

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

### **ГОРОБЦЯ Олексія Миколайовича на тему «Наземне метрологічне забезпечення точності аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

**Актуальність теми дисертації.** Радіолокаційний космічний землегляд є однією з сучасніших інформаційних технологій, яка при наявності відповідного орбітального угруповання дає можливість безперервного моніторингу земної поверхні. Отже питання якості одержуваної інформації має велике наукове і практичне значення. Радіолокатор космічного базування по суті є вимірвальним пристроєм. Метрологічне забезпечення ефективної його роботи, зокрема шляхом зовнішнього калібрування, значно відрізняється від такого, коли пристрій і калібрувальні еталони розміщені в одній лабораторії й умови калібрування відомі з високою точністю та підтримуються на постійному рівні. Тому особливої уваги потребує розробка теоретичних засад та практичних методів зовнішнього калібрування таких космічних систем (зокрема, радіолокаторів із синтезованою апертурою антени). Одну з ключових позицій в цій проблемі посідають питання наземного забезпечення дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), до яких належать, зокрема: розробка й створення адекватних наземних випробувальних засобів, їх доцільне розташування та методи використання для вирішення задач калібрування, пошук існуючих об'єктів, що можуть являти собою своєрідні випробувальні засоби і т. д. Підвищення точності результатів ДЗЗ безпосередньо залежить від адекватного вирішення цих питань, тобто від розробки відповідного задачам метрологічного забезпечення. Саме цьому й присвячена дисертаційна робота О. М. Горобця, яку представлено до захисту.

Насамперед, слід мати на увазі реалізацію радіолокаторів мікрохвильового діапазону з синтезованою апертурою антени, які забезпечують при їх розміщенні на авіаційних або космічних носіях отримання радіозображень підстильної поверхні з високою роздільною здатністю на місцевості, тобто з високою чіткістю (якщо користуватися оптичними термінами) незалежно від погоди, часу доби, сезону та інших умов. Безсумнівно важливо і те, що використання сучасної потужної швидкодіючої комп'ютерної техніки дозволяє за необхідності отримувати радіозображення земної поверхні й об'єктів на ній в реальному масштабі часу. З іншого боку, якщо раніше коло споживачів космічної інформації обмежувалося винятково вищими ешелонами влади в технічно розвинених країнах, то зараз це коло розширилося до масштабів областей, районів, міст, підрозділів МНС тощо.

Зрозуміло, що в процесі запуску та виведення на космічну орбіту радіолокатор піддається впливу великих перевантажень. В процесі подальшої експлуатації електронне устаткування зазнає тривалого жорсткого впливу негативних космічних факторів. Внаслідок цього характеристики радіолокатора погіршуються, що неминуче призводить до погіршення якості радіозображення.

Однак, незважаючи на гостру потребу, завдання калібрування та валідації даних космічного землегляду дотепер повною мірою не розв'язане, зокрема, вкрай бідно досліджені питання фізичних основ їх наземного забезпечення. Тому дисертаційна робота О. М. Горобця, яка присвячена розвитку методології наземного забезпечення зовнішнього

калібрування радіолокаторів із синтезованою апертурою антени (РСА) космічного базування в процесі їх тривалої експлуатації, є актуальною.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

1. Представлені в дисертації теоретичні й експериментальні методи дослідження фізичних явищ у радіолокації при зовнішньому калібруванні РСА; методи обробки цифрових сигналів для пошуку наземних споруд, придатних для калібрування РСА; дослідження полів і хвиль у приймально-передавальній системі транспондера; дослідження діаграм спрямованості й узгодження вібраторних антен, розташованих над екраном кінцевих розмірів методом геометричної теорії дифракції повно та зрозуміло описані дисертантом і коректно використані.

2. Автор грамотно застосовує сучасні методи обчислювальної математики для верифікації отриманих експериментальних даних щодо узгодження вібраторних антен металевими стрижневими та дисковими неоднорідностями, розташованими в області між вібратором і екраном.

3. Автором правильно використаний метод електродинамічної подібності для вимірювання ефективної площі розсіювання масштабних моделей наземних споруд, придатних для калібрування РСА космічного базування.

Результати дисертаційної роботи опубліковані в профільних виданнях і широко апробовані на Українських і міжнародних наукових конференціях високого рівня.

### **Достовірність і новизна отриманих результатів.**

Усі результати, отримані автором дисертації, є новими. Найбільш важливі з них такі:

1. Уперше встановлена залежність ширини відгуку (кількість пікселів) від ширини апертури відбивача та розроблений новий метод визначення роздільної здатності РСА на основі операції зворотної матричної згортки.

2. Удосконалена математична модель залежності яскравості відбивача на космічному зображенні від його ефективної площі розсіювання та розроблений новий метод визначення передатної функції РСА, що дозволяє визначити його динамічний діапазон та інші радіометричні характеристики, які раніше не калібрувалися з достатньою коректністю, а частіше і зовсім не підлягали калібруванню, в той час як погіршення саме цих характеристик пов'язане з деградацією електронного устаткування радіолокатора.

3. Розроблений новий метод виділення антропогенних об'єктів на монохромних зображеннях земної поверхні, які придатні для калібрування чутливості РСА космічного базування.

4. Уперше запропонований «точковий» наземний відбивач у вигляді транспондера зі слабкоспрямованими приймальною та передавальною антенами, працездатність якого підтверджена в прямому наземно-космічному експерименті з РСА космічного апарата «TerraSar-X».

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням відомих методів математичної фізики, методів комп'ютерного моделювання, експериментальних методів дослідження, застосуванням сучасної вимірювальної техніки та проведенням вимірювань у безлунній камері. Також результати дисертаційної роботи апробовані в профільних виданнях і доповідях на наукових конференціях.

Результати дисертаційної роботи Горобця О. М. повністю відображені в публікаціях автора. Опубліковані статті за змістом не дублюють одна одну.

### **Значущість для науки й практики.**

Наукова значущість результатів і висновків, отриманих у дисертації Горобця О. М., полягає в тому, що в ній уперше розроблене фізико-математичне й методичне забезпечення наземного супроводу калібрування та валідації РСА космічного базування впродовж тривалого процесу його експлуатації. Розроблений вимірювальний полігон забезпечує визначення з високою точністю роздільної здатності та динамічного діапазону РСА. Розроблені автором дисертації прикладні комп'ютерні програми дозволяють виділити на космічних зображеннях наземні антропогенні об'єкти, які дозволяють реально підвищити точність калібрування РСА менш витратними способами. Відзначимо також, що розроблений спосіб і програма, тобто алгоритм пошуку й ідентифікації антропогенних об'єктів, може бути використаний для розпізнавання образів в інших галузях науки й інформаційних технологій. Запропонований, розроблений і досліджений у прямому наземно-космічному експерименті транспондер на основі слабкоспрямованих антен може бути застосований у якості «точкового» наземного репера у радіолокації, авіації, на транспорті та в інших областях.

**Практична значущість** отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані безпосередньо для підвищення рівня метрологічного забезпечення космічного землегляду, значного поліпшення якості космічних зображень у радіодіапазоні шляхом застосування вдосконалених існуючих і нових методів наземного супроводу ДЗЗ і розроблених автором методик використання наземних даних для калібрування сенсорів радіолокаційного діапазону, а також підвищення точності оцінки характеристик наземних об'єктів за рахунок використання як тест-об'єктів великої кількості існуючих споруд. Ефективність розроблених підходів продемонстрована шляхом аналізу даних з більше 20 космічних знімків, на яких було виділено близько 250 споруд.

### **Повнота викладення наукових положень в опублікованих роботах.**

Основні наукові результати дисертаційних досліджень повною мірою викладені в 13 наукових статтях і пройшли апробацію на 24 наукових конференціях високого професійного рівня. З цих робіт 15 входять до наукометричних баз, зокрема Scopus.

### **Оцінка змісту дисертації й автореферату.**

Зміст дисертації й автореферату повністю відображає сутність і послідовність проведення дисертаційних досліджень, нові наукові та практичні результати, висновки й рекомендації.

Основні положення, висновки та результати дисертації й автореферату сформульовані логічно та зрозуміло. Графічний матеріал добре ілюструє та доповнює зміст роботи.

Зміст автореферату повністю відображає зміст дисертації.

Зміст дисертаційної роботи відповідає темі та паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика, за якою вона представлена до захисту.

### **Зауваження по роботі.**

1. Якщо є математичний доказ того, що запропонована в роботі процедура взяття похідної по зображенню рівнозначна для градієнтів будь-яких напрямків (стор. 112-113), то графічні демонстрації зазвичай не наводять. Крім того, у роботі зазначено, що ваги в ядрі спадають до нуля на кутах ядра, отже, на його краях ваги не нульові. Це означає, що функція залежності ваги від відстані  $W$  на інтервалі від  $s/2$  до  $s/\sqrt{2}$  враховується не

повністю залежно від напрямку градієнта. Таким чином, запропоноване ядро згортки може бути рівнозначним для градієнтів усіх напрямків, тільки якщо кусково-лінійна функція  $W$  визначена так, що  $W(s/2) = 0$ .

2. На стор. 123 не зрозуміло, навіщо приділена увага нейронній мережі з радіально базисною функцією. Очевидно, що вона не підходить для формування надлишкового набору відрізків уже тому, що ставить кожен відлік вхідних даних у відповідність тільки одному кластеру, що не відповідає постановці задачі.

У дисертації є описки:

1. Підпис до рисунка 3.11 «суми модулів похідних уздовж стовпців та уздовж рядків (в)» – у тексті й на самому малюнку це корінь із суми квадратів.

2. На стор. 118 найперший рядок «масив модулів градієнтів  $\mathbf{R}$ .» – у всьому тексті параграфа масив модулів градієнтів (шар величини градієнта) позначений  $\mathbf{F}$ .

3. У формулі (3.19)  $TH$  – поріг бінаризації у формулі позначений як  $T$ .

4. У параграфі 2.3 усі величини позначені одноманітно окрім RMSE, яка очевидно, має бути надрукована курсивом.

### **Загальний висновок.**

Викладені вище зауваження суттєво не впливають на загальну високу оцінку теоретичного й експериментального рівня дисертаційної роботи і її великого практичного значення. У дисертації виконаний широкий спектр актуальних досліджень, отримані нові фізичні результати, що мають наукову й практичну значущість.

Кандидатська дисертація Горобця О.М. «Наземне метрологічне забезпечення точності аерокосмічних систем дистанційного зондування Землі» є завершеною науково-дослідною роботою. Отримані в дисертації результати є новими та науково-обґрунтованими. У дисертації розв'язана актуальна задача наземного забезпечення післястартового калібрування радіолокаторів із синтезованим розкритом антени космічного базування в процесі їх експлуатації.

Дисертаційна робота в цілому за отриманими новими результатами, за змістом і за оформленням задовольняє всім вимогам МОН України, які пред'являються до кандидатських дисертацій, а її автор Горобець Олексій Миколайович заслуговує присудження йому вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
завідувач відділу дистанційного зондування Землі  
Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України

  
В. К. Іванов

Підпис В. К. Іванова засвідчую  
Учений секретар  
Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України  
кандидат фізико-математичних наук

  
Є. Почаніна

«12» грудня 2019 р.