

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

*доктора технічних наук, професора Березького Олега Миколайовича
на дисертаційну роботу Шуніна Олександра Юрійовича
на тему «Нейромережеві методи виявлення аномалій у полях фізичних
величин», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань
12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»*

1. Актуальність теми дисертації

Під час дистанційного обстеження територій інформація про потенційно небезпечні об'єкти може бути отримана не безпосередньо, а через спричинені ними зміни фізичних полів. У такому випадку результат пошуку залежить не тільки від характеристик окремих сенсорів, а й від того, наскільки правильно узгоджені та інтерпретовані отримані вимірювання.

Особливість поставленої в роботі задачі полягає у використанні різноманітних сенсорних каналів. Імпульсно-індукційні, магнітометричні, оптичні та георадарні дані мають різні фізичні характеристики, частоти дискретизації, просторові масштаби та джерела похибок. Без їх часового, просторового та структурного узгодження безпосереднє подання таких даних до нейронної мережі є проблематичним.

У дисертації ця проблема розглядається на прикладі мультисенсорної БПЛА-платформи та задач гуманітарного розмінування, а також дистанційного моніторингу ґрунтів. Така постановка є практично значущою, оскільки використання БПЛА дає можливість проводити обстеження територій без безпосередньої присутності оператора в потенційно небезпечній зоні.

Тому актуальність теми визначається не лише застосуванням нейронних мереж, а необхідністю створення цілісного інформаційного конвеєра, який забезпечує перехід від різноманітних вимірювань до узгодженого представлення, придатного для автоматизованого виявлення та локалізації аномалій.

Виходячи з цих міркувань, дисертаційне дослідження є актуальним.

2. Аналіз форми та змісту дисертаційного дослідження

Структура дисертаційної роботи сформована відповідно до логіки розв'язання поставленої науково-прикладної задачі. Робота загальним обсягом 274 сторінки, з яких 217 сторінок становить основний текст, складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 72 найменувань та 6 додатків. Текст ілюстровано 38 рисунками та 14 таблицями.

У вступі обґрунтовано актуальність та визначено методи досліджень, сформульовано мету та завдання дослідження, висвітлено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, а також наведено відомості про їхню апробацію та публікації.

У першому розділі проведено аналіз проблеми виявлення аномалій у полях фізичних величин і розглянуто сучасний стан методів, алгоритмів і засобів, що застосовуються для цієї задачі у прикладних системах дистанційного спостереження, насамперед у контексті гуманітарного розмінування як одного з найкритичніших практичних сценаріїв.

Визначено особливості підготовки вимірювальної інформації, часової синхронізації, просторової прив'язки, інтерполяції, формування структурованого представлення, нейромережевої обробки та оцінювання результатів.

Результати виконаного аналізу стали основою для формулювання мети і задач дисертаційного дослідження.

Другий розділ присвячено системному аналізу задачі злиття різнорідних сенсорних даних для нейромережевого виявлення аномалій у полях фізичних величин і розроблено цілісну архітектуру такого злиття.

Побудовано п'ятирівневу інформаційну модель дистанційного моніторингу ґрунту, що описує весь потік даних від сенсора до рішення: збір → передача → попереднє оброблення → злиття → прийняття рішень.

Розроблені методи злиття та просторової прив'язки, що поєднує автономну кінематику реального часу з кількісною оцінкою точності геоприв'язки.

У третьому розділі розроблено нейромережеві методи виявлення та класифікації аномалій, які перетворюють структуроване мультисенсорне подання на рішення. Розроблено архітектуру мультисенсорного злиття зі спеціалізованими гілками каналів, об'єднанням ознак та ансамблевим метарівнем, доповнену модулем адаптивного зважування каналів на основі механізму уваги, який враховує змінну інформативність джерел без перенавчання основної системи. Розвинуто підхід фізично-інформованих нейронних мереж для поставлених задач. Сформовані вибірки, стратегія подолання доменного зсуву та протокол розбиття за проходами.

У четвертому розділі вирішені задачі формування даних для нейромережевого виявлення аномалій — від планування місій до форматів кінцевих продуктів.

У п'ятому розділі виконано практичну реалізацію обґрунтованих нейромережевих методів виявлення та класифікації аномалій для трьох основних джерел даних: імпульсного міношукача, магнітометричної системи та георадара. Для кожного сенсорного каналу сформовано окремий конвеєр обробки даних, який включає попередню обробку сигналів, виділення інформативних ознак, нейромережевий аналіз та формування результатів локалізації аномалій.

Висновки узагальнюють результати виконаного дослідження, підтверджують досягнення поставленої мети та наукову обґрунтованість запропонованих рішень.

3. Наукова новизна отриманих результатів

Дисертаційне дослідження полягає у розв'язанні науково-практичної задачі розроблення нейромережевих методів пошуку, виявлення, класифікації та

локалізації аномалій у полях фізичних величин за мультисенсорними даними БПЛА-платформи.

Наукові результати такі:

- удосконалено нейромережевий метод виявлення і класифікації аномалій у полях фізичних величин за мультисенсорними даними БПЛА-платформи, який використовує геометрично узгоджене тензорне подання $T(x, y, k)$ як спільний багатоканальний вхід для ансамблю одновимірних згорткових нейронних мереж і стекінгового метакласифікатора, що забезпечує спільне використання даних різної фізичної природи для пошуку аномалій у темпі надходження вимірювань;

- вперше розроблено чотиривимірну модель поля аномалій $S(c, X, Y, t)$ для даних імпульсної індукції, яка формалізує залежність сигналу від параметрів каналу приймання, просторових координат точки зондування та часу релаксації відгуку, що забезпечує формування структурованого подання вхідних даних нейронних мереж виявлення аномалій;

- удосконалено метод часового узгодження різномірних вимірювальних потоків мультисенсорної БПЛА-платформи, який базується на апаратній прив'язці сенсорних каналів до спільного опорного сигналу, що забезпечує просторовий еквівалент похибки синхронізації 2–4 см та створює необхідні умови формування коректних вхідних даних для нейронних мереж виявлення аномалій;

- удосконалено метод просторової прив'язки мультисенсорних вимірювань, який поєднує автономну кінематику реального часу з кількісним обґрунтуванням точності геоприв'язки, що забезпечує формування геометрично узгодженого тензорного подання даних за просторової похибки геоприв'язки 1–8 см та формування вхідних даних для нейронних мереж виявлення аномалій;

- набув подальшого розвитку підхід до побудови фізично-інформованих нейронних мереж шляхом включення до функції втрат регуляризаційних складових, що відображають структурні інваріанти сенсорних сигналів, задані дипольною моделлю магнітної аномалії та моделями багатоекспоненційного затухання вихрових струмів, що підвищує узагальнювальну здатність нейронних мереж пошуку, виявлення, класифікації та локалізації аномалій за умов обмеженої розміченої вибірки.

4. Практичне значення отриманих результатів

Практичний інтерес становить запропонована дворівнева схема планування місії БПЛА, за якої попередній обліт використовується для виділення зон інтересу, після чого детальне обстеження виконується лише в таких зонах. У дисертації наведено результат, відповідно до якого площа детального обстеження може бути скорочена на 56,3 %.

Розроблені алгоритми та програмні засоби впроваджено у практичну діяльність ТОВ ВП «Спецмонтаж» та ТОВ «ОМ Енерджи». Відкритий набір лабораторних і польових вимірювань трикотушкового імпульсного металошукача опубліковано в репозиторії github.com/op-uav-lab/soil-monitormlp.

Дисертаційне дослідження виконано у межах проєкту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0161 «Використання штучного інтелекту для підвищення якості визначення вибухових пристроїв мультисенсорним дроном-міношукачем» (номер ДР 0124U003664), грантового науково-технічного проєкту СШ/5-2024 від 28.11.2024 «Інтелектуальна система визначення стану довкілля у реальному часі на базі БПЛА» (номер ДР 0124U004854) та НДР 723- 43 «Розробка інтелектуальних сенсорів дистанційного комплексного моніторингу деградації ґрунтів повоєнних територій» (ДР 0126U001468). Дисертант брав участь у виконанні зазначених проєктів як співвиконавець.

5. Дотримання вимог академічної доброчесності, мова та стиль викладення результатів

За результатами аналізу тексту дисертації та публікацій автора за темою дисертації встановлено відсутність академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження. Таким чином, порушення академічної доброчесності в дисертаційній роботі відсутні.

Дисертаційна робота написана українською мовою і має чітку структуру. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

6. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, що представлені у дисертаційній роботі, підтверджується коректним використанням математичного апарату, зокрема, лінійної алгебри, математичного аналізу та теорії обробки сигналів та зображень, теорії нейронних мереж. А також вони забезпечуються цілісною методологією проведення досліджень, які поєднують всі необхідні складові: теоретичний аналіз, математичне моделювання, експериментальну перевірку та порівняльний аналіз із застосуванням відомих метрик для оцінювання отриманих результатів.

Це дає підстави вважати основні положення та висновки дисертаційної роботи достатньо обґрунтованими, а одержані результати – достовірними в межах визначених умов і параметрів експерименту.

Вважаю, що коректність запропонованих методів та програмних рішень підтверджується результатами експериментів.

7. Повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових працях, серед яких 3 статті у фахових виданнях України, 1 стаття у зарубіжному науковому

періодичному виданні, 1 розділ у колективній монографії та 5 публікації у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Отже, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача, а кількість та якість публікацій відповідає чинному законодавству щодо присудження доктора філософії.

8. Дискусійні положення та зауваження

Недоліки дисертаційного дослідження такі:

1. У підрозділі 2.13 порівняння розробленої системи з існуючими рішеннями значною мірою має якісний характер. Було б корисно доповнити його зведеним кількісним порівнянням основних характеристик — імовірності виявлення, F1-міри, швидкодії та інших доступних показників — із найближчими аналогами. Це дозволило б чіткіше оцінити місце розробленого методу серед існуючих рішень.

2. Основні кількісні результати нейромережевої класифікації наведено для конкретного набору РІ-вимірювань. Для підвищення відтворюваності результатів доцільно було б детальніше вказати обчислювальну платформу, на якій вимірювався час оброблення менш ніж 4 мс на вектор даних.

3. У дисертації показано приріст F1 на 0,020 при додаванні близько 25 % синтетичних даних. Доцільним було б дослідити ширший діапазон частки синтетичних зразків, оскільки наведений експеримент підтверджує позитивний ефект такого розширення, але сам по собі не дає можливості зробити висновок про оптимальність саме 25 %.

4. Розроблена фізично-інформована регуляризація є одним із результатів роботи. Разом з тим потребує подальшого дослідження її чутливість до похибок фізичних моделей, які використовуються при формуванні регуляризаційних складових, зокрема за неоднорідних властивостей ґрунту. У самій дисертації систематичне кількісне оцінювання внеску фізичної регуляризації визначене як напрям подальших досліджень.

5. Експериментальна перевірка різних сенсорних каналів має неоднаковий рівень завершеності. Для РІ-каналу наведено найбільш повну лабораторну та польову базу, тоді як магнітометричний канал перевірявся на демонстраційних даних, а георадарний — на синтетичних даних без проведення натурних георадарних вимірювань. Було б доцільно провести повноцінну польову перевірку цих каналів та окремо оцінити їх внесок у кінцеве рішення.

6. Для більш повного підтвердження переваги саме мультисенсорного підходу доцільно було б розширити абляційні експерименти: порівняти результати РІ-каналу окремо, його поєднання з магнітометричними та оптичними даними і повного набору сенсорів. Це дозволило б кількісно визначити внесок окремих каналів у кінцеву якість виявлення.

7. У тексті дисертаційної роботи присутні стилістичні та термінологічні неточності.

Наведені зауваження мають дискусійний характер, окреслюють напрями подальшого розвитку дослідження та не ставлять під сумнів достовірність основних результатів, їх наукову новизну і практичне значення.

9. Загальний висновок

Отже, дисертаційна робота Шуніна Олександра Юрійовича «Нейромережеві методи виявлення аномалій у полях фізичних величин» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, у межах якого розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розроблення нейромережевих методів пошуку, виявлення, класифікації та локалізації аномалій у полях фізичних величин за різнорідними сенсорними даними. Отримані результати мають теоретичне значення для розвитку нейромережевих методів аналізу фізичних полів і практичне значення для задач гуманітарного розмінування, первинного обстеження потенційно небезпечних територій, дистанційного моніторингу ґрунтів, геофізичного обстеження та екологічного контролю.

Одержані результати підтверджено теоретичними оцінками, статистичним аналізом, програмною реалізацією та експериментальними дослідженнями.

За актуальністю теми, обґрунтованістю наукових положень, новизною одержаних результатів, практичним значенням, повнотою оприлюднення та рівнем виконання дисертаційна робота відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та 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 12.01.2022 № 44, а її автор Шунін Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
Західноукраїнського національного університету

Олег БЕРЕЗЬКИЙ