

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з наукової роботи
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

Оксана ЖИЛІНСЬКА
2026 р.

ВИСНОВОК

**Київського національного університету імені Тараса Шевченка
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Мамотенка Сергія Петровича на тему:
«Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення
даних магнітно-резонансної томографії», поданої на здобуття ступеня
доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю
105 Прикладна фізика та наноматеріали**

Витяг

з протоколу № 7 засідання кафедри математики та теоретичної
радіофізики від «29» травня 2026 року

Присутні: Головуючий на засіданні –
Висоцький В. І.; к. ф.-м. н., доцент Радченко О.
С. В.; к. ф.-м. н., доцент Іваненко Д. О.; к.ф.-м.
н., доцент Максюта М. В.; к. ф.-м. н., доцент
Нетреба А. В.; к. ф.-м. н., доцент. Ястремський
Є. А.; д. ф.-м. н., проф. Оліх О. Я.

Серед присутніх 2 доктори і 9 кандидатів

Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження
інженерії факультету радіофізики, електро... систем
Мамотенка Сергія Петровича на тему «Непараметричний аналіз спектрів
сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії»,
поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі
науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Науковий керівник — кандидат фізико-математичних наук, доцент, декан
факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського
національного університету імені Тараса Шевченка — Нетреба Андрій
В'ячеславович.

Прому
затвердити
Висновок
кафедри
11.05.2026
В. Жилинський

Дисертація виконувалась на кафедрі математики та теоретичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 3 від «16» листопада 2022 року). Уточнену редакцію теми дисертаційного дослідження затверджено на засіданні Вченої ради факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол № 8 від «05» березня 2026 року).

Виступили:

Висоцький В.І. Вітаю, шановні члени кафедри та гості. До Вашої уваги представляється дисертаційна робота аспіранта 4 року навчання денної форми здобуття освіти за контрактом Мамотенка Сергія Петровича. Тема дисертації «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії». Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент – Нетреба Андрій В'ячеславович.

Мамотенко С. П. представлю презентацію за основними положеннями дисертації «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

У дисертаційному дослідженні розглядалося чотири напрямки:

1. Дослідження основ формування МРТ-сигналу, природи шуму в комплексній області.
2. Застосування періодограмного оцінювання спектральної густини потужності для зменшення адитивного гауссівського шуму в МРТ-зображеннях.
3. Розробка гібридного підходу, що поєднує періодограмну попередню обробку із згортковим автокодувальником, як підходу до оптимізації періодограми.
4. Реалізація двовимірного багатовіконного спектрального методу для обробки комплексних МРТ-даних у k -просторі.

Особливістю магнітно-резонансної томографії є те, що первинні МРТ-дані формуються у k -просторі, який відповідає спектру просторових частот. Шумові компоненти та артефакти, присутні у МРТ-сигналі, можуть змінювати розподіл енергії в k -просторі та у спектрі зображення. В центральній області k -простору містяться низькочастотні компоненти, що переважно визначають загальний контраст, тоді як периферійні області відповідають високим просторовим частотам, пов'язаним з дрібними деталями і контурами структур на зображенні. Зазвичай шум у МРТ має теплове походження, підпорядковується гауссівському розподілу та має білий спектр, тобто вносить однакову дисперсію шуму на всіх частотах. За сталої дисперсії шуму відношення сигнал/шум є нижчим у

високочастотній області k -простору, тому відносний внесок шуму в цій області зростає.

Комплексний МРТ-сигнал подається через амплітудну і фазові 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 в 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. Розроблення методів непараметричного спектрального аналізу для обробки МРТ-даних є актуальною науково-прикладною задачею медичної фізики та цифрової обробки сигналів.

Метою дисертаційної роботи є розроблення та дослідження методів непараметричного спектрального аналізу для розв'язання задачі відновлення магнітно-резонансних зображень та зменшення шумових артефактів у цих зображеннях. У роботі ця задача розглядається як обернена задача оцінювання незашумленого МРТ-сигналу за його зашумленим просторовим або просторово-частотним поданням.

Для досягнення поставленої мети було сформовано наступні завдання:

- проаналізувати теоретичні основи формування МРТ-сигналу, природу шуму в комплексній області та особливості його прояву в амплітудних зображеннях та комплексних МРТ-даних;

- дослідити можливість застосування періодограмного оцінювання спектральної густини потужності для зменшення адитивного гауссівського шуму в МРТ-зображеннях;

- оцінити залежність якості реконструкції від розміру вікна згладжування періодограми Деніелла на якість реконструкції за кількісними метриками PSNR, SSIM та фрактальною розмірністю;

- розробити гібридний підхід, що поєднує періодограмну попередню обробку із згортковим автокодувальником, як підходу до оптимізації періодограми;

- визначити доцільність інтеграції спектральних методів з алгоритмами глибокого навчання в умовах обмеженої навчальної вибірки;

- реалізувати двовимірний багатовіконний спектральний метод для обробки комплексних МРТ-даних у k -просторі;

- побудувати оператор спектрального стискання на основі багатовіконної оцінки спектральної густини потужності та оціненого рівня шуму;

- порівняти ефективність запропонованого багатовіконного методу з одновіконною періодограмою та методом нелокальних середніх.

Об'єктом дослідження є процеси формування, реєстрації та цифрової обробки МРТ-сигналів у просторовій та просторово-частотній областях за наявності шумових артефактів.

Предметом дослідження є методи непараметричного спектрального аналізу та алгоритми зменшення шумових артефактів у МРТ-даних, зокрема в амплітудних та комплексних поданнях Т2-зважених зображень.

Методи дослідження базуються на цифровій обробці сигналів і зображень, двовимірному перетворенні Фур'є, періодограмному оцінюванні спектральної густини потужності, згладженій періодограмі Деніелла, багатовіконному спектральному оцінюванні із застосуванням DPSS-вікон, а також на методах фільтрації за аналогією з фільтром Вінера.

Для розробки гібридного підходу використана нейромережа згорткового автокодувальника. Для оцінювання якості реконструкції використано метрики PSNR, SSIM, FSIM та фрактальну розмірність.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробці та застосуванні методів непараметричного спектрального аналізу комплексних МРТ-даних для задачі відновлення зображень і зменшення впливу шумових артефактів цих зображень. Запропоновано нові підходи до обробки МРТ-даних у k -просторі на основі спектрального оцінювання.

Наукові результати:

- досліджено застосування одновіконної періодограми Деніелла для зменшення шумових артефактів у МРТ-зображеннях, визначено обмеження даного підходу;

- запропоновано гібридний підхід для подолання обмежень попереднього методу, у якому результат періодограмної обробки використовується як додатковий вхідний канал згорткового автокодувальника для роботи з обмеженими навчальними вибірками;

- встановлено, що внесок періодограмної попередньої обробки в гібридному підході є найбільш помітним за умов дефіциту навчальних даних і зменшується зі збільшенням обсягу вибірки;

- розроблено двовимірний багатовіконний метод зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у k -просторі;

- запропоновано оператор спектрального стискання, побудований на основі багатовіконної оцінки спектральної густини потужності та оціненого рівня шуму;

- показано, що багатовіконний метод забезпечує стабільнішу спектральну оцінку порівняно з одновіконною періодограмою та є конкурентоспроможним порівняно з методом нелокальних середніх у задачі зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних.

Перейдемо до презентації першого етапу дослідження, де для обробки МРТ-зображень застосовано періодограмне оцінювання спектральної густини потужності. Періодограма використовується для визначення того, як енергія або потужність сигналу розподілена між просторовими частотами. Для МРТ-зображення це відповідає аналізу частотних компонент, які формують плавні області, межі, дрібні деталі та шумові флуктуації.

Зображення переводиться у спектральну область за допомогою двовимірного перетворення Фур'є. Вхідне МРТ-зображення перетворюється у

спектр. Оскільки спектр є комплексним, його можна подати через модуль та фазу. Періодограма обчислюється як квадрат модуля спектра, нормований на розмір зображення.

Періодограма Деніелла додатково згладжує спектральну оцінку шляхом усереднення спектральної потужності в локальній квадратній області навколо конкретної точки спектра. Розмір цієї області визначається параметром K , тобто вікном. Таке вікно є двовимірним, оскільки згладжування виконується у двох напрямках спектральної площини.

У роботі досліджено вплив параметра K на результат обробки. При малому значенні K згладжування є недостатнім, тому в зображенні зберігається помітний вплив шуму. При великому значенні K шум пригнічується сильніше, однак втрачаються високочастотні компоненти сигналу, пов'язані з дрібними деталями та контурами.

Для оцінювання результатів використовувалися метрики PSNR та SSIM. Результати показали, що періодограмне згладжування дає змогу послабити шум, однак ступінь згладжування має бути узгоджений із масштабом анатомічної структури. Разом з тим на результат суттєво впливає великий чорний фон, який не містить анатомічної інформації, але впливає на глобальне спектральне представлення зображення. Тому частина спотворень на повнорозмірному скані може бути зумовлена саме впливом чорного фону на спектральну оцінку.

У зв'язку з цим періодограма Деніелла розглядається як початковий етап дослідження, а не як фінальний метод. Один зі способів подолання її обмежень полягає в інтеграції періодограмного підходу з нейронною мережею автокодувальника.

Тепер *перейдемо до наступного методу*, де періодограмна обробка була використана як попередній етап для згорткового автокодувальника. Автокодувальник складається з кодувальника та декодувальника. Кодувальник за допомогою згорткових шарів і max-pooling зменшує розмірність зображення та виділяє основні ознаки, а декодувальник через upsampling і згорткові шари відновлює зображення до початкового розміру. Автокодувальник було обрано для реконструкції без потреби в ручній розмітці.

Попередня періодограмна обробка використовувалась як один із входів автокодувальника для оцінювання стійкості методу за умов зменшення обсягу навчальної вибірки. Було сформовано три сценарії навчання: надмала вибірка — 10 зображень, обмежена вибірка — 20 зображень, базова вибірка для порівняння — 50 зображень. Ідея полягала в тому, щоб надати автокодувальнику не лише вихідне зображення з шумом, а й спектрально згладжене подання. У такій схемі періодограма виконує допоміжну роль і використовується як спосіб попередньої стабілізації вхідних даних.

Для вибірки з 10 зображень гібридний метод забезпечив краще збереження структури малих патологічних осередків. При збільшенні кількості навчальних зображень різниця між гібридним методом і окремим автокодувальником зменшується. Для вибірки з 50 зображень значення SSIM для обох методів становить 0.92, тобто за більшого обсягу навчальних даних окремий автокодувальник уже значно краще виконує задачу реконструкції.

Отже, реальна область застосування гібридного методу пов'язана насамперед із реконструкцією обмежених медичних вибірок, де класичний автокодувальник ще не здатен самостійно ефективно усувати шумові артефакти. У цьому режимі інтеграція непараметричного спектрального модуля з автокодувальником дає найбільш помітний ефект.

Тепер перейдемо до останнього розділу, присвяченого багатовіконному методу обробки комплексних МРТ-даних у k-просторі. k-простір розглядається як просторово-частотне подання МР-сигналу, з якого кінцеве зображення формується за допомогою перетворення Фур'є. Кожна точка k-простору є комплексним числом, що містить амплітуду, фазу та внесок певної просторової частоти в майбутнє зображення.

Для формування комплексного подання використовуються амплітудна та фазова складові. Після цього виконується перехід у k-простір, де шум додається як адитивний комплексний гауссівський процес.

Основним недоліком одновіконної періодограми є спектральний витік, пов'язаний із використанням скінченного прямокутного вікна. В багатовіконному методі формується кілька спектральних оцінок із використанням ортогональних DPSS-вікон. Потім ці оцінки усереднюються, що дозволяє отримати стабільнішу оцінку спектральної густини потужності. Після цього будується оператор спектрального стискання за логікою, подібною до фільтра Вінера. Для кожної точки k-простору визначається ваговий коефіцієнт, який задає, які компоненти потрібно зберігати, а які пригнічувати. Реконструкція виконується оберненим двовимірним перетворенням Фур'є. Для багатовіконного методу важливими параметрами є часо-смуговий добуток і кількість вікон. DPSS-вікна мають високу концентрацію спектральної енергії в заданій частотній смузі, а їх ортогональність означає, що різні вікна не дублюють одне одного.

Результати показали, що багатовіконний метод суттєво перевершує одновіконну періодограму за PSNR: різниця становить приблизно 4.25 дБ, при майже однаковому значенні FSIM. Порівняно з NLM багатовіконний метод має вище значення PSNR, однак NLM має вище значення FSIM.

Візуальний аналіз показав, що для одновіконної періодограми зберігається помітна залишкова зернистість. У випадку багатовіконного методу фонові область є більш однорідною, а контури збережені без виражених ознак надмірного згладжування. Отже, багатовіконний метод він суттєво перевершує одновіконну періодограму та залишається конкурентоспроможним порівняно з NLM.

Тепер перейдемо до загальних висновків дисертаційного дослідження:

Проведено аналіз методів обробки та відновлення даних у магнітно-резонансній томографії. Обґрунтовано використання спектрального аналізу для відновлення МРТ-даних з урахуванням їх комплексного подання та особливостей шуму в k-просторі.

Розв'язано задачу зменшення шумових артефактів у магнітно-резонансних даних на основі методів непараметричного спектрального аналізу. Досліджено періодограмний підхід, його поєднання з алгоритмом глибокого навчання, а

також розроблено багатовіконний спектральний метод для обробки комплексних МРТ-даних в k -просторі.

Продемонстровано, що періодограмний підхід оцінки спектральної густини потужності дає змогу виконувати спектральну обробку МРТ-зображень без задання параметричної моделі сигналу. Виявлено ряд обмежень методу пов'язані з впливом розміру вікна згладжування, масштабу анатомічних структур і впливом фону МРТ-зображення.

Як один зі шляхів подолання обмежень періодограмного підходу запропоновано гібридний метод, який поєднує попередню періодограмну обробку із згортковим автокодувальником. Встановлено, що зі збільшенням обсягу навчальних даних додатковий внесок періодограмного входу поступово зменшується.

Розроблено метод зменшення шумових артефактів в k -просторі на основі двовимірного багатовіконного спектрального оцінювання та Вінер-подібного оператора спектрального стискання. Такий підхід дозволив зменшити дисперсію спектральної оцінки та послабити спектральний витік, характерні для класичних одновіконних методів.

Отже, результати дисертаційної роботи підтверджують, що непараметричний спектральний аналіз є перспективною основою для методів магнітно-резонансної томографії за наявності артефактів. Найбільш перспективним напрямом у межах виконаного дослідження виявився багатовіконний спектральний аналіз комплексних МРТ-даних у k -просторі.

Дякую за увагу!

Після закінчення презентації Мамотенка С.П. присутніми на захисті фахівцями були поставлені наступні запитання:

Доктор фізико-математичних наук, професор Висоцький В. І.: Ви багаторазово використовуєте термін “ k -простір”. Яка його природа? Конкретизуйте його саме в контексті формування сигналу в МРТ.

Мамотенко С.П.: Дякую за запитання. Спробую пояснити який був сенс роботи з k -простором і його природу. У МРТ сигнал формується ядрами водню, які мають спин. У зовнішньому магнітному полі ці спіни прецесують із ларморовою частотою, а після радіочастотного збудження їхня прецесія реєструється як МРТ-сигнал. Для просторового кодування використовують градієнти магнітного поля: вони змінюють поле залежно від координати, тому сигнали з різних ділянок простору набувають різної частоти або фази. В роботі комплексні МРТ-дані формуються з амплітудної та фазової складових. У кожній точці такого зображення задано не лише інтенсивність, а комплексне число, що містить амплітуду і фазу. Далі за допомогою перетворення Фур'є виконується перехід у k -простір, тобто до просторово-частотного подання сигналу. Кожна точка k -простору є комплексним коефіцієнтом, який визначає внесок відповідної просторової частоти у формування зображення.

Доктор фізико-математичних наук, професор Висоцький В. І.: В роботі ви демонструєте різні набори даних, що мають різні характеристики, зокрема

відрізняються масштабом, структурними особливостями тощо. Якою була логіка вибору цих наборів даних та їхніх характеристик?

Мамотенко С.П.: Дякую за запитання. Вибір наборів даних здійснювався з урахуванням завдань і обмежень кожного з методів. В дисертаційній роботі використовувалися два набори МРТ-даних. Перший набір був отриманий мною під час власного МРТ-дослідження головного мозку. Другий набір було взято з відкритого джерела на платформі Kaggle, де персональні дані пацієнтів вилучені; він використовувався для навчання нейронної мережі, оскільки для цього етапу був потрібний більший обсяг навчальних даних. Окремо хотів би зупинитися на власному наборі даних, на якому було випробувано періодограмний і багатовіконний методи. Для дослідження періодограми було обрано фрагменти кори головного мозку з огляду на наявність звивин, борозен і меж між тканинами, тобто структур, чутливих до надмірного згладжування. Для аналізу впливу просторового масштабу та параметра вікна K було сформовано три типи тестових зображень з різним збільшенням.

Також було показано вплив чорного фону на повнорозмірне МРТ-зображення, щоб окреслити обмеження одновіконної періодограми. Надалі для подолання цих обмежень було застосовано багатовіконний аналіз; в останньому розділі використовувалося повнорозмірне комплексне зображення, а обробка виконувалася в k -просторі.

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Радченко О. М.: Покажіть слайд у презентації, де було додано шум. Яким чином ви обирали рівень шуму? Також ви казали про так званий райсівський шум – що це за шум? Яка взагалі природа шуму в МРТ-зображеннях і чому ви зосередилися на дослідженні саме гауссівського шуму?

Мамотенко С.П.: Дякую за запитання. На перших етапах роботи я використовував спрощену модель: до вже сформованих амплітудних МРТ-зображень штучно додавався адитивний гауссівський шум. До кожного пікселя амплітудного зображення додавалося випадкове значення з нормального розподілу з нульовим середнім і заданим стандартним відхиленням σ . Це не розглядалося як повна фізична модель шуму в амплітудному МРТ-зображенні, а використовувалося для первинної перевірки періодограмного та гібридного методів за відомого рівня шумового спотворення. Фізично шум у МРТ виникає переважно в комплексному сигналі – у дійсній та уявній складових, а також у k -просторі. У цій області його зазвичай моделюють як адитивний комплексний гауссівський шум. Однак після переходу до амплітудного зображення, тобто після обчислення модуля комплексного сигналу, статистика змінюється і стає райсівською. Саме тому в останньому розділі робота була перенесена до комплексних МРТ-даних у k -просторі, де додавання комплексного гауссівського шуму є більш фізично обґрунтованим. Тобто гауссівський шум у перших розділах був тестовою моделлю, а в останньому розділі – моделлю шуму в комплексному представленні даних.

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Ястремський І. О.: Зазвичай в роботах такого типу, де йдеться про відновлення зображень, для зменшення шуму використовується статистичний аналіз. В чому особливість вашого методу? В яких випадках його практичне застосування є виправданим і більш доцільним за інші методи?

Мамотенко С.П.: Методи на основі спектрального аналізу можуть застосовуватися для обробки зображень без задання параметричної моделі сигналу. Також продемонстровано сценарії застосування до надмалих вибірок даних і зображень, де шумова складова особливо ускладнює діагностування і візуальну інтерпретацію. Тобто згладження спектра працює в цих сценаріях як уніфікований підхід до попередньої обробки зображення, використовуючи ідею, що згладження спектра хоч і може призводити до втрати структури зображення, але також зменшує вплив шуму. У прийнятій моделі білий гауссівський шум не зосереджений в окремій частотній області. Тому в роботі і розглядалась задача знаходження балансу між збереженням структур зображення і пригніченням шуму.

Наявність настільки сильного шумового спотворення, як було використано на деяких зображеннях у презентації, дійсно не є типовим випадком. Однак у медичній візуалізації, зокрема при дослідженні гліобластоми, не завжди можна збільшувати тривалість сканування або кількість повторів, оскільки це підвищує ризик рухових артефактів і навантаження на пацієнта. Таким чином, отримане зображення може мати велику кількість шуму, що потенційно обумовлює використання методів, розглянутих у роботі.

Доктор фізико-математичних наук, професор Оліх О. Я.: Ви зазначали, що при використанні періодограми працюєте тільки з обмеженою областю зображення, тобто застосовуєте певне вікно. Що відбувається з сигналом або зображенням, поза цим вікном?

Мамотенко С.П.: Дійсно, в роботі параметр K задає розмір локального вікна згладжування в спектральній області, тобто в області періодограми. Для кожної точки спектра обчислюється середнє значення спектральної потужності в околі розміру K . Частоти, які не входять до цього локального вікна, не враховуються при обчисленні згладженого значення саме для цієї точки спектра. При переході до наступної точки спектра вікно зміщується, і згладжування виконується вже для іншої локальної околиці. Таким чином, обробляється весь спектр зображення, а не лише одна обмежена ділянка. Після згладжування спектральної оцінки виконується реконструкція зображення. Тому поза поточним вікном згладжування сигнал не бере участі в локальному усередненні для конкретної частотної точки.

Доктор фізико-математичних наук, професор Оліх О. Я.: Також маю запитання щодо метрик, з якими ви працювали в роботі. Ви використовуєте певні кількісні метрики, які оцінюють рівень шуму, а також користуєтеся візуальним аналізом. Чи можете ви навести критерії оцінювання якості збереження структур

зображення, які могли б бути використані, зокрема, в медичній практиці? Візуальна оцінка не завжди є об'єктивним показником у такому питанні.

Мамотенко С.П.: В роботі я використовував не лише метрики, пов'язані з оцінкою рівня шуму, як PSNR, а й структурні метрики – SSIM та FSIM, вони оцінюють саме структурну подібність отриманого зображення до еталонного. SSIM оцінює локальну подібність яскравості, контрасту та структури, тобто дає уявлення про те, чи зберігається загальна просторово-структурна організація зображення. FSIM додатково орієнтований на фазову узгодженість і градієнтні переходи. Також в роботі я використовував фрактальну розмірність (FD), як додатковий показник складності його геометричної структури.

Тому я погоджуюся, що візуальна оцінка не може бути єдиним критерієм. У роботі вона використовувалась лише як доповнення до кількісних метрик. Для практичного медичного застосування найбільш обґрунтованим є поєднання метрик похибки, структурних метрик та експертної оцінки лікаря.

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Оберемок Є.А.: У розділі про інтеграцію методу з нейронною мережею ви використовуєте автокодувальник, однак важко зрозуміти його структуру, особливості налаштування, а головне – його внесок у метод.

Мамотенко С.П.: Я погоджуюсь з Вами щодо зауваження про структуру нейронною мережі та опис її внеску. Саме автокодувальник було обрано через його здатність формувати компактне латентне представлення вхідного зображення, у якому шум може пригнічуватись, а суттєві структурні ознаки зберігатися. Це робить його дуже поширеним саме в задачах обробки зображень. Також важливою особливістю моделі є її здатність тренуватися на малих обсягах даних, що є характерним для мого сценарію. Щодо самої структури – то вона являє собою типовий encoder–decoder. Енкодер використовує згорткові шари з ядрами розміру 3 x 3, після яких застосовується функція активації ReLU. Для зменшення просторової розмірності та для виділення інформативних ознак після згорткових шарів використовуються шари Max-Pooling із вікном 2 x 2. Така структура дозволяє поступово переходити від вихідного двоканального зображення до компактнішого латентного представлення. Декодувальник виконує зворотне перетворення. Для цього застосовуються шари UpSampling, після яких ідуть згорткові шари, що уточнюють відновлену структуру карт ознак. Фінальний шар формує одноканальне вихідне зображення з інтенсивностями, нормованими в діапазоні [0, 1]. Він працює з комбінованим двоканальним поданням – зашумнений сигнал + попередньо оброблений періодограмою сигнал.

Внесок нейронної мережі у гібридний метод було продемонстровано як порівняння отриманих після обробки зображень для різних розмірів вибірок. Також було підкреслено, що зі збільшенням розміру вибірки вплив гібридного методу стає менш помітним порівняно з окремим автокодувальником.

Після відповідей на запитання виступили:

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент Нетребя А.В.

Нетребя А.В.:

Аспірант Мамотенко Сергій повністю виконав наукову та практичну складові освітньо-наукової програми за період навчання та підготував дисертаційну роботу, що відповідає встановленим вимогам. Аспірант продемонстрував самостійність, наполегливість і відповідальність у питаннях, що стосуються предмета дисертаційного дослідження.

Мамотенко С.П. самостійно провів аналіз сучасних методів, виконав розроблення запропонованих підходів та здійснив їх апробацію. Варто також зазначити, що основні розроблені методи та результати дослідження були представлені аспірантом на фахових наукових конференціях, де він самостійно виступав із доповідями. За темою дисертації аспірант опублікував три статті у фахових наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus, зокрема дві статті – у зарубіжних виданнях. Також з метою апробації результатів дослідження було опубліковано п'ять тез доповідей у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій.

Отримані аспірантом результати мають значення не лише в контексті магнітно-резонансної томографії як методи зменшення шумових артефактів, а й для обробки сигналів відгуку в ЯМР-спектроскопії та суміжних задачах спектрального аналізу. Вважаю, що дисертаційна робота має наукову новизну, а отримані результати свідчать про перспективність подальшого дослідження запропонованого аспірантом напрямку. Розроблені підходи можуть у подальшому бути використані в задачах обробки та відновлення медичних зображень. Дисертаційна робота виконана на належному науковому рівні.

Вважаю, що наявні всі підстави рекомендувати її до захисту на здобуття ступеня доктора філософії.

Рецензенти дисертаційної роботи, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання та зауваження:

Кандидат фізико-математичних наук, доцент Оберемок Є.А.: Я був рецензентом дисертаційної роботи здобувача і встиг докладно з нею ознайомитися. Мене дещо здивував різкий перехід від теорії непараметричного аналізу спектрів сигналів відгуку одразу до питання шумів у МРТ. Однак в подальшому роботі наявна аргументація вибору саме такого підходу, тому враження від подальшого матеріалу це не зіпсувало. Я можу підкреслити якість і структурованість матеріалу, кожен розділ є логічно і чітко пов'язаним із попереднім. Під кінець складається цілісна картина, завдяки, власне, глибині розкриття теми дослідження. Результати опубліковані у відповідних наукових статтях та обговорені на конференціях, тобто матеріал апробований. По суті дисертація якісна. Рекомендую її до захисту.

Доктор фізико-математичних наук, професор Оліх О. Я.:

Заслугує позитивної оцінки те, наскільки широко розкрита тема дисертаційного дослідження. Аспірант не концентрується на якомусь одному методі. Тут наявна і інтеграція з нейронними мережами і розширення дослідження використанням комплексних даних. Кожен наступний результат і метод порівнюється з популярними існуючими методами, а також з попередніми результатами, що дозволяє прослідкувати прогрес у роботі.

Хотілося б звернути увагу на те, як в роботі подані метрики та перевірена статистична значущість. Було б бажано використовувати в кожному розділі однакові метрики, щоб було легше порівнювати результати. Також використання парного t-тесту для статистичної верифікації не завжди є доцільним у цьому контексті, оскільки кількість зображень у вибірках є обмеженою, а розподіл значень метрик якості не обов'язково відповідає нормальному закону.

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь:

Доктор фізико-математичних наук, професор Висоцький В. І.: Дисертацію треба захищати, робота виконана на належному рівні. На початку презентації озвучуйте, будь ласка, наявні публікації та намагайтеся одразу пояснювати такі терміни, як k-простір і комплексні дані. Враховуйте всі зауваження щодо презентації і доповіді, які вам були озвучені. Дякую.

Доктор фізико-математичних наук, професор Оліх О. Я.: Тема є актуальною, аспірант підійшов до проблеми з різних сторін і розробив, на мій погляд, цікаві й нестандартні рішення. Поставлена задача розв'язана, дисертаційна робота відповідає всім вимогам і, на мою думку, може бути рекомендована до захисту. Можу порадити доопрацювати презентацію: докладно описати метрики для кожного методу та пояснити їхнє значення.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Мамотенка Сергія Петровича на тему: «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю

105 Прикладна фізика та наноматеріали

1. Обґрунтування вибору теми дослідження. Особливістю магнітно-резонансної томографії є те, що первинні МРТ-дані формуються у k-просторі, який відповідає спектру просторових частот. Шумові компоненти та артефакти, присутні у МРТ-сигналі, можуть змінювати розподіл енергії в k-просторі та у спектрі зображення. В центральній області k-простору містяться низькочастотні компоненти, що переважно визначають загальний контраст, тоді як периферійні області відповідають високим просторовим частотам, пов'язаним з дрібними деталями і контурами структур на зображенні. Зазвичай шум у МРТ має теплове походження, підпорядковується гауссівському розподілу та має білий спектр, тобто вносить однакову дисперсію шуму на всіх частотах. За сталої дисперсії

шуму відношення сигнал/шум є нижчим у високочастотній області k -простору, тому відносний внесок шуму в цій області зростає.

Комплексний МРТ-сигнал подається через амплітудну і фазові 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 в 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. Розроблення методів непараметричного спектрального аналізу для обробки МРТ-даних є актуальною науково-прикладною задачею медичної фізики та цифрової обробки сигналів.

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

Дисертаційна робота виконана в рамках тем наукових досліджень факультету радіофізики електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка: «Дифузійні та електродинамічні явища у багатокомпонентних неоднорідних системах для медико-біологічних інформаційних технологій» НДР № 22 БФ 052-01, № ДР 0122U002024 (науковий керівник Нетребя А.В.) та «Методи формування та використання когерентних та кореляційних процесів в атомно-ядерних, астрофізичних та біомолекулярних клітинних системах» НДР № 22 БФ 052-03, № ДР 0122U001974 (науковий керівник Висоцький В.І.).

3. Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розроблення та дослідження методів непараметричного спектрального аналізу для розв'язання задачі відновлення магнітно-резонансних зображень та зменшення шумових артефактів у цих зображеннях. У роботі ця задача розглядається як обернена задача оцінювання незашумленого МРТ-сигналу за його зашумленим просторовим або просторово-частотним поданням.

Для досягнення поставленої мети було сформовано наступні завдання:

- проаналізувати теоретичні основи формування МРТ-сигналу, природу шуму в комплексній області та особливості його прояву в амплітудних зображеннях та комплексних МРТ-даних;
- дослідити можливість застосування періодограмного оцінювання спектральної густини потужності для зменшення адитивного гауссівського шуму в МРТ-зображеннях;
- оцінити залежність якості реконструкції від розміру вікна згладжування періодограми Деніелла на якість реконструкції за кількісними метриками PSNR, SSIM та фрактальною розмірністю;
- розробити гібридний підхід, що поєднує періодограмну попередню обробку із згортковим автокодувальником, як підходу до оптимізації періодограми;
- визначити доцільність інтеграції спектральних методів з алгоритмами глибокого навчання в умовах обмеженої навчальної вибірки;

- реалізувати двовимірний багатовіконний спектральний метод для обробки комплексних МРТ-даних у k -просторі;
- побудувати оператор спектрального стискання на основі багатовіконної оцінки спектральної густини потужності та оціненого рівня шуму;
- порівняти ефективність запропонованого багатовіконного методу з одновіконною періодограмою та методом нелокальних середніх

4. Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процеси формування, реєстрації та цифрової обробки МРТ-сигналів у просторовій та просторово-частотній областях за наявності шумових артефактів.

5. Предмет дослідження. Предметом дослідження є методи непараметричного спектрального аналізу та алгоритми зменшення шумових артефактів у МРТ-даних, зокрема в амплітудних та комплексних поданнях Т2-зважених зображень.

6. Методи дослідження. Методи дослідження базуються на цифровій обробці сигналів і зображень, двовимірному перетворенні Фур'є, періодограмному оцінюванні спектральної густини потужності, згладжених періодограмі Денієлла, багатовіконному спектральному оцінюванні із застосуванням DPSS-вікон, а також на методах фільтрації за аналогією з фільтром Вінера.

Для розробки гібридного підходу використана нейромережа згорткового автокодувальника. Для оцінювання якості реконструкції використано метрики PSNR, SSIM, FSIM та фрактальну розмірність.

7. Наукова новизна дослідження: Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробці та застосуванні методів непараметричного спектрального аналізу комплексних МРТ-даних для задачі відновлення зображень і зменшення впливу шумових артефактів цих зображень. Запропоновано нові підходи до обробки МРТ-даних у k -просторі на основі спектрального оцінювання.

В дисертації отримано такі наукові результати:

- досліджено застосування одновіконної періодограми Денієлла для зменшення шумових артефактів у МРТ-зображеннях, визначено обмеження даного підходу;

- запропоновано гібридний підхід для подолання обмежень попереднього методу, у якому результат періодограмної обробки використовується як додатковий вхідний канал згорткового автокодувальника для роботи з обмеженими навчальними вибірками;

- встановлено, що внесок періодограмної попередньої обробки в гібридному підході є найбільш помітним за умов дефіциту навчальних даних і зменшується зі збільшенням обсягу вибірки;

- розроблено двовимірний багатовіконний метод зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних у k -просторі;

- запропоновано оператор спектрального стискання, побудований на основі багатовіконної оцінки спектральної густини потужності та оціненого рівня шуму;

- показано, що багатовіконний метод забезпечує стабільнішу спектральну оцінку порівняно з одновіконною періодограмою та є конкурентоспроможним

порівняно з методом нелокальних середніх у задачі зменшення шумових артефактів у комплексних МРТ-даних

8. Практичне значення. Практичне значення результатів роботи полягає у можливості використання розроблених алгоритмів для попередньої обробки МРТ-даних з метою зменшення шумових артефактів. Запропоновані підходи можуть бути використані в задачах цифрової реконструкції та аналізу медичних зображень, зокрема для підвищення якості даних перед подальшою сегментацією, обробкою або візуальною інтерпретацією.

Розроблений гібридний підхід орієнтований на застосування в умовах обмеженої доступності навчальних даних, зокрема при аналізі невеликих серій МРТ-зображень або даних, отриманих за спеціалізованими протоколами сканування. Багатовіконний метод є придатним для обробки комплексних МРТ-даних у k -просторі, де шум у прийнятій моделі має адитивний комплексний характер. У ширшому контексті запропоновані методи можуть бути адаптовані до задач обробки сигналів ядерного магнітного резонансу, де розв'язується обернена задача відновлення сигналу за наявності шумових артефактів

9. Апробація результатів дослідження. Результати дисертаційної роботи були представлені на наукових конференціях:

1. Reconstruction of magnetic resonance images using multiple periodogram methods / Mamotenko S. P. and Netreba A. V. // Conference Proceedings Book of XX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics, 2024, Kyiv, Ukraine

2. Reconstruction for MRI by Autoencoder and Periodogram Method / Mamotenko S. P. and Netreba A. V. // International research and practice conference: Nanotechnology and Nanomaterials 21-24 of August 2024 Uzhhorod, Ukraine

3. Multitaper k -Space Denoising of Magnetic Resonance Images / Mamotenko S. P. and Netreba A. V. // Conference Proceedings Book of XXI International Scientific Conference Electronics and Applied Physics, 2025, Kyiv, Ukraine

4. Magnetic Resonance Image Denoising Using Frequency-Domain Windowing / Mamotenko S. P. and Netreba A. V. // Conference Proceedings Book of XXV International Young Scientists Conference on Applied Physics, 2025, Kyiv, Ukraine

5. Wiener-Based Spectral Shrinkage for k -Space Denoising of Magnetic Resonance Images / Mamotenko S. P. and Netreba A. V. // Conference Proceedings Book of XXVI International Young Scientists Conference on Applied Physics, 2026, Kyiv, Ukraine

10. Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано 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.

1. Мамотенко, С. П., Нетреба, А. В., Обробка даних для магнітно-резонансної томографії методом періодограм. Вісті вищих учбових закладів. Радіoeлектроніка. (2025) doi.org/10.20535/S002134702412001X

2. Mamotenko, S.P. and Netreba, A.V., Reconstruction for MRI by autoencoder and periodogram method, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 769(15-18), 1547–1557 (2025). doi: 10.1080/15421406.2025.2540101

3. S. P. Mamotenko and A. V. Netreba, Multitaper Spatial Frequency Domain Signal Noise Reduction in Magnetic Resonance Imaging, J. Nano-Electron. Phys. 18(1), 01008 (2026). doi: 10.21272/jnep.18(1).01008

11. Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 121 сторінку. Робота містить 36 рисунків, 7 таблиць. Список використаних джерел налічує 101 найменування.

12. Характеристика особистості здобувача. Здобувач Мамотенко Сергій Петрович продемонстрував високий рівень академічної підготовки, цілеспрямованість та здатність до самостійної науково-дослідної діяльності. У процесі роботи над дисертацією він проявив послідовність, відповідальність і наполегливість у досягненні поставлених цілей.

Здобувач на високому рівні опанував методи спектрального аналізу та обробки медичних зображень, продемонстрував здатність до вирішення задач, поставлених науковим керівником, а також до самостійного пошуку напрямів подальшого дослідження. У спілкуванні з колегами Мамотенко С. П. ввічливий і доброзичливий, охоче ділиться досвідом та допомагає іншим. За час навчання в аспірантурі він зарекомендував себе як відповідальний і цілеспрямований дослідник, здатний до подальшої наукової роботи та викладацької діяльності у закладах вищої освіти.

13. Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертація виконана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

14. Рецензенти рекомендують: відповідно до пп. 15, 16 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, *пропонується такий склад разової ради:*

Голова ради:

Висоцький Володимир Іванович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри математики та теоретичної радіофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Рецензенти:

Оліх Олег Ярославович, доктор фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Оберемок Євген Анатолійович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Офіційні опоненти:

Мамілов Сергій Олександрович, кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, завідувач лабораторією біосенсорів в Інституті магнетизму НАН України та МОН України;

Максимюк Олександр Петрович, кандидат біологічних наук, старший дослідник, заступник директора з науково-технічної роботи Інституту фізіології ім.О.О.Богомольця.

Усі члени разової спеціалізованої вченої ради не мають реальний чи потенційний конфлікт інтересів щодо здобувача Мамотенка Сергія Петровича (зокрема, є його близькою особою) та/або його наукового керівника.

У результаті попередньої експертизи дисертації **Мамотенка Сергія Петровича** і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Мамотенка Сергія Петровича на тему: «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії».

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Мамотенка С.П. відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 **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.

3. Рекомендувати дисертацію Мамотенка С.П. на тему: «Непараметричний аналіз спектрів сигналів відгуку для відновлення даних магнітно-резонансної томографії» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

4. Рекомендувати вченій раді географічного факультету затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Висоцький Володимир Іванович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри математики та теоретичної радіофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Рецензенти:

Оліх Олег Ярославович, доктор фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри загальної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Оберемок Євген Анатолійович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри квантової радіофізики та наноелектроніки Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Офіційні опоненти:

Мамілов Сергій Олександрович, кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, завідувач лабораторією біосенсорів в Інституті магнетизму НАН України та МОН України;

Максимюк Олександр Петрович, кандидат біологічних наук, старший дослідник, заступник директора з науково-технічної роботи Інституту фізіології ім.О.О.Богомольця.

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Мамотенка Сергія Петровича:

«За» – 11

«Проти» – немає

«Утримались» – немає

Презентація Мамотенка Сергія Петровича на 18 стор. додається.

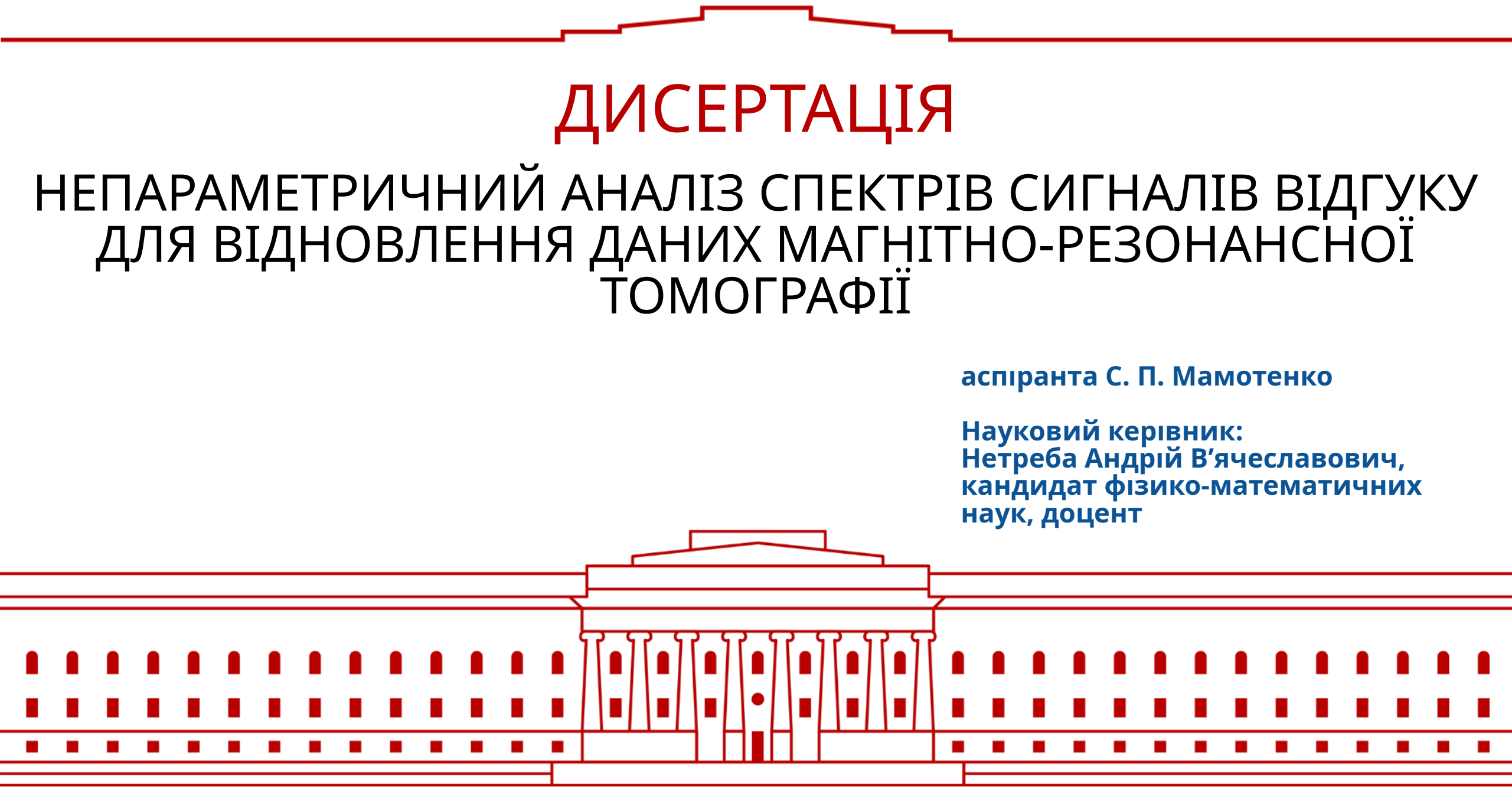
Заступник декана факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем – кандидат фізико-математичних наук, доцент **Олег НЕДИБАЛЮК**

Головуючий на засіданні – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри математики та теоретичної радіофізики

Володимир ВИСОЦЬКИЙ

Секретар засідання

Олександр МАСЮТКА



ДИСЕРТАЦІЯ

НЕПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ СПЕКТРІВ СИГНАЛІВ ВІДГУКУ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ

аспіранта С. П. Мамотенко

Науковий керівник:
Нетреба Андрій В'ячеславович,
кандидат фізико-математичних
наук, доцент

Вступ

Актуальність теми

Первинні МРТ-дані формуються у k -просторі. Шумові артефакти можуть змінювати розподіл енергії в k -просторі та у спектрі зображення. Розроблення методів непараметричного спектрального аналізу для обробки МРТ-даних є актуальним напрямом для обробки комплексного сигналу в k -просторі, тобто до переходу до амплітудного подання.

Мета

Метою дисертаційної роботи є розроблення та дослідження методів непараметричного спектрального аналізу для відновлення магнітно-резонансних зображень та зменшення шумових артефактів в цих зображеннях.

Завдання

- Дослідити основи формування МРТ-сигналу, природу шуму в комплексній області;
- застосувати періодограмне оцінювання спектральної густини потужності для зменшення адитивного Гауссівського шуму в МРТ-зображеннях;
- розробити гібридний підхід, що поєднує періодограмну попередню обробку із згортковим автокодувальником, як підходу до оптимізації періодограми;
- реалізувати двовимірний багатовіконний спектральний метод для обробки комплексних МРТ-даних у k -просторі;
- порівняти ефективність запропонованого багатовіконного методу з попередніми методами.

Формування МРТ-сигналу, k-простір

- зареєстровані МРТ-системою сигнали, подаються як сума елементарних гармонічних коливань – синусоїд;
- комплексна амплітуда є фазором (phasor), модуль якого дорівнює амплітуді A , а аргумент ϕ . Фазор масштабує синусоїду та зсуває її фазу;
- перехід з часової області у простір просторових частот виконує перетворення Фур'є, що формує k-простір. Так визначаються які саме фазори формують сигнал;
- зворотне перетворення Фур'є k-простору формуючи амплітудне зображення.

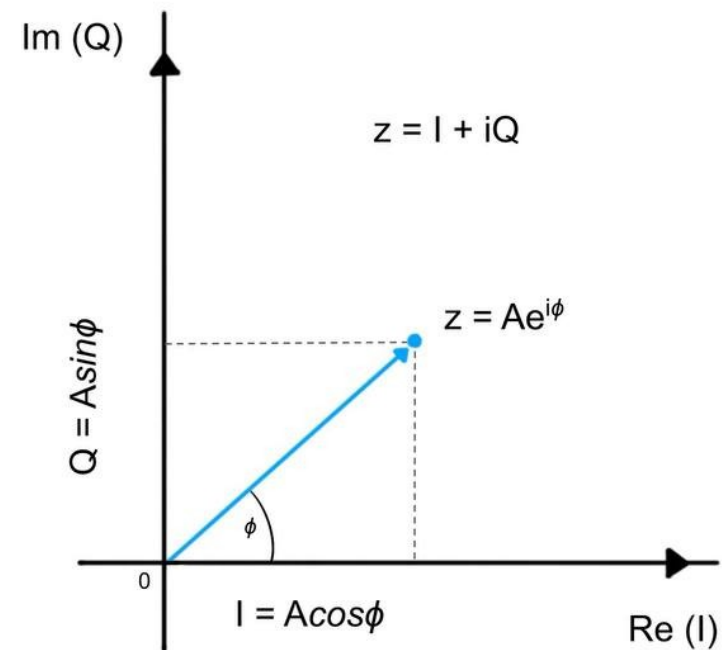


Рис. 1. Векторне представлення фазора на комплексній площині

Комплексний сигнал і природа шуму

Амплітудне та фазове зображення об'єднуються у комплексне зображення:

$$s(x, y) = A(x, y)e^{j\phi(x, y)}$$

- модуль визначає амплітуду сигналу;
- фаза зберігає комплексну структуру сигналу;
- перетворення Фур'є переводить зображення в k-простір.

Нелінійна операція обчислення модуля комплексного сигналу змінює статистику шуму з Гауссівської на райсівську.

$$M = |Y| = \sqrt{(S_R + n_R)^2 + (S_I + n_I)^2}$$

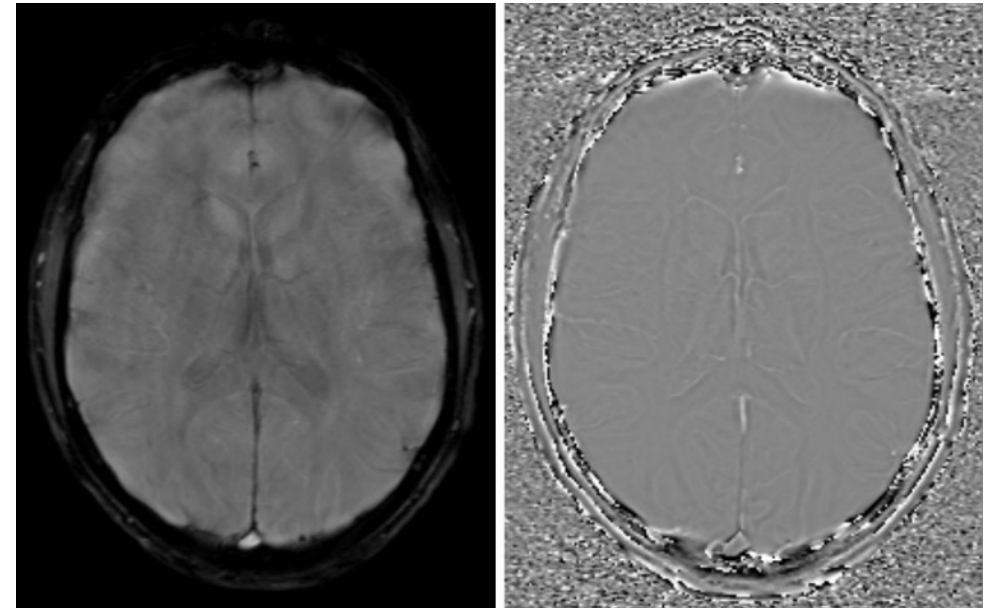


Рис. 2. Амплітудне зображення ліворуч, фазове праворуч.

Стандарт DICOM

В дисертаційній роботі використовувалися два набори DICOM-даних:

- перший набір з публічної бібліотеки Kaggle;
- другий набір був отриманий за участю здобувача дисертації (рисунок 3).

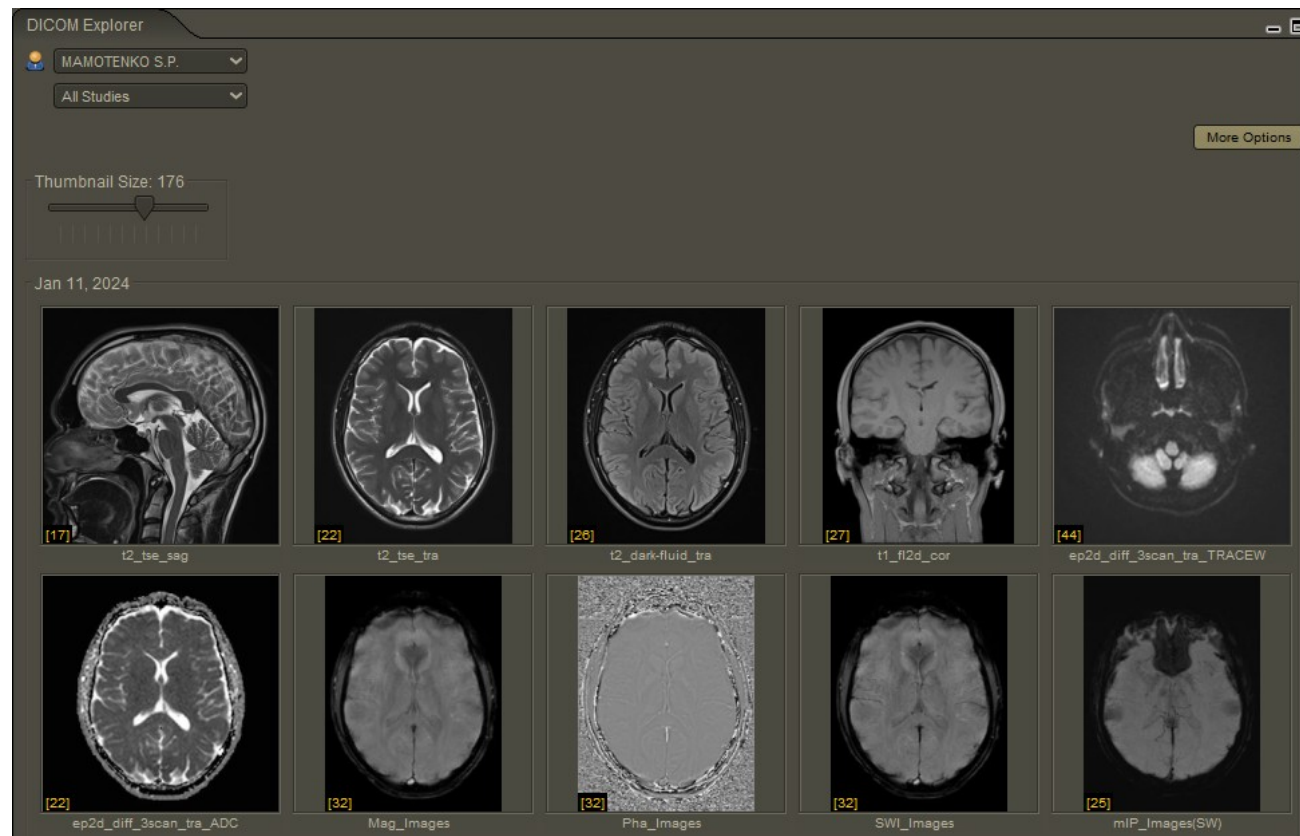


Рис. 3. Оглядове вікно з другим набором даних DICOM.

НЕПАРАМЕТРИЧНІ МЕТОДИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ НА ОСНОВІ ПЕРІОДОГРАМ

- Періодограма – оцінка спектральної щільності потужності сигналу;
- в даному розділі розглядається саме спектральне оцінювання для двовимірного амплітудного зображення, а не k-простору;
- стандартна періодограма має недоліки у вигляді spectral leakage і bias;
- метод Деніелла реалізує локальне усереднення значень періодограми безпосередньо в частотній області.

$$P(u, v) = \frac{1}{MN} \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \rho(m, n) e^{-i2\pi\left(\frac{um}{M} + \frac{vn}{N}\right)} \right|^2$$

Стандартна періодограма для двовимірного випадку визначається як квадрат модуля двовимірного дискретного перетворення Фур'є, нормований на розмір вибірки.

$$P_D(u, v) = P(u, v) * H(u, v)$$

Періодограма Деніелла – це згладжена оцінка спектральної густини потужності, отримана шляхом усереднення стандартної періодограми в локальному частотному вікні.

Алгоритм періодограмного методу

Результати

Multitaper

Single-window periodogram is unstable

- high variance of spectral estimate;
- spectral leakage.

Multitaper improves spectral estimation

- uses several DPSS windows;
- averages partial spectral estimates;
- produces a more stable power spectrum.

Spectral Shrinkage

Multitaper provides a stable spectral estimate, but not the final filter.

It estimates:

- local spectral power in k-space;
- regions dominated by signal;
- regions where noise contribution is high.

Additional step required:

convert this spectral estimate into a weighting function for reconstruction.

Purpose of shrinkage:

attenuate noise-dominated components while preserving signal-dominated regions.

Wiener-based Spectral Shrinkage

Each k-space point receives a weight:

$$G = \max \left(0, 1 - \frac{N_0^{mt}}{\widehat{S}_{mt}^{2D} + \varepsilon} \right)$$

where:

- $\widehat{S}_{mt}^{2D}$ - multitaper estimate of local spectral power;
- N_0^{mt} - estimated noise floor;
- ε - small constant preventing division by zero.

Interpretation:

$G \approx 1$: signal-dominated component is preserved;
 $G \approx 0$: noise-dominated component is suppressed.

Results

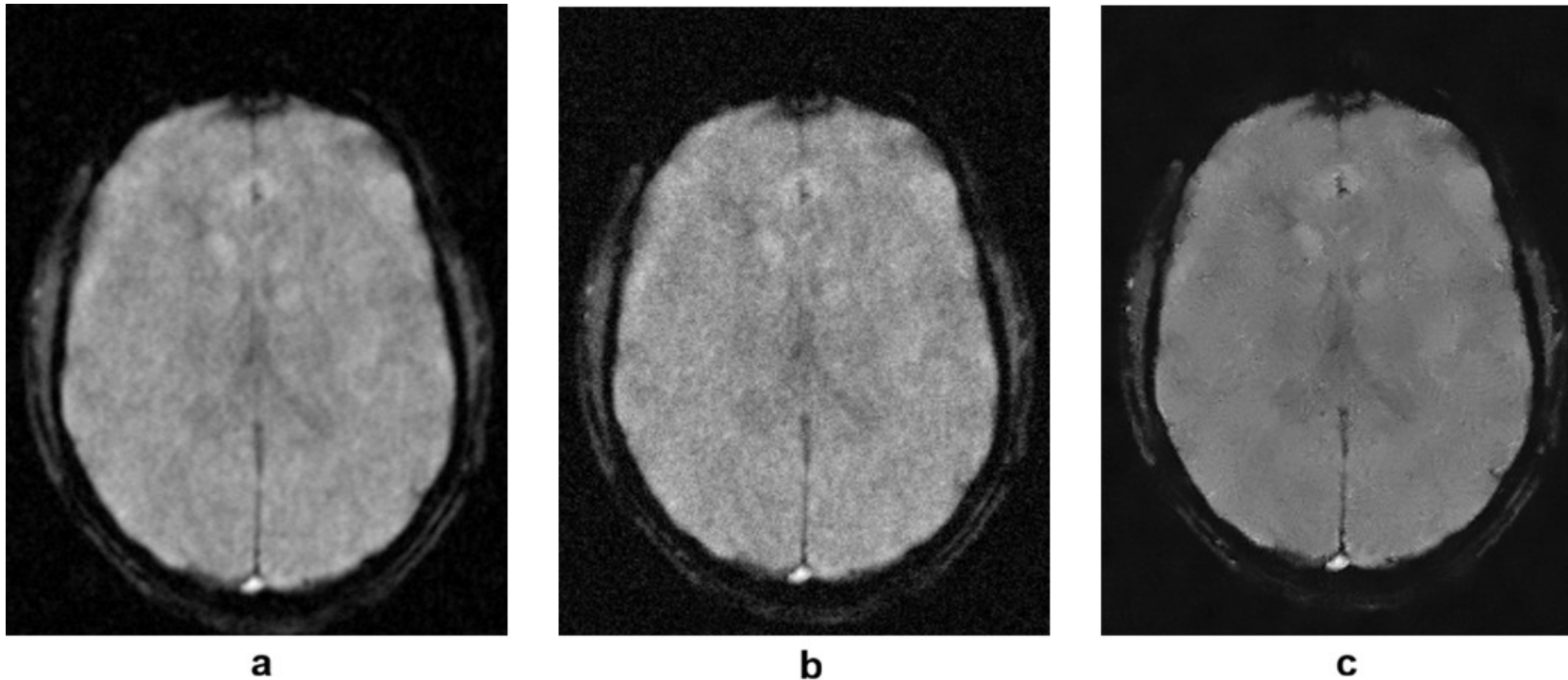


Fig. 3. Denoising results: (a) multitaper spectral shrinkage; (b) single-window periodogram; (c) NLM.

ВИСНОВКИ

- Multitaper gives a stable spectrum
- Shrinkage suppresses noise-dominated components
- Processing is performed directly in k-space
- The method outperforms the single-window periodogram and remains competitive with NLM

Thank you for attention!



XXVI International Young Scientists Conference on Applied Physics

Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
2026