



DOI 10.28925/2663-4023.2026.34.1345

УДК 621.396.96:355.404.3

Биби́к Роман Тарасович

асистент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україн

ORCID: 0000-0002-9506-014X

roman.t.bybyk@lpnu.ua

Ракобoвчу́к Лариса Маратівна

к.т.н., доцент, доцент кафедри захисту інформації

Національний Університет «Львівська Політехніка», Львів, Україн

ORCID: 0000-0001-9437-6137

larysa.m.rakobovchuk@lpnu.ua

**ПОРІВНЯЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ**

Анотація. У статті наведено результати теоретичного дослідження та порівняльного аналізу існуючих методів просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам радіоелектронної боротьби (РЕБ). Актуальність роботи зумовлена необхідністю систематизації накопиченого науково-технічного доробку в галузі просторової та частотної обробки сигналів в умовах зростання кількості, щільності та складності джерел радіоелектронних завад, що характерно для сучасних сценаріїв бойового застосування засобів РЕБ. Розглянуто основні групи методів: некеровану (фіксовану) просторову обробку (conventional/Bartlett beamforming), статистично оптимальні адаптивні методи (MVDR/Capon, LCMV), градієнтні та рекурсивні адаптивні алгоритми (LMS, RLS), а також методи, орієнтовані на оцінювання напрямку приходу сигналу (DOA-орієнтовані підходи MUSIC та ESPRIT). Для кожного методу досліджено принцип функціонування, теоретичні основи, вимоги до вхідних даних, обчислювальні особливості, чутливість до похибок вихідних даних і рівня шуму. Здійснено класифікацію методів за кількома незалежними ознаками (керованість, критерій оптимальності, обчислювальна схема) та побудовано узагальнені структурні схеми просторово-частотного орієнтування, що ілюструють спільний принцип формування вагових коефіцієнтів приймальної решітки. На основі аналізу наукових публікацій виконано порівняння методів за критеріями точності, роздільної здатності, стійкості до похибок, обчислювальної складності, вимог до обсягу вибірових даних, адаптивності та придатності до застосування у просторово-частотних системах протидії; результати узагальнено у шести аналітичних таблицях. Встановлено закономірність, згідно з якою підвищення точності й роздільної здатності методів супроводжується зростанням обчислювальної складності та чутливості до похибок вихідних даних. Визначено обмеження існуючих методів та окреслено перспективні напрями подальших досліджень, зокрема щодо робастних модифікацій та гібридних просторово-частотних схем. Робота має виключно теоретичний характер: комп'ютерне або імітаційне моделювання, а також формування нових методів чи алгоритмів у межах статті не проводилися.

Ключові слова: радіоелектронна боротьба, просторово-частотне орієнтування, адаптивна антенна решітка; діаграма спрямованості, MVDR, LCMV, LMS, RLS, просторова фільтрація.

ВСТУП

Сучасний розвиток засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) супроводжується постійним збільшенням кількості та складності джерел радіоелектронних завад. Особливо це помітно за досвідом сучасних бойових дій в Україні, де ефективність систем радіоелектронного захисту та придушення значною мірою залежить від того, наскільки точно засоби протидії можуть визначити положення джерела сигналу в просторі та виділити його за частотою на фоні інших сигналів і шумів. У зв'язку з цим значний інтерес становлять методи просторово-частотного орієнтування. Вони дають змогу одночасно враховувати просторове положення джерела та характеристики його сигналу в частотній області. Основна ідея таких підходів полягає у формуванні потрібної діаграми спрямованості приймальної системи та забезпеченні необхідної частотної селективності. Це дозволяє підвищити рівень корисного сигналу відносно завад і



шумів та зменшити вплив інших джерел, які можуть знаходитися в сусідніх напрямках або працювати на близьких частотах.

Постановка проблеми. Практична задача просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам РЕБ полягає у виборі такої обробки сигналів, отриманих від антенної системи, яка дає змогу якомога краще виділити корисний сигнал на фоні завад і власних шумів приймального тракту. При цьому складність задачі визначається низкою факторів. Серед них відсутність повної інформації про кількість джерел завад, їхнє просторове положення, потужність і спектральні характеристики. Додатковою проблемою є чутливість статистично оптимальних методів до похибок у заданих параметрах і недостатнього обсягу вибірових даних. Окрему увагу необхідно приділяти обчислювальній складності адаптивних методів. Алгоритми з високою швидкістю збіжності можуть потребувати значних обчислювальних ресурсів, що створює певні обмеження для їх використання в апаратурі з обмеженою продуктивністю. Методи, орієнтовані на визначення напрямку приходу сигналу (DOA), також мають свої особливості: їхні можливості залежать від кількості джерел, які потрібно одночасно розрізняти, а також від взаємної кореляції сигналів. Таким чином, наукова проблема полягає не стільки у відсутності окремих методів просторово-частотного орієнтування, скільки у необхідності їх комплексного та систематизованого порівняння. Такий аналіз дає змогу визначити переваги й обмеження кожного класу методів та встановити, за яких умов їх застосування є найбільш доцільним. Особливе значення при цьому мають доступність апіорної інформації, обчислювальні можливості апаратури та вимоги до швидкості реагування на зміни завадової обстановки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи просторової обробки сигналів антенними решітками закладені у класичних роботах з адаптивних антенних систем. Основоположною вважається робота Відроу зі співавторами, у якій вперше запропоновано застосування алгоритму найменших середніх квадратів (LMS) для адаптивного керування ваговими коефіцієнтами приймальної решітки з метою придушення завад невідомого напрямку. Подальший розвиток статистично оптимальних методів пов'язаний з роботою Кейпона, у якій запропоновано метод мінімальної дисперсії незміщеної відповіді (Сарон/MVDR) для високороздільного спектрального оцінювання хвильових полів, та роботою Фроста, що поширив ідею статистичної оптимальності на випадок множинних лінійних обмежень (LCMV). Узагальнюючий огляд принципів формування діаграми спрямованості наведено у класичній оглядовій статті Ван Віна та Баклі [1].

Питання оцінювання кутових координат джерел випромінювання розглянуто у працях Шмідта, який запропонував метод множинної класифікації сигналів (MUSIC), та у роботі Роя і Кайлата, де представлено обчислювально ефективний метод оцінювання параметрів сигналу на основі ротаційної інваріантності (ESPRIT). Узагальнений огляд двох десятиліть розвитку параметричних методів просторової обробки сигналів наведено у роботі Кріма і Віберга, а сучасний, значно розширений огляд методів формування діаграми спрямованості у роботі Ельбіра зі співавторами [14].

Проблема чутливості адаптивних методів до похибок керуючого вектора та обмеженого обсягу вибірових даних детально досліджена у циклі робіт з робастної адаптивної просторової обробки: Кокс зі співавторами розглянули втрату ефективності класичних адаптивних решіток за наявності похибок калібрування, Ворог'єв, Гершман і Ло запропонували метод оптимізації за найгіршим випадком для компенсації неузгодженості сигналу, а Лі, Стоїца і Ван розвинули підхід діагонального навантаження коваріаційної матриці для підвищення робастності методу Кейпона [10].

В україномовній науковій літературі питання просторової селекції сигналів джерел радіовипромінювання з використанням антенних решіток та алгоритмів пеленгації розглядалися, зокрема, у роботах Наритника, Авдеєнка та Якорнова, де виконано моделювання методів пеленгації джерел радіовипромінювання антенними решітками, та Куликівської, Авдеєнка і Якорнова, присвячений розробці методу просторової селекції сигналів на базі алгоритмів пеленгації. Питання класифікації сучасних методів РЕБ та методів протидії їй розглядалися автором у попередній публікації, проте предметом цієї статті є систематизація саме методів просторово-частотного орієнтування засобів протидії, які в зазначеній роботі детально не розглядалися. Незважаючи на значний обсяг досліджень з окремих класів методів, у проаналізованих джерелах відсутнє комплексне порівняння методів conventional beamforming, MVDR/Сарон, LCMV, LMS, RLS та DOA-орієнтованих підходів за єдиною системою критеріїв саме в контексті задач протидії джерелам РЕБ, що визначає актуальність цієї статті [29].

Мета статті. Метою статті є теоретичне дослідження та порівняльний аналіз існуючих методів просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам радіоелектронної боротьби, визначення принципів їх функціонування, класифікаційних ознак, переваг, недоліків, обмежень та умов застосування на основі узагальнення наукових публікацій.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі наведено концепції, підходи та принципи, на яких безпосередньо базується дослідження, а також визначено основні терміни й поняття, що використовуються у подальшому викладі. Спільним для всіх розглянутих методів є те, що вихідний сигнал антенної решітки формується як зважена сума сигналів її окремих елементів: кожен елемент решітки приймає власну реалізацію суміші корисного сигналу, завад і шуму, а результат об'єднання цих реалізацій з певними ваговими коефіцієнтами визначає підсумкову діаграму спрямованості приймальної системи. Відмінність між методами полягає виключно у способі обчислення цих вагових коефіцієнтів.

Класифікація існуючих методів

Аналіз наукових джерел дозволяє виділити кілька незалежних класифікаційних ознак, за якими можуть бути систематизовані існуючі методи просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам РЕБ. За характером обробки просторової складової сигналу методи поділяються на некеровану (фіксовану) просторову обробку, яка не залежить від поточної заводої обстановки (класичний, або конвенційний, метод формування діаграми спрямованості), та адаптивну (статистично оптимальну) обробку, вагові коефіцієнти якої обчислюються з урахуванням оціненої коваріаційної матриці прийнятих коливань (методи MVDR/Caron та LCMV). Окрему підгрупу становлять методи, орієнтовані на попереднє оцінювання кутових координат (напрямку приходу, DOA) джерел випромінювання.

За характером обробки частотної складової виділяють методи фіксованої частотної селекції та методи адаптивної частотної фільтрації. За критерієм адаптивності обчислювальної схеми розрізняють градієнтні алгоритми адаптації (LMS та його модифікації) і рекурсивні алгоритми (RLS та похідні). Окремий підклас складають робастні модифікації статистично оптимальних методів, зорієнтовані на підвищення стійкості до похибок керуючого вектора та обмеженої вибірки даних. Узагальнена класифікаційна схема досліджуваних методів наведена на рисунку 1.



Рис. 1. Класифікація існуючих методів просторово-частотного орієнтування

Наведена класифікація не є взаємовиключною: більшість практичних систем просторово-частотного орієнтування поєднують кілька класифікаційних ознак одночасно. Наприклад, типова схема системи протидії джерелам РЕБ може використовувати DOA-орієнтований метод для попереднього оцінювання кутових координат завад з подальшою реконструкцією коваріаційної матриці та обчисленням оптимального вагового вектора за критерієм LCMV [29].

Узагальнена структурна схема просторово-частотного орієнтування

Незалежно від конкретного методу, узагальнена структурна схема просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам РЕБ включає такі функціональні блоки: антенну решітку з M елементами, блок попередньої обробки (підсилення, перетворення частоти, аналого-цифрове перетворення), блок просторової обробки, блок частотної обробки, блок просторово-частотного об'єднання результатів та, за наявності адаптивного контуру, блок адаптації, що змінює параметри просторової та частотної обробки відповідно до обраного критерію оптимальності. Узагальнена структурна схема наведена на рисунку 2.



Рис. 2. Узагальнена структурна схема просторово-частотного орієнтування

Принципи функціонування методів

Конвенційний метод формування діаграми спрямованості є найпростішим і історично першим методом просторової обробки сигналів антенною решіткою [1]. Його принцип полягає у формуванні вагового вектора, що компенсує лише фазові зсуви сигналу, зумовлені геометрією решітки та напрямком приходу корисного сигналу, без урахування статистичних характеристик завадової обстановки. Метод не потребує оцінювання коваріаційної матриці вхідних сигналів, що зумовлює його високу обчислювальну простоту, але одночасно й принципове обмеження, нездатність автоматично формувати провали діаграми спрямованості в напрямках завад.

Метод MVDR/Сароп, запропонований у роботі, мінімізує вихідну потужність решітки за обов'язкової умови одиничного підсилення в напрямку корисного сигналу. На відміну від конвенційного методу, MVDR використовує оцінку коваріаційної матриці прийнятих сигналів, що дозволяє адаптивно формувати глибокі провали діаграми спрямованості в напрямках дискретних завад. Метод LCMV є узагальненням MVDR на випадок множинних лінійних обмежень, що дозволяє одночасно контролювати відповідь решітки в кількох напрямках або частотах, однак зменшує кількість «вільних» ступенів свободи, доступних для придушення невідомих завад.

Алгоритм LMS реалізує ітеративне наближене розв'язання задачі мінімізації середньоквадратичної похибки методом стохастичного градієнтного спуску, уникаючи явного обчислення й обернення коваріаційної матриці, що зумовлює його низьку обчислювальну складність. Алгоритм RLS розв'язує ту саму задачу рекурсивно й точно, забезпечуючи значно вищу швидкість збіжності ціною суттєвого зростання обчислювальної складності. DOA-орієнтовані методи MUSIC та ESPRIT вирішують задачу оцінювання кутових координат джерел як самостійну задачу параметричного оцінювання: MUSIC використовує ортогональність сигнального і шумового підпросторів кореляційної матриці, а ESPRIT властивість ротаційної інваріантності підмасивів решітки, що суттєво знижує обчислювальні витрати порівняно з MUSIC. Узагальнена структурна схема адаптивного методу наведена на рисунку 3.

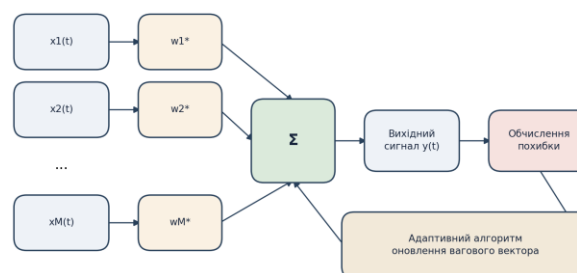


Рис. 3. Структурне представлення адаптивного методу (на прикладі узагальненої адаптивної решітки)

Узагальнюючи викладені принципи, можна констатувати чітку закономірність: перехід від найпростіших некерованих методів до статистично оптимальних, а далі — до рекурсивних та DOA-орієнтованих підходів супроводжується послідовним зростанням обсягу необхідної апріорної та статистичної інформації, обчислювальної складності і чутливості до похибок вихідних даних, натомість забезпечуючи вищу точність і роздільну здатність. Ця закономірність детально розглядається в розділі результатів дослідження.



МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження виконано за методикою теоретичного узагальнення й порівняльного аналізу наукових публікацій без проведення власного комп'ютерного або імітаційного моделювання, експериментів чи розробки нових методів і алгоритмів. Методика дослідження включає такі послідовні етапи:

- аналіз наукових джерел, присвячених методам просторової, частотної та просторово-частотної обробки сигналів;
- систематизація та класифікація виявлених методів за сукупністю ознак (керованість, критерій оптимальності, обчислювальна схема);
- дослідження принципів функціонування та теоретичних основ кожного з відібраних методів (conventional beamforming, MVDR/Capon, LCMV, LMS, RLS, MUSIC, ESPRIT) з посиланням на першоджерела;
- порівняльний аналіз методів за єдиною системою якісних критеріїв (точність, стійкість, обчислювальна складність, вимоги до вхідних даних, адаптивність, чутливість до шуму), результати якого узагальнено у формі аналітичних таблиць;
- формування висновків та визначення перспективних напрямів подальших досліджень.

Відбір методів для аналізу здійснено за критерієм їх апробованості та цитованості у провідних наукових виданнях (IEEE Xplore, ScienceDirect, Springer, Wiley), а також відповідності предмету дослідження - методам, що безпосередньо застосовуються або можуть застосовуватися для просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам РЕБ. Якісні оцінки порівняльних характеристик методів («низька», «середня», «висока») сформовано на основі узагальнення відомостей, наведених у цитованих першоджерелах, без введення власних числових значень, що відповідає теоретичному характеру дослідження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порівняльний аналіз досліджених методів

Результати класифікації та порівняння узагальнено у таблицях 1–6.

Таблиця 1

Класифікація існуючих методів

Метод	Клас за керованістю	Клас за критерієм оптимальності	Належність до обробки
Conventional (Bartlett)	Некерований (фіксований)	Без критерію оптимальності	Просторова
MVDR/Capon	Адаптивний	Статистично оптимальний (мінімум дисперсії)	Просторова
LCMV (Frost)	Адаптивний	Статистично оптимальний з обмеженнями	Просторова / просторово-частотна
LMS	Адаптивний (градієнтний)	Мінімум середньоквадратичної похибки	Просторова
RLS	Адаптивний (рекурсивний)	Мінімум зваженої суми похибок	Просторова
MUSIC	DOA-орієнтований	Розділення підпросторів	Оцінювання кутів
ESPRIT	DOA-орієнтований	Ротаційна інваріантність	Оцінювання кутів

Таблиця 2

Порівняння принципів функціонування методів

Метод	Принцип формування вагового вектора	Потреба в оцінці R	Вихідний результат
Conventional	Фазування за керуючим вектором	Не потрібна	Фіксована діаграма
MVDR/Capon	Мінімізація потужності за обмеження одиничного відгуку	Потрібна	Адаптивна діаграма з провалами



Метод	Принцип формування вагового вектора	Потреба в оцінці R	Вихідний результат
LCMV	Мінімізація потужності за множини обмежень	Потрібна	Діаграма з кількома відгуками
LMS	Ітеративний градієнтний спуск	Не потрібна	Уточнюваний ваговий вектор
RLS	Рекурсивне точне рішення МНК	Неявна рекурсивна оцінка	Швидко збіжний вектор
MUSIC	Псевдоспектр за ортогональністю підпросторів	Потрібна	Кутові оцінки джерел
ESPRIT	Задача власних значень зсуву	Потрібна	Кутові оцінки без сканування

Таблиця 3

Основні параметри та вимоги до вхідних даних

Метод	Обсяг вибірки	Апріорна інформація	Ключовий параметр
Conventional	Не вимагається	Геометрія решітки, напрямки	—
MVDR/Caron	$N \geq M$	Геометрія решітки, напрямки	Регуляризація R
LCMV	$N \geq M$	Матриця обмежень, відгуки	Кількість обмежень
LMS	Не вимагається	Опорний сигнал	Крок адаптації μ
RLS	Мінімальна	Опорний сигнал	Коефіцієнт забування λ
MUSIC	$N \gg M$	Кількість джерел	Розмірність підпростору
ESPRIT	$N \gg M$	Кількість джерел, підмасиви	Геометрія зсуву

Таблиця 4

Переваги та недоліки існуючих методів

Метод	Переваги	Недоліки
Conventional	Найпростіша реалізація; стійкість	Низька роздільна здатність
MVDR/Caron	Висока роздільна здатність	Чутливість до похибок вектора
LCMV	Гнучкість множинних обмежень	Зменшення ступенів свободи
LMS	Низька складність $O(M)$	Повільна збіжність
RLS	Швидка збіжність	Висока складність $O(M^2)$
MUSIC	Надрелєвська роздільна здатність	Потребує знання кількості джерел
ESPRIT	Нижча складність, ніж MUSIC	Спеціальна геометрія решітки

Таблиця 5

Обмеження існуючих методів

Метод	Основні обмеження застосування	Джерело
Conventional	Непридатний за близьких потужних завад	[1]
MVDR/Caron	Втрата ефективності за малої вибірки	[2, 9–12]
LCMV	Обмежена кількість реалізованих обмежень	[4, 5]
LMS	Компроміс швидкості й стійкості	[3, 17]



Метод	Основні обмеження застосування	Джерело
RLS	Обчислювальна вартість для реального часу	[17, 18]
MUSIC	Потребує некорельованості джерел	[6, 7]
ESPRIT	Чутливість до похибок підмасивів	[6, 8]

Таблиця 6

Порівняння методів за якісними критеріями

Метод	Точність	Стійкість	Складність	Дані	Адаптивність	Шум
Conventional	Низька	Висока	Низька	Не потр.	Відсутня	Низька
MVDR/Сарон	Висока	Середня	Середня	Середні	Висока	Середня
LCMV	Середня/висока	Середня	Середня	Середні	Висока	Середня
LMS	Середня	Висока	Низька	Низькі	Середня	Середня
RLS	Середня/висока	Середня	Висока	Низькі	Висока	Середня
MUSIC	Дуже висока	Низька	Висока	Високі	Не адапт.	Висока
ESPRIT	Висока	Середня	Середня	Високі	Не адапт.	Висока

Наведені у таблиці 6 якісні оцінки узагальнюють характеристики методів, що описані у відповідних першоджерелах без введення числових значень, оскільки предметом статті є теоретичне узагальнення, а не власне експериментальне вимірювання показників.

Узагальнена блок-схема функціонування методів

Узагальнена блок-схема функціонування досліджуваних методів, що ілюструє послідовність прийняття рішення щодо застосування конкретного класу методу залежно від наявності контуру адаптації, наведена на рисунку 4.

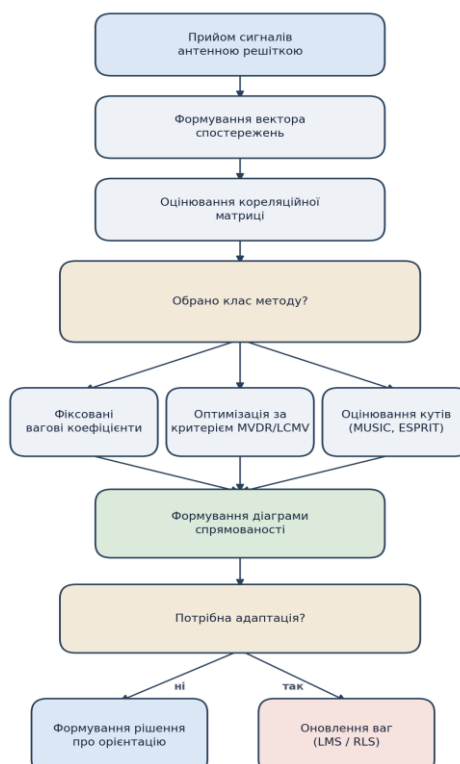


Рис. 4. Узагальнена блок-схема функціонування досліджуваних методів

Взаємозв'язок просторової та частотної складових

Важливим аспектом порівняльного аналізу є взаємозв'язок просторової та частотної складових просторово-частотного орієнтування. Ефективність спільної просторово-частотної обробки визначається узгодженістю керуючого вектора з частотною характеристикою тракту обробки: похибка в оцінюванні кутового положення джерела призводить до розсіювання ефективної смуги частотної селекції, а похибка частотного налаштування до зниження ефективного підсилення просторової діаграми спрямованості [5].

Обговорення результатів

Проведений аналіз показує, що жоден з розглянутих методів не є універсально оптимальним для всіх умов застосування у задачах протидії джерелам РЕБ. Некерований метод залишається доцільним у випадках, коли завадова обстановка апріорно невідома, а обчислювальні ресурси украї обмежені, проте його низька роздільна здатність унеможливує ефективне придушення близько розташованих завад. Статистично оптимальні методи (MVDR, LCMV) забезпечують суттєво кращі показники придушення завад за умови коректного знання керуючого вектора та достатнього обсягу вибірових даних, однак у реальних умовах бойового застосування без застосування робастних модифікацій їх ефективність може суттєво знижуватися [9-12].

Порівняння градієнтного (LMS) та рекурсивного (RLS) адаптивних алгоритмів демонструє класичний компроміс між обчислювальною складністю та швидкістю збіжності. DOA-орієнтовані методи (MUSIC, ESPRIT) відіграють особливу роль у системах просторово-частотного орієнтування, оскільки дозволяють не лише формувати діаграму спрямованості, а й безпосередньо визначати кутові координати джерел випромінювання [29].

Узагальнюючи результати порівняльного аналізу переваг і обмежень, можна констатувати наявність стійкої закономірності: підвищення точності та роздільної здатності методів (MVDR, LCMV, MUSIC, ESPRIT, RLS) супроводжується зростанням обчислювальної складності, обсягу необхідних вибірових даних та чутливості до похибок моделі сигналу, тоді як найпростіші методи (conventional, LMS) поступаються у роздільній здатності й точності, але зберігають високу обчислювальну й параметричну стійкість. Ця закономірність узагальнена на рисунку 5.



Рис. 5. Класифікаційна схема переваг та обмежень існуючих методів

Отже, обґрунтований вибір методу просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам РЕБ має здійснюватися з урахуванням конкретних умов застосування динаміки завадової обстановки, доступних обчислювальних ресурсів, вимог до точності пеленгування, апріорної інформації про геометрію решітки та кількість джерел, а не на основі формальної переваги одного методу над іншим за окремо взятим критерієм.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У статті проведено теоретичне дослідження та порівняльний аналіз існуючих методів просторово-частотного орієнтування засобів протидії джерелам радіоелектронної боротьби. За результатами дослідження можна зробити такі висновки.



1) Здійснено систематизацію та класифікацію існуючих методів просторово-частотного орієнтування за кількома незалежними ознаками: керованістю, критерієм оптимальності, обчислювальною схемою та належністю до просторової, частотної чи просторово-частотної обробки.

2) Досліджено принципи функціонування семи основних методів - conventional beamforming, MVDR/Capon, LCMV, LMS, MUSIC та ESPRIT з наведенням теоретичних основ кожного методу з посиленням на першоджерела.

3) Встановлено, що підвищення точності та роздільної здатності методів просторово-частотного орієнтування закономірно супроводжується зростанням обчислювальної складності, вимог до обсягу вибірових даних та чутливості до похибок моделі сигналу, тоді як найпростіші методи характеризуються високою обчислювальною і параметричною стійкістю за рахунок нижчої роздільної здатності.

4) На основі аналізу наукових публікацій виконано порівняння методів за критеріями точності, стійкості, обчислювальної складності, вимог до вхідних даних, адаптивності та чутливості до шуму, результати якого узагальнено у вигляді шести аналітичних таблиць.

5) Визначено обмеження кожного з досліджених методів, зокрема чутливість статистично оптимальних методів до похибок керуючого вектора та обмеженого обсягу вибірки, обчислювальну вартість рекурсивних методів, а також вимоги DOA-орієнтованих підходів до некорельованості джерел і спеціальної геометрії решітки.

6) Показано, що жоден з розглянутих методів не є універсально оптимальним для всіх умов застосування у задачах протидії джерелам РЕБ, а обґрунтований вибір методу потребує врахування конкретних умов бойового застосування, доступних обчислювальних ресурсів та динаміки завадової обстановки.

Отримані результати мають теоретичний характер і можуть бути використані як методологічна основа для подальших досліджень у галузі просторово-частотної обробки сигналів у системах протидії засобам радіоелектронної боротьби.

Перспективними напрямками подальших досліджень визначено такі:

- поглиблене теоретичне дослідження робастних модифікацій статистично оптимальних методів стосовно специфічних умов завадової обстановки, характерної для сучасних систем РЕБ;
- дослідження гібридних схем, що поєднують DOA-орієнтовані методи оцінювання кутових координат з подальшим адаптивним формуванням просторово-частотних вагових коефіцієнтів;
- теоретичний аналіз можливостей зменшення обчислювальної складності рекурсивних методів для їх застосування в бортовій апаратурі засобів протидії РЕБ з обмеженими обчислювальними ресурсами;
- дослідження методів підвищення стійкості DOA-орієнтованих підходів до кореляції сигналів джерел та похибок калібрування антенної решітки;
- розроблення методологічних підходів до обґрунтованого вибору методу просторово-частотного орієнтування залежно від тактико-технічних вимог до конкретного зразка засобу протидії джерелам РЕБ;
- дослідження можливостей інтеграції існуючих методів просторово-частотного орієнтування з нейромережевими моделями автоматизованого аналізу спектральних характеристик сигналів у межах подальших авторських досліджень цього напрямку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. IEEE ASSP Magazine, 5(2), 4–24. <https://doi.org/10.1109/53.665>
2. Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proceedings of the IEEE, 57(8), 1408–1418. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
3. Widrow, B., Mantey, P. E., Griffiths, L. J., & Goode, B. B. (1967). Adaptive antenna systems. Proceedings of the IEEE, 55(12), 2143–2159. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6092>
4. Frost, O. L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. Proceedings of the IEEE, 60(8), 926–935. <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8817>
5. Buckley, K. (1987). Spatial/spectral filtering with linearly constrained minimum variance beamformers. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 35(3), 249–266. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1165142>
6. Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: The parametric approach. IEEE Signal Processing Magazine, 13(4), 67–94. <https://doi.org/10.1109/79.526899>
7. Schmidt, R. O. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(3), 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>



8. Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT — estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7), 984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
9. Vorobyov, S. A., Gershman, A. B., & Luo, Z.-Q. (2003). Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(2), 313–324. <https://doi.org/10.1109/TSP.2002.806865>
10. Li, J., Stoica, P., & Wang, Z. (2003). On robust Capon beamforming and diagonal loading. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(7), 1702–1715. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.812831>
11. Lorenz, R. G., & Boyd, S. P. (2005). Robust minimum variance beamforming. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(5), 1684–1696. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.845436>
12. Cox, H., Zeskind, R., & Owen, M. (1987). Robust adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(10), 1365–1376. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165054>
13. Reed, I. S., Mallett, J. D., & Brennan, L. E. (1974). Rapid convergence rate in adaptive arrays. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 10(6), 853–863. <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893>
14. Elbir, A. M., Mishra, K. V., Vorobyov, S. A., & Heath, R. W. (2023). Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 40(4), 118–131. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10144712>
15. Applebaum, S. (1976). Adaptive arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 24(5), 585–598. <https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141417>
16. Griffiths, L. J. (1969). A simple adaptive algorithm for real-time processing in antenna arrays. *Proceedings of the IEEE*, 57(10), 1696–1704. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1449315>
17. Van Trees, H. L. (2002). Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-22110-4
18. Haykin, S. (2002). Adaptive filter theory (4th ed.). Prentice-Hall. ISBN 978-0-13-048434-5
19. Monzingo, R. A., & Miller, T. W. (1980). Introduction to adaptive arrays. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-04703-6
20. Godara, L. C. (1997). Application of antenna arrays to mobile communications, II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, 85(8), 1195–1245.
21. Ziskind, I., & Wax, M. (1988). Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 36(10), 1553–1560. <https://doi.org/10.1109/29.7543>
22. Stoica, P., & Nehorai, A. (1989). MUSIC, maximum likelihood, and Cramér-Rao bound. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(5), 720–741. <https://doi.org/10.1109/29.17564>
23. Shahbazpanahi, S., Gershman, A. B., Luo, Z.-Q., & Wong, K. M. (2003). Robust adaptive beamforming for general-rank signal models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(9), 2257–2269. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.815395>
24. Howells, P. (1965). Intermediate frequency side-lobe canceller (U.S. Patent No. 3,202,990). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US3202990A>
25. Gershman, A. B. (1999). Robust adaptive beamforming in sensor arrays. *International Journal of Electronics and Communications*, 53(6), 305–314.
26. Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hearn, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E., & Goodlin, R. C. (1975). Adaptive noise cancelling: Principles and applications. *Proceedings of the IEEE*, 63(12), 1692–1716.
27. Mestre, X., & Lagunas, M. A. (2008). Modified subspace algorithms for DoA estimation with large arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(2), 598–614.
28. Наритник, Т. М., Авдеєнко, Г. Л., & Якорнов, Є. А. (2022). Моделювання методів пеленгації джерел радіовипромінювання з використанням антенних решіток. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, 1(3), 115–152. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-08>
29. Куликівська, Н. І., Авдеєнко, Г. Л., & Якорнов, Є. А. (2022). Розробка методу просторової селекції сигналів на базі алгоритмів пеленгації джерел радіовипромінювання. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, 1(3), 184–206. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-11>
30. Опірський, І. Р., & Бибик, Р. Т. (2023). Дослідження сучасних методів РЕБ та методів і засобів її протидії. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(2), 88–97. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>

**Roman Bybyk**

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

Larysa Rakobovchuk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Information Security
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9437-6137
larysa.m.rakobovchuk@lpnu.ua

COMPARATIVE EVALUATION OF ADAPTIVE METHODS OF SPATIAL-FREQUENCY SIGNAL PROCESSING IN RADIO ELECTRONIC COUNTERMEASUREMENT CONDITIONS

Abstract. The article presents the results of a theoretical study and comparative analysis of existing methods of spatial-frequency orientation of countermeasures against electronic warfare (EW) sources. The relevance of the work is driven by the need to systematize accumulated scientific and technical knowledge in the field of spatial and frequency signal processing under conditions of an increasing number, density, and complexity of electronic jamming sources, which is characteristic of modern combat employment scenarios of EW countermeasure systems. The main groups of methods are considered: non-adaptive (fixed) spatial processing (conventional/Bartlett beamforming), statistically optimal adaptive methods (MVDR/Capon, LCMV), gradient and recursive adaptive algorithms (LMS, RLS), as well as direction-of-arrival (DOA) oriented approaches (MUSIC and ESPRIT). For each method, the operating principle, theoretical foundations, input data requirements, computational features, and sensitivity to input errors and noise level are examined. A classification of methods according to several independent criteria (controllability, optimality criterion, computational scheme) is performed, and generalized structural schemes of spatial-frequency orientation are constructed, illustrating the common principle of forming the weighting coefficients of a receiving array. Based on the analysis of scientific publications, the methods are compared in terms of accuracy, resolution, robustness to errors, computational complexity, sample data requirements, adaptivity, and applicability in spatial-frequency countermeasure systems; the results are summarized in six analytical tables. A general pattern is established according to which an increase in the accuracy and resolution of methods is accompanied by an increase in computational complexity and sensitivity to input data errors. Limitations of existing methods are identified, and promising directions for further research are outlined, in particular regarding robust modifications and hybrid spatial-frequency schemes. The work is purely theoretical: no computer or simulation modelling, nor the development of new methods or algorithms, was performed within this article.

Keywords: electronic warfare, spatial-frequency orientation, adaptive antenna array, radiation pattern, MVDR, LCMV, LMS, RLS, spatial filtering.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2), 4–24. <https://doi.org/10.1109/53.665>
2. Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1408–1418. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278>
3. Widrow, B., Mantey, P. E., Griffiths, L. J., & Goode, B. B. (1967). Adaptive antenna systems. *Proceedings of the IEEE*, 55(12), 2143–2159. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6092>
4. Frost, O. L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. *Proceedings of the IEEE*, 60(8), 926–935. <https://doi.org/10.1109/PROC.1972.8817>



5. Buckley, K. (1987). Spatial/spectral filtering with linearly constrained minimum variance beamformers. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(3), 249–266. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1165142>
6. Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: The parametric approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(4), 67–94. <https://doi.org/10.1109/79.526899>
7. Schmidt, R. O. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3), 276–280. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830>
8. Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT — estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7), 984–995. <https://doi.org/10.1109/29.32276>
9. Vorobyov, S. A., Gershman, A. B., & Luo, Z.-Q. (2003). Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(2), 313–324. <https://doi.org/10.1109/TSP.2002.806865>
10. Li, J., Stoica, P., & Wang, Z. (2003). On robust Capon beamforming and diagonal loading. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(7), 1702–1715. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.812831>
11. Lorenz, R. G., & Boyd, S. P. (2005). Robust minimum variance beamforming. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(5), 1684–1696. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.845436>
12. Cox, H., Zeskind, R., & Owen, M. (1987). Robust adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(10), 1365–1376. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165054>
13. Reed, I. S., Mallett, J. D., & Brennan, L. E. (1974). Rapid convergence rate in adaptive arrays. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 10(6), 853–863. <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307893>
14. Elbir, A. M., Mishra, K. V., Vorobyov, S. A., & Heath, R. W. (2023). Twenty-five years of advances in beamforming: From convex and nonconvex optimization to learning techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 40(4), 118–131. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10144712>
15. Applebaum, S. (1976). Adaptive arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 24(5), 585–598. <https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141417>
16. Griffiths, L. J. (1969). A simple adaptive algorithm for real-time processing in antenna arrays. *Proceedings of the IEEE*, 57(10), 1696–1704. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1449315>
17. Van Trees, H. L. (2002). Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-22110-4
18. Haykin, S. (2002). Adaptive filter theory (4th ed.). Prentice-Hall. ISBN 978-0-13-048434-5
19. Monzingo, R. A., & Miller, T. W. (1980). Introduction to adaptive arrays. John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-04703-6
20. Godara, L. C. (1997). Application of antenna arrays to mobile communications, II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, 85(8), 1195–1245.
21. Ziskind, I., & Wax, M. (1988). Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 36(10), 1553–1560. <https://doi.org/10.1109/29.7543>
22. Stoica, P., & Nehorai, A. (1989). MUSIC, maximum likelihood, and Cramér-Rao bound. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(5), 720–741. <https://doi.org/10.1109/29.17564>
23. Shahbazpanahi, S., Gershman, A. B., Luo, Z.-Q., & Wong, K. M. (2003). Robust adaptive beamforming for general-rank signal models. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(9), 2257–2269. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.815395>
24. Howells, P. (1965). Intermediate frequency side-lobe canceller (U.S. Patent No. 3,202,990). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US3202990A>
25. Gershman, A. B. (1999). Robust adaptive beamforming in sensor arrays. *International Journal of Electronics and Communications*, 53(6), 305–314.
26. Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hearn, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E., & Goodlin, R. C. (1975). Adaptive noise cancelling: Principles and applications. *Proceedings of the IEEE*, 63(12), 1692–1716.
27. Mestre, X., & Lagunas, M. A. (2008). Modified subspace algorithms for DoA estimation with large arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(2), 598–614.
28. Narytnyk, T. M., Avdieienko, H. L., & Yakornov, Ye. A. (2022). Modeliuvannia metodiv pelenhatsii dzherel radiovyprominiuvannia z vykorystanniam antenykh reshitek [Simulation of direction-finding methods for radio emission sources using antenna arrays]. *Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii*, 1(3), 115–152. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-08>



29. Kulykivska, N. I., Avdieienko, H. L., & Yakornov, Ye. A. (2022). Rozrobka metodu prostоровoi selektsii syhnaliv na bazi alhorytmiv pelenhatsii dzherel radiovyprominiuvannia [Development of a signal spatial selection method based on radio emission source direction-finding algorithms]. Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnologii, 1(3), 184–206. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-11>
30. Opirskyi, I. R., & Bybyk, R. T. (2023). Doslidzhennia suchasnykh metodiv REB ta metodiv i zasobiv yii protydii [Study of modern electronic warfare methods and countermeasure methods and means]. Ukrainian Scientific Journal of Information Security, 29(2), 88–97. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17873>

Отримано редакцією журналу / Received: 05.02.26

Прорецензовано / Revised: 16.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 24.09.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.