

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

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають все більш поширеними засобами в різних сферах застосування, що призводить до збільшення потреби в сучасних засобах їхнього радіолокаційного оснащення. Завдяки поєднанню мобільності та гнучкості платформи, БПЛА можуть оперативно надавати дані про місцевість з малої висоти, доповнюючи існуючі поточні джерела інформації. У такому контексті вбудований радар із синтезованою апертурою здатен забезпечити досить високу роздільну здатність, а також вирішувати задачі картографування та виявлення об'єктів в ускладнених умовах спостереження.

При створенні системи з синтезом апертури (РСА-системи), призначеної для встановлення на БПЛА, виникає ряд технічних обмежень. Габарити і вага антени та інших модулів мають бути мінімальними, аби не перевантажувати літальний апарат і не зменшувати час його перебування у повітрі. БПЛА мають обмежену ємність акумуляторів, тому радар із високою споживаною потужністю значно скоротить час польоту. Окрім того, нестабільність платформи БПЛА внаслідок турбулентності суттєво впливає на якість синтезованого радіозображення. Для компенсації рухів платформи необхідно застосовувати обладнання стабілізації, зокрема інерційні навігаційні системи та GPS, а також реалізовувати алгоритмічний розрахунок поправок у процесі формування зображень. Унаслідок цього малогабаритна РСА-система повинна відповідати високим вимогам щодо габаритів і маси, працювати в умовах обмеженої енергетичної потужності та забезпечувати корекцію відхилень від заданої траєкторії, що характерні для польоту БПЛА.

В представленій роботі запропоновано вирішувати проблеми огляду поверхні на малих висотах шляхом використання безперервних ЛЧМ-сигналів, що дозволяють усунути «сліпу зону» та забезпечити високу роздільну здатність без потреби у великій антені – це критично для компактних БПЛА. Для практичної реалізації такого підходу може бути застосована вітчизняна

елементна база, що є доступною та не підпадає під експортні обмеження. Крім того, в роботі запропоновано перехід на міліметрові частоти, зокрема W-діапазон, що дозволяє значно зменшити фізичні розміри антен та радіоелектронних модулів.

Треба відмітити, що більшість існуючих алгоритмів формування РСА-радіозображень розроблено з урахуванням роботи на відносно стабільній платформі та за умови відомих або сталих характеристик сцени спостереження. Однак під час роботи на малих висотах, особливо з безпілотних літальних апаратів, виникає низка специфічних проблем, які досі залишаються малодослідженими. Однією з особливостей є стохастичний характер поверхні поля зору: різні типи природної місцевості та урбанізовані ділянки формують складну хаотичну структуру радіолокаційного відбиття. Це призводить до неоднорідностей у відбитих сигналах, до появи спекл-шуму, до змін у фазі та інтенсивності ехо-сигналів.

Таким чином, розробка радарів з синтезованою апертурою на основі безперервних ЛЧМ-сигналів для БПЛА є вкрай актуальною з огляду на потребу в компактних, енергоефективних та високоточних системах дистанційного зондування. Поєднання переваг міліметрового діапазону, адаптивних алгоритмів обробки та сучасної елементної бази відкриває нові можливості для картографування, розвідки й моніторингу у складних умовах. Наявні технічні обмеження та стохастичний характер сцени спостереження вимагають застосування спеціалізованих підходів до формування зображень. Отже, тематика представленої роботи відповідає сучасним викликам у сфері аерокосмічної розвідки та моніторингу, має високу наукову і практичну цінність та 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.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними й витікають з об'єктивного аналізу отриманих результатів – як шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання кривих виявлення БПЛА, так і експериментальними дослідженнями контрастів різних типів БПЛА за допомогою вимірювального

пасивного комплексу із залученням сучасного вимірювального обладнання та елементної бази.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів дисертації підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, праці яких індексуються у наукометричній базі Scopus. Частину наукових результатів здобувача було перевірено в рамках виконання наступних науково-дослідних робіт: «Малогабаритний бортовий радар з синтезуванням апертури антени для БПЛА та вертольотів», №ДР 0123U102002, 2023-2025 рр.; «Розроблення експериментального зразка безпілотної літального апарату прихованої радіолокаційної розвідки малопомітного для сучасних засобів виявлення», №ДР 0124U000445, 2023-2025 рр. Роботи 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 безпілотної літального апарату, що враховує стохастичну структуру комплексного коефіцієнту розсіювання об'єкту вимірювання, особливості оброблення безперервних ЛЧМ-сигналів в радарі 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 радарі 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 радара 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 представленій дисертаційній роботі задачу з підвищення роздільної здатності радіозображень за рахунок статистичної оптимізації структури бортового радара 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.

Грунтуючись на результатах офіційної перевірки на наявність текстових запозичень, 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 обґрунтовано актуальність створення малогабаритних радарів із синтезованою апертурою для застосування на безпілотних літальних апаратах, зокрема з використанням безперервних ЛЧМ-сигналів. Визначено наукову проблему, шляхи її вирішення та технічні переваги запропонованого підходу. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ роботи містить огляд класичних алгоритмів синтезу апертури із аналізом відповідних переваг та недоліків. В розділі також проаналізовано схеми апаратної генерації ЛЧМ-сигналів й аргументовано необхідність розвитку математичних моделей розсіяних поверхнею просторово-часових сигналів, синтезу алгоритмів оброблення просторово-часових сигналів.

У другому розділі розроблено статистичні моделі сигналів і шумів для РСА з ЛЧМ, синтезовано оптимальний алгоритм формування зображень із урахуванням фазової когерентності та ефекту міграції цілі. Ефективність методу підтверджено моделюванням і проаналізовано за допомогою метрик оцінки якості радіозображення.

У третьому розділі описано експериментальний макет радару із ЛЧМ-сигналами з урахуванням обмежень по масі, енергоспоживанню та габаритам, що було створено в рамках дисертаційної роботи. Проведено лабораторні випробування, які підтвердились отриманням теоретично розрахованих величин у спектрі, що характеризують дальність, під час випробування пристрою.

У четвертому розділі представлено методику випробувань, склад обладнання і результати експериментів із прототипом радару. Встановлено підвищення роздільної здатності за азимутом на понад 38% завдяки застосуванню розробленого оптимального алгоритму обробки сигналів.

У висновках стисло сформульовано основні наукові результати дисертаційного дослідження, їхнє практичне значення, в тому числі для впровадження з метою розвитку освітньої програми, та подальших досліджень.

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 наукометричної бази Scopus, одна стаття - кuartиль Q1, дві статті - кuartиль Q2, дві статті - 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 DESSERT2023;
- 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, представлені в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. При формулюванні задачі оптимізації методу формування зображень зроблено припущення, що комплексний коефіцієнт розсіювання поверхні має властивості білого шуму (вираз 2.13), в той час як для реальних поверхонь комплексний коефіцієнт розсіювання є просторово корельованим, в залежності від типу поверхні радіус його просторової кореляції може сягати десятків метрів.

2. У роботі запропоновано використання опорного сигналу (2.63), який має адаптуватися до співвідношення сигнал/завада (стор. 107), але не наведено прикладів такої адаптації.

3. Для підтвердження отриманих результатів, доцільним було б проведення кількісної оцінки похибок експериментальних вимірювань.

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

Наведені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів досліджень 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 аерокосмічних
радіоелектронних систем
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук

_____ Ксенія НЕЖАЛЬСЬКА