

ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Важливими інструментами при розв'язанні задач картографування рельєфу місцевості, повітряної та космічної розвідки є активні радіосистеми аерокосмічного базування. Наразі серед таких систем найбільш поширеними є радіолокаційні станції (РЛС) з синтезуванням апертури антени, які дозволяють отримувати високоточні радіозображення заданої місцевості не залежно від поточних погодних умов та часу доби. Проте формування радіозображень з високою роздільною здатністю при залученні РСА можливе лише у бічних напрямках відносно надиру носія, що пояснюється особливостями поширення зондуючого сигналу та його обробкою у приймачі. Таким чином, при кутах зондування, близьких до надиру носія (зазвичай, $\pm 15^\circ$ від нього), радіозображення сучасними РСА не формуються. Це може знижувати загальну ефективність зондування заданої зони та вимагати додаткових прольотів для отримання повної інформації про неї, що на практиці не завжди є можливим. Тому тематика, пов'язана з вирішенням проблеми розширення області формування зображень радарними аерокосмічного базування, у сучасності є актуальною.

У дисертаційному дослідженні Церне Е.О. проблему обмеженості зони огляду сучасних РСА вирішено шляхом їх доповнення системами активного апертурного синтезу з широко- та широкосмуговими зондуючими сигналами. Проте алгоритми формування радіозображень системами апертурного синтезу є добре дослідженими лише для випадків оброблення вузькосмугових та монохроматичних сигналів та не є застосовними для широкосмугового випадку. Водночас перспективним є використання саме широкосмугових сигналів у якості зондуючих, що дозволить зменшити розміри антенної системи РЛС та підвищити роздільну здатність формованих нею радіозображень. 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.

При виконанні дослідження здобувач використав підхід, оснований на поєднанні статистичної теорії синтезу оптимальних методів оброблення сигналів у радіосистемах та евристичних методів розробки РЛС. Достовірність отриманих результатів підтверджена шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання і експериментальними дослідженнями з залученням розробленого макету системи активного апертурного синтезу та сучасного вимірювального обладнання.

Також достовірність низки отриманих результатів була підтверджена в межах науково-дослідних робіт «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.), виконавцем яких був здобувач.

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;

- вперше 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, спектральною густиною автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи та енергетичним спектром зондуючих коливань;

- 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;

– 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;

– 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. Суттєву новизну мають практичні алгоритми реалізації цього методу, що 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.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання синтезування алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами виконано, 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.

З огляду на звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Церне Едуарда Олексійовича є результатом самостійних досліджень здобувача та 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 та коректним використанням загальнонаукових і фахових термінів. Робота має логічну структуру, теоретичні та практичні положення у ній викладені послідовно, є повними та розкривають головні наукові ідеї автора.

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

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, виконано загальне порівняння існуючих радіосистем формування радіозображень та визначено їх недоліки. На основі аналізу сформована мета дослідження й окремі завдання, виконання яких дозволить її досягти. Також у розділі наведені пункти наукової новизни проведеного дослідження, зазначені науково-дослідні роботи, в межах яких воно виконувалося, та вказано особистий внесок здобувача.

У **першому** розділі наведено основні принципи функціонування існуючих однопозиційних та багатопозиційних радарів з синтезуванням апертури антени, вказано їх основні переваги та недоліки, а також обґрунтована наявність «мертвої» зони формування радіозображень у таких бортових системах. Водночас виконано математичний та статистичний опис моделей випромінених та прийнятих широкосмугових сигналів, що необхідні для визначення алгоритмів формування радіозображень в розглянутій здобувачем системі активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами. Також у розділі сформульовано задачі наукового дослідження.

У **другому** розділі введено поняття спектральної густини комплексної функції просторової когерентності та спектральної густини автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи, використання яких є доцільним для опису широко- та надширокосмугових радіосистем. Визначено математичний зв'язок між зазначеними спектральними густинами та оцінкою некогерентного радіозображення досліджуваної поверхні. Виконано алгоритмічний опис процедури формування інтегральних за частотами некогерентних зображень поверхонь широкосмуговими і надширокосмуговими системами активного апертурного синтезу, основу якої складає розділення спектра прийнятого сигналу на піддіапазони частот. Виконано математичний опис 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, спектральними густинами комплексної функції просторової когерентності та автокореляційної функції амплітудно-фазового розподілу приймальної антенної системи. Запропоновано метод формування інтегрального некогерентного радіозображення зондованої системою активного апертурного синтезу поверхні, основною алгоритмічною

операцією в якому є інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів.

У третьому розділі методом максимуму функціоналу правдоподібності синтезовано математичну модель оптимального алгоритму обробки сигналів в системі активного апертурного синтезу за умови використання широко- та надширокосмугових зондуючих сигналів. Виконано опис основних операцій оброблення прийнятих радіосистемою сигналів, запропоновано структурну схему радарної системи та наведено принцип її роботи.

Четвертий розділ присвячений імітаційному моделюванню отриманих загального евристичного та оптимального алгоритмів формування зображень в широкосмугових системах активного апертурного синтезу. Сформовані первинні радіозображення для випадку кожного з алгоритмів та більш детально досліджено роботу оптимального алгоритму формування радіозображень з операцією декореляції за різних випадків точності оцінки функції невизначеності системи. Сформовані радіозображення порівняні з вихідним оптичним з використанням декількох метрик: SSIM, MS-MSIM, середньоквадратичної похибки та коефіцієнту кореляції.

У п'ятому розділі з залученням розробленого макету двоантенної системи активного апертурного синтезу досліджено кореляційні функції сигналів, прийнятих рознесеними приймачами, при різних смугах частот зондуючого сигналу. Експериментально доведено доцільність оброблення широкосмугових стохастичних сигналів у системах активного апертурного синтезу. Досліджено роботу розробленого макету при впливі на нього вузькосмугової завади. З врахуванням результатів експериментальних досліджень, розраховано потенційну лінійну роздільну здатність радіозображень пропонуваної широкосмугової системи активного апертурного синтезу.

У висновках узагальнено результати, отримані автором у проведеному дисертаційному дослідженні. Також 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 дисертації висвітлені здобувачем: у 1 статті у науковому періодичному виданні іншої держави (США), що індексуються н.м.б.д. Scopus (Q4); у 3 публікаціях у науковому періодичному виданні України категорії «А», що індексуються Scopus (Q3); у 1 патенті на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосується наукових результатів дисертації. Водночас результати дисертації були апробовані на 4 міжнародних англomовних фахових конференціях, матеріали яких індексуються Scopus. Здобувач доповідав на «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. При математичній формалізації зонduючого сигналу, відбитого підстильною поверхнею, не враховано ефект Доплера, який буде виникати за умови руху носія радіолокаційної станції.

2. У роботі зазначено, що запропонований алгоритм формування радіозображень, основу якого складає операція інтегрування за часом другої похідної просторово-часової кореляційної функції прийнятих сигналів, дозволить зменшити складність реалізації широкосмугової системи, проте не вказано, у чому виражається дане зменшення і яку величину воно становить.

3. У роботі пропонується алгоритм оброблення сигналів, який передбачає розділення широкосмугового сигналу на окремі вузькосмугові процеси, проте не наведено критерію, за яким дане розділення необхідно виконувати.

4. У роботі синтез оптимального алгоритму виконано за умови зонduючого сигналу лише з гаусівським розподілом амплітуди і не враховано можливість наявності на вході системи коливань з іншими розподілами.

Дані зауваження 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.

Офіційний опонент:

Начальник кафедри радіоелектронних систем пунктів управління Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба

доктор технічних наук, професор
«27» 05 2024 року



Володимир ВАСИЛИШИН

Підпис доктора технічних наук, професора Васишлина В.І. засвідчую:



Начальник штабу – заступник начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
подковник

Дмитро ГУР'ЄВ

Вчений секретар вченої ради Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба
кандидат філософських наук, доцент
працівник ЗС України
«27» 05 2024 року



Людмила ПЕТРОВА