

М. В. Олійник¹
О. В. Терещенко¹
О. Ю. Мирончук¹

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНФІГУРАЦІЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Стрімкий розвиток технологій, що використовуються для розробки БПЛА сприяє швидкому покращенню їхніх характеристик. Використання композитних матеріалів, мінімізація компонентів, велика швидкість руху робить такого роду цілі складними для виявлення традиційними радіолокаційними системами. Зменшення собівартості, еволюція каналів зв'язку та алгоритмів керування дозволяє використовувати велику кількість апаратів одночасно. Необхідність точного виявлення та відслідковування таких літальних апаратів визначає вимоги до високої роздільної здатності по куту. У разі використання традиційних радіолокаційних систем спостерігається протиріччя — для забезпечення високої роздільної здатності по куту потрібно збільшити кількість елементів антенної решітки та відповідно її апертури. Останнє призводить до збільшення помітності таких систем, а також це накладає вимоги до виготовлення антенної решітки, а саме до розміщення антенних елементів, оскільки похибки у їх положенні призводять до зменшення точності визначення положення цілі. Запропонований підхід для вирішення такого протиріччя є розробка радіолокаційних системи з використанням технології МІМО. Використання технології МІМО змінює структуру радіолокаційної системи, але введення поняття віртуальної антенної решітки дозволяє використовувати наявні алгоритми обробки радіолокаційної інформації без змін. Також ця технологія дозволяє гнучко формувати діаграму направленості віртуальної решітки. При цьому забезпечуються додаткові можливості щодо сканування простору, та одночасного спостереження багатьох цілей. Використання ортогональних сигналів для передачі погіршує енергетичні характеристики системи, але можливість незалежного формування зондувальних сигналів дозволяє за необхідності повернутися до класичної фазованої антенної решітки. Але деяким недоліком цієї технології є висока обчислювальна складність, необхідність паралельної обробки великої кількості інформації. Ці критичні обмеження у минулому, але наразі рівень розвитку електронно-обчислювальних засобів є достатнім для використання технології МІМО, а мінімізація забезпечує технологічність виробництва.

Ключові слова: МІМО, радіолокаційна система, ортогональні сигнали, віртуальна антенна решітка, малорозмірні цілі, безпілотні літальні апарати, цифрова обробка сигналів.

Вступ

Сучасні радіолокаційні системи (РЛС) повинні забезпечити високу точність виявлення та відслідковування літальних апаратів, зокрема безпілотних, які широко використовуються в різних цілях. У разі використання в РЛС традиційних антенних систем спостерігається протиріччя — для забезпечення високої роздільної здатності по куту потрібно збільшити кількість елементів антенної решітки та відповідно її апертури. Останнє призводить до збільшення помітності таких систем, а також це накладає вимоги до виготовлення антенної решітки, а саме до розміщення антенних елементів, оскільки похибки у їх положенні призводять до зменшення точності визначення положення цілі [1]—[3]. Запропонований підхід для вирішення такого протиріччя є розробка

радіолокаційних системи з використанням технології МІМО. Відмінною властивістю радіолокаційних систем, що використовують технологію МІМО (англ. Multiple Input Multiple Output), від класичних є можливість випромінювання ортогональних сигналів рознесеними у просторі передавачами та можливість приймання відбитих від цілей сигналів рознесеними у просторі приймачами [4].

У широкому сенсі, технологія МІМО передбачає синтез радіолокаційної системи складної структури з великою кількістю приймально-передавальних елементів. Отже, до МІМО можна віднести розосереджені радарні системи, що складають з множини незалежних елементів, де за рахунок комплексування даних можна досягти покращення характеристик виявлення радіолокаційних цілей та оцінки їхніх параметрів. Також до МІМО систем можна віднести моностатичні радарні системи, де декілька передавачів та приймачів утворюють єдину антенну систему складної конфігурації. На відміну від радіолокаційних систем з фазованими антенними решітками (ФАР), що використовують той самий сигнал на всіх елементах решітки з необхідним розподілом фаз, радіолокаційні системи з МІМО використовують комплекс ортогональних сигналів. Такий підхід суттєво розширює потенційні можливості радіолокаційних систем з МІМО щодо цифрового формування діаграми спрямованості антени, адаптації діаграми до роботи в складних завадо-цілевих умовах. У радіолокаційних системах з МІМО, завдяки передачі ортогональних сигналів, відсутній ефект променю, натомість енергія передається відповідно до діаграми направленості елемента решітки. Це забезпечує опромінювання усього простору радіолокаційного контролю, та стає можливим керування променем після прийому відбитих від цілі сигналів. У радіолокаційних системах з використанням такого підходу теж є недоліки, а саме ускладнення обробки інформації та гірші енергетичні характеристики. Вирішення проблеми оптимального використання енергії здійснюється завдяки гнучкості технології МІМО, а саме можливість синтезу сигналів з потрібними просторово-часовими характеристиками.

Ще однією перевагою радіолокаційних систем з МІМО є краща роздільна здатність за кутом, у порівнянні з антенами ФАР з тією ж кількістю передавальних/приймальних елементів. Це досягається застосуванням досконаліших алгоритмів оброблення прийнятих сигналів в РЛС з МІМО [5]—[7].

Модель обробки прийнятого сигналу

Радіолокаційна система з МІМО має структуру, показану на рис. 1. Передавальні елементи випромінюють ортогональні сигнали, приймальні отримують на вході суму усіх ехо-сигналів. За допомогою банку оптимальних фільтрів, на виході кожного приймального елемента буде виділено усі ехо-сигнали з відповідними фазовими затримками.

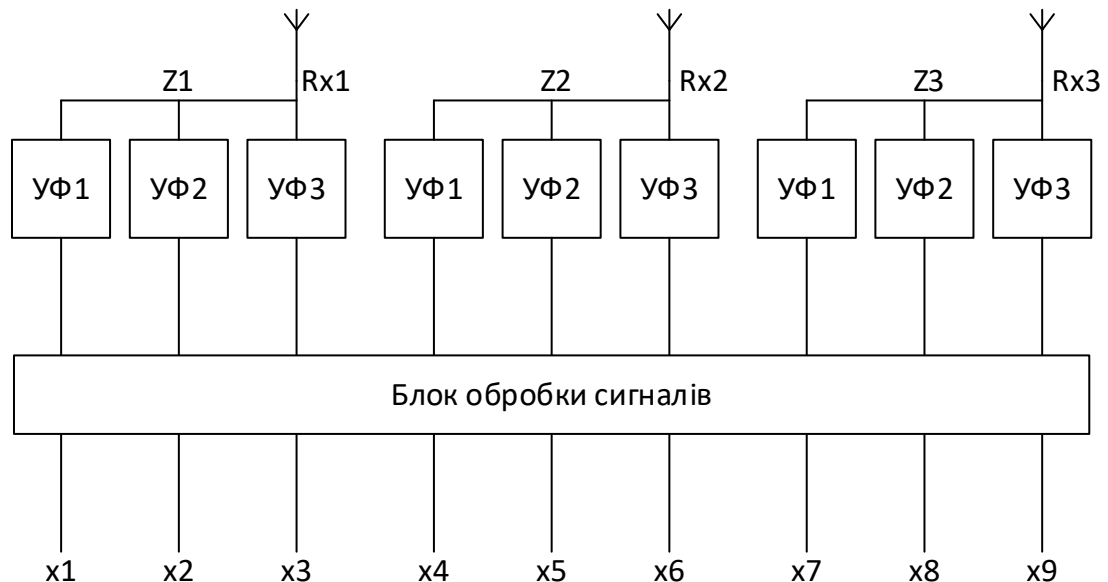


Рис. 1. Узагальнена структурна схема приймального каналу РЛС з МІМО та формування віртуальної ФАР

Для правильного розуміння сутності отриманої системи потрібно ввести поняття віртуальної антенної решітки, та описати модель прийнятого сигналу. У цьому прикладі розглянемо конфігурацію, показану на рис. 2. Антенна решітка складається з трьох приймально-передавальних елементів, що знаходяться у координатах $\{0, d, 2d\}$, така решітка є лінійною та еквідистантною.

У загальному вигляді аналітичний вираз прийнятого сигналу можна подати так [4]:

$$Z = \sum_{\delta} H_{\delta} S_{\delta} + N \quad (1)$$

де Z — матриця прийнятого сигналу S — вектор переданого сигналу, затриманого на час δ , N — вектор шумового сигналу.

Для простого випадку розглянемо сигнал, відбитий від точкової цілі. Оскільки ціль знаходиться у дальній зоні антени, фазовий фронт можна розглядати як плоский, відповідно фазовий розподіл на приймально-передавальних елементах можна описати такими виразами:

$$(H_{\delta})_{n,m} \propto e^{iku \cdot (y_n + x_m)}; \quad (2)$$

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

де k — хвильовий вектор, u — вектор напрямку на ціль, а y_n, x_m — це вектори, що описують положення приймальних та передавальних елементів. Кожен елемент матриці каналів H описує набір фази на елементі антенної решітки відносно фазового центру антени.

Для антенної системи, що містить 3 приймальні та 3 передавальні елементи, розташовані рівномірно на відстані d один від одного, у координатах $\{0, d, 2d\}$, матриця каналів матиме такий вигляд [8]:

$$H_{\delta} \propto \begin{pmatrix} e^{i\eta 2d} & e^{i\eta d} & e^{i\eta 0} \\ e^{i\eta d} & e^{i\eta 0d} & e^{-i\eta d} \\ e^{i\eta 0} & e^{-i\eta d} & e^{-i\eta 2d} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де
$$\eta = ku \cdot \frac{d}{\|d\|}. \quad (5)$$

У отриманій матриці наявні набіги фази, які не характерні решітці, складеної з трьох елементів, а саме $e^{i\eta 2d}$ та $e^{-i\eta 2d}$. Отриманий фазовий розподіл на елементах решітки можна представити у вигляді віртуальної решітки, що складається з п'яти елементів, які знаходяться у координатах $\{-2d, -d, 0, d, 2d\}$ відповідно до рис. 3. Також отримана матриця симетрична, та відповідно має елементи, що повторюються.

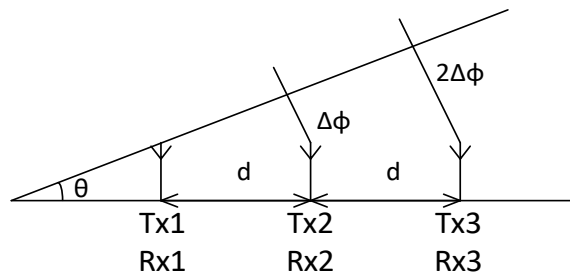


Рис. 2. Конфігурація приймально-передавальних елементів

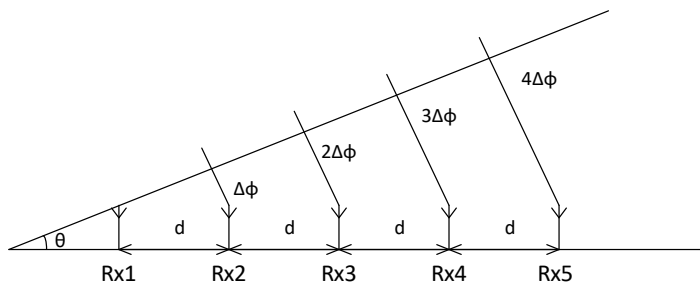


Рис. 3. Конфігурація віртуальних елементів решітки

Властивості віртуальної антенної решітки

Формула (4) показує зв'язок між фізичним положенням елементів реальної антенної решітки, та отриманої віртуальної. У загальному випадку кількість елементів віртуальної решітки дорівнює $M \cdot N$ але через можливу наявність повторюваних набігів фаз кількість елементів може бути меншою. Для прикладу розглянемо змінену конфігурацію антенних елементів, показано на рис. 4.

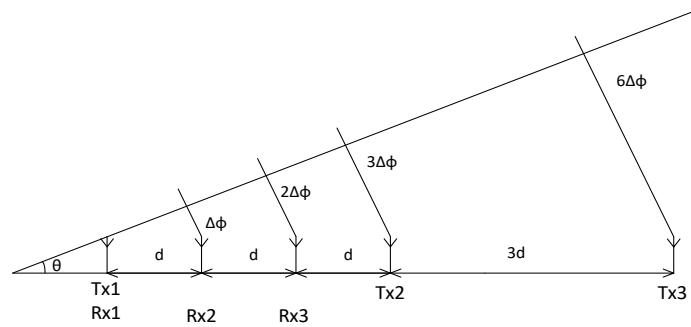


Рис. 4. Конфігурація реальних елементів решітки з рознесенням

У цій конфігурації передавальні елементи рознесені.

Передавальні елементи знаходяться за координатами $\{-3d, 0, 3d\}$, а приймальні за $\{-3d, -2d, -d\}$. Підставивши ці координати у (4), отримаємо матрицю каналів такого вигляду:

$$H_{\delta} \propto \begin{pmatrix} e^{i\eta 6d} & e^{i\eta d} & e^{i\eta 0} \\ e^{i\eta d} & e^{i\eta 0d} & e^{-i\eta d} \\ e^{i\eta 0} & e^{-i\eta d} & e^{-i\eta 2d} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Отримавши фазові затримки можна побудувати еквівалентну віртуальну решітку (рис. 5). Зауважимо, що приймальні елементи розмножені за положеннями передавальних. Адаптації положення реальних елементів, для отримання заданої конфігурації віртуальної решітки, та відповідно діаграми направленості описано роботах [9]—[12].

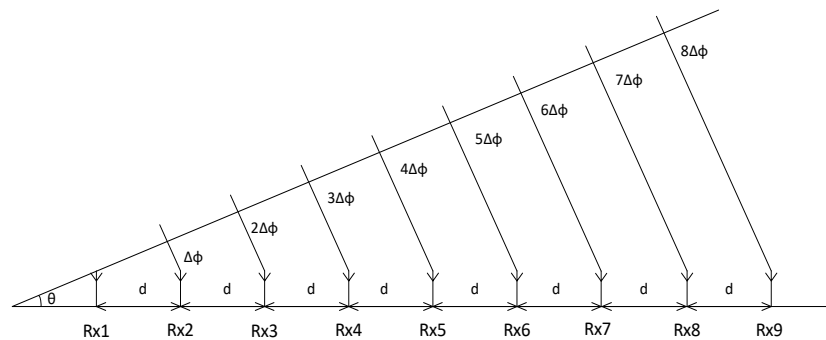


Рис. 5. Конфігурація віртуальних елементів решітки для реальних з рознесенням

На основі отриманих віртуальних решіток можна порівняти різні конфігурації реальних елементів, а саме їх вплив на ширину головної пелюстки діаграми направленості.

За результатами компаративного аналізу діаграм спрямованості стандартної ФАР та синтезованих віртуальних ФАР на основі технології МІМО можна підсумувати, що запропонований спосіб побудови антенної системи сучасної РЛС забезпечує подолання зазначеного вище протиріччя. При цьому за незмінної кількості фізичних елементів антенної системи — 6 штук, забезпечено підвищення роздільної здатності за кутом по азимуту. Отримані діаграми направленості демонструють, що за використання технології МІМО для решітки з рівномірно розподіленими приймально-передавальними елементами, ширина головної пелюстки діаграми направленості зменшилася до H градусів, як і звичайна ФАР, що має H градусів. Водночас використання рознесених передавальних елементів дозволяє отримати ширину головної пелюстки у H градусів. Це стало можливо за рахунок використання технології МІМО, спеціальних алгоритмів оброблення прийнятих сигналів та підбору оптимальної конфігурації розташування елементів антенної решітки.

Для компаративного аналізу застосовувалася антенна система з трьох елементів з апертурою $A = 2 \cdot d$, що відповідає конфігурації рис. 2, але за рахунок застосування технології МІМО зменшили ширину діаграми направленості у два рази рис. 6а, б. В іншому експерименті застосовувалася антенна система з конфігурацією рис. 4. За умови забезпечення ширини діаграми направленості 12 градусів порівняння побудови антенної системи звичайної ФАР та на основі МІМО

апертура антени у першому випадку була $9d$ а в другому $6d$. Отже, підтверджено можливість зменшення фізичного розміру антенної системи на 33% зі збереженням заданих характеристик діаграми спрямованості.

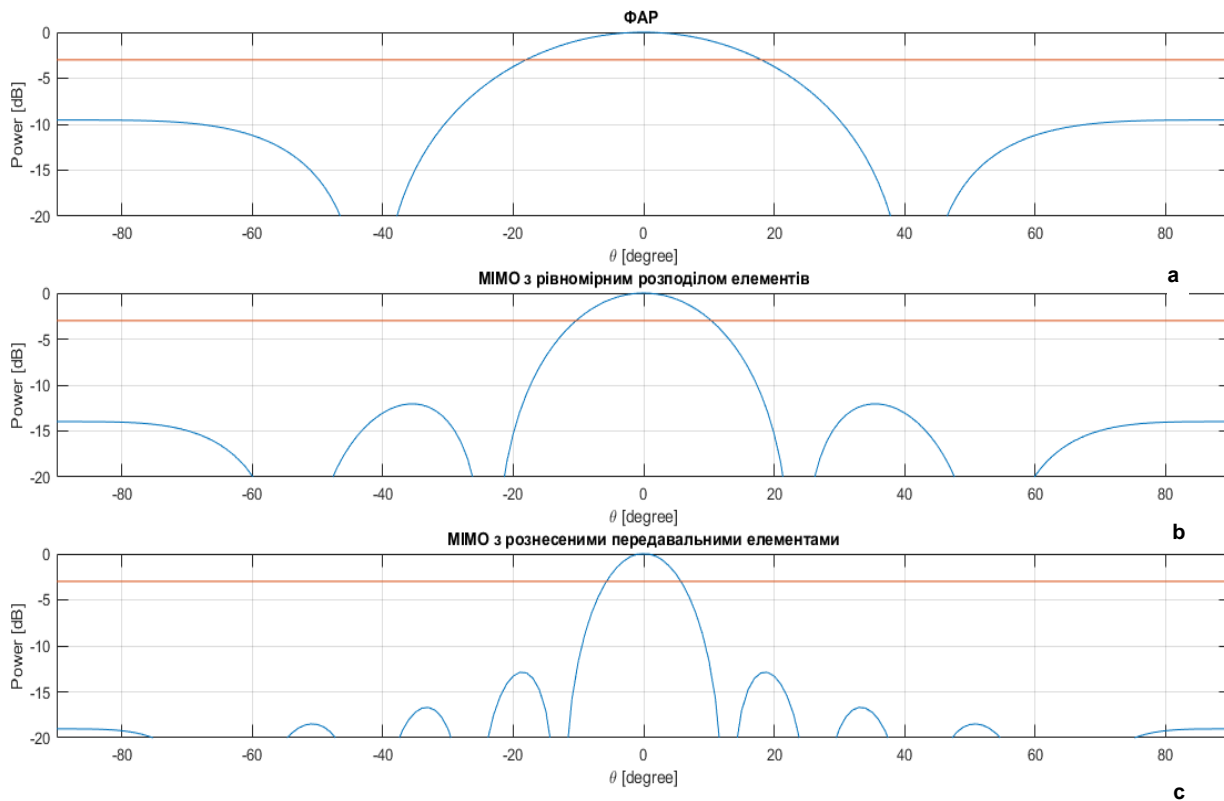


Рис. 6. Діаграми направленості антенних решіток

Висновки

Використання технології МІМО дозволяє вирішити протиріччя між розмірами антенної решітки та роздільною здатністю за кутом, а саме зменшувати фізичний розмір антенної системи на 30% у порівнянні зі звичайною ФАР. Такий підхід передбачає нові алгоритми цифрового оброблення сигналів, системи передачі ортогональних радіолокаційних сигналів. Побудова РЛС з використанням технології МІМО забезпечить відповідність сучасним вимогам до компактних мобільних систем виявлення БПЛА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] B. Yan, E. Paolini, L. Xu, and H. Lu, "A Target Detection and Tracking Method for Multiple Radar Systems," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-21, 2022, Art no. 5114721. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3183387>.
- [2] A. K. Agrawal, and E. L. Holzman, "Beamformer architectures for active phased-array radar antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 3, pp. 432-442, March 1999. <https://doi.org/10.1109/8.768777>.
- [3] S. Y. Zhuk, T. V. Malenychuk, O. S. Neumin, and O. Yu. Myronchuk, "Adaptive Radar Tracking Algorithm for Maneuverable UAV with Probabilistic Identification of Data Using Coordinate and Amplitude Characteristics," *Radioelectron. Commun. Syst.* no. 65, pp. 503-516, 2022. <https://doi.org/10.3103/S073527272212007X>.
- [4] J. Li, and P. Stoica, *MIMO radar signal processing*. New Jersey: Wiley, 2009, pp. 365-368.
- [5] X. Li, X. Wang, Q. Yang, and S. Fu, "Signal Processing for TDM MIMO FMCW Millimeter-Wave Radar Sensors," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167959-167971, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137387>.
- [6] R. Kishore Arumugam, A. Froehly, P. Wallrath, R. Herschel, and N. Pohl, "Signal Processing Architecture for a Trustworthy 77-GHz MIMO Radar," *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 1112-1122, 2024. <https://doi.org/10.1109/TRS.2024.3479711>.
- [7] O. Myronchuk, A. Brusko, and M. Oliinyk, "Modeling of Methods for Determining the Direction of Arrival of Radio Signals Using Phased Antenna Arrays," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755857>.
- [8] Robert Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Third Edition, Artech, 2017.
- [9] A. A. Yahia, and H. M. Elkamchouchi, "Design of Virtual Antenna Array for Direction of Arrival Estimation Using Real Antenna Array System," *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, JeJu, Korea (South), 2019, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC.2019.8793364>.

[10] A. Maltsev, A. Pudeyev, R. Weiler, M. Peter, W. Keusgen, and I. Bolotin, "Virtual Antenna Array Methodology for Outdoor Millimeter-Wave Channel Measurements," *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Washington, DC, USA, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7849080>.

[11] M. Li, F. Zhang, Y. Ji, and W. Fan, "Virtual Antenna Array with Directional Antennas for Millimeter-Wave Channel Characterization," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 8, pp. 6992-7003, Aug. 2022. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3161334>.

[12] A. Reyna, L. I. Balderas, J. C. Garza, G. Maldonado, and M. A. Panduro, "An Experiment of Virtual Antenna Arrays for 5G Applications," *2024 IEEE 1st Latin American Conference on Antennas and Propagation (LACAP)*, Cartagena de Indias, Colombia, 2024, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/LACAP63752.2024.10876375>.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Дата надходження: 8.12.2025

Дата прийняття до публікації: 27.03.2026

Дата публікації: 8.04.2026

Олійник Максим Віталійович — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0001-5201-1911>;

Терещенко Олександр Володимирович — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: alexandr.t.v.188@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0004-0420-3590>;

Мирончук Олександр Юрійович — д-р філософії, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: myronchukalex@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-5251-3578> .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

M. V. Oliinyk¹

O. V. Tereshchenko¹

O. Yu. Myronchuk¹

Improving the Configuration of the Radar System for UAV Detection Based on MIMO Technology

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The rapid development of technologies used in the development of UAVs leads to rapid improvement of their performance. The use of composite materials, minimization of components, and high speed make such targets difficult to detect by traditional radar systems. Reduced costs, evolution of communication channels and control algorithms allow for the use of a large number of devices simultaneously. The need for accurate detection and tracking of such aircraft determines the requirements for high angle resolution. When using traditional radar systems, there is a contradiction that to ensure high angle resolution, it is necessary to increase the number of antenna array elements and, accordingly, its aperture. The latter leads to an increase in the visibility of such systems, and it also imposes requirements for the manufacture of the antenna array, namely, the placement of antenna elements, since errors in their position lead to a decrease in the accuracy of determining the target position. The proposed approach to resolve this contradiction is the development of radar systems using MIMO technology. The use of MIMO technology changes the structure of the radar system, but the introduction of the concept of a virtual antenna array allows the use of existing radar information processing algorithms without changes. Also, this technology allows for flexible formation of the virtual array pattern. This provides additional opportunities for space scanning and simultaneous observation of many targets. The use of orthogonal signals during transmission worsens the energy characteristics of the system, but the possibility of independent formation of sensing signals allows, if necessary, to return to the classical phased array. However, some of the disadvantages of this technology are its high computational complexity and the need for parallel processing of a large amount of information. These limitations were critical in the past, but at the moment the level of development of electronic computing facilities is sufficient to use MIMO technology, and minimization ensures manufacturability of production.

Keywords: MIMO, radar system, orthogonal signals, virtual antenna array, small targets, unmanned aerial vehicles, digital signal processing.

Oliinyk Maksym V. — Post-Graduate Student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: oliinyk.ak@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0001-5201-1911>;

Tereshchenko Oлександр V. — Post-Graduate Student of the of Radioengineering Systems, e-mail: alexandr.t.v.188@gmail.com . <https://orcid.org/0009-0004-0420-3590>;

Myronchuk Oлександр Yu. — PhD, Associate Professor of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: myronchukalex@gmail.com . <https://orcid.org/0000-0001-5251-3578> .