

**Чмельов В.О.**

<https://orcid.org/0000-0003-3369-2675>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олійник М.В.**

<https://orcid.org/0009-0001-5201-1911>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ВІРТУАЛЬНІЙ ФАР МІМО З ВРАХУВАННЯМ БЛОЧНОЇ СТРУКТУРИ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МАТРИЦІ

У статті розглянуто метод прискорення адаптації радіолокаційних систем з фазованими антенними решітками в умовах дії інтенсивних активних шумових завад. Досліджено узагальнену модель активних шумових завад у ФАР МІМО, та визначено блочну структуру кореляційної матриці завад. Запропоновано підхід до адаптації віртуальної ФАР МІМО-радару з ортогональними сигналами на передачі, який базується на використанні апріорно відомої блочної структури кореляційної матриці «завади + шум». Блочна структура матриці та наявність нулів у позадіагональних елементах, як результаті відсутності кореляції сигналів активних шумових завад, дозволяє замінити інверсію кореляційної матриці великої розмірності на інверсію окремих блоків меншого порядку з використанням алгоритму Шура. Це суттєво знижує обчислювальну складність без втрати оптимальності просторової обробки. Побудовано математичну модель віртуальної ФАР МІМО та проаналізовано фізичний зміст діагональних і позадіагональних блоків кореляційної матриці завад. Результати імітаційного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили ефективність запропонованого методу: прискорення адаптації становить від 1,7 до 5,6 разів залежно від конфігурації МІМО-ФАР, при використанні критерію оптимальності "Максимум правдоподібності" було отримано придушення активних шумових завад на рівні до  $-60$  дБ. Визначено обмеження застосування запропонованого способу адаптації, а саме необхідність ортогональності зондуючих сигналів для збереження діагональних властивостей кореляційної матриці, незалежність сигналів активних шумових завад, та мінімальне обмеження кількості приймальних каналів ФАР МІМО. Отримані результати свідчать про перспективність застосування методу в радіолокаційних системах з високими вимогами до швидкої адаптації.

**Ключові слова:** радіолокаційна система, МІМО, фазована антенна решітка, цифрове оброблення сигналів, активна шумова завада, просторова селекція, блочна структура, оптимізація, адаптації.

**Постановка проблеми.** В умовах розвитку засобів радіоелектронної боротьби радіолокаційні системи (далі – РЛС) стикаються з інтенсивними активними шумовими завадами, які суттєво знижують ефективність виявлення та супроводу радіолокаційних цілей. Сучасні радіолокаційні системи для забезпечення ефективного огляду повітряного простору використовують цифрові фазовані антени решітки (далі – ФАР). Традиційні ФАР забезпечують адаптивну просторову селекцію сигналів завад за рахунок обчислення оптимальних значень вагових коефіцієнтів нала-

штування ФАР, де основні витрати обчислення зосереджуються на визначенні оберненої кореляційної матриці завад. Проте, з великою кількістю елементів ФАР, зростає обчислювальна складність визначення оберненої кореляційної матриці високої розмірності, що обмежує швидкість адаптації ФАР до нових умов.

Перехід до МІМО-радарів з ортогональними сигналами на передачі дозволяє формувати віртуальну антенну решітку з розширеною апертурою та великою кількістю ступенів свободи без збільшення фізичної кількості фізичних антен.



Апріорно відома блокова структура кореляційної матриці перешкод у віртуальній решітці МІМО спрощує процедуру адаптації, суттєво знижуючи обчислювальні витрати в порівнянні з традиційними ФАР тієї ж розмірності.

Такі рішення є критичними для адаптації радіолокаційних систем, які працюють в умовах високої динаміки змін завадо-цільової обстановки: бортових радарів, безпілотних платформ, автомобільної безпеки, де потрібна висока швидка адаптація до змін обстановки.

Тому дослідження, присвячені підвищенню ефективності просторової обробки сигналів у віртуальній ФАР МІМО з урахуванням апріорно відомої блокової структури кореляційної матриці перешкод є актуальною проблемою, яку необхідно вирішувати при розробці сучасних радіолокаційних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1,2] розглянуто адаптивні алгоритми формування діаграми спрямованості ФАР в МІМО-радарях, показано збільшення ступенів свободи віртуальних решіток, але обчислювальна складність інверсії повної матриці залишається високою. У [3] запропоновані методи STAP (Space-Time Adaptive Processing) для спільного придушення пасивних та активних завад роботі ФАР МІМО, досягнуто підвищення SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), проте без експлуатації блокової структури для прискорення обчислень.

У [4] досліджено стійкість формування діаграми спрямованості ФАР з реконструкцією коваріаційної матриці завад в МІМО, покращено робастність, але інверсія матриці проводиться стандартним способом. У [5] використані блочні властивості коаліційної матриці завад в МІМО-STAP, знижений час обробки для пасивних завад, але активні шумові завади не досліджувалися.

В [6] застосовано матричні ідентичності структурних блоків для прискорення обчислення, показано зниження складності, проте не врахувати апріорну інформацію про блочну структуру коваріаційної матриці завад в МІМО. У [7] розглянута структура коваріаційної матриці теплового шуму для, запропоновані спрощені її інверсії, але не розглядалися сигнали активних шумових завад для РЛС.

У [8] розроблено спрощена процедура STAP з врахування блоків кореляційної матриці в МІМО, досягнуто прискорення, але забарвленість сигналів активних шумових завад після узгоджених фільтрів деталізована недостатньо. У [9] вивчено адаптацію форму сигналів передавачів в МІМО

для придушення активних завад, показано їх перевагу над ортогональними сигналами, але питання прискореної адаптації залишилися відкритими.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого вирішенню *проблеми* прискорення адаптації РЛС до роботи в умовах дії активних шумових завад за рахунок переходу до віртуальної ФАР МІМО з експлуатацією апріорно відомої блокової структури кореляційної матриці.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка методу адаптації антенної решітки МІМО до роботи радіолокаційної системи в умовах дії активних шумових завад за рахунок використання особливостей віртуальної ФАР з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці. Отриманий метод суттєво прискорює визначення оптимальних вагових коефіцієнтів налаштування віртуальної ФАР МІМО у порівнянні зі звичайними ФАР.

Для досягнення поставленої мети виконано наступні завдання:

Розглянута узагальнена модель активних шумових завад, які впливають на віртуальну ФАР МІМО, та визначена блочна структура кореляційної матриці завад;

Сформульовано метод адаптації віртуальної ФАР МІМО зі спрощеною інверсією кореляційної матриці завад на основі її блочної структури та критерію оптимізації «мінімум дисперсії сигналу»;

Проведено кількісну оцінку прискорення процесу адаптації у порівнянні зі звичайними підходами.

Об'єктом дослідження є процес адаптації антенної решітки, що побудована за технологію МІМО, до дії активних шумових завад для забезпечення ефективної роботи радіолокаційної системи в складних умовах завадо-цільової обстановки

Проведено компаративний аналіз підходів до адаптації традиційних ФАР з обчисленням оберненої кореляційної матриці завад звичайним способом, і підходу до адаптації віртуальної ФАР з блочною структурою кореляційної матриці завад.

Метод побудований на основі аналітичного поділу кореляційної матриці завад на блоки, відповідно до відомої конфігурації ФАР МІМО та властивостей ортогональних сигналів РЛС, що дозволяє замінити обчислення оберненої цілої кореляційної матриці, на послідовність інверсії окремих блоків.

Перевірка ефективності запропонованого метода, і кількісна оцінка адаптації проводилися на основі цифрової моделі ФАР МІМО в середовищі спеціального програмного забезпечення MATLAB.

**Виклад основного матеріалу.**

**Результати дослідження адаптації ФАР МІМО до роботи в умовах дії активних шумових завад**

**1. Дослідження математичної моделі.**

Структура звичайної ФАР та принципи її адаптації до дії активних шумових завад ґрунтовно дослідженні [10,11]. На рисунку 1 зображена структура звичайної лінійної ФАР, яка широко застосовується в РЛС.

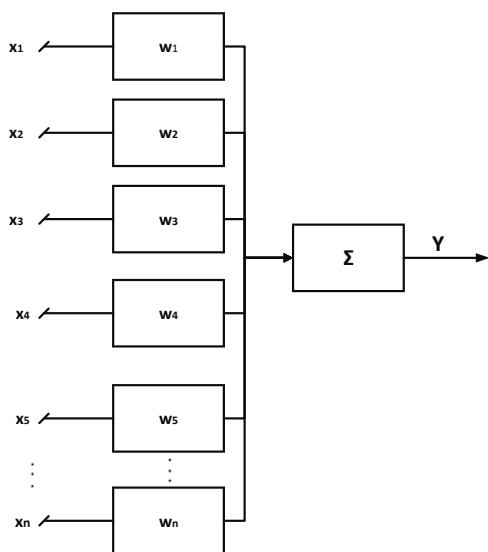


Рис. 1. Структурна схема ФАР з n-елементів [10]

Сигнал на виході ФАР визначається:

$$Y = X^T W = W^T X \tag{1}$$

де  $W^T$  – вектор вагових комплексних коефіцієнтів налаштування ФАР,  $X$  – вектор вхідних сигналів.

Адаптація лінійної ФАР, це формування провалів діаграми спрямованості антенної решітки у напрямку джерела активної шумової завади за рахунок зміни вагових комплексних коефіцієнтів. Для їх обчислення застосовують різні критерії оптимальності [10], наприклад:

**1. Рівняння Вінера-Хопфа**

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} R_{xd} \tag{2}$$

де  $w_{opt}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР,

$R_{xx}$  – кореляційна теплицева матриця вхідних сигналів,  $R_{xd}$  – взаємна кореляційна матриця вхідних сигналів та очікуваного еталонного сигналу.

**2. Максимізація відношення сигнал/шум**

$$w_{rsn} = \alpha R_{nn}^{-1} v \tag{3}$$

де  $w_{rsn}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР,

$R_{nn}$  – кореляційна ермітова матриця завад в каналах прийому ФАР,  $v$  – вектор фазових здви́гів для формування основної пелюстки ФАР у напрямку очікування корисного сигналу,  $\alpha$  – скаляр.

**3. Максимум правдоподібності**

$$w_{LN} = \frac{R_{nn}^{-1} v}{v^H R_{nn}^{-1} v} \tag{4}$$

де  $w_{LN}$  – вектор оптимальних вагових коефіцієнтів ФАР.

Як видно з виразів 2,3,4 для визначення оптимальних вагових коефіцієнтів налаштування ФАР потрібно визначити обернену кореляційну матрицю завад. Існують різноманітні методи спрощення процесу обчислення оберненої матриці, але вони суттєво не вирішують проблему прискорення адаптації ФАР, які потребують інверсії матриці високого порядку.

Математична модель ФАР МІМО розкриває особливості оброблення сигналів та побудови кореляційної матриці завад. На рисунку 2 наведено структура ФАР МІМО [14]

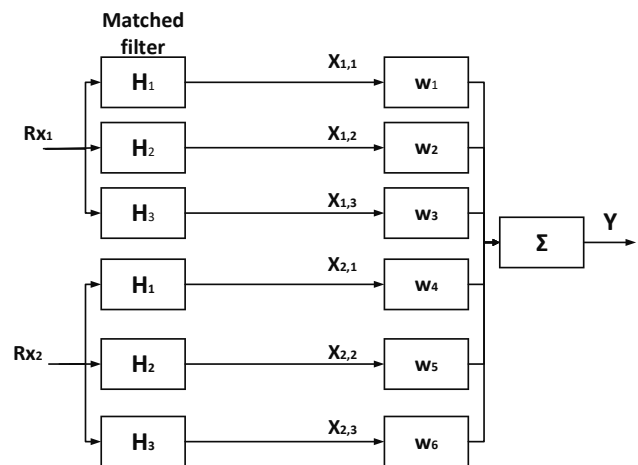


Рис. 2. Структурна схема ФАР МІМО

В загальній моделі ФАР МІМО використовується  $M$ –ортогональних сигналів зондування для передавачів,  $L$ –приймачів,  $K$ –завад. Після узгоджених фільтрів формується віртуальна ФАР (рис. 2) з вектором сигналів розміром  $N = ML$ . Вектор даних  $x$  (розміром  $ML \times 1$ ) впорядкований по приймачам: спочатку усі  $M$  канали для першого приймача  $Rx1$ , потім для  $Rx2, \dots, RxL$ .

Кореляційна матриця завади+шум:

$$R = M \{xx^T\} = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1L} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{L1} & \dots & R_{LL} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Розмір кореляційної матриці ( $ML \times ML$ ), має блочну структуру  $L \times L$  блоків, кожен блок – матриця ( $M \times M$ ).

Повна кореляційна матриця:

$$R = R_J + R_N \quad (6)$$

де,  $R_J$  – вклад від  $K$  активних шумових завад,  $R_N$  – вклад від внутрішніх шумів, окремо в кожному приймачі.

Частина кореляційної матриці –  $R_J$ , для кожної завади  $k=1 \dots K$ , з кутом приходу плоского фронту хвилі  $\Theta_k$  визначається просторовим вектором приймачів ФАР  $a_{Rx}(\Theta_k) \in C^{L \times 1}$ . Елемент вектору:

$$a_{Rx}(\Theta_k)_l = e^{j \frac{2\pi}{\lambda} p_l \sin(\Theta_k)} \quad (7)$$

де,  $d$  – інтервал між приймальними елементами ФАР,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $p_l = (l-1)d$  – позиція  $l$ -го приймача в лінійній геометрії ФАР.

Матриця коваріації сигналів активних шумових завад між  $M$  виходами узгоджених фільтрів в одному каналі прийому  $C_k \in C^{M \times M}$  ермітова, позитивно визначена, і відображає кольоровість сигналів завад, їх особливості після проходження через узгоджені фільтри ортогональних сигналів.

Для  $K$  незалежних активних шумових завад

$$R_J = \sum_{k=1}^K R_J^k = \sum_{k=1}^K (a_{Rx}(\Theta_k) a_{Rx}(\Theta_k)^H \otimes C_k) \quad (8)$$

де,  $\otimes$  - Кронекерівський добуток [12].

Частина кореляційної матриці внутрішніх шумів –  $R_N$ . Шуми незалежні для кожного приймача, але кольорові після проходження узгоджених фільтрів (рис. 2), і елементи матриці дорівнюють нулю, якщо  $l \neq l$ .

$$R_N = blkdiag(N_1, N_2, \dots, N_L) \quad (9)$$

де,  $N_L \in C^{M \times M}$  – коваріація шуму на  $l$ -м приймачі.

Кореляційна матриця  $R$  (5) має блочну структуру. Діагональні блоки  $R_{ll}$  ( $l=l$ ) автокореляційні блоки для  $l$ -го приймача:

$$R_{ll} = \sum_{k=1}^K |a_l(\Theta_k)|^2 C_k + N_l = \sum_{k=1}^K C_k + N_l \quad (10)$$

де,  $|a_l(\Theta_k)|^2 = 1$  для нормованого просторового вектора.

Зазначені діагональні блоки описують взаємну кореляцію сигналів на виходах  $M$  узгоджених фільтрів в одному каналі прийому віртуальної

ФАР. Діагональні блоки відрізняються між собою тільки різною шумовою складовою  $N_l$ .

Позадіагональні блоки  $R_{ll}$  ( $l \neq l$ ):

$$R_{ll'} = \sum_{k=1}^K a_l(\Theta_k) a_{l'}^*(\Theta_k) C_k = \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (p_l - p_{l'}) \sin(\Theta_k)} C_k \quad (11)$$

Позадіагональні блоки містять значення взаємної кореляції сигналів активних шумових завад між різними каналами прийому віртуальної ФАР. Внутрішні шуми різних каналів прийому незалежні, тому в позадіагональних блоках їх взаємна кореляція нульова. Фазовий множник  $e^{j\phi(\Theta_k)}$  відображає кут  $\Theta_k$  приходу плоского фронту хвилі  $k$  – завади. Ця інформація є основою для формування нулів діаграми направленості віртуальної ФАР у напрямку на джерело завад. Матриця  $C_k$  масштабує цю кореляцію відповідно до виходів узгоджених фільтрів, для врахування кольоровості сигналів активних шумових завад. Саме ці блоки кореляційної матриці забезпечують просторове оброблення сигналів та подавлення завад.

Отримана апіорна блочна структура кореляційної матриці  $R$  (5) для віртуальної ФАР МІМО дозволяє використовувати відомі алгоритми прискореного обчислення оберненої матриці. За рахунок поділу великої кореляційної матриці на блоки малого розміру, і проведення інверсії малих блоків та простих операції матричного множення, суттєво прискорює процес обчислення. Так звичайна інверсія матриці розміром  $N \times N$  (наприклад методом Гаусса-Жордана або LU-декомпозиції) потребує  $O(N^3)$  операцій [13].

В роботі застосовується Алгоритм Шура (Schur complement) [15], який для моделі віртуальної ФАР МІМО знижує складність обчислення до  $O(L M^3 + L^3 M^2)$ . Де операції  $O(L M^3)$  для інверсії блоків матриці, а операції  $O(L^3 M^2)$  для матричного добутку.

При побудові ФАР МІМО необхідно враховувати критичну умову:  $L \geq 2$ , приймачів повинно бути два і більше, тоді це забезпечить формування позадіагональних блоків кореляційної матриці. Порівняння витрат на обчислення оберненої матриці здійснюється [13] в одиницях flops (Floating-point Operations Per Second) для ФАР МІМО, у якої  $M=3$ ,  $L=2$ . При звичайній інверсії матриці  $N=L M$ , витрати складуть  $O(N^3) = 6^3 = 216$  flops. При інверсії кореляційної матриці ФАР МІМО з врахуванням блочної структури обчислювальні витрати складуть:  $O(L M^3 + L^3 M^2) = (2 \cdot 3^3 + 2^3 \cdot 3^2) = 126$  flops. Відносне прискорення обчислення складо 1.71 рази. При збільшенні розмірів ФАР МІМО, наприклад до структури  $M=4$ ,  $L=3$ , будемо

мати витрати:  $O(N^3) = 12^3 = 1728$  flops,  $O(L M^3 + L^3 M^2) = (3 \cdot 4^3 + 3^3 \cdot 4^2) = 624$  flops. Відносно прискорення обчислень стане ще більшим 2.77 рази.

Метод адаптації антенної решітки МІМО до роботи радіолокаційної системи в умовах дії активних шумових завад за рахунок використання особливостей віртуальної ФАР з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці буде полягати у наступному:

- формується конфігурація ФАР МІМО радіолокаційної системи на основі тактико-технічних вимог (визначаються параметри  $M$  та  $L$ );
- вибирається критерій оптимальності (2,3,4) або інший, за яким будуть визначатися вагові коефіцієнти для налаштування віртуальної ФАР МІМО;
- апріорно будується блочна структура кореляційної матриці (5) «завади+шум»;
- на основі отриманих сигналів з виходів узгоджених фільтрів формуємо вектор даних віртуальної ФАР МІМО (рис. 2), і обчислюємо кореляційну матрицю (5);
- обчислюємо обернену кореляційну матрицю на основі алгоритм Шура з врахуванням її блочної структури;
- визначаємо оптимальні параметри вагових коефіцієнтів налаштування віртуальної ФАР МІМО.

Запропонований метод втілюється у вигляді алгоритму цифрового оброблення сигналів віртуальної ФАР.

## 2. Моделювання роботи адаптивної віртуальної ФАР

Моделювання проведено для лінійної ФАР МІМО з наступною структурою (рис. 2): передавачів ортогональних сигналів  $M=3$ , які розміщені на відстані одної  $\lambda$  між ними; приймачів радіоло-

каційних сигналів  $L=2$ , які розміщені на відстані  $\lambda/2$  між ними; між останнім передавачем і першим приймачем відстань  $6\lambda$ .

Віртуальна решітка має  $N=ML=6$  елементів, на РЛС впливає  $K=2$  активні шумові завади з азимутами:  $-27^\circ$  та  $32^\circ$ , відношення завади/шум складає 20 дБ, внутрішній тепловий шум має нормальний закон розподілу щільності імовірності випадкової величини, і дисперсію  $\sigma_n^2 = 0,1$ . Критерій оптимальності (4) "Максимум правдоподібності", вагові коефіцієнти налаштування ФАР МІМО визначаються для оптимального придушення сигналів гаусівських активних шумових завад.

Структура кореляційної матриці (5)  $R(6 \times 6)$  блочна  $(2 \times 2)$ , з блоками  $(3 \times 3)$  для кожного приймача.

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$R_{21} = R_{12}^H, R_{11} = \sum_{k=1}^2 C_k + N_1,$$

$$R_{22} = \sum_{k=1}^2 C_k + N_2, R_{12} = \sum_{k=1}^2 e^{-j2\pi \sin(\Theta_k)} C_k$$

де,  $C_k$  – коваріаційна матриця  $(3 \times 3)$  сигналу  $k$ -ої активної шумової завади після узгоджених фільтрів,  $N_l$  – коваріаційна матриця  $(3 \times 3)$  теплового шуму в  $l$  приймачі.

Проведено статистичне випробування методом Монте-Карло з 100 реалізацій процесу адаптації ФАР МІМО. Проводилось звичайне обчислення оберненої кореляційної матриці, та застосування алгоритму Шура. За результатами випробування визначався середній коефіцієнт прискорення адаптації, який склав 1.7 рази. Результати адаптації ФАР МІМО на рисунку 3.

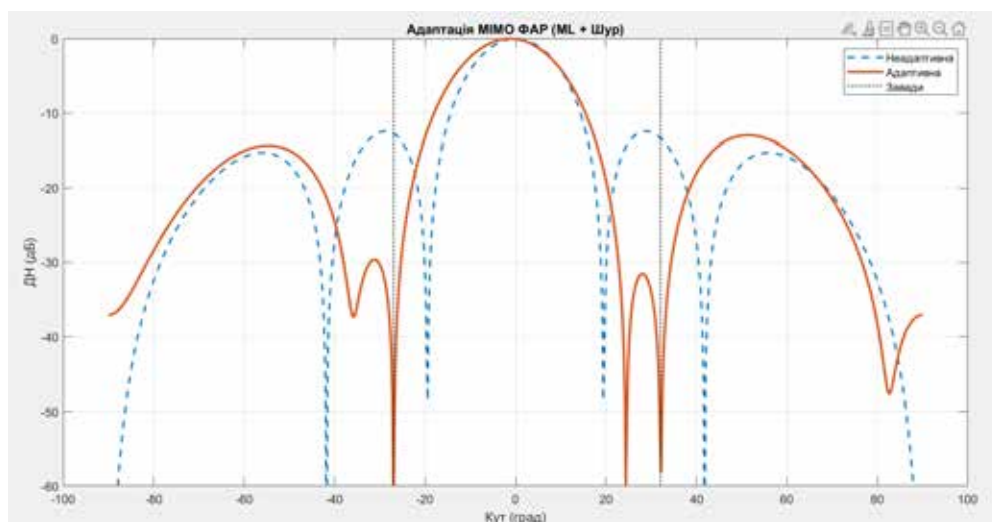


Рис. 3. Адаптація діаграми спрямованості ФАР МІМО

На рисунку видно, що ефективність придушення активних шумових завад досягає -60 дБ без втрати оптимальності по критерію "Максимум правдоподібності".

При збільшенні складності структури ФАР МІМО, моделювання показано, що виграш у швидкості адаптації стає ще більший у порівнянні зі звичайними ФАР (Таблиця 1).

Таблиця 1

**Залежність виграшу швидкості адаптації від структури ФАР МІМО**

№	Структура ФАР МІМО, (M-L)	Виграш у швидкості адаптації, рази
1	3-2	1,7
2	4-4	3
3	6-4	5,6

**Обговорення результатів розробки метода адаптації віртуальної ФАР МІМО за рахунок використання блочної структури кореляційної матриці завад.** Результати математичного моделювання підтвердили ефективність запропонованого методу адаптації ФАР МІМО. Отримані результати прискорення адаптації ФАР пояснюються використанням апріорної інформації про блочну структуру кореляційної матриці завад віртуальної ФАР МІМО. Це дозволило спростити обчислення оберненої кореляційної матриці віртуальної ФАР МІМО у порівнянні з адаптацією звичайних ФАР з такою ж розмірністю. При цьому, необхідно враховувати, технологія МІМО дозволяє використовувати меншу кількість фізичних структурних елементів антенної решітки для побудови ФАР заданої розмірності, що стає ще одним вагомим фактором переваги розробленого методу.

Розроблений метод забезпечує вирішення проблеми, яка визначена у розділі 2 за рахунок прямого зниження складності обчислення оптимальних значень вагових коефіцієнтів налаштування ФАР МІМО. *Обмеження*, які необхідно врахову-

вати при застосуванні запропонованого метода, це строге забезпечення ортогональності сигналів передавачів, бо при наявності крос-кореляції зникають діагональні властивості кореляційної матриці. Інше обмеження, це кількість прийомних каналів ФАР МІМО повинно бути не менше 2.

Поза увагою даного дослідження залишилась ФАР МІМО, у конфігурації якої передавачі і приймачі розташовуються в двомірній площині (x,y). За такої конфігурації кореляційна матриця завад буде тривимірною, а блочна структура більш складною. Плоскі віртуальні ФАР МІМО можуть стати предметом розвитком даного дослідження, що дозволить адаптувати РЛС до дії активних завад в тривимірному просторі.

**Висновки.** На відміну від відомих підходів, що базуються на повній інверсії кореляційної матриці завад в традиційних ФАР, запропонований метод адаптації РЛС до впливу активних шумових завад за рахунок застосування віртуальної ФАР МІМО з апріорно відомою блочною структурою кореляційної матриці.

Дослідження блочної структури кореляційної матриці віртуальної ФАР МІМО на основі математичне моделювання підтвердило прискорення адаптації в 2 і більше разів, у порівнянні зі звичайними ФАР з такою ж розмірністю апертури. Крім того, при збільшенні розмірності ФАР виграш у прискоренні адаптації суттєво зростає.

Оптимальними умовами застосування розробленого методу адаптації є ортогональність сигналів передавачів та відповідні характеристики узгоджених фільтрів, незалежність сигналів активних шумових завад, кількість приймальних каналів ФАР МІМО повинно бути більше 2.

Після завершення налаштування віртуальної ФАР МІМО відповідно до визначеного критерію просторового оброблення сигналів, в її діаграма спрямованості сформувалися провали у напрямку дії активних шумових завад, і забезпечили придушення сигналів завад до - 60 дБ.

**Список літератури:**

1. A Novel Towed Jamming Suppression with FDA-MIMO Radar/ Siqi Li; Zhulin Zong; Yun Feng/, Date Added to IEEE Xplore: 18 June 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2147009.2021.9455232>
2. Yudian Hou, Wen-Qin Wang, Robust adaptive beamforming with interference-plus-noise covariance matrix reconstruction for FDA-MIMO radar, Signal Processing. Vol. 232, July 2025. DOI: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2025.109929>
3. Jia, Mingjie and Sun, Yan and Wang, Wen-Qin, Fda-Mimo Radar Parameter Designing Against Range-Ambiguous Clutter and Scatter-Wave Jamming, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5101505>
4. Fuhai Wan, Jingwei Xu, Zhenrong Zhang Robust Beamforming Based on Covariance Matrix Reconstruction in FDA-MIMO Radar to Suppress Deceptive Jamming, MDPI-2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041479>

5. Guohao Sun; Ming Li; Jun Tong; Yuandong Ji Structured Clutter Covariance Matrix Estimation for Airborne MIMO Radar With Limited Training Data, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters ( Volume: 19)-2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3027818>
6. Yan Sun, Wen-qin Wang, Zhou He, Shunsheng Zhang FDA Jamming Against Airborne Phased-MIMO Radar-Part II: Jamming STAP Performance Analysis, Electrical Engineering and Systems Science, Signal Processing – 2024 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03055>
7. Shenghua Zhou, Hongwei Liu, Baochang Liu, Kuiying Yin Adaptive MIMO radar target parameter estimation with Kronecker-product structured interference covariance matrix, Signal Processing, Vol. 92, Iss. 5, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.08.025>
8. Ting Wang, Yongjun Zhao, Jie Huang A reduced-rank STAP algorithm for simultaneous clutter plus jamming suppression in airborne MIMO radar, 2017 18th International Radar Symposium (IRS). DOI: <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008095>
9. Jingwei Xu, Guisheng Liao Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar, Signal Processing. Vol. 113, August 2015. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014>
10. Monzingo R. A., Haupt R. L., Miller T. W. Introduction to Adaptive Arrays. *Institution Eng. Technol.*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1049/sbew046e>
11. Hubregt J. Visser Array and Phased Array Antenna Basics, 2005 John Wiley & Sons Ltd England. 359 p. ISBN-13 978-0-470-87117-1
12. Guolong Cui, Theory and Applications of MIMO Radar / Edited by Guolong Cui, Bin Liao, Yong Yang and Xianxiang Yu, 2024 Editorial Office MDPI Switzerland, 250 p. ISBN 978-3-7258-0236-4 (PDF). DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-0236-4>
13. Li Jian, MIMO radar signal processing / Jian Li, Petre Stoica. 2009 by John Wiley & Sons, Inc in Canada. 448 p., ISBN 978-0-470-17898-0.
14. Jamie Bergin, MIMO Radar Theory and Application. Jamie Bergin, Joseph R. Guerci. – 2018 Artech House in the United States of America. 230 p., ISBN-13: 978-1-63081-342-0
15. Fuzhen Zhang. The schur complement and its applications, 2005 Springer Science+Business Media, Inc. ISBN 0-387-24271-6.

#### **Chmelov V.O., Oliinyk M.V. FEATURES OF SPATIAL SIGNAL PROCESSING IN A VIRTUAL MIMO PHASED ARRAY WITH CONSIDERATION OF THE BLOCK STRUCTURE OF THE COVARIANCE MATRIX**

*The article considers a method for accelerating the adaptation of radar systems with phased array antennas under conditions of intense active noise jamming. A generalized model of active noise interference in a MIMO phased array is investigated, and the block structure of the interference correlation matrix is determined. An approach to the adaptation of a virtual MIMO phased array radar with orthogonal transmit signals is proposed, based on the use of the a priori known block structure of the “interference + noise” correlation matrix. The block structure of the matrix and the presence of zeros in the off-diagonal elements, resulting from the absence of correlation between active noise jamming signals, make it possible to replace the inversion of a large-dimensional correlation matrix with the inversion of individual lower-order blocks using the Schur algorithm. This significantly reduces computational complexity without loss of optimality in spatial processing. A mathematical model of the virtual MIMO phased array is developed, and the physical meaning of the diagonal and off-diagonal blocks of the interference correlation matrix is analyzed. Simulation results obtained in MATLAB confirm the effectiveness of the proposed method: the adaptation speed increases by a factor of 1.7 to 5.6 depending on the MIMO phased array configuration. Using the Maximum Likelihood optimality criterion, suppression of active noise jamming up to –60 dB was achieved. The limitations of the proposed adaptation method are identified, namely the requirement for orthogonality of probing signals to preserve the diagonal properties of the correlation matrix, the independence of active noise jamming signals, and a minimum required number of receiving channels in the MIMO phased array. The obtained results demonstrate the prospects of applying the method in radar systems with stringent requirements for rapid adaptation.*

**Keywords:** radar system, MIMO, phased antenna array, digital signal processing, active noise jamming, spatial filtering, block structure, optimization, adaptation.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026