

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Аль-Сенайх Раеда Жихадовича

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

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

Актуальність теми дисертації.

Сучасний етап розвитку систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) характеризується стрімким збільшенням обсягів просторових даних, одержаних за допомогою радарів із синтезованою апертурою (РСА), зокрема супутників місії Sentinel-1 програми Copernicus. Завдяки всепогодності та можливості цілодобового знімання, радіолокаційні зображення стали індустріальним стандартом у моніторингу навколишнього середовища, сільськогосподарському та лісовому господарстві, а також у реагуванні на надзвичайні ситуації.

Проте когерентна природа радіолокаційного сигналу призводить до виникнення інтенсивної мультиплікативної завади — спекл-шуму, що деградує якість зображень і суттєво знижує точність алгоритмів автоматичної обробки (сегментації, класифікації, детектування об'єктів). Застосування класичних адаптивних фільтрів (Лі, Фроста тощо) потребує ручного налаштування ключових параметрів (розміру вікна чи демпфування), що унеможлиблює їх використання в автоматизованих конвеєрах хмарної обробки великих масивів даних. Водночас повністю нейромережеві фільтри функціонують як неінтерпретовані «чорні ящики» і схильні генерувати структурні артефакти, оскільки не враховують фізику формування сигналу.

Тому актуальним науковим завданням є створення гібридних нейромережевих методів просторово-адаптивного придушення спекл-шуму, що об'єднують аналітичні моделі класичної фільтрації зі здатністю нейромереж до аналізу контексту, а також розроблення систем апріорного прогнозування метрик якості фільтрації безпосередньо за зашумленим вхідним знімком для оптимізації обчислювальних ресурсів. Саме на вирішення цих завдань спрямоване дисертаційне дослідження Аль-Сенайх Р. Ж., що й обумовлює його актуальність.

Обґрунтованість, достовірність та новизна наукових результатів.

Наукові результати, отримані Аль-Сенайхом Раедом Жихадовичем, є глибоко обґрунтованими та достовірними. Достовірність результатів підтверджується послідовним застосуванням методів математичного моделювання, теорії цифрової обробки сигналів і глибокого згорткового навчання (фреймворк PyTorch), використанням реальних супутникових даних місій Sentinel-1 та Sentinel-2 для формування навчальних і тестових вибірок, а також ретельним бенчмаркінгом на репрезентативній тестовій базі з 382 повноформатних зображень.

Здобувачем отримано такі наукові результати, що характеризуються науковою новизною:

1. Метод апіорного прогнозування абсолютних мір якості РСА-зображень після придушення спекл-шуму. Запропоновано підхід на основі трансферного навчання густозв'язаної архітектури DenseNet-121, адаптованої для одноканальних амплітудних радарних знімків. На відміну від існуючих методів, які оцінюють лише відносний приріст якості, розроблений предиктор прогнозує абсолютні значення п'яти метрик (PSNR, WSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM) безпосередньо за вхідним зашумленим знімком без використання еталонного зображення на етапі інференсу. Досягнуто високої точності прогнозування (середній $R^2 = 0,9732$, максимум $R^2 = 0,9972$ для фільтра Gamma MAP).

2. Метод апіорного вибору керуючих параметрів фільтрації (на прикладі розміру вікна фільтра Лі). Завдання автоматичного вибору розміру просторового вікна вперше сформульовано як пряму багатокласову класифікацію на базі модифікованої архітектури MobileNetV2. Це дозволило усунути накопичення похибок, притаманне традиційним двоетапним регресійним схемам, забезпечивши точність вибору оптимального вікна на рівні 87,17 % при мінімальних обчислювальних витратах, що є критично важливим для потокової обробки даних на пристроях із обмеженими ресурсами.

3. Гібридний метод просторово-адаптивної фільтрації спекл-шуму (VGG16-FrostNet). Одержав подальший розвиток метод адаптивного придушення шуму шляхом аналітичного поєднання трансферного навчання на базі VGG16 та модуля просторово-канальної уваги СВМ із математичною моделлю фільтра Фроста. Модель формулюється як наскрізно-навчальний граф, де мережа прогнозує просторово-змінну карту коефіцієнтів демпфування для кожного пікселя окремо. Для забезпечення чисельної стійкості зворотного поширення градієнтів запропоновано модифікацію

математичного опису фільтра Фроста шляхом заміни квадрата локального коефіцієнта варіації на його першу ступінь.

Завершеність дисертаційної роботи, дотримання академічної доброчесності, мова та стиль викладення.

За змістом і структурою дисертаційна робота Аль-Сенайх Р. Ж. є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке повністю відповідає вимогам стандарту вищої освіти за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. Рукопис містить детальний опис об'єкта, предмета, методів досліджень, розроблених алгоритмічних рішень та результатів їх експериментальної перевірки.

Аналіз публікацій здобувача та тексту дисертації свідчить про повне дотримання принципів академічної доброчесності. Усі запозичені ідеї, математичні моделі та результати досліджень інших авторів супроводжуються коректними посиланнями на першоджерела. Робота виконана самостійно, не містить ознак плагіату чи фальсифікації наукових даних.

Роботу написано українською мовою. Тексту властивий строгий академічний стиль викладу, логічна послідовність, чіткість формулювань та використання сучасної науково-технічної термінології у сфері обробки сигналів та штучного інтелекту. Теоретичні викладки та експериментальні дані проілюстровані достатньою кількістю рисунків і таблиць.

Структура та зміст дисертації.

Дисертація побудована за класичною структурою і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (163 найменування) та додатків. Загальний обсяг основного тексту рукопису становить приблизно 165 сторінок, містить 22 рисунки та 14 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт, предмет, мету і завдання дослідження, охарактеризовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та структуру роботи.

У **першому розділі** здійснено аналітичний огляд фізичної природи виникнення та математичних моделей спекл-шуму, систематизовано класичні локально-статистичні просторові фільтри, а також сучасні нейромережеві методи придушення перешкод. На основі проведеного аналізу виділено прогалини в існуючих підходах та детально обґрунтовано постановку задач дослідження.

У **другому розділі** розроблено методику апіорного прогнозування метрик якості фільтрації та прямої класифікації параметрів фільтра Лі. Описано конвеєр генерації напівсинтетичного навчального корпусу на основі оптичних знімків Sentinel-2 (діапазон NIR) та алгоритму нелінійного гістограмного узгодження з розподілами Sentinel-1. Представлено детальні архітектури моделей DenseNet-121 та MobileNetV2.

У **третьому розділі** представлено гібридний метод VGG16-FrostNet. Наведено математичне обґрунтування заміни квадрата коефіцієнта варіації у формулі Фроста для уникнення числових нестабільностей і стабілізації градієнтного спуску. Описано інтеграцію модуля СВМ для розрахунку карти коефіцієнтів демпфування та складену функцію втрат для наскрізного навчання моделі.

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень. Систематизовано та порівняно п'ять парадигм інтеграції класичних фільтрів у згорткові мережі. Наведено результати тестування методу VGG16-FrostNet на тестовому наборі з 382 повноформатних зображень. Окреслено напрями впровадження результатів у хмарних конвеєрах обробки великих масивів радарних даних.

Повнота відображення результатів у наукових публікаціях здобувача.

Основний зміст та отримані наукові результати дисертації повністю висвітлені у 6 опублікованих наукових працях здобувача. Серед них: 3 статті у провідних наукових фахових виданнях України (зокрема, 1 стаття у виданні категорії «А», що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus, та 2 статті у виданнях категорії «Б»); 3 публікації у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій. Публікації повною мірою відображають як теоретичну, так і експериментальну складові дослідження.

Зауваження до дисертаційної роботи.

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу Аль-Сенайх Р. Ж., необхідно висловити такі зауваження та побажання:

1. У дисертаційній роботі велику увагу приділено придушенню мультиплікативного спекл-шуму, що є характерним для РСА-зображень, проте розроблені моделі та методи (зокрема на базі MobileNetV2 та DenseNet-121) тестувалися в основному на амплітудних одноканальних знімках Sentinel-1. Було б доцільно розглянути адаптацію запропонованих підходів для інших типів завад (наприклад, адитивного або пуассонівського шуму), що розширило б область застосування розроблених методів.

2. Під час проведення досліджень та верифікації моделей у розділах 2 та 3 автор використовує одноканальні амплітудні зображення. Оскільки сучасні супутникові системи PCA (зокрема Sentinel-1 у режимі IW GRD) зазвичай формують дані у двох поляризаціях (наприклад, VV та VH), доцільно було б проаналізувати особливості застосування методів прогнозування якості та просторово-адаптивної фільтрації (VGG16-FrostNet) до двополяризаційних або багатоканальних радарних даних.

3. У третьому розділі під час розробки гібридного методу VGG16-FrostNet для прогнозування карти коефіцієнтів демпфування A_{map} використовується архітектура VGG16 з модулем CBAM. Хоча це забезпечує високу якість фільтрації, використання VGG16 створює значне обчислювальне навантаження. Було б корисно навести порівняльний аналіз швидкодії та обчислювальної складності VGG16-FrostNet із легковаговими архітектурами (наприклад, MobileNet або ShuffleNet) як потенційними альтернативами для модулів просторової уваги.

4. Для оцінювання якості придушення спекл-шуму автор використовує широкий спектр сучасних метрик (PSNR, WSNR, SSIM, FSIM, HaarPSI та інші). Водночас у роботі не обговорюється можливість застосування розроблених методів прогнозування для безеталонних метрик (наприклад, NIQE або BRISQUE), які оцінюють природність зображення без порівняння з еталонним зображенням. Це могло б спростити оцінювання якості фільтрації в реальних умовах інференсу без залучення оптичних парних даних.

5. У тексті дисертації зустрічаються поодинокі редакційні та друкарські огріхи, зокрема деякі графіки (наприклад, у розділі 4) мають дрібне маркування осей, що дещо ускладнює сприйняття інформації.

Висловлені зауваження не применшують наукову та практичну значущість отриманих здобувачем результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Аль-Сенайх Раєда Жихадовича на тему «Методи адаптивної фільтрації спекл-шуму та апіорного оцінювання якості радіолокаційних зображень на основі нейронних мереж» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення якості та автоматизації процесу попередньої обробки зображень ДЗЗ. Робота містить нові наукові положення та практичні результати, що мають істотне значення для галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації.

За своєю актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю результатів і практичним значенням дисертація 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, а її автор — Аль-Сенайх Раед Жихадович — заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Рецензент:

доктор технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник кафедри
інформаційно-комунікаційних технологій
ім. О. О. Зеленського
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Сергій КРИВЕНКО