

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,
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації.

Методи дистанційного зондування Землі та радіолокаційного картування набули широкого застосування у багатьох цивільних та військових напрямках людської діяльності. Інформація, яку отримують у оптичному, інфрачервоному і радіодіапазонах, дозволяє отримувати інформацію про стан атмосфери і поверхні Землі, а також її параметри і характеристики. Водночас необхідно відзначити значимість саме радіодіапазону, який дозволяє отримати інформацію не залежно від складності погодних умов та часу доби.

Одними з найпоширеніших бортових радіосистем, що використовуються для вирішення задач дистанційного зондування, є радары з синтезуванням апертури антени. Ці системи забезпечують високу роздільну здатність радіозображень як за дальністю у кутомісній площині, так і за кутом в азимутальній. Проте суттєвим недоліком таких радарів є наявність «мертвої» зони формування зображень при зондуванні поверхні під кутами менше, ніж $\pm 15^\circ$ від напрямку надиру носія системи, у яких вони не здатні забезпечити високу лінійну роздільну здатність за кутом місця. Це призводить до зниження загальної ефективності зондування заданої місцевості, що може викликати необхідність у додаткових прольотах літального апарату-носія для отримання повної інформації про неї, що в деяких випадках може бути неможливим або небезпечним.

У дисертаційній роботі Церне Е.О. запропоновано вирішити задану проблему шляхом доповнення існуючих радарів з синтезуванням апертури антени додатковими системами активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами. Проте принципи функціонування систем апертурного синтезу у наш час є добре відомими лише для випадку обробки вузькосмугових та монохроматичних сигналів, а для випадку широко- та надширокосмугових – мало дослідженими. Тому задача синтезування алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами, яка вирішується у дисертаційній роботі, є актуальною та має наукову новизну.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Підхід до проведення дослідження, використаний здобувачем, заснований на поєднанні евристичних методів розробки радіосистем та статистичної теорії синтезу оптимальних методів обробки надширокосмугових стохастичних просторово-часових сигналів. Коректність обраних підходів до вирішення задачі та достовірність отриманих результатів підтвердженні як шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання, так і низкою експериментальних досліджень із залученням сучасної радіоелементної бази та передового вимірювального обладнання. Таким чином, отримані у роботі наукові результати є обґрунтованими та достовірними.

Водночас наукові дослідження виконувалися здобувачем на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» в рамках НДР «Розвиток теорії надширокосмугових 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.), під час яких було перевірено достовірність низки отриманих результатів.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше для активних радіолокаційних систем дистанційного зондування поверхонь широкосмуговими та надширокосмуговими сигналами, на основі математичного апарату спектральних V_F -перетворень визначено математичний зв'язок оцінок некогерентних зображень поверхонь із спектральною густиною комплексної функції просторової когерентності, спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи та енергетичним спектром зондуючих коливань, що дозволило здобувачу визначити операції формування радіозображень у різних частотних піддіапазонах спектра сигналу;

- вперше надано алгоритмічний опис процедур формування інтегральних за частотами некогерентних зображень поверхонь широкосмуговими і надширокосмуговими системами активного апертурного синтезу, основу якого складає розділення спектра прийнятого сигналу на піддіапазони частот з виконанням умови просторово-часової вузькосмуговості, що дозволило здобувачу розрахувати практичні алгоритми формування радіозображень зображень як у вузьких смугах спектра зондуючого сигналу, так і інтегрального зображення за всіма смугами;

– вперше виконано математичний опис статистичної оцінки інтегрального зображення, сформованого за всіма частотами спектру відбитого від поверхні ширококутового або надширококутового 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 антенної системи та енергетичним спектром зондуючих коливань, що дозволило визначити алгоритмічну структуру операцій формування інтегральних зображень досліджуваних поверхонь. Доповнення РСА пропонованою системою активного апертурного синтезу з ширококутовими зондуючими сигналами дозволить розширити лінійну зону огляду земної поверхні за кутом місця на 29% при граничному куті зондування РСА 50° від надиру;

– вперше у результаті рішення задачі активного апертурного синтезу зображень в оптимізаційній постановці методом пошуку максимуму функціоналу правдоподібності обґрунтовано доцільність введення 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;

– отримав подальший розвиток розвитку метод формування інтегрального некогерентного зображення поверхні системою активного апертурного синтезу, основу якого складає інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів. Практичні алгоритми реалізації цього методу полягають у формуванні взаємних кореляційних функцій сигналів із виходів елементів антенних решіток, обчисленні їх похідних з урахуванням затримок, та подальшому підсумовуванні отриманих сигналів;

Отже, в поставлене дисертаційній роботі завдання, що полягає у синтезуванні алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з ширококутовими зондуючими сигналами, виконане 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 освітньої 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 з дотриманням наукового стилю викладу матеріалу. Розділи, підрозділи та інформація в них логічно структуровані, а використана термінологія та математичні позначення є загальноприйнятими для наукових робіт в області радіолокації. Дослідження є цілісною роботою, в якій досягнуті тематична повнота та розкриття головної наукової ідеї автора

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури. Загальний обсяг дисертації 204 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформована його мета та окремі завдання, які необхідно вирішити для її досягнення. Водночас наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення та особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі проаналізовано особливості функціонування сучасних однопозиційних та багатопозиційних бортових радіолокаційних систем з синтезуванням апертури антени, визначено їх загальні переваги та недоліки при вирішенні задач дистанційного зондування Землі. Водночас виконано математичний опис моделі відбитих від зондованої поверхні широкосмугових полів, яку доцільно застосовувати при визначенні алгоритмів формування радіозображень у широкосмугових системах активного апертурного синтезу. У кінці розділу визначено перелік завдань, які необхідно вирішити у роботі.

У **другому** розділі розроблено та проаналізовано евристичні алгоритми формування зображень у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами. На основі математичного апарату спектральних V_F -перетворень визначено математичний зв'язок оцінок некогерентних радіозображень поверхонь із спектральною густиною комплексної функції просторової когерентності, спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи та енергетичним спектром зондуючих коливань. Виконано математичний опис статистичної оцінки інтегрального зображення, сформованого за всіма частотами спектрів відбитих від поверхні широкосмугових або надширокосмугових стохастичних сигналів, та встановлено її зв'язок з ефективним перерізом розсіювання поверхні, спектральною густиною комплексної функції просторової когерентності та спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи. Запропоновано алгоритмічний опис процедур формування інтегральних за частотами некогерентних зображень поверхонь широкосмуговими і надширокосмуговими системами активного апертурного синтезу, основу якого складає розділення спектра прийнятого сигналу на піддіапазони частот. Запропоновано метод формування інтегрального некогерентного зображення поверхні системою активного апертурного синтезу, основу якого складає інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів.

У **третьому** розділі синтезовано надано загальні теоретичні відомості щодо оптимізації систем дистанційного зондування, які надалі використані для синтезування методом пошуку максимуму функціоналу правдоподібності оптимального алгоритму обробки сигналів у пропонованій широкосмуговій системі активного апертурного синтезу. Запропоновано алгоритм обробки сигналів, основу якого складає операція декореляції прийнятих сигналів. На основі синтезованого алгоритма обробки сигналів запропонована структурна схема радіосистеми та описано принцип її роботи.

У **четвертому** розділі виконано імітаційне модулювання евристичного та оптимального алгоритмів формування зображень в системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими стохастичними зондуючими сигналами. Сформовані первинні радіозображення для випадку кожної із систем та виконано їх порівняння з вихідним оптичним з залученням декількох метрик, а саме: SSIM, MS-MSIM, середньоквадратичної похибки та коефіцієнту кореляції.

У **п'ятому** розділі виконано дослідження форм функцій кореляції сигналів, прийнятих рознесеними приймачами, для різних випадків смуги зондуючого сигналу – від монохроматичного до широкосмугового. Продемонстровано

ефективність використання широко- та надширокосмугових зондуючих сигналів для створення систем активного апертурного синтезу. Проведено експериментальне дослідження роботи такої системи при наявності зовнішнього джерела завади. Розраховано потенційну лінійну роздільну здатність радіозображень, формованих пропонованою системою активного апертурного синтезу за різних умов.

У **висновках** узагальнено матеріали, отримані автором згідно проведеним дисертаційним дослідженням. Водночас стислі висновки наведено після кожного розділу.

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, отримані здобувачем під час роботи над дисертацією, висвітлені у 8 наукових працях, серед яких:

- 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (США), яка індексується в Scopus та віднесена до четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank;

- 3 статі у науковому періодичному виданні України, що індексується у SCOPUS та віднесенедо третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, а також включеного на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, що рекомендовані до друку Вченою радою Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;

- 4 публікації у матеріалах міжнародних англомовних конференцій, що включені до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях:

- «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).

Водночас здобувач отримав 1 патент України на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації.

Наукові праці здобувача містять аналіз сутності проблеми дослідження, опис його виконання, застосованих методів та обґрунтовані висновки за отриманими результатами. У публікаціях порушення принципів академічної доброчесності не виявлено – роботи є оригінальними.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

За матеріалами дисертаційної роботи можна зробити наступні зауваження:

1) Робота занадто перенавантажена математичними виразами та проміжними розрахунками. Разом цим, математичні викладки та отримані при їх виконанні результати практично не пояснюються. Доцільно було б перенести значну частину математики в додатки, а в тілі роботи зосередитися на практичному значенні отриманих результатів.

2) У вступі та підрозділі 5.5 згадується про підвищену завадостійкість радіосистем для випадку використання широко- та надширокосмугових зондуючих сигналів, проте детальний аналіз цього твердження не виконано.

3) У підрозділах 2.2 та 3.2 запропоновано алгоритми формування зображень, які передбачають розділення широкосмугового процесу на окремі смуги, що задовольняють умовам КМН, та подальшу обробку лише на центральній частоті кожної з них. Водночас не приділяється уваги енергетичним втратам, які виникають при тому чи іншому ступені наближення до цих умов, які визначають складність обробки, та їх впливу на роботу системи.

4) Імітаційне моделювання виконано для умови антенної решітки квадратної форми з еквідистантно-розташованими елементами, яка є не ефективною при вирішенні задач апертурного синтезу. Доцільно було б розглянути більш складні форми антенних решіток.

5) Під час порівняння якості отриманого під час імітаційного моделювання первинного радіозображення з вихідним оптичним (табл. 4.1) не зазначено одиниці вимірювань для різних показників якості. Зокрема, наведена величина середньоквадратичної помилки, мабуть, залежить від форматів даних у порівнюваних зображеннях і буде різною для різних форматів.

6) Порівняння потенційної роздільної здатності запропонованої широкополосмугової системи активного апертурного синтезу із системою з синтезуванням апертури антени F-SAR (підрозділ 5.6) виконано дуже стисло, мало б сенс навести приклади зображень (хоча б на моделях), отриманих із використанням одночасно АС і SAR, щоб візуально порівняти їхню роздільну здатність.

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 широкосмугових 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:

Професор кафедри аерокосмічних
радіоелектронних систем
Національного аерокосмічного
університету ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут",
кандидат технічних наук, доцент



Вячеслав Шульгін

Підпис професора Вячеслава Шульгіна підтверджую

Вчений секретар
Національного аерокосмічного
університету ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут",
кандидат технічних наук, доцент



Тетяна БОНДАРЄВА

М.П.