

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.

У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів дистанційного зондування особливої розробка радіолокаційних систем з синтезованою апертурою, орієнтована до застосування в безпілотних літальних апаратах – є актуальною тематикою. Це обумовлено кількома ключовими тенденціями: по-перше, зростаючою потребою у високоточному моніторингу територій у режимі реального часу, для широкої номенклатури застосування. Зокрема для цілей оборони, агровиробництва, екологічного контролю, картографування. По-друге здатністю БПЛА як ефективною мобільною платформою, діяти у складних умовах із мінімальними енергетичними витратами та без ризику для оператора.

Утім, використання РСА в умовах реального польоту БПЛА пов'язано із численними технічними складнощами, зокрема нестабільністю траєкторії руху, де навіть незначні відхилення від прямолінійного польоту призводять до фазових зсувів у прийнятому сигналі, що знижує якість зображення або робить його зовсім непридатним до подальшої обробки. Складнощами, що пов'язані із технічною реалізацією, високою дороговизною закордонних компонентів, наявністю експортних обмежень до їх постачання в Україну. Відповідно традиційні імпульсні радары, які застосовуються у великих або стаціонарних системах, виявляються менш придатними для малогабаритних БПЛА. Вони вимагають значних енергетичних ресурсів, складного узгодження апаратури і не здатні забезпечити безперервне сканування з високою роздільною здатністю при малій висоті польоту, що критично для застосувань на низьких висотах. У цих умовах значні переваги має використання безперервних лінійно-частотно модульованих сигналів для РСА, які дозволяють уникнути мертвої зони та забезпечити стабільну роботу на близьких відстанях до об'єкта спостереження.

Застосування ЛЧМ-сигналів у малогабаритних системах дозволяє ефективно використовувати енергетичні ресурси, оскільки енергія сигналу рівномірно розподілена в часі, а не сконцентрована в коротких імпульсах, що

простіше до апаратної реалізації. Це в свою чергу спрощує завдання витримати мінімально можливу вагу апаратури. Синтез апертури у такій конфігурації забезпечує високу просторову, азимутальну роздільну здатність без необхідності збільшення розмірів антени, що також є цінним у умовах обмежених габаритів і маси БПЛА. Неперервний ЛЧМ із широкою смугою модульованої частоти забезпечує високу роздільну здатність за дальністю. Не дивлячись на наявність переваг заявлений підхід є мало дослідженим, та потребує практично підтверджених даних для подальшого розвитку РЛС за цим напрямком.

Застосування триміліметрового діапазону робочої довжини хвиль обумовлено низкою вагомих технічних і практичних переваг. Насамперед, менша довжина хвилі дозволяє істотно зменшити габарити антенної системи, що є критично важливим при інтеграції радара на безпілотних авіаційних платформах, де обмежені масогабаритні параметри. Крім того, триміліметровий діапазон забезпечує можливість реалізації широкої смуги лінійно-частотної модуляції з високою стабільністю, оскільки відносна зміна довжини хвилі в цьому діапазоні є незначною, що полегшує технічну реалізацію частотно стабільних генераторів. Важливою перевагою є також низький рівень радіозавад у цьому частотному спектрі, зумовлений відсутністю значної кількості масових цивільних засобів зв'язку та інших пристроїв, які б активно використовували цей діапазон.

Особливу цінність має той факт, що наявна в Україні виробнича та науково-технічна база забезпечує виготовлення необхідних радіокомпонентів для роботи у триміліметровому діапазоні. Це дозволяє створити повноцінний виробничий цикл без потреби в імпорті критичних елементів, що, своєю чергою, підвищує автономність розробки, знижує її вартість і спрощує процес обслуговування систем. Таким чином, вибір даного діапазону не лише оптимальний з точки зору технічної ефективності, а й стратегічно виправданий для створення серійних зразків РСА-радарів, орієнтованих на потреби оборонної промисловості України та цивільного сектору. Такий підхід створює умови для подальшого масштабування розробки, розширення функціональності системи та її адаптації до різних типів носіїв і сценаріїв використання, що говорить про достатню актуальність тематики.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними і витікають із результатів об'єктивного аналізу результатів, імітаційного моделювання і подальшого експериментального дослідження – а саме на основі проведених досліджень із експериментальним макетом РСА із ЛЧМ-сигналами, для проведення яких створено стенд із рухомою платформою для імітації поздовжньо прямолінійного руху, необхідного для синтезу апертури. Синтезований статистично оптимальний метод формування радіолокаційних зображень в радарх з обробленням безперервних ЛЧМ-сигналів було не тільки доведено моделюванням, а також перевірено його ефективність на практиці, отримане синтезоване радіозображення містить суттєвий вииграш у роздільній здатності.

Варто підкреслити, у даній роботі зроблено наголос на наскрізний підхід до проектування та моделювання ЛЧМ-радару – від генерації сигналу до відновлення зображення, що підвищує цінність дисертації як цілісної та завершеної роботи. 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 азимуту 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 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 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 теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, зазначено, в чому полягають наукова новизна та практична значимість отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ роботи присвячений огляду класичних методів та алгоритмів синтезу апертури, наведено їх основні недоліки та переваги. Розглянуто різноманітні схеми апаратної реалізації лінійно-частотної модуляції. Сформовано перелік завдань, які необхідно вирішити у дослідженні, щоб досягнути мети всієї роботи.

У **другому** розроблено статистичні моделі безперервних ЛЧМ-зондуючих сигналів, відбитих сигналів та внутрішніх шумів, а також визначено їхні статистичні характеристики і зв'язки з комплексним коефіцієнтом відбиття підстилаючої поверхні. На основі теорії оптимальної обробки стохастичних сигналів синтезовано оптимальний алгоритм формування радіолокаційних зображень для малогабаритного бортового РСА, що функціонує з безперервними ЛЧМ-сигналами. Запропонований метод базується на модифікації класичного алгоритму Omega-K з урахуванням міграції цілі по дальності та забезпеченням фазової когерентності на всіх етапах обробки, що дозволяє зменшити спотворення і підвищити фокусування радіозображень. Імітаційне моделювання підтвердило переваги запропонованого алгоритму над класичними методами. Декореляція опорних сигналів дала змогу повніше використати когерентну інформацію від розсіяних сигналів, забезпечивши

вищу роздільну здатність і контрастність сформованих радіолокаційних зображень. Потенційну точність нового методу оцінено шляхом аналізу межі Крамера-Рао.

У **третьому** розділі описано розробку та виготовлення малогабаритного бортового радару синтезованої апертури у W-діапазоні, що працює з безперервними ЛЧМ-сигналами. Створений прототип пристосований для встановлення на борту БПЛА з урахуванням обмежень по масі, енергоспоживанню та габаритам; при цьому, за винятком одного фазообертача, використано радіокомпоненти українського виробництва, які не підпадають під експортний контроль. Для експериментальної перевірки запропонованої технології синтезування радіозображень створено спеціальний полігон з тестовою сценою, що моделює реальні умови. Після збірки прототипу радару проведено серію тестових вимірювань, які підтвердили його працездатність

У **четвертому** розділі представлено експериментальне обладнання та методику дослідження працездатності й точності створеного макету малогабаритного радару огляду поверхні з неперервними ЛЧМ-сигналами. Описано проведення тестових вимірювань, проаналізовано сигнали низької частоти та наведено процес налаштування прямого і квадратурного каналів приймача. На основі розробленого оптимального алгоритму обробки реалізовано алгоритми стиснення сирих сигналів за дальністю та азимутом. Експериментальні результати показали, що запропонований оптимальний метод обробки дозволяє підвищити роздільну здатність радіозображень за азимутом приблизно на 38,7%.

У **висновках** стисло сформульовано основні результати дисертаційного дослідження та надано пропозиції стосовно їх практичного застосування із метою вирішення поставлених задач.

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 м.н.б.д. Scopus, одна стаття кuartиль Q1, дві статті до м.н.б.д. Scopus, кuartиль Q2, дві статті до м.н.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. У роботі висвітлено обмежену кількість експериментальних досліджень. Так, було показано лише один повний цикл побудови зображення із кутиковими відбивачами у якості цілей. Доцільно виконати серію повторних експериментів, із однаковими умовами для проведення статистичного аналізу, а також провести додаткові дослідження з іншими типами об'єктів.

2. У теоретичній частині відзначено можливість реалізації запропонованого алгоритму оброблення сигналів з залученням програмованих логічних інтегральних схем ПЛІС. Проте надалі у роботі не наведено потенційних технічних та алгоритмічних рішень такої реалізації.

3. У роботі вказано, що пропонована радіолокаційна система потенційно є корисним навантаженням БПЛА. Проте імітаційне моделювання та експериментальне дослідження пропонованої системи були виконані тільки для випадку лінійного позаддовжнього лінійного руху носія. Такий підхід не враховує вплив низки факторів, притаманних реальній експлуатації на БПЛА, а саме: вібрації, відхилення від траєкторії руху внаслідок неоднорідності повітряного потоку тощо. Відповідно доцільно було б приділити більшу увагу заважаючим факторам, які виникають при реальній експлуатації системи, та їх компенсації.

4. Відповідно до наданої у роботі інформації, пропонована радіолокаційна система для використання у складі бортового обладнання малогабаритних безпілотних літальних апаратів. Водночас не достатньо висвітлено, як саме планується вбудувати розроблену радіолокаційну систему у БПЛА з врахуванням масо-габаритних, енергетичних та тактичних характеристик носіїв такого типу.

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 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.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник

науково-дослідного відділу (розвитку АСУ авіацією та ППО Повітряних Сил і кібербезпеки) науково-дослідного управління (розвитку і застосування Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
кандидат технічних наук

Валерій СЛОБОДЯНЮК