

РЕЦЕНЗІЯ

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

Світовий ринок безпілотних технологій останнім часом стрімко зростає, відкриваючи нові можливості у цій сфері. Так, у 2024 році загальний обсяг промисловості безпілотників (включаючи споживчі, комерційні та військові системи) був оцінений приблизно в 73 мільярди доларів (за даними GrandviewResearch.com). Прогнози свідчать про те, що цей ринок може досягти приблизно 163–165 мільярдів доларів до 2030 року, причому деякі більш оптимістичні аналітики прогнозують ще стрімкіше зростання. Україна є одним із лідерів у розробці систем автоматизації та інновацій в аерокосмічній галузі. Стратегія цифрового розвитку інноваційної діяльності України до 2030 року визначає розвиток галузі безпілотного транспорту як одну зі стратегічних цілей, досягнення якої призведе до посилення інноваційної екосистеми та реалізації інноваційного потенціалу України.

Сучасні БпЛА – це складні автономні системи, які змінюють логістику, геодезію та картографію, агробізнес, екологічний моніторинг і, звісно, оборону. Тож застосування БпЛА не обмежується суто військовою сферою і зараз, мабуть, складно навести якусь господарську галузь, де б не використовувалися дрони. Це свідчить про масштабованість безпілотної технології та актуальну потребу у різноманітності її модифікацій. Сучасний рівень розвитку мікроелектроніки та цифрових обчислювальних засобів забезпечує можливість дистанційного управління БпЛА з високим ступенем автономності, що значно знижує ризики для операторів і підвищує ефективність виконання поставлених задач. У цьому контексті дедалі більшої актуальності набуває інтеграція радіолокаційних систем у бортове обладнання БпЛА, адже саме радіолокаційні методи на відміну від оптичних забезпечують цілодобове та всепогодне спостереження, незважаючи на погану освітленість, задимлення місцевості, туман, дощ та інші несприятливі умови. Особливої уваги потребує проблема використання радарів у складі малогабаритних БпЛА, де на перший план виходять технічні обмеження

по масі, енергоспоживанню, габаритах та наявна динамічна нестабільність носія в повітряному середовищі. Застосування радіолокаційних систем у таких умовах є ускладненою, проте перспективною. Тому розробка ефективних малогабаритних радіолокаційних систем для БпЛА є актуальним науково-практичним завданням, яке потребує всебічного аналізу, моделювання і експериментальної перевірки. Розроблення імітаційних моделей, що враховують когерентний характер відбитого сигналу та стохастичну структуру підстильної поверхні, дозволяє більш адекватно моделювати процес формування радіолокаційних зображень. Такий підхід дає змогу детально дослідити вплив просторової неоднорідності сцени на результати оброблення «сирих» даних, оцінити потенційні похибки, а також перевірити стійкість алгоритмів до флуктуацій інтенсивності сигналів розсіяння. В умовах обмеженого ресурсу бортових обчислювальних засобів БпЛА це дозволяє заздалегідь адаптувати структури алгоритмів до типових умов експлуатації.

У дисертаційному дослідженні Ковальчука Даниїла Івановича вирішено завдання підвищення роздільної здатності радіозображень за рахунок статистичної оптимізації структури бортового радару огляду поверхні з неперервними лінійно-частотно модульованими сигналами та методом синтезування апертури у W діапазоні хвиль.

Оскільки забезпечення високоточного локального позиціонування БпЛА та розвідка підстильної поверхні засобами радіолокації, розташованими на мобільній платформі є важливою науково-практичною задачею, то тематика дисертаційної роботи є *актуальною*.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові результати дисертації мають достатній рівень обґрунтованості та не суперечать теоретичним закономірностям, відомим фактам та загально прийнятим уявленням про фізичні принципи формування радіолокаційних зображень у когерентних системах. Запропоновані у роботі математичні моделі формування зображень в системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондувальними ЛЧМ-сигналами є обґрунтованими, адже базуються на статистичній теорії оптимального оброблення сигналів в радарх та на евристичних методах проектування радіосистем. При дослідженні застосовано загальнонаукові та спеціальні прийоми і методи пізнання; їх використання дозволило дисертанту науково обґрунтувати теоретичні та практичні аспекти структурного синтезу малогабаритного радару для БпЛА.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними і витікають із результатів об'єктивного аналізу результатів, отриманих експериментально – як шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання радіозображень земних поверхонь, так і експериментальними дослідженнями макету малогабаритного радару огляду поверхні з неперервними ЛЧМ-сигналами.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертації підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus. Окремі наукові результати здобувача було перевірено в рамках виконання НДР «Малогабаритний бортовий радар з синтезуванням апертури антени для БПЛА та вертольотів» (№ДР 0123U102002, 2023-2025 рр.) та «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 підстильної земної поверхні з борту 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 зондувальних сигналів.

Вперше синтезовано оптимальний метод формування радіолокаційних зображень підстильної 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 синтезуванням 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 співпадіння, 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 досягається 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 обґрунтовано актуальність завдання створення спеціалізованих малогабаритних радарів із синтезованою апертурою для застосування на безпілотних літальних апаратах. Визначено наукову проблему, шляхи її вирішення та висвітлено переваги використання безперервних ЛЧМ-сигналів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ роботи присвячено огляду класичних алгоритмів синтезу апертури, розглянуто їх переваги та недоліки. Проаналізовано існуючі схеми апаратної генерації ЛЧМ-сигналів. Для моделей формування радіолокаційних зображень наведено аналітичні розрахунки розсіяних електромагнітних полів на основі феноменологічного методу. Обґрунтовано необхідність розвитку й модифікації відомих математичних моделей формування та відновлення радіозображень у радарх із синтезованою апертурою. Наведено результати імітаційного моделювання процесу формування радіозображень.

У **другому** розділі розроблено статистичні моделі сигналів і шумів для РСА з безперервними ЛЧМ-сигналами, синтезовано оптимальний алгоритм формування зображень із урахуванням фазової когерентності та ефекту міграції цілі. Ефективність методу підтверджено моделюванням радіолокаційних зображень поверхні й порівнянням отриманих зображень із еталонним за значеннями низки метрик оцінки якості.

У **третьому** розділі сформульовано технічні вимоги до структурних компонентів бортового РСА з обробленням ЛЧМ-сигналів у W-діапазоні з урахуванням обмежень по масі, енергоспоживанню та габаритам. Описано структуру експериментального макету радара, який було створено в рамках дисертаційної роботи. Наведено результати тестових вимірювань, які підтверджують працездатність розробленого макету ЛЧМ-радара.

У **четвертому** розділі розроблено алгоритм стиснення «сирих» даних за дальністю та азимутом для формування когерентного радіолокаційного зображення. Описано методику випробувань, експериментальне устаткування та надано аналіз результатів експериментів із прототипом радара. Доведено, що запропоновані технічні рішення забезпечують суттєве підвищення роздільної здатності РСА азимутом завдяки застосуванню розробленого оптимального алгоритму оброблення сигналів.

У **висновках** стисло сформульовано основні наукові результати дисертаційного дослідження та їх практичне значення, а також надано пропозиції стосовно їх можливого застосування.

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, з яких одна стаття – у періодичному науковому виданні, проіндексованому у м.н.б.д. Scopus, що віднесене до першого квартиля (Q1), дві статті входять до м.н.б.д. Scopus, квартиль Q2, дві статті – до м.н.б.д. Scopus, квартиль Q3.

Також результати дисертації були апробовані на трьох 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 висвітлено у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Цілі, використані в експерименті з прототипом радара, були еталонними кутковими відбивачами. Зважаючи на те, що у запропонованому алгоритмі оброблення сигналів передбачається стохастична структура підстильної поверхні, було б доцільно доповнити дослідження експериментом з опроміненням неідеальної поверхні, що формує стохастичний характер відбиття.

2. У роботі не розглянуто умови, за яких запропонований метод оброблення сигналів може втратити свою ефективність, наприклад, якими мають бути параметри діаграми спрямованості антен, співвідношення сигнал / шум тощо.

3. У роботі не досліджено вплив на точність формування радіолокаційних зображень можливих відхилень траєкторії та швидкості руху носія РСА від прямолінійного рівномірного руху.

4. У роботі не наведено масо-габаритні параметри та споживану потужність експериментального макету, що було б корисним для деталізованої оцінки характеристик створеного прототипу РСА для БпЛА.

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» не порушує принципів академічної доброчесності, виконана на високому науковому рівні 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 за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що 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.

Рецензент:

Доцент кафедри інформаційно-комунікаційних
технологій ім. О. О. Зеленського
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент

_____Ірина ВАСИЛЬЄВА