

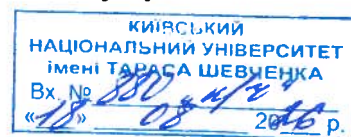
Голові разової спеціалізованої вченої ради
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
доктору фізико-математичних наук,
професору, завідувачу кафедри
математики та теоретичної радіофізики
факультету радіофізики, електроніки та
комп'ютерних систем
Київського національного університету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

ВІДГУК

Офіційного опонента **Мамілова Сергія Олександровича**
на дисертаційну роботу **Мамотенка Сергія Петровича**
**«Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення
даних магнітно-резонансної томографії»,**
що подана до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
10 – Природничі науки за спеціальністю
105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Актуальність теми дослідження.

Актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена особливостями формування та обробки даних магнітно-резонансної томографії. Первинні МРТ-дані формуються у k -просторі, який відповідає спектру просторових частот. Шумові компоненти та артефакти, присутні у МРТ-сигналі, можуть змінювати розподіл енергії у k -просторі та спектрі зображення. У центральній області k -простору містяться низькочастотні компоненти, що переважно визначають загальний контраст, тоді як периферійні області відповідають високим просторовим частотам, пов'язаним із дрібними деталями і контурами структур на зображенні. Зазвичай шум у МРТ має теплове походження, підпорядковується гауссівському розподілу та має білий спектр. За сталої дисперсії шуму співвідношення сигнал/шум є нижчим у високочастотній області k -простору, тому відносний внесок шуму в цій області зростає.



Комплексний МРТ-сигнал подається через амплітудну і фазову складові. Тому робота лише з візуальним поданням, тобто з амплітудним зображенням, не завжди є достатньою для аналізу шуму. Після формування амплітудного зображення статистика шуму ускладнюється через нелінійну операцію обчислення модуля комплексного сигналу. У зв'язку з цим спектральний аналіз МРТ-даних є актуальним напрямом для обробки комплексного сигналу у k -просторі та просторово-частотній області, тобто до переходу до амплітудного подання.

Оскільки спектральна оцінка формується безпосередньо з наявних МРТ-даних без попереднього задання параметричної моделі сигналу, такий підхід належить до непараметричних методів. Отже, розроблення методів непараметричного спектрального аналізу для обробки МРТ-даних є актуальною науково-прикладною задачею медичної фізики та цифрової обробки сигналів.

В дисертаційній роботі Мамотенка С. П. були поставлені наступні **завдання дослідження**:

- виконати аналіз теорії формування та обробки МРТ-сигналу, природи шуму та особливостей його прояву в амплітудних і комплексних зображеннях;
- розглянути непараметричний спектральний аналіз на основі періодограм для зменшення шуму на амплітудних МРТ-зображеннях та порівняти періодограмний підхід з іншими поширеними фільтрами;
- оцінити доцільність використання періодограмного аналізу, зокрема методу Денієлла, за основними кількісними метриками; виявити недоліки та розглянути шляхи їх подолання;
- дослідити гібридний метод реконструкції МРТ-зображень, який поєднує непараметричну спектральну попередню обробку на основі періодограми Денієлла зі згортковим автокодувальником;
- розробити та дослідити метод зменшення шуму МРТ-зображень у k -просторі, що ґрунтується на двовимірному багатовіконному спектральному оцінюванні;
- виконати порівняльний аналіз ефективності запропонованого

багатовіконного підходу порівняно з іншими методами; визначити перспективні напрями подальшого розвитку запропонованого підходу.

Приведені здобувачем завдання є **актуальними**, а їх розв'язання має науково-практичне значення для обробки даних магнітно-резонансної томографії за наявності шумових артефактів.

Науково-обґрунтований вибір об'єкта та предмета досліджень, а також використання запропонованих методів дали змогу здобувачу отримати практичні результати щодо відновлення МРТ-даних та зменшення шумових артефактів у магнітно-резонансних зображеннях. Застосовані методи дослідження та проведений кількісний аналіз забезпечують належний рівень достовірності отриманих результатів. Тому дисертація Мамотенка С. П. повністю відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали галузі знань 10 Природничі науки.

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

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Рукопис викладено на 121 сторінці та включає 36 рисунків, 7 таблиць. Список використаних джерел налічує 101 найменування. Робота повністю відповідає вимогам щодо оформлення дисертацій.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова та практична цінність отриманих результатів.

Перший розділ присвячено огляду теоретичних основ формування та обробки сигналів у магнітно-резонансній томографії. Розглянуто фізичні основи формування МРТ-сигналу, концепцію k-простору та перетворення Фур'є. Досліджено формати медичної візуалізації, природу шуму в МРТ та його статистичні характеристики. Проведено аналіз існуючих методів фільтрації МРТ-зображень, зокрема класичних лінійних фільтрів, алгоритмів глибокого навчання та спектральних методів. Розглянуто особливості кількісного

оцінювання якості відновлених МРТ-зображень.

У *другому розділі* було розглянуто непараметричний спектральний аналіз на основі періодограм для зменшення шуму на амплітудних МРТ-зображеннях. Основну увагу приділено стандартній періодограмі та її модифікації за Денієллом. Було показано, що згладжування періодограми зменшує варіативність спектральної оцінки, однак зі збільшенням параметра K знижується частотна роздільна здатність.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи розроблено та досліджено гібридний метод реконструкції МРТ-зображень, який поєднує непараметричну спектральну попередню обробку на основі періодограми Денієлла зі згортковим автокодувальником. Запропонована схема передбачає використання результату періодограмної фільтрації як додаткового каналу вхідних даних для нейронної мережі, що дозволяє сформувати більш інформативне подання сигналу в умовах обмеженого обсягу навчальної вибірки.

Запропонований гібридний підхід випробувано на T2-зважених МРТ-зображеннях пацієнта з розсіяним склерозом. Встановлено, що зі збільшенням обсягу навчальної вибірки додатковий внесок періодограмної попередньої обробки поступово зменшується. Таким чином, основна наукова та практична цінність розробленого гібридного підходу полягає в можливості його застосування до обмежених медичних вибірок даних, де класичні нейромережеві моделі є недостатньо ефективними, а попередня непараметрична спектральна обробка дозволяє підвищити якість реконструкції патологічних структур на МРТ-зображенні. Саме в цьому режимі запропонований метод демонструє найбільш переконливі результати.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню та дослідженню двовимірного багатовіконного спектрального методу для зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у k -просторі. Ефективність методу продемонстровано на реальному МРТ-зображенні головного мозку зі штучно доданим комплексним гауссівським шумом у k -просторі. Реалізований підхід передбачає формування комплексного зображення з даних амплітуди та фази, перехід до k -простору за допомогою

двовимірного швидкого перетворення Фур'є та подальшу двовимірну багатовіконну фільтрацію, що базується на модифікації фільтра Вінера.

Аналіз показав, що візуальна якість зображень після обробки запропонованим методом є близькою до результатів роботи широкоживаного фільтра NLM – з яким проводилось порівняння. Отримані результати свідчать, що двовимірний багатовіконний спектральний аналіз є ефективною основою для зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у просторово-частотній області. Перспективними напрямками подальшого розвитку запропонованого підходу є його адаптація для роботи з виділеними областями інтересу (ROI) та інтеграція в гібридні схеми реконструкції для підвищення діагностичної цінності медичних зображень.

Висновки містять основні результати роботи.

Дисертація Мамотенка С. П. «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії», є завершеною науковою роботою.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна і практична доцільність розроблених в дисертаційній роботі підходів полягає в наступному:

- Розглянуто і вперше використано непараметричний спектральний аналіз на основі періодограм для зменшення шуму на амплітудних МРТ-зображеннях. Основну увагу приділено стандартній періодограмі та її модифікації за Деніеллом. При обробці повнорозмірного МРТ-зрізу було виявлено додаткові обмеження, пов'язані з неоднорідністю зображення та наявністю чорного фону.
- Розроблено та досліджено гібридний метод реконструкції МРТ-зображень, який поєднує непараметричну спектральну попередню обробку на основі періодограми Денієлла зі згортковим автокодувальником. Встановлено, що зі збільшенням обсягу навчальної вибірки додатковий внесок періодограмної попередньої обробки поступово зменшується. Основна наукова та практична цінність розробленого гібридного підходу полягає в можливості його

застосування до обмежених медичних вибірок даних.

- Вперше запропоновано та досліджено метод зменшення шуму МРТ-зображень у k -просторі, що ґрунтується на двовимірному багатовіконному спектральному оцінюванні. Отримані результати свідчать, що двовимірний багатовіконний спектральний аналіз є ефективною основою для зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у просторово-частотній області. Визначено перспективні напрями подальшого розвитку запропонованого підходу, як його адаптація для роботи областями інтересу ROI та інтеграція в гібридні схеми реконструкції для підвищення діагностичної цінності медичних зображень.

Практична значимість отриманих результатів

Розроблені в дисертаційній роботі алгоритми можуть бути використані для попередньої обробки МРТ-даних як з метою зменшення шумових артефактів, так і для суміжних задач спектрального аналізу. Запропоновані підходи можуть застосовуватися в задачах цифрової реконструкції та аналізу медичних зображень, зокрема в ЯМР-спектроскопії.

Основна практична цінність розробленого гібридного підходу полягає в можливості його застосування до обмежених медичних вибірок даних, де класичні нейромережеві моделі є недостатньо ефективними. Розроблений багатовіконний метод є ефективною основою для зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у просторово-частотній області без переходу до амплітудного подання на етапі спектральної обробки.

Отримані результати свідчать про перспективність подальшого дослідження запропонованого здобувачем напряму. Розроблені підходи можуть у подальшому бути використані в задачах обробки та відновлення медичних зображень.

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

Результати дисертаційної роботи висвітлені у 8 наукових працях, із них: 3

статті у періодичних наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus; 5 тез доповідей у збірниках праць наукових конференцій.

Всі основні результати дисертаційної роботи є **новими** та вчасно опубліковані у наукових виданнях. **Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі літературних джерел, виконанні основного обсягу експериментальних досліджень, обробці та аналізі експериментальних даних та написанні статей і дисертації.

Зроблені автором висновки цілком обґрунтовані та відповідають поставленій меті роботи та її змісту. Результати дисертаційної роботи відповідають змісту статей, що надруковані у фахових журналах

3. Зауваження та побажання.

1. Зображення та позначення до них не приведені до єдиного вигляду. Наприклад, рисунок 1.6 має нумерацію а, б тощо, а рисунок 1.10 - позначення “ліворуч”, “праворуч”. Частина зображень у розділі 3 має англійські позначення.
2. У розділах 2 та 4 використовується персональний набір МРТ-зображень, отриманий особисто здобувачем. Водночас у розділі 3 використовується “відкритий набір МРТ-зображень головного мозку з ознаками розсіяного склерозу”. Більш доцільно було б використовувати один стандартизований набір даних впродовж всього дослідження.
3. Перехід від теорії непараметричного аналізу спектрів сигналів відгуку до питання шумів у МРТ є дещо різким. Бажано доповнити роботу іншими проблемами обробки сигналів у МРТ.
4. У роботі на теоретичному рівні добре описана природа амплітудних і комплексних (фазових) зображень, однак не вистачає ілюстративного порівняння цих зображень. У зв’язку з цим дещо важче зрозуміти ефективність методу, що працює з комплексними зображеннями.
5. На рисунках 1.2, 1.3, 2.1, 2.5, 3.3 підпис опинився на наступній сторінці відносно самого малюнка.

4. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Мамотенка Сергія Петровича «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії» є завершеним і самостійним науковим дослідженням. За актуальністю теми, її новизною та обґрунтованістю наукових результатів, теоретичним і практичним значенням дисертаційна робота відповідає вимогам до наукової кваліфікації ступеня доктора філософії, що встановлені «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року, а Мамотенко Сергій Петрович **заслуговує присудження** наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

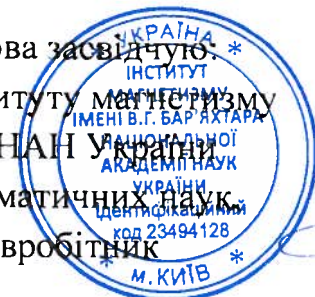
Офіційний опонент:

Завідувач лабораторією біосенсорів в
Інституті магнетизму
імені В.Г. Бар'яхтара НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Сергій МАМІЛОВ

Підпис Сергія Мамілова засвідчую.
Учений секретар Інституту магнетизму
імені В.Г. Бар'яхтара НАН України
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник



Ірина ШАРАЙ

