

Анастасія Лебедєва-Дичко¹, Галина Шило²¹ Кафедра комп'ютерних наук, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, E-mail: lidas.1405@gmail.com, ORCID 0009-0003-1931-1861² Кафедра комп'ютерних наук, Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, E-mail: shilo.gn@gmail.com, ORCID 0000-0002-5020-6707

ОПТИМІЗАЦІЯ СЕНСОРНОГО ПОКРИТТЯ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ ПОЗИЦІЮВАННЯ

Отримано: Березень 20, 2025 / Переглянуто: Березень 25, 2025 / Прийнято: Березень 31, 2025

© Лебедєва-Дичко А., Шило Г., 2025

<https://doi.org/>

Анотація. У статті розглянуто задачу оптимізації розміщення сенсорів в гібридних системах позиціонування, що функціонують в умовах динамічних виробничих середовищ. Сучасні промислові об'єкти характеризуються змінною структурою, наявністю мобільних елементів, складною топологією та обмеженнями щодо встановлення обладнання, що обумовлює потребу в ефективних підходах до проєктування систем позиціонування.

Метою дослідження є розробка методу та алгоритму розміщення сенсорів (якорів) на промислових об'єктах з урахуванням критичності окремих зон майданчика, що надає можливість забезпечити необхідну точність позиціонування при мінімальних витратах на обладнання.

Запропоновано методологію створення гібридних систем позиціонування, що ґрунтується на зонуванні простору промислового об'єкта та використанні фрагментарних структур. Для забезпечення необхідної точності та надійності, врахування просторових та економічних критеріїв використано метаевристичний еволюційний алгоритм, який надає можливість отримати субоптимальне рішення. Алгоритм реалізовано з використанням жадібної стратегії та подальшої адаптації популяції на основі мутацій та відбору.

Метод дає змогу враховувати конфігурацію майданчика, технічні обмеження радіусів дії технологій позиціонування та вимоги до щільності покриття. Розглянуто способи дискретизації майданчика на полігони, що можуть бути задані геометричними фігурами.

Новизна дослідження полягає у розробці методу розміщення сенсорів (якорів) на промислових об'єктах з урахуванням критичності окремих зон промислового майданчика, що надає можливість створювати гібридні системи та інтегрувати різні технології.

Практична цінність полягає у розробці алгоритму оптимізації розміщення сенсорів для проєктування систем позиціонування на динамічних об'єктах зі складною структурою — зокрема, у будівництві, логістиці та промисловості.

Подальші дослідження передбачають розширення можливостей використання методу за рахунок врахування масштабування об'єктів, порівняння різних метаевристичних стратегій оптимізації.

Ключові слова: гібридна система позиціонування, оптимальне розміщення сенсорів, еволюційний алгоритм, фрагментарні структури, критичність зон, метаевристика.

Вступ

У сучасному світі, де цифрові технології дедалі активніше інтегруються в критичні галузі промисловості, виникає потреба у розробці рішень, здатних забезпечити ефективне управління процесами, високий рівень безпеки та економічну доцільність впровадження. Серед таких рішень особливу роль відіграють системи позиціонування об'єктів, що стають невід'ємною складовою цифрової трансформації виробничих майданчиків.

Для галузей, які характеризуються високою мобільністю, динамічною зміною конфігурації

середовища та нестабільною інфраструктурою, доцільним є використання гібридних систем позиціонування. Такі системи поєднують декілька технологій для досягнення необхідної точності визначення координат із одночасним збереженням економічності рішення.

Через розширення габаритних розмірів будівельних майданчиків та ускладненням топології виробничих об'єктів зростає складність побудови ефективної архітектури систем позиціонування. Розміщення якорів, вибір технологій та стратегія покриття території мають прямий вплив на вартість впровадження, рівень точності, стабільність та масштабованість системи. В умовах обмежених ресурсів особливо актуальним стає завдання оптимізації – мінімізації кількості апаратних компонентів, забезпечуючи при цьому достатній рівень точності та надійності позиціонування.

Постановка проблеми

Сучасні вимоги до систем позиціонування об'єктів охоплюють не лише точність визначення координат, але й здатність адаптуватися до змін у конфігурації виробничих майданчиків, швидкість розгортання та економічність ефективності.

Популярність набувають гібридні системи позиціонування, які поєднують декілька технологій (GPS, Wi-Fi, UWB тощо), що надає можливість забезпечити високу точність у складних умовах, наприклад, у зонах з низьким покриттям супутникових сигналів або з наявністю великої кількості металевих конструкцій. Проте впровадження таких систем потребує ретельного проєктування архітектури: важливо не лише обрати відповідні технології, а й ефективно розмістити апаратні засоби для досягнення необхідного рівня покриття при мінімальних витратах.

Наявність різних підходів до побудови сенсорного покриття, зокрема, визначення кількості технологій позиціонування в окремих зонах, координат розташування сенсорів, способів дискретизації майданчику, вибір критеріїв оптимальності проєктних рішень.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Задача оптимального розміщення сенсорів для позиціонування об'єктів залишається актуальною в умовах зростання складності індустріальних майданчиків, зокрема відкритих територій з динамічно змінними умовами. Такі майданчики можуть мати несталі перешкоди, змінну геометрію та обмеження щодо доступу до енергоживлення, що робить традиційні схеми фіксованого розміщення сенсорів неефективними.

У роботі [1] було вперше системно досліджено розміщення сенсорів для позиціонування множини цілей на основі лише вимірів відстані. Проте у цій публікації розглядалися лише статичні конфігурації сенсорної мережі, без урахування змін у середовищі або рухомих перешкод.

Сучасні дослідження починають враховувати адаптивне (динамічне) формування сенсорних мереж. Зокрема, у статті [2] розроблено метод позиціонування об'єктів у просторі лише на основі даних про дальність розташування об'єктів від камери відеоспостереження, що застосовується до багатопозиційних радіолокаційних систем. Це рішення актуальне для відкритих майданчиків, де інші методи працюють нестабільно через обмеження або погодні умови.

Ще один підхід розглянуто у [3], де досліджено розміщення сенсорів на нерегулярних тривимірних поверхнях, що моделює складні архітектури об'єктів, таких як промислові установки чи техніка. Робота підкреслює необхідність врахування геометрії місцевості та мобільності об'єктів.

Також варто зазначити дослідження [4], у якому використовуються еволюційні алгоритми для визначення оптимального розміщення сенсорів у морських умовах. Хоча дослідження проводилося для підводних апаратів, воно демонструє ефективність генетичних алгоритмів у задачах, де розміщення має бути адаптивним до змін навколишнього середовища.

У [5] аналізується оптимальне та малопомітне розміщення сенсорів, що може бути корисним для об'єктів критичної інфраструктури, де є вимога до мінімального впливу сенсорної мережі на середовище або прихованості.

Загалом, аналіз літератури показує, що:

- більшість класичних підходів орієнтовані на фіксовані конфігурації сенсорів;

- сучасні дослідження все частіше розглядають необхідність адаптивних, мобільних та енергоефективних конфігурацій майданчиків;
- для оптимального розміщення сенсорів використовуються еволюційні, градієнтні, мультикритеріальні методи;
- відкриті простори з динамічною структурою залишаються малодослідженою, але критично важливою проблемою, особливо в галузях будівництва, виробництва та логістики.

Цілі та проблеми дослідження

Метою дослідження є розробка методу та алгоритму розміщення сенсорів (якорів) на промислових об'єктах з урахуванням критичності окремих зон майданчика, що надає можливість забезпечити необхідну точність позиціонування при мінімальних витратах на обладнання. Основними цілями роботи є:

- дослідити вплив різних типів сіток (трикутна, квадратна, гексагональна) на якість сенсорного покриття;
- провести порівняльний аналіз ефективності різних конфігурацій сенсорного покриття в умовах різної топології об'єктів;
- запропонувати метод оптимального розміщення сенсорів з урахуванням геометрії майданчика, обмежень по радіусу дії та вимог до точності;
- реалізувати алгоритм по оптимальному розміщенню сенсорів на майданчиках.

Проблеми дослідження:

- висока варіативність топологій промислових майданчиків ускладнює побудову універсального підходу до розміщення сенсорів;
- обмеження у кількості обладнання потребують мінімізації кількості сенсорів без втрати точності;
- необхідність врахування динамічних змін середовища підвищує складність моделювання;
- відсутність уніфікованих критеріїв оптимальності для адаптивного проектування сенсорної мережі;
- недостатня адаптивність класичних методів до умов змінної структури середовища.

Виклад основного матеріалу

При проектуванні систем позиціонування на об'єктах із динамічною конфігурацією ключовим аспектом є формування ефективної топології сенсорної мережі. Точність, надійність таких систем визначається щільністю покриття та просторовим розміщенням сенсорів у відповідності до функціонального значення кожної зони. Особливо це важливо у промислових середовищах, де геометрія майданчика відхиляється від ідеально прямокутної, а вимоги до точності позиціонування суттєво варіюються залежно від розташування об'єкта. При позиціонуванні особливо важливо, що територія зазвичай неоднорідна — як за геометрією, так і за рівнем критичності до точності локалізації.

У зв'язку з великою площею території та її динамічністю в процесі виконання робіт, запропоновано поділ майданчика на три основні типи зон відповідно до рівня вимог до точності позиціонування та впливів, що можуть спричинити похибки. Такий підхід надає можливість адаптувати конфігурацію сенсорної мережі до умов середовища та забезпечити баланс між точністю, стабільністю та вартістю реалізації.

Критичні зони охоплюють ділянки з підвищеним рівнем ризику, інтенсивним рухом об'єктів, наявністю техніки або виконанням точних технологічних операцій. У цих зонах часто спостерігається значна кількість металоконструкцій, динамічних об'єктів і змін у конфігурації простору, що суттєво ускладнює стабільне позиціонування. Для забезпечення необхідної точності доцільно застосовувати комбіноване використання трьох технологій — UWB, Wi-Fi-позиціонування та супутникові технології.

Середньокритичні зони характеризуються відносною стабільністю середовища, меншою щільністю об'єктів та менш вираженим впливом перешкод. Точність позиціонування в цих зонах також важлива, але допустимі ширші межі похибки. У таких умовах доцільним є використання

двох технологій — наприклад, Wi-Fi та GPS — які забезпечують прийнятний баланс між точністю та ресурсними витратами.

Низькокритичні зони охоплюють віддалені частини майданчика, зони складування або стоянки техніки, де відсутня постійна активність і динамічна зміна простору. У цих зонах допустимі відхилення, а впровадження високотехнологічних засобів позиціонування є економічно недоцільним. Тому для базового контролю присутності об'єктів застосовується супутникове позиціонування, як найбільш універсальне і доступне рішення.

Зонування надає можливість створити гнучку і масштабовану систему позиціонування, оптимізовану під умови експлуатації та потреби різних частин майданчика.

Для побудови ефективної конфігурації мережі сенсорів в межах критичних зон необхідно провести їх дискретизацію, для поділу простору на полігони, в межах яких сенсорна щільність і топологія можуть бути чітко визначені. Така дискретизація має кілька важливих функцій:

- локалізація джерел потенційних похибок — надає змогу визначити, в яких конкретно ділянках простору необхідно підвищити щільність сенсорів або застосувати додаткові технології;
- моделювання просторових характеристик покриття — кожен полігон може мати свій набір метричних параметрів, що надає змогу обґрунтовано формувати конфігурацію сенсорної сітки;
- підготовка до застосування оптимізаційних алгоритмів — визначення мінімальної кількості сенсорів при забезпеченні необхідного рівня точності;
- гнучке масштабування — у разі розширення або перебудови зони, сенсорна мережа оновлюється без повного перерахунку всієї гібридної системи позиціонування.

Для реалізації запропонованого підходу до побудови сенсорної мережі пропонується дослідити вплив геометричної форми полігонів на якість покриття майданчиків різних топологій:

- майданчик правильної прямокутної форми характеризується простими геометричними межами, відсутністю внутрішніх перешкод і максимальною симетрією (рис.1,а). Такий тип є базовим прикладом, який надає змогу оцінити ефективність різних структур заповнення в умовах, близьких до ідеальних;
- майданчик із внутрішнім вирізом П-подібної форми характеризується наявністю внутрішніх порожнин, коридорів або технічних проїздів, що ускладнюють рівномірне покриття території (рис.1, б);
- майданчик складної конфігурації з нерегулярними або комбінованими геометричними особливостями, асиметрією, виступами та функціональними сегментами. Така конфігурація близька до реальних промислових майданчиків із непередбачуваними перешкодами, тимчасовими конструкціями або змінною топографією (рис.1,в).

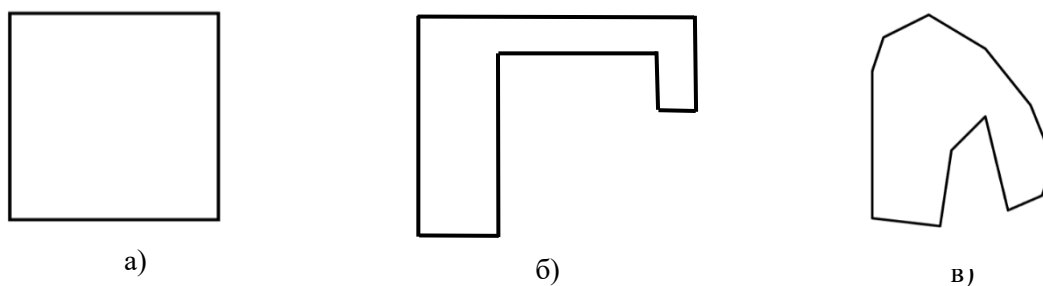


Рис.1. Топологія майданчиків

Для забезпечення коректної роботи технологій позиціонування, таких як UWB та Wi-Fi, необхідно дотримуватись просторових вимог щодо кількості доступних референсних точок у межах зони видимості сенсору. Для забезпечення однакових умов порівняння ефективності дискретизації для різних типів сіток було виконано розрахунок довжини сторони базового геометричного елемента. Розрахунок довжини базового геометричного елемента здійснювався з урахуванням обраного середнього радіуса дії технології позиціонування, а також вимоги наявності не менше трьох якірних точок у зоні локалізації. Параметри технологій наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Параметрів технологій

Технологія	Тип покриття	Радіус дії R, м	Мін. кількість якорів	Бажане перекриття зон
UWB	локальне	15	≥ 3	100%
WiFi	локальне	30	≥ 3	90%
GPS	глобальне	∞	-	-

Реалізовано дискретизацію простору з використанням трьох різних базових геометричних елементів: рівносторонніх трикутників (рис.2, а), квадратів (рис.2, б) та правильних шестикутників (рис.2, в) для різних типів майданчиків.

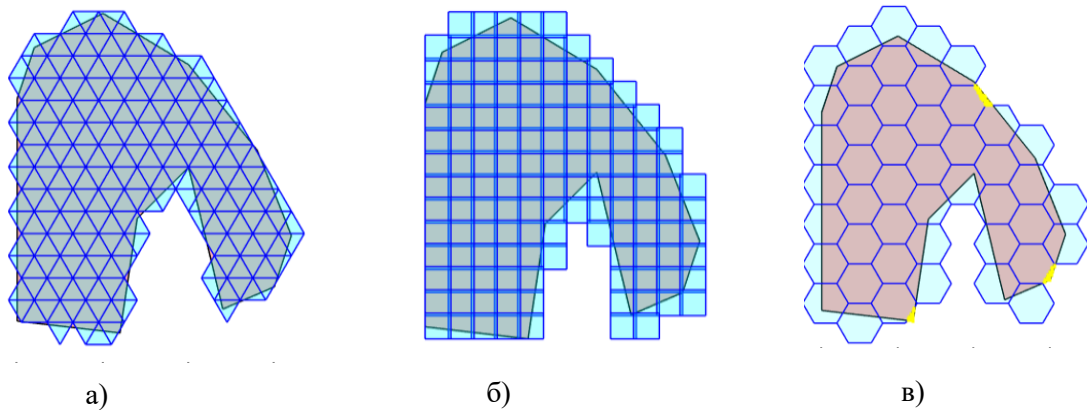


Рис.2. Дискретизація простору з використанням базових геометричних елементів

Для кожного вузла сітки виконуються умова: не менше 3 сенсорів на відстані не більше R, де R – радіус дії технології.

Тоді сторона полігона a_k у формі квадрату визначається за формулою (1):

$$a_k \leq \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

де a_k - сторона полігона у формі квадрату.

У трикутній сітці сторона a_t трикутника визначається за формулою (2):

$$a_t \leq R, \quad (2)$$

де a_t - сторона полігона у формі трикутника.

У гексагональній структурі відстань між центрами суміжних гексагонів дорівнює стороні гексагона $a_{ш}$, тож аналогічно:

$$a_{ш} \leq \frac{2R}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

де $a_{ш}$ - сторона полігона у формі шестикутника (гексогону).

Кожен із типів геометричних елементів має свої особливості, що впливають на щільність покриття, кількість необхідних сенсорів, обчислювальну складність та стійкість до геометричних викривлень майданчика:

- квадратна дискретизація є найпростішою в реалізації, легко масштабується, але може створювати «мертві зони» в складних формах.

- трикутна сітка надає змогу досягти максимальної щільності покриття, особливо в зонах з вузькими та витягнутими ділянками або асиметричними структурами.

- гексагональна сітка забезпечує компроміс між щільністю та економією кількості сенсорів, оскільки мінімізує дублювання зони покриття між сусідніми вузлами.

Паралельно з типом сітки було протестовано різні алгоритми заповнення простору. У зв'язку з тим, що в критичних зонах застосовується комбіноване використання кількох технологій позиціонування для досягнення максимальної точності, основна увага при формуванні сенсорного покриття приділяється центральній частині майданчика, де зосереджені найбільш динамічні та небезпечні процеси (рис.3). Периферійні області, які зазвичай мають нижчий рівень активності та менше схильні до просторових змін, не потребують такої щільності сенсорного покриття, оскільки похибки позиціонування в цих зонах проявляються менш критично.

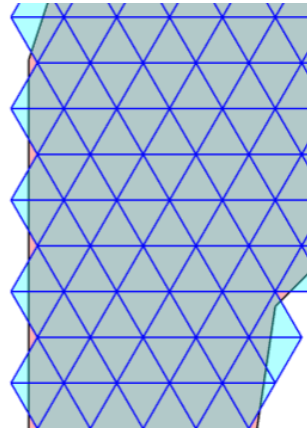


Рис.3. Зниження щільності сенсорного покриття на периферії майданчика при центроорієнтованому заповненні

Результати та обговорення

Результати моделювання заповнення з використанням трьох типів сітки: квадратної, трикутної та гексагональної наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння покриття площі та кількості елементів

Тип майданчика	Тип сітки	Покриття, %	Кількість елементів
Прямокутна	Квадратна	100	729
	Трикутна	99,85	1674
	Гексагональна	99,71	303
П-подібна	Квадратна	100	411
	Трикутна	100	790
	Гексагональна	99,21	143
Складна конфігурація майданчика	Квадратна	100	131
	Трикутна	99,64	223
	Гексагональна	99,48	46

Ключовими критеріями оцінки ефективності стали: відсоток покриття площі, кількість елементів дискретизації, середня точність позиціонування, середнє число якорів на одну точку позиціонування, а також інтегральна вартість реалізації.

З наведених даних видно, що трикутна сітка забезпечує найвищу щільність покриття в умовах складної геометрії, хоча потребує більшої кількості сенсорів. Гексагональна забезпечує меншу кількість елементів, але дещо поступається за охопленням, особливо на нерегулярних межах.

Для аналізу впливу структури сітки на просторову ефективність та точність позиціонування, було проведено серію експериментів з різними варіантами розміщення сенсорів для кожної з трьох розглянутих форм майданчиків. У кожному випадку дискретизація виконувалась відповідно до обраного типу сітки: квадратної, трикутної або гексагональної.

Оцінювання здійснювалося за такими критеріями: середня точність позиціонування, кількість якорів на одну точку (показник надмірності покриття), а також покриття сенсорами критичної зони.

Результати розміщення сенсорів у вузлах елементів сітки для кожної з конфігурацій майданчиків узагальнено в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння точності

Тип майданчика	Тип сітки	Точність (м)	Якорів/точку	Покриття (%)	Кількість сенсорів
Прямокутна	Квадрат	0,24	4,13	96,96	961
	Трикутник	0,15	7,05	99,97	1674
	Гексагон	0,24	4,64	96,32	378
П-подібна	Квадрат	0,24–0,54	4,02	93,76–100	455–529
	Трикутник	0,15	3,32–6,65	87,4–99,8	362–729
	Гексагон	0,24	4,64	96,32	378
Складна конфігурація майданчика	Квадрат	0,15–0,36	3,04–3,72	75,34–86,69	119
	Трикутник	0,15	4,28–6,5	94,41–99,55	131–223
	Гексагон	0,15–0,54	1,56–8,14	6,72–98,6	55–244

Згідно з аналізом, трикутна дискретизація демонструє найкращі показники точності на всіх типах майданчиків. Проте вона має і найбільшу середню кількість якорів на одну точку, що прямо впливає на вартість. Гексагональна сітка забезпечує компроміс: вона значно скорочує кількість сенсорів, зберігаючи достатній рівень точності для середньокритичних зон.

З урахуванням особливостей промислових майданчиків і необхідності адаптивного підходу до побудови сенсорної мережі нами було сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації, основною метою якої є мінімізація витрат на реалізацію системи позиціонування за умови дотримання заданого рівня точності в критичних зонах.

При вирішенні задачі оптимізації враховуємо:

- кожна точка критичної зони повинна бути в зоні дії не менше трьох якорів відповідної технології;
- максимальна відстань між сенсорами не перевищує допустимий радіус;
- мінімізація покриття в зонах низької критичності.

Для ефективної побудови системи позиціонування на промислових майданчиках надзвичайно важливо враховувати сукупність факторів, що впливають на точність, надійність і вартість реалізації: геометрію майданчика, просторову диференціацію зон, обмеження за радіусом дії сенсорів, вимоги до кількості якорів у зоні та рівень допустимої похибки. З огляду на складність цих умов, доцільним є застосування метаевристичного методу оптимізації, зокрема еволюційного алгоритму, який надає змогу здійснити ефективний пошук конфігурацій сенсорного розміщення в багатовимірному просторі можливих рішень.

Для розв'язання задачі застосовано еволюційний підхід на фрагментарній структурі [7-10], де кожен полігон розглядається як окремий фрагмент рішення, а повне рішення будується поступово шляхом об'єднання фрагментів.

Цільова функція для кожного фрагменту формуються у вигляді:

$$F(x) = N(x) + \lambda_1 \cdot P_n(x) + \lambda_2 \cdot P_t(x), \quad (4)$$

де λ_1 , λ_2 — вагові коефіцієнти критеріїв оптимальності; x — вектор рішень, що описує конфігурацію розміщення сенсорів; $N(x)$ — функція, яка на вході приймає вектор x , і повертає кількість сенсорів у цій конфігурації; $P_n(x)$ — функція недостатнього покриття зон відповідно до їх критичності; $P_t(x)$ — функція низької точності позиціонування

Для оцінювання відповідності рівня покриття заданим вимогам критичності зони пропонується використання функції $P_n(x)$, яка враховує ступінь недостатності покриття в кожному трикутнику залежно від його типу критичності.

$$P_n(x) = \sum_{i=1}^N \begin{cases} \lambda_{WIFI} \cdot \max(0.3 - Cov_{WIFI})^2 + \lambda_{UWB} \cdot \max(0.3 - Cov_{UWB})^2, & \text{для } k_i = 1 \\ \lambda_{WIFI} \cdot \max(0.3 - Cov_{WIFI})^2, & \text{для } k_i = 2 \\ 0, & \text{для } k_i = 3 \end{cases} \quad (5)$$

де Cov_{WIFI}, Cov_{UWB} — фактичний рівень покриття відповідною технологією; $\lambda_{UWB}, \lambda_{WIFI}$ — вагові коефіцієнти, що відображають важливість забезпечення покриття відповідною технологією; k_i — тип критичності.

Значення 0,3 у формулі (5) відповідає мінімально допустимому рівню покриття відповідною технологією. Якщо фактичне покриття менше цієї межі, виникає штраф, який квадратично зростає зі збільшенням відхилення. Значення 0,3 визначено експертно на основі технічних вимог до точності позиціонування.

Для врахування точності позиціонування використовується функція $P_T(x)$

$$P_T(x) = \sum_{i=1}^N \begin{cases} \max(0, d_{max}^{i,UWB} - 15)^2 + \max(0, d_{max}^{i,WIFI} - 30)^2, & \text{для } k_i = 1 \\ \max(0, d_{max}^{i,WIFI} - 30)^2, & \text{для } k_i = 2 \\ 0, & \text{для } k_i = 3 \end{cases} \quad (6)$$

де $d_{max}^{i,WIFI}, d_{max}^{i,UWB}$ — максимальні відстані від якорів відповідної технології до точки i відповідною технологією;

Вирішення задачі еволюційним алгоритмом здійснювалося з урахуванням обмеження, відповідно до якого покриття критичних зон не повинно бути нижче за 90 %. Оптимізація проводилась з початкового розміщення сенсорів у вершинах рівносторонніх трикутників (рис. 4), що забезпечує рівномірне покриття зони. Для реалізації еволюційного підходу було використано 100 поколінь та популяцію розміром 50 особин, що дозволило забезпечити стійкий пошук із поступовим покращенням рішень. Показники для цієї конфігурації наведено у таблиці 4.

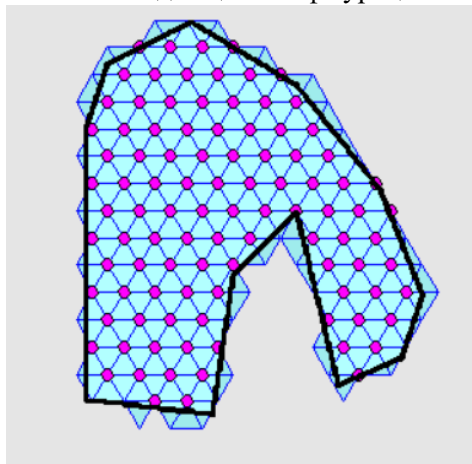


Рис. 4. Покриття критичної зони за допомогою трикутної дискретизації та розміщення сенсорів

Таблиця 4

Результати вирішення завдання еволюційним алгоритмом

Показник	Значення (до оптимізації) UWB, м	Значення (після оптимізації) UWB, м	Значення (до оптимізації) WiFi, м	Значення (після оптимізації) WiFi, м
Середня точність позиціонування в критичній зоні	0,15	0,15	2,8	2,8
Середнє число якорів на одну точку	4,01	3,52	7,1	5,9
Покриття критичної зони	100 %	90,02%	100 %	99.85%
Кількість сенсорів	135	115	135	28

На рисунку 5 представлено результати оптимального розміщення сенсорів для двох різних технологій позиціонування (Wi-Fi та UWB) на основі трикутної дискретизації критичної зони.

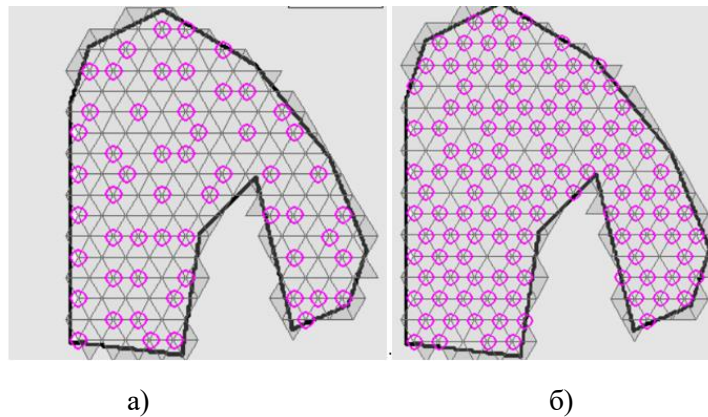


Рис. 5. Оптимальне розміщення сенсорів Wi-Fi та UWB у критичній зоні після еволюційної оптимізації

Результати оптимізації розміщення сенсорів для різних технологій (рис.5) показали, що зменшення кількості сенсорів без зниження точності локалізації для технології UWB складає 15%, для Wi-Fi - 79%. Отже, метаевристичний підхід забезпечує адаптивне налаштування конфігурації сенсорної мережі відповідно до геометрії майданчика, критичності зон і обмежень конкретного об'єкта. Це надає змогу досягти ефективного балансу між точністю, покриттям і вартістю, що робить запропоновану методику доцільною для застосування в реальних умовах — особливо на об'єктах з динамічною просторовою структурою.

Висновки

У статті запропоновано підхід до оптимізації розміщення сенсорної інфраструктури в гібридних системах позиціонування, орієнтований на умови динамічних виробничих майданчиків. Продемонстровано, що геометрія майданчика значно впливає на ефективність сенсорного покриття: чим складніша структура, тим більше є переваги трикутної дискретизації, яка забезпечує найвищу щільність і точність.

Для вирішення задачі оптимального розміщення сенсорів з урахуванням заданих вимог до точності було використано еволюційний алгоритм, який забезпечив адаптивне формування конфігурації сенсорної мережі.

Застосування метаевристичного підходу відкриває можливості для подальшого вдосконалення систем позиціонування, зокрема через використання інших методів оптимізації та розширення постановки задачі до багатокритеріальної форми, що дозволить одночасно оптимізувати вартість, точність і стійкість до відмов.

Перелік використаних джерел

- [1] Moreno-Salinas D., Pascoal A.M., Aranda J. Optimal Sensor Placement for Multiple Target Positioning with Range-Only Measurements in Two-Dimensional Scenarios // *Sensors*. — 2013. — Vol. 13, No. 8. — P. 10674–10710. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s130810674>
- [2] Wang Y., Ma S., Li X. Spatial Positioning Method Based on Range-Only Measurement of Multi-Station Radar // *Heliyon*. — 2023. — Vol. 9, Issue 12. — Article e21193. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21193>
- [3] Crespiello M., González-García C., Elosegui P., de Vicente P. Sensor Placement in an Irregular 3D Surface for Improving Localization Accuracy // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, No. 14. — Article 6316. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s23146316>
- [4] Moreno-Salinas D., Aranda J., Pascoal A.M. Genetic Algorithm to Solve Optimal Sensor Placement for Underwater Vehicle Localization // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22, No. 20. — Article 7655. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s22207655>
- [5] Shahmansoori A., Chorti A., Poor H.V. Stealthy Optimal Range-Sensor Placement for Target Localization // *arXiv preprint*. — 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2412.04316>

- [6] Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. — Addison-Wesley, 1989. — 412 p.
- [7] Deb K. Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. — Wiley, 2001. — 528 p.
- [8] I. V. Kozin, Fragment structures and evolutionary algorithms, in: O. Kiselyova (Ed.), Problems of applied mathematics and mathematical modeling: Collection of scientific works, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 2008, pp. 138–146. ISSN 2074-5893.
- [9] I. V. Kozin, N. K. Maksyshko, V. A. Perepelitsa, Fragmentary structures in discrete optimization problems 53 (2017) 931–936. doi:10.1007/s10559-017-9995-6.
- [10] I. V. Kozin, S. I. Polyuga, On properties of fragmentary structures (2012) 99–106. URL: <https://web.znu.edu.ua/herald/issues/2012/mat-1-2012/099-106.pdf>

Anastasiia Lebedieva-Dychko¹, Galina Shilo²

¹ Department of Computer Science, Zaporizhzhia National University, 66 Zhukovskogo str., Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: ldas.1405@gmail.com, ORCID 0009-0003-1931-1861

² Department of Computer Science, Zaporizhzhia National University, 66 Zhukovskogo str., Zaporizhzhia, Ukraine, E-mail: shilo.gn@gmail.com, ORCID 0000-0002-5020-6707

OPTIMIZATION OF SENSOR COVERAGE IN HYBRID POSITIONING SYSTEMS

Received: March 20, 2025 / Revised: March 25, 2025 / Accepted: March 31, 2025

© Lebedieva-Dychko A., Shilo G., 2025

Abstract. The paper considers the problem of optimizing the placement of sensors in hybrid positioning systems operating in dynamic production environments. Modern industrial facilities are characterized by a variable structure, the presence of mobile elements, complex topology, and equipment installation restrictions, which necessitates effective approaches to the design of positioning systems.

The aim of the study is to develop a method and algorithm for placing sensors (anchors) at industrial facilities, taking into account the criticality of certain areas of the site, which makes it possible to ensure the required positioning accuracy at minimal equipment costs.

A methodology for creating hybrid positioning systems based on zoning the space of an industrial facility and using fragmentary structures is proposed. To ensure the necessary accuracy and reliability, taking into account spatial and economic criteria, a metaheuristic evolutionary algorithm is used, which makes it possible to obtain a suboptimal solution. The algorithm is implemented using a greedy strategy and further adaptation of the population based on mutations and selection.

The method allows to take into account the site configuration, technical limitations of positioning technologies' radii of action, and requirements for coverage density. Methods of discretizing the site into polygons that can be defined by geometric shapes are considered.

The novelty of the study is the development of a method for placing sensors (anchors) at industrial facilities, taking into account the criticality of individual areas of the industrial site, which makes it possible to create hybrid systems and integrate different technologies.

The practical value lies in the development of an algorithm for optimizing the placement of sensors for the design of positioning systems on dynamic objects with a complex structure, in particular, in construction, logistics, and industry.

Further research involves expanding the possibilities of using the method by taking into account the scaling of objects, comparing different metaheuristic optimization strategies.

Keywords: hybrid positioning system, optimal sensor placement, evolutionary algorithm, fragmented structures, criticality of zones, metaheuristics.