УДК 621.39:623.1/.7

Д. Р. Мужило, В. В. Джус

ПЕЛЕНГАЦІЯ ПОСТАНОВНИКІВ АКТИВНИХ ПЕРЕШКОД

Анотація. *Розглянуто можливості надрозділяючих методів просторового спектрального аналізу для визначення кутового положення та кількості постановників активних шумових перешкод. Наведено підхід до математичного моделювання вихідних сигналів фазованої антенної решітки й оцінювання роздільної здатності за ймовірністю правильного розділення джерел. Узагальнено результати порівняння базових, комбінованих і власноструктурних методів за різних рівнів інтенсивності перешкод та обмеженого обсягу навчальної вибірки.*

Ключові слова*: просторовий спектральний аналіз, роздільна здатність.*

Abstract*. The paper considers the capabilities of super-resolution spatial spectral analysis methods for estimating the angular positions and number of active noise jammers. A mathematical model of phased-array receiver outputs and an approach to evaluating resolution using the probability of correct source separation are outlined. The results of comparing basic, combined and subspace-based methods under different interference intensity levels and limited training-sample sizes are summarized.*

Keywords*: spatial spectral analysis, resolution, phased antenna array*

Застосування крилатих ракет групами у поєднанні з бортовими постановниками активних шумових перешкод ускладнює оцінювання радіолокаційної обстановки. Якщо декілька джерел перешкод розташовані в межах діаграми спрямованості антени, традиційні методи можуть не забезпечувати їх надійного розділення. Це зумовлює потребу в методах обробки, здатних формувати оцінки кутового спектра з роздільною здатністю, вищою за класичну межу Релея.

Метою роботи є порівняння роздільної здатності надрозділяючих методів просторового спектрального аналізу та визначення умов, за яких їх доцільно застосовувати для пеленгації кількох джерел шумового випромінювання.

У дослідженні розглянуто три групи методів просторового спектрального аналізу: базові надрозділяючі методи, комбіновані методи та власноструктурні методи. До першої групи належать метод мінімальної дисперсії, метод лінійного передбачення і метод теплового шуму. Комбіновані методи представлені модифікованим алгоритмом Кейпону і методом Борджотті–Лагунаса. До власноструктурних належать MUSIC і метод мінімальної норми, які використовують власні вектори шумового підпростору кореляційної матриці вихідних сигналів фазованої антенної решітки (ФАР) [1-4].

Математична модель приймання ґрунтується на формуванні пакета комплексних відліків вихідних сигналів каналів ФАР. За навчальною вибіркою обчислюється оцінка кореляційної матриці, на основі якої формуються спектральні функції відповідних алгоритмів. Кількість джерел оцінюється за кількістю максимумів спектральної функції, що відповідають обраному критерію розділення.

Для статистичної оцінки ефективності застосовується метод статистичних випробувань. Для визначення факту розділення використовується критерій Релея.

Математичне моделювання виконано для лінійної еквідистантної ФАР із 16 приймальними елементами, розташованими з кроком, що дорівнює половині довжини хвилі. Розглядалася тестова ситуація з двома рівнопотужними джерелами, кутова відстань між якими становила 0,1 ширини діаграми спрямованості. Інтенсивність сигналів досліджувалася на рівнях 24, 30 і 34 дБ відносно рівня власних шумів каналів. Обсяг навчальної вибірки змінювався в межах до 100 відліків.

Результати моделювання засвідчили, що ефективність методів залежить від інтенсивності джерел і обсягу навчальної вибірки. За інтенсивності 24 дБ найкращі результати продемонстрували методи лінійного передбачення та модифікований алгоритм Кейпону. Метод мінімальної дисперсії не забезпечував належного розділення джерел за цього рівня інтенсивності. За інтенсивності 30 дБ найкращі результати продемонстрував метод MUSIC.

Методи лінійного передбачення, модифікований алгоритм Кейпону та теплового шуму досягали середнього значення. Метод Борджотті – Лагунаса потребував більшої вибірки ніж інші методи. За інтенсивності 34 дБ найкращі показники продемонстрували MUSIC і метод мінімальної дисперсії.

Результати дослідження свідчать, що вибір надрозділяючого методу просторового спектрального аналізу має здійснюватися з урахуванням інтенсивності джерел, обсягу навчальної вибірки та вимог до швидкодії обчислювальної системи. За нижчої інтенсивності перешкод доцільно застосовувати методи лінійного передбачення та модифікований алгоритм Кейпону. За середньої інтенсивності високі показники демонструє MUSIC, однак його реалізація потребує додаткових обчислювальних витрат на визначення власних чисел і векторів кореляційної матриці. За високої інтенсивності перешкод перспективним є також метод мінімальної дисперсії.

Отримані результати можуть бути використані під час дослідження та вдосконалення алгоритмів обробки радіолокаційної інформації. Водночас практичне застосування розглянутих методів потребує додаткового оцінювання їхньої стійкості до неідентичності каналів приймання, похибок моделі та обмежень обчислювальних ресурсів.

Список використаних джерел:

1. Леховицкий Д. И. Статистический анализ «сверхразрешающих» методов пеленгации источников шумовых излучений при конечном объеме обучающей выборки. Прикладная радиоэлектроника. 2009. Т. 8, № 4. С. 526–541. URL: http://openarchive.nure.ua/handle/document/952.

2. Dzhus V., Roshchupkin Y., Kukobko S., Herasymov S., Drob N., Trofymova M. Estimation of Noise Radiance Point Sources Multichannel Direction Finding Systems Resolution by Linear Prediction Method. Information Processing Systems. 2021. Issue 4 (167). P. 19–26. DOI: https://doi.org/10.30748/soi.2021.167.02.

3. Джус В. В. Оцінка роздільної здатності методів просторового спектрального аналізу при пеленгації постановників перешкод крилатих ракет в умовах російсько-української війни. Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ. 2025. № 4(61). С. 65–69. DOI: https://doi.org/10.30748/nitps.2025.61.07.

4. Мужило Д. Р., Рибніков М. І., Джус В. В. Роздільна здатність пеленгації бортових постановників активних шумових перешкод крилатих ракет. Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил безпеки і оборони: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2026. С. 424–425.

Мужило Дем'ян Русланович *– курсант 343А навчальної групи факультету зенітних ракетних військ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: demyan.muzhilo4567@gmail.com ORCID https://orcid.org/0009-0002-2830-9328.*

Джус Володимир Всеволодович *– кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зенітних ракетних комплексів середньої дальності факультету зенітних ракетних військ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: vdzhus2020@gmail.com ORCID https://orcid.org/0000-0003-1762-1543.*

Demian Muzhylo*– cadet 343A of the training group of the Faculty of Air Defense Missile Forces at the Ivan Kozhedub National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska Street, postal code 61023, e-mail: demyan.muzhilo4567@gmail.com ORCID https://orcid.org/0009-0002-2830-9328. .*

Volodymyr Dzhus*– Candidate of Engineering Science, Associate Professor at the Department of Medium-Range Air Defense Missile Systems of the Faculty of Air Defense Missile Forces at the Ivan Kozhedub National Air Force University, Kharkiv, 77/79 Sumska Street, postal code 61023, e-mail: vdzhus2020@gmail.com ORCID https://orcid.org/0000-0003-1762-1543.*