

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Колеснікова Дениса Вікторовича на тему «Метод статичного синтезу апертури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка**

На засіданні кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем за участі: голови засідання – д-р техн. наук, доцента, зав. кафедри Жили С.С; та учасників – д-р техн. наук, доцента Попова А.В.; д-р техн. наук, професора Волосюка В.К.; д-р техн. наук, професора Павлікова В.В.; д-р техн. наук, професора Руженцев М.В.; канд. техн. наук, доцента Шульгіна В.І.; канд. техн. наук, доцента Абрамова О.Д.; канд. техн. наук, доцента Мазуренка О.В.; канд. техн. наук, доцента Нежальської К.М.; канд. техн. наук, доцента Одокієнка О.В.; канд. техн. наук, доцента Щербини К.О.; канд. техн. наук, доцента Вонсовича М.А.; ст. викладача Душепи В.А.; аспіранта Власенка Д.С.; аспіранта Церне Е.О.; аспіранта Черепніна Г.С.; аспіранта Інкарбаєва О.С.; аспіранта Кошарського В.В.; аспіранта Ковальчука Д.І.; аспіранта Перетятко М.С.; д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій ім. О.О. Зеленського Лукін В.В.; д-р техн. наук, професор кафедри авіаційних радіотехнічних систем навігації та посадки Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба Костенко П.Ю., відбулася публічна презентація дисертаційної роботи Колеснікова Дениса Вікторовича на тему «Метод статичного синтезу апертури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю».

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи, ухвалено висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

### **1. Актуальність теми дослідження.**

Для отримання зображень досліджуваних об'єктів чи ділянок територій використовуються системи, що оперують у різних діапазонах хвиль – оптичному, інфрачервоному чи радіо діапазоні. Кожний з цих діапазонів має свої особливості та певну галузь застосування, різний ступінь розвитку елементної бази, використовується окремо або у комбінації з іншими. Не зважаючи на більші габаритні розміри радіосистем в порівнянні з оптичними та інфрачервоними камерами, системи радіобачення поверхні вдосконалюються вже більше ніж 50 років. В питаннях дослідження земної поверхні найбільшого розвитку отримали радари з синтезуванням апертури, які встановлюються на системи космічного (або авіа) базування. Такі системи можуть використовуватися не тільки, як системи картографування, але й в питаннях вивчення підстильної поверхні, контролю стану природних ресурсів, контролю стану аграрних місцин, вивчення

та попередження екологічних катастроф тощо. Роздільна здатність отримуваних радіозображень радарів з синтезованою апертурою сягає дециметрових показників з низькоорбітальних супутників, що може бути співставно з системами оптичними тих же супутників.

Іншим напрямком вивчення об'єктів у радіодіапазоні є системи що використовують метод побудови та оброблення сигналів згідно з технологією апертурного синтезу. Найбільшого поширення та розвитку отримали інтерферометричні системи наземного базування, що використовуються у дослідженнях космічних об'єктів – радіотелескопи. У таких системах просторова роздільна здатність сягає сотих та навіть тисячних кутових секунд.

Окрім задач глобального радіобачення з аерокосмічних носіїв існують і локальні, тобто задачі статичних досліджень в лабораторіях або на спеціально обладнаних полігонах, в безлунних камерах. Актуальним сьогодні є формування тестових зображень поверхонь, наземних споруд, повітряних суден та різноманітної техніки. Також постійно розвиваються технології створення вузлів, приладів, агрегатів з можливістю їх неруйнівного контролю через радіопрозорі вікна в корпусах. В таких вимірюваннях відкриваються нові можливості з вибору умов вимірювань, траєкторій руху, варіації вимірювальної техніки (різні діапазони хвиль, антени, режими роботи).

Системи космічного базування не можуть вирішувати (або можуть з певними обмеженнями) задачі локального радіобачення. Вони є громіздкими, мають завелику масу, залежні від орбіти та обертання Землі, алгоритми побудови зображень залежні від великої висоти над вимірюваною областю. Майже те ж саме справедливо для систем апертурного синтезу наземного базування: для отримання найкращої роздільної здатності треба мати бази у десятки кілометрів між елементами радіотелескопів, а також є залежність від обертання Землі задля заповнення просторових частот отримуваних зображень.

За останні десятиріччя було реалізовано низку радіотехнічних систем з синтезуванням апертури, що могли б отримувати зображення об'єктів у безпосередній близькості до системи. З недоліків таких систем можна відмітити великі габарити, побудова на основі інженерного досвіду та думки, та відсутність вирішення оптимізаційної задачі. Також ці системи реалізують суто боковий огляд лише при прямолінійній траєкторії руху носія. Натомість сучасні системи, а саме БПЛА чи програмно-визначаємі пристрої сканування, можуть змінювати своє положення та напрямок руху достатньо різко та за заданими координатами або напрямками, тобто траєкторія руху може бути непрямолінійною. У такому випадку, траєкторія руху може стати джерелом додаткової інформації для підвищення роздільної здатності зображень, так само як і модуляція сигналів, МІМО-ідеологія побудови антен та накопичення незалежних баз рознесених у просторі антен інтерферометричних систем апертурного синтезу.

Виходячи з наведеного можна стверджувати, що на сьогодні постала актуальна наукова задача статистичного синтезу методу та алгоритму формування радіозображень статичних сцен з високою роздільною здатністю та розробки принципів їх практичної реалізації у системах дистанційного зондування та неруйнівного контролю.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Отримані автором результати дисертації використовувались при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» і були відображені в наступних звітах про НДР: «Основи теорії проектування аерокосмічних когнітивних радарів з оптимальною просторово-часовою обробкою сигналів, розширеною зоною огляду і високою просторовою роздільною здатністю» (№ДР 0120U102082, 2020-2022 рр.), «Малогабаритний бортовий радар з синтезуванням апертури антени для БПЛА та вертольотів» (№ДР 0224U002816, 2023-2024 рр.).

## **3. Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Отримали подальшого розвитку математичні моделі опису когерентних та некогерентних радіолокаційних зображень, що формуються в радіолокаційних системах з синтезуванням апертури при довільній траєкторії руху носія. На відміну від існуючих моделей, представлені нові аналітичні вирази з одного боку ґрунтуються на точній теорії дифракції, теоремах Кірхгофа і Релея-Зоммерфельда, а з іншого – враховують особливості побудови радіозображень в зонах Френеля і Фраунгофера, що дозволяє визначати фізичну сутність формування радіолокаційних зображень при довільній траєкторії руху, змінних кутах візування, заданих розмірах несинтезованих бортових антен, та параметрах електродинамічних моделей підстильної поверхні.

2. Вперше отримано метод оптимального формування когерентних радіолокаційних зображень поверхонь з технологією статичного синтезу апертури, який, на відміну від існуючих, дозволяє формувати зображення фіксованої ділянки місцевості з високою роздільною здатністю за дальністю та азимутом за рахунок когерентної просторово-часової обробки безперервних сигналів без модуляції при складних непрямолінійних траєкторіях руху радіолокаційного сенсору.

3. Удосконалено принципи побудови радіолокаційних систем формування когерентних зображень поверхонь з рухомих носіїв, запропоновано структурну схему радіотехнічної виміральної системи з технологією статичного синтезування апертури, яка відповідає новому синтезованому оптимальному методу високоточного радіобачення фіксованої сцени огляду.

4. Отримав подальшого розвитку метод імітаційного моделювання радіолокаційних зображень поверхонь, який враховує умови огляду сцени, траєкторію руху носія радіовимірювача та її випадкову варіацію, алгоритми когерентного оброблення прийнятих траєкторних сигналів та внутрішні шуми системи. Новизною вирізняється методи врахування складних траєкторій руху носія та оброблення безперервних траєкторних сигналів при побудові когерентних радіолокаційних зображень.

#### **4. Практичне значення результатів роботи.**

1. Розроблені алгоритми просторово-часового оброблення сигналів у системах з синтезуванням апертури антени зі складними непрямолінійними траєкторіями руху носія відкривають перспективний напрямок створення нових методів високоточного радіобачення з БПЛА та вертольотів.

2. Розроблена структурна схема радару формування радіозображень поверхонь з технологією статичного синтезу апертури є основою для створення перспективних високоточних систем радіобачення з фіксованою сценою огляду, зокрема лабораторних прототипів аерокосмічних радарів дистанційного зондування та радіотехнічних систем неруйнівного контролю.

3. Розвинутий метод імітаційного моделювання радіолокаційних зображень дозволить розширити можливості з імітаційного моделювання когерентних систем формування радіозображень заданих поверхонь.

#### **5. Апробація/використання результатів дисертації.**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях:

- 1) 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC 2022);
- 2) 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2023);
- 3) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2023).

#### **6. Дотримання принципів академічної доброчесності.**

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Колеснікова Дениса Вікторовича визнана оригінальною роботою, яка виконана самостійно і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Зміст основних розділів дисертації перевірено 10.06.2024 р. на наявність текстових запозичень в системі «UNICHECK», в порівнянні з файлами бібліотеки корпоративного облікового запису Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства.

**7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.**

За результатами досліджень опубліковано 8 наукових публікацій. Серед публікацій:

- 1) 2 статті у наукових періодичних видання України категорії «А», що індексуються у SCOPUS, Q3 (зі співавторами);
- 2) 1 стаття у фаховому виданні категорії «А», що індексуються у Web of Science Core Collection (зі співавторами);
- 3) 1 стаття у науковому фаховому виданні України категорії «Б»;
- 4) 4 публікації в працях міжнародних конференцій, матеріали яких включено у базу даних Scopus (з співавторами).

### Статті у наукових періодичних виданнях:

1. 1. Volosyuk, V. K., Zhyla, S. S., Ruzhentsev, M. V., Sobkolov, A. D., Tserne, E. O., Kolesnikov, D. V., Vlasenko, D. S., & Topal, M. S. (2020). RADAR CROSS-SECTION IMAGING IN SYNTHETIC APERTURE RADAR WITH LINEAR ANTENNA ARRAY AND ADAPTIVE RECEIVER. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 7–21. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-1. [індексується у н.м.б.д. Web of Science Core Collection].

У роботі здобувачем виконано часткове рішення наскрізної задачі синтезу оптимального методу відновлення ПЕПР поверхонь в радарх з синтезуванням апертури антени, лінійною антенною решіткою та адаптивним приймачем: конкретизація форм сигналів зондуючих та відбитих від досліджуваної області, рівняння спостереження та їх кореляційних властивостей.

2. Volosyuk, V., Zhyla, S., Pavlikov, V., Vlasenko, D., Kosharskiy, V., Kolesnikov, D., Inkarbaeva, O., & Nezhalskaya, K. (2021). Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar with planar antenna array. *Radioelectronic and Computer Systems*, 0(1), 50-59. DOI: 10.32620/reks.2021.1.04. [індексується у н.м.б.д. Scopus, Q3].

У роботі здобувачем виконано фізична інтерпретація отриманих аналітичних виразів в ході вирішення оптимізаційної задачі оптимальної оцінки ефективного перерізу розсіювання в радарх з синтезуванням апертури та планарною антенною решіткою.

3. С.С. Жила, Д.В. Колесніков. Метод статичного синтезу апертури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 3(179). – С. 75-83. DOI: 10.32620/aktt.2022.3.08. [категорія «Б»].

У роботі здобувачем виконано формалізацію поняття та визначення структури когерентного зображення у радарх з синтезуванням апертури та математичному обґрунтуванню методу статичного синтезу апертури.

4. Nezhalska K, Volosyuk V, Bilousov K, Kolesnikov D, Cherepnin G. Relation Models of Surface Parameters and Backscattering (or Radiation) Fields as a Tool for Solving Remote Sensing Problems. *Computation*. 2024; 12(5):104. DOI: 10.3390/computation12050104. [індексується у н.м.б.д. Scopus, Q3]

У роботі здобувачем було виконано порівняльний аналіз існуючих моделей зв'язку сигналів власного випромінювання або відбитих поверхнею сигналів з характеристиками поверхні.

### Статті у працях міжнародних конференцій, які проіндексовано у Scopus:

1. V. Volosyuk, S. Zhyla, V. Pavlikov, D. Kolesnikov, O. Inkarbaeva and E. Tserne, "Method of Static Synthesis of Aperture in Tasks of Remote Sensing and Non-Destructive Testing," 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1-5, DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9922996.

У роботі здобувачем було виконано реалізація метода статичного синтезу апертури для траєкторії руху за хрестом.

2. V. Volosyuk, S. Zhyla, D. Vlasenko, O. Inkarbaieva, D. Kolesnikov and G. Cherepnin, "Concepts of Primary and Secondary Coherent Images in Radar and Optical Systems," 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6, DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9923005.

У роботі здобувачем виконано опис когерентних зображень та створюваних полів в області реєстрації сигналів, обґрунтовані поняття первинного та вторинного когерентного зображень.

3. D. Kolesnikov, S. Zhyla, V. Pavlikov and O. Mazurenko, "Imaging Simulation for Radar with Static Aperture Synthesis Method," 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 192-197, DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380361.

У роботі здобувачем було виконано імітаційне моделювання отримуваних радіозображень при різних непрямолінійних траєкторіях руху системи, що реалізує метод статичного синтезу апертури.

4. Kolesnikov, D., Pavlikov, V., Zhyla, S., Vlasenko, D., Kovalchuk, D., Shcherbina, K. (2024). Statistical Optimisation of the Static Aperture Synthesis Method. In Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1008, pp. 578-586. DOI: 10.1007/978-3-031-61415-6\_49.

У роботі здобувачем було виконана статистична оптимізація методу статичного синтезу апертури та побудована структурна схема формування радіозображень поверхонь з технологією статичного синтезу апертури.

## **8. Висновок наукового керівника.**

Дисертація здобувача містить результати завершеного наукового дослідження. Достовірність отриманих у дисертації результатів підтверджена як результатами теоретичних досліджень так і комп'ютерного моделювання. Тема дисертації має важливе наукове та практичне значення. Про високий науковий рівень дисертації свідчить те, що вона спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми розроблення нового методу, алгоритму та структури формування радіозображень поверхонь з технологією статичного синтезу апертури, що підвищить роздільну здатність радіолокаційних зображень тестових поверхонь та об'єктів. Підтверджую, що здобувачем Колесніковим Д.В. було дотримано академічну доброчесність протягом підготовки наукових статей, доповідей на міжнародних конференціях та у процесі написання дисертації. Враховуючи, що Колесніков Денис Вікторович успішно виконав індивідуальний навчальний план та індивідуальний план наукової роботи, досягнув високих результатів у навчанні за відповідною освітньо-науковою програмою та написанні дисертації, яка є результатом самостійного дослідження, є завершеною науковою

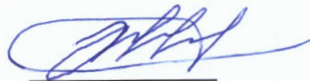
працею, містить наукову новизну, виконана на належному науковому рівні, відповідає встановленим вимогам до дисертацій докторів філософії, вважаю, що дисертацію на тему «Метод статичного синтезу апертури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю» можна рекомендувати до захисту, а її автору Колеснікову Денису Вікторовичу присудити ступінь доктора філософії за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

#### **9. Загальний висновок.**

Вважаємо, що дисертаційна робота Колеснікова Дениса Вікторовича «Метод статичного синтезу апертури в задачах дистанційного зондування та неруйнівного контролю», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44). Дисертаційна робота може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Головуючий на засіданні кафедри  
аерокосмічних радіоелектронних систем  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
доктор технічних наук, доцент

12 червня 2024 р.



Семен ЖИЛА