

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Церне Едуарда Олексійовича
на тему «Апертурний синтез зображень з використанням
широкосмугових сигналів»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації, спеціальність
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації.

Питанням створення та експлуатації радарних систем із синтезуванням апертури антени (РСА) для дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) приділяється нині велика увага у всьому світі. Так, обсяг ринку РСА оцінюється в 5,21 мільярда доларів США у 2024 році і, як очікується, сягне 8,80 мільярда доларів США до 2029 року. Реалізація у РСА принципу синтезу апертури антени дозволяє отримувати радіолокаційні зображення субметрового просторового розрізнення, що відповідає можливостям сучасних оптико-електронних систем. Водночас системи РСА відрізняє невибагливість до умов освітленості досліджуваного району та нечутливість до погодних умов у зоні зйомки, що робить РСА основним інструментом оперативного контролю, а також засобом довгострокових регулярних спостережень за глобальними та регіональними геофізичними процесами, що сприяє забезпеченню національної безпеки.

Однією з найважливіших переваг РСА з точки зору перспектив розвитку є різноманітність застосовуваних режимів зйомки та методів обробки даних ДЗЗ. Саме в цій галузі ведуться інтенсивні наукові дослідження з метою покращити технічні характеристики та розширити функціональні можливості систем РСА. При цьому особлива увага приділяється подальшому вдосконаленню методологічної бази отримання та подання корисної інформації в РСА.

Незважаючи на безперечні переваги РСА, які вже давно зарекомендували себе як найбільш перспективні багатофункціональні засоби ДЗЗ, такі радары мають суттєвий недолік – обмеженість зони огляду підстильної поверхні, що не дозволяє формувати високоточні зображення місцевості при кутах огляду, близьких до надиру носія. Зазвичай «мертва» зона огляду РСА складає приблизно $\pm 15^\circ$ від кута надиря. Тобто, при прольоті носія радара значна площа місцевості залишається недослідженою, що зменшує ефективність виконання поставлених задач спостереження. Таким чином теми наукових робіт, пов'язані з вирішенням наведеного недоліка існуючих систем РСА, є актуальними.

У дисертаційному дослідженні Церне Е.О. з метою формування суцільного радіозображення досліджуваної поверхні без «мертвих» зон в області надиру носія запропоновано доповнити існуючі РСА додатковими системами активного апертурного синтезу з ширококутовими зондувальними сигналами. Такі системи є поширеними у радіоастрономії, де виконується приймання власного радіотеплового випромінювання та його оброблення у вузькій смузі частот. Водночас для випадку широко- та надширококутових процесів ці системи є мало дослідженими, а алгоритми оброблення таких сигналів не мають достатнього теоретичного обґрунтування. Таким чином задача синтезування алгоритмів оброблення сигналів у системах активного апертурного синтезу з ширококутовими зондуючими сигналами, яка вирішується у дисертаційній роботі, є актуальною та має наукову новизну.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертації мають достатній рівень обґрунтованості, вони спираються на відомі досягнення у предметній галузі та не суперечать теоретичним закономірностям, відомим фактам та загально прийнятим уявленням про принципи формування радіозображень у системах РСА.

Запропоновані у роботі математичні моделі для алгоритмів формування зображень в системах активного апертурного синтезу з ширококутовими зондувальними сигналами є обґрунтованими, адже базуються на статистичній теорії синтезу методів оптимального оброблення сигналів в радарх та на евристичних методах проектування радіосистем.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними і витікають із результатів об'єктивного аналізу результатів, отриманих експериментально – як шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання, так і експериментальними дослідженнями макету системи 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 н.м.б.д. Scopus. Також деякі наукові результати здобувача були перевірені в рамках НДР «Розвиток теорії надширококутових систем активного апертурного синтезу для високоточного дистанційного зондування з високошвидкісних аерокосмічних платформ» (№ДР 0119U100968, 2019-2021pp) та «Проектування, розроблення макету та експериментальне дослідження пасивного радару з завадозахищеним сигналом

підсвічування цілей для виявлення БПЛА» (№ДР 0123U102000, 2023-2024pp.), що виконувалися на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

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

Вперше для активних радіолокаційних систем дистанційного зондування поверхонь широкосмуговими та надширокосмуговими сигналами визначено математичний зв'язок оцінок некогерентних зображень поверхонь із спектральною густиною комплексної функції просторової когерентності, спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антени та енергетичним спектром зондувальних коливань. Це дозволило визначити операції формування радіозображень у різних частотних піддіапазонах спектра випромінюваного сигналу.

Вперше отримано математичний опис статистичної оцінки інтегрального зображення, сформованого за всіма частотами спектру відбитого від поверхні широкосмугового або надширокосмугового стохастичного сигналу, та встановлено її зв'язок з ефективним перерізом розсіювання поверхні, спектральною густиною комплексної функції просторової когерентності, спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антени та енергетичним спектром зондувальних коливань. Це дозволило визначити операції формування інтегральних зображень поверхонь у «мертвій» зоні РСА. Отже, доповнення РСА системою активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондувальними сигналами дозволить розширити лінійну зону огляду земної поверхні за кутом місця.

Вперше надано алгоритмічний опис процедур формування інтегральних за частотами некогерентних зображень широкосмуговими і надширокосмуговими системами активного апертурного синтезу, основу якого складає розділення спектра прийнятого сигналу на піддіапазони частот з виконанням умови просторово-часової вузькосмуговості. У результаті отримано практичні алгоритми формування радіозображень як у окремих вузьких смугах спектру зондувального сигналу, так і інтегрального зображення за всіма смугами. Запровадження таких алгоритмів у перспективі дозволить зменшити складність реалізації широко- та надширокосмугових систем активного апертурного синтезу у бортовому виконанні.

Вперше у результаті вирішення задачі активного апертурного синтезу зображень в оптимізаційній постановці методом пошуку максимуму функціоналу правдоподібності обґрунтовано доцільність уведення в алгоритми

оброблення операцій попередньої декореляції прийнятих сигналів і подальшого формування зображень у різних піддіапазонах методами паралельного огляду поверхні. Операція декореляції дозволяє покращити якість формованих радіозображень шляхом додаткового розширення спектра сигналу. Доцільність введення операції декореляції у алгоритм формування радіозображень системою активного апертурного синтезу підтверджено результатами імітаційного моделювання.

Отримав подальший розвиток метод формування інтегрального некогерентного зображення поверхні системою активного апертурного синтезу, основу якого складає інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів. Суттєву новизну мають практичні алгоритми реалізації цього методу, які полягають у формуванні взаємних кореляційних функцій сигналів із виходів елементів антенних решіток, обчисленні їх похідних з урахуванням затримок, що забезпечує вирівнювання фронту падаючого поля, та подальшому підсумовуванні отриманих сигналів. Пропонований метод дає змогу істотно спростити апаратне та програмно-алгоритмічне забезпечення розв'язання задачі апертурного синтезу зображень.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання з синтезування алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондувальними сигналами 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 Церне Е.О. 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 Церне Едуарда Олексійовича 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 з вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури. Загальний обсяг дисертації 204 сторінки.

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 загальних принципів функціонування однопозиційних та багатопозиційних бортових радіолокаційних систем з синтезуванням апертури антени, наведено їх переваги і недоліки. Детально проаналізовано проблему наявності у таких радарів «мертвої» зони формування зображень за кутах, близьких до надиру носія. Наведено загальну геометрію формування радіозображень для бортових систем активного апертурного синтезу. Визначено математичні моделі широкосмугових сигналів та встановлено зв'язки цих моделей із некогерентним радіозображенням зондованої підстильної поверхні. У кінці розділу сформовано перелік завдань, які необхідно вирішити у дослідженні.

У **другому** розділі виконано розроблення евристичних алгоритмів формування радіозображень у системах активного апертурного синтезу при використанні широкосмугових зондувальних сигналів. Запропоновано загальний алгоритм формування радіозображень, який полягає у визначенні на кожній частоті оброблюваного сигналу сукупності показників когерентності сигналу, застосування до них дискретного перетворення Фур'є та підсумовування отриманих результатів. Запропоновано практичний алгоритм формування радіозображень, особливістю якого є розділення широкосмугового сигналу на окремі вузькосмугові процеси і подальше оброблення лише на центральних частотах кожного з них. Запропоновано алгоритм формування

радіозображень, основу якого складає інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів. Відповідні розрахунки виконані як для випадку ідеалізованої континуальної апертури антени, так і для реальних дискретних антенних решіток.

У **третьому** розділі методом максимуму функціоналу правдоподібності синтезовано оптимальний алгоритм формування радіозображень у широкосмугових системах активного апертурного синтезу та виконано аналіз складових операцій оброблення сигналів. На основі розробленого алгоритму запропоновано загальну структурну схему радара та виконано її опис.

Четвертий розділ присвячено апробації загального евристичного та синтезованого оптимального алгоритмів формування радіозображень методом імітаційного моделювання. Досліджено вплив похибок оцінки функції невизначеності системи на результати декореляційної фільтрації, що складає основу оптимального алгоритму. Наведено результати порівняння вихідного оптичного зображення із формованими радіолокаційними за метриками якості.

У **п'ятому** розділі наведено результати експериментального дослідження розробленого двоантенного макета системи активного апертурного синтезу. Досліджено вплив смуги зондувального сигналу на форму функції кореляції процесів, прийнятих рознесеними синхронізованими приймачами. Досліджено роботу макету при наявності впливу зовнішньої імпульсної завади. На основі отриманих результатів розраховано потенційну роздільну здатність запропонованої системи апертурного синтезу з врахуванням параметрів сучасної радіоелементної бази та запропоновано можливі варіанти комплексування такої системи та існуючих РСА.

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.

Наукові результати дисертації висвітлені у 4 наукових публікаціях здобувача виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, з яких 3 статі у фаховому виданні України категорії «А», віднесеного до третього квартиля (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank та 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (США). Також здобувач має 1

патент України на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації.

Також результати дисертації були апробовані на 4 міжнародних наукових фахових конференціях, а саме:

- «IEEE Ukrainian Microwave Week» (2020 рік, Харків, Україна);
- «IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering» (2021 рік, Львів, Україна);
- «IEEE 19th International Conference on Smart Technologies» (2021 рік, Львів, Україна);
- «IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering» (2022 рік, Львів-Славське, Україна).

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1) У математичних моделях сигналів, використаних при розробленні алгоритмів формування зображень, не враховано рух аерокосмічного носія системи, який накладає обмеження на час спостереження обраної ділянки поверхні.

2) У роботі зазначено, що алгоритм формування радіозображень на основі розділення широкосмугового процесу на окремі частотні смуги дозволяє зменшити складність системи, проте не наводяться кількісні показники даного зменшення.

3) У роботі методом максимальної правдоподібності синтезовано алгоритм оцінювання параметру, що є пропорційним ефективній поверхні розсіювання зондованої поверхні, проте не розраховано граничні похибки цієї оцінки.

4) Імітаційне моделювання у роботі відбувалося із залученням функції невизначеності системи і не відображає у повній мірі процесів оброблення сигналів у запропонованому радарі.

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.

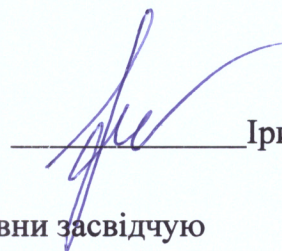
Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Церне Едуарда Олексійовича на тему «Апертурний синтез зображень з використанням ширококутових сигналів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність 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 Церне Едуард Олексійович 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 ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент



Ірина ВАСИЛЬЄВА

Підпис доцента Васильєвої Ірини Карлівни засвідчую

Вчений секретар

Національного аерокосмічного
університету ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент



Тетяна БОНДАРЄВА