

# ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ДЕТЕКЦІЇ СТАТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЗЕМЛІ ІЗ ДОПОМОГОЮ МІКРОХВИЛЬОВОГО КАСКАДНОГО РАДАРУ

І. В. Корчевой<sup>1,a</sup>, В. В. Іванова<sup>1</sup>, В. М. Степаненко<sup>1</sup>, Г. Є. Монастирський<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

## Анотація

Проведена експериментальна перевірка можливості виявлення статичних об'єктів розташованих на землі із малою ефективною площею розсіяння МІМО радаром міліметрового діапазону. Продемонстровано вплив калібрування системи на якість детекції об'єктів, зокрема у випадках зашумлених умов середовища.

**Ключові слова:** МІМО радар, бічні пелюстки, калібрування

## Вступ

Сучасні технології радарів відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки, ефективності та автоматизації різних сфер діяльності людини, включаючи оборону, авіацію, передбачення погоди та інші різноманітні системи моніторингу. Радари (Radio Detection and Ranging) використовують радіохвилі для виявлення об'єктів, вимірювання відстані до них, їх швидкості та напрямку руху. Здатність працювати за різних погодних умов і в умовах обмеженої видимості робить ці системи незамінними в багатьох критичних ситуаціях.

Першими були так звані моностатичні радари, тобто радари в яких передавач і приймач знаходяться в одному місці та програмовано антена перемикається з одного режиму в інший. Наступними були бістатичні радари (див. рис. 2), в яких передавач та приймач просторово рознесені. Це дозволило протидіяти технології «стелс» та впровадити напівактивне керування ракетами.

Логічним розвиненням бістатичних радарів стали фазові ґратки. Збільшення кількості передавачів та їх регулярне розташування дозволило підвищити розділову здатність радару, а маніпулювання фазовою затримкою когерентних сигналів дозволило майже миттєво змінювати зону сканування (перемикаючи поле зору).

З розвиненням обчислювальних здатностей комп'ютерів, стало можливим досягти ще більшої роздільної здатності. Радари з синтезованою апертурою (SAR) використовують обробку сигналів для збільшення апертури, за рахунок руху антени.

Однією з найсучасніших реалізацій радарної технології є МІМО (Multiple Input, Multiple Output) радари. Завдяки використанню кількох передавальних і приймальних антен та за умови ортогональності сигналів формується віртуальний масив антен. Якщо кожен приймач може відрізнити від якого передавача

він отримує сигнал, то такі сигнали є ортогональними. Віртуальний масив антен — сукупність уявних антен, які є еквівалентними просторовій структурі великої антенної решітки без її фізичної реалізації.

Фазові ґратки та радіолокатори з синтезованою апертурою (SAR) відомі вже давно, однак через високу вартість їх застосування було обмежено переважно військовою сферою. Основне призначення МІМО-радарів полягає в імітації функціональних можливостей цих високовартісних систем [1].

Оскільки ключовою особливістю, яка забезпечує високу розділну здатність МІМО радарів є ортогональність сигналів передавача, то споживча потужність розділяється між каналами передачі хвиль, що призводить до зменшення можливої дальності [2]. Тому типовим застосування МІМО радарів є зйомка зображень на малій та середній відстані, часто з поєднанням технології SAR [3].

Для ідеології МІМО не принциповий вибір смуги частот (приклад сонару [4]), але міліметровий діапазон хвиль є привабливим, оскільки дає можливість працювати за будь-яких погодних умов.

Аналіз літератури вказує, що переважно застосування МІМО радарів тестувалося для об'єктів із відносно великою площею розсіяння, що знаходяться в відносно "незашумленому" середовищі (наприклад автомобілі [5]) або об'єктів в русі (як дрони на фоні неба [6]). Водночас становить інтерес дослідити можливість їх застосування для ідентифікації статичних об'єктів, що мають малу RCS та замасковані різноманітними перешкодами.

## 1. Основні принципи функціонування МІМО радару

### 1.1. Віртуальна фазова ґратка МІМО радару

Розглянемо МІМО який складається з  $M_t$  передавачів та  $M_r$  приймачів. Нехай сигнали ортогональні, тоді існує  $M_t \times M_r$  каналів по яким може поширюва-

<sup>a</sup>korchevou.ihor-ipt@lll.kpi.ua

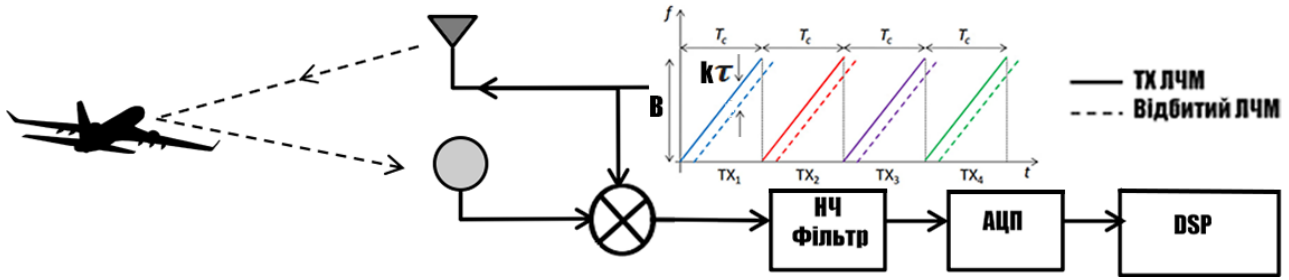


Рис. 1. Схема обробки даних для FMCW радару за [1] та [7]. На вставці показано, як забезпечується ортогональність ЛЧМ імпульсів від різних передавачів  $TX_1, TX_2, \dots$ . Різниця  $k\tau$  між миттєвими значеннями частоти переданого і прийнятого сигналу пропорційна відстані до об'єкту (див. 6)

тись сигнал. Тобто за допомогою  $M_t + M_r$  антен можна синтезувати віртуальну фазову ґратку з  $M_t \times M_r$  антенами.

Для визначення розташування елементів синтезованого масиву можна використовувати теорему Келла [8] про еквівалентність бістатичних та моностатичних систем.

Якщо зворотне розсіювання від цілі нечутливе до бістатичного кута  $\beta$ , який визначається геометрією передавача, приймача і цілі, то бістатичний RCS добре апроксимується моностатичним RCS, вимірюваному на бісектрисі кута  $\beta$ . За цієї умови моностатично-бістатична еквівалентність має незначний вплив на зображення цілі.

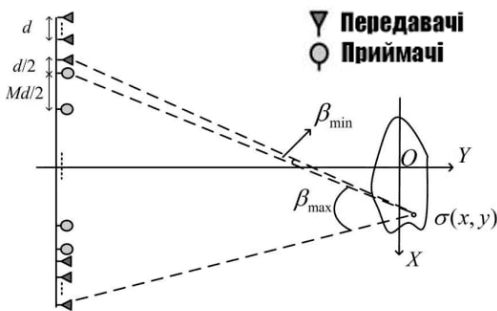


Рис. 2. Бістатична геометрія MIMO радару [8]

На рис. 2 показано приклад бістатичної геометрії, де  $d$  — відстань між передавальними антенами,  $\beta_{min}, \beta_{max}$  — мінімальний та максимальний можливі бістатичні кути.

Отже, для одновимірного масиву реальних приймачів/передавачів, розглядаючи кожний приймач та передавач як бістатичну пару, для якої виконується теорема Келла, розташування елементів синтезованого масиву визначається:

$$x_{ij} = \frac{x_{r,i} + x_{t,j}}{2} \quad i = 0, \dots, M_r; \quad j = 0, \dots, M_t \quad (1)$$

де  $x_{r,i}$  — координата  $i$ -того приймача,  $x_{t,j}$  — координата  $j$ -того передавача,  $x_{ij}$  — координата синтезованого елемента в віртуальній фазовій ґратці (приклад такої ґратки показано на рис. 4 б).

Необхідною умовою реалізації віртуальної фазової ґратки є ортогональність сигналів від різних

передавачів. Для цього використовують два простих підходи – часове (див. рис. 1) або частотне мультиплексування. Приклад на рис. 1 ілюструє як в рівні проміжки часу, окремо одне від одного випромінюються сигнали різними передавачами.

### 1.2. Принцип формування та обробки сигналів в FMCW радарх

MIMO радары зазвичай працюють на неперервній хвилі, оскільки приймачі та передавачі розділені, і немає накладання випромінювального та відбитого сигналу. Для передачі корисної інформації, випромінювання частотно модулюється. Цей тип хвиль, неперервна хвиля з частотною модуляцією, носить назву chirp (далі ЛЧМ, від лінійна частотна модуляція), а радары, які працюють за цим принципом називають FMCW (Frequency-modulated continuous wave) радары.

Математично, ЛЧМ можна записати так:

$$s(t) = \exp[j(2\pi f_c t + \pi k t^2)]; \quad t \in [-T_c/2; T_c/2] \quad (2)$$

де  $f_c$  — центральна частота,  $T_c$  — тривалість випромінювання,  $k = B/T_c$  — швидкість зміни частоти при модуляції,  $B$  — ширина смуги пропускання частот.  $k$  може бути як додатнім — наростаюча ЛЧМ, так і від'ємним — спадна ЛЧМ.

Тоді час затримки від цілі до  $ij$ -того віртуального приймача можна обрахувати

$$\tau_{ij} = \frac{2R}{c} + \frac{2x_{ij} \sin \theta}{c} \quad (3)$$

Тоді можна очікувати отримати назад сигнал:

$$r_{ij} = A \cdot s(t - \tau_{ij}) \quad (4)$$

де  $A$  це константа, яка враховує комбінацію втрат при розповсюдженні та підсилення антени.

Отриманий від об'єкту сигнал приходить на гетеродин, де міксується із з сигналом випромінювання. Сигнал від гетеродину проходить через фільтр низьких частот (рис. 1)

Отже, сигнал піддається демодуляції, результат якої можна записати як

$$u_{ij} = r_{ij}^* s(t) = [A \cdot s^*(t - \tau_{ij})] \cdot s(t) = A \cdot \exp [j(2\pi f_c \tau_{ij} + 2\pi k \tau_{ij} t - \pi k \tau_{ij}^2)] \quad (5)$$

Експонента з показником  $2\pi j k \tau_{ij} t$  показує перетворення часу затримки з часової області в частотну. Частоту, отриману від  $M_{t,i}$  передавача для  $M_{r,j}$  приймача можна записати як:

$$f_{ij} = k \tau_{ij} \approx 2k \frac{R}{c} \quad (6)$$

Отже, відстань може бути знайдена шляхом Фур'є перетворення, що реалізується в масштабі реального часу високошвидкісним спеціалізованим процесором DSP (Digital Signal Processing на рис. 1), а її просторова роздільна здатність обмежена роздільною здатністю частоти.

$$\Delta R = \frac{c}{2k} \frac{1}{T_c} = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

### 1.3. Визначення AoA цілі та кутової роздільної здатності

Для визначення кута, під яким приходить сигнал на радар AoA (angle of arrival) потрібно, як мінімум 2 приймальні антени. Розглянемо приклад однорізного масиву з одним передавачем та чотирма приймачами:

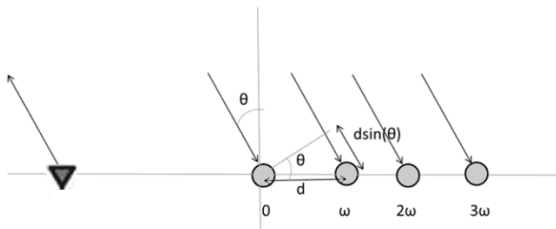


Рис. 3. Принциповий метод визначення кута [9]

Якщо сигнал приходить до приймача під кутом, як показано на рис. 3, то для кожного наступного приймача сигнал буде мати на сталу  $\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) d \sin \theta$  різницю фаз більше від попереднього. Тобто утворюється масив  $[0, \phi, 2\phi, \dots, M_r \phi]$ . Провівши перетворення Фур'є над цими даними, отримуємо AoA, оскільки  $\theta = \arcsin \left(\frac{\phi \lambda}{2\pi d}\right)$ . З того факту, що однозначно різницю фаз можна визначити лише в межах  $(-\pi; \pi)$ , то при  $d = \lambda/2$  отримуємо максимально можливе поле зору в  $90^\circ$

Роздільна здатність для кута  $\Delta\theta$  визначається ефективною апертурою  $A_e$  синтезованої ґратки:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2A_e \cos(\theta)} = \frac{\lambda}{2(M_t M_r - 1)d \cdot \cos(\theta)} \quad (8)$$

## 2. Експериментальні подробиці

Для поставленої цілі, в ході роботи, було досліджено можливість детекції статичних об'єктів на землі, які мали різну відбивальну здатність із допомогою мікрохвильового каскадного радару на базі чіпів AWR2243 від Texas Instruments в режимі MIMO. Ортогоналізація каналів відбувалась через режим TDM (time division multiplexing).

Каскад складався з 4 чіпів, кожен чіп управляє трьома передавачами та чотирма приймачами. Схема розташування передавальних та приймальних антен каскаду, а також відповідна їм віртуальна ґратка показана на рис. 4.

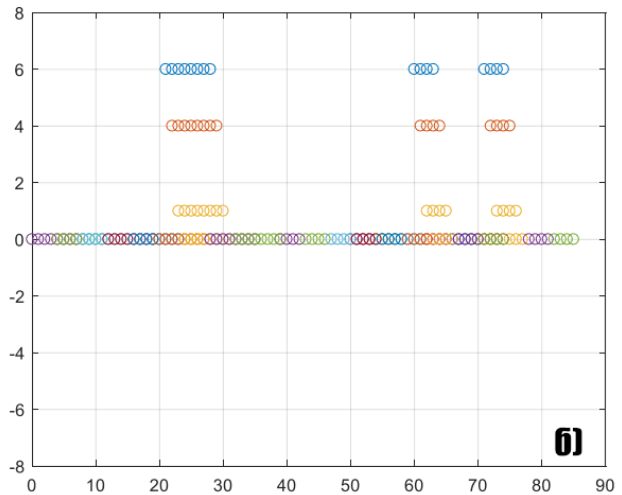
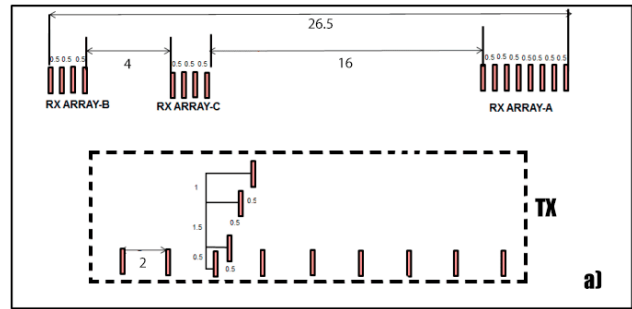


Рис. 4. Схема а) розташування передавальних та приймальних антен [2]. Відстань вказана в довжинах хвиль  $\lambda$ . Схема б) віртуальна фазова ґратка, що їй відповідає.

Дані було знято, в сніжну погоду. В якості цілей було обрано три металевих тіла круглої форми, з різними діаметрами та чотири металеві палки. Загалом три досліди.

## 3. Результати

### 3.1. Дослід із кутовим відбивачем і калібрування радару

Перед початком зйомки було виконано калібрування з використанням саморобного кутового відбивача, виготовленого з фольги (Рис. 5). Відбивач встановлювався на відстані близько 5 м перпендикулярно до площини радару.

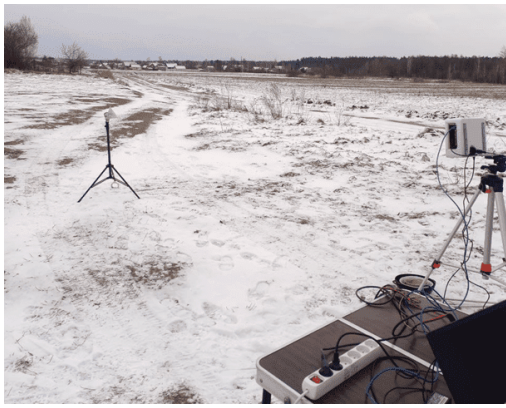


Рис. 5. Фотографія дійсного положення кутового відбивача

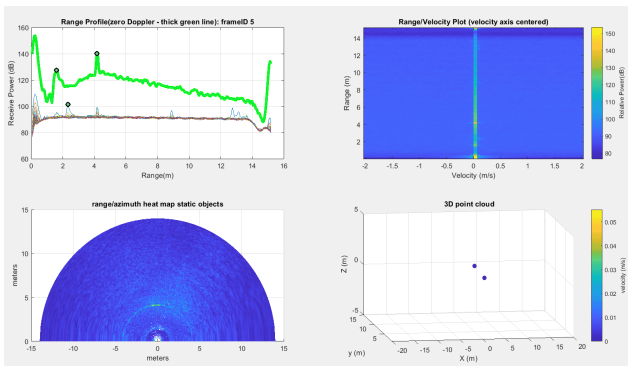


Рис. 6. Вигляд вікна обробки

На рис. 6 представлено результати обробки даних для одного з кадрів.

Верхній лівий графік ілюструє залежність інтенсивності від відстані при нульовому доплерівському зсуві (зелена лінія) та, окремо, від кожного каналу (різнокольорові лінії). Виражені локальні максимуми отриманої потужності в межах 1–5 м. Кружечки показують кількість цілей детектованих CFAR (constant false alarm rate) алгоритмом.

На графіку дальність–швидкість (верхній правий) спостерігається висока концентрація енергії поблизу нульової радіальної швидкості, що додатково підтверджує відсутність рухомих об'єктів у полі зору радару. Потужність сигналу відображено в логарифмічному масштабі, що дозволяє чітко локалізувати сильні відбитки.

У нижньому лівому графіку зображено, так званий Heat map, в координатах дальність–азимут, але обробка без калібрування не дає побачити чітку локалізацію відбивача.

У правому нижньому куті подано просторову реконструкцію сцени у вигляді 3D-точкової хмари, де кольором закодовано оцінку радіальної швидкості.

Оскільки досліджувані об'єкти є статичними, правий верхній та нижній графіки надалі зображуватись не будуть.

Теплова карта від кутового відбивача демонструє наявність декількох розмитих відбитків, розташованих на дифузному кільці радіусом, що дорівнює відстані від радару до відбивача (рис. 6). Попри те, що

точність геометрії кутового відбивача (відхилення кутів між гранями від  $90^\circ$  та орієнтації відносно центру каскаду) була невідома і достовірно визначити його ефективну площу розсіювання (RCS) було неможливо, данні отримані від нього було використано для формування спеціального файлу калібрування. Таке калібрування дозволяє зменшити фазові та частотні невідповідності між каналами, що покращує формування діаграми направленості та знижує рівень бокових пелюсток. Водночас амплітудне вирівнювання на основі такого еталона є неточним, що може знижувати чутливість системи до об'єктів з низькою RCS. Як видно із рис. 7, якщо застосувати таку калібровку для даних, отриманих для кутового відбивача на тепловій карті залишається тільки один об'єкт, а інтенсивність дифузного кільця значно зменшується

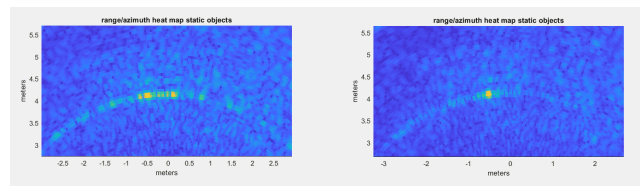


Рис. 7. Теплова карта кутового відбивача без калібрування (ліворуч) та з калібрування (праворуч)

### 3.2. Теплові карти досліджуваних об'єктів

Теплові карти статичних об'єктів на землі із різною RCS наведено знизу на рис. 8 та рис. 9.

Як видно застосування навіть недосконалого калібрування, зробленого в польових умовах, дозволяє провести однозначну реєстрацію об'єктів округлої форми із площею розсіювання декілька квадратних дециметрів на відстані до 20 метрів. Проте реєстрація об'єктів лінійної геометрії із товщиною порядку 1–2 см і довжиною до 1 м не є однозначною і часто губиться на фоні землі.

Оцінка за формулами 7 та 8 просторової та кутової розділової здатності каскаду дають значення 5 см і 0.01, відповідно. Ці значення значно менше, ніж відстані між досліджуваними об'єктами і їх кутові розміри. Тому, передбачається, що застосування більш акуратної калібрування із використанням коректної геометрії зйомки і кутових відбивачів, а також застосування процедури деконволюції із використанням Point Spread Function дозволить значно покращити якість ідентифікації об'єктів.

## 4. Висновок

У роботі продемонстровано здатність ММО-радарів здійснювати детекцію статичних об'єктів із низькою радіолокаційною сигнатурою за умов наявності перешкод. Результати експериментів підтвердили важливість застосування калібрування для зменшення впливу бічних пелюсток та підвищення точності визначення координат об'єктів.

Розглянуті принципи формування віртуальної ґратки, а також методи обробки сигналів у FMCW-системах, є ключовими для реалізації високої про-

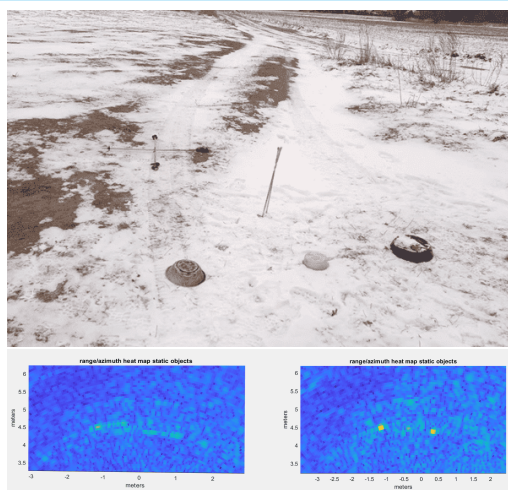


Рис. 8. Розташування об'єктів (верхній рисунок) на відстані приблизно 5 метрів від радару і відповідні теплові карти без (нижній лівий) та з калібруванням (нижній правий)

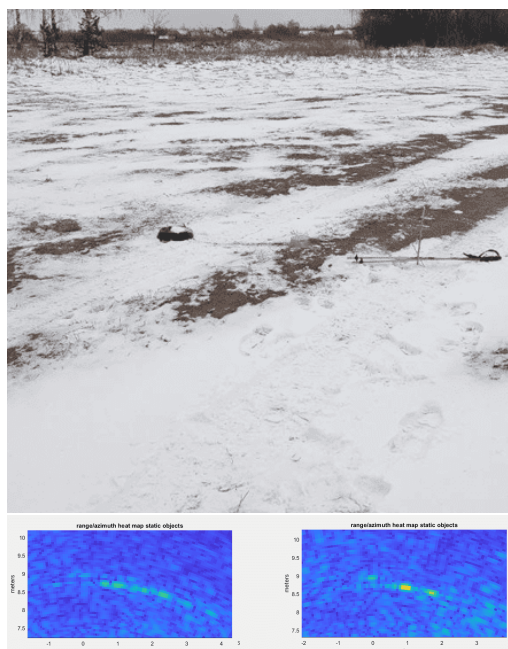


Рис. 9. Розташування об'єктів (верхній рисунок) на відстані приблизно 10 метрів від радару і відповідні теплові карти без (нижній лівий) та з калібруванням (нижній правий)

сторової роздільної здатності. Отримані результати свідчать про доцільність подальшого вдосконалення системи калібрування та застосування додаткової обробки сигналів, таких як деконволюція.

## Перелік використаних джерел

1. *Huang D., Patrick Y.* FMCW Based MIMO Imaging

- Radar. — 2014.
2. *Texas Instruments.* Signal Processing User's Guide: Cascade Radar with mmWave Sensors. — 2020. — URL: [https://e2e.ti.com/cfs-file/\\_\\_key/communityserver-discussions-components-files/1023/signalProcessing\\_5F00\\_userguide\\_5F00\\_4chipCascade.pdf](https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/1023/signalProcessing_5F00_userguide_5F00_4chipCascade.pdf).
  3. *Yanik M. E., Wang D., Torlak M.* 3-D MIMO-SAR Imaging Using Multi-Chip Cascaded Millimeter-Wave Sensors // 2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). — 2019. — С. 1—5. — DOI: [10.1109/GlobalSIP45357.2019.8969133](https://doi.org/10.1109/GlobalSIP45357.2019.8969133).
  4. High-angular- and range-resolution imaging using MIMO sonar with two-dimensional deconvolution / X. Liu, Y. Yang, C. Sun, J. Zhuo, Y. Wang, Q. Zhai // IET Radar, Sonar & Navigation. — 2023. — Т. 17, № 6. — С. 991—1001. — DOI: <https://doi.org/10.1049/rsn2.12393>. — eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/rsn2.12393>. — URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/rsn2.12393>.
  5. *Daraghma R. S. M.* The Effect of Radar Cross Section and Speed of Target on the Detection of MIMO Radar // Proceedings of the Tenth International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOMM 2018). — Athens, Greece : IARIA, 2018. — С. 36—40. — URL: [https://www.thinkmind.org/articles/spacomm\\_2018\\_5\\_10\\_20046.pdf](https://www.thinkmind.org/articles/spacomm_2018_5_10_20046.pdf).
  6. DoA Estimation for Micro and Nano UAV Targets using AWR2243 Cascaded Imaging Radar / T. Kavya, V. G S, S. Pathipati, L. V, P. Bethi // . — 12.2022. — С. 528—531. — DOI: [10.1109/iSES54909.2022.00115](https://doi.org/10.1109/iSES54909.2022.00115).
  7. *Texas Instruments.* mmWave Sensing: FMCW Radar : тех. звіт. / Texas Instruments. — n.d. — URL: [https://www.ti.com.cn/content/dam/videos/external-videos/en-us/2/3816841626001/5415203482001.mp4/subassets/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing\\_0.pdf](https://www.ti.com.cn/content/dam/videos/external-videos/en-us/2/3816841626001/5415203482001.mp4/subassets/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing_0.pdf).
  8. *Liu Y., Xu X.* MIMO Radar Images of a Trihedral Corner Reflector for Near-Field Measurement // 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). — 2017. — С. 1—2.
  9. *Texas Instruments.* Overview of Cascade Radar System : тех. звіт. / Texas Instruments. — 2018. — SWRA554A. — URL: <https://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf>.