

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора кафедри інформаційних та комунікаційних технологій Міжнародного науково-технічного університету ім. академіка Юрія Бугая

Бутка Ігоря Миколайовича

на дисертацію Малашти Павла Петровича

на тему: «Принципи та особливості формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА», подану на здобуття освітньо - наукового ступеня

доктора філософії галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

за спеціальністю 172 « Телекомунікації та радіотехніка»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота присвячена задачі встановлення принципів та особливостей формування фантомних радіолокаційних зображень космічних радіолокаторів з синтезованою апертурою (далі – РСА) із застосуванням інтегрованих у підкладку хвилеводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ в радіотехнічних системах фантомізації.

Актуальність представленого дослідження зумовлена необхідністю створення вітчизняних радіотехнічних систем протидії дистанційному зондуванню космічними радарми з синтезованою апертурою об'єктів критичної інфраструктури України, що набуває суттєвого значення в умовах військового стану. Основна функція таких радіотехнічних систем – це фантомізація зображень (тобто створення хибних елементів або спотворення параметрів реальних об'єктів на цих зображеннях) радарів космічного базування з синтезованою апертурою. Традиційні методи **оманливої** протидії класичним РЛС, які базуються на створенні певної часової затримки відбитого від об'єкту сигналу, є не придатними у випадку з радарми з синтезованою апертурою, що обумовлено їх особливістю обробки відбитого сигналу. Так, формування радіозображення радарів з РСА визначається не тільки затримкою прийнятого сигналу, але й його амплітудою, фазою, часом інтегрування апертури і т.д. Специфічність та складність додає також саме космічне базування РСА. Однак,

незважаючи на наявність низки публікацій з даної тематики у світовій літературі, принципи та особливості формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА досліджені недостатньо, а в науковій літературі України за останні більше ніж тридцять років публікації даної тематики відсутні.

Особливо треба відмітити, що наявні в світовій літературі публікації майже не розглядають особливості побудови радіотехнічних систем фантомізації космічних РСА на рівні НВЧ-елементної бази, в тому числі й спеціальної на основі напівпровідникових кристалів. Проте наявність такої елементної бази та її характеристики визначають принципову можливість практичного створення даних радіотехнічних систем.

Таким чином, тематика дисертаційного дослідження, присвячена встановленню принципів та особливостей формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА із застосуванням спеціальної НВЧ елементної бази на кристалах $A^{II}B^{VI}$ в радіотехнічних системах фантомізації, є актуальною.

Структура та зміст дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота Малашти П. П. має чітко окреслену, логічно вибудовану структуру, яка відповідає поставленій меті та завданням дослідження. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел після кожного розділу, а також додатків. Обсяг дисертації становить 180 сторінок, з яких 138 сторінок — основна частина. Робота містить 67 рисунків, 8 таблиць, а список літератури складається сумарно зі 140 бібліографічних джерел, що свідчить про достатню наукову базу проведеного дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, методи дослідження, наукову новизну, практичне значення, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та наведено відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження і публікації здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану області формування фантомних об'єктів у радіолокаційних зображеннях космічних РСА. Проведено аналіз існуючих типів глушіння космічних РСА, блок-схем радіотехнічних систем протидії космічним РСА, методів та алгоритмів формування оманливого сигналу. На основі аналізу обґрунтовано доцільність досліджень у напрямі встановлення принципів та особливостей формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА, сформульовано мету та завдання дослідження.

Другий розділ присвячено принципам та особливостям побудови радіотехнічної системи фантомізації зображень космічних РСА. Запропоновано сучасну концепцію формування зазначеної системи. Автором визначено просторово-часові параметри взаємодії у системі «космічний РСА – радар фантомізації» та оцінено очікувані характеристики ЛЧМ-сигналу з урахуванням конфігурації формування радіозображення і діаграми спрямованості антени. На основі аналізу просторової роздільної здатності РСА для різних видів огляду підстильної поверхні визначено можливі розміри фантомного об'єкта. Розроблено узагальнену математичну модель сигналу, що відбивається від підстильної поверхні та реєструється приймачем космічного РСА, а також наведено відповідну блок-схему радару. Шляхом застосування статистичної теорії та методу максимальної правдоподібності синтезовано структурну схему приймача радіотехнічної системи фантомізації. Досліджено точність оцінювання параметрів ЛЧМ-сигналу в приймальному каналі і отримано аналітичні вирази для розрахунку їх граничних середньоквадратичних похибок. Встановлено принцип формування сигналу радару фантомізації космічних РСА, а також запропоновано блок-схему передавача, яка потребує використання високошвидкісного малогабаритного фазообертача з плавним керуванням фазою.

У третьому розділі вперше обґрунтовано теоретичні основи проєктування інтегрованих у підкладку хвильоводів на базі напівпровідникових кристалів $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ для

радіотехнічних систем фантомізації космічних РСА. Встановлено принципи та особливості формування швидкодіючого фазообертача з оптичним керуванням на базі SIW-хвильоводів на основі кристалів AlN^{VI} для створення передавача радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА.

Четвертий розділ містить опис методу обробки зображень для радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА, який потрібен для попереднього визначення просторових областей створення фантомних об'єктів, налаштування радару фантомізації і наповнення його банку моделей. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність методу і дозволили встановити, що використання оператора Робертса є найбільш ефективним для детектування меж на РСА-зображеннях.

У загальних висновках сформульовано основні результати роботи, що підтверджують досягнення поставленої мети та вирішення визначених завдань.

Загалом, структура дисертації є логічною, послідовною та повністю відповідає вимогам до кваліфікаційної наукової роботи. Зміст розділів розкриває предмет дослідження, а подача матеріалу — цілісна та обґрунтована.

Наукова новизна результатів дослідження

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає у встановленні принципів та особливостей формування фантомних зображень космічних РСА, а саме:

1. Отримали подальший розвиток математичні моделі сигналів космічного РСА, параметри та структура системи «РСА – радар фантомізації», які відрізняються урахуванням умов формування сигналу для фантомізації зображень саме космічних РСА, що дозволило сформувати на базі статистичної теорії радіотехнічних систем детальну структуру прийомного та передавального трактів таких систем;

2. Удосконалено метод визначення граничних середньоквадратичних похибок оцінок параметрів ЛЧМ-сигналу у приймальному каналі радіолокатора фантомізації, який відрізняється застосуванням обґрунтованого функціоналу правдоподібності для системи «радар фантомізації – космічний РСА», що дозволило оцінити вплив похибок оцінювання параметрів сигналу РСА на роботу радара фантомізації при його технічній реалізації;

3. Вперше обґрунтовано теоретичні основи проектування SIW – хвилеводів на основі напівпровідникових кристалів $A^{II}B^{VI}$ для формування швидкісного керованого фотозбудженням фазообертача в складі передавача радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання встановлення принципів та особливостей формування фантомних зображень космічних РСА із застосуванням інтегрованих у підкладку хвилеводів на кристалах $A^{II}B^{VI}$ в радіотехнічних системах фантомізації, виконано повністю. Здобувач продемонстрував розуміння теоретичних основ функціонування радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА, володіння сучасним апаратом математичного моделювання сигналів її приймально-передавального тракту, застосування електродинамічного моделювання НВЧ елементної бази для систем фантомізації, розуміння способу обробки зображень космічних РСА, що свідчить про його здатність до самостійної наукової діяльності.

Практична цінність отриманих результатів

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в можливості їх подальшого використання для розробки і побудови вітчизняної радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА. Особливої уваги заслуговують наступні результати:

1. Сформовано рекомендації та аналітичний апарат для створення

малогабаритної елементної бази НВЧ-діапазону на основі SIW-технології та кристалів групи $A^{II}B^{VI}$, що необхідно для проектування НВЧ пристроїв спеціального призначення, а також дозволяє суттєво знизити масогабаритні показники аерокосмічної бортової апаратури.

2. Розроблено та наведено приклад реалізації методу обробки зображень для радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА, який може бути інтегрований у перспективні комплекси радіоелектронного захисту від космічної розвідки.

3. Отримані блок-схеми приймального та передавального трактів радіотехнічної системи фантомізації космічних РСА є основою для практичної розробки та технічного впровадження відповідної апаратури спеціального призначення.

Результати дослідження були апробовані в рамках науково-дослідної роботи «Теорія радіотехнічних систем формування фантомних радіозображень радарам аерокосмічного призначення» (Д501-1/2024-Ф), а також окремі положення дослідження інтегровані у навчальний процес при викладанні дисциплін, пов'язаних із дистанційним зондуванням космічними РСА.

Повнота викладу основних результатів в публікаціях

Основні наукові результати, сформульовані в дисертації висвітлені в опублікованих працях здобувача. Дисертантом опубліковано 4 наукові публікації за темою дослідження, з яких 2 статті опубліковано у наукових фахових виданнях, що входять до переліку МОН України, 2 статті — у міжнародних виданнях, індексованих у наукометричній базі Scopus, а також 4 тез доповідей, представлених на міжнародних наукових конференціях, які також індексуються наукометричною базою даних Scopus.

У публікаціях послідовно викладено концепцію, параметри, сигнали,

принципи та особливості побудови радіотехнічної системи фантомізації радіолокаційних зображень космічного РСА, теоретичні основи формування НВЧ елементної бази на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$, способу обробки зображень космічних РСА для цілей фантомізації. Таким чином, можна зробити висновок, що основні положення та висновки дисертаційної роботи мають достатнє висвітлення у публікаціях.

Апробація результатів дисертаційного дослідження

Основні положення та результати дисертації апробовані на міжнародних наукових конференціях, зокрема: «14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)» (September, 19 – 21, 2024, Ceske Budejovice, Czech Republic), «17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)» (October, 08-12, 2024, Lviv, Ukraine) та «15th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)» (September, 17-19, 2025, Sibenik, Croatia).

Апробація є достатньою, змістовною та відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Недоліки та зауваження до дисертаційного дослідження

Робота є завершеним науковим дослідженням та має самостійний характер. Разом з тим, окремі положення потребують уточнення або доопрацювання, та мають рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

1. У роботі не розглянуто детально побудову та алгоритм функціонування таких блоків передавача радару фантомізації як «блок моделей» та «блок супутників», хоча вони є важливими з огляду оперативності формування імітаційних об'єктів на зображеннях космічного РСА.

2. Принцип формування сигналу фантомізації космічного РСА наведено для спрощеної моделі ЛЧМ – сигналу. При цьому не враховано вплив комплексного коефіцієнту розсіювання підстильної поверхні, загасання сигналу, вплив атмосферних явищ.

3. В дисертаційній роботі детально не аналізується для яких робочих частот доцільно розробляти радар фантомізації космічних РСА та фазообертач на основі кристалів $A^{II}B^{VI}$.

4. В третьому розділі роботи наводяться дані щодо електрофізичних та фотоелектричних властивостей кристалів $A^{II}B^{VI}$ різного складу. Було б доцільно додати в цей розділ порівняння щодо використання кристалів $A^{II}B^{VI}$ різного складу для побудови керованого фазообертача передавача радару фантомізації.

5. В четвертому розділі було б доцільно більш детально розглянути застосування машинного навчання сукупно з наданим методом обробки зображень для формування банку моделей радару фантомізації.

6. На рисунках трапляються аббревіатури без перекладу українською мовою. Наприклад, рис. 1.9 на стор. 45 (“DRFM”, “IFM”), рис. 3.5 на стор 146 (“Field”, “V/m”). Це може ускладнити зручність читання.

7. Не всі умовні позначення і скорочення, що часто застосовуються в роботі, наведені в переліку умовних позначень і скорочень. Наприклад, ФАР (с.92). Не наведено виразів для розрахунку помилок обробки зображень першого і другого роду (с. 169).

Вважаю, що зазначені зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи й не впливають на її наукову цінність.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота на тему «Принципи та особливості формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА» є завершеним науковим

дослідженням, у якому розв'язано актуальне наукове завдання встановлення принципів та особливостей формування фантомних радіолокаційних зображень космічних РСА із застосуванням інтегрованих у підкладку хвилеводів на кристалах $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ в радіотехнічних системах фантомізації. Робота відзначається належним рівнем теоретичного опрацювання, науковою новизною, обґрунтованістю запропонованих рішень, а також практичною значущістю результатів.

За змістом, структурою, обсягом проведених досліджень та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам, визначеним у Постанові Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами), а її автор Малашта Павло Петрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент:

професор кафедри інформаційних та
комунікаційних технологій
Міжнародного науково-технічного
університету ім. академіка Юрія Бугая,
д.т.н., професор

_____ Ігор БУТКО

«_____» _____ 2026 року