

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

Шелестова Андрія Юрійовича

на дисертаційну роботу

Аль-Сенайх Раеда Жихадовича

на тему «Методи адаптивної фільтрації спекл-шуму та апріорного оцінювання якості радіолокаційних зображень на основі нейронних мереж»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії

у галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації.

Швидкий розвиток супутникових угруповань дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема супутників РСА Sentinel-1 (програма Copernicus), призвів до значного збільшення обсягів геопросторових даних високого просторового розрізнення. Оскільки радіолокаційні зображення генеруються в мікрохвильовому діапазоні, це дає змогу здійснювати регулярний моніторинг земної поверхні незалежно від погодних умов та хмарності, що робить їх незамінними для розв'язання задач сільського та лісового господарства, картографування наслідків катастроф, національної безпеки тощо.

Проте формування радіолокаційних зображень супроводжується специфічним фізичним явищем — когерентним спекл-шумом мультиплікативного характеру. Спекл-шум спотворює корисний сигнал, розмиває дрібні структури та значно погіршує якість роботи автоматизованих систем детектування та класифікації об'єктів. Традиційні методи фільтрації (лінійні та нелінійні просторові фільтри) потребують ручного підбору параметрів для кожної окремої сцени, що виключає їх застосування у великих хмарних конвеєрах обробки даних. З іншого боку, методи навчання глибоких нейронних мереж (CNN), хоча і демонструють високу ефективність, діють як неінтерпретовані «чорні ящики» і можуть вносити непередбачувані структурні спотворення, оскільки не спираються на фізико-математичну модель формування радіосигналу.

Тому виникає нагальна потреба в розробці гібридних методів, які поєднують строгість класичних локально-статистичних моделей фільтрації зі здатністю нейронних мереж адаптуватися до просторового контексту, а також

у створенні систем апріорного оцінювання якості, що дозволяють автоматично визначати доцільність фільтрації та її параметри до запуску ресурсномістких алгоритмів. Це зумовлює високу актуальність дисертаційної роботи Аль-Сенайх Р. Ж.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Матеріали, викладені в дисертації Аль-Сенайх Раеда Жихадовича, свідчать про високий рівень обґрунтованості та достовірності його наукових результатів. Достовірність забезпечується використанням сучасного математичного апарату теорії цифрової обробки сигналів, методів математичного та імітаційного моделювання, машинного та глибокого навчання з використанням передових згорткових архітектур DenseNet, MobileNet та VGG. Експериментальна частина спирається на використання радарних даних Sentinel-1 великого об'єму та оптичних даних Sentinel-2, а кількісна оцінка проведена за допомогою групи повнореференсних і перцептивних метрик якості (PSNR, WSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM, HaarPSI, EPI, FOM).

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод апріорного прогнозування абсолютних значень метрик якості PCA-зображень після фільтрації спекл-шуму на основі моделі DenseNet-121. На відміну від відомих підходів, які оцінюють лише відносне покращення якості, розроблена модель дозволяє з високою точністю прогнозувати абсолютні значення метрик на етапі інференсу безпосередньо за зашумленим знімком, без використання еталонного зображення.

2. Удосконалено метод апріорного вибору параметрів фільтрації (на прикладі розміру вікна фільтра Лі) завдяки формулюванню задачі як прямої багатокласової класифікації на базі архітектури MobileNetV2. Це дозволило усунути накопичення похибок, притаманне двоетапним регресійним схемам, забезпечивши автоматизований вибір оптимального розміру вікна з точністю 87,17%.

3. Одержав подальший розвиток метод адаптивної фільтрації спекл-шуму PCA-зображень шляхом побудови гібридної архітектури VGG16-FrostNet з наскрізним навчанням. Метод поєднує модель просторово-канальної уваги СВМ для піпсельного розрахунку карти коефіцієнтів демпфування з використанням фільтра Фроста. При цьому для запобігання

згасанню градієнтів у процесі навчання розроблено та інтегровано чисельно стійку модифікацію фільтра Фроста шляхом заміни квадрата локального коефіцієнта варіації на його перший ступінь.

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

Дисертація є завершеною науковою працею, виконаною на високому науковому рівні. Її зміст повністю відповідає паспорту спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка та напрямам досліджень кафедри інформаційно-комунікаційних технологій імені О. О. Зеленського Національного аерокосмічного університету «ХАІ».

Аналіз дисертації та опублікованих праць здобувача підтвердив, що вона є результатом самостійних досліджень автора і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації чи плагіату. Використані ідеї, математичні моделі та експериментальні результати інших авторів супроводжуються належними посиланнями на відповідні першоджерела. Принципи академічної доброчесності у роботі дотримано повністю.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційну роботу написано українською мовою. Стиль викладення матеріалу є чітким, послідовним, логічним та повністю відповідає академічним вимогам до наукових праць. Автор вільно володіє сучасною термінологією у сфері цифрової обробки сигналів та методів штучного інтелекту. Теоретичні висновки належним чином підкріплені графічним матеріалом, таблицями експериментальних метрик та схемами алгоритмів.

Структура роботи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (163 найменування) та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок основного тексту рукопису, містить 22 рисунки та 14 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність роботи.

У **першому розділі** проведено ґрунтовний огляд фізичних передумов виникнення спеклу, проаналізовано класичні та нейромережеві методи придушення шуму, визначено прогалини та сформульовано конкретні завдання дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** описано розроблення методів прогнозування якості фільтрації на основі DenseNet-121 та вибору розміру вікна Лі на основі MobileNetV2. Детально представлено конвеєр формування напівсинтетичного навчального набору зображень на базі знімків Sentinel-2 з використанням гістограмного узгодження.

У **третьому розділі** наведено опис архітектури VGG16-FrostNet. Детально описано математичну модель диференційованого шару Фроста, обґрунтовано його чисельну стійкість та принципи прогнозування карти коефіцієнтів демпфування через механізм уваги CBAM.

У **четвертому розділі** представлено результати порівняльного аналізу розроблених методів із сучасними архітектурами глибокого навчання та класичними просторовими фільтрами. При цьому базовим еталоном був оптимізований фільтр Фроста, коефіцієнт демпфування якого індивідуально налаштовувався для кожного тестового зображення шляхом ітеративного пошуку оптимального значення. Систематизовано п'ять парадигм інтеграції класичних фільтрів у нейронні мережі. Проведено порівняльний аналіз розроблених методів на тестовому наборі з 382 повноформатних зображень, підтверджено їх високу ефективність та описано практичне впровадження в компанії P-Product, Inc., що підтверджене відповідним актом.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 6 наукових працях здобувача. Серед них 3 статті у провідних наукових фахових виданнях України (зокрема 1 стаття в журналі категорії «А», який індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus, та 2 статті у виданнях категорії «Б»); 3 публікації у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам чинного законодавства.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Позитивно оцінюючи дисертаційне дослідження Аль-Сенайх Р. Ж., необхідно зробити наступні зауваження:

1. У другому розділі під час формування напівсинтетичного навчального набору зображень на основі оптичних зображень Sentinel-2 застосовано алгоритм гістограмного узгодження. Проте в роботі недостатньо висвітлено, як саме відмінності в кутах падіння або сезонні зміни рослинного покриву між оптичними та радарними парами можуть впливати на точність гістограмного узгодження та подальше прогнозування якості.

2. При реалізації класифікатора MobileNetV2 для вибору розміру вікна фільтра Лі задача формулюється як класифікація серед п'яти класів (розміри вікон від 3×3 до 11×11). Водночас у дисертації не розглянуто випадки асиметричних ковзних вікон (наприклад, 3×5 або 5×7), які могли б бути корисними для сильно витягнутих лінійних об'єктів (доріг, берегових ліній).

3. У третьому розділі під час оцінювання методу VGG16-FrostNet порівняння проводилося переважно з класичним фільтром Фроста. Було б доцільно розширити порівняльний аналіз, залучивши інші нейромережеві методи придушення шуму (наприклад, DnCNN або архітектури типу U-Net) для більш чіткого розмежування переваги гібридного аналітичного шару порівняно з суто нейромережевими підходами.

4. У підрозділі 2.2.7 згадується формування репрезентативного набору даних, але не наведено його розмір та кількісних або якісних оцінок «репрезентативності».

5. Назви деяких розділів (наприклад, 2.4.3) не зовсім відповідають їх змісту.

6. Підрозділ 2.5.16, присвячений питанню енергоефективності, а також підрозділи 2.5.17 і 3.4.1, у яких розглянуто перспективи інтеграції методів у хмарні платформи оброблення даних ДЗЗ, доцільно було б розширити кількісними оцінками часу виконання, використання пам'яті, пропускну здатності та енергоспоживання, а також аналізом компонентної архітектури відповідних систем та місцем в цих архітектурах розроблених автором методів.

7. Структура викладення результатів є дещо фрагментованою: результати окремих експериментів наведено в різних підрозділах, хоча, з огляду на назву, у розділі 4 доцільно було б навести основні результати експериментальної верифікації та порівняльного оцінювання розроблених методів. Поточна організація матеріалу ускладнює цілісне сприйняття отриманих результатів.

8. У четвертому розділі на тестовому наборі з 382 зображень оцінювалися глобальні метрики якості по всьому зображенню. Водночас у роботі доцільно було б навести окрему кількісну оцінку ефективності фільтрації для різних типів земної поверхні (наприклад, окремо для міських територій і однорідних водних поверхонь), що дозволило б детальніше оцінити роботу просторово-адаптивного модуля уваги СВМ.

9. У тексті дисертації трапляються дрібні редакційні помилки (наприклад, у деяких формулах другого розділу не наведено повних описів

усіх проміжних змінних), присутня велика кількість дрібних розділів, що ускладнює аналіз отриманих результатів, є певні термінологічні неточності (наприклад, «тренування»,), а деякі розділи мають невдалу назву (наприклад, підрозділ 2.5.15).

Водночас зазначені зауваження не знижують загальної наукової цінності отриманих результатів і практичного значення дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Аль-Сенайх 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, є завершеним самостійним науковим дослідженням. Сукупність отриманих теоретичних та практичних результатів забезпечує розв'язання актуальної науково-прикладної задачі в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю отриманих результатів і практичним значенням повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, зокрема пунктам 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:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри математичного моделювання
та аналізу даних
Навчально-наукового фізико-технічного інституту
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Андрій ШЕЛЕСТОВ