

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора кафедри системотехніки факультету комп'ютерних наук Харківського національного університету радіоелектроніки Безкоровайного Володимира Валентиновича на дисертаційну роботу Лебедевої-Дичко Анастасії Сергіївни «Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках», яку подано на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки

Актуальність теми дослідження

Зростання обсягів виробництва, яке спостерігається в наш час у більшості країн світу, вимагає відповідного переобладнання існуючих чи створення нових виробничих потужностей. У процесах будівництва, реконструкції й експлуатації складних промислових об'єктів виникає необхідність ретельного відстеження місць знаходження значної кількості техніки і персоналу з використанням автоматизованих чи автоматичних засобів позиціонування. При цьому, динаміка просторів промислових майданчиків (встановлення чи демонтаж конструкцій, обладнання, переміщення техніки, поява нових джерел завод тощо) призводить до зміни характеристик поширення сигналів, виникнення «мертвих зон», зниження точності й надійності систем позиціонування. Для забезпечення їх надійного покриття виникає необхідність адаптації сенсорних мереж, зокрема, з використанням декількох технологій навігації. Як наслідок, виникає **протиріччя** між потребами практики швидкого й точного визначення координат об'єктів на промислових майданчиках з використанням гібридних технологій навігації та можливостями сучасної методології автоматизованого проєктування систем позиціонування.

Це обумовило **актуальність теми** дисертаційного дослідження, яке присвячене вирішенню науково-прикладного завдання підвищення ефективності технологій автоматизованого проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією.

Тема дисертаційної роботи відповідає Пріоритетному тематичному напрямку наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні і до 2023 року, у сфері інформаційних та комунікаційних технологій «Кіберфізичні

системи. Інтернет речей. Робототехніка. Комп'ютерна обробка сигналів різних видів та походження», визначеним Постановами Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 та від 30 квітня 2024 року №476, Стратегії цифрового розвитку інновацій України (WINWIN) до 2030 року за напрямом «Імерсивні технології» (XR) (цифрові двійники в будівництві та інфраструктурі) та «Оборонні технології» (DefenseTech) (сенсори та системи отримання даних), затвердженої Кабінетом Міністрів України.

Свідченням актуальності теми дисертаційного дослідження є також те, що воно виконано в рамках науково-дослідної теми: «Інтелектуальні методи пошуку субоптимальних розв'язків прикладних дискретних оптимізаційних задач» (ДР №0120U000375).

Структура, логіка та зміст дослідження

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 127 найменувань, трьох додатків і має загальний обсяг 162 сторінки.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її темі, меті та задачам дослідження. У викладенні результатів дослідження просліджується певна послідовність, етапи дослідження взаємопов'язані і вирішують локальні задачі, розв'язання яких у сукупності дозволяє досягти поставленої мети дослідження.

Вступ розкриває суть, структуру і сучасний стан розв'язуваного у дисертаційній роботі науково-прикладного завдання. У ньому наведена загальна характеристика роботи, яка містить відомості щодо виконаного дослідження згідно з існуючими вимогами: актуальність теми; зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами; формулювання мети та задач дослідження; перелік використаних методів дослідження; декларацію наукової новизни результатів дисертаційної роботи; практичне значення отриманих результатів; відомості про апробацію, реалізацію результатів та їх впровадження; публікації авторки за темою дисертації.

Перший розділ роботи присвячений огляду сучасного стану проблеми проєктування систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках. У ньому наведено результати аналізу структури та етапів проєктування систем позиціонування об'єктів, виділено основні фактори, що визначають ефективність процесів їхнього функціонування. Для вирішення автором обрано агрегативно-декопозиційний підхід, в рамках якого для системи позиціонування як

розподіленого у просторі об'єкта обрані схема декомпозиції й ітераційна схема проєктування сенсорної мережі. За результатами аналізу переваг і недоліків глобальних і локальних систем позиціонування зроблено висновок щодо доцільності їх комплексного використання, а для забезпечення їх ефективного функціонування доцільно застосовувати адаптивний, багатоетапний підхід з урахуванням технологічних обмежень, умов експлуатації та обсягів даних.

Виходячи з цього, сформульовано **науково-прикладне завдання**, що передбачає підвищення ефективності гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією за рахунок розроблення моделей та методів для визначення топологічної структури сенсорної мережі за множиною показників якості та вдосконалення процесів збору, зберігання та обробки даних, а також множина задач, отриманих у результаті його декомпозиції.

У **другому розділі** наведено результати експериментального дослідження впливу факторів промислового середовища на точність сучасних технологій позиціонування. Наведено результати оцінки характеристик технологій GPS, Wi-Fi, Starlink PNT, UWB в умовах промислових майданчиків. Для підвищення точності позиціонування об'єктів автором запропоновувати здійснювати попередню обробку вимірювань з використанням фільтру Калмана. На цій основі автором запропоновано структуру обчислювального модуля, що реалізує алгоритмічну частину системи для виконання процедури позиціонування, яка передбачає: оцінку координат на основі зібраних метричних вимірювань; застосування фільтраційних або статистичних моделей на основі фільтру Калмана чи нейромережових згорток; формування траєкторій, виявлення подій та подальшу інтеграцію з іншими інформаційними системами.

Третій розділ присвячено розробленню математичних моделей і методів для оптимізації структур сенсорних мереж у гібридних системах позиціонування. Як базову обрано задачу оптимізації системи, використання якої дозволить досягти заданого рівня точності та надійності при мінімальних витратах. Сформульовано припущення, що ефективне проєктування сенсорної мережі має враховувати не лише топологію території, а й ступінь критичності її окремих ділянок до точності позиціонування. На цій основі введено концепцію зонування, яка дозволяє диференціювати територію за рівнем вимог до точності, стабільності та ресурсних витрат. Для спрощення геометричних моделей задачі, цілком слушно,

запропоновано і проаналізовано варіанти апроксимації областей покриття різних форм з використанням базових геометричних елементів трикутників, прямокутників і гексагонів. Встановлено, що жоден тип дискретизації не є універсальним, а ефективність їх застосування залежить від форми майданчика, просторової динаміки та співвідношення пріоритетів між показниками точності і витрат. Виходячи зі складності задачі та її високої розмірності, для оптимізації розміщення сенсорів запропоновано метаевристичні методи (еволюційний, що реалізується з використанням генетичного алгоритму та аналогу покоординатного спуску), для яких отримано аналітичні оцінки часової складності.

У **четвертому розділі** наведено опис технології проектування гібридних системи позиціонування, яка дозволяє створювати масштабовані, гнучкі системи з ефективною обробкою великих обсягів даних. При формуванні архітектурних патернів систем позиціонування запропоновано виділяти сенсорний рівень, рівні обробки, збереження й інтерфейсний рівень. У процесі масштабування системи запропоновано використання паралельної та розподіленої обробки даних, що дозволить забезпечити необхідну продуктивність, скоротити затримки та підтримувати актуальність позиційної інформації в реальному часі. Запропонована з використанням методу аналізу ієрархії методика вибору технологій позиціонування дозволяє враховувати критичність зон, просторові обмеження, характеристики сигналу та витрати на їх реалізацію.

Висновки дисертації узагальнюють результати проведеного дослідження, підтверджують досягнення поставленої мети та вирішення сформульованих завдань.

У додатках наведені документи про впровадження результатів дослідження у навчальний процес Запорізького національного університету, у приватному акціонерному товаристві «Запоріжсталь» та у товаристві з обмеженою відповідальністю «АЛД Інжинірінг та будівництво».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність

Вихідні положення дисертаційної роботи є коректними. Запропоновані у роботі підхід, математичні моделі, методи й алгоритми розв'язання частинних задач проблеми базуються на відомих моделях і методах системного аналізу, автоматизації проектування, концептуального та математичного моделювання,

теорії прийняття рішень та сучасних інформаційних технологій.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають достатній ступінь обґрунтованості та підтверджуються результатами теоретичних і експериментальних досліджень. Достовірність отриманих результатів підтверджується практичною апробацією розроблених методів та технологій на реальних промислових об'єктах, що свідчить про їхню прикладну цінність та відповідність реальним умовам експлуатації.

Свідченнями обґрунтованості та достовірності результатів дисертаційної роботи можуть слугувати також їхня публікація у наукових фахових виданнях та апробація у середовищі фахівців на високореєтингових міжнародних наукових конференціях.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі наведено розв'язання актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності технологій автоматизованого проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією.

При цьому отримано ряд наукових результатів, що мають переваги над існуючими:

- отримав подальший розвиток метод розрахунку координат об'єкта, який поєднує дані отримані від глобальних і локальних систем позиціонування та використовує фільтрацію для згладжування шумів, що надає можливість підвищити точність та надійність позиціонування об'єктів на промислових майданчиках;

- отримав подальший розвиток метод розробки геометричної моделі дискретизації промислового майданчика, що на відміну від існуючих, враховує рівень критичності щодо покриття сигналу та надає можливість адаптації параметрів системи позиціонування до умов динамічної зміни конфігурації і безпекових вимог;

- уперше розроблено метод оптимізації сенсорної мережі у гібридній системі позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією, що на відміну від існуючих, враховує рівень критичності зон, радіус дії сенсорів та вимоги до точності, економічної доцільності, надає можливість ефективного масштабування системи та забезпечує її мобільність;

- уперше запропоновано технологію проєктування гібридної системи

позиціонування об'єктів з можливістю масштабування, що на відміну від існуючих, формує багаторівневу архітектуру та враховує необхідність адаптації до змін середовища, оптимізації витрат на розгортання інфраструктури, обробку та візуалізацію великих даних.

Отримані результати створюють підґрунтя для розроблення адаптивних, економічно доцільних та масштабованих систем позиціонування, що мають практичну цінність для широкого спектру застосувань у будівельній галузі та промисловості.

Значущість результатів дослідження для науки і практики та можливі шляхи їх використання

Запропоновані методи та технологія розширюють сучасні наукові уявлення про побудову гібридних систем позиціонування у складних динамічних середовищах, сприяють розвитку теорії оптимального проєктування сенсорних мереж та адаптивних інформаційно-комунікаційних систем.

Методи геометричної дискретизації простору, оптимізації структури сенсорної мережі з урахуванням динаміки конфігурації промислового середовища і рівнів критичності зон, мають значний потенціал для подальшого розвитку досліджень у сфері систем моніторингу, Інтернету речей, мобільної робототехніки та систем управління складними об'єктами.

Результати дослідження можуть бути використані у технологіях проєктування, реінжинірингу і впровадження гібридних систем позиціонування на промислових майданчиках, будівельних об'єктах, підприємствах енергетики, логістики, а також у системах забезпечення безпеки праці. Упровадження розроблених методів і технології дозволить підвищити точність, надійність та економічну ефективність систем позиціонування в умовах, де традиційні технології не забезпечують достатнього рівня якості.

Повнота викладу результатів дослідження в наукових публікаціях

Основні наукові результати роботи достатньо повно викладені у 3-х публікаціях, які включені до переліку наукових фахових видань України за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, що відповідає п. 8 діючого «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової

спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі, також були апробовані та отримали позитивну оцінку на трьох всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

Академічна доброчесність

Очевидних ознак порушення авторкою академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження та/або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства, не виявлено.

Результати перевірки подібності тексту дисертаційної роботи підтвердили достатньо високий рівень його оригінальності.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

1. У першому розділі дисертаційної роботи доцільно було б більш повно подати огляд математичних моделей та методів розв'язання комбінаторних задач покриття, які використовуються чи можуть бути використані для оптимізації систем позиціонування.

2. Відомо, що цільові функції в задачах багатокритеріальної оптимізації утворюють з використанням моделей теорії корисності. З урахуванням цього, недостатньо вдалим слід визнати використання в адитивних згортках (1.3), (3.8), (3.9), (3.11) ненормованих показників, що мають різні розмірності і діапазони зміни.

3. Наведені аналітичні оцінки часової складності запропонованих методів (3.18)–(3.19) не відображають залежностей від розміру розв'язуваної задачі, що не дозволить використовувати їх для прогнозування часу розв'язання задач інших розмірностей.

4. Відомо, що точність розв'язків, отримуваних з використанням запропонованого еволюційного методу, суттєво залежить від виду генетичного алгоритму та його параметрів (способу кодування, розміру популяції, кількості епох, виду кросовера, ймовірності мутації). У роботі не наведено рекомендацій щодо вибору значень його параметрів у залежності від розмірності розв'язуваної задачі.

5. По тексту роботи зустрічаються граматичні помилки та неточності, зокрема: на узагальненій структурній схемі системи позиціонування (рис. 1.3)

кількості елементів і об'єктів є однаковими для кожного з вузлів, що у загальному випадку не відповідає дійсності; елементи системи визначено як сукупність фізичних пристроїв, які забезпечують виявлення та фіксацію об'єктів у просторі (с. 28), проте наведені у подальшому результати відповідають позиціонуванню на площині; задача оптимізації, в якій необхідно досягти заданого рівня точності та надійності при мінімально можливих витратах, не є багатокритеріальною, як те стверджується на с. 89 тощо.

Загальний висновок

Незважаючи на зазначені недоліки, дана дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яке за актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю, науково-теоретичною та науково-практичною значущістю результатів відповідає вимогам діючого «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 № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами і доповненнями, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), «Положення про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті» (наказ №35 від 31.01.2024) та вимогам до оформлення дисертації, а її авторка Лебедєва-Дичко Анастасія Сергіївна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри системотехніки
факультету комп'ютерних наук
Харківського національного
університету радіоелектроніки



В. В. Безкоровайний