

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Ковальчука Даниїла Івановича

на тему «Оптимізація структури малогабаритного радару огляду поверхні з
неперервними лінійно-частотними модульованими сигналами»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації, спеціальність
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації.

Зростаючі потреби у використанні безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для задач високоточного дистанційного зондування обумовлюють актуальність розробки спеціалізованих радіолокаційних систем огляду поверхні із синтезованою апертурою, здатних забезпечити високу просторову роздільну здатність радіозображень. Це зумовлює підвищений інтерес до створення малогабаритних бортових радарів, адаптованих до обмежень таких типів платформ, зокрема за масо-габаритними та енергетичними параметрами. Можливість інтеграції високошвидкісного паралельного оброблення сигналів у реальному часі на основі програмованих логічних інтегральних схем відкриває значний потенціал для подальшого розвитку бортових систем радіолокації для БПЛА.

Наявні імпульсні радіолокаційні системи для роботи в умовах низької висоти польоту БПЛА малоприсадибні. Зокрема, через утворення «сліпої зони» в ближній області огляду, що унеможлиблює спостереження об'єктів безпосередньо під носієм або на малих відстанях. Окрім того, обмежений доступ до закордонної елементної бази імпульсних РЛС, через дію експортного контролю, ускладнює їх серійне виробництво та масштабування. Імпульсні системи також вирізняються складною апаратною реалізацією, яка збільшує масу, енергоспоживання і вартість бортової апаратури – критичні параметри для малорозмірних БПЛА.

Зазначені проблеми пропонується вирішувати шляхом використання неперервних сигналів із лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ). Такі сигнали дозволяють здійснювати безперервне зондування поверхні та усунути «сліпу зону» в ближній області огляду. Застосування неперервних ЛЧМ-сигналів у радарх із синтезованою апертурою забезпечує високу просторову роздільність без потреби у великій фізично антені, що є важливим для компактних літаючих платформ. Додатковою перевагою такої архітектури є можливість використання

вітчизняної елементної бази, яка є доступною, дешевою та не підпадає під обмеження міжнародного експортного контролю.

При проектуванні радару з безперервними ЛЧМ-сигналами постає задача вибору діапазону робочих частот з урахуванням вимог до роздільної здатності та конструктивно-експлуатаційних обмежень. Застосування W-діапазону істотно зменшує розміри й вагу антени. З іншого боку, якщо ширина смуги сигналу перевищує 1% центральної частоти, систему відносять до широкосмугових, а реалізація широкої смуги ЛЧМ-сигналу на нижчих частотних діапазонах є недоцільною через необхідність складніших рішень налаштування та узгодження тракту. Таким чином, вибір W-діапазону для малогабаритного ЛЧМ-радару є обґрунтованим компромісом між високою роздільною здатністю та технічною доцільністю системи.

Аналіз існуючих наукових і комерційних розробок показує відсутність реалізованих методів статистично оптимального оброблення безперервних ЛЧМ-сигналів у бортових радарх із синтезованою апертурою для БПЛА. У більшості робіт застосовуються спрощені моделі формування зображення, які не враховують фізичної природи розсіювання сигналів підстильною поверхнею. Крім того, відомі алгоритми не реалізують повного когерентного накопичення відбитих сигналів з урахуванням стохастичних властивостей сцени, що обмежує якість отримуваних радіолокаційних зображень. Отже, виникає науково-практична потреба у проведенні дослідження, спрямованого на розроблення статистично оптимального методу формування радіолокаційних зображень на основі неперервного ЛЧМ-сигналу в умовах обмежених ресурсів малогабаритного радару.

Таким чином, актуальною науковою задачею є підвищення інформативності та роздільної здатності радіолокаційних зображень шляхом статистичної оптимізації структури бортового радару огляду поверхні з неперервними ЛЧМ-сигналами.

У рамках даної дисертації вирішено низку науково-технічних завдань, що поєднують статистично оптимальний алгоритм просторово-часового оброблення сигналів із схемою радару, спроектованого для експлуатації у складі бортового обладнання БПЛА. Досягнуті результати мають значення для створення ефективних компактних радіолокаційних систем спостереження земної поверхні, здатних формувати високоточні зображення в режимі реального часу.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Висновки та рекомендації здобувача мають логічну будову, виведені із об'єктивного аналізу результатів, імітаційного моделювання і подальшого експериментального дослідження – а саме на основі досліджень проведених використовуючи експериментальний макет РСА із неперервними ЛЧМ-сигналами. різних типів БПЛА. Реалізовано експериментальний стенд із рухомою платформою, яка імітує прямолінійний поздовжній рух, необхідний для формування синтезованої апертури. Запропонований статистично оптимальний метод формування радіолокаційних зображень був не лише обґрунтований теоретично та підтверджений результатами імітаційного моделювання, але й перевірений експериментально. Практичні випробування засвідчили його ефективність, а отримане радіозображення демонструє помітне покращення просторової роздільної здатності порівняно з класичним методом.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертації підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus. Також деякі наукові результати здобувача були перевірені в рамках виконання НДР «Малогабаритний бортовий радар з синтезуванням апертури антени для БПЛА та вертольотів», №ДР 0123U102002, 2023-2025 рр. «Розроблення експериментального зразка безпілотного літального апарату прихованої радіолокаційної розвідки малопомітного для сучасних засобів виявлення», №ДР 0124U000445, 2023-2025 рр., що виконувалися на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Наукова новизна результатів, отриманих у роботі, полягає у наступному:

- **Отримала подальшого розвитку** імітаційна модель формування когерентних радіолокаційних зображень підстилаючої земної поверхні з борта безпілотного літального апарату, що враховує стохастичну структуру комплексного коефіцієнту розсіювання об'єкту вимірювання, особливості оброблення безперервних ЛЧМ-сигналів в радарх з синтезуванням апертури, геометрію вимірювання, щільність ймовірності внутрішніх шумів приймача, параметри зондуючих сигналів.

- **Вперше** синтезовано оптимальний метод формування радіолокаційних зображень підстилаючої земної поверхні в малогабаритних бортових радарх з синтезуванням апертури та обробленням безперервних ЛЧМ-сигналів. На відміну від існуючих, оптимальний метод дозволяє формувати

радіолокаційні зображення з кращою роздільною здатністю за рахунок просторово-часового когерентного оброблення прийнятих сигналів з декорельованими опорними функціями, що враховують стохастичну природу розсіяних сигналів від об'єктів дослідження та природних поверхонь.

– **Вперше** розроблено структурну схему бортового радару з синтезуванням апертури, що передбачає модифіковане оброблення безперервних ЛЧМ-сигналів. Розроблена структура відрізняється простотою реалізації передавача і каналу формування високочастотного когерентного опорного сигналу, передбачає нову операцію інверсної фільтрації опорних низькочастотних сигналів, що реалізує розширення діапазону частот когерентного оброблення прийнятих коливань, пропорційно до відношення сигнал/завада.

– **Суттєву новизну** мають результати експериментального розроблення, виготовлення та дослідження малогабаритного радару W-діапазону хвиль з когерентним просторово-часовим обробленням безперервних сигналів з лінійною частотною модуляцією, які на відміну від відомих дозволяють підвищити роздільну здатність радіолокаційних сигналів за азимутом за рахунок декореляції опорних сигналів.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання з підвищення роздільної здатності радіозображень за рахунок статистичної оптимізації структури бортового радару огляду поверхні з неперервними лінійно-частотно модульованими сигналами та методом синтезування апертури виконано повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ковальчука Д.І. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Телекомунікації та радіотехніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям 17 Електроніка та телекомунікації.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ковальчука Даниїла Івановича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату

та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак порушення принципів академічної доброчесності.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Розділи та підрозділи мають логічну структуру, а матеріал викладено послідовно з дотриманням наукового стилю та загальноприйнятої фахової та загальнонаукової термінології. У роботі досягнуті тематична повнота та повне розкриття головних наукових ідей здобувача.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації 186 сторінок.

У **вступі** У вступі обґрунтовано актуальність вибраної тематики, сформульовано мету і основні завдання дослідження, визначено об'єкт та предмет роботи. Наведено стислий огляд стану проблеми, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також інформацію про апробацію та публікації за темою дисертації.

Перший розділ містить аналіз сучасних підходів до реалізації малогабаритних РЛС з неперервними ЛЧМ-сигналами, зокрема генерацію сигналу, геометрію синтезованої апертури та залежність роздільної здатності від частотного діапазону. Особливу увагу приділено Омега-К алгоритмам обробки сирих даних, його модифікаціям, компенсації викривлень.

У **другому** розділі розвинуті статистичні моделі випромінюваних та відбитих ЛЧМ-сигналів, а також внутрішніх шумів; визначено їх статистичні характеристики та зв'язок з комплексним коефіцієнтом відбиття поверхні, що досліджується. На основі положень статистичної теорії оптимального оброблення стохастичних сигналів синтезовано оптимальний метод формування радіолокаційних зображень для бортового РСА з безперервними ЛЧМ-сигналами.

У **третьому** розділі представлено розробку конструкції W-діапазонного радару з синтезованою апертурою на вітчизняній елементній базі, з акцентом на переваги безперервної модуляції для компактних систем. Обґрунтовано технічні рішення для забезпечення високої роздільної здатності та надійної роботи в умовах обмежених ресурсів БПЛА.

У **четвертому** розділі У розділі 4 представлено експериментальне устаткування та методику перевірки працездатності й точності створеного

макету малогабаритного радару огляду поверхні з неперервними ЛЧМ-сигналами. Описано склад вимірювального стенду, процедуру проведення тестових вимірювань, проаналізовано сигнали на низьких частотах та виконано налаштування прямого і квадратурного каналів приймача. Наведено порівняння отриманих зображень, сформованих класичним та модифікованим методами синтезованої апертури при використанні безперервних ЛЧМ-сигналів, що дозволило експериментально підтвердити переваги запропонованого підходу.

У **висновках** узагальнено, що дисертаційна робота вирішує актуальну наукову проблему оптимізації структури компактного радару з неперервними ЛЧМ-сигналами для БПЛА. Отримано низку нових результатів, зокрема синтезовано оптимальний алгоритм обробки сигналів і створено експериментальний зразок W-діапазонного радару, що підтвердив ефективність запропонованих рішень і відкриває перспективи для серійного впровадження.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дослідження опубліковані у п'яти статтях, 4 статті входять до н.м.б.д. Scopus, одна стаття кuartиль Q1, дві статті до н.м.б.д. Scopus, кuartиль Q2, дві статті до н.м.б.д. Scopus, кuartиль Q3.

Також результати дисертації були апробовані на 3 міжнародних наукових фахових конференціях, а саме:

- 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT2024
- 2024 14th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT2024;
- 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Доцільним є більш детальне порівняння класичного та запропонованого оптимального методу обробки «сирих» даних. Наочніше підкреслити переваги запровадженої оптимальної операції із декореляцією опорного сигналу.

2. Всі експериментальні випробування виконано за лабораторних умов, у закритому приміщенні, з використанням тестових цілей на малих відстанях.

Доцільно провести польові експерименти на відкритій місцевості, із дослідженням роботи радару в умовах реального рельєфу та природних завад.

3. У частині роботи, що аналізує процес формування скатерометричних радіолокаційних зображень, для оптимального алгоритму у часовій області наведено комплексні інтеграли до, яких було б корисно дати стислий опис їх фізичного змісту.

4. У роботі не проведено дослідження впливу відношення сигнал/шум на якість отримуваних радіолокаційних зображень.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ковальчука Даниїла Івановича на тему «Оптимізація структури малогабаритного радару огляду поверхні з неперервними лінійно-частотними модульованими сигналами» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації. Дисертаційна робота актуальна, має практичну цінність та наукову новизну, що повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які передбачені в п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ковальчук Даниїл Іванович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник
кафедри теоретичної радіофізики
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
доктор технічних наук

_____Віктор БИКОВ