

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СУКУПНОСТІ МАТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ-ПРОЕКТОРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ГРУПОВОЇ ЦІЛІ У МЕЖАХ ОДНОГО ІМПУЛЬСНОГО ОБ'ЄМУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

У статті розглянуто одну з актуальних проблем сучасної радіолокації – визначення складу групових зосереджених цілей у межах імпульсного об'єму радіолокаційної станції (РЛС). Проаналізовано методи високого розрізнення, що перевищують релієвську межу, зокрема алгоритми альтернативного спектрального аналізу (MUSIC, Capon) та проєкційні методи. Відзначено обмеження спектральних алгоритмів, що пов'язані з високою кореляцією сигналів від окремих цілей та значною обчислювальною складністю, що знижує їх практичну ефективність.

Запропоновано алгоритм просторової обробки сигналів на основі матричних фільтрів-проєкторів (ФП), який дозволяє реалізувати процедуру квазіоптимального розрізнення без необхідності обчислення оберненої кореляційної матриці. Методологія побудована на положеннях функціонального аналізу та використанні критерію найменших квадратів, що забезпечує адаптивність алгоритму до умов невизначеності параметрів сигналів.

Розроблена структурна схема системи включає кілька фільтрів-проєкторів, узгоджених із різними моделями групових цілей. Для випадку двох цілей у межах імпульсного об'єму застосовується пара ФП: один узгоджений з одиночним сигналом, інший – з парною ціллю. Рішення про кількість цілей приймається на основі порівняння вихідних сигналів цих каналів із заданим порогом, що дозволяє реалізувати процедуру, близьку за змістом до оптимального алгоритму розрізнення.

Ефективність методу підтверджено статистичними випробуваннями за методом Монте-Карло. Показано, що при відношенні сигнал/шум 16-20 дБ система високого розрізнення на основі двох узгоджених ФП забезпечує впевнене розрізнення групових цілей, удвічі перевищуючи релієвську межу.

Таким чином, стаття робить вагомий внесок у розвиток теорії та практики систем надвисокого розрізнення в радіолокації, пропонуючи технічно реалізований алгоритм, здатний працювати в умовах високої кореляції сигналів. Результати мають значне тактичне значення для задач виявлення та класифікації групових цілей у сучасних РЛС.

Ключові слова: групова ціль, система високого розрізнення, імпульсний об'єм.

Вступ та постановка проблеми. Зростання інтенсивності застосування засобів повітряного нападу, зокрема безпілотних літальних апаратів та високотехнологічних ракет, вимагає від радіолокаційних станцій (РЛС) Повітряних Сил Збройних Сил України здатності не лише виявляти групові цілі, але й визначати їхній чисельний склад. Визначення складу групових зосереджених цілей (ГЗЦ) є однією з проблемних завдань радіолокаційного забезпечення, вирішення якого дозволить визначити склад групової цілі в межах імпульсного об'єму РЛС, що підвищить точність та оперативність ідентифікації повітряних об'єктів у складних умовах сучасного бою.

Методологія вирішення задачі, що отримала назву "надвисока роздільна здатність", ґрунтується на фундаментальній роботі Monzingo R.A., Miller T.U. [1]. Розвитку ідей високої роздільної здатності в останній період присвячено велику кількість публікацій. Зокрема Schuessler C., Hoffmann M. та Vossiek M. запропонували використання глибинних нейронних мереж для вирішення завдання надрозрізнення повітряних цілей [2] що демонструє, як сучасні методи штучного інтелекту можуть доповнити класичні алгоритми просторової фільтрації, підвищуючи точність розрізнення. У роботі [3] Yang S. з колегами розглядають використання алгоритму MSL0 для підвищення кутового розрізнення реальної апертури радару, а Kim B.-S.,

Jin Y., Lee J., Kim S. досліджують використання комбінації методів FFT та MUSIC для зниження обчислювальних ресурсів при збереженні високого розрізнення [4].

Поряд з публікаціями останніх років у даній статті пропонується фундаментально обґрунтований та технічно реалізований алгоритм просторової обробки на основі матричних фільтрів-проекторів, що доповнює новітні підходи штучного інтелекту та оптимізаційні методи у сфері надвисокого розрізнення радіолокаційних систем.

Реалізація спектральних методів (алгоритми Capon, MUSIC та інші) обмежується у зв'язку з притаманними їм двома основними недоліками [5]:

- по-перше, можливість високої роздільної здатності лише за умови незалежності сигналів, відбитих від поодиноких цілей (для ГЗЦ такі сигнали мають високий ступінь кореляції);

- по-друге, велика складність обчислювальних процедур (обчислення оберненої кореляційної матриці, її власних значень).

Найбільш близькими прототипами за змістом задачі, що вирішується, є роботи [6] та [7]. У першій з них запропоновано алгоритм розрізнення сигналів, відбитих від цілі та перевідбитих поверхнею Землі, у другій – запропоновано алгоритм високої роздільної здатності, який орієнтований на застосування в РЛС загоризонтного типу (що відрізняються видом сигналу та діапазоном хвиль). В обох роботах використовуються фільтри-проектори.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та практична реалізація алгоритму просторової обробки сигналів у РЛС, який дозволяє визначати склад ГЗЦ у межах імпульсного об'єму незалежно від ступеня кореляції сигналів, забезпечуючи надвисоке розрізнення понад релєйську межу.

Виклад основного матеріалу. Основи статистичної теорії розпізнавання були розроблені та опубліковані наприкінці 60-х років, засновником якої є Ширман Я.Д. [8].

Задача оптимального розпізнавання двох сигналів формулюється як прийняття рішення про наявність кожного з сигналів окремо за наявності іншого заважаючого сигналу, еквівалентного перешкоді.

Критична статистика розпізнавання полягає у обчисленні кореляційного інтеграла, в якому замість опорного сигналу (що є копією очікуваного) використовується вирішальна функція, яка виконує завдання придушення заважаючого сигналу в області перекриття. Ступінь придушення залежить від коефіцієнта кореляції сигналу, що виявляється в даний момент, із заважаючим.

$$z = y^H w, \quad (1)$$

де z – значення кореляційного інтеграла (КІ);

$y = x + v$ – вектор вхідного процесу (x – корисний сигнал, v – шум);

H – знак ермітового спряження;

w – вирішальна функція КІ, що визначається виразом:

$$w = x_1 - k \cdot x_2, \quad (2)$$

де $k = 1 - \rho \frac{q_2}{q_2 + 1}$ – коефіцієнт використання енергії виявленого сигналу;

$x = x_1 + x_2 \cdot q_2$ – відношення сигнал/шум: $c/u = \frac{\mathcal{E}}{N_0}$ (індекс опускається, оскільки для

розглянутої моделі ГЗЦ сигнали мають однакову амплітуду).

Приклад вигляду вирішальної функції при розрізненні нормованих до одиниці сигналів прямокутної форми при довільній координаті α з коефіцієнтом перекриття 0,5, показано на рис. 1.

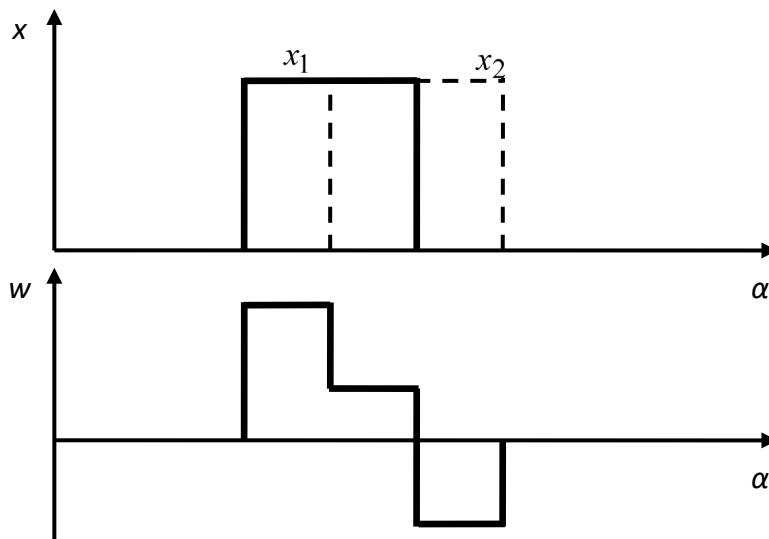


Рисунок 1 – Приклад вигляду вирішальної функції при розрізненні нормованих до одиниці сигналів прямокутної форми

Алгоритм оптимального розрізнення практично не застосовується через апіорі невідомий ступінь перекриття сигналів, хоча його реалізація можлива завдяки багатоканальності побудови системи обробки. Тому не можна повністю погодитися з висновком про непрацездатність алгоритму оптимального розрізнення, який зустрічається в окремих публікаціях.

Значно складніше реалізувати оптимальний або близький до нього за принципом обробки алгоритм розрізнення цілей за просторовими координатами, коли формування вирішальної функції має здійснюватися антенною системою або застосуванням антенної решітки (АР) з просторовими фільтрами. У той же час принцип просторового розрізнення може бути реалізований на деякій лінійній апертурі антени. Залежно від розподілу випромінювачів на апертурі створюється певний розподіл поля. На це поле накладається поле шумів теплового випромінювання, яке можна вважати ізотропним. Інформація про наявність одного з випромінювачів у присутності заважаючого, може бути отримана шляхом аналізу напруженості поля як функції двох змінних: часу та координати, що виконується додатковим інтегруванням по апертурі за допомогою багатоеlementної антени типу цифрової антенної решітки (ЦЛАР) та просторовими фільтрами. Проведений аналіз показує, що задача просторового розрізнення, процедура якої наближена до алгоритму оптимального розрізнення, є цілком перспективною для розробки систем визначення складу групової парної цілі.

Для вирішення поставленої у статті мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробка методу квазіоптимальної просторової обробки сигналів на основі матричних фільтрів, що забезпечує обробку в реальному масштабі часу;
- розробка методу визначення кількості цілей з різними азимутами в межах імпульсного об'єму РЛС та його технічна реалізація.

При вирішенні першого завдання використовується метод синтезу детектора на основі застосування методології та положень теорії функціонального аналізу, вперше запропонований у [6].

Як критерій оптимізації обирається критерій найменших квадратів [8]. Використання даного критерію, з одного боку, не вимагає знання повних характеристик вектора (що визначає вихідні сигнали каналів прийому), з іншого боку, дозволяє застосовувати теореми та положення функціонального аналізу для спрощення задачі. У термінах функціонального аналізу задача синтезу алгоритму "виявлення – розрізнення" може бути сформульована наступним чином [6].

Існує набір базисних функцій (векторів) $V = [v_i, i = 1 \dots M]$, які належать підпростору H Гільбертового простору L^2 , і на цьому базисі необхідно сформулювати вектор U_c^\wedge , який задовольняє умові:

$$\varepsilon = (U - U_c^\wedge)^H (U - U_c^\wedge) = \min. \quad (3)$$

З'являється можливість подання:

$$U_c^\wedge = V \cdot u_1^\wedge, \quad (4)$$

де u_1^\wedge – оціночний вектор-стовпець сигналу цілі на виході першого приймального каналу.

Виконуючи операцію векторного диференціювання за u_1^\wedge , отримаємо:

$$\frac{d\varepsilon(u_1^\wedge)}{du_1^\wedge} = V^H (U - V u_1^\wedge) = 0; \quad u_1^\wedge = V^{-1} U.$$

Розв'язуючи відносно U_c^\wedge , отримаємо рівняння:

$$U_c^\wedge = V(V^H V)^{-1} V^H U. \quad (5)$$

У правій частині рівності (5), використовуючи теорему проектування функціонального аналізу, виділимо вираз, що відповідає фільтру-проектору, який позначимо P_{rM}^\wedge і називатимемо матричним фільтром-проектором (ФП):

$$Pr_M = V(V^H V)^{-1} V^H, \quad (6)$$

де M – кількість джерел сигналів. За термінологією функціонального аналізу: проектор (6) натягнутий на стовпці матриці V .

З урахуванням (5) і (6) маємо рівність:

$$U_c^\wedge = Pr_M U. \quad (7)$$

Після фільтрації матричним ФП алгоритм передбачає обчислення норми результату і подальше порівняння з порогом. Якщо позначити вихідний сигнал системи виявлення за наявності на вході сигналів від M джерел через w_M , то алгоритм виявлення має вигляд:

$$w_M = U^H Pr_M U \geq w_0, \quad (8)$$

де w_0 – поріг виявлення (при заданому M).

Формула алгоритму випливає з однієї з властивостей проекторів: квадрат норми проекції будь-якого вектора на підпростір, утворений проектором, дорівнює квадратичній формі виду:

$$\| Pr_M U \|^2 = U^H Pr_M U.$$

За наявності в імпульсному об'ємі двох цілей N -мірний вектор-стовпець вихідних сигналів ЦІАР має вираз:

$$U = U_{c1} + U_{c2} + U_{ш}; \quad U_{c1} = v_1 s_1; \quad U_{c2} = v_2 s_2.$$

де v_1, v_2 , – вектор-стовпці, що характеризують амплітудно-фазовий розподіл на входах приймальних елементів ЦІАР:

$$v_1^H = [1e^{-j\varphi_1} e^{-2j\varphi_1} \dots e^{-j(N-1)\varphi_1}], \quad v_2^H = [1e^{-j\varphi_2} e^{-2j\varphi_2} \dots e^{-j(N-1)\varphi_2}], \quad \varphi_{1,2} = \pi \sin \beta_{1,2};$$

s_1 та s_2 – сигнали цілей в опорному каналі.

Фільтр-проектор являє собою матричний фільтр із передавальною характеристикою $Pr_n = V \cdot (V^H V)^{-1} \cdot V^H$, де V – матриця розміром $N \times n$ (n – кількість стовпців матриці V , у нашому випадку дорівнює M). Розмірність ФП визначається кількістю стовпців V , тобто для основних моделей ГЗЦ відповідає $M = 2 \dots 3$. ФП називають узгодженим, якщо розмірність проектора n збігається з числом цілей M в імпульсному об'ємі РЛС ($n = M$).

Проектор з урахуванням кількості розрізняваних сигналів повинен здійснювати переналаштування своїх параметрів. Переналаштування необхідне для знаходження тих значень параметрів, при яких максимізується квадрат норми проекції вихідного сигналу ЦЛАР на підпростір, натягнутий на стовпці матриці V проектора, тобто досягається умова:

$$\alpha^* = \arg \max(U_i^H \cdot V \cdot (V^H V)^{-1} V^H U_i), \quad (9)$$

де α^* – вектор оцінок параметра.

Перевагою отриманого алгоритму порівняно з відомими алгоритмами високої роздільної здатності є усунення необхідності обчислення зворотної кореляційної матриці вихідних сигналів ЦЛАР і, отже, зняття обмежень, пов'язаних з її оцінкою.

Розв'язання другого завдання. При невідомих потужностях сигналів, відбитих від цілей, достовірний склад групової цілі в імпульсному об'ємі РЛС може бути встановлений тільки при включенні в систему обробки декількох ФП, число яких залежить від реального складу ГЗЦ. У разі розрізнення двох цілей у системі обробки має бути два ФП. З них: один ФП має бути "узгоджений" з одиночною ціллю (проектор позначимо Pr_1), інший "узгоджений" з груповою ціллю, що включає два повітряних об'єкти (проектор позначимо – Pr_2). За наявності цих двох фільтрів-проекторів рішення про кількість цілей в імпульсному об'ємі РЛС приймається за результатами різниці вихідних сигналів двох каналів обробки. Рішення про наявність двох цілей у складі ГЗЦ приймається тоді, коли виконується умова:

$$\Delta w = w_1 - w_2 \geq w_p, \quad (10)$$

де w_p – поріг рішення, який обирається з умовою забезпечення заданої ймовірності прийняття неправильних рішень щодо кількості цілей у групі (зазвичай приймає значення 10^{-4}).

В основу алгоритму визначення кількості цілей у ГЗЦ береться така властивість проекторів:

$$Pr_M - Pr_{M-1} = Pr_M(I_{N \times N} - Pr_{M-1}) = Pr_M \cdot Pr_{\perp(M-1)}, \quad (11)$$

де Pr_{\perp} – ортогональний проектор, що формує підпростір, який є ортогональним до підпростору, що формується Pr_{M-1} .

Алгоритмічна структурна схема підсистеми визначення кількості цілей в імпульсному об'ємі РЛС представлена на рис.2.

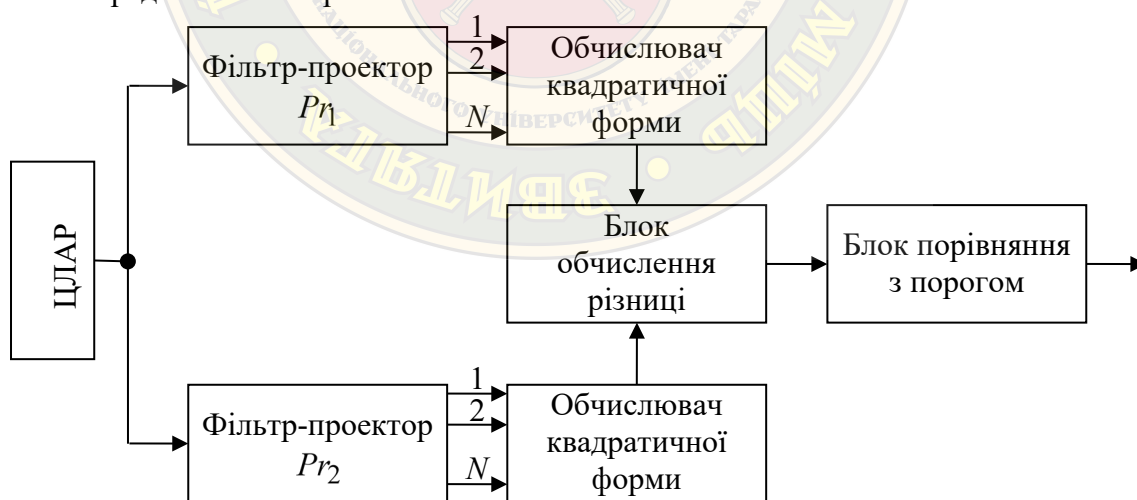


Рисунок 2 – Алгоритмічна структурна схема підсистеми визначення кількості цілей в імпульсному об'ємі РЛС

Позначення характеристик ФП на рис. 2 відповідають: $Pr_1 \Rightarrow Pr_{M_0}$, $Pr_2 \Rightarrow Pr_{M_0-1}$.

Фізичне тлумачення процедури розрізнення ілюструється при підстановці в рівняння (10) значень вихідних сигналів, виражених через характеристики проекторів, та перетворенні отриманого виразу. Після підстановки w_1 та w_2 у (10) отримаємо:

$$\Delta w = U^H (Pr_2 - Pr_1) U > w_p. \quad (12)$$

Підпростір, утворений проектором Pr_1 , належить до підпростору, що утворений Pr_2 , тому має місце співвідношення:

$$Pr_1 Pr_2 = Pr_2 Pr_1 = Pr_1, \quad (13)$$

з урахуванням чого співвідношення (12) можна представити у вигляді:

$$\Delta w = U^H Pr_2 \cdot Pr_{\perp 1} U > w_p, \quad (14)$$

де $Pr_{\perp 1} = (I - Pr_1)$ – ортогональний проектор для сигналу першої цілі.

Отримане рівняння прийняття рішення щодо розрізнення двох цілей означає, що в блоці обчислення різниці на рис. 2 здійснюється режекція сигналу однієї з цілей і забезпечується виявлення другої. Така процедура обробки сигналів при розрізненні цілком відповідає за змістом алгоритму оптимального розрізнення цілей (порівняння (2) з (12)).

Оцінка ймовірності розрізнення групової цілі, що складається з двох одиночних в імпульсному об'ємі РЛС, виконана методом статистичних випробувань Монте-Карло представлена на графіку рис. 3. Кутовий рознос цілей по азимуту становив 0,5 ширини діаграми спрямованості антени.

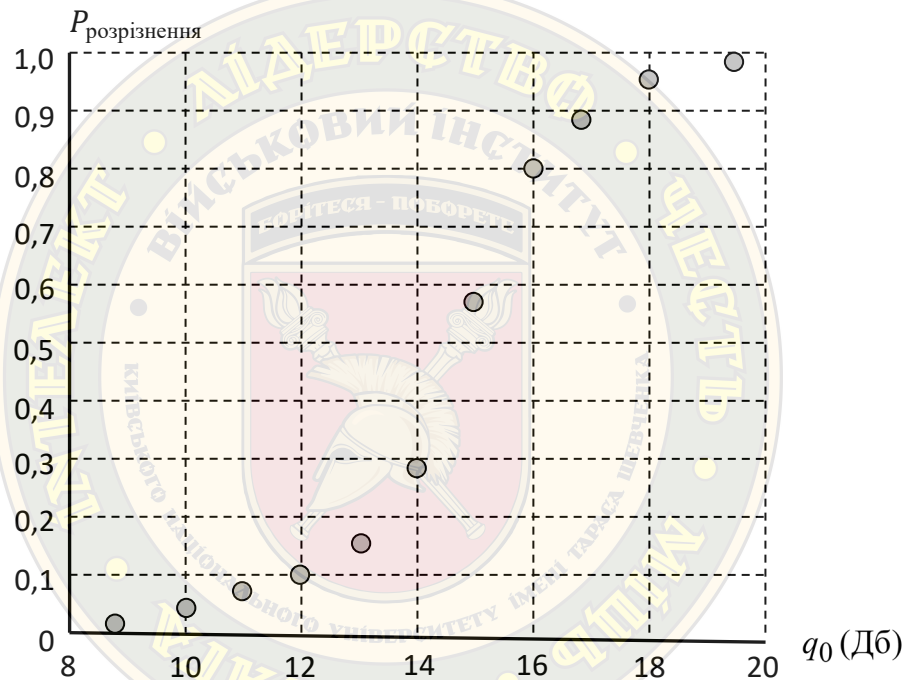


Рисунок 3 – Оцінка ймовірності розрізнення групової зосередженої цілі

Таким чином, за умови забезпечення співвідношення сигнал/шум 16–20 дБ система високої роздільної здатності на основі двох ФП, узгоджених з різними цілями, забезпечує роздільну здатність ($P_{\text{розрізнення}} > 0,8$), яка удвічі краща за релеївську.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було науково обґрунтовано та практично реалізовано алгоритм просторової обробки сигналів, що базується на застосуванні сукупності матричних фільтрів-проекторів для ідентифікації складу ГЗЦ у межах одного імпульсного об'єму РЛС. Запропонований підхід, на відміну від класичних спектральних методів типу MUSIC або Capon, демонструє високу ефективність в умовах значної кореляції сигналів, що є характерним для щільних бойових порядків засобів повітряного нападу. Використання методології функціонального аналізу та критерію найменших квадратів дозволило мінімізувати обчислювальну складність шляхом усунення необхідності обчислення оберненої кореляційної матриці, що забезпечує можливість обробки даних у реальному масштабі часу. Результати статистичного моделювання підтвердили, що розроблена система квазіоптимального розрізнення при відношенні сигнал/шум 16-20 дБ дозволяє досягти роздільної здатності, яка вдвічі перевищує релеївську межу з ймовірністю понад 0,8.

Напрямки подальших досліджень у даній галузі доцільно зосередити на розширенні можливостей алгоритму для ідентифікації складніших конфігурацій цілей, що включають три та більше об'єктів у межах одного імпульсного об'єму РЛС. Також перспективним є поєднання методів матричної фільтрації з технологіями глибинних нейронних мереж та штучного інтелекту, що дозволить підвищити адаптивність систем до динамічних змін сигнального середовища.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Robert A. Monzingo; Randy L. Haupt; Thomas W. Miller "Introduction to Adaptive Arrays" (2nd Edition), 2011. – 543 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/SBEW046E>
2. C. Schuessler, M. Hoffmann, and M. Vossiek, "Super-Resolution Radar Imaging with Sparse Arrays Using a Deep Neural Network", *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 1, pp. 45–56, 2023. DOI: DOI: <https://arxiv.org/pdf/2306.09839>
3. S. Yang, Y. Zhao, X. Tuo, et al., "Real Aperture Radar Angular Super-Resolution Imaging Using Modified Smoothed L0 Norm", *Remote Sensing*, vol. 16, no. 2, pp. 312, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16010012>
4. B.-S. Kim, Y. Jin, J. Lee, and S. Kim, "FMCW Radar Estimation Algorithm with High Resolution and Low Complexity Based on Reduced Search Area," *Sensors*, vol. 22, no. 3, pp. 1456, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22031202>
5. Raymond J. Weber; Yikun Huang "Analysis for Capon and MUSIC DOA estimation algorithms" 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 2009 DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2009.5171460>.
6. Бондаренко Б.Ф., Прокофьев В.П. "Применение методов функционального анализа для решения задачи синтеза системы пространственной обработки" // *Радиоэлектроника*. – 1982. – Т. 25, № 3. – С. 15-23.
7. Бондаренко Б.Ф., Сашук И.И., Тимчук В.Ю. "Предельное качество обнаружения и разрешения сигналов в обнаружителях на основе согласованных проекторов" // *Вісті вищих навчальних закладів. Радиоелектроніка*, №48(3) – 2005. – С.24-33,. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347005030039>
8. C. Radhakrishna Rao. "Linear Statistical Inference and its Applications" 2nd Edition, Wiley, New York, 1973. – 625p. DOI: www.doi.org/10.1002/9780470316436

REFERENCES:

1. Robert A. Monzingo; Randy L. Haupt; Thomas W. Miller "Introduction to Adaptive Arrays" (2nd Edition), 2011. – 543 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/SBEW046E>
2. C. Schuessler, M. Hoffmann, and M. Vossiek, "Super-Resolution Radar Imaging with Sparse Arrays Using a Deep Neural Network" *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 1, pp. 45–56, 2023. DOI: DOI: <https://arxiv.org/pdf/2306.09839>
3. S. Yang, Y. Zhao, X. Tuo, et al., "Real Aperture Radar Angular Super-Resolution Imaging Using Modified Smoothed L0 Norm" *Remote Sensing*, vol. 16, no. 2, pp. 312, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16010012>
4. B.-S. Kim, Y. Jin, J. Lee, and S. Kim, "FMCW Radar Estimation Algorithm with High Resolution and Low Complexity Based on Reduced Search Area" *Sensors*, vol. 22, no. 3, pp. 1456, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22031202>
5. Raymond J. Weber; Yikun Huang "Analysis for Capon and MUSIC DOA estimation algorithms" 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 2009 DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2009.5171460>.
6. Bondarenko B.F., Prokofev V.P. "Prymenenye metodov funktsyonalnoho analiza dlia resheniya zadachy synteza system prostranstvennoi obrabotky // *Radyoelektronika*. – 1982. – Т. 25, № 3. – С. 15-23.
7. Bondarenko B.F., Sashchuk Y.Y., Tymchuk V.Iu. "Predelnoe kachestvo obnaruzheniya y razresheniya syhnalov v obnaruzhyteliakh na osnove sohlasovannikh proektorov" // *Visti vyshchyykh uchbovykh zakladiv. Radioelektronika*, №48(3) – 2005. – С.24-33,. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347005030039>
8. C. Radhakrishna Rao. "Linear Statistical Inference and its Applications" 2nd Edition, Wiley, New York, 1973. – 625p. DOI: www.doi.org/10.1002/9780470316436

APPLICATION OF THE SPATIAL FILTERING METHOD USING A SET OF MATRIX FILTERS -PROJECTORS TO DETERMINE THE COMPOSITION OF A GROUP TARGET WITHIN A SINGLE PULSE VOLUME OF A RADAR STATION

This paper addresses one of the critical challenges in modern radar systems – the determination of the composition of group concentrated targets (GCTs) within the radar’s impulse volume. The authors analyze advanced high-resolution methods that surpass the Rayleigh limit, focusing on alternative spectral analysis algorithms (such as MUSIC and Capon) and projection-based approaches. While spectral methods are limited by signal correlation and computational complexity, projection methods offer a more practical pathway to implementation.

The study proposes a spatial signal processing algorithm based on matrix projector filters (MPFs), enabling quasi-optimal resolution without the need to compute the inverse correlation matrix. The methodology is grounded in functional analysis and employs the least-squares criterion, ensuring adaptability under uncertain signal parameters. A structural scheme of the system is developed, incorporating multiple MPFs tuned to different target models. For the case of two targets within the impulse volume, the system utilizes a pair of projectors—one matched to a single target and the other to a dual-target configuration. The decision on the number of targets is made by comparing the outputs of these channels against a predefined threshold, effectively implementing a procedure close to optimal resolution.

Monte Carlo simulations confirm the efficiency of the proposed approach. Results demonstrate that at a signal-to-noise ratio of 16–20 dB, the high-resolution system based on dual MPFs achieves reliable separation of group targets, providing resolution twice as effective as the Rayleigh criterion.

In conclusion, the paper contributes significantly to the development of super-resolution radar systems, presenting a technically feasible algorithm capable of operating under conditions of high signal correlation. The findings hold substantial tactical importance for target detection and classification in contemporary radar applications. Keywords: geographic information system, geospatial data, geospatial support, ArcGIS, LiDAR, terrain change mapping, remote sensing, raster georeferencing, topographic map updating.

Keywords: group target, high-resolution system, pulse volume.