

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

ГОРОБЕЦЬ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 537.8 + 528.855

**НАЗЕМНЕ МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ  
АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ  
ЗЕМЛІ**

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Єлісєєва Надія Петрівна**, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри прикладної електродинаміки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Іванов Віктор Кузьмич**, Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я Усикова Національної академії наук України (м. Харків),  
завідувач відділу дистанційного зондування Землі.

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Панасенко Сергій Валентинович**, Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України (м. Харків),  
завідувач відділу фізики іоносфери.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р. о \_\_\_\_ годині

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02

Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: майдан Свободи, 4, ауд. 3-9, м. Харків, Україна, 61022.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В наш час багато зусиль світового наукового співтовариства вкладається у розвиток сфери дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Розвиток цієї області науки та технологій вкрай необхідний для забезпечення прийняття уповноваженими органами обґрунтованих рішень в таких сферах діяльності, як безпека й обороноздатність країни, надзвичайні ситуації (в тому числі пожежна безпека лісового господарства, повені, урагани, тощо), контроль стану врожаю та ще безлічі дуже важливих задач. Проте, за час експлуатації орбітальні засоби землеогляду піддаються значним впливам зовнішнього середовища, що призводить до суттєвих змін їх параметрів, в результаті чого вони потребують постійного дистанційного оцінювання (зовнішнього калібрування) характеристик. Розвиток необхідних для цього норм і засобів, зокрема для радіолокаційних космічних сенсорів, лише починається [1–37] і тому вони слабо поширені. Відтак, орган, який приймає рішення державного рівня, не має можливості об'єктивно оцінити якість отриманих знімків. В той самий час, у сфері зовнішнього калібрування космічних сенсорів міжнародною спільнотою визнано як одне з ключових напрямків забезпечення простежуваності величини сигналу, отриманого від сенсора орбітального базування, до державних еталонів (і тим самим до одиниць СІ) – найважливішої складової метрологічного забезпечення ДЗЗ [38].

Відзначимо, що оптичні засоби ДЗЗ отримали більш значний розвиток методів зовнішнього післястартового калібрування (*vicarious calibration*). Імовірно це пов'язано з великою кількістю прикладних задач, що ефективно розв'язуються як у комерційному секторі, так і в науковій сфері. Зокрема, у напрямку забезпечення простежуваності сигналів від космічних сенсорів оптичного й інфрачервоного діапазонів до метрологічної системи одиниць зроблено значний науковий внесок [39].

В свою чергу радіолокаційні засоби ДЗЗ дозволяють розв'язувати ширший спектр задач за рахунок незалежності від метеорологічних умов або часу доби, і тому отримали значніший розвиток за останні роки. Нові методи використання даних ДЗЗ диктують більш жорсткі вимоги до якості його продукту, яка забезпечується не в останню чергу адекватним метрологічним супроводом зйомки, в тому числі необхідною періодичністю та точністю експлуатаційного калібрування датчиків ДЗЗ.

Таким чином, обрана тема дисертації є актуальною, бо передбачає розробку низки фізико-математичних і науково-технічних рішень, а також програмного забезпечення для найважливішої складової надійного метрологічного забезпечення – післястартового калібрування радіолокаторів

космічного базування з синтезованою апертурою антени (РСА), а також розробку апаратних рішень у сфері малогабаритних антен для ретрансляторів зонduючого сигналу (як мобільних та ефективних пристроїв для зовнішнього калібрування РСА). Ці розробки дозволяють розв'язати низку нагальних задач зовнішнього калібрування РСА, а отже, і задовільнити тим самим існуючий попит на засоби підвищення якості інформаційного продукту ДЗЗ й ефективності його використання, а саме – простежуваність величини сигналу, отриманого від сенсора орбітального розташування, з заданою невизначеністю до метрологічних величин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконані у відповідності з поточними та перспективними планами наукової роботи Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за тематикою розвитку теорії та техніки в області прикладної електродинаміки та безпосередньо пов'язані з виконанням планових фундаментальних держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України: «Оптимізація просторового розподілу поля поблизу пристроїв, які випромінюють електромагнітні хвилі» (державна реєстрація №0109U000537; 2009–2011 рр.), «Електромагнітні поля поблизу випромінюючих систем великих електричних розмірів» (державна реєстрація №0112U000545; 2012–2014 рр.), «Аналіз і синтез заданого просторового розподілу електромагнітного випромінювання антенних решіток на довільних відстанях» (державна реєстрація №0116U000811; 2016–2018 рр.), а також НДР «Створення полігонно-калібрувального комплексу для наземного забезпечення космічної системи 710КС» (державна реєстрація №0110U004803; 2010–2012 рр.), яка була виконана кафедрою прикладної електродинаміки за господарським договором. Автор брав участь в даних НДР як виконавець і його науковий внесок відображено в дисертації.

**Мета і завдання роботи.** Метою дисертаційної роботи є розвиток методів зовнішнього післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени як найважливішої складової забезпечення якості продукції космічного радіолокаційного землегляду. Досягнення цієї мети має підвищити якість калібрування та скоротити видатки на обслуговування радіолокаторів космічного базування в процесі експлуатації, насамперед, за рахунок розробки нових фізико-математичних, апаратних і програмних рішень. Виходячи з цілі роботи були поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи зовнішнього калібрування РСА, виявити їх недоліки та створити метод визначення роздільної здатності РСА за радіолокаційним зображенням у реальному масштабі часу.

2. Поєднати та систематизувати критерії оцінки радіометричних характеристик РСА за радіолокаційними зображеннями. Розробити алгоритм визначення критеріїв оцінки чутливості РСА та розробити математичну модель точкового відгуку на об'єкт, яка має забезпечити кращу точність визначення ефективної площі розсіяння (ЕПР) відбивача за його радіолокаційним зображенням.
3. Дослідити можливість використання для зовнішнього калібрування РСА наземних антропогенних об'єктів. Розробити програмні рішення для автоматизованого пошуку наземних об'єктів, придатних для зовнішнього калібрування РСА в процесі експлуатації.
4. Дослідити теоретично й експериментально антени типу диполь над екраном довільних розмірів у якості антени для калібрувального ретранслятора (транспондера) та визначити можливості покращення узгодження такої антени з фідерним трактом і розширення її робочої смуги частот.

**Об'єктом дослідження є:** радіофізичні методи дистанційного зондування, оброблювані цифрові сигнали у вигляді специфікованих радіолокаційних та інфрачервоних зображень поверхні Землі зі спеціальним калібрувальним приладдям або з антропогенними спорудами, поля і хвилі у відкритій системі транспондера, їх дифракція й інтерференція.

**Предметом дослідження є:** фізичні явища в радіолокації, зокрема при зовнішньому калібруванні РСА; нові підходи щодо обробки цифрових сигналів, а саме, пошук наземних споруд, придатних для калібрування космічних РСА; залежність характеристик спрямованості й узгодження антени типу диполь над екраном від її електричних розмірів і конфігурації.

#### **Методи досліджень.**

1. Методи прикладної електродинаміки, зокрема метод геометричної теорії дифракції, використано для дослідження антен калібрувального ретранслятора.
2. Методи теорії імовірностей і статистичної радіофізики використані при розробці нових методів калібрування РСА космічного базування.
3. Методи обчислювальної математики використані при розробці математичних моделей, що є невід'ємними компонентами запропонованих способів зовнішнього калібрування.
4. Методи експериментальних досліджень – використані при обробці цифрових зображень, при налагодженні програмного забезпечення запропонованих методів і для дослідження узгодження антени типу диполь над екраном, шляхом розміщення металевих неоднорідностей у ближній зоні антени.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В дисертації отримані нові результати, які відносяться до загальних і окремих фізико-математичних моделей, що використовуються для обробки зображень земної поверхні, валідації та калібруванні РСА та загалом в радіофізиці. В роботі отримані наступні наукові результати.

1. Уперше встановлена залежність ширини відгуку на точковий об'єкт (кількість пікселів) від ширини апертури використовуваного для калібрування РСА відбивача та запропонований новий метод визначення роздільної здатності РСА космічного базування, що дозволяє використання тригранних кутникових відбивачів різного розміру на основі операції зворотного матричного згортання. За результатами проведених вимірювань цей метод забезпечує в середньому на 15 % меншу невизначеність типу А, ніж найбільш поширений з відомих методів.
2. Удосконалено математичну модель залежності яскравості зображення відбивача на радіолокаційному зображенні (РЛЗ) від ЕПР еталонних відбивачів, що розташовані на підстильній поверхні, та розроблено метод визначення передатної функції РСА на основі аналізу більше 100 радіолокаційних зображень відбивачів, який дозволяє суттєво підвищити точність визначення ЕПР об'єкта за його яскравістю у верхній і нижній частинах динамічного діапазону РСА.
3. Дістав подальший розвиток розв'язок задачі виявлення антропогенних об'єктів на монохромних знімках Землі. Розроблений алгоритм не потребує чіткої специфікації форми або тренувального набору даних. Метод призначений для пошуку антропогенних об'єктів, що можуть бути використані для калібрування чутливості РСА. Даний підхід дозволяє підвищити точність визначення ЕПР в нижній частині динамічного діапазону РСА за рахунок використання великої кількості тест-об'єктів.
4. Уперше для розв'язання задачі створення високоефективного "точкового" наземного відбивача для наземних еталонних полігонів запропоновано активний радіолокаційний відповідач-ретранслятор (транспондер) зі слабкоспрямованими приймальною і передавальною антенами та мікрохвильовими підсилювачами з високим коефіцієнтом підсилення. Така антена дозволяє зменшити невизначеність вимірювань, зумовлену похибками кутового положення антени ретранслятора. Працездатність транспондера підтверджено в прямому наземно-космічному експерименті з РСА КА «TerraSar-X». Запропоновано та теоретично й експериментально доведено можливість розширення смуги робочих частот вібраторної антени, розміщеної паралельно плоскому екрану, шляхом введення між вібратором і екраном стрижневих або дискових неоднорідностей.



**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що: Розроблені два новітніх методи вимірювання роздільної здатності та радіометричних характеристик РСА космічного базування дозволяють використовувати для визначення роздільної здатності та динамічного діапазону сенсора одні й ті самі тригранні кутникові відбивачі, що призводить до підвищення загальної точності калібрування РСА. Розроблена низка програмних модулів, в яких реалізовані ці методи, спрощує використання зображень для калібрування радіолокаторів космічного базування, а для кінцевого споживача – спрощує вибір сенсора та режиму його роботи для виконання конкретного тематичного завдання.

Запропонована й апробована можливість зовнішнього калібрування РСА за допомогою наземних антропогенних споруд і дослідження їх типових конструктивів дозволяє зменшити видатки на калібрування та валідацію РСА космічного базування. Розроблений алгоритм пошуку об'єктів на монохромних знімках земної поверхні з формою, характерною для антропогенних споруд, дозволяє в реальному масштабі часу визначити об'єкти, які можуть бути придатні для зовнішнього калібрування РСА. Цей новий підхід у розпізнаванні образів може бути застосований в інших сферах науки та техніки (розпізнавання дорожніх знаків, класифікація патогенних мікроорганізмів, тощо), окрім дистанційного зондування.

Розроблений та експериментально досліджений транспондер може бути використаний не тільки для зовнішнього калібрування РСА, але і як мобільний репер, а запропонована концепція врахування зворотного зв'язку між приймальною та передавальною антенами може бути ефективною для розробки аналогічних пристроїв у інших частотних діапазонах. Розроблена компактна широкосмугова антена для використання у мобільних системах зв'язку.

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно розроблено новітні методи й алгоритми визначення характеристик радіолокатора космічного базування за знімками земної поверхні, а також алгоритм пошуку антропогенних об'єктів.

Участь автора в спільних роботах, що стосуються експериментальних результатів, полягає в тому, що він запропонував спосіб обчислення азимуту сліду траси космічного апарата на підстильній поверхні та відповідний спосіб побудови схеми розміщення метрологічних пристроїв (відбивачів, тощо), брав безпосередню участь у підготовці та проведенні експериментів в безлунній камері та польових (космічних) експериментів, розробив механічні вузли для регулювання положення відбивачів і відповідну конструкторську документацію, а також брав участь в розробці математичного та програмного забезпечення польових експериментів.

Участь автора в сумісних роботах, що стосуються теоретичних досліджень, полягає в тому, що він брав активну участь в математичному моделюванні при розробці антени, розрахунках і аналізі отриманих результатів,

а також представляв роботи особисто на вітчизняних і зарубіжних наукових конференціях (9 доповідей).

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати та основні положення дисертації були представлені й опубліковані в матеріалах наступних конференцій:

- Ukrainian Conference on Space Research. Yevpatoria/Odessa, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016.
- Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 2011, 2012, 2013, 2015 гг.
- Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012, 2013 гг.
- Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка». Харків, 2012, 2016 рр.
- 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications (MIKON'2014). 16–18 June, Gdansk, Poland, 2014.
- Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, 2015, 2017.
- IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, May 29 – June 2, 2017.
- 17-та міжнародна науково-технічна конференція “Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017)”. Одеса, 8–13 червня 2017 р.
- International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017). Kyiv, September 11–15, 2017.

**Публікації.** Матеріали дисертації опубліковано в 37 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України [1–5], 4 у зарубіжних виданнях (в тому числі з них 2 англійською мовою) [6–9], 24 тези доповідей на фахових вітчизняних і міжнародних конференціях [10–33] та 4 статті в інших наукових журналах, які додатково відображають наукові результати [34–37]. З наведених робіт 15 входять до наукометричних баз, зокрема Scopus, Web of Science та Science index (ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3582-3659>).

Робота виконана самостійно та не містить плагіату.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 191 сторінку, з них основного тексту – 143 сторінки. Дисертація містить 13 таблиць і 37 рисунків. Список використаних джерел розташований на 16 аркушах і нараховує 122 джерела.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтована актуальність теми дослідження та новизна запропонованих рішень, зв'язок роботи з науковими програмами, визначено мету та задачі дослідження, а також зазначені особистий внесок здобувача й публікації та апробація результатів досліджень.

**Перший розділ** являє собою огляд літератури за темою дисертації та суміжними темами. У розділі розглянуто низку нормативних документів стосовно зовнішнього калібрування, надані загальні положення щодо калібрування радіолокаторів із синтезованою апертурою, досліджено можливість калібрування РСА за допомогою стаціонарних антропогенних об'єктів. Також надано вичерпний огляд літератури стосовно задачі по виділенню на чорно-білому знімку антропогенних споруд, досліджено вимоги до калібрувального ретранслятора, основні варіанти його конструкції, висвітлені задачі, які розв'язуються за допомогою цього пристрою та основні труднощі його конструювання і створення.

В результаті аналізу відомих наукових джерел обґрунтована актуальність теми дисертації.

**Другий розділ** присвячений отриманню роздільної здатності та параметрів передатної функції РСА шляхом зйомки розміщених на поверхні Землі спеціальних тригранних самофазованих кутникових відбивачів. Вихідними даними послужили документи за експериментом [9], а також метадані знімків і специфікація до них. Для дослідження використані усі п'ять знімків сенсора TerraSar-X, що були отримані впродовж експерименту [9]. Із кожного знімка були відібрані по 11–15 відгуків на відбивачі із параметрами, відомими заздалегідь. На рис. 1 зображено попередньо-згенероване радіолокаційне зображення одного із сеансів (а), та фото відповідного наземного обладнання (б).



а) РЛЗ полігону

б) калібрувальне обладнання на місцевості

Рис. 1 Матеріали експерименту для дослідження характеристик РСА TerraSar-X

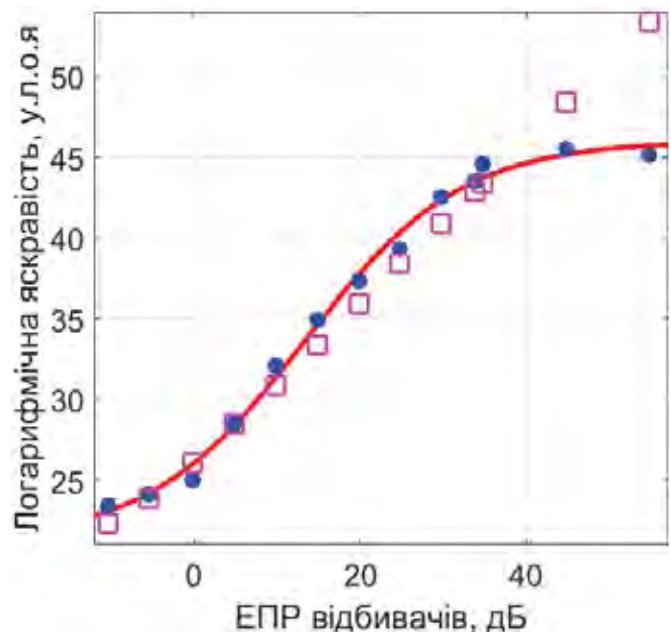
Показано, що ширина відгуку на точкову ціль залежить від розміру апертури реального об'єкта, який використовується у якості точкової цілі. Також має місце систематична похибка внаслідок імовірного попадання точкової цілі на межу пікселів. Запропоновано метод підвищення точності подібних вимірювань шляхом пошуку функції розмиття з урахуванням усіх даних експерименту та вимірюванню ширини відгуку з її використанням. За результатами випробування цього методу на усіх п'яти радіолокаційних зображеннях показано, що запропонований метод може бути використаний для відбивачів, які мають ширину апертури не більше двох пікселів РЛЗ на знімках, для яких були застосовані методи автофокусування. Також показано, що запропонований метод дозволяє повністю виключити цю систематичну похибку.

При дослідженні радіометричних характеристик радіолокаційних знімків було встановлено, що точна залежність яскравості на знімку від ЕПР відповідного об'єкта не може бути описана квазілінійною залежністю. На рис. 2 наведені фактичні значення яскравості в логарифмічному масштабі (точки) та очікувані рівні яскравості (квадрати), що були отримані із фактичних значень ЕПР відбивачів у відповідності до метаданих знімка та специфікації радіолокатора TerraSar-X [40]. Вони були обчислені за наступною формулою:

$$DN = 10 \lg \sqrt{\frac{10^{\sigma_{dB}/10} + NEBN \sin \gamma_{inc}}{k_s \sin \gamma_{inc}}}, \quad (1)$$

де  $DN$  (Digital Number) – величина яскравості на знімку виражена в умовних логарифмічних одиницях яскравості (у.л.о.я),  $k_s$  – радіометричний калібрувальний коефіцієнт, зазначений в метаданих як «absCalFactor»,  $NEBN$  (Noise Equivalent Beta Naught) – рівень шуму для даної частини знімка, тут використаний середній рівень шуму, зазначений в метаданих як «averageNoiseRecordAzimuthSpacing»,  $\gamma_{inc}$  – кут падіння електромагнітної хвилі на ціль,  $\sigma_0$  – дійсна ЕПР цілі, виражена в дБ.

Рис. 2 Очікувані та дійсні рівні логарифмічної яскравості в залежності від фактичних значень ЕПР використаних відбивачів



Оскільки очевидно, що модель для визначення ЕПР об'єкта за його яскравістю на знімку, яка надається виробником, не дозволяє врахувати ефекти впливу фону та насичення приймача РСА, нами була запропонована альтернативна сигмоїдальна модель залежності яскравості на РЛЗ від ЕПР цілі:

$$S(x) = Shft_{Br} + \frac{Scl_{Br}}{1 + \exp\left(-\frac{x - Shft_{RCS}}{Scl_{RCS}}\right)}, \quad (2)$$

де  $Scl_{Br}$ ,  $Scl_{RCS}$  – масштабуючі коефіцієнти по яскравості та по ЕПР відповідно, а  $Shft_{Br}$ ,  $Shft_{RCS}$  – аналогічно показники зсувів середини сигмоїди відносно початку координат по яскравості та по ЕПР відповідно. Модельні значення яскравості  $S$  представлені на рис. 2, 3 червоною лінією.

Наведена модель виглядає для кінцевого споживача суттєво складнішою за лінійну, тому нами були запропоновані два числові параметри, які дозволяють надати порівняльну характеристику різним режимам, або навіть різним моделям РСА. Для їх визначення спростимо сигмоїдальну модель (2) до кусково-лінійної. Вона складається з ділянки лінійної залежності та горизонтальних асимптот на шкалі яскравості. Запропоновані додаткові параметри були названі «точка насичення» (верхня межа лінійної ділянки) та точка впливу фону (нижня межа лінійної ділянки). Ці параметри та приклад спрощення сигмоїди до кусково-лінійної моделі показано на рис. 3. Після апроксимації відгуків моделлю (2) їх можна визначити за виразами:

$$H_{RCS}[\text{дБ}] = Shft_{RCS} + 2Scl_{RCS}, \quad (3a)$$

$$L_{RCS}[\text{дБ}] = Shft_{RCS} - 2Scl_{RCS}, \quad (3б)$$

де  $H_{RCS}$  – точка насичення динамічного діапазону,  $L_{RCS}$  – точка впливу фону.

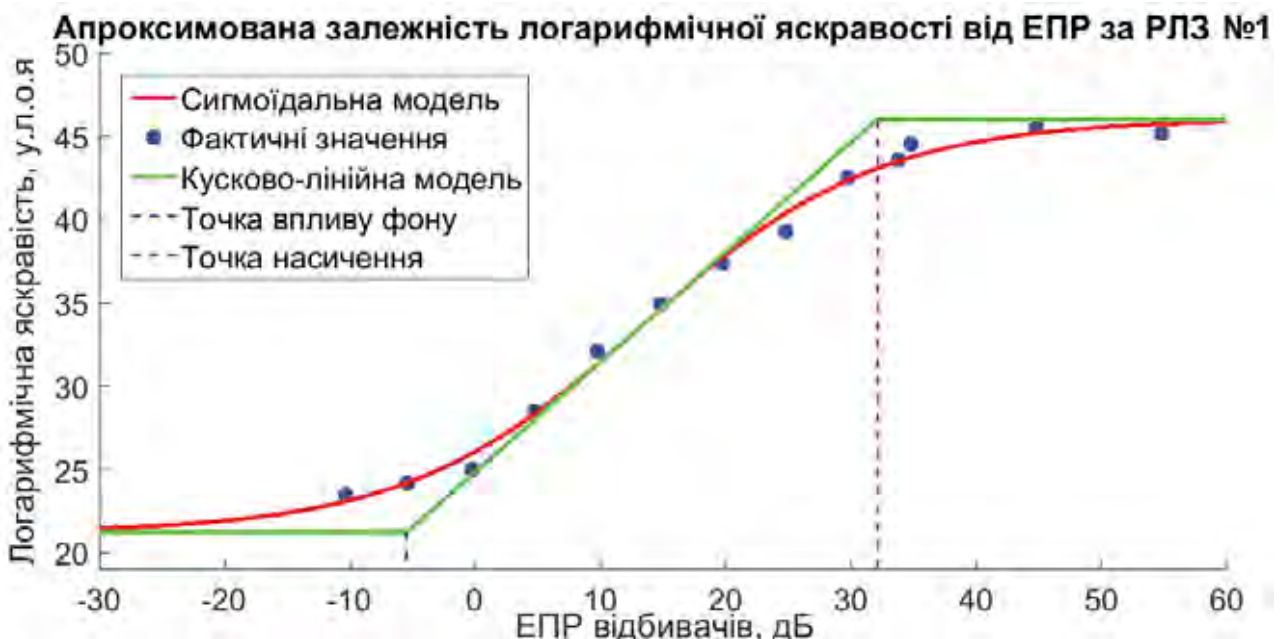


Рис. 3 Формування кусково-лінійної моделі кривої радіометричної чутливості

По аналогії з апроксимацією відгуків від кожного відбивача для визначення роздільної здатності[41], нами була проведена серія експериментів для визначення точного значення яскравості об'єкта (відбивача), навіть якщо його центр розташований близько до межі пікселів. Саме для коректної обробки таких випадків нами був запропонований та випробуваний спосіб субпіксельної поправки положення центру відгуку на РЛЗ. При апроксимації відгуку точне положення центру відгуку в растрі грає важливу роль, особливо для відбивачів з низькою ЕПР, яскравість яких на знімку близька до рівня фонових шумів.

Досліджені кілька варіантів апроксимації відгуку на об'єкт. Усі варіанти порівняні між собою за середньоквадратичною похибкою апроксимації сигмоїдою (2). Було встановлено, що більш ефективно робити субпіксельну корекцію центра відгуку на знімку з лінійною (не логарифмічною) яскравістю, яка виражена в умовних одиницях яскравості (у.о.я). Отримані результати дозволили запропонувати два способи: апроксимація відгуку за центральним рядком і стовпчиком функцією Гауса – доцільна за умови відносно високих фонових шумів; апроксимація двовимірною функцією Гауса – доцільна лише за умови низьких фонових шумів, в той час як безпосереднє використання яскравості з центрального пікселя відгуку (з лінійним наближенням до сусідніх пікселів відповідно до уточненого положення його центра) доцільне для невизначеного рівня фонових шумів або коли цей рівень може змінюватися для різних об'єктів.

В **третьому розділі** розглянута можливість використання для калібрування РСА космічного базування наземних антропогенних об'єктів господарського призначення. З'ясовано, що для цієї цілі можуть служити металеві об'єкти – цистерни, водонапірні башти або дахи будівель із матеріалу з регулярною структурою, наприклад, шиферу. На рис. 4 наведені приклади РЛЗ будівель з шиферними дахами, одержаних РСА Radarsat-2 (а), а також РЛЗ однієї і тієї ж місцевості на висхідному (б) і низхідному (в) напіввитках. З рисунка видно, що яскравість шиферу на РЛЗ сильно залежить від кута падіння та поляризації зонduючого сигналу.



Рис. 4 РЛЗ, на яких зображені будівлі з шиферною покрівлею



В роботі також представлені результати експериментальних досліджень індикатриси зворотного розсіяння моделей типової водонапірної башти, стаціонарної цистерни для зрошення полів, а також зворотного розсіяння фрагмента шиферу на двох лінійних поляризаціях. Використання для післястартового калібрування РСА наземних антропогенних об'єктів також додатково ускладнюється внаслідок ефекта Фарадея при проходженні зонduючого сигналу через іоносферу. Відтак, точне визначення і величини впливу ефекта Фарадея і радіометричних характеристик РСА за таких умов можливе лише в разі присутності на знімку значної кількості шиферних дахів із різним нахилом і різною орієнтацією хвиль відносно сторін світу.

Крім того, з огляду на значно нижчу точність визначення ЕПР таких об'єктів, ніж кутникових відбивачів або транспондерів, прийнятну для практики якість такого методу можна отримати лише шляхом значного розширення вибірки вхідних даних. Так в межах означеної задачі розроблено алгоритм для пошуку на монохромному зображенні усіх можливих антропогенних об'єктів. Тут мається на увазі, що досліджувана місцевість буде знята з кількох ракурсів і ті об'єкти, які добре розпізнавані з усіх ракурсів, можуть бути в подальшому використані для калібрування радіолокатора. Таким чином, важлива ланка методу являє собою алгоритм пошуку будівель на монохромних знімках, без чітких вимог до їх форми, який формує найбільш повний (надлишковий) набір імовірних цілей.

Розроблений алгоритм пошуку не використовує поширені нині нейронні мережі й тому не потребує тренувального набору даних. В його основу покладено принцип, за яким, за нашим припущенням, на знімку шукає будівлі оператор – а саме, пошук форм, що практично не можуть бути сформовані за природних умов, таких як прямі межі об'єктів і прямі кути між ними. Відтак, цей алгоритм складається з кількох основних етапів: попередня обробка, взяття похідної, адаптивна фільтрація, визначення лінійних фрагментів контуру, оптимізація та сортування відрізків, поєднання відрізків в прямокутні фрагменти контуру та складання межі об'єкта з цих фрагментів.

При обробці зображення використані як добре відомі (класичні) підходи, так і нові, (розроблені нами) експериментальні методи. Так, наприклад, дві роздільні операції – розмиття та взяття похідної по зображенню, нами були об'єднані в єдиний етап, оскільки вони обидві базуються на процедурі матричного згортання. На рис. 5 наведений фрагмент зображення з будівлею: на вихідному зображенні (а), після попередньої обробки (б) та після взяття похідних по зображенню у двох напрямках (в), що дозволяє розкласти зображення на масив величини  $F$  та масив напрямку градієнта  $\theta$ .

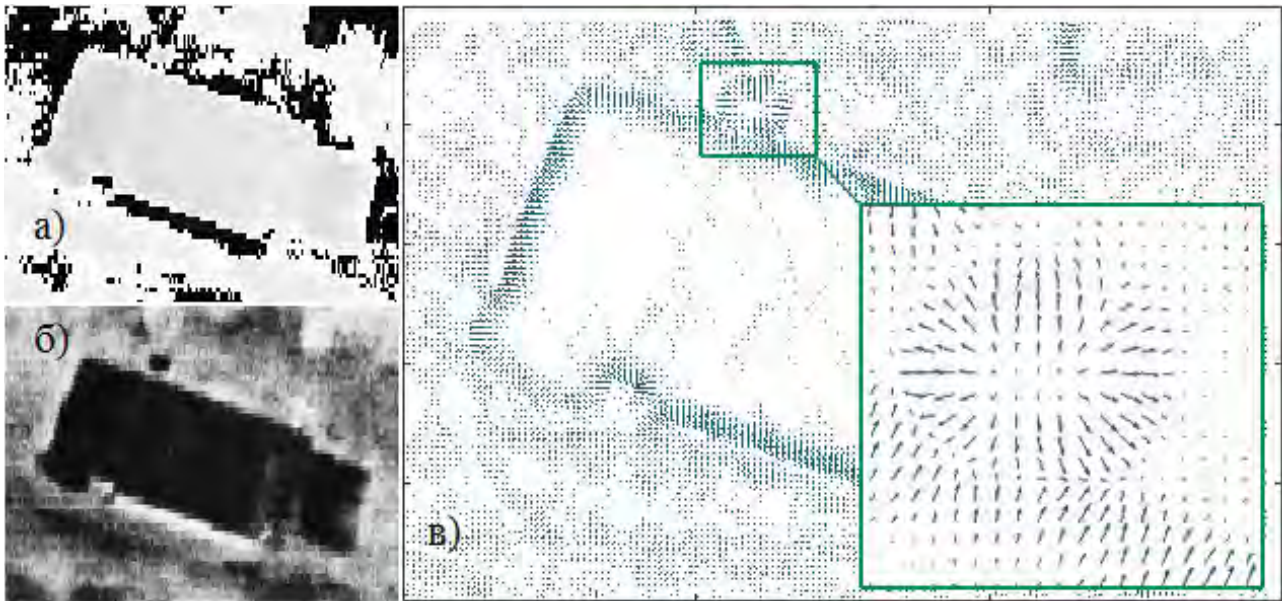


Рис. 5 Фрагмент зображення з будівлею на початкових етапах обробки

Для подальшого визначення меж об'єктів, як правило, використовують масив величини градієнта. Існує два найбільш поширених метода для отримання меж – це детектор кордонів Канні та метод Хафа. Детектор Канні отримав поширення здебільшого в задачах автоматизації промисловості, коли розпізнаваний об'єкт зображено на рівномірному фоні. Його особливість полягає у подвійному порозі бінаризування зображення **F**. Тобто розмітка контура починається, коли на зображенні знайдено достатньо високий градієнт (вище «потужного» порогу), та припиняється, коли розмічені всі прилеглі до нього області, в яких градієнт не нижче другого «слабкого» порогу. Такий підхід дозволяє майже уникнути випадків, коли алгоритм повертає незамкнутий контур, який непридатний для подальшої класифікації. В контексті розпізнавання будівель на природному фоні використання цього методу недоцільне, оскільки об'єкти часто розташовані на нерівномірній за яскравістю поверхні – це призводить до великої кількості незамкнутих контурів, обумовлених річками, балками, межами типів рослинності, тощо, які в подальшому ускладнюють класифікацію.

Другий підхід – метод Хафа призначений саме для пошуку прямих меж об'єктів. В своїй основі він має масив гіпотез, т. з. «акумулятор», в якому перебрані усі можливі положення й орієнтації прямої межі на зображенні. Він погано підходить для великих зображень, бо для якісної роботи потребує екстремального об'єму оперативної пам'яті. Крім того, на практиці він доволі чутливий до спотворень форми контуру, які на реальних даних присутні фактично всюди.

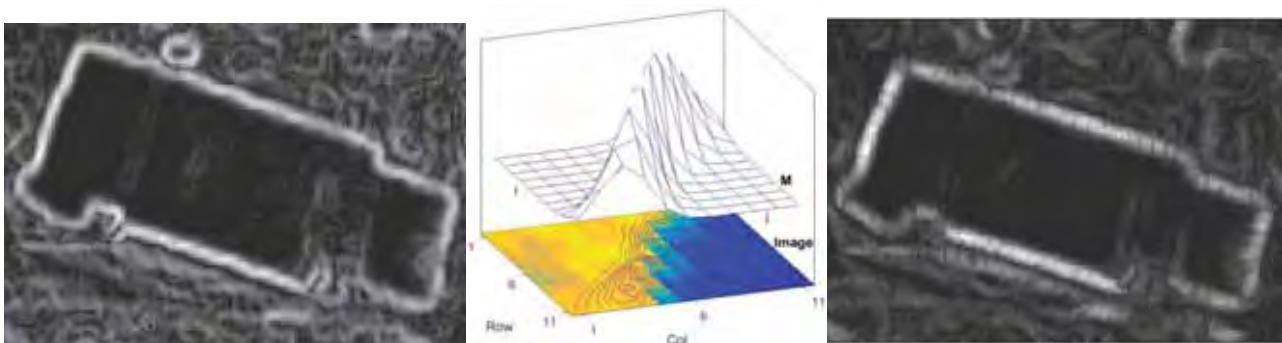
Таким чином, для розв'язання поставленої задачі нами був розроблений і випробуваний принципово новий підхід, який базується на адаптивній



фільтрації. Якщо розглядати зображення як двовимірний сигнал, можна виконати для нього матричне згортання, де ядро згортки для кожного пікселя обчислюється незалежно. Так на вхід фільтра подається два масиви даних – величини  $F$  (рис. 6, а) та напрямку градієнта  $\theta$ . В розробленому методі згортка виконується для масиву  $F$ . Типове ядро згортки наведено на рис. 6, б, воно являє собою гаусіану в поперечному перерізі та косинусоїду у поздовжньому. Для кожного пікселя результуючого зображення форма поверхні, що описує ядро, незмінна, однак ця поверхня міняє своє кутове положення відносно вертикальної вісі із центра ядра в залежності від того який напрямок градієнта у відповідному пікселі масиву  $\theta$ . Так фільтр підлаштовується під напрямок градієнта в поточному пікселі, крім того форма фільтру (рис. 6, б) обрана таким чином, що високий вихідний сигнал можна отримати лише у випадку, коли високі значення градієнтів зображення розташовані в ряд, за рахунок цього й досягаються селективні до прямих меж властивості фільтра.

Після етапу адаптивної фільтрації необхідно отримати список відрізків, які описують контур об'єкта. Для цього отримане з фільтру зображення піддається бінаризуванню – так обираються пікселі, які можуть бути згруповані у співнаправлені кластери. Саме з них в подальшому й обчислюються параметри відрізків, що описують контур (рис. 7).

Відповідно до поставленої задачі необхідний об'єкт визначається не тільки прямими межами, але і близькими до прямих кутами між ними. Відтак очевидно, що для об'єднання відрізків в об'єкти-кути, необхідно співставити кожний відрізок з кожним іншим відрізком на зображенні, що вказує на квадратичну складність алгоритму. Тому для оптимізації нами був реалізований етап проріджування відрізків. Зазначимо, що на використаних монохромних зображеннях розміром  $16\,000 \times 576$  пікселів, як правило до прорідження на зображенні розмічено близько 120–160 тисяч відрізків. На цьому етапі відрізки порівнюються один з одним за положенням, довжиною та тотожним градієнтом відповідного кластеру пікселів. Після проріджування їхня кількість зменшується приблизно до 18 тисяч.



а) вихідне зображення

б) ядро згортки

в) результат фільтрації

Рис. 6 Приклад адаптивної фільтрації фрагмента зображення зі спорудою

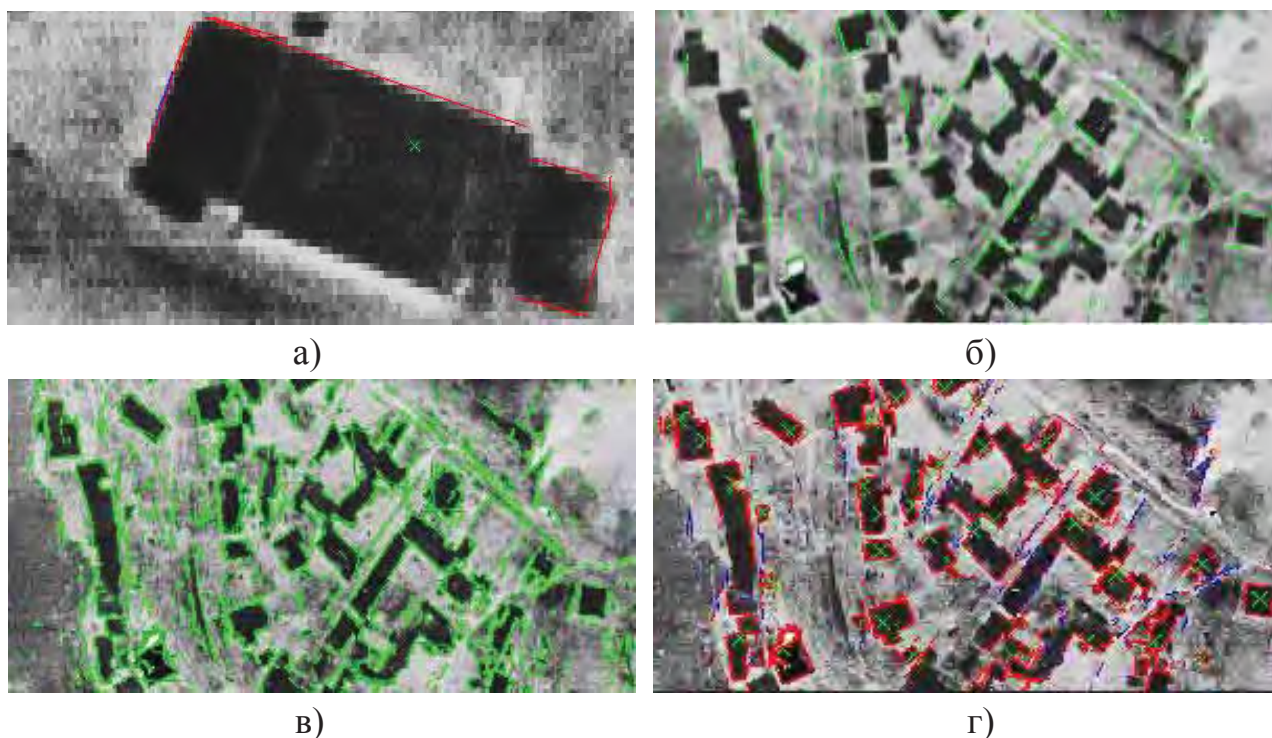


Рис. 7 Виділення меж споруд розробленим алгоритмом і за методом Хафа

На останньому етапі спеціальний модуль алгоритму складає з об'єктів-кутів контури імовірних споруд. Детальний приклад зображено на рис. 7, а. Червоні лінії – прямі межі, що утворюють прямі кути, зелений хрест – центр споруди. Також в розділі порівняно розроблений алгоритм з існуючими аналогами. Оскільки аналогічних за постановкою завдання рішень не було знайдено, було порівняно ключовий елемент алгоритму – пошук прямих меж з існуючим аналогом – методом Хафа. На рис 7, б зображено межі, визначені за методом Хафа. Оскільки більшість прямих меж має нерівності, цей метод не дає прийняттого результату, тому зображення було попередньо розмите, причому радіус розмиття підбирався для кращого результату. На рис. 7, в, г зображено приклад роботи розробленого алгоритму. Різницю важко виразити кількісно, проте з рисунків видно, що кожна будівля так чи інакше розмічена.

**Четвертий розділ** присвячено створенню калібрувального ретранслятора для РСА. З огляду на розглянуті в попередніх розділах недоліки пасивних відбивачів як метрологічних засобів для зовнішнього калібрування РСА космічного базування, однією з найвагоміших переваг активного ретранслятора служить невеликий розмір апертури антени по відношенню до потужності ретрансльованого сигналу. Однак показано, що існуючі транспондери не можуть бути використані у якості точкових об'єктів, оскільки в них використовуються гостроспрямовані дзеркальні антени досить великих електричних розмірів. Тому в даному розділі нами запропоновано для

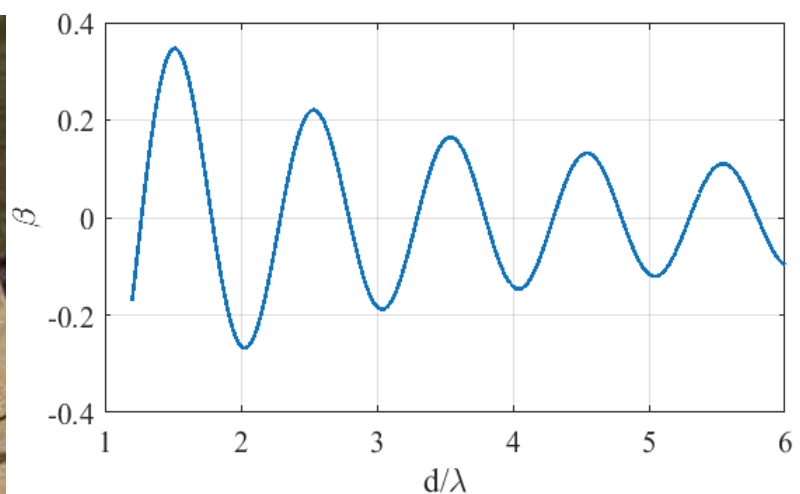
створення ретранслятора використовувати малогабаритні антени типу диполь над екраном, які мають найменший із можливих розмір апертури.

Другою вагомою перевагою використання такої антени для калібрувального ретранслятора є її досить широка діаграма спрямованості. Це не тільки робить пристрій простішим у використанні, але й дозволяє проводити калібрування систем що складаються із пари радіолокаторів, які працюють в режимі бістатичної зйомки. В розділі також представлено результати експерименту з транспондером у S-діапазоні на базі приймачів прямого підсилення (ТРУ 002-01) та з використанням двох антен такого типу. Було проведено теоретичне дослідження впливу взаємного розміщення приймальної та передавальної антен на їх взаємодію, тож регулювання підсилення ретранслятора проводилося з урахуванням зворотного зв'язку між приймальною та передавальною антенами. Зовнішній вигляд транспондера під час польових випробувань наведено на рис. 8, а. Глибину зворотного зв'язку було розраховано з використанням геометричної теорії дифракції для різних відстаней між антенами. Ця залежність наведена на рис. 8, б.

Калібрувальний ретранслятор на базі приймачів прямого підсилення в світі не є поширеною практикою, принаймні, для X-діапазону, оскільки НВЧ-підсилювачі, як правило, мають тим менший коефіцієнт підсилення, чим вища робоча частота. Проте для S-діапазону такий ретранслятор можливий, і за рахунок цього він може бути універсальним. Представлений на рис. 8, а транспондер має коефіцієнти підсилення антен 7,5 дБ. Коефіцієнти підсилення кожного підсилювача не менш 20 дБ. Таким чином, повний коефіцієнт підсилення розробленого транспондера без урахування зворотного зв'язку становить 75 дБ, тобто такого ж порядку, як і у відомих зарубіжних транспондерів з гостроспрямованими антенами.



а) випробування ретранслятора



б) глибина зворотного зв'язку

Рис. 8 Ретранслятор прямого підсилення та залежність зворотного зв'язку між його антенами від відстані між приймальним і передавальним вібраторами



Оскільки досліджувалися шляхи створення універсального калібрувального ретранслятора, в роботі також теоретично й експериментально досліджена можливість суттєвого розширення робочої смуги частот подібних антен шляхом розміщення металевих неоднорідностей (стрижнів і/або дисків) в ближній зоні антени між диполем та екраном. Експерименти проводилися в безлунній камері шляхом підбору геометрії та положення неоднорідностей при дослідженні коефіцієнта стоячої хвилі за напруженістю (КСХН) в заданому діапазоні частот. Теоретичні дослідження проводилися шляхом моделювання експерименту за допомогою програми FEKO LITE.

Впродовж експериментів було досліджено чотири види конструкції антени типу диполь над екраном. Уже попередні розрахунки й експерименти показали, що стрижнева неоднорідність дозволяє налаштувати вібраторну антену на мінімум КСХН на певній частоті при її розміщенні поблизу вібратора на відстанях від 0,02 до 0,1 довжини хвилі. Такий самий ефект досягається при використанні диска діаметром близько половини довжини хвилі, що розташований на відстанях від 0,05 до 0,2 довжини хвилі від екрану.

З чотирьох досліджених антен найгірші початкові характеристики узгодження немодифікованої антени має вібратор О. О. Пістолькорса, тому вивчена можливість узгодження шляхом розміщення неоднорідностей саме на ньому. На рис. 9, а представлена залежність КСХН від частоти експериментального макета антени без узгоджувальних елементів. Видно, що навіть в мінімумі цієї залежності і розрахункове і експериментальне значення КСХН не нижче 3,2. На рис. 9, б приведена досліджувана залежність КСХН вібратора Пістолькорса, налаштованого на мінімум КСХН за допомогою штирьового узгоджувального елемента, розташованого паралельно до вібратора. В цьому випадку і розрахункові, і експериментальні величини КСХН зменшилися до 1,1, а самі криві вказують на ширококутний характер узгодження модифікованої таким чином антени, причому узгодження спостерігається здебільшого в високочастотній області смуги робочих частот антени. З рис. 9, в, на якому представлена досліджувана залежність КСХН вібратора, налаштованого за допомогою диска, видно, що такий узгоджувальний елемент забезпечує краще узгодження в низькочастотній області. Ці дані відкривають можливості збільшення ширококутності петльових вібраторних антен шляхом використання узгоджувальних елементів обох типів одночасно. На рис. 9, г приведена відповідна залежність, яка підтверджує цей висновок. Таким чином, ускладнення конструкції антени узгоджувальними елементами виправдано отриманим результатом узгодження антени в 17,5 % смугі частот за рівнем КСХН  $\leq 1,5$  та 18,7 % за рівнем КСХН  $\leq 2,0$ .

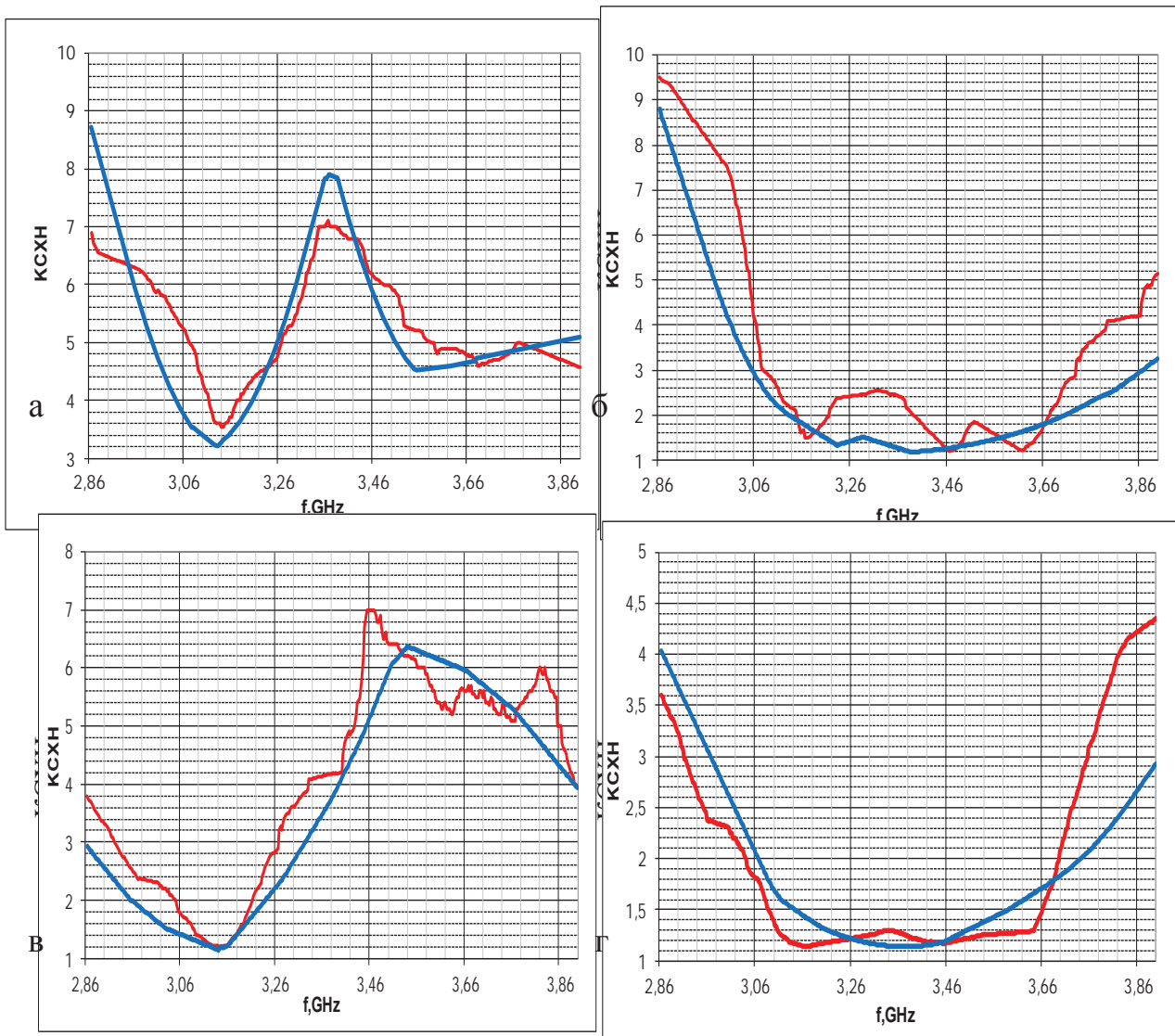


Рис. 9 Залежність КСХН петльової вібраторної антени О. О. Пістолькорса від частоти в різних конфігураціях ( — розрахунок; — експеримент )

Також теоретично й експериментально був розглянутий вплив означених узгоджувальних елементів на діаграму спрямованості досліджуваної антени. Було встановлено, що розрахунок і експеримент найбільш близькі для варіанту антени без настроювальних елементів, а також, що узгоджувальні елементи слабо впливають на діаграму спрямованості – максимум на 1 – 2 дБ в головній пелюстці, та не більше 2 – 2,5 дБ в бічних пелюстках.

В розділі також представлено теоретичне дослідження по визначенню максимально можливого коефіцієнта спрямованої дії даної антени. Розрахунки показали, що при розташуванні симетричного вібратора довжиною  $1,27$  довжини хвилі на висоті  $0,25 \lambda$  максимальна величина КСД антени збільшується до  $10,6$  дБ, ширина головної пелюстки за половиною потужності в площині електричного вектора поля зменшується до  $2\Delta\theta_{0,5P}^E = 28^\circ$ , в площині магнітного вектора поля  $2\Delta\theta_{0,5P}^H = 110^\circ$ .

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача розвитку методів зовнішнього післястартового калібрування радіолокаторів космічного базування з синтезованою апертурою антени. Отримані такі наукові та практичні результати.

1. Запропоновано новий спосіб визначення роздільної здатності космічного радіолокаційного зображення, який дозволяє отримувати результат у реальному масштабі часу, а також проведено порівняння з найбільш поширеним з існуючих способом [41]. Перевага запропонованого способу полягає в свободі вибору розміру еталонного відбивача та в більш високій точності. Він забезпечує в середньому на 15 % меншу невизначеність типу А ніж найбільш поширений з відомих методів. Єдине обмеження для найбільш детальних режимів роботи РСА полягає в необхідності отримати доступ до параметрів алгоритму автофокусування.

2. Запропоновано практичний спосіб оцінки динамічного діапазону РЛЗ, що дозволяє порівнювати між собою різні режими роботи різних сенсорів і визначати їх придатність для виконання конкретних тематичних завдань. Даний метод дозволяє забезпечити простежуваність яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР ( $m^2$  або дБ) із заданою невизначеністю в нижній і середній частині динамічного діапазону. В рамках його реалізації досліджено ряд способів апроксимації відгуку для підвищення точності визначення його яскравості. В результаті обробки п'яти РЛЗ, отриманих сенсором TerraSar-X, з метаданими, що додаються, показано, що найбільш ефективні три способи:

- з апроксимацією відгуку функцією Гауса за центральними рядком і стовпцем – доцільно використовувати для випадків високих фонових шумів;
- з безпосереднім використанням яскравості центрального пікселя відгуку (базовий варіант) – доцільно використовувати у випадках, коли відносний рівень фону невідомий, або сильно відрізняється від знімка до знімка;
- з апроксимацією двовимірного відгуку двовимірною функцією Гауса – доцільно використовувати для даних з низьким рівнем фонових шумів.

3. Проведено низку експериментальних досліджень коефіцієнта відбиття від масштабних моделей антропогенних споруд, які задовольняють принципу електродинамічної подібності. Їх результати дозволяють використовувати для зовнішнього експлуатаційного калібрування РСА металеві споруди господарського призначення, зокрема, водонапірні вежі та металеві цистерни. Також досліджені діаграми зворотного розсіяння доволі поширеного покрівельного матеріалу – шиферу. Показано, що господарчі металеві об'єкти придатні для використання їх у якості реперів для корекції знімків. Крім того, деякі типи покрівельних матеріалів, зокрема, хвилясті шиферні пластини, придатні для калібрування радіометричних характеристик РСА.



4. Розроблено новітній алгоритм виділення на космічному знімку усіх можливих антропогенних об'єктів, придатних для зовнішнього калібрування сенсорів космічного базування. Алгоритм має такі основні переваги:

- найбільш загально сформульовані критерії вибору контуру – тільки наявність прямих ліній і прямих кутів між ними;
- стійкість до шумів і спотворень форми контуру;
- можливість пошуку дуже малих об'єктів (близько десяти пікселів).

5. Для практичного виконання суперечливого завдання створення високоефективного відбивача малих фізичних розмірів, тобто створення "точкового" відбивача з великою потужністю відбитого сигналу, запропоновано використовувати активні радіолокаційні відповідачі (транспондери) зі слабкоспрямованими приймальною й передавальною антенами та приймачем прямого підсилення. Експериментально створено транспондер S-діапазону зі слабкоспрямованими антенами лінійної поляризації у вигляді резонансних вібраторів, розташованих паралельно плоскому металевому екрану. Такий підхід дозволяє забезпечити простежуваність яскравості пікселя на знімку до метрологічних одиниць ЕПР ( $m^2$  або дБ) в верхній частині динамічного діапазону РСА. Прямий наземно-космічний експеримент підтвердив працездатність запропонованого приладу. При космічній зйомці наземного полігону «Скрипалі» відгук транспондера виявився еквівалентним відгуку тригранного кутникового відбивача з ЕПР, що дорівнює 20 дБ. Таку ЕПР має кутниковий відбивач з трикутними гранями з шириною апертури 97 см в S-діапазоні ( $\lambda = 9,6$  см).

6. Досліджено антени типу диполь над екраном у якості приймальної та передавальної антен для широкоспрямованого ретранслятора прямого підсилення. Проведено теоретичне й експериментальне дослідження можливостей покращення узгодження антени з коаксіальним фідерним трактом і розширення робочої смуги частот шляхом введення в ближній зоні антени між екраном і диполем неоднорідності у вигляді металевго стрижня та/або металевго диска. Показано, що стрижень найбільш ефективний при розміщенні його поблизу диполя та дозволяє домогтися суттєвого розширення робочої смуги у бік високих частот. Також показано, що дисковий погоджувальний елемент найбільш ефективний при розміщенні поблизу екрана та дозволяє розширяти робочу смугу у бік нижчих частот. Використання обох погоджувальних елементів дозволяє розширити робочу смугу частот до 17 % від центральної робочої частоти за рівнем КСХН  $\leq 1.5$ . Теоретично й експериментально показано, що такі погоджувальні елементи на діаграму спрямованості не впливають. Широка діаграма спрямованості також дозволяє домогтися зменшення невизначеності вимірювань, що зумовлена похибками кутового положення антени ретранслятора.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Костриков А. Л., Купко В. С., Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Мобильный контрольно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 3–9. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні й експериментальних випробуваннях полігону для калібрування РСА, розробив механічні вузли для точної орієнтації відбивачів за параметрами траси космічного апарата.)*

1а. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., Малюков В. М., Мель И. А., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для наземного обеспечения радиолокационного космического землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1010. Вип. 20. С. 10–18. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у створенні та в роботі полігону, розробив конструкторську документацію до калібрувального комплексу.)*

2. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.** Красногорский М. Г., Малюков В. М. Внешняя калибровка РСА космического базирования: 2. Метод радиометрической калибровки радиолокаторов высокого разрешения // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038. Вип. 21. С. 7–10. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці методичної бази для обробки результатів і створив необхідні для постановки експерименту програми.)*

3. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Красногорский М. Г., Лебедев А. С., Малюков В. М. Теория и практика полигонного обеспечения космического радиолокационного землеобзора // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2013. № 1094. Вип. 23. С. 36–43. *(Особистий внесок здобувача: розв'язав задачу із обчислення азимуту сліду траси космічного апарата на поверхні Землі для заданих географічних координат.)*

4. Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Махов Е. С. Вибраторные антенны с согласующимися неоднородностями в ближней зоне // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 27. С. 70–74. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення експериментальних зразків антен, теоретично й експериментально дослідив узгодження та діаграми спрямованості антен.)*

5. **Горобец А. Н.** Обработка монохромного изображения поверхности Земли для обнаружения строений // *Радіофізика та електроніка*. 2017. Т. 22, № 4. С. 11–18.

5а. Переклад: **Gorobets A. N.** Building Detection using Processing of Monochromatic Earth Observation Image // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, Issue 3. P. 243–256. (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

#### **Наукові праці у зарубіжних наукових фахових виданнях:**

6. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Сафронова Л. П. Эффективная площадь рассеяния наземных сооружений, используемых в качестве радиолокационных реперов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Сборник научных статей. 2009. Вып. 6, Т. 2. С. 506–512. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і експериментальних дослідженнях.*)

7. Елисеева Н. П., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.** Характеристики ближнего поля горизонтального вибратора, расположенного над квадратным экраном // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т. 61, № 7. С. 611–628. (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Science index.)

7а. Переклад: Yeliseyeva N. P., Gorobets N. N. **Gorobets A. N.** Characteristics of Near Field of the Horizontal Vibrator Located above a Square Screen // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. Vol. 61, № 7. P. 749–766. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках, підготовці графічних матеріалів і аналізі одержаних результатів.*) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

8. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Nesterenko M. V. Radiation Fields of System of Two Impedance Crossed Vibrators Excited In-Phase and Placed over a Rectangular Screen // *Progress In Electromagnetics Research B*. 2017. Vol. 77, Issue 1. Article number 52503, P. 71–84. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів.*) (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

9. Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Горобец Н. Н., Данилова Т. Д., Елизаветин И. В., Жиличкин А. Г., Малюков В. М., Скрыльников Р. А., Тарасова П. Д. Результаты верификации данных, получаемых КА «Terrasar-X», с использованием наземных тест-объектов // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 4. С. 68–78. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці тест-об'єктів і розробив конструкторську документацію до них.*) (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Science index.)

**Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:**

10. Ратушная Е. С., **Горобец А. Н.**, Канивец К. П., Ковшов С. Б., Лебедев А. С., Малюков В. М. Размещение пассивных средств калибровки и валидации на подспутниковом полигоне «Скрипалі» // 11th Ukrainian Conference on Space Research, Aug. 29 – Sept. 2 2011. : abstr. Yevpatoria, 2011. P. 88. *(Особистий внесок здобувача: розробив схему розміщення калібрувального приладдя.)*

11. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Атрошенко Л. М., **Горобец А. Н.**, Ковшов С. Б., Красногорский М. Г. Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 1. Гофрированные материалы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы IX Всероссийской Открытой конференции, 14–18 нояб. 2011 г., Москва, 2011. С. 42. *(Особистий внесок здобувача: розробив креслення тестових майданчиків.)*

12. Онищенко А. А., Пивовар Е. А., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С. Современные технологии представления пространственной информации в процессе создания и эксплуатации новой техники наземной инфраструктуры космических исследований // 12th Ukrainian Conference on Space Research, 3–7 sept. 2012. : abstr. Yevpatoria, 2012. P. 123. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці графічних матеріалів та їх аналізі.)*

13. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Полигонно-калибровочный комплекс для РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международной Крымской конференции, 10–14 сент. 2012 г., Севастополь, 2012. С. 1005–1006. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в організації, експериментальних дослідженнях і роботі полігону.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus.)

14. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Мель И. А. Метрологические аспекты наземного обеспечения космического землеобзора // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2012): матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції, 9–11 жовт. 2012 р., Харків, 2012. С. 455–462. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках і створив відповідні програмні скрипти.)*

15. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Ратушная Е. С. Летно-экспериментальные испытания полигонно-калибровочного комплекса подспутникового полигона Скрипалі // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса:



материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 145. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в експериментальних випробуваннях полігону.)*

16. Лебедев А. С., Горобец Н. Н., Кийко В. И., Купко В. С., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Мындарь И. Г. Распределенные метрологические средства для оценки УЭПР подстилающей поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 147. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

17. Лебедев А. С., Ковшов С. Б., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Материалы для создания тестовых площадок оценки динамического диапазона РСА космического базирования. 2. Материалы на основе набора металлических сфер // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы X Всероссийской Открытой конференции, 12–16 нояб. 2012 г., Москва, 2012. С. 151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в супутніх теоретичних і експериментальних дослідженнях.)*

18. Лебедев А. С., **Горобец А. Н.** Дополнения к программному обеспечению дешифрирования радиолокационных космических снимков для повышения надежности результатов испытаний РСА // 13th Ukrainian Conference on Space Research, 2–6 sept. 2013. : abstr. Yevpatoria, 2013. P. 200. *(Особистий внесок здобувача: запропонував методи обробки радіолокаційного зображення, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

19. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Красногорский М. Г., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М., Мель И. А. Использование объектов хозяйственного назначения для внешней калибровки РСА космического базирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 23-й Международной Крымской конференции, 8–14 сент. 2013 г., Севастополь, 2013. С. 1150–1151. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в теоретичних розрахунках і постановці експерименту.)* (Видання входить до наукометричної бази Scopus.)

20. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Красногорский М. Г., Малюков В. М., **Горобец А. Н.** Начальный период внешней калибровки характеристик РСА МКА «Кондор - Э» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы XI Всероссийской Открытой конференции, 11–15 нояб. 2013 г., Москва, 2013. С. 163. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону.)*

21. **Gorobets A.**, Yeliseyeva N., Gorobets M. Power and Polarization Patterns of a Circularly Polarized Four-Dipole Radiator with a Square Screen // MİKON'2014: Proceedings on CD of 20th International Conference on Microwaves,

Radar, and Wireless Communications, 16–18 June, 2014. Gdansk, Poland, 2014. P. 589–591. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, створив усі графічні матеріали та робив доповідь особисто.)* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Science index.)

22. Yeliseeva N. P., Gorobets N. N., **Gorobets A. N.**, Calculation of near field of dipole placed above rectangular screen // ICATT'2015: Proceedings on CD of X Anniversary International Conference of Antenna Theory and Techniques, 21–24 April, 2015. Kharkov, 2015. P. 102–104. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в розробці програмних рішень для розрахунків, підготував усі графічні матеріали та робив доповідь на конференції.)* (Видання входить до наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)

23. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мирошниченко А. Ю., Мындарь И. Г., Онищенко А. А., Пивовар Е. А. Наземное обеспечение CAL/VAL PCA TERRASAR-X и KOMPSAT-5 // 15th Ukrainian Conference on Space Research, 24–28 aug. 2015. : abstr. Odessa, 2015. P. 183. *(Особистий внесок здобувача: брав активну участь в роботі полігону й обробці отриманих результатів.)*

24. **Горобец А. Н.**, Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н. Метод получения функции размытия с использованием сосредоточенных целей с известной эквивалентной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы XIII Всероссийской Открытой конференции, 16–20 нояб. 2015 г., Москва, 2015. С. 23. *(Особистий внесок здобувача: запропонував новий підхід до обробки параметрів, що валідуються, створив необхідні програмні модулі, доповідав особисто.)*

25. **Горобец А. Н.** Характеристики контрольно-калибровочных полигонов для наземного обеспечения работы космических систем "Січ-2-1" и "Січ-2М" // 16th Ukrainian Conference on Space Research, 22–27 aug. 2016. : abstr. Odessa, 2016. P. 193.

26. **Горобець О. М.** Радіометричний аналіз якості радіолокаційного зображення // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія–2016): X Міжнародна науково-технічна конференція, 5–7 жовт. 2016 р. : тези доп. Харків, 2016. С. 82.

27. **Gorobets A. N.**, Yeliseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V. Optimization of Circularly Polarized Radiation of Inphase Crossed Impedance Dipoles with Screen // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 may, 2017. Kyiv, 2017. P. 270–272. *(Особистий внесок здобувача: брав участь у розрахунках і підготовці матеріалів, робив доповідь особисто.)* (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science та Science index.)



28. **Gorobets A. N.** Segmentation for Detecting Buildings in Infrared Space Images // ICATT'17: Proceedings on CD of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques, 24–27 May, 2017. Kyiv, 2017. P. 364–366. (Видання входить до наукометричних баз Scopus, WoS та Science index.)

29. Yeliseyeva N. P., Katrich V. A., Nesterenko M. V., **Gorobets. A. N.** Synthesis of Circularly Polarized Radiation by Inphase Crossed Impedance Wire Dipoles with Screen // UKRCON: Proceedings on CD of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, May 29 – June 2, 2017. Kyiv, 2017. P. 98–101. (*Особистий внесок здобувача: розробка програми, проведення розрахунків і підготовка графічних матеріалів, робив доповідь особисто.*) (Видання входить до наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

30. Атрошенко Л. М., Борщева Г. А., **Горобец А. Н.**, Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Мель И. А., Ярмольчук Е. Д. Методы наземного обеспечения внешней калибровки сенсоров отечественных КС ДЗЗ // Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах (ВОТТП-2017): матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції, 8–13 черв. 2017 р., Одеса, 2017. С. 29–30. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці нових методів калібрування, запропонував нові підходи.*)

31. Yeliseyeva N. P., **Gorobets A. N.**, Katrich V. A., Pshenichnaya S. V. Directional and Polarization Characteristics of Crossed Impedance Wire Dipoles with Square Screen // UkrMiCo'2017: Proceedings on CD of International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, 11–15 Sept. 2017. Kyiv, 2017. P. 113–117. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у розробці програми розрахунків, обробці графічних матеріалів і їх аналізі.*) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.)

32. **Gorobets A. N.**, Gorobets N. N., Mahov E. S. Impedance Matching of Dipole Antennas by Metal Rod and Disk Placing // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, 2018. P. 357–361. (*Особистий внесок здобувача: брав участь у проведенні експерименту, аналізі й підготовці матеріалів до публікації.*) (Видання входить до наукометричної бази Scopus.)

33. Gorobets N. N., Bulgakova A. A., Lyashchenko V. A., **Gorobets A. N.**, Optimizing the Vibrator Antenna, Parallel to a Flat Screen, by the Maximum Directive Gain in the Normal Direction // UWBUSIS'2018: Proceedings on Flash-drive of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 04–07 Sept. 2018. Odessa, P. 372–375. (*Особистий внесок здобувача: брав участь в розрахунках, аналізі результатів і підготовці матеріалів до публікації.*) (Видання входить до наукометричної бази Scopus.)

**Наукові праці, які додатково відображають  
наукові результати дисертації:**

34. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костриков А. Л., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Требования, предъявляемые к контрольно-калибровочным комплексам для наземного обеспечения CalVal PCA космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2013. № 3. С. 46–52. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в експериментальному випробуванні полігону та формуванні вимог до нього.)*

35. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Купко В. С., **Горобец А. Н.**, Лебедев А. С., Малюков В. М. Критерии оценки результатов летных испытаний PCA космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 28–34. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в роботі полігону, обробці й аналізі отриманих результатів.)*

36. Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., **Горобец А. Н.**, Мель И. А., Мындарь И. Г. Требования к точностным характеристикам установки метрологических средств для внешней калибровки PCA космического базирования // Український метрологічний журнал. Харків, 2014. № 2. С. 45–50. *(Особистий внесок здобувача: брав участь в дослідженнях точності виготовлення та встановлення радіолокаційних відбивачів.)*

37. **Горобец А. Н.** Расширенный метод метрологической оценки разрешающей способности радиолокационного изображения // Український метрологічний журнал. Харків, 2017. № 3. С. 9–16.

**ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ:**

38. GEO. Committee on Earth Observation Satellites. A Quality Assurance Framework for Earth Observation – Implementation Strategy and Work Plan. URL : [http://qa4eo.org/docs/QA4EO\\_implementation\\_strategy\\_for\\_CEOS\\_and\\_GEO\\_v0.4.pdf](http://qa4eo.org/docs/QA4EO_implementation_strategy_for_CEOS_and_GEO_v0.4.pdf) (date of application: 07.04.2019).

39. Metrology for Earth Observation and Climate (portal). URL : <http://www.meteoc.org/objectives/> (date of application: 07.04.2019).

40. TerraSar-X Ground Segment Basic Product Specification Document. 2009. URL : [https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TX-GS-DD-3302\\_Basic-Products-Specification-Document\\_V1.6.pdf](https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TX-GS-DD-3302_Basic-Products-Specification-Document_V1.6.pdf) (date of application: 14.09.2018).

41. Вербя В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования: монография. Москва : Радиотехника, 2010. 680 с.

## АНОТАЦІЯ

Горобець О. М. Наземне метрологічне забезпечення точності аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2019.

Дисертація присвячена розвитку методів зовнішнього післястартового калібрування РСА. Розглянуті сучасні методи калібрування, виявлено їх недоліки, запропоновано нові підходи та алгоритми. Встановлено наявність прямої кореляції між шириною відгуку на точкову ціль і шириною апертури використовуваного відбивача. Запропоновано метод корекції одержуваних оцінок. Запропоновано нову модель зіставлення яскравості радіолокаційного зображення та відповідної до неї ЕПР, яка дозволяє врахувати вплив насичення вхідного тракту приймача радіолокатора та сукупного рівня шумів. Досліджено можливість використання для калібрування РСА антропогенних об'єктів. Розроблено алгоритм для автоматичного виділення на чорно-білому знімку всіх можливих будівель. Запропоновано активний калібрувальний ретранслятор (транспондер) на базі приймачів прямого підсилення й антен типу диполь над екраном. Запропоновано спосіб суттєвого розширення робочої смуги частот такої антени.

**Ключові слова:** Електромагнітні хвилі, радіолокатор, зовнішнє калібрування, радіолокаційне зображення, роздільна здатність, чутливість, розпізнавання образів, антена, кутниковий відбивач.

## ABSTRACT

Gorobets O. M. Ground metrological accuracy assurance of space-born Earth Observation units. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in physics and mathematics, specialty 01.04.03 – radio physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2019.

High demand for a space-born Earth Observation (EO) products is caused by a large number of particular applications, which is always growing. New methods of using such data ask for higher requirements for the EO product quality, including the periodicity and accuracy of the vicarious calibration of space-craft sensors. Another important activity area in this branch is to ensure the traceability of a pixel brightness on a radar image to the international system of units SI.

Following new scientific results have been obtained in the work:

1. The dependence of the point-target response width (number of pixels) versus the reflector aperture dimensions, which is used to calibration, is established. The advanced method for determining a Synthetic Aperture Radar (SAR) resolution has been proposed as well. That allows to use triangle corner reflectors of different

sizes to get the identical point-target response width. The main principle which that is based on is the operation of matrix deconvolution.

2. The mathematical model of the SAR output signal dependence versus the Radar Cross-section (RCS) of reference reflectors, which are located on the scanned surface, is proposed. The appropriate method for detailed evaluation of the transfer function and sensitivity of the SAR is developed. It is based on more than hundred radar images of corner reflectors. Mathematical models of the point-target response on the radar image are developed and their suitability for the SAR vicarious calibration by radar images are investigated as well.

3. It is developed the algorithm for buildings extraction from grayscale images which doesn't need to specify the typical object shape precisely and which does not require a training dataset at all. It allows to increase the accuracy of the SAR vicarious calibration due to increasing a number of test objects on the radar image if appropriate RCS'es is known in advance for this sight-angle.

4. It is investigated the dipole above the screen type of antenna as the both receiving and transmitting antenna of the calibrating transponder. The requirements of their mutual placement have been determined as well. There are found and experimentally tested ways of their frequency band extension. It is also shown that these ways do not affect to the directivity pattern significantly.

The practical significance of obtained results mostly consist of two developed newest methods for measuring the resolution and radiometric characteristics of the space-born SAR, which allows to use same corner reflectors to determine the one's resolution and sensitivity. It should improve overall accuracy of the SAR vicarious calibration as well. A number of software modules have been developed in which these methods are implemented. It makes simple to use radar images for a calibration of space-born SAR's by the end-user.

The possibility of the SAR vicarious calibration with man-made objects is investigated and tested. It is explored their typical shapes and it is developed the algorithm of building extraction from grayscale images. The main principle is searching for objects with an unnatural shape. It is possible to get it quickly a lot of objects that can be suitable for the vicarious calibration of a SAR. This new approach to pattern recognition can be applied in other areas except for remote sensing, such as road traffic, classification of pathogenic microorganisms by microscopes etc.

The developed and experimentally tested transponder can be used to develop similar devices in other frequency bands. The used compact broadband antenna is also quite useful in mobile communication systems.

Obtained results and developed methods have been tested and put into practice during the vicarious calibration campaign of the "Condor-E" and "TerraSar-X" space-born SAR's. It has been done during the testing and adoption stage of the calibration test site "Skripali" which has been supervised by the National Space Agency of Ukraine (NSAU) in 2012–2016.

**Key words:** Electromagnetic waves, radar, vicarious calibration, radar image, resolution, sensitivity, pattern recognition, antenna, corner reflector.

Підписано до друку 20.09.2019.  
Формат 60 x 90/16. Друк ризографічний.  
Гарнітура Times New Roman  
Зам. 2811/2018. Ум. Вид. арк. 0.9.  
Тираж 100 прим. Ціна договірна.

Надруковано ФОП Видавець А.Б.  
м. Харків, вул. Видавнича, 3001, офіс 1001.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ВОО № 12345 від 18.12.2017.