



ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,
старшого наукового співробітника

Кокрельської школи інженерії Техаського університету в Остіні (США)

Васілевського Олександра Миколайовича

на дисертацію Артемука Сергія Ігоровича

на тему «Застосування штучних нейронних мереж для визначення координат джерела акустичного сигналу»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Актуальність теми дисертаційної роботи

У сучасному світі стрімко розвиваються системи локалізації об'єктів, що використовують акустичні сигнали для визначення координат та знаходять широке застосування в багатьох сферах життєдіяльності людини. Це пов'язано із здатністю акустичних хвиль проникати через різноманітні перешкоди та стійкістю до електромагнітних перешкод, які створюються іншими об'єктами в навколишньому середовищі. Для забезпечення якісного визначення координат об'єктів такі системи повинні забезпечувати на достатньому рівні точність, надійність та швидкодію. Завдяки динамічному розвитку інформаційних та комп'ютерних технологій відкриваються нові можливості для створення вдосконалених систем локалізації об'єктів з покращеними характеристиками. Дослідження в цій галузі є надзвичайно актуальними та дозволяють вирішувати актуальні питання, зокрема: неоднозначності результатів визначення координат; складності реалізації систем для визначення координат кількох об'єктів одного типу одночасно; необхідності застосування відносно великої кількості сенсорів, що ускладнює алгоритм розрахунку координат і зменшує швидкодію; значного впливу шуму, завад та реверберації на точність визначення координат, тощо.

Враховуючи стрімкий розвиток технологій машинного навчання, актуальною є наукова задача створення систем визначення координат джерела акустичного сигналу із використанням нейронних мереж для покращення метрологічних характеристик таких систем.

Аналіз змісту та форми дисертації

Наукові положення, висновки та запропоновані у дисертації ідеї є науково, теоретично та експериментально обґрунтованими. Під час роботи над дисертацією здобувач застосував різні методи та засоби аналізу.

Дисертація Артемука С.І. складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 194 сторінки, що містять 16 таблиць, 70 рисунків, 61 формулу, список використаних джерел із 146 найменувань та 6 додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, окреслено мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для його виконання, представлені методи досліджень, вказані новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію, публікації та реалізацію результатів дослідження.

В *першому розділі* проведено аналітичний огляд існуючих методів визначення координат розташування фізичних об'єктів, наведено основні відомості про кожен з методів, його суть та структурну схему реалізації систем на основі цих методів, проаналізовано переваги та недоліки кожного з методів, а також особливості їх використання, проведено порівняння метрологічних характеристик різних систем, встановлено оптимальний для метод вирішення поставленої задачі.

У *другому розділі* представлено структурну схему системи визначення координат джерела акустичного сигналу на основі різницево-часового методу та з використанням нейронної мережі, розроблено програмно-математичні моделі, які дозволяють відтворити процес проходження акустичного сигналу від джерела до сенсорів, розрахувати час його реєстрації та сформувані набір даних для навчання і перевірки нейронної мережі, запропоновано алгоритм дослідження похибок системи визначення координат джерела акустичного сигналу, досліджено абсолютну похибку визначення координат джерел акустичного сигналу.

В *третьому розділі* проведено оптимізацію системи визначення координат джерела акустичного сигналу за критерієм мінімуму похибки, отримано залежності середнього значення абсолютної похибки визначення координат від параметрів системи, встановлено оптимальні параметри системи визначення координат джерела акустичного сигналу за яких отримано мінімум похибки, здійснено порівняння систем із оптимізованими параметрами та параметрами за замовчуванням.

У *четвертому розділі* досліджено неоднозначність результатів визначення координат джерела акустичного сигналу, отримано залежність

абсолютної похибки визначення координат джерела акустичного сигналу від температури та вологості, запропоновано спосіб корекції, який забезпечує зменшення впливу температури та вологості навколишнього середовища на результати визначення координат, проведено оцінювання сумарної похибки визначення координат, відстані та кута до джерела акустичного сигналу.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

У додатках представлено акти впровадження та додаткові матеріали.

Список літературних джерел містить 146 найменувань.

Анотація дисертації коректно відображає її основні положення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

При вирішенні поставлених у дисертації задач, створенні наукових положень, висновків та рекомендацій здобувачем застосовані дані, які одержані з літературних джерел, з результатів аналізу сучасного стану та перспектив розвитку систем визначення координат джерела акустичного сигналу. Для розв'язання поставлених у дисертації завдань використано методи порівняльного аналізу, машинного навчання, програмно-математичного моделювання, а також теорії похибок.

Обґрунтованість наукових положень та висновків, викладених у дисертації, є достатньою та базується на детальному аналізі наукової задачі дослідження, використанні сучасних методів дослідження та обґрунтованому викладенні основних результатів.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих методів і засобів підтверджується результатами теоретичних та експериментальних досліджень, коректним застосуванням математичного апарату, а також впровадженням наукових результатів.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Робота містить раніше незахищені наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати. А саме:

- *вперше* розроблено програмно-математичну модель системи визначення координат джерела акустичного сигналу на основі різницево-часового методу та технологій машинного навчання, що дає змогу сформувати набір даних для навчання та перевірки нейронної мережі, а також оптимізувати параметри системи за критерієм мінімуму похибки;

- *вперше* отримано залежності похибки визначення координат джерела акустичного сигналу від досліджуваних параметрів системи та нейронної

мережі, які дають змогу розрахувати похибку визначення координат за необхідних параметрів системи та нейронної мережі;

- *розроблено* математичну модель корекції результатів вимірювання, що дає змогу зменшити додаткову похибку визначення координат джерела акустичного сигналу;

- *отримав подальший розвиток* різницево-часовий метод, який за рахунок використання нейронних мереж дозволяє покращити метрологічні характеристики реалізованих на його основі систем визначення координат джерела акустичного сигналу.

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, є достовірними, містять наукову новизну і є індивідуальним внеском дисертанта.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в розробленні програмних модулів та алгоритмів формування даних для навчання та перевірки нейронної мережі, розробленні програмних модулів для дослідження залежності похибки визначення координат джерела акустичного сигналу від зміни температури та вологості навколишнього середовища, розробленні алгоритму корекції результатів визначення координат джерела акустичного сигналу.

Отримані результати досліджень також впроваджено у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій» Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін: «Мобільні робото-технічні пристрої» для магістрів спеціальності 175 – Інформаційно-вимірювальні технології та «Машинний інтелект в робототехніці» для бакалаврів спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, а також в діяльність UNIDATALAB LTD.

Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності

Основні положення та практичні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на таких конференціях: The XII International Scientific and Practical Conference: Advances in Technology and Science (Берлін, Німеччина, 2021 р.); The 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (Краків, Польща, 2021 р.); IX Міжнародна науково-технічна конференція «Захист інформації і безпека інформаційних систем» (Львів, Україна, 2023 р.); IV Міжнародно-практична конференція «The world of modern technologies and

inventions» (Відень, Австрія, 2023 р.); VI Міжнародно-практична конференція «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (Львів, Україна, 2023 р.); 7th International scientific and practical conference: Current challenges of science and education (Берлін, Німеччина, 2024 р.).

Основні результати дисертації викладено у 11 публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях України та 6 публікацій у матеріалах та збірниках доповідей наукових конференцій, з яких 1 індексується у наукометричній базі даних Scopus.

Таким чином, вимоги «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» до кількості публікацій виконано.

Публікація автором результатів досліджень у рецензованих виданнях, які передбачають попередню перевірку матеріалів на відсутність запозичень, є одним із елементів підтвердження відсутності порушень академічної доброчесності. В цілому у дисертації порушень академічної доброчесності не виявлено.

Мова та стиль дисертаційної роботи

Дисертація написана зрозуміло, доступно, на належному технічному рівні з використанням сучасної термінології.

Тема, зміст та отримані наукові результати роботи відповідають спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації

1. В першому розділі дисертації здобувачем виконано аналіз основних методів визначення координат розташування фізичних об'єктів, а також в підрозділі 1.3 в таблиці 1.1 представлено діапазони вимірювання та похибки вимірювання розглянутих методів. Однак в більшості представлених в таблиці 1.1 методів вимірювання координат розташування фізичних об'єктів невідомі (не зазначені), а ні діапазони вимірювання, а ні похибки вимірювання, тому важко порівняти точність активних і пасивних методів вимірювання. На мою думку доцільно було б також проаналізувати не лише методи та їхні похибки, але й існуючі засоби вимірювання координат та їх точність. В зв'язку з цим виникає запитання які ще критерії використовувалися для порівняння різних методів

вимірювання координат і чому Ви вважаєте, що різницево-частотний метод є кращим чи ефективнішим за інші методи?

2. В підрозділі 2.3 здобувачем пропонується програмно-математична модель розташування сенсорів, однак з тексту не зрозуміло, хто і на якому етапі повинен обирати форми розташування сенсорів, як форми розташування сенсорів будуть впливати на точність вимірювань та яка з форм розташування сенсорів є оптимальною?

3. В підрозділі 2.5 здобувачем запропоновано алгоритм дослідження похибок із використанням методу Монте Карло, однак з тексту дисертації не зрозуміло чому для дослідження похибок обрано саме цей метод, а не якийсь інший, наприклад, метод найменших квадратів. Яка основна причина вибору методу Монте Карло для аналізу похибок?

Також з підрозділів 2.5 та 2.6 чітко не зрозуміло, які значення були прийняті за дійсні при розрахунку абсолютних похибок?

В таблиці 2.2 представлені непевності вимірювання, однак не вказано який тип непевності А, Б чи комбінована непевність?

Крім цього, в таблиці 2.2 представлені середні значення абсолютних похибок ($\Delta x_{m,s}$ та $\Delta y_{m,s}$), однак непевності вимірювання, наскільки я зрозумів, розраховані за виразами, що наведені в алгоритмі на рис. 2.11. На мою думку непевності вимірювань також повинні залежати від середніх арифметичних значень абсолютних похибок $u(\Delta x_{m,s})$ та $u(\Delta y_{m,s})$, а не від одиничних показників абсолютних похибок $u(\Delta x_m)$ та $u(\Delta y_m)$, чи не так?

4. В третьому розділі дисертації здобувачем проведено оптимізацію параметрів системи визначення координат джерела акустичного сигналу за критерієм мінімуму похибки. Під час опрацювання результатів використовується лише середнє значення абсолютної похибки. Поясніть будь-ласка чому при оцінюванні та порівнянні результатів Ви використовуєте лише середнє значення абсолютної похибки, а не середньо-квадратичне відхилення. Адже відомо, що абсолютна похибка (наприклад, 0.5 м) може бути гарним показником вимірювання великих відстаней та поганим показником при вимірюванні малих відстаней. Тому в метрологічній практиці прийнято використовувати безрозмірну величину – відносну похибку вимірювання, а при наявності вибірки для оцінювання якості вимірювань та порівняння результатів спостережень прийнято використовувати середньо-квадратичне відхилення.

5. На рисунку 3.5 представлено результати лише для координати X. Доцільно було б додати графік і для координати Y. Також на рисунках 3.7 та 3.12 не зрозуміло, що відображається за віссю Y.

6. В четвертому розділі здобувачем досліджено похибки системи визначення координат джерела акустичного сигналу. Однак при розрахунку похибок зустрічається некоректний опис фізичної суті похибок, зокрема, під час опису рівнянь (4.27) та (4.28), здобувач вказує, що за цими формулами було

розраховано відносні похибки, але загальновідомо, що відношення абсолютної похибки до нормованого значення, яке при діапазоні показів від нуля до верхньої межі вимірювання відповідає максимальному значенні вимірюваної величини – це зведена (або приведена) похибка. І якщо її помножити на 100%, то вона буде виражатися у відсотках, але знак «%» чомусь пропущений у зазначених рівняннях.

Крім цього, на мою думку, в четвертому розділі дисертації недостатньо приділено уваги використанню концепції непевності вимірювань. Здобувачем в кінці четвертого розділу наведено лише два рисунки з характеристиками зміни непевності вимірювань відстані (рис. 4.24) та непевності вимірювання кута (рис. 4.25), однак не вказано виразів і типу непевності за якими вони розраховувалися. Також доцільно було б розрахувати комбіновану (сумарну) непевність вимірювань замість сумарної похибки вимірювань, оскільки всі необхідні данні для оцінювання непевностей типу В на основі наукових суджень про вимірюванні та впливні величини в дисертації розглянуті. Це дозволило б представити отримані результати досліджень відповідно до вимог міжнародного стандарту з оцінювання якості вимірювань.

Слід відзначити, що визначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Загальні висновки та оцінка дисертації

Представлена дисертація Артемука Сергія Ігоровича «Застосування штучних нейронних мереж для визначення координат джерела акустичного сигналу» є завершеною, самостійно виконаною науковою роботою, що стосується вирішення важливого наукового завдання – розроблення та дослідження способу визначення координат джерела акустичного сигналу на основі різницево-часового методу із використанням технологій комп'ютерного моделювання і машинного навчання та характеризується актуальністю, науковою новизною, теоретичною та практичною цінністю.

Отримані наукові та практичні результати мають значення для галузі автоматизації та приладобудування. Тема та зміст дисертаційної роботи відповідають спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Отже, з огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх наукову новизну та практичну цінність, повноту викладу матеріалу у наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності вважаю, що дисертація цілком відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора

філософії та скасування рішень разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор Артемук Сергій Ігорович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Офіційний опонент / Official opponent
доктор технічних наук, професор,
старший науковий співробітник
Кокрельської школи інженерії
Техаського університету
в Остіні, США /
Doctor of Engineering Science, Professor,
Senior Researcher of
the Cockrell School of Engineering,
The University of Texas at Austin, USA

Олександр ВАСІЛЕВСЬКИЙ



Oleksandr VASILEVSKYI