

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Аль-Сенайха Раеда Жихадовича

на тему **«Методи адаптивної фільтрації спекл-шуму та апіорного оцінювання якості радіолокаційних зображень на основі нейронних мереж»**

представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань Інформаційні технології за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Актуальність теми дисертації.

Попри переваги радарного дистанційного зондування, формування радіолокаційних зображень супроводжується виникненням викривлень, що обмежують ефективність їх подальшого аналізу, зокрема, мультиплікативного спекл-шуму. Ефективність існуючих методів фільтрації залежить від вибору керуючих параметрів. Некоректний вибір параметрів залишає високий рівень шуму або спричиняє розмиття дрібних деталей. В умовах конвеєрного оброблення масивів радарних даних ручне підбирання параметрів для кожної сцени є неефективним і неможливим, що актуалізує проблему автоматизації налаштування фільтрів. Також існуючі фільтри часто спричиняють втрату важливих високочастотних компонент через згладжування. Це актуалізує задачу апіорного оцінювання потенційної ефективності фільтрації та вдосконалення існуючих методів фільтрації.

В основі роботи є розробка прогнозуючих і гібридних методів обробки радіолокаційних даних дистанційного зондування Землі з метою вдосконалення методики спекл-фільтрації даних. У роботі використано ряд іноваційних методів обробки: математичного моделювання та цифрової обробки сигналів для опису спекл-шуму й диференційованої моделі фільтра Фроста; методи машинного та глибокого навчання для класифікації параметрів фільтрації й апіорного прогнозування метрик якості; механізми трансферного навчання та просторово-канальної уваги для попиксельної адаптації; дев'ять метрик для кількісної верифікації результатів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна роботи представлена запропонованим методом прогнозування абсолютних мір якості радіолокаційних зображень без

використання еталонного зображення для оцінювання конкретного вхідного знімка на етапі інференсу і ручного розрахунку ознак, вдосконаленні методу апріорного вибору параметрів фільтрації як прямої багатокласової класифікації. В роботі також розвинуто метод адаптивної фільтрації спекл-шуму через інтеграцію згорткової нейронної мережі VGG16, адаптованої до використанні із радіолокаційними даними, модуля просторово-канальної уваги СВAM та математичної моделі фільтра Фроста. На відміну від підходів, що оцінюють відносне покращення після фільтрації, запропоновані моделі формують прогноз якості або керуючого параметра до запуску фільтра.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів підтверджено експериментально шляхом обробки 384 зображень та оцінкою ряду метрик кількісної верифікації.

Розроблений автором в ході виконання дисертаційного дослідження гібридний метод фільтрації спекл-шуму дозволив поєднати переваги тренування нейронних мереж із математичною строгістю фільтру Фроста, що сприяло обмеженню ймовірності галюцинування при реалізації фільтрації та зберігати реальні високочастотні компоненти при цьому придушуючи шумові складові.

В дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Аль-Сенайха Раеда Жихадовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка та напрямкам досліджень відповідно до галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям інформаційні технології. За темою роботи опубліковано ряд праць та реалізовано впровадження результатів дослідження.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, виконана послідовно, із дотриманням традиційної структури, що включає в себе теоретичні засади отримання даних радіолокаційного знімання та існуючих складностей при реалізації фільтрації даних, постановки завдання, методів прогнозування оцінки

якості даних, опису гібридного методу фільтрації шуму, постановки експерименту та оцінки результатів. Робота написана доступно, із використанням влучних та доцільних епітетів, при цьому в роботі використана загальноприйнята термінологія і загалом текст роботи викладено на високому науково-технічному рівні.

Дисертація складається з вступу, списку публікацій здобувача, списку скорочень, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 222 сторінки.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, описана його актуальність, поставлено науково-прикладне завдання. Визначені об'єкт, предмет, мета і завдання дослідження. Також описані методи дослідження, наукова новизна та представлено особистий внесок здобувача. Представлено результати апробації положень дисертаційного дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі описана проблема виникнення спекл-шуму при отриманні радіолокаційних даних ДЗЗ, проведено аналітичний огляду методів придушення спекл-шуму, оцінювання якості даних та сучасних парадигм трансферного й гібридного навчання сформульовано такі узагальнені висновки.

У другому розділі виконано формалізацію задачі апріорного прогнозування якості зображень, генерацію напівсинтетичних даних, обґрунтовано вибір оптичних даних NIR-діапазону, описано алгоритм узгодження оптичних і радарних даних. Описано методику прогнозування метрик якості даних на основі адаптованої архітектури DenseNet-121, при цьому отримано коефіцієнт детермінації 0,9732. Успішно розв'язано проблему вибору параметрів адаптивної фільтрації у формі задачі прямої класифікації на основі легкої нейромережі MobileNetV2.

У третьому розділі дисертаційної роботи розроблено наскрізно-навчальну систему придушення спекл-шуму, що поєднує локально-статистичні методи з глибокими нейронними мережами. Запропоновано диференційовану математичну модель фільтра Фроста, яка забезпечує чисельну стабільність градієнтів і перетворює класичний алгоритм на керований шар нейронної мережі, усуваючи потребу в ручному налаштуванні параметрів. На основі цієї моделі синтезовано гібридну архітектуру VGG16-FrostNet, у якій екстрактор ознак VGG16 разом із модулем уваги CBAM прогнозує просторово-змінну карту коефіцієнтів демпфування.

У четвертому розділі виконано порівняльний аналіз п'яти основних підходів до інтеграції класичних адаптивних фільтрів і методів глибокого навчання, визначено їхні переваги та сфери застосування. Показано, що парадигма «жорсткого зв'язку» забезпечує найвищу якість і попиксельну адаптивність, а сформована теоретична основа обґрунтовує запропоновані в дисертації архітектурні рішення. Експериментальні дослідження VGG16-FrostNet підтвердили переваги цього підходу.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні наукові результати дисертації повністю розкривають її мету та завдання дослідження і повною мірою висвітлені здобувачем у 6 наукових працях. Серед них опубліковано 3 наукові статті у провідних фахових виданнях України (2 категорії «Б» та 1 категорії «А», з яких одна індексується у міжнародній наукометричній базі даних Scopus). Окрім цього, результати досліджень представлено у 3 працях апробаційного характеру (матеріали та тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях). Автором одержано два акти впровадження наукових положень і результатів дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача та мають впровадження.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У першому розділі наведено якісний і детальний опис природи спекл-шуму, його впливу на алгоритми машинного зору та проявів на радарних зображеннях, однак бракує ілюстративного матеріалу для підкріплення опису.

2. Семантика ландшафтів та поверхонь оцінюється лише статистично та частотно, і не враховується реальне відношення територій до певних типів земної поверхні, які можливо отримати із існуючих геопросторових продуктів, зокрема даних DynamicWorld, які б дозволили визначити поведінку спекл-шуму в межах різних класів земної поверхні, виявляти специфічні патерни на межах різних класів та всередині кожного класу та застосовувати оптимальний розмір ковзного вікна для кожного із отриманих сегментів.

3. В підрозділі 2.2.2 запропоновано використання даних NIR як еталонного базису, оскільки він передає структурні особливості підстилаючої поверхні. Однак ці дані в межах забудованої території мають дуже низький рівень

сигналу, у той час як прояви спекл-шуму зазвичай інтенсивніші, що спричиняє зворотну залежність між оптичними і радарними сигналами. Це розходження демонструє рис. 2.2 на с. 88 між оригінальним та стилізованим зображенням Sentinel-2 на рівні сигналу нижче 0,1. Було б доцільно використати комплексні спектральні індекси, які б враховували властивості як рослинного покриву, так і штучних поверхонь, зокрема, порогове комбінування індексів NDVI для рослинності та NDBI для штучних поверхонь.

4. На сторінці 133 зроблено широке узагальнення щодо інваріантності градієнтів, контурів та базових геометричних структур для оптичних і радарних даних, хоча на сторінці 164 описані деякі обмеження гібридного підходу фільтрації, обумовлені неузгодженістю оптичних і радарних даних.

5. У підпункті 3.3.1 недостатньо детально описано процедуру формування навчальних даних та узгодження їх із радарними даними: які канали відібрано, обґрунтування відбору та, власне, процедуру узгодження. Якщо ця процедура відповідає опису в підпункті 2.2.2, то наявна розбіжність опису, оскільки раніше говорилося про дані NIR, а в даному випадку про кольорові зображення, які використовує мережа VGG16, тобто деякий багатоканальний синтез, а не одиничне зображення.

6. В підпункті 2.5.5 описаний відбір репрезентативних сцен для порівняння дійсних і передбачених метрик якості, однак самі зображення в роботі не наведені.

7. Незначні недоліки на рисунках (на рис. 2.10 не підписана частина осей, на рис. 2.13 легенда закриває частину даних).

Вважаю, що вказані недоліки не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів, підтверджену впровадженням результатів роботи, та не впливають на високу оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Аль-Сенайха Раеда Жихадовича на тему **«Методи адаптивної фільтрації спекл-шуму та апіорного оцінювання якості радіолокаційних зображень на основі нейронних мереж»** виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та

науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Аль-Сенайх Раед Жихадович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

Старший науковий співробітник лабораторії методів обробки даних дистанційного зондування при відділі геопросторового моделювання в аерокосмічних дослідженнях Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат технічних наук, старший дослідник

Микола ЛУБСЬКИЙ

«15» липня 2026 року