

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктору фізико-математичних наук,
професору, завідувачу кафедри
математики та теоретичної радіофізики
факультету радіофізики, електроніки
та комп'ютерних систем
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
Висоцькому Володимирі Івановичу

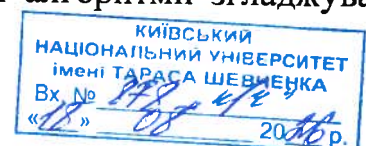
РЕЦЕНЗІЯ

рецензента **Оліха Олега Ярославовича**
на дисертаційну роботу **Мамотенка Сергія Петровича**
**«Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення
даних магнітно-резонансної томографії»**,
поданої на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 10 – Природничі науки
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Актуальність обраної теми

Актуальність дисертаційної роботи зумовлена сучасними викликами у сфері неінвазивної медичної діагностики, зокрема необхідністю підвищення якості магнітно-резонансної томографії (МРТ), яка є провідним інструментом візуалізації. Незважаючи на стрімкий розвиток томографічних систем, діагностична цінність отриманих зображень суттєво обмежується наявністю апаратних завад, серед яких головну роль відіграє тепловий шум електронних компонентів. Цей тип шуму є найбільш поширеним фактором деградації сигналу, що виникає ще на етапі первинної реєстрації. Теплові флуктуації мають адитивну природу та рівномірно розподіляються по всьому частотному спектру. Оскільки енергія корисного магнітно-резонансного сигналу стрімко падає на високих частотах, які відповідають за чіткість контурів та дрібних анатомічних структур, відносний вплив шумових компонентів у цих зонах критично зростає. Це створює серйозні перешкоди для точної ідентифікації тканин та виявлення прихованих патологій.

Разом з тим, існуючі традиційні методи просторової фільтрації, що застосовуються до фінальних амплітудних зображень, мають суттєві обмеження. Процес перетворення комплексного сигналу в амплітудний спотворює статистику шуму, змінюючи її з гауссівської на райсівську, що провокує штучне позитивне зміщення інтенсивності в ділянках із низьким співвідношенням сигнал/шум. Крім того, класичні алгоритми згладжування,



хоча й пригнічують завади, часто призводять до надмірного розмиття високочастотних деталей, що ускладнює діагностику локальних уражень мозку. У зв'язку з цим виникає гостра потреба у створенні альтернативних інструментів обробки, які б працювали безпосередньо з первинними даними.

Перспективним напрямом розв'язання цієї проблеми є застосування методів непараметричного спектрального аналізу до комплексних сигналів ще до їх нелінійного перетворення. Однак досягнення стабільної спектральної оцінки є нетривіальним завданням через невідомі наперед частотні характеристики та варіативність даних. Саме тому обґрунтованим та надзвичайно доцільним є впровадження двовимірних багатовіконних спектральних методів у поєднанні з архітектурами глибокого навчання (зокрема, гібридними згортковими автокодувальниками), які здатні адаптивно пригнічувати шум та якісно відновлювати інформацію навіть за умов жорсткого дефіциту навчальних вибірок.

2. Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження Мамотенка С.П. проводилося на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка та виконувалося в межах науково-дослідної роботи «Дифузійні та електродинамічні явища у багатокомпонентних неоднорідних системах для медико-біологічних інформаційних технологій» (номер державної реєстрації 0122U002024) та науково-дослідної роботи «Методи формування та використання когерентних та кореляційних процесів в атомно-ядерних, астрофізичних та біомолекулярних клітинних системах» (номер державної реєстрації 0122U001974).

3. Структура дисертації, основні наукові результати, їх новизна, ступінь обґрунтованості та достовірності

Дисертація об'ємом 121 сторінок, у тому числі 111 сторінок основного тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків та переліку використаних джерел зі 101 найменування. Дисертація містить 8 таблиць та 34 рисунки.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, окреслено його мету, ключові завдання, а також об'єкт і предмет. Подано методологічну базу роботи, висвітлено наукову новизну та сформульовано особистий внесок здобувача. Визначено практичну цінність одержаних результатів, їхній зв'язок із науково-дослідними темами та рівень апробації на наукових форумах.

У *першому розділі* подано вичерпний аналітичний огляд літератури, присвячений сучасним підходам до формування, обробки та реконструкції даних магнітно-резонансної томографії. Розглянуто як традиційні математичні та спектральні методи відновлення сигналів відгуку у k -просторі, так і новітні напрями на основі алгоритмів машинного навчання та згорткових нейронних мереж. Проведений аналіз засвідчує високу ерудицію здобувача та

демонструє, що задача ефективного застосування непараметричного спектрального аналізу (зокрема методів періодограмного та багатовіконного згладжування) в умовах високого рівня шуму та обмеженого обсягу навчальних даних залишається недослідженою повною мірою, що й зумовлює актуальність даної дисертації.

У *другому розділі* детально описано методологію непараметричного спектрального оцінювання МРТ-зображень на основі періодограмного аналізу. Розглянуто математичний апарат згладженої періодограми Денієлла та методику її застосування для пригнічення аддитивного шуму на амплітудних сканах. Детально висвітлено алгоритми розрахунку квантифікаційних метрик якості відновлення зображень, таких як пікове відношення сигналу до шуму (PSNR), індекс структурної подібності (SSIM), а також параметр фрактальної розмірності. Особливу увагу приділено дослідженню залежності зазначених метрик від ширини згладжувального вікна Денієлла, що дозволило обґрунтувати оптимальні параметри обробки для збереження дрібномасштабних анатомічних структур.

У *третьому розділі* висвітлено розробку та апробацію гібридної неймерережевої схеми відновлення МРТ-зображень, яка поєднує попередню непараметричну спектральну обробку та згортковий автокодувальник. Детально описано архітектуру нейронної мережі, функції втрат, процес навчання та підготовки вибірок. Особливу увагу приділено дослідженню ефективності запропонованого підходу в умовах суттєвого дефіциту навчальних даних (малопараметричного навчання). На прикладі аналізу клінічних МРТ-сканів пацієнтів із патологіями (зокрема, розсіяним склерозом) продемонстровано, що попередня періодограмна фільтрація за Денієллом забезпечує високу точність реконструкції та збереження патологічних осередків навіть при використанні надмалих навчальних датасетів.

У *четвертому розділі* розглянуто метод двовимірного багатовіконного спектрального аналізу (Multitaper) для обробки комплексних даних МРТ безпосередньо у k -просторі. Описано математичний апарат побудови 2D-вікон на основі дискретних сфероїдальних послідовностей та обґрунтовано їхні концентруючі властивості. На основі аналогії з фільтрацією Вінера запропоновано та синтезовано оригінальний оператор спектрального стискання, що дозволяє адаптивно регулювати внесок високочастотних та низькочастотних компонент k -простору. Проведено порівняльний аналіз ефективності розробленого методу з класичними підходами (зокрема, згладженою періодограмою та фільтром нелокальних середніх), який підтвердив перевагу запропонованого оператора за метриками PSNR та SSIM при відновленні зашумлених томографічних даних.

Висновки дисертаційної роботи відповідають її змісту та поставленій меті.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблено гібридну методологію реконструкції МРТ-зображень, яка поєднує попередню непараметричну спектральну фільтрацію (згладжену періодограму Денієлла) зі згортковим автокодувальником; доведено, що такий підхід забезпечує стійку мінімізацію шумових артефактів та високу точність

відтворення дрібномасштабних патологічних структур в умовах критичного дефіциту (надмалих вибірок) навчальних даних;

- синтезовано оператор спектрального стискання для комплексних даних k -простору, який за аналогією з фільтром Вінера здійснює адаптивне регулювання внеску спектральних компонент; обґрунтовано його ефективність для пригнічення аддитивного шуму зі збереженням чіткості міжтканинних меж у порівнянні з класичною періодограмою та методом нелокальних середніх;
- удосконалено метод двовимірного багатовіконного спектрального оцінювання стосовно задач обробки МРТ-даних у k -просторі шляхом застосування 2D-ортогональних вікон на основі дискретних сфероїдальних послідовностей, що дозволило суттєво зменшити зміщення спектральної оцінки та знизити витік енергії за межі основного пелюстка;
- дістали подальшого розвитку підходи до кількісного оцінювання якості відтворених МРТ-зображень шляхом комплексної аналітики структурних метрик (PSNR, SSIM) у взаємозв'язку з фрактальною розмірністю (FD), що дало змогу об'єктивно оцінити вплив параметрів спектрального згладжування на збереження складної геометричної топології біологічних тканин.

Достовірність наукових результатів та обґрунтованість висновків дисертаційної роботи Мамотенка С.П. не викликає сумнівів, адже у ході виконання дослідження обґрунтованість отриманих результатів забезпечується строгим і коректним застосуванням математичного апарату непараметричного спектрального аналізу (періодограми Деніелла, двовимірних DPSS-вікон та оператора спектрального стискання), сучасною архітектурою згорткового автокодувальника, а також використанням комплексного набору незалежних квантифікаційних метрик якості зображень (PSNR, SSIM, фрактальної розмірності).

4. Практична значимість отриманих результатів

Практична цінність дисертаційної роботи Мамотенка С.П. полягає у розробці ефективного програмно-алгоритмічного забезпечення для підвищення якості МРТ-зображень та пригнічення шумових артефактів без необхідності збільшення часу сканування чи зміни апаратних параметрів томографа. Запропонований гібридний нейромережевий підхід дозволяє проводити точну реконструкцію та збереження дрібних патологічних структур (зокрема, осередків ураження при розсіяному склерозі) навіть за умов суттєвого дефіциту та надмалого обсягу навчальних даних, що є критично важливим для клінічної практики та діагностики рідкісних патологій. Створений оператор спектрального стискання для k -простору може бути безпосередньо інтегрований у первинні модулі цифрової обробки сигналів сучасних МРТ-сканерів для адаптивної фільтрації зашумлених комплексних даних. Крім того, розроблені методи двовимірного багатовіконного спектрального аналізу та комплексного оцінювання якості (з урахуванням фрактальної розмірності) можуть бути адаптовані для розв'язання ширшого кола задач томографії та медичної візуалізації, включаючи ультразвукову,

комп'ютерну та оптичну когерентну томографію.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 3 наукові праці у провідних фахових виданнях, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та Web of Science (2 роботи в журналах з квантилем Q4 та одна в журналі з квантилем Q3). Результати дисертаційної роботи пройшли всебічну апробацію та доповідалися на 5 міжнародних та вітчизняних конференціях. Опубліковані праці містять повноцінне та системне викладення основних наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації. Особистий внесок здобувача є чітко виокремленим, вирішальним і вагомим на всіх етапах виконання дослідження.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

Головні ідеї рукопису викладено зрозуміло, присутня чітка та логічно виправдана структуризація тексту. Водночас, під час ознайомлення з дисертацією виникли деякі зауваження.

1. У розширених описових абзацах першого та другого розділів наявні поодинокі випадки пропущення ком перед вступними словами («зокрема», «отже», «таким чином») або при відокремленні довгих дієприслівникових зворотів, які описують математичні перетворення.

2. Існує певна плутанина з нумераціями рисунків: так, рис.1.4, 3.2 та 4.2 відсутні, хоча рис.3.3, 4.3 та 1.5 наявні (останній номер використано навіть двічі на сторінках 25 та 27 для різних зображень). Так само відсутня табл.3.3 за наявності таблиць з номерами 3.2 та 3.4.

3. На ст.24 у розділі 2.1 сказано, що «Для спрощення математичних операцій синусоїду зручно записувати як дійсну частину комплексної експоненти», хоча насправді в цьому випадку потрібно використовувати уявну частину.

4. На ст.26, параграф 1.3.1 сказано «де змінна частоти ω є оберненою до одиниць часу (радіани за секунду або герци)» хоча насправді в дужках використані одиниці двох різних фізичних величин – циклічної та лінійної частот.

5. При статистичній обробці даних (параграфи 2.5.3 та 3.5.5) використовувався t-тест, який, зокрема, передбачає нормальний розподіл даних. В цьому випадку краще було використовувати методи непараметричної статистики, такі як Wilcoxon signed-rank тест, Friedman тест, Friedman Aligned тест, Quade тест з різними post-hoc процедурами, що не є настільки вимогливими до вихідних даних.

6. При визначенні оптимального розміру вікна згладжування (параграф 2.5) не вказано яким чином та на скількох зображеннях визначалися похибки метрик (SSIM, PSNR і FD).

7. В параграфі 2.6.1 зазначено, що за кількісними характеристиками

стандартний фільтр Вінера переважає метод Данієлла, запропонований до використання у даній роботі. Виникає питання щодо доцільності застосування нового та гіршого методу, якщо є кращий та загальноприйнятний.

8. Автор переконливо демонструє переваги гібридної схеми (згортковий автокодувальник та періодограма) при роботі з малопараметричними вибірками. Однак у роботі бракує чіткої математичної межі/критерію: який саме мінімальний розмір навчального датасету є критичним, після якого якість реконструкції почне стрімко деградувати. Крім того, в роботі не розглянуто такий традиційний підхід до роботи з малими масивами даних як трансфер навчання (transfer learning).

9. Застосування двовимірних дискретних сфероїдальних послідовностей та оператора спектрального стискання вимагає додаткових обчислювальних ресурсів порівняно з класичним швидким перетворенням Фур'є. У роботі бажано було б навести порівняльну таблицю часової складності та вимог до RAM для обробки стандартного MPT-скану.

7. Загальний висновок

Дисертаційна робота Мамотенка Сергія Петровича «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії», є завершеним і самостійним науковим дослідженням, яке за актуальністю теми, її новизною та обґрунтованістю наукових результатів, що мають теоретичне та практичне значення, відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. №261 (зі змінами) та вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженому Постановою КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022 р.), а її автор Мамотенко Сергій Петрович **заслуговує присудження** наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри загальної фізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Олег ОЛІХ

