ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Черне Едуарда Олексійовича на тему «Апертурний синтез зображень з використанням широкосмугових сигналів», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

На засіданні кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем за участі: голови засідання – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедри Жили С.С; д-р техн. наук, професора Волосюка В.К.; д-р техн. наук, професора Павлікова В.В.; д-р техн. наук, доцента Попова А.В.; д-р техн. наук, професора Руженцев М.В.; канд. техн. наук, доцента Шульгіна В.І.; канд. техн. наук, доцента Абрамова О.Д.; канд. техн. наук, доцента Мазуренка О.В.; канд. техн. наук, доцента Нежальської К.М.; канд. техн. наук, доцента Одокієнка О.В.; канд. техн. наук, доцента Щербини К.О.; канд. техн. наук, доцента Вонсовича М. А.; ст. викладача Душепи В.А.; аспіранта Власенка Д.С.; аспіранта Інкарбаєвої О.С.; аспіранта Черепніна Г.С.; аспіранта Колеснікова Д.В.; аспіранта Кошарського В.В.; аспіранта Ковальчука Д.І.; аспіранта Перетятько М.С.; канд. техн. наук, доцента, доцента кафедри інформаційно-комунікаційних технологій ім. О.О. Зеленського Васильєвої І.К.; д-р техн. наук, професора, професора кафедри інформаційно-комунікаційних технологій ім. О.О. Зеленського Тоцького О.В.; начальника кафедри радіоелектронних систем пунктів управління Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба Василишина В.І., відбулася публічна презентація дисертаційної роботи Черне Едуарда Олексійовича на тему «Апертурний синтез зображень з використанням широкосмугових сигналів».

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи, ухвалено висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

1. Актуальність теми дослідження. Для вирішення задач картографування рельєфу поверхні, повітряної та космічної розвідки, керування ракетним озброєнням активно використовуються активні та пасивні радіотехнічні системи, що базуються на аерокосмічних носіях. Радари з синтезуванням апертури антени на сьогоднішній день є одними з найбільш поширених та ефективних серед таких систем. Їх особливість полягає у когерентному накопиченні та подальшій обробці сигналу, прийнятого під час польоту літального апарату, що дозволяє досягти високої просторової роздільної здатності формованих радіозображень підстильної поверхні в азимутальному напрямку без необхідності використання великогабаритних вздовжфюзеляжних антенних систем на борту носія.

Проте такі радіолокаційні станції мають деякі недоліки, насамперед – обмеженість зони огляду підстильної поверхні. Сучасні системи формують радіозображення лише у бічних напрямках та мають «мертву зону» огляду, яка

зазвичай складає до +15 град. від напрямку у надир. Це пов’язано з неможливістю забезпечення достатньої роздільної здатності зображень за вказаними кутами, а за напрямком у надир – роздільна здатність відсутня повністю.

Формування радіозображень у мертвій зоні активних радарів можливо забезпечити залученням пасивних систем, наприклад – систем апертурного синтезу, які набули широкого поширення в радіоастрономії. Однак пряме доповнення активних радарів пасивними системами апертурного синтезу для формування радіозображень без розриву у напрямку надиру має деякі складнощі. Так, сформовані такими радарами зображення мають різний фізичний сенс. Окремі елементи дозволу радіозображення, сформованого активним радаром, еквівалентні ефективній поверхні розсіювання, а радіозображення, отриманого з залученням пасивних систем – відповідає значенню радіояскравісної температури.

Також складнощі виникають з забезпеченням високої просторової роздільної здатності радіозображень, формованих існуючими пасивними радарами, адже її забезпечення вимагає залучення антенних решіток, геометричні розміри яких можуть складати сотні і тисячі кілометрів. Це унеможливлює реалізацію методу апертурного синтезу у вигляді бортової системи авіаційного.

Наведені складнощі можуть бути вирішені переходом від пасивних вузькосмугових систем активного апертурного синтезу до активних з широкосмуговими зондуючими сигналами. Таким чином, задача синтезування алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами, яка вирішується у дисертаційному дослідженні є актуальною. Реалізація таких алгоритмів дозволить формувати радіозображення «мертвої зони» сучасних радарів з синтезуванням апертури антени у напрямку надиру, а використання широкосмугових зондуючих сигналів дозволить зменшити геометричні розміри антенної системи до рівня, прийнятного для встановлення на аерокосмічні носії.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Отримані автором результати дисертації використовувались при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі аерокосмічних радіоелектронних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» і були відображені в наступних звітах про НДР: «Розвиток теорії надширокосмугових систем активного апертурного синтезу для високоточного дистанційного зондування з високошвидкісних аерокосмічних платформ» (№ДР 0119U100968, 2019-2021рр.), «Проєктування, розроблення макету та експериментальне дослідження пасивного радару з завадозахищеним сигналом підсвічування цілей для виявлення БПЛА» (№ДР 0123U102000, 2023-2024рр.).

3. Наукова новизна отриманих результатів.

1) В дисертаційній роботі dперше виконано 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 антенної системи та енергетичним спектром зондуючих коливань. Це дозволило визначити алгоритмічну структуру операцій формування інтегральних зображень досліджуваних поверхонь. Реалізація радіотехнічної системи на основі даного алгоритму дозволить формувати радіозображення в кутах $\pm 15^{\circ}$ від напрямку у надир аерокосмічного носія, яка є «мертвою» зоною для сучасних радарів з синтезуванням апертури антени. Доповнення РСА системою активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами дозволить розширити лінійну зону огляду земної поверхні за кутом місця на 29% при граничному куті зондування РСА 50° від надиру;

2) в дисертаційній роботі 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. У результаті отримано практичні алгоритми формування радіозображень зображень як у вузьких смугах спектра зондуючого 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.;

3) в дисертаційній роботі 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. Це дозволило визначити операції формування радіозображень у різних частотних піддіапазонах спектра сигналу, що випромінюється;

4) в дисертаційній роботі вперше у результаті рішення 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. У результаті імітаційного моделювання підтверджено, що введення операції декореляції у алгоритм формування радіозображень системою активного апертурного синтезу дозволяє підвищити на 27% якість отримуваних радіозображень (за критерієм коефіцієнта кореляції);

5) в дисертаційній роботі 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. Пропонований метод дає змогу істотно спростити апаратурне та програмно-алгоритмічне забезпечення розв'язання задачі апертурного синтезу зображень, що досягається виключенням з алгоритму формування радіозображень множників, врахування яких ускладнене при його практичній реалізації.;

4. Практичне значення результатів роботи.

1) Доповнення класичних радарів з синтезуванням апертури антени системою активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами дозволяє розширити зону формування радіозображення шляхом усунення «мертвої» зони РСА;

2) Використання широкосмугових зондуючих сигналів за рахунок звуження функції кореляції процесів, прийнятих рознесеними приймальними елементами, дозволяє зменшити геометричні розміри антенної решітки системи активного апертурного синтезу без втрати у роздільній здатності порівняно з вузькосмуговими системами. Це робить пропоновану систему придатною до використання на борту аерокосмічного носія;

3) Зменшення обчислювальної складності алгоритмів обробки інформації у широкосмугових системах активного апертурного синтезу за рахунок розділення широкосмугового сигналу на вузькосмугові процеси дозволяє реалізувати необхідні математичній операції на існуючій аналоговій та цифровій радіоелементній базі.

5. Апробація/використання результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях:

1. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, (UkrMW 2020).
2. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON 2021)
3. 19th IEEE International Conference on Smart Technologies (EUROCON 2021);
4. 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2022).

6. Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Черне Едуарда Олексійовича визнана оригінальною роботою, яка виконана самостійно і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Зміст основних розділів дисертації перевірено 08.04.2024 р. на наявність текстових запозичень в системі «UNICHECK», в порівнянні з файлами бібліотеки

корпоративного облікового запису Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 8 наукових публікацій та отримано 1 патент України на винахід. Серед публікацій:

1) 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави (США), яка індексується в SCOPUS (зі співавторами);

2) 3 статті у наукових періодичних видання України категорії А, що індексуються у SCOPUS (Q3) (зі співавторами);

3) 4 публікацій в працях міжнародних конференції, матеріали яких включено у базу даних Scopus (з співавторами).

Статті у наукових періодичних виданнях:

1) . V. Nechyporuk, V. V. Pavlikov, A. D. Sobkolov, O. E. Tserne, Valerii K. Volosyuk, S. S. Zhyla Aperture synthesis of surface images using active remote sensing with ultra-wideband stochastic signals // Telecommunications and Radio Engineering, Vol. 79, 2020, Is. 15, pp. 1327-1347. Doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i15.30 http://www.dl.begellhouse.com/journals/0632a9d54950b268,0d5f232b6dbbf1fa,05418f490fbd2325.html [індексується у н.м.б.д. Scopus, Q4].

В роботі здобувачем виконано імітаційне моделювання алгоритму формування результатів V-перетворень від різних типів вхідних функцій.

2) Volosyuk, V., Zhyla, S., Pavlikov, V., Tserne, E., Sobkolov, A., Shmatko, O. & Belousov, K. 2021, "Mathematical description of imaging processes in ultra-wideband active aperture synthesis systems using stochastic sounding signals", Radioelectronic and Computer Systems, 2021, no. 4, pp. 166-182. Doi:10.32620/reks.2021.4.14 [індексується у н.м.б.д. Scopus, Q3]

В роботі здобувачем виконано імітаційне моделювання алгоритму формування радіозображень у системі активного апертурного синтезу.

3) 3. Pavlikov, V., Belousov, K., Zhyla, S., Tserne, E., Shmatko, O., Sobkolov, A., Vlasenko, D., Kosharskyi, V., Odokiienko, O. & Ruzhentsev, M. 2021, "Radar imaging complex with sar and asr for aerospace vechicle", Radioelectronic and Computer Systems,2021 , no. 3, pp. 63-78. Doi:10.32620/reks.2021.3.06 [індексується у н.м.б.д. Scopus, Q3]

В роботі здобувачем було розраховано математичний опис оптимального алгоритму формування радіозображень у системах активного апертурного синтезу.

4) O.G. Viunytskyi, V.I. Shulgin, A.A. Roienko, A.V. Totsky, K.O. Eguiazarian, “Fetal ecg extraction from the abdominal signal using wavelet bispectrum technique”, Telecommunications and Radio Engineering, USA, Volume 82, Issue 9, 2023, pp. 29–46, doi: https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2023047588 (**Scopus, Q4**).

В роботі здобувачем було розроблено, реалізовано та досліджено експериментальний макет системи активного апертурного синтезу.

Статті у працях міжнародних конференцій, які проіндексовано у Scopus:

1) V. Pavlikov, V. Volosyuk, M. Nechyporuk, A. Sobkolov, O. Odokienko and E. Tserne, "Algorithm of Formation Radio Images from Aerospace Carriers," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 2020, pp. 54-58, doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252702.

В роботі здобувач виконав імітаційне моделювання алгоритму формування радіозображень системою активного апертурного синтезу.

2) V. Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, E. Tserne, O. Shmatko and A. Sobkolov, "Development of Broadband Criterion for Spatially Distributed Radio Systems Synthesis," 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 232-236, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575281

В публікації здобувачем було виконано імітаційне моделювання пропонованого критерію.

3) V. Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, E. Tserne, O. Shmatko and A. Sobkolov, "Active-Passive Radar for Radar Imaging from Aerospace Carriers," IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies, 2021, pp. 18-24, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535619.

В роботі здобувач виконав імітаційне моделювання алгоритмів обробки сигналів у активно-пасивному комплексі.

4) Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, E. Tserne, O. Shmatko and O. Odokienko, "Aerospace Wide Swath Radio Vision Complex," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022, pp. 93-98, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9766879.

В роботі здобувач виготовив та дослідив експериментальний зразок системи активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами.

Отримані результати стали основою отриманого патента:

1) Спосіб і пристрій формування радіолокаційного зображення земної поверхні з літального апарата. Патент України на винахід №. 127594. / Павліков В. В., Черне Е. О., Шматко О. О., Волосюк В.К., Одокієнко О.В., Собколов А. Д., Попов А. В.; 26.10.2023

8. Висновок наукового керівника

Дисертація здобувача містить результати завершеного наукового дослідження. Достовірність отриманих у дисертації результатів підтверджена як результатами теоретичних досліджень і комп’ютерного моделювання, так і експериментальним дослідженням макету пропонованої системи. Тема дисертації має важливе наукове та практичне значення. Про високий науковий рівень дисертації свідчить таке: вона спрямована на вирішення актуальної наукової

проблеми синтезування алгоритмів обробки сигналів у системах активного апертурного синтезу з широкосмуговими зондуючими сигналами, реалізація яких дозволить формувати радіозображення «мертвої зони» сучасних радарів з синтезуванням апертури антени у напрямку надиру, а використання широкосмугових зондуючих сигналів дозволить зменшити геометричні розміри антенної системи до рівня, прийнятного для встановлення на аерокосмічні носії. Підтверджую, що здобувачем Черне Е.О. було дотримано академічну доброчесність протягом підготовки наукових статей, доповідей на міжнародних конференціях та в процесі написання дисертації. Враховуючи, що Черне Едуард Олексійович успішно виконав індивідуальний навчальний план та індивідуальний план наукової роботи, досягнув високих результатів у навчанні за відповідною освітньо-науковою програмою та написанні дисертації, яка є результатом самостійного дослідження, є завершеною науковою працею, містить наукову новизну, виконана на належному науковому рівні, відповідає встановленим вимогам до дисертацій докторів філософії, вважаю, що дисертацію на тему «Апертурний синтез зображень з використанням широкосмугових сигналів» можна рекомендувати до захисту, а її автору Черне Едуарду Олексійовичу присудити ступінь доктора філософії за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

9. Загальний висновок

Вважаємо, що дисертаційна робота Черне Едуарда Олексійовича «Апертурний синтез зображень з використанням широкосмугових сигналів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44). Дисертаційна робота може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Головуючий на засіданні кафедри
аерокосмічних радіоелектронних систем
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, доцент

9 квітня 2024 р. _____ Семен ЖИЛА