

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЛЕБЕДЄВА-ДИЧКО АНАСТАСІЯ СЕРГІЇВНА

УДК [004.722.45:621.396.946]:[528.85:69](043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів
на промислових майданчиках

Спеціальність: 122 Комп'ютерні науки
Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.С. Лебедєва-Дичко
Науковий керівник: Шило Галина Миколаївна,
доктор технічних наук, професор

Запоріжжя – 2025

АНОТАЦІЯ

Лебедєва-Дичко А.С. Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Запорізький національний університет, Запоріжжя, 2025.

В дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу підвищення ефективності систем позиціонування об'єктів шляхом розроблення методів та моделей проєктування, що забезпечують визначення оптимальної структури сенсорної мережі та процесів збору, зберігання та обробки даних.

У першому розділі дисертаційної роботи здійснено аналіз основних етапів проєктування систем позиціонування об'єктів, а також проведено комплексне дослідження сучасного стану технологій, що використовуються для визначення просторового положення об'єктів на промислових майданчиках. Особливу увагу приділено аналізу принципів функціонування глобальних та локальних систем позиціонування. Розглянуто технічні аспекти реалізації зазначених систем, зокрема апаратну складову, методи збору, передавання та обробки даних. Проаналізовано обмеження, притаманні як глобальним, так і локальним технологіям у контексті промислового середовища, зокрема чутливість до електромагнітних завад, багатопроменевість сигналу, екранування конструкціями тощо. У зв'язку з виявленими обмеженнями обґрунтовано необхідність проведення експериментальних досліджень з метою вивчення впливу завад на точність і стабільність функціонування систем позиціонування у реальних умовах експлуатації.

У другому розділі проведено комплексний аналіз ефективності функціонування глобальних та локальних технологій позиціонування в умовах промислових майданчиків. Особливу увагу приділено оцінці точності,

стабільності сигналу, стійкості до перешкод і чутливості до змін конфігурації середовища. Встановлено, що жодна з технологій окремо не забезпечує необхідного рівня точності та надійності в умовах відкритих територій із великою кількістю металевих конструкцій, змінною забудовою та значними електромагнітними завадами. Це підтвердило доцільність і обґрунтованість використання гібридного підходу, що об'єднує переваги різних типів технологій для досягнення високого рівня позиціонування за критеріями точності, покриття, вартості та енергоспоживання. Тому гібридні системи позиціонування є перспективним напрямом для задоволення цих вимог. Поєднання глобальних та локальних технологій надає можливість компенсувати недоліки кожної з окремих систем, підвищуючи загальну надійність і точність позиціонування навіть у несприятливому середовищі.

У третьому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз ключових чинників ефективного впровадження гібридних систем позиціонування, серед яких – оптимальне розміщення сенсорів. У роботі реалізовано підхід, що ґрунтується на геометричній дискретизації простору з подальшим поділом території на зони критичності. Формування таких зон здійснюється на основі аналізу інтенсивності виконання технологічних операцій, маршрутів переміщення персоналу та техніки, наявності фізичних перешкод, а також рівня потенційних ризиків для точності позиціонування. Запропонований метод допомагає організувати диференційований вибір технологій позиціонування для кожної зони, що дозволяє реалізувати адаптивну конфігурацію системи відповідно до важливості та особливостей окремих ділянок майданчика. Для розв'язання задачі оптимізації сенсорної мережі використано еволюційний алгоритм, який надає можливість ефективно знаходити субоптимальні розв'язки, а також метод координатного спуску для локального покращення знайдених рішень і досягнення більш точного налаштування конфігурації мережі. Такий підхід сприяє мінімізації надлишкових витрат, підвищенню загальної ефективності системи, а також гарантує її масштабованість і адаптивність у разі змін конфігурації виробничого середовища або умов експлуатації.

У четвертому розділі дисертаційної роботи запропоновано технологію проєктування гібридної системи позиціонування об'єктів, що забезпечує підхід до побудови систем із урахуванням вимог до точності, надійності, вартості та динамічних змін просторової конфігурації промислового майданчика. На основі запропонованої технології реалізовано архітектурний патерн, який охоплює сенсорний рівень, рівень обробки, збереження даних та рівень управління та інтерфейсу. Така архітектура забезпечує стабільний доступ до збережених даних сенсорної мережі у реальному часі, надає можливість накопичувати й аналізувати дані історії переміщення об'єктів, а також здійснювати моніторинг активності в різних функціональних зонах майданчика. Однією з переваг запропонованої архітектури є її масштабованість, що надає можливість адаптувати систему до змін просторової конфігурації без необхідності повного перепроєктування. Важливою особливістю є використання паралельних обчислень на рівні обробки інформації, що дозволяє ефективно працювати з великими обсягами даних у випадках збільшення кількості контрольованих об'єктів або сенсорних точок. У роботі також розроблено методику вибору технологій позиціонування на основі багатофакторної класифікації об'єктів розгортання. При цьому враховуються такі характеристики, як тривалість реалізації проєкту, масштаб об'єкта, тип середовища, рівень необхідної точності та фінансові обмеження. На основі проведеного аналізу сформовано типові комбінації глобальних і локальних технологій позиціонування для різних сценаріїв розгортання систем. Запропонований підхід сприяє формалізації процесу прийняття інженерних рішень, мінімізації ризиків інженерних помилок під час проєктування та підвищенню ефективності впровадження.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні методу розрахунку координат об'єкта з урахуванням використання глобальних і локальних технологій позиціонування та фільтрації шумів, що забезпечує підвищення точності та надійності в умовах змінної конфігурації простору. Отримав подальший розвиток метод геометричної дискретизації території майданчика, який дозволяє адаптувати систему до рівня критичності сигналу в окремих зонах.

У межах дослідження вперше запропоновано метод оптимізації сенсорної мережі, що враховує зони з різним рівнем критичності, радіус дії обладнання та вимоги до точності, що забезпечує не лише ефективне масштабування системи, але й її мобільність. Також вперше розроблено технологію проєктування гібридної системи позиціонування, яка передбачає багаторівневу організацію з можливістю гнучкого розгортання, обробки та візуалізації великих обсягів даних, а також адаптацію до умов експлуатації.

Практична цінність проведеного дослідження полягає в можливості використання отриманих результатів для підвищення ефективності проєктування та впровадження гібридних систем позиціонування в реальних промислових умовах. Зокрема, встановлено закономірності впливу зовнішніх факторів на точність функціонування окремих технологій позиціонування. Це дозволяє здійснювати обґрунтований вибір технічних рішень відповідно до специфіки середовища. На основі розробленої геометричної моделі дискретизації з урахуванням зон критичності реалізовано підхід до автоматизованого проєктування конфігурації сенсорної мережі, що підвищує адаптивність системи до змін у просторі та динаміці процесів на промислових майданчиках. Розроблений алгоритм оптимізації кількості та розміщення сенсорів дозволяє мінімізувати витрати на інфраструктуру при збереженні заданих параметрів точності й надійності, що особливо важливо в умовах обмеженого фінансування. В межах запропонованої технології проєктування системи позиціонування було розроблено багаторівневий архітектурний патерн. Окрему увагу приділено створенню методики вибору комбінацій глобальних та локальних технологій залежно від типу майданчика, характеристик середовища й вимог до точності, що надає можливість створювати практично-орієнтовані, техніко-економічно обґрунтовані рішення для моніторингу переміщення об'єктів у складних умовах промислової експлуатації.

Отже, у дисертаційній роботі послідовно розкрито теоретичні та прикладні аспекти проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках. Гібридні системи позиціонування можуть бути

основою для впровадження рішень з моніторингу технічних об'єктів і персоналу, автоматизованого контролю за технологічними процесами, а також знайти застосування у сфері охорони праці, будівництві та військово-промисловому комплексі.

Ключові слова: архітектурні патерни, автоматизація проєктування, багатокритеріальне оцінювання, геометрична дискретизація, гібридна мережа сенсорів, декларативний підхід, кеш, масштабованість, мікросервіси, надійність, оптимізація, паралельні обчислення, субоптимальний розв'язок, система моніторингу, численні відмови.

ABSTRACT

Lebedieva-Dychko A.S. Methods for designing hybrid systems for positioning objects at industrial sites – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 122 "Computer Science." – Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, 2025.

The dissertation solves the scientific and technical problem of improving the efficiency of object positioning systems by developing design methods and models that ensure the determination of the optimal structure of the sensor network and the processes of data collection, storage and processing.

The first chapter of the dissertation analyses the main stages of designing object positioning systems and conducts a comprehensive study of the current state of technologies used to determine the spatial position of objects at industrial sites. Particular attention is paid to analyzing the principles of global and local positioning systems. The technical aspects of the implementation of these systems are considered, in particular the hardware component, methods of data collection, transmission and processing. The limitations inherent in both global and local technologies in the context

of the industrial environment are analyzed, in particular sensitivity to electromagnetic interference, signal multipath, shielding by structures, etc. In view of the identified limitations, the need for experimental research to study the impact of interference on the accuracy and stability of positioning systems in real operating conditions is justified.

The second chapter provides a comprehensive analysis of the effectiveness of global and local positioning technologies in industrial sites. Particular attention is paid to the assessment of accuracy, signal stability, resistance to interference, and sensitivity to changes in the environment configuration. It was found that none of the technologies alone provides the required level of accuracy and reliability in open areas with a large number of metal structures, variable buildings and significant electromagnetic interference. This confirmed the feasibility and validity of using a hybrid approach that combines the advantages of different types of technologies to achieve a high level of positioning in terms of accuracy, coverage, cost, and energy consumption. Therefore, hybrid positioning systems are a promising direction for meeting these requirements. The combination of global and local technologies makes it possible to compensate for the shortcomings of each individual system, increasing the overall reliability and accuracy of positioning even in unfavorable environments.

The third chapter of the dissertation analyses the key factors for the effective implementation of hybrid positioning systems, including the optimal placement of sensors. The work implements an approach based on geometric discretization of space with subsequent division of the territory into critical zones. These zones are formed based on an analysis of the intensity of technological operations, the routes of personnel and equipment movement, the presence of physical obstacles, and the level of potential risks to positioning accuracy. The proposed method helps to organize a differentiated selection of positioning technologies for each zone, which allows for the implementation of an adaptive system configuration in accordance with the importance and characteristics of individual areas of the site. To solve the problem of optimizing the sensor network, an evolutionary algorithm is used, which makes it possible to effectively find suboptimal solutions, as well as a coordinate descent method for local

improvement of the solutions found and achieving a more accurate configuration of the network. This approach helps minimize excess costs, increase the overall efficiency of the system, and ensure its scalability and adaptability in case of changes in the configuration of the production environment or operating conditions.

The fourth chapter of the dissertation proposes a technology for designing a hybrid object positioning system that provides an approach to building systems that take into account the requirements for accuracy, reliability, cost, and dynamic changes in the spatial configuration of an industrial site. Based on the proposed technology, an architectural pattern has been implemented that covers the sensor level, processing level, data storage level, and management and interface level. This architecture provides stable access to stored sensor network data in real time, enables the accumulation and analysis of object movement history data, and allows for the monitoring of activity in different functional areas of the site. One of the advantages of the proposed architecture is its scalability, which makes it possible to adapt the system to changes in spatial configuration without the need for complete redesign. An important feature is the use of parallel computing at the information processing level, which allows you to work effectively with large amounts of data in cases of an increase in the number of controlled objects or sensor points. The paper also develops a methodology for selecting positioning technologies based on a multifactorial classification of deployment objects. This takes into account characteristics such as project duration, object scale, environment type, required accuracy level, and financial constraints. Based on the analysis, typical combinations of global and local positioning technologies for different system deployment scenarios have been formed. The proposed approach contributes to the formalization of the engineering decision-making process, minimization of the risks of engineering errors during design, and increased implementation efficiency.

The scientific novelty of the work lies in the improvement of the method for calculating the coordinates of an object, taking into account the use of global and local positioning technologies and noise filtering, which ensures increased accuracy and reliability in conditions of variable space configuration. The method of geometric

discretization of the site area has been further developed, allowing the system to be adapted to the signal criticality level in individual zones. Within the framework of the study, a method for optimizing the sensor network was proposed for the first time, which takes into account zones with different levels of criticality, the radius of action of the equipment and accuracy requirements, ensuring not only effective scaling of the system, but also its mobility. Also, for the first time, a technology for designing a hybrid positioning system has been developed, which provides for a multi-level organization with the possibility of flexible deployment, processing and visualization of large amounts of data, as well as adaptation to operating conditions.

The practical value of the research lies in the possibility of using the results obtained to improve the efficiency of designing and implementing hybrid positioning systems in real industrial conditions. In particular, the patterns of the influence of external factors on the accuracy of individual positioning technologies have been established. This allows for an informed choice of technical solutions in accordance with the specifics of the environment. Based on the developed geometric discretization model, taking into account critical areas, an approach to the automated design of the sensor network configuration has been implemented, which increases the adaptability of the system to changes in space and the dynamics of processes at industrial sites. The developed algorithm for optimizing the number and placement of sensors allows minimizing infrastructure costs while maintaining the specified accuracy and reliability parameters, which is especially important in conditions of limited funding. Within the framework of the proposed positioning system design technology, a multi-level architectural pattern was developed. Particular attention is paid to the creation of a methodology for selecting combinations of global and local technologies depending on the type of site, environmental characteristics and accuracy requirements, which makes it possible to create practical, technically and economically sound solutions for monitoring the movement of objects in complex industrial operating conditions.

Thus, the dissertation consistently reveals the theoretical and applied aspects of designing hybrid systems for positioning objects at industrial sites. Hybrid positioning systems can be the basis for the implementation of solutions for monitoring technical

objects and personnel, automated control of technological processes, and can also be used in the field of occupational safety, construction and the military-industrial complex.

Keywords: architectural patterns, design automation, multicriteria evaluation, geometric sampling, hybrid sensor network, declarative approach, cache, scalability, microservices, reliability, optimisation, parallel computing, suboptimal solution, monitoring system, multiple failures.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Шило Г. М., **Лебедєва-Дичко А. С.** Аналіз точності позиціонування за допомогою супутникових систем та фільтрація шумів у промислових умовах / Г. М. Шило, А. С. Лебедєва-Дичко // *Computer Science and Applied Mathematics*. – 2024. – № 2. – С. 102–108.
2. **Лебедєва-Дичко А. С.**, Шило Г. М. Оптимізація сенсорного покриття в гібридних системах позиціонування / А. С. Лебедєва-Дичко, Г. М. Шило // *Computer Design Systems. Theory and Practice*. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 300–309.
3. **Лебедєва-Дичко А. С.** Архітектура систем позиціонування об'єктів на будівельних майданчиках / А. С. Лебедєва-Дичко // *Computer Science and Applied Mathematics*. – 2025. – № 1. – С. 119–127.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Romaniuk D., **Lebedieva-Dychko A.**, Shilo G., Pysarskyi A., Shaptala S. Indoor and Outdoor Positioning Technology at the Industrial Enterprises. Тиждень науки–2020. Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 13–17 квітня 2020. С. 58–60.
5. Shilo G., Romaniuk D., Pysarskyi A., **Lebedieva-Dychko A.** Cost-Effective Indoor Positioning Using IoT Solutions. *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems (SWS IDAACS)*. 2020. Dortmund, Germany.
6. **Lebedieva-Dychko A.**, Shilo G. Outdoor Positioning for Industrial Workplace. *Proceedings of the 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems of Microelectronics (CADSM)*. 2023. IEEE. DOI: 10.1109/CADSM58174.2023.10076493.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ	22
1.1 Аналіз структури та етапів проєктування систем позиціонування об'єктів	22
1.2 Аналіз глобальних та локальних технологій позиціонування об'єктів	32
1.3 Аналіз методів збору, обробки, передачі даних в системах позиціонування	41
1.4 Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації для розв'язку задачі розміщення сенсорів на промислових майданчиках	52
1.5 Висновки та постановка задач дослідження	56
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ	59
2.1 Технології позиціонування за допомогою GPS	59
2.2 Технології позиціонування на основі Wi-Fi	63
2.3 Технології позиціонування з використанням системи Starlink PNT	72
2.4 Технології позиціонування на основі UWB	82
2.5 Висновки	86
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ У ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ ПОЗИЦІОНУВАННЯ	89
3.1. Постановка задачі оптимізації структури сенсорної мережі	89

3.2. Геометричні моделі дискретизації простору промислового майданчика	94
3.3. Метаевристичні підходи до оптимізації структури сенсорної мережі	103
3.4. Аналіз результатів оптимізації	112
3.5 Висновки	116
РОЗДІЛ 4. АРХІТЕКТУРНИЙ ПАТЕРН ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ	117
4.1. Технологія проєктування системи позиціювання	117
4.2 Апаратна та програмна реалізація архітектурного патерна гібридної системи позиціонування	122
4.3 Методика вибору технологій позиціонування об'єктів	133
4.4 Висновки	142
ВИСНОВКИ	144
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	146
ДОДАТКИ	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BLE – Bluetooth Low Energy.

GNSS – Global Navigation Satellite System.

GPS – Global Positioning System.

IMU – Inertial Measurement Unit.

IoT – Internet of Things.

LTE – Long-Term Evolution.

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport.

RFID – Radio-Frequency Identification.

RSSI – Received Signal Strength Indicator.

RTLS – Real-Time Locating System.

TDoA – Time Difference of Arrival.

ToF – Time of Flight.

UWB – Ultra-Wideband.

Wi-Fi – Wireless Fidelity.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах питання безпеки та ефективного управління виробничими процесами є пріоритетними, особливо в контексті виконання робіт у промислових зонах. Однією з ключових складових забезпечення безпеки є позиціонування об'єктів, зокрема персоналу та технічних засобів, у реальному часі. Ці функції реалізуються у межах інтегрованої системи моніторингу, яка дозволяє не лише фіксувати положення об'єктів, а й здійснювати контроль переміщень, аналіз активності та оперативне виявлення відхилень від допустимих сценаріїв поведінки. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах динамічно змінюваного середовища, де відсутні стаціонарні орієнтири, а конфігурація простору постійно змінюється через переміщення конструкцій, техніки, появи нових об'єктів або руйнування старих в ході виконання робіт. Згідно з [1], використання RTLS (Real-Time Locating Systems) дозволяє значно скоротити кількість інцидентів на будівництві, забезпечуючи оперативне виявлення небезпечних ситуацій та швидке реагування на них. Наявність точної інформації про місцезнаходження працівників, техніки та матеріалів також сприяє оптимізації управління ресурсами, дозволяючи мінімізувати простой, уникати дублювання робіт та підвищувати загальну продуктивність. Як показано в [2], різні типи технологій (RFID, UWB, GPS) можуть бути адаптовані для конкретних підсистем: контроль переміщення персоналу, автоматизоване ведення обліку обладнання, інтеграція з системами диспетчеризації.

Впровадження систем позиціонування на промислових майданчиках супроводжується рядом викликів:

- динамічна конфігурація майданчика, що змінюється через виробничі процеси (зведення конструкцій, переміщення техніки), значно ускладнює налаштування й адаптацію систем;
- металеві конструкції та обладнання спричиняють багатопроменевість,

затінення сигналу та резонанс;

– точність позиціонування є ключовим фактором, тому що похибка в кілька метрів може стати критичною для контролю доступу до небезпечних зон.

Крім того, в умовах промислового середовища спостерігаються численні відмови окремих компонентів системи позиціонування, спричинені вібраціями, пилом, екстремальними температурами та нестабільним енергоживленням. Це вимагає врахування відмовостійкості на етапі проектування.

Попри наявність великої кількості технологій позиціонування більшість із них демонструють високу точність лише в контрольованих або стаціонарних умовах. У разі застосування цих технологій на об'єктах із змінною топологією, наприклад, будівельних майданчиків, кар'єрах, нафтових платформах, виникають численні проблеми, пов'язані з втратою сигналу, відбиттям хвиль, впливом металевих конструкцій та тимчасових перешкод. Це зумовлює необхідність частого перепроєктування системи, зміни розміщення сенсорів, збільшення кількості контрольних точок і, відповідно, зростання вартості системи та складності її обслуговування.

У зв'язку з цим виникає потреба у створенні адаптивних, гнучких та економічно доцільних рішень, здатних забезпечувати високу точність позиціонування та можливість роботи з великими даними навіть в умовах динамічної просторової конфігурації. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є розробка гібридних систем позиціонування, які інтегрують можливості декількох технологій навігації, забезпечити оптимальне покриття.

Вагомий внесок у розвиток теоретичних та прикладних аспектів проектування систем моніторингу та позиціонування, здійснили дослідники: К. J. Ray Liu [3, 4], Victor Bahl [5, 6], Г.В. Фесенко, В.С. Харченко [7-8], А.О. Саченко [9], В.В. Конін [10, 11] та інші.

У сфері побудови математичних моделей, які застосовуються для задач оптимального покриття та розміщення, розв'язання комбінаторних задач, значний вклад внесли: В.В. Бескоровайний [12-14], І.В.Козін [15-17], В. Л.

Рвачовим [18-20], J. O'Rourke [21, 22], M. de Berg [23], M. S. Floater [24, 25], та інші.

У сфері обробки великих даних, а також розподілених та паралельних обчислень, суттєвий внесок зробили такі дослідники, як Matei Zaharia [26-29], Sajal K. Das [30-33], Ю.Г.Стоян [34], С.І. Гоменюк [35-37]. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених підвищенню ефективності систем позиціонування, аналіз їх сучасного стану виявив протиріччя між зростаючими вимогами до точності, надійності функціонування та необхідності зменшення витрат на проектування та експлуатацію таких систем. Це обумовлює актуальність науково-технічної задачі підвищення ефективності систем позиціонування об'єктів шляхом розроблення методів та моделей проектування, що забезпечують визначення оптимальної структури сенсорної мережі та процесів збору, зберігання та обробки даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Тема дисертаційного дослідження виконана у межах пріоритетного тематичного 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, а саме «Кіберфізичні системи. Інтернет речей. Робототехніка. Комп'ютерна обробка сигналів різних видів та походження», що визначено Постановами Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 та від 30 квітня 2024 року №476 [38-39].

Згідно затвердженої Кабінетом Міністрів України Стратегії цифрового розвитку інновацій України (WINWIN) до 2030 року тема дисертаційної роботи відповідає напрямкам імерсивні технології (цифрові двійники в будівництві та інфраструктурі) та оборонні технології (сенсори та системи отримання даних) [40].

Результати, що одержані в дисертаційній роботі відповідають основним наукових напрямам, що виконуються у Запорізькому національному університеті. Зокрема, робота виконувалася у відповідності до плану науково-

технічних робіт Запорізького національного університету при виконанні науково-дослідної теми: «Інтелектуальні методи пошуку субоптимальних розв'язків прикладних дискретних оптимізаційних задач» (номер державної реєстрації 0120U000375).

Мета і задачі дослідження: підвищення ефективності гібридних систем позиціонування об'єктів за рахунок розроблення моделей та методів проєктування для визначення структури сенсорної мережі та вдосконалення процесів збору, зберігання та обробки даних з урахуванням оптимального співвідношення вартості, точності та надійності для застосування на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз структури системи позиціонування об'єктів;
- визначити етапи проєктування систем позиціонування об'єктів, що потребують удосконалення проєктних процедур та впровадження методів підвищення точності та надійності визначення координат об'єктів;
- провести комплексний аналіз сучасних глобальних та локальних технологій позиціонування об'єктів з точки зору точності та надійності у промислових умовах з високим рівнем завад;
- розробити метод розрахунку координат об'єкту позиціонування з використанням фільтру для згладжування шумів, що надасть можливість підвищити точність та надійність позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією;
- визначити критерії та розробити методику вибору технологій для побудови гібридних систем позиціонування в умовах динамічної просторової конфігурації промислового майданчика;
- вдосконалити метод розробки геометричної моделі дискретизації простору промислового майданчика з урахуванням змін просторової конфігурації;
- розробити метод оптимізації сенсорної мережі у гібридній системі позиціонування на промислових майданчиках;

- розробити технологію проєктування гібридної системи позиціонування об'єктів з можливістю масштабування та врахування адаптації до змін середовища, оптимізації витрат на розгортання інфраструктури, обробку та візуалізацію великих даних;

- розробити архітектурний патерн (шаблон) гібридної системи позиціонування з динамічною зміною конфігурації апаратного забезпечення, що забезпечить збір, збереження та обробку великих даних з використанням алгоритмів паралельних обчислень.

Об'єкт дослідження – процес проєктування систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках.

Предмет дослідження – методи проєктування гібридних систем позиціонування на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією.

Наукова новизна роботи:

- *отримав подальший розвиток* метод розрахунку координат об'єкта, який на відміну від існуючих поєднує дані, що отримані глобальними та локальними технологіями позиціонування, з використанням фільтру для згладжування шумів та надає можливість підвищити точність та надійність позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією;

- *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, безпекових вимог;

- *вперше* розроблено метод оптимізації сенсорної мережи 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 та надає можливість ефективного масштабування системи та забезпечує її мобільність;

- *вперше* запропоновано технологію проектування 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.

Розроблений метод геометричної дискретизації промислового майданчика впроваджено на ТОВ «Запоріжсталь». Метод забезпечив оптимізацію розміщення засобів позиціонування та покращення стабільності сигналу у зонах підвищеної критичності. Гібридну систему позиціонування персоналу впроваджено на ТОВ «АЛД ІНЖИНІРІНГ ТА БУДІВНИЦТВО», що дозволило підвищити ефективність контролю переміщення працівників у реальному часі та знизити ризики перебування у небезпечних зонах. Окрім цього, результати дослідження використовуються в навчальному процесі Запорізького національного університету при викладанні дисципліни “Інтернет речей” для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 122 – «Комп’ютерні науки».

Практична цінність роботи:

–визначено закономірності впливу зовнішніх факторів, які виникають у промислових умовах, на точність технологій позиціонування, що надає можливість обирати технології при проектуванні гібридної системи позиціонування об'єктів;

–розроблено алгоритм оптимізації кількості та розміщення сенсорів у системі позиціонування, що надає можливість при заданій точності визначення координат об'єкта мінімізувати витрати на розгортання системи;

–розроблено гібридну систему позиціонування з використанням глобальних (GPS, Starlink) та локальних технологій (Wi-Fi, UWB) на будівельних майданчиках для моніторингу переміщення об'єктів;

– запропонована геометрична модель дискретизації будівельного майданчика за рівнями критичності, що надало можливість автоматизувати процес проєктування гібридної системи позиціонування для моніторингу переміщення об'єкта;

– розроблено архітектурний патерн (шаблон) гібридної системи позиціонування з динамічною зміною конфігурації апаратного забезпечення, що забезпечить збір, збереження та обробку великих даних з використанням алгоритмів паралельних обчислень;

– запропоновано методику вибору технологій в залежності від типів проєктів, характеристик майданчика та вимог до точності, що надає можливість обґрунтовано підібрати оптимальні технічні рішення для реалізації позиціонування в умовах реального промислового майданчика, враховуючи економічні та технічні обмеження.

Апробація результатів дослідження. Наступні результати дисертаційної роботи були оприлюднені на наукових семінарах, всеукраїнських та міжнародних конференціях, а саме:

– International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – CADSM 2023 (м. Львів-Славське, 2023 р.);

– IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems – SWS IDAACS 2020 (м. Дортмунд, Німеччина, 2020 р.).

Публікації. Результати проведеного дисертаційного дослідження було опубліковано у 6 наукових працях, а саме: 3 статті опубліковані у наукових виданнях, які включені до Переліку наукових фахових видань України та визнаються як фахові з комп'ютерних наук, а також 3 тези доповіді на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 162 сторінок, з яких основний текст займає 143 сторінки. Список використаних джерел налічує 127 найменування (13 сторінок). Додатки займають 3 сторінки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ

1.1 Аналіз структури та етапів проєктування систем позиціонування об'єктів

У сучасному світі визначення місцезнаходження об'єктів є невід'ємною складовою багатьох технологічних, логістичних, безпекових і побутових систем. Позиціонування дозволяє забезпечувати ефективне управління ресурсами, організовувати переміщення людей і техніки, підтримувати навігаційні сервіси, а також здійснювати моніторинг стану об'єктів у реальному часі. З розвитком інформаційно-комунікаційних технологій проблеми точного позиціонування стають все більш актуальними в різних сферах – від транспорту та медицини до енергетики та будівництва [41, 42].

Позиціонування об'єктів – це процес визначення місцезнаходження об'єкта у просторі відносно заданої системи координат з використанням різноманітних технологічних засобів. Реалізація систем позиціонування дозволяє оперативно отримувати дані про розташування об'єктів, оптимізувати процеси їх взаємодії та забезпечувати високу ефективність функціонування складних систем у різних умовах [43].

У сучасних виробничих умовах задачі позиціонування технічних об'єктів набувають особливої актуальності у зв'язку з впровадженням концепції Індустрії 4.0. Особливого значення набувають підходи, що поєднують архітектурну модульність із можливістю роботи на обмежених обчислювальних пристроях, характерних для середовища Інтернету речей (IoT). У цьому контексті показовою є система акустичного аналізу [44], хоча ця система призначена для класифікації

звуків, її архітектурні принципи є релевантними для створення адаптивних IoT-платформ позиціонування. З огляду на вимоги до гнучкості й масштабованості таких систем, доцільним є врахування об'єктно-орієнтованих підходів до архітектури програмного забезпечення [45]. Незважаючи на те, що ця система призначена для задач механіки, її архітектурні рішення можуть бути релевантними при створенні гнучких платформ для позиціонування у виробничому середовищі.

Ефективність систем позиціонування визначається низкою факторів, серед яких особливе значення мають точність визначення координат, швидкість оновлення інформації, стійкість до зовнішніх завад та здатність працювати у складних середовищах. Недостатня якість позиціонування може призводити до серйозних наслідків: зниження ефективності виробничих процесів, порушення логістичних ланцюгів, підвищення ризиків для безпеки людей та об'єктів [46, 47].

Щоб забезпечити функціональність таких систем відповідно до виробничих вимог, необхідно визначити основні задачі, які вирішують системи позиціонування в умовах промислового середовища (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Задачі систем позиціонування

Структура відображає чотири ключові задачі, які ставлять перед сучасними системами позиціонування в контексті промислового середовища. Локалізація в реальному часі забезпечує базову функцію – визначення поточного положення об'єктів із заданою точністю, що є критичним для координації дій персоналу та мобільної техніки. Моніторинг та облік переміщень дозволяє накопичувати історичні дані про траєкторії руху, що є основою для аналізу ефективності виробничих процесів, планування та безпеки.

Зонування простору та контроль доступу дає змогу впроваджувати обмеження на переміщення об'єктів у межах заданих зон, підвищуючи рівень оперативного контролю та безпеки. У контексті промислової експлуатації такий підхід виступає основою для побудови багатофункціональної системи моніторингу, орієнтованої на забезпечення безпеки, аналіз логістичних процесів та підвищення ефективності виробництва. Адаптація до умов середовища відображає здатність системи функціонувати в умовах наявності фізичних перешкод, електромагнітних завад або змін топології простору, що особливо актуально для відкритих або багаторівневих виробничих майданчиків.

Ці задачі формують функціональну основу для розробки, впровадження та оптимізації систем позиціонування, а їх реалізація прямо впливає на ефективність роботи підприємства загалом. Успішне вирішення зазначених задач є основою не лише надійної роботи системи позиціонування, а й підвищення загальної продуктивності, безпеки та адаптивності виробничих процесів у динамічному промисловому середовищі.

З метою структурного представлення логіки прийняття технічних рішень у межах процесу проектування систем позиціонування на рисунку 1.2 представлено узагальнену блок-схему процесу отримання проєктних рішень, яка відображає взаємозв'язок між основними елементами проєктування – вхідними даними, обмеженнями, процедурами, варійованими параметрами, оцінкою результатів і формуванням вихідної документації.



Рисунок 1.2 – Загальна структура процесу отримання проєктних рішень

Проектування системи позиціонування в умовах динамічного промислового середовища доцільно організовувати відповідно до стандартів життєвого циклу автоматизованих систем [13]. У табл. 1.1 наведено узагальнене представлення основних етапів проектування та впровадження системи позиціонування разом із відповідними задачами на кожному з них.

Таблиця 1.1 – Етапи та задачі проектування системи позиціонування

Рівень	Назва етапу	Задачі
1	Формування вимог	Обстеження об'єкта та обґрунтування необхідності створення Формування вимог користувача Оформлення звіту та заявки на розробку
2	Розробка концепції	Вивчення об'єкта Проведення науково-дослідних робіт Розробка варіантів концепції, що відповідає вимогам Оформлення звіту
3	Технічне завдання	Розробка та затвердження технічного завдання на створення
4	Ескізний проєкт	Розробка попередніх проєктних рішень по системі та її частинах Розробка документації на систему та її частини

Рівень	Назва етапу	Задачі
5	Технічний проєкт	Розробка проєктних рішень Розробка технічної документації Документація на поставку виробів або вимоги до їх розробки Завдання для суміжних частин
6	Робоча документація	Розробка робочої документації Розробка або адаптація програм
7	Введення в дію	Підготовка об'єкта Підготовка персоналу Комплектація системи Будівельно-монтажні роботи Пусконаладжувальні роботи Попередні випробування Дослідна експлуатація Приймальні випробування
8	Супровід	Виконання гарантійних зобов'язань Післягарантійне обслуговування

Такий підхід передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних етапів, які охоплюють повний цикл створення систем: від обґрунтування необхідності її впровадження до супроводу в умовах реальної експлуатації. Розробка концепції

З метою реалізації зазначених функціональних задач системи позиціонування у складному промисловому середовищі необхідно сформувати структурно-функціональну модель, що відображає ключові компоненти системи, їхні взаємозв'язки та послідовність обробки даних. Така модель повинна забезпечувати масштабованість, адаптивність до умов експлуатації та можливість інтеграції з іншими інформаційними підсистемами.

Узагальнена схема системи позиціонування (рис. 1.3) відображає ієрархічну організацію основних компонентів, зокрема центр управління, вузли, елементи системи позиціонування та об'єкти позиціонування [48]. Вона дозволяє візуалізувати логіку роботи системи в реальному часі та забезпечує основу для подальшого проєктування технічної та програмної архітектури.

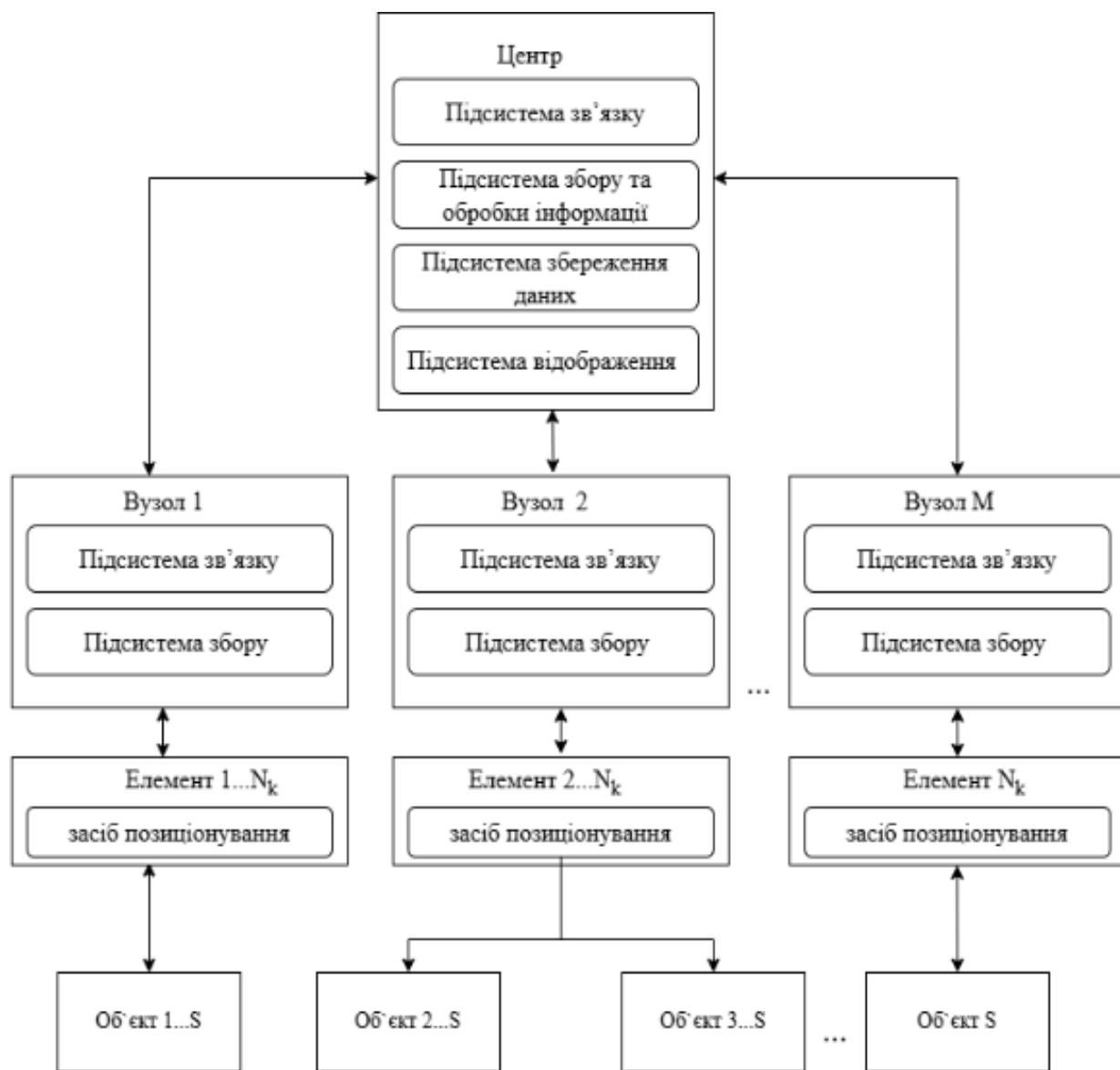


Рисунок 1.3 – Узагальнена структурна схема системи позиціонування

Узагальнена структурну модель системи позиціонування об'єктів, яка реалізує ієрархічний підхід до збору, обробки та аналізу даних про місцезнаходження об'єктів у просторі. Система складається з трьох основних рівнів: Центру, розподілених вузлів і елементів моніторингу, які безпосередньо взаємодіють із об'єктами позиціонування [49, 56].

Центральна ланка системи відповідає за координацію та управління усією інфраструктурою, до складу входять:

- підсистема зв'язку, що забезпечує обмін даними з вузлами;
- підсистема збору та обробки даних про положення об'єктів;

- підсистема зберігання даних;
- підсистема відображення даних.

Кожен вузол виконує роль локального оброблювального та комунікаційного центру у відповідній зоні покриття. До складу вузла входять:

- підсистема зв'язку – підтримує зв'язок з елементами системи;
- підсистема збору даних – приймає дані від засобів позиціонування, виконує локальну обробку.

Елементи – це сукупність фізичних пристроїв, які забезпечують виявлення та фіксацію об'єктів у просторі. Вони включають засоби позиціонування (UWB-якорі, Wi-Fi-маячки тощо), які безпосередньо взаємодіють з об'єктами та передають інформацію про їхнє положення.

Представлена структура забезпечує масштабованість, стійкість до збоїв і можливість роботи в умовах динамічної зміни. Такий підхід дозволяє ефективно організовувати позиціонування об'єктів із заданою точністю в реальному часі.

Ефективність системи позиціонування об'єктів у промисловому середовищі визначається рішеннями, що приймаються на етапі її проєктування. Процес оптимізації такої системи полягає у виборі найкращої конфігурації з множини допустимих варіантів, які задовольняють технічні, функціональні та вартісні обмеження. Серед ключових критеріїв – точність визначення координат, витрати на створення та експлуатацію системи, а також надійність функціонування в умовах змінної просторової конфігурації та впливу завад. У процесі проєктування системи позиціонування завдання оптимального вибору її конфігурації є основною задачею. Насамперед необхідно визначити оптимальну конфігурацію системи позиціонування, яка мінімізує загальні витрати, забезпечує заданий рівень точності і надійності, а також враховує економічну ефективність протягом життєвого циклу системи.

Задача проєктування ефективної гібридної системи позиціонування розглядається як метазадача *MetaTask*, яка складається з ієрархічно організованої множини підзадач $\{Task_i^l\}$, що мають власні вхідні дані $InDat_i^l$ та результати $OutDat_i^l$ [50,51]:

$$MetaTask = \{Task^l\}, Task^l = \{Task_i^l\}, Task_i^l: InDat_i^l \rightarrow OutDat_i^l \quad (1.1)$$

де $l=2$ – мікрорівень проєктування системи позиціонування.

Кожна з підзадач має власні вхідні дані та результати, які слугують основою для формування математичної моделі системи, її структури, алгоритмів локалізації та розміщення апаратних компонентів. Підзадачі мікрорівня охоплюють ключові етапи від вибору принципів побудови до оцінки ефективності проєктних рішень:

- $Task_1^2$ – визначення вимог до системи;
- $Task_2^2$ – побудови структури;
- $Task_3^2$ – топологічна дискретизація майданчика;
- $Task_4^2$ – вибір технологій позиціонування;
- $Task_5^2$ – оптимізація структури сенсорної мережі;
- $Task_6^2$ – нормалізація та інтеграція критеріїв ефективності.

Для забезпечення опису та реалізації мікрорівня проєктування гібридної системи позиціонування, після декомпозиції задач у вигляді метазадачі, доцільно побудувати модель проєктування системи позиціонування [51]:

$$L_{SOS} = \langle Tasks, InDat, Res, DesDec, ProDec \rangle \quad (1.2)$$

де $Tasks$ – множина задач;

$InDat$ – множина вхідних даних (характеристики майданчика, об'єктів, зон тощо);

Res – множина обмежень (точність, критичність зон, бюджет тощо);

$DesDec$ – множина допустимих оптимізаційних рішень (розміщення сенсорів);

$ProDec$ – процедура прийняття рішень, яка ставить у відповідність кожній парі вхідних даних і обмежень підмножину ефективних рішень.

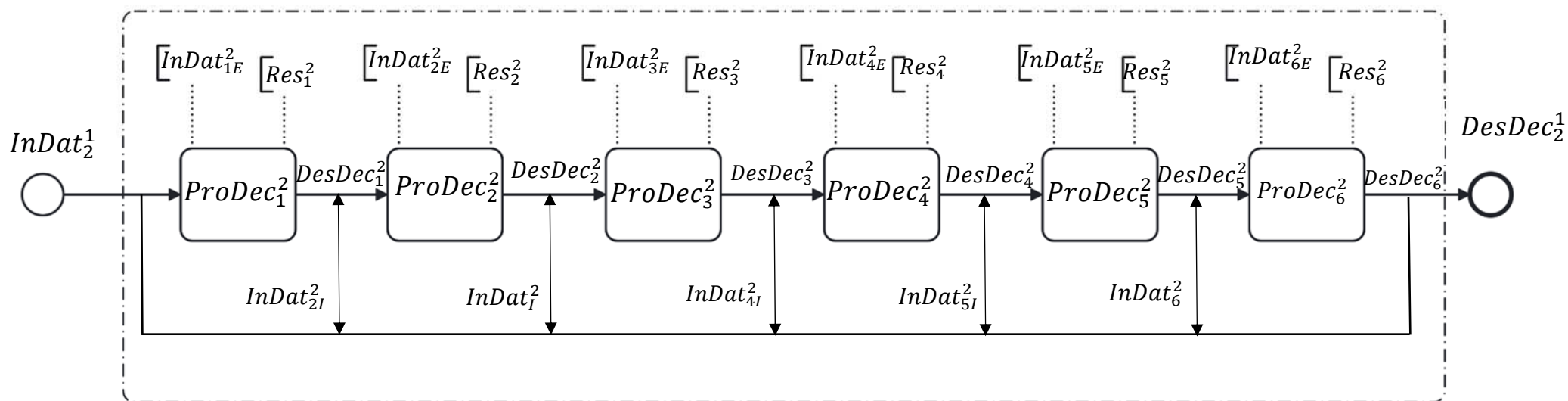
Опишемо процес синтезу гібридної системи позиціонування як послідовність взаємопов'язаних етапів, кожен з яких відповідає певній підзадачі мікрорівня проєктування [48]:

1. Ініціалізація процесу: введення вихідних даних $InDat_i^l$ та обмежень Res_i^l задачі $Task_1^2$.
2. Вибір структури системи $Task_2^2$: визначення компонентів, взаємозв'язків системи.
3. Визначення топології $Task_3^2$: зонування, дискретизація простору.
4. Вибір технологій позиціонування $Task_4^2$.
5. Оптимізація розміщення обладнання $Task_5^2$.
6. Перевірка варіанта побудови системи на відповідність обмеженням задачі: якщо результат не задовольняє умови задачі, повернення до п. або зміна стратегії.
7. Оцінка ефективності варіантів: обчислення значень критеріїв точності, надійності, вартості.
8. Завершення синтезу: визначено оптимальний варіант побудови системи.

Ітераційна схема проєктування системи позиціонування наведена на рисунку 1.4.

Ключовою метою процесу проєктування системи позиціонування є мінімізувати загальні витрати C на створення та експлуатацію, гарантувати заданий рівень точності та надійності, а також враховує економічну доцільність рішень протягом усього життєвого циклу. Для досягнення цієї мети необхідно формалізувати параметри, що визначають конфігурацію системи, зокрема:

- N_k – кількість компонентів у системі;
- P_i – координати i -го компонента системи ($i= 1,2,.., N_k$);
- T_i – обраний тип i -го компонента системи.



$ProDec_1^2$ – процедура визначення принципів побудови системи позиціонування; $ProDec_2^2$ – процедура вибору структури; $ProDec_3^2$ – процедура вибору технологій позиціонування; $ProDec_4^2$ – процедура вибору визначення елементів та зв'язків системи позиціонування, $ProDec_5^2$ – процедура визначення параметрів елементів та зв'язків, $ProDec_6^2$ – оцінка ефективності системи синтезованої

Рисунок 1.4 – Ітераційна схема проектування сенсорної мережі системи позиціонування

Межі цих параметрів обумовлені мінімальною та максимальною конфігурацією. Мінімальна конфігурація системи – це така комбінація засобів та технологій позиціонування в межах промислового майданчика, яка забезпечує досягнення встановленого порогового рівня точності та надійності позиціонування об'єктів відповідно до функціональних вимог, але з мінімально можливою кількістю апаратних компонентів і ресурсів. Максимальна конфігурація системи позиціонування – це повний набір доступних засобів та технологій позиціонування, що можуть бути використані на майданчику, з метою досягнення максимальної точності та стійкості до завад, але при цьому зростає складність системи.

Задача розв'язується з урахуванням обмежень:

– $\varepsilon(N_k, P_i, T_i) \leq \varepsilon_{\text{доп.}}$ – похибка визначення координат;

– $R(N_k, P_i, T_i) \geq R_{\text{доп}}$ – надійність системи;

– $\sum_j N_k \geq N_{k_{\text{доп}}}$ – покриття зони кількістю анкерів необхідною технологією.

Визначення оптимальної конфігурації системи позиціонування передбачає мінімізацію витрат і мінімізацію кількості використаних технологій. У цьому випадку оптимізація проводиться за двома критеріями:

– $C(N_k, P_i, T_i) \rightarrow \min$ – мінімізація витрат;

– $N_t(T_i) \rightarrow \min$ – мінімізація використання технологій.

Завдання є багатокритеріальним, тому використовується метод лінійної згортки критеріїв. Цей метод передбачає об'єднання критеріїв шляхом побудови зваженої суми часткових критеріїв і перехід до однокритеріальної задачі:

$$F(N_k, P, T) = \lambda_1 \cdot C(N_k, P_i, T_i) + \lambda_2 \cdot N_t(T_i) \rightarrow \min \quad (1.3)$$

де λ_1 та λ_2 – вагові коефіцієнти $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$.

Результати застосування оптимізаційної процедури надають можливість:

– зменшити кількість датчиків до мінімально необхідного рівня;

- забезпечуючи при цьому задану точність і надійність системи;
- скоротити загальну вартість системи порівняно з початковим варіантом;
- підвищити економічну ефективність на всіх етапах життєвого циклу.

Отже, подальший вибір конкретної технології позиціонування, яка реалізовуватиме оптимальну конфігурацію, залежить від характеру виробничого середовища, умов розгортання, обмежень щодо енергоспоживання та вимог до точності. Залежно від специфіки бізнес-процесів і технічних завдань, застосовуються різні типи систем позиціонування, кожен з яких має власні переваги та обмеження [53].

1.2 Аналіз глобальних та локальних технологій позиціонування об'єктів

З огляду на різноманіття технологічних рішень, що застосовуються у сфері просторового позиціонування, доцільним є систематичний аналіз існуючих підходів. Технології позиціонування можна умовно розділити на три основні категорії, які представлені на рисунку 1.5.

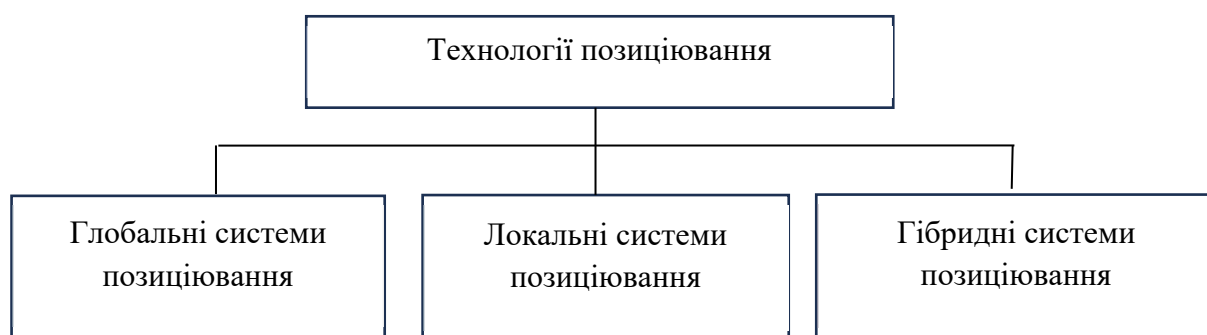


Рисунок 1.5 – Технології систем позиціонування

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) становлять основу сучасних технологій позиціонування, навігації та синхронізації часу в різноманітних галузях, зокрема у промисловості, транспорті, будівництві,

телекомунікаціях, обороні, тощо. Принцип дії GNSS полягає у визначенні координат об'єкта на основі аналізу часу проходження сигналів від кількох супутників, орієнтованих на орбітах навколо Землі [54, 55].

Серед глобальних систем позиціонування виділяють:

–GPS (Global Positioning System) – система розроблена в США та на сьогодні найпоширеніша система у світі;

–Galileo –європейська високоточна система з відкритим доступом для цивільного використання;

–BeiDou –система розроблена в Китаї представляється у вигляді комбінації геостационарних (GEO), квазігеостационарних (IGSO) та середньорбітальних (MEO) супутників;

–QZSS (Японія) та IRNSS/NavIC (Індія) – системи з регіональним покриттям.

У таблиці 1.2 наведено порівняння основних параметрів GNSS.

Таблиця 1.2 –Параметри систем глобального позиціонування

Система	Країна	Орбіти супутників	Кількість супутників (активних)	Точність (цивільна)	Особливості
GPS	США	MEO	~31	3–5 м	Висока доступність
Galileo	ЄС	MEO	~26	1–3 м	Відкритий доступ, S&R
BeiDou	Китай	MEO+IGSO+GEO	~45	2–5 м	Регіональна точність до 1 м
QZSS	Японія	IGSO+GEO	4	1–2 м (регіональна)	Підтримка в Азії
IRNSS/NavIC	Індія	GEO+IGSO	7	~10 м	Регіональна навігація

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) мають низку суттєвих переваг, що зумовлюють їх широке застосування в системах позиціонування, особливо на відкритих майданчиках. Насамперед, це глобальне покриття та автономність, які забезпечують доступ до сервісу в будь-якій точці земної кулі без залежності від локальної інфраструктури. Системи GNSS також характеризуються високою точністю визначення координат, особливо за умови використання диференціальних методів корекції, таких як RTK (Real-Time Kinematic) або PPP (Precise Point Positioning). Ще однією важливою перевагою є можливість синхронізації часу з мікросекундною точністю, що критично важливо для телекомунікацій, фінансових транзакцій та енергетичних систем. Крім того, GNSS легко інтегруються з іншими технологіями, зокрема інерціальними вимірювальними одиницями (IMU), Bluetooth або Wi-Fi-модулями, що дозволяє реалізовувати гібридні рішення для покращення точності в складних умовах навколишнього середовища. Однак у складних умовах, таких як забудовані міські території, тунелі, промислові конструкції або змінне середовище (наприклад, будівельні майданчики), сигнали GNSS можуть зазнавати втрат або викривлень. Це обумовлює необхідність використання додаткових або комбінованих технологій позиціонування [56, 57].

Застосування GNSS у вітчизняних космічних проєктах ілюструє супутник «Січ-2-30», запущений у 2022 році в межах національної програми дистанційного зондування Землі з урахуванням інтеграції України до європейського космічного простору. Апарат використовує супутникову навігацію для забезпечення орієнтації на сонячно-синхронній орбіті та прив'язки отриманих геопросторових даних до глобальної координатної системи [58].

Попри високу ефективність глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS), у ряді сценаріїв їх використання є обмеженим або недоступним. Це стосується, зокрема, закритих або напівзакритих приміщень, підземних споруд, складських та виробничих зон, будівельних майданчиків зі змінною конфігурацією. У таких випадках альтернативу становлять локальні системи позиціонування (Local Positioning Systems, LPS), які дозволяють визначати

місцезнаходження об'єктів у межах заданої зони за допомогою локально розміщених пристроїв або сенсорних мереж.

До основних різновидів локальних систем позиціонування належать:

- Wi-Fi на основі RSSI (Received Signal Strength Indicator) або ToF (Time of Flight) – поширене рішення для офісів, складів;
- Bluetooth Low Energy (BLE) – зокрема із застосуванням кутового методу (Angle of Arrival, AoA);
- Ultra-Wideband (UWB) – забезпечує сантиметрову точність, використовується в промисловості та автоматизації;
- RFID/NFC – підходить для ідентифікації об'єктів на коротких відстанях;
- інфрачервоні (IR) або оптичні системи (VLC) – застосовуються в медичних або спеціалізованих середовищах;
- Inertial Measurement Units (IMU) – інерціальні сенсори, що забезпечують обчислення координат на основі прискорення та обертання.

Локальні системи забезпечують вищу точність на обмежених територіях та демонструють кращу адаптивність до складного середовища. Водночас їх застосування вимагає інфраструктурної підготовки, включно з монтажем якорів та налаштуванням системи.

Характерною перевагою є висока точність визначення координат: до 10 см для ультраширококутних (UWB) систем і 1–3 м для технологій на базі BLE або Wi-Fi. Це дозволяє здійснювати детальне відстеження переміщень і точне позиціонування об'єктів. Локальні системи демонструють стійкість до багатопроменевих завад завдяки широкому частотному діапазону або спеціалізованим алгоритмам обробки сигналів.

Локальні системи позиціонування можуть функціонувати автономно без зовнішніх навігаційних джерел, що є перевагою в закритих або екранованих просторах, вони масштабуються та легко адаптуються до змін середовища. Можлива інтеграція з іншими сенсорними платформами (температура, рух, вібрації, біометричні параметри), що дозволяє створювати комплексні системи моніторингу та безпеки.

До обмежень при використанні відносять: обмежену зону покриття, залежність точності від конфігурації середовища, потреба у попередньому калібруванні або картографуванні (для фінгерпринтингу), обмеження щодо кількості об'єктів для одночасного відстеження, а також залежність від джерел живлення й мережевої інфраструктури. Додатково можливе виникнення частотних конфліктів або електромагнітного зашумлення. Ці обмеження створюють істотні труднощі в забезпеченні стабільного та точного позиціонування на промислових майданчиках. У зв'язку з цим актуальним є створення гібридної мережі сенсорів, яка дозволяє комбінувати переваги глобальних і локальних технологій для підвищення надійності позиціонування в складному середовищі.

Гібридні системи позиціонування являють собою рішення, що інтегрують щонайменше два незалежні джерела даних щодо координат або переміщення об'єкта, зокрема супутникову навігацію (GNSS), інерціальні сенсори (IMU), а також локальні бездротові технології (Wi-Fi, BLE, UWB). Такий підхід дозволяє компенсувати обмеження кожної з технологій шляхом їх поєднання та адаптації до конкретних умов середовища.

Основною характеристикою гібридних систем є інтеграція інформації з різномірних джерел за допомогою фільтраційних або машинних алгоритмів. Системи можуть функціонувати в реальному часі, забезпечуючи безперервне позиціонування навіть у випадках часткової втрати сигналів.

Для ефективної роботи гібридні системи вимагають попереднього калібрування, синхронізації каналів передачі даних і наявності достатніх обчислювальних ресурсів. Це ускладнює їх впровадження, однак дозволяє досягти високої точності та стабільності результатів у змінних або динамічних умовах експлуатації (наприклад, на будівельних об'єктах або в логістичних центрах).

У таблиці 1.3 представлено узагальнене порівняння основних категорій систем позиціонування за сферою застосування, перевагами, обмеженнями та відповідними технологіями позиціонування.

Таблиця 1.3 – Область застосування технологій позиціонування

Категорія технологій	Застосування	Переваги	Обмеження	Технологія
Глобальні системи (GPS)	Логістика, транспорт, моніторинг віддалених об'єктів	Широке охоплення, висока точність на великих відстанях	Неможливість роботи всередині будівель	Стільниковий зв'язок (LTE, 5G), Супутниковий зв'язок
Локальні системи	Складська логістика, управління виробництвом	Висока точність на малих відстанях, робота в приміщеннях	Обмежений радіус дії	Wi-Fi, Bluetooth, протоколи зв'язку (MQTT, RESTful API)
Гібридні системи	Мультимодальна логістика, контроль зон	Поєднання глобального та локального покриття	Складність інтеграції	Комбінація глобальних та локальних технологій

Однак, реалізація позиціонування об'єктів потребує не лише вибору відповідної технології відповідно до конфігурації майданчика, на якому вона впроваджується, але й ретельного підбору та аналізу апаратної складової. Саме апаратні компоненти відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності та достовірності отриманих даних, оскільки відповідають за реєстрацію, обробку та передачу сигналів у реальному часі.

У системах глобального позиціонування система складається з GNSS-приймачі, антени, комунікаційні модулі, обчислювальні блоки та, за потреби, інерціальні сенсори. Їхній вибір і конфігурація суттєво впливають на якість результатів.

В свою чергу, GNSS-приймач є центральним компонентом, що забезпечує обробку сигналів супутників та обчислення координат [59, 60]. Основні характеристики, що впливають на точність:

- кількість одночасно відслідковуваних супутників;
- підтримка багаточастотного прийому (L1/L2/L5);

- можливість застосування диференціальних методів (RTK, PPP);
- внутрішня фільтрація та згладжування шумів;
- частота оновлення координат (від 1 Гц до 20 Гц і вище).

Професійні приймачі здатні забезпечувати сантиметрову точність при використанні RTK, тоді як дешевші модулі масового виробництва мають похибку 2–5 м у стандартному режимі [61, 62].

Антенa є першим апаратним елементом, що взаємодіє з супутниковими сигналами. Тип антени безпосередньо впливає на стійкість сигналу до завад, мультипасових ефектів та відбиттів:

- геодезичні фазові антени з кільцевою поляризацією застосовуються для прецизійних вимірювань;
- активні антени з вбудованим підсилювачем зменшують втрати сигналу;
- правильне розміщення антени (віддаленість від металевих об'єктів, видимість неба) – критичне для точності [10].

Для диференціального позиціонування (RTK або PPP) необхідна передача коригуючого сигналу від базових станцій. Це вимагає мобільного або супутникового зв'язку:

- модулі LTE/5G передають дані з низькою затримкою (до 100 мс), що дозволяє працювати з RTCM-сервером;
- LoRa або радіомодем NTRIP використовуються для коротких відстаней у польових умовах.

Коли GNSS приймач отримує допоміжну інформацію через мережу – це скорочує час фіксації позиції, особливо у смартфонах [61].

У системах GNSS – позиціонування обчислювальний блок відповідає за:

- алгоритмічну обробку сигналів;
- застосування фільтрів Калмана для згладжування траєкторії;
- інтеграцію з іншими джерелами (наприклад, IMU).

Недостатня продуктивність цього модуля може призводити до сповільнення оновлення координат, особливо при русі [62,63].

Локальні системи позиціонування реалізуються за допомогою комплексу апаратних засобів, призначених для визначення просторових координат об'єктів у межах контрольованої території з обмеженим покриттям. У типових конфігураціях такі системи містять фіксовані передавальні або приймальні пункти, мобільні відстежувані пристрої, вузли обробки сигналів та канали передачі даних [64].

Стаціонарні пункти позиціонування, розміщені в координатно визначених фіксованих положеннях, відіграють роль просторових референтів для оцінки відстані до мобільних об'єктів. У різних технологічних реалізаціях такі пункти можуть функціонувати як передавачі (наприклад, BLE-маяки), так і як приймачі (наприклад, в UWB-системах за схемою TDoA). Точність позиціонування суттєво залежить від геометрії розміщення якорів, щільності покриття та наявності прямої видимості між елементами системи [65].

Мобільний відстежуваємий пристрій позиціонування встановлюється на об'єктах, що підлягають моніторингу, і можуть функціонувати як джерело або приймач сигналів [66]. Типова мітка містить модуль передачі або прийому сигналу, енергонезалежну пам'ять, блок живлення (у разі активних міток), а також часто – додаткові сенсорні модулі (акселерометри, гіроскопи тощо), що підвищують точність трекінгу шляхом локальної обробки динамічних характеристик руху.

Модуль збору та обробки вимірювань здатний здійснювати фіксацію сигналів з боку мобільних елементів або стаціонарних якорів, а також визначати відповідні метричні характеристики (рівень сигналу, час затримки, фазовий зсув, кут прибуття тощо). У багатьох реалізаціях приймальні пристрої інтегровані з якорами або шлюзами та слугують проміжною ланкою між польовими модулями та центральною обчислювальною системою [66].

Комунікаційний шлюз забезпечує агрегацію даних із польових модулів, їх попередню фільтрацію, буферизацію та передачу до центрального обчислювального середовища. У залежності від архітектури, шлюзи можуть також виконувати синхронізацію часу між компонентами (особливо в TDoA-

системах), координувати оновлення програмного забезпечення пристроїв та підтримувати комунікацію з мережею передачі даних (Wi-Fi, Ethernet, LTE тощо) [67].

Обчислювальний модуль або сервер реалізує алгоритмічну частину системи – виконання процедури позиціонування, яка включає:

- оцінку координат на основі зібраних метричних вимірювань (наприклад, трилатерації);
- застосування фільтраційних або статистичних моделей (наприклад, фільтр Калмана, нейромережеві згортки);
- формування траєкторій, виявлення подій та подальшу інтеграцію з іншими інформаційними системами.

Як свідчить аналіз [64, 65, 68], точність і стабільність локальних систем позиціонування суттєво залежить від сукупного впливу таких факторів, як геометричне покриття якорів, якість апаратних сенсорів, частота оновлення, а також від наявності або відсутності адаптивних алгоритмів компенсації завад у фізичному середовищі.

Однак, структура апаратного забезпечення локальної системи позиціонування прямо залежить від використовуваної технології позиціонування та принципу вимірювання. UWB-системи вимагають високоточних синхронізованих компонентів, тоді як BLE та Wi-Fi орієнтовані на щільну сітку недорогих пристроїв із фокусом на масштабованість, а RFID базується на простій зональній архітектурі. Саме від вибору технології позиціонування залежить не лише точність та надійність системи, а й вартість її впровадження та експлуатації. У таблиці 1.4 наведено порівняльний аналіз ключових характеристик основних технологій, які використовуються для побудови локальних систем позиціонування, з урахуванням їх переваг, обмежень та типових сфер застосування. Ретельне врахування цих технологічних відмінностей є критично важливим для проєктування ефективної системи позиціонування відповідно до умов експлуатації.

Таблиця 1.4 – Апаратна реалізація від типу технології

Технологія	Якір	Мітка	Сканер / приймач	Особливості
BLE	BLE-маяк (передавач)	Смартфон / ESP32	Приймач RSSI	Велика кількість, низьке енергоспоживання
UWB	Синхронізо- ваний якор	Тег з ToF / TDoA	Приймач ToF	Висока точність, потребує синхронізації
Wi-Fi RSSI	Точка доступу	Клієнт з Wi-Fi	Сканер Wi-Fi	Використання існуючої інфраструктури
Wi-Fi RTT / ToF	AP з підтримкою 802.11mc	Смартфон / модуль RTT	Часовий вимір	Потребує спеціалізованого заліза
RFID (пасивна)	Зчитувач	Пасивна мітка	—	Лише ідентифікація
RFID (активна)	Зчитувач	Активна мітка	Контролер	позиціонування по зоні охоплення

Отже, апаратна архітектура формує технічний фундамент систем позиціонування, забезпечуючи сприйняття сигналів, їх початкову обробку та передачу. Проте надійність і точність кінцевих координат значною мірою залежать від подальших етапів цифрової обробки даних. Саме методи збору, попередньої фільтрації, передачі та інтеграції вимірювань визначають здатність системи адаптуватися до завад, втрат сигналу та змін у навколишньому середовищі.

1.3 Аналіз методів збору, обробки, передачі даних в системах позиціонування

Проектування ефективної системи позиціонування – як глобальної, так і локальної – вимагає цілісного підходу, який охоплює не лише вибір технології

чи апаратних засобів, але й глибоке розуміння процесів збору, обробки та передачі даних, що формують координатну модель. Якість, швидкість і стійкість системи визначається саме на цьому рівні [53, 54, 68].

Саме метод, за допомогою якого система отримує первинну просторову інформацію, визначає подальшу якість розрахунку координат і стабільність трекінгу у динамічному середовищі. Збір даних є основою обчислювальної моделі, на якій базуються всі наступні етапи – фільтрація, позиційна інтерполяція, візуалізація та інтеграція в керуючі системи. Якщо на етапі збору відбувається похибка, спотворення чи втрати інформації, то навіть за умови використання високоточних фільтрів або компенсаційних алгоритмів неможливо досягти високої точності або просторової стабільності [54, 56]. Крім того, метод збору обумовлює апаратну конфігурацію, потребу в синхронізації (у випадку часових методів), кількість і тип сенсорів, розташування якорів, а також визначає вимоги до швидкості обробки даних. Отже, вибір або поєднання методів збору є базовим стратегічним рішенням при проектуванні системи позиціонування.

На основі аналізу можна виділити такі ключові класи методів збору даних які наведені на рис.1.6.



Рисунок 1.6 – Класифікація методів збору даних у системах позиціонування

Метод на основі потужності сигналу (RSSI) є одним із найпоширеніших у бездротових системах позиціонування, особливо в реалізаціях на базі Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, ZigBee та LoRaWAN. Основна ідея методу полягає у

використанні величини потужності прийнятого сигналу як показника відстані між передавачем і приймачем. У системах позиціонування ця величина інтерпретується як функція просторового розташування, що дозволяє здійснити наближене обчислення координат об'єкта [63, 64, 68].

Метод RSSI є привабливим завдяки простоті реалізації, низьким енергетичним витратам і відсутності потреби в синхронізації між пристроями [3]. Проте в реальних умовах його ефективність суттєво знижується через:

- багатопроменеві ефекти (відбиття, дифракція);
- флуктуації сигналу (до ± 10 дБ навіть у стабільному середовищі);
- поглинання та екранування (наприклад, тілами людей або металевими конструкціями);
- температурні коливання та властивості антен.

Для покращення стабільності результатів широко застосовуються методи фільтрації, а також статистичні моделі, що враховують варіативність сигналу.

У неконтрольованому середовищі точність позиціонування за RSSI зазвичай становить 2–5 м. Однак при використанні методу фінгерпринтингу (тобто порівняння поточних RSSI-значень із попередньо зібраною базою сигналів) точність може бути підвищена до 1–2 м [63, 64, 68].

Метод широко застосовується в системах:

- моніторингу присутності в приміщеннях (офіси, навчальні заклади);
- визначення зон активності в розумних будівлях;
- позиціонування працівників у логістичних або виробничих просторах;
- простежуванні об'єктів в умовах обмеженого бюджету або енергоспоживання.

Часові методи збору даних є одним із найнадійніших підходів до визначення просторового положення об'єкта, що застосовується як у глобальних (GNSS), так і у локальних (наприклад, UWB, Wi-Fi RTT) системах позиціонування. Метод базується на вимірюванні часу, за який сигнал поширюється від передавача до приймача, або на різниці часів прибуття сигналу до кількох приймачів. З огляду на швидкість поширення сигналу, часові

характеристики можуть бути використані для точного розрахунку відстані між пристроями, що є основою трилатерації.

Цей метод ґрунтується на вимірюванні абсолютного часу, необхідного для проходження сигналу між передавачем і приймачем.

Реалізація часових методів збору даних, відрізняються принципом вимірювання, вимогами до синхронізації, точністю, а також застосовуваними технологіями. Найпоширенішими серед них є:

- метод різниці часів прибуття сигналу (TDoA);
- метод зворотного часу поширення сигналу (RTT).

Обидва підходи дозволяють уникнути необхідності точної синхронізації між усіма учасниками системи (особливо мітками), що робить їх привабливими для практичного впровадження в умовах динамічного середовища. Нижче наведено короткий опис кожного методу, їхні переваги, обмеження та галузі застосування.

Методи збору інформації на основі кута прибуття сигналу (AoA) є окремим класом серед методів збору даних у системах позиціонування, що дозволяють визначати напрямок розташування джерела сигналу відносно приймача. AoA-методи забезпечують просторову орієнтацію, а не абсолютну відстань, що дозволяє визначити положення об'єкта навіть за наявності одного якірного пристрою, якщо він оснащений багатоканальною антеною решіткою. Як зазначено в роботах [54, 67, 69], AoA є ефективним доповненням або альтернативою трилатерації в умовах обмеженого розгортання інфраструктури.

AoA-методи ґрунтуються на вимірюванні різниці фаз або часу приходу сигналу до кількох просторово рознесених антен, розташованих у масиві на одному приймальному пристрої. Отримане значення кута дозволяє визначити напрямок на джерело сигналу у полярних координатах, а за наявності кількох антен або повороту приймача – обчислити просторове положення.

Інерціальні методи позиціонування (IM) базуються на використанні інерціальних вимірювальних одиниць (IMU), що складаються з акселерометрів, гіроскопів, а іноді й магнітометрів, які фіксують прискорення, кутові швидкості

та орієнтацію об'єкта у просторі. Відповідно до досліджень [49, 70], ці методи дозволяють оцінювати переміщення об'єкта відносно початкової позиції без потреби у зовнішньому сигналі або інфраструктурі, що робить їх важливим компонентом гібридних систем позиціонування.

Розглянуті вище методи збору інформації мають різну природу, точність, апаратні вимоги та сферу застосування. Вибір конкретного підходу залежить від цільового середовища, вимог до точності, наявної інфраструктури та допустимих енергетичних або обчислювальних витрат (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Порівняння методів збору

Метод	Принцип вимірювання	Типова точність	Вимоги до апаратури	Переваги	Обмеження
RSSI	Сила сигналу в dBm, зменшується з відстанню	2–5 м (до 1–2 м із фільтрацією)	Один приймач, не синхронізований	Простота, низька вартість, енергоефективність	Залежність від середовища, нестабільність, низька точність
ToF / ToA	Час поширення сигналу	0.1–1 м (GNSS, UWB)	Синхронізація або двосторонній обмін	Висока точність, придатність для відкритих просторів	Потребує точного таймінгу, складна реалізація
TDoA	Різниця часу прибуття сигналу до кількох антен	0.1–1 м	Синхронізовані якорі	Не вимагає синхронізації мітки, стабільність	Складність синхронізації якорів, вимоги до інфраструктури
RTT	Час повного циклу запит–відповідь	1–2 м (Wi-Fi RTT)	Сумісні пристрої, двосторонній обмін	Використання існуючої інфраструктури, без синхронізації	Затримки обробки, похибка при асиметрії каналу

Продовження таблиці 1.5

Метод	Принцип вимірювання	Типова точність	Вимоги до апаратури	Переваги	Обмеження
АоА	Кут приходу сигналу до антен	0.5–2 м (кутова точність $\approx 5^\circ$)	Багатока-нальний приймач, фазова обробка	Позиціонування за одним якірним пристроєм, кутова інформація	Складність реалізації, залежність від точності калібрування антен
Фінгер-принтинг	Зіставлення поточних характеристик сигналу з базою	1–2 м (при щільній сітці)	База радіопрофільів, попереднє навчання	Стійкість до завад, висока точність у складному середовищі	Необхідність попереднього збору даних, залежність від стабільності середовища
Інерціальні	Інтегрування прискорення та кутових швидкостей	Добра короткостроково, дрейф з часом	IMU (акселерометр, гіроскоп, іноді магнітометр)	Автономність, висока частота оновлення, працює без сигналу	Акумуляція похибки, необхідність періодичної корекції координат

Після етапу збору даних системи позиціонування переходять до наступного критично важливого рівня – обробки вимірюної інформації. Методи обробки визначають кінцеву якість локалізації, оскільки сирі сигнали, зібрані сенсорними пристроями, зазвичай містять похибки, флуктуації, затримки та шумові спотворення [2, 4, 49].

Методи обробки даних у системах позиціонування, залежно від їх функціонального призначення та математичного підходу, прийнято поділяти на кілька основних категорій:

- методи фільтрації та згладжування;
- методи інтерполяції та прогнозування;
- методи інтеграції даних з кількох сенсорів (сенсорний ф'южн);
- моделі на основі машинного навчання та класифікації.

Методи фільтрації та згладжування займають центральне місце в обробці даних систем позиціонування, особливо у випадках, коли сигнал зазнає суттєвих флуктуацій, затримок або викидів. Ці методи дозволяють забезпечити стабільність координатного відображення, зменшити похибки вимірювань і запобігти аномальним стрибкам положення об'єкта.

Метод інтерполяції дозволяє відновлювати координатні значення у проміжках між фактичними вимірами, що є особливо важливим для візуалізації руху в режимі реального часу або побудови суцільної траєкторії. Це забезпечує континуальність даних, яка необхідна як для людино-машинної інтерпретації положення об'єкта, так і для подальших алгоритмічних обчислень (наприклад, розрахунку швидкості, прискорення, виявлення подій).

Натомість прогнозування дозволяє оцінювати ймовірне майбутнє положення об'єкта на основі його попереднього руху, динаміки та інерції. Цей підхід є особливо корисним у випадках, коли координати надходять із затримкою, або система повинна діяти на випередження – наприклад, у задачах автоматизованого управління, попередження зіткнень, чи навігації роботизованих платформ.

Лінійна інтерполяція найпростіший підхід, коли координата в проміжку розраховується за лінійною формулою між двома сусідніми вимірюваннями. Кубічна інтерполяція використовує гладкі поліноміальні функції для побудови кривої, що проходить через кілька точок.

Адаптивне прогнозування на основі фільтра Калмана поєднує модель руху з фактичними вимірами для оцінки поточного та майбутнього положення, враховуючи похибки та коваріації. Цей підхід використовується як оптимальна альтернатива прямим інтерполяціям, особливо в умовах швидкої зміни траєкторії або втрат сигналу.

Після збору та обробки координатної інформації наступним критично важливим етапом у функціонуванні системи позиціонування є передача даних від сенсорного рівня (міток, якорів, приймачів) до центрального обчислювального вузла або кінцевого користувача. Цей етап забезпечує оперативність, цілісність та своєчасність відображення положення об'єкта, а відтак – загальну функціональність і придатність системи для практичного використання.

Мережевий протокол MQTT побудовано за моделлю «публікація – підписка», що забезпечує ефективну передачу даних між пристроями у мережах з обмеженими ресурсами. Основною особливістю MQTT є використання посередника – MQTT-брокера, через якого здійснюється обмін повідомленнями.

У системах позиціонування, MQTT дозволяє організувати потік координатних даних без необхідності прямого з'єднання між джерелом та отримувачем. Такий підхід сприяє масштабованості та модульності системи.

Протоколи CoAP (Constrained Application Protocol) прикладного рівня, розроблений спеціально для пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами та енергоефективних мереж. Він базується на протоколі UDP та реалізує модель комунікації, подібну до REST-архітектури HTTP, однак у значно легшому та компактнішому форматі, що робить його придатним для використання в IoT-середовищі.

У контексті систем позиціонування CoAP реалізує модель запит–відповідь, де координати можуть надаватися у відповідь на запити або у вигляді окремих повідомлень. Дані передаються в компактному бінарному форматі, що знижує обсяг переданого трафіку та зменшує затримки.

Протокол HTTP (HyperText Transfer Protocol) є одним із найпоширеніших прикладного рівня, що реалізує класичну клієнт-серверну модель. У контексті систем позиціонування він використовується для передачі координатних даних від пристроїв (наприклад, трекерів або шлюзів) до серверів через RESTful API. Передача координат здійснюється за допомогою стандартних методів HTTP,

таких як POST або PUT, що забезпечує структуровану та узгоджену взаємодію з сервером.

Для форматування даних зазвичай використовуються універсальні формати – JSON або XML, що дозволяє легко інтегрувати протокол із зовнішніми інформаційними системами, базами даних, веб-сервісами та аналітичними платформами.

Мережевий протокол WebSocket забезпечує двосторонній, постійний канал зв'язку між клієнтом та сервером. Ініціація з'єднання відбувається через стандартний HTTP-запит, після чого канал переходить у режим потокової передачі даних без необхідності повторних запитів, що характерно для класичного HTTP. У системах позиціонування WebSocket забезпечує миттєву доставку координат у момент їх надходження, завдяки чому досягається мінімальна затримка і висока частота оновлення. Це особливо важливо у випадках візуалізації руху об'єктів у реальному часі, де кожна секунда може бути критичною.

TCP (Transmission Control Protocol) та UDP (User Datagram Protocol) є основними транспортними протоколами, які забезпечують передачу даних у мережах. Вони можуть застосовуватися як безпосередньо, так і як основа для прикладних протоколів, таких як CoAP, WebSocket чи MQTT, що активно використовуються у системах позиціонування.

UDP є протоколом без встановлення з'єднання, що характеризується високою швидкістю передачі та мінімальними затримками. Його особливістю є відсутність підтвердження доставки, що робить протокол менш надійним, але надзвичайно ефективним для додатків, де критичним є час реакції – зокрема, при передаванні координат об'єктів у реальному часі.

TCP, навпаки, є надійним транспортним протоколом, що забезпечує підтвердження доставки кожного пакета, контроль порядку переданих даних і повторну передачу в разі втрат. Завдяки цьому він широко використовується в критичних підсистемах, де будь-яка втрата даних є неприпустимою, наприклад,

при збереженні координат у базах даних або під час обміну даними між аналітичними модулями.

У системах позиціонування, що базуються на методах вимірювання часу, таких як Time of Flight (ToF) або Time Difference of Arrival (TDoA), надзвичайно важливим є точне узгодження часових міток між усіма вузлами системи. Для цього застосовуються спеціалізовані протоколи синхронізації: NTP (Network Time Protocol) та PTP (Precision Time Protocol).

NTP забезпечує синхронізацію часу в межах мілісекунд і є найпоширенішим рішенням для загальних цілей. Його достатньо для систем, де координатні вимірювання не вимагають надвисокої точності часової прив'язки.

PTP (відповідно до стандарту IEEE 1588) забезпечує значно вищу точність – до мікросекунд або навіть субмікросекунд, що робить його критично важливим для UWB-систем та гібридних позиціонувальних архітектур, у яких обчислення координат базуються на часовій різниці між прийомом сигналів.

Використання NTP або PTP не стосується безпосередньо передачі координатних даних, проте є фундаментальним для забезпечення коректної та узгодженої обробки інформації в системах, де часові затримки або десинхронізація можуть спричинити суттєві похибки у визначенні місцеположення об'єктів.

Отже, інтеграція протоколів синхронізації є обов'язковою умовою для реалізації точних і надійних систем позиціонування, особливо у складних або динамічних середовищах.

У табл. 1.6 наведені ключові характеристики найбільш поширених протоколів, які використовуються для передачі координатної інформації у сучасних рішеннях позиціонування. Також в таблиці 1.6 виконане порівняння протоколів з наведенням сфер застосування

Таблиця 1.6 – Порівняння методів передачі даних

Метод передачі	Тип з'єднання	Модель обміну	Затримка	Надійність	Енерговитрати	Сфера застосування
MQTT	TCP	Publish/Subscribe	Низька	Висока (QoS)	Низькі	IoT-трекери, BLE, мобільні теги
CoAP	UDP	Request/Response (або Observe)	Дуже низька	Середня (опціонально ACK)	Дуже низькі	Обмежені сенсори, енергоефективні рішення
HTTP/REST	TCP	Request/Response	Середня	Висока	Середні	Хмара, API, серверна взаємодія
WebSocket	TCP	Постійне двостороннє з'єднання	Дуже низька	Висока	Середні	Візуалізація, трекінг у реальному часі
UDP (сирий)	UDP	Unicast/Broadcast	Дуже низька	Низька	Низькі	Надшвидка передача, без критичності
TCP (сирий)	TCP	Потокова/сесійна	Низька	Висока	Вищі, ніж UDP	Промислові системи, де важлива доставка
NTP / PTP	TCP / UDP	Синхронізація	—	—	—	GNSS/UWB синхронізація годинників

Аналіз показує, що не існує універсального методу передачі даних, який був би оптимальним для всіх типів систем позиціонування:

– у системах реального часу з великою кількістю міток доцільним є застосування MQTT або WebSocket, що забезпечують низьку затримку та можливість масштабування;

– для обмежених за ресурсами пристроїв, таких як BLE-мітки або LoRa-модулі, CoAP забезпечує ефективну передачу із мінімальним

енергоспоживанням;

- у випадках інтеграції з веб-сервісами та візуалізації координат, HTTP/REST забезпечує простоту взаємодії, але з вищим навантаженням;

- для систем, що використовують часові методи (ToF, TDoA), синхронізація через NTP або PTP є обов'язковою умовою для досягнення високої точності.

Отже, ефективність функціонування системи позиціонування визначається узгодженістю вибраної технології, апаратною складовою, підібраними методами збору, обробки та передачі даних, що забезпечують цілісність, точність та стабільність координатної інформації. У складних умовах експлуатації – за наявності завад, затримок або втрат сигналу – особливо важливою є здатність системи адаптуватися, прогнозувати положення об'єкта та оперативна реагувати на змінні параметри середовища. Ці вимоги актуалізують задачу оптимального розміщення сенсорів, яка дозволяє досягти необхідного рівня покриття та зменшити просторову похибку.

1.4 Аналіз методів багатокритеріальної оптимізації для розв'язку задачі розміщення сенсорів на промислових майданчиках

Під час розгляду процесу проєктування системи позиціонування встановлено, що для формування оптимальної конфігурації необхідно мінімізувати загальні витрати C на створення системи та зменшити кількість одночасно використовуваних технологій N_t , при цьому дотримуючись обмежень на точність ε та надійність R позиціонування. Розв'язання задачі призводить до формування множини Парето-оптимальних рішень – сукупності таких конфігурацій системи позиціонування, для яких покращення одного з критеріїв неможливе без одночасного погіршення іншого. Така множина передбачає компромісні рішення, що задовольняють технічні та економічні обмеження, і дозволяє обирати найкращий варіант відповідно до специфіки середовища,

пріоритетів проєкту та доступного бюджету.

Для вирішення задач позиціонування використовують різноманітні математичні моделі та методи. Для вирішення задачі позиціонування у [69] розглядається геометрична модель трілатерації. Основною перевагою підходу є простота реалізації та висока точність у відкритому середовищі.

У публікації [70] запропоновано дискретну математичну модель покриття для позиціонування за допомогою локальних технологій. Простір розбивається на регулярну сітку, а задача позиціонування формалізується як задача пошуку клітинки з мінімальною відстанню Гаусса до вимірюного RSSI-вектора. Дискретна модель дозволяє зменшити складність алгоритму та підвищити стійкість до флуктуацій сигналу.

Стохастичну модель позиціонування застосовує автор [71], в якій вводиться ймовірність правильного розпізнавання координат об'єкта на основі неповних або зашумлених даних. Для цього використовується модифікований алгоритм Bat Optimization, адаптований до стохастичної функції втрат. Цей підхід особливо актуальний для промислових майданчиків із високим рівнем завад та металевими конструкціями.

Використання графа для дослідження задачі позиціонування розглядається у [72]. Модель запропоновано на основі множини якірних вузлів і спостережень. Вона будується як зважений двочастковий граф, у якому ребра відображають наявність сигналу між об'єктами та якорями, а ваги – інтенсивність або RSSI. Задача позиціонування перетворюється на задачу максимуму правдоподібності у факторному полі, що вирішується за допомогою повідомлень.

Отже кожен з підходів має свої переваги й обмеження залежно від умов середовища, наявних даних і технологічного забезпечення. Геометричні моделі, забезпечують високу точність, однак чутливі до шумів. Дискретні моделі більш стійкі до флуктуацій, але вимагають попереднього збору даних та менш точні на межах зон. Стохастичні моделі дозволяють враховувати шум і невизначеність, однак мають високу обчислювальну складність. Графові моделі забезпечують

гнучке відображення топології системи та поєднання різних типів даних, проте їх реалізація потребує складної побудови структури сенсорної мережі.

Однак незалежно від обраної моделі, ключовим етапом проєктування системи позиціонування на промисловому майданчику є розв'язання задачі оптимального розміщення сенсорів. Вона охоплює визначення типів технологій, кількості пристроїв, їх географічного розташування та параметрів взаємодії з урахуванням просторових обмежень, зон із різною критичністю, особливостей ландшафту, точності сигналу, надійності та вартості.

Одним із ключових завдань при проєктуванні та оптимізації систем позиціонування на промислових майданчиках є ефективне розміщення сенсорів. Це передбачає розв'язання задачі по визначенню кількості сенсорів, їх розміщення, параметрів взаємодії та формування зв'язків з урахуванням обраних технологій позиціонування, особливостей середовища та вимог до функціонування системи. Тому, задача формулюється як багатокритеріальна оптимізаційна проблема, що враховує як технічні, так і структурно-організаційні аспекти побудови системи.

Існують різні підходи до розв'язання задачі покриття в системах позиціонування. Одним із таких напрямів є використання об'єктно-орієнтованих програмних систем чисельного моделювання, придатних для адаптації до задач оцінки зон покриття або симуляцій впливу середовища. Програмна бібліотека для скінченно-елементного аналізу PyFEM реалізує модульну архітектуру, принципи якої можуть бути релевантними у суміжних галузях [44, 45].

В даній роботі запропоновано підхід, що ґрунтується на структурно-функціональному аналізі майданчика з урахуванням вимог до точності, надійності та конфігураційної динаміки, з подальшою багатокритеріальною оптимізацією розміщення сенсорів.

Методи вирішення таких завдань розділяють на комбінаторні та евристичні [76, 77]. Задача оптимального розміщення сенсорів є NP-складною комбінаторною задачею, яка включає численні змінні, обмеження, а також конфліктні цільові функції (точність, кількість сенсорів, вартість, надмірність

покриття). Через експоненційне зростання розмірності простору рішень із збільшенням кількості полігонів та сенсорів застосування точних методів оптимізації (лінійного або цілочисельного програмування) стає обчислювально недоцільним.

У таких умовах доцільним є використання метаевристичних алгоритмів – методів наближеного пошуку, які імітують природні або когнітивні процеси для знаходження прийняттого за якістю рішення в обмежений час. До переваг метаевристик належать:

- здатність ефективно працювати у великих і складних пошукових просторах;
- відсутність вимог до аналітичної форми функцій (придатні навіть за наявності дискретних або нелінійних залежностей);
- гнучкість у врахуванні багатьох критеріїв – наприклад, через побудову агрегованої або векторної цільової функції;
- можливість адаптації до реальних динамічних умов середовища.

Метою даного дослідження є не побудова глобально оптимального розміщення сенсорів, а розробка методу, який дозволяє швидко отримувати конфігурації високої якості, що задовольняють технічні та економічні вимоги в умовах реального промислового середовища. У багатьох випадках різниця між глобальним і локальним рішенням є не суттєвою з погляду фактичної точності позиціонування, тоді як витрати на пошук ідеального варіанта можуть бути неприйнятними.

Крім того, наявність обмежень за часом, бюджетом і зміною структури майданчика в процесі експлуатації потребує рішень, які можна швидко адаптувати або перебудувати. Субоптимальні рішення, отримані за допомогою метаевристик, забезпечують достатній рівень продуктивності, стабільність та гнучкість, що робить їх практично доцільними для використання в промислових умовах.

Для пошуку глобального оптимуму розглядаємо еволюційну модель оптимізації, для нас вона є найбільш придатною для вирішення задачі

розміщення сенсорів у системах позиціонування на промислових майданчиках, що підтверджується результатами, наведеними в роботах [76] та [77], де підкреслюється ефективність адаптивних, евристичних підходів у складних багатокритеріальних умовах з високою динамікою змін і обмеженнями ресурсів.

Для пошуку локального оптимуму в межах окремих підпросторів оптимізації доцільно застосовувати метод покоординатного спуску [78, 79]. Цей метод належить до класу градієнтних підходів, але відрізняється простотою реалізації та меншою обчислювальною складністю, що робить його придатним для використання в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Він полягає в послідовній оптимізації функції цілі за кожною координатною віссю окремо, що дозволяє поступово наближатися до локального екстремуму навіть за відсутності глобальної інформації про простір пошуку. Такий підхід добре узгоджується з архітектурою фрагментарної моделі, де кожен полігон оптимізується окремо, з урахуванням локальних умов і обмежень.

Отже, враховуючи складність, багатовимірність та динамічність середовища, традиційні комбінаторні або точні методи оптимізації виявляються обчислювально неефективними та недостатньо гнучкими. Застосування еволюційної моделі дозволяє здійснювати глобальний пошук у складному просторі конфігурацій, а метод покоординатного спуску забезпечує ефективну локальну оптимізацію в межах окремих підпросторів. Така комбінована стратегія дозволяє формувати практично доцільні, стабільні й адаптивні рішення, що відповідають технічним і економічним вимогам реального промислового майданчика.

1.5 Висновки та постановка задач дослідження

У процесі виконання роботи було розглянуті особливості проектування систем позиціонування, класифікація типів комунікаційних технологій для

глобального, локального позиціонування. Визначено основні задачі систем позиціонування – моніторинг, локалізація, адаптація до змін просторових умов та інтеграція з інформаційними платформами управління.

Проаналізовано етапи проєктування систем позиціонування, зокрема виявлено, що процес побудови систем позиціонування має ітераційний характер – включає повторювані цикли вибору технологій, розміщення сенсорів та перевірки результатів.

Проаналізовано існуючі методи та математичні моделі проєктування та оптимізації систем позиціонування. Встановлено, що для забезпечення ефективного функціонування системи позиціонування доцільно застосовувати адаптивний, багатоетапний підхід з урахуванням технологічних обмежень, умов експлуатації та обсягів даних. У ході аналізу встановлено, глобальні технології мають істотні обмеження в умовах зашумлення або екранування, тоді як локальні потребують точного розташування компонентів з урахуванням специфіки середовища. Більшість виробничих майданчиків характеризуються наявністю значної кількості перешкод, металевих конструкцій і динамічних змін конфігурації, що ускладнює стабільне позиціонування.

У зв'язку з цим постає необхідність проведення експериментальних досліджень з метою виявлення впливу завад на технології позиціонування. Подальше дослідження буде зосереджено на визначенні закономірностей зміни точності позиціонування залежно від просторово-геометричних характеристик середовища, щоб враховувати ці фактори під час проєктування архітектури системи. Враховуючи виявлені обмеження існуючих технологій, підходів та потребу в адаптивності до змін просторового середовища, виникає потреба у вдосконаленні проєктування систем позиціонування об'єктів, що функціонують у складних промислових умовах.

Отже, метою даного дослідження є підвищення ефективності систем позиціонування об'єктів шляхом розроблення моделей та методів проєктування, спрямованих на визначення структури сенсорної мережі та оптимізацію процесів збору, зберігання й обробки даних із урахуванням критерію оптимального

співвідношення вартості, точності та надійності для застосування на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією.

Для вирішення поставленої задачі необхідно:

- провести аналіз структури системи позиціонування об'єктів;
- визначити етапи проєктування систем позиціонування об'єктів, що потребують удосконалення проєктних процедур та впровадження методів підвищення точності та надійності визначення координат об'єктів;
- провести комплексний аналіз сучасних глобальних та локальних технологій позиціонування об'єктів з точки зору точності та надійності у промислових умовах з високим рівнем завад;
- розробити метод розрахунку координат об'єкту позиціонування з використанням фільтру для згладжування шумів, що надасть можливість підвищити точність та надійність позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією;
- визначити критерії та розробити методику вибору технологій для побудови гібридних систем позиціонування в умовах динамічної просторової конфігурації промислового майданчика;
- вдосконалити метод розробки геометричної моделі дискретизації простору промислового майданчика з урахуванням змін просторової конфігурації;
- розробити метод оптимізації сенсорної мережі у гібридній системі позиціонування на промислових майданчиках;
- розробити технологію проєктування гібридної системи позиціонування об'єктів з можливістю масштабування та врахування адаптації до змін середовища, оптимізації витрат на розгортання інфраструктури, обробку та візуалізацію великих даних;
- розробити архітектурний патерн (шаблон) гібридної системи позиціонування з динамічною зміною конфігурації апаратного забезпечення, що забезпечить збір, збереження та обробку великих даних з використанням алгоритмів паралельних обчислень.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ

2.1 Технології позиціонування за допомогою GPS

У системах позиціонування на відкритих виробничих майданчиках одним із найпоширеніших рішень є використання супутникових навігаційних систем, зокрема технології GPS (Global Positioning System). Завдяки глобальному покриттю, автономності та відносно невисокій вартості впровадження GPS широко застосовується для моніторингу переміщення працівників і техніки в реальному часі [80-82].

Проте, згідно з численними дослідженнями, застосування GPS у промисловому середовищі має низку обмежень: сигнал може втрачатися або викривлятися внаслідок дії металоконструкцій, щільної забудови, атмосферних явищ тощо [83]. Для підтвердження цього твердження та оцінки практичної придатності супутникових трекерів у реальних умовах було проведено експериментальне дослідження із застосуванням персонального GPS-трекера ТК-102/102-2, що працює в мережах стільникового зв'язку [84].

GPS-tracker ТК-102 використовується для контролю місцезнаходження об'єкту. Персональний трекер призначений для роботи в мережах стільникового зв'язку GSM стандарту і зоні навігаційних супутників NaviStar (GPS). Трекер ТК-102 обладнаний вбудованим GSM-модулем з підтримкою сигналів quad-GSM 850/900/1800/1900 МГц, що дає йому змогу працювати в будь-яких мережах стільникового зв'язку стандарту GSM. Якщо трекер перебуває поза зоною приймання GSM-мережі, то вся навігаційна інформація зберігається у внутрішній пам'яті (резервний буфер) і передається на сервер моніторингу під час повернення в зону покриття GSM-сигналу.

Принцип дії ґрунтується на визначенні абсолютних координат місцезнаходження на поверхні Землі (широта, довгота) з точністю 30 метрів (на відкритій місцевості 3 метри) і передаванні даних на базову станцію у форматі «коротких повідомлень» SMS або на сервер у форматі GPRS. Разом із GPS-координатами ТК-102 передає на сервер Cell ID – ідентифікатори комірок стільникової мережі, що дає змогу здійснювати приблизне позиціонування об'єкта навіть у разі відсутності GPS-сигналу (наприклад, якщо об'єкт перебуває в підземному гаражі) [82].

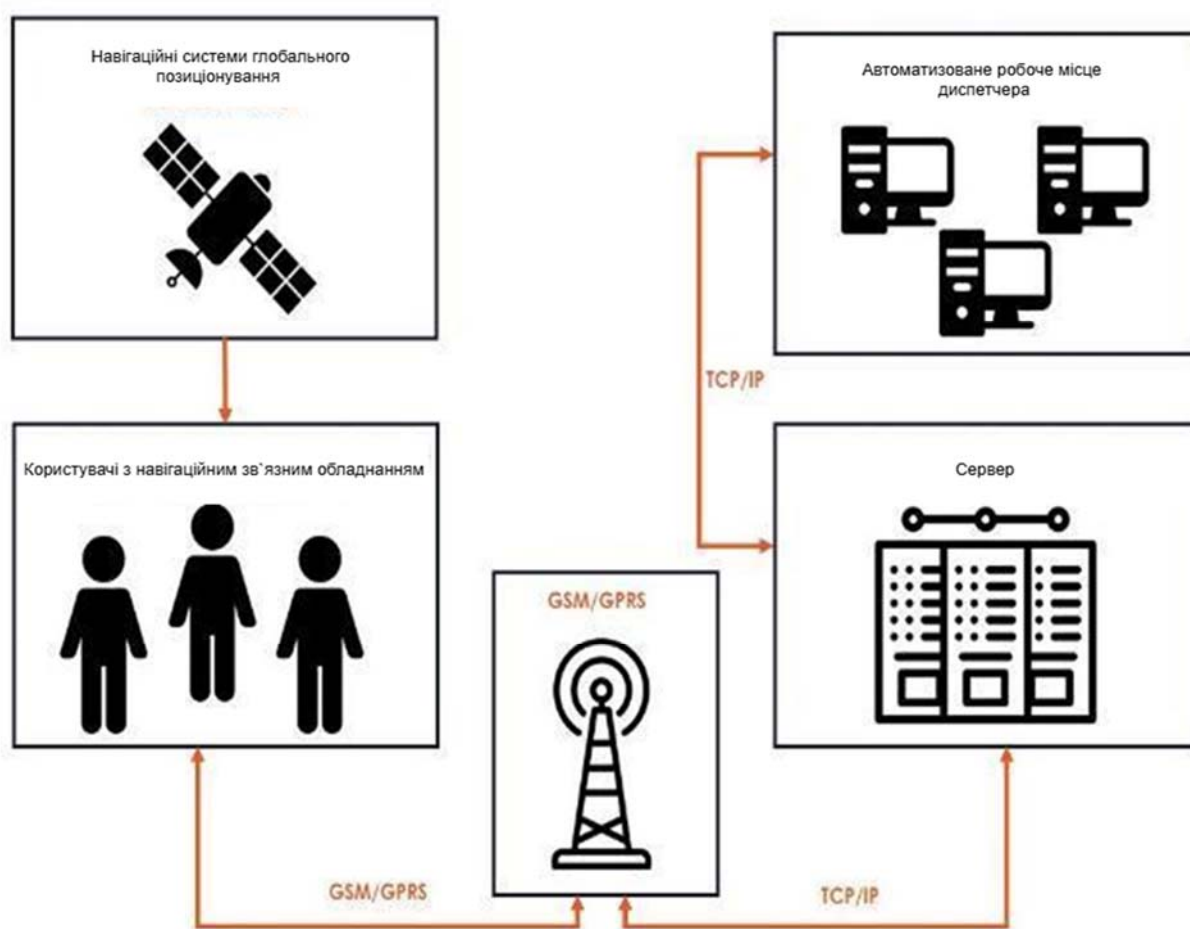


Рисунок 2.1 – Архітектура системи

Дослідження проводились на відкритому майданчику. Заздалегідь було промальовано територію загальною площею 25 Га (рис. 2.2), для зручності територію поділено на квадрати (рис. 2.3), входження до яких автоматично

посилає сигнал на сервер про перебування на території об'єкта, проте заявлена похибка на відкритих територіях 3 м не дотримується.



Рисунок 2.2 – Територія експериментального промислового майданчика

Червоним виділені співробітники щодо яких робили вимірювання, синім – точки, які були отримані після передачі даних.

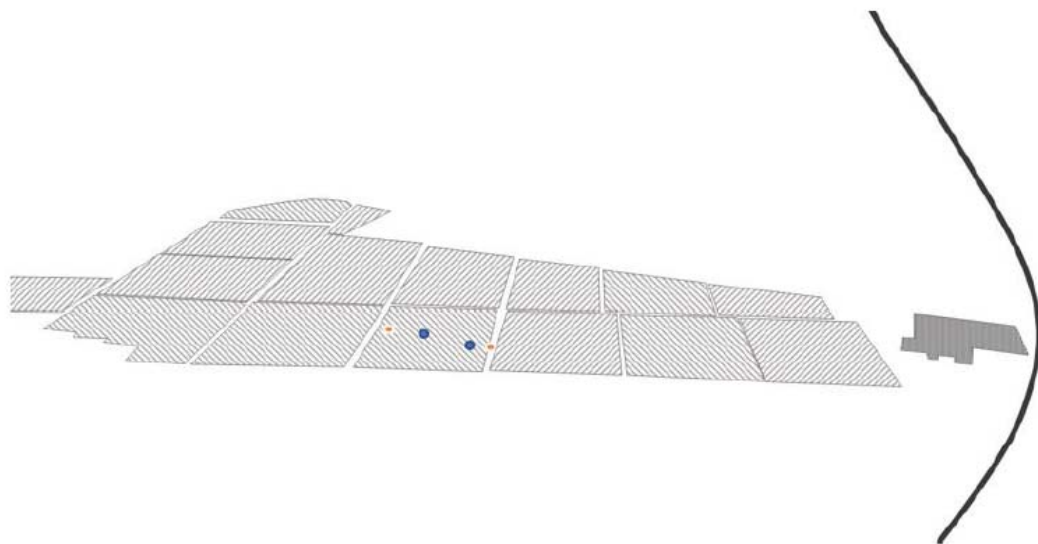


Рисунок 2.3 – Інтерфейс системи на базі GPS

Істотне обмеження – це робота в умовах видимості щонайменше 4-х супутників. Під час тестування на території металургійного заводу передавання

координат від зазначеного датчика виявилось неможливим через значну кількість металоконструкцій, які спричиняли екранування сигналу та багатоприменеве поширення.

З метою забезпечення обґрунтованості результатів дослідження було реалізовано повномасштабний експеримент, під час якого проводився моніторинг рухомих об'єктів на промисловому майданчику. Основні параметри експерименту подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри експериментального дослідження

№	Параметр дослідження	Значення
1	Кількість днів експерименту	22 робочі дні
2	Тривалість фіксації координат на день	8 годин
3	Періодичність фіксації	5 хвилин
4	Кількість об'єктів	12

Для оцінки були обрані наступні критерії:

– оцінка точності виконувалась на основі порівняння координат, отриманих з GPS-трекера ТК-102, з еталонними координатами, заданими на сітці дослідної території;

- максимальна похибка;
- наявність втрат сигналу;
- швидкість фіксації координат.

У ході експерименту були зафіксовані наступні результати:

- середня похибка позиціонування склала від 18 до 35 метрів залежно від сектора;
- у зонах з наявністю металевих ангарів або щільних конструкцій спостерігалось відхилення понад 50 м, а також періодичні втрати зв'язку;
- при роботі в умовах прямої видимості на відкритому просторі точність покращилась до 10–15 метрів;

- затримка передачі координат у мобільній мережі не перевищувала 5 секунд, проте спостерігалась нерівномірність оновлення даних, що знижувало оперативність контролю;
- отримані результати свідчать про обмежену придатність GPS-технологій для точного позиціонування об'єктів в умовах промислових майданчиків.

Основними негативними факторами стали:

- екстремальна багатопроменевість сигналу в присутності металевих конструкцій, що спричиняє значну втрату точності;
- недостатня роздільна здатність, яка не дозволяє точно ідентифікувати розташування працівника в межах критично важливих зон (наприклад, небезпечних ділянок, зон обмеженого доступу);
- одновимірність рішення – відсутність можливості врахування висоти (3D-координат), що є критичним для багаторівневих будівельних об'єктів.

Отже, з огляду на ці обмеження, GPS-технології можуть застосовуватись лише як компонент гібридної системи позиціонування, що доповнюється локальними технологіями (Wi-Fi, UWB, BLE) та алгоритмами фільтрації й предикції для підвищення точності в умовах складного середовища.

2.2 Технології позиціонування на основі Wi-Fi

У системах позиціонування на промислових майданчиках одним із перспективних рішень є використання стандартних Wi-Fi-мереж, що базуються на доступному інфраструктурному обладнанні. Технології Wi-Fi-позиціонування використовують сигнали, які передаються з мітки або мобільного пристрою у вигляді запиту на виявлення (probe request), що приймаються стаціонарними точками доступу. До основних методів, які

застосовуються в таких системах, належать тріангуляція, трилатерація, RSSI-аналіз і методи фінгерпринтингу [85- 87].

Для апробації методів позиціонування у внутрішніх просторах було реалізовано прототип системи з використанням мікроконтролерів ESP8266EX на платах WEMOS D1 mini Pro. Один з модулів працював як тег, розміщений у центрі координатної сітки, а решта – як якірні вузли, встановлені на відомих позиціях з рівномірним кроком.

У роботі пристрої працювали у режимах тега та якоря. Тег надсилав запит активного сканування (active scan request) в мережу, які приймалися якорями. Якорі вимірювали RSSI сигналу та передавали ці дані до серверної частини через AWS IoT Channel для обробки та розрахунку координат [88-90].

Пристрій стеження визначає відстань до вузлів прив'язки, використовуючи модель втрат шляху. Нехай d позначає відстань від пристрою стеження до i -го якоря. Тоді якоря розташовуються десь на радіусі d -ій якоря. Як тільки таких кількість якорів більша за три, ми можемо вичислити місце розташування пристрою, як показано на рис. 2.4.

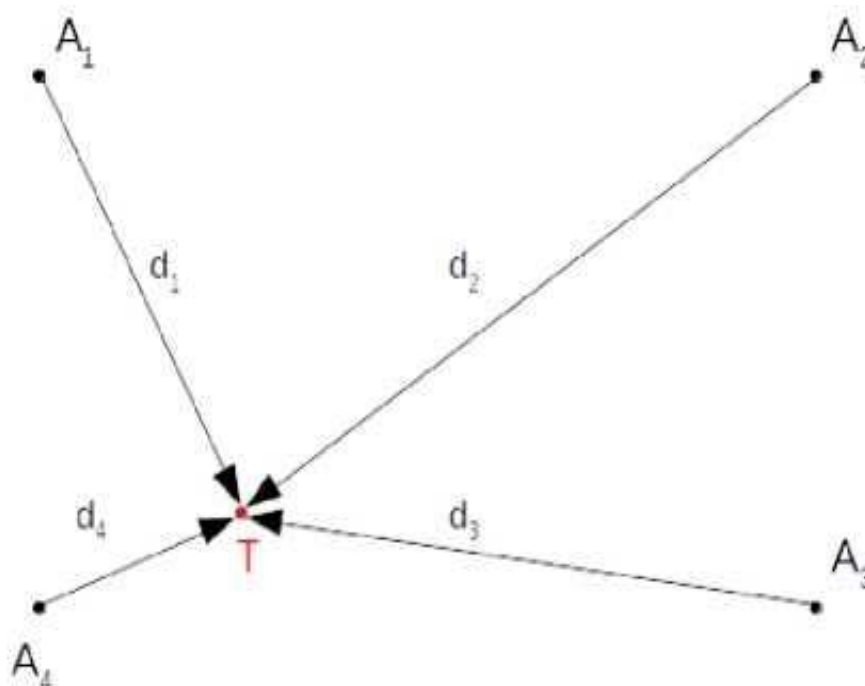


Рисунок 2.4 – Метод трилатерація

Для обчислення координат тега використовуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1, \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2, \\ \vdots \\ (x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 = d_m. \end{cases} \quad (2.1)$$

де (x_i, y_i) – координати i -го якоря;

(x, y) – координати тега;

d_i – відстань від якоря до тега.

Система, орієнтована на задачі локалізації, де важлива вартість і простота реалізації (рис.2.5).



Рисунок 2.5 – Структура системи

Відніmemo m -е рівняння з решти рівнянь, щоб зробити їх лінійними, і перетворимо результат на матричне рівняння:

$$\begin{pmatrix} 2(x_1 - x_m)^2 & 2(y_1 - y_m)^2 \\ 2(x_2 - x_m)^2 & 2(y_2 - y_m)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{m-1} - x_m)^2 & 2(y_{m-1} - y_m)^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 - x_m^2 + y_1^2 - y_m^2 + d_m^2 - d_1^2 \\ x_2^2 - x_m^2 + y_2^2 - y_m^2 + d_m^2 - d_2^2 \\ \vdots \\ x_{m-1}^2 - x_m^2 + y_{m-1}^2 - y_m^2 + d_m^2 - d_{m-1}^2 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

З 2.2 видно, що для вирішення рівняння потрібно не менше 3 якорів. Система рівнянь може бути вирішена за допомогою методу найменших квадратів. Він усереднює помилки в d_i , але чутливий до неправильного положення якорів. Просте віднімання m -го рівняння від решти не завжди дає гарний результат, тому віднімемо від системи інші рівняння і виберемо те, що дає найменшу абсолютну похибку. Трилатерація дає хороші результати для даних, але не тоді, коли вони зашумлені. Щоб уникнути цього, потрібно ретельно підійти до вибору моделі втрат на шляху, яка буде використовуватися для отримання відстані з RSSI. Для визначення відстані між тегом та якорем використовується логарифмічна модель втрат шляху. Втрати на шляху виглядатимуть, як показано в (2.3).

$$R = -10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + A + X_\sigma, \quad (2.3)$$

де n – параметр затухання;

d_0 – відстань, на якій RSSI буде A ;

X_σ – нормально розподілена випадкова величина, яка вносить шум у вимірювання.

Щоб очистити вимірювання від випадкового шуму, їх потрібно відфільтрувати. Теоретично можуть працювати як фільтри зі скінченно-імпульсною (FIR), так і нескінченно-імпульсною (IIR) характеристикою, наприклад, фільтр ковзного середнього або фільтр Калмана. Тоді виправлене рівняння буде таким:

$$R = -10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \bar{A} \quad (2.4)$$

З (2.4) можна знайти відстань за значенням RSSI. Якщо прийняти, що $\bar{A}$ базове значення RSSI на відстані d_0 , тоді за допомогою алгоритму найменших квадратів можна визначити параметр n , як показано в (2.5).

$$n = 0.1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{A} - R_i) \cdot \lg \frac{d}{d_0}}{\sum_{i=1}^m \lg^2 \frac{d}{d_0}} \quad (2.5)$$

На рис. 2.6 зображено необроблені дані RSSI, які демонструють високу варіативність навіть за фіксованих відстаней.

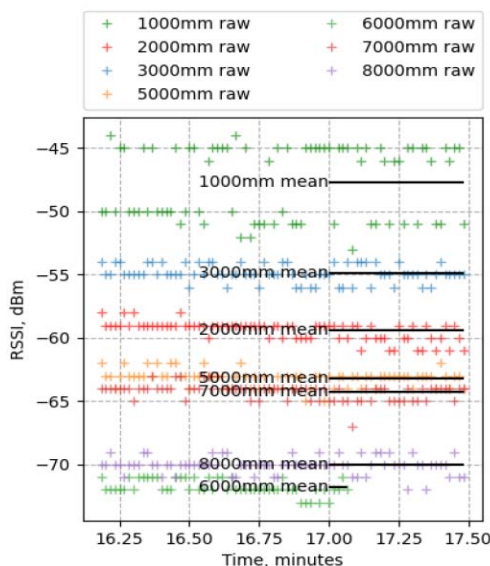


Рисунок 2.6 – Початкові RSSI-вимірювання пакетів з одного тегу

Процес підбору кривої дозволив отримати криву із середньою похибкою 2131 мм. Вона показана на рис. 2.7.

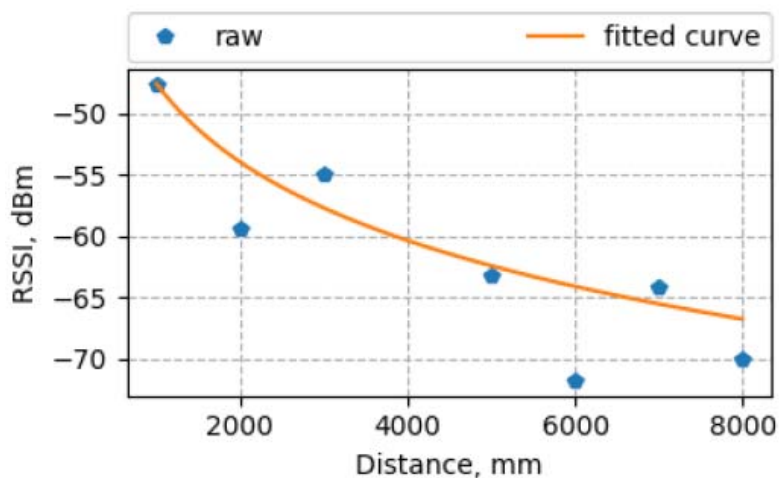


Рисунок 2.7 – Результати підгонки кривої

Результати були в межах середньої похибки. Точність позиціювання була кращою для пристрою, що використовувався для підбору кривої. На рис. 2.8 наведено результати розрахованого положення тега на сітці 1×1 м, де трикутниками зображено – розташування якорів, біле коло представляє реальна позиція тега, а хмара точок – розраховані координати за даними трілатерації.

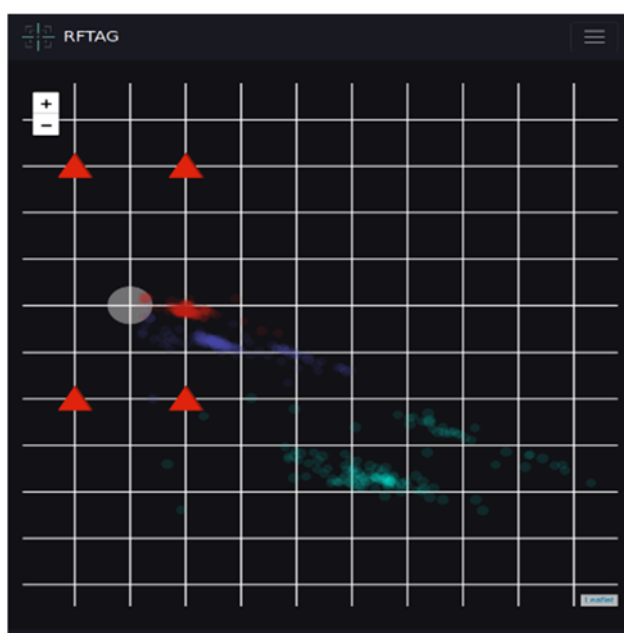


Рисунок 2.8 – Інтерфейс системи на базі Wi-Fi

Експериментально встановлено, що IIR-фільтри дають стабільні результати. На рисунку на рис. 2.9 порівнюються кілька фільтрів: ковзне середнє з періодом 21, блочне середнє з періодом 21 і фільтр Калмана, розрахований для статичної змінної з коваріацією шуму 10^{-5} і середньоквадратичним відхиленням шуму вимірювання 1.25. З рисунка 2.9 також видно, що фільтр Калмана перевершує інші FIR-фільтри.

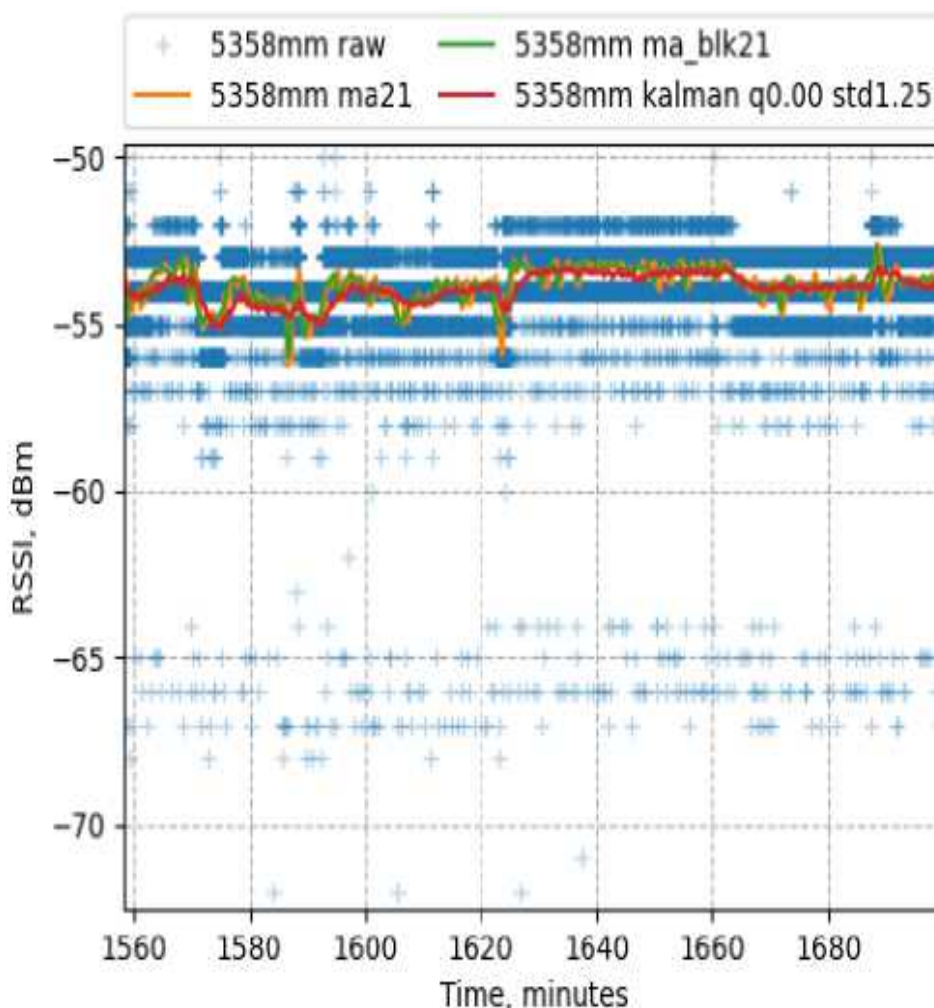


Рисунок 2.9 – Порівняння роботи фільтрів

Отже, була усунена нестабільність під час роботи в режимі якор-тег. Розроблене програмне забезпечення передає спеціальні пакети з інформацією про приналежність до мережі позиціонування та підписом SHA256, що виключає можливість пошкоджених пакетів. Зв'язок здійснюється через вибраний канал Wi-Fi 2.4 Гц у режимі 1 Мбіт. Прошивка виконує два основних завдання:

калібрування моделі втрат на шляху та позиціонування міток. Кожен пакет, позначений як зонд як від анкерів, так і від міток, записується пристроєм у чергу. Значення RSSI фільтрується через фільтр Калмана, унікальний для кожного пристрою. Після того, як анкери отримують достатню кількість даних, вони обчислюють модель втрат. Завдяки такому підходу вдалося усунути вплив апаратних відмінностей на результати позиціонування.

Коли модель втрат готова, анкери починають перетворювати RSSI у відстань і надсилати цю інформацію на якорь, який виконує трилатерацію. Значення RSSI від міток вимірюються за двостороннім методом. Тег відстежує RSSI анкерів поблизу та надсилає цю інформацію разом зі своїми зондами.

Описаний підхід допоміг суттєво покращити стабільність вимірювання RSSI, а також середню похибку підбору кривої в реальному часі, яка тепер становить близько 193 мм. Результати показано на рис. 2.10.

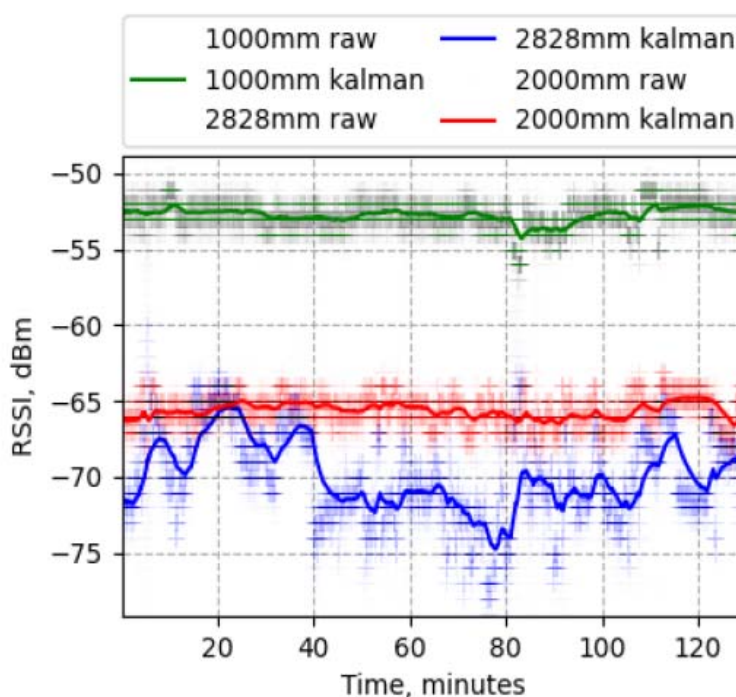


Рисунок 2.10 – Результати поліпшеного вимірювання RSSI

Експеримент показав, що реальна діаграма спрямованості встановленої антени відрізняється від зазначеної в документації через те, що вона змонтована

на плату. Цей факт вносить суттєву похибку в точність позиціонування, тому її потрібно компенсувати. Для цього необхідно зняти реальну діаграму спрямованості антени та скомпонувати кожний із кінцевих пристроїв із вимірювальним інерційним пристроєм (комбінація компаса, гіроскопа та акселерометра). Використовується одностороннє позиціонування, зі свого боку використання двостороннього позиціонування, тобто коригування результату з урахуванням сили сигналу від якорів, який приймає кожна мітка, може підвищити стабільність системи під час роботи біля металевих конструкцій і загальну точність. У цьому варіанті розроблена система не може працювати в промислових умовах.

Для забезпечення статистичної достовірності результатів, було виконано вимірювання RSSI у 720 контрольних точках на дослідній площині. Основні параметри експерименту подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні параметри експериментального дослідження

№	Параметр дослідження	Значення
1	Кількість днів експерименту	18 робочих дня
2	Тривалість фіксації координат на день	8 годин
3	Періодичність фіксації	5 хвилин
4	Кількість об'єктів	1

Критерії оцінки ефективності включали:

- середню та максимальну похибку позиціонування;
- стабільність сигналу;
- вплив металевих перешкод;
- практичність використання в реальному середовищі.

У ході експерименту було виявлено таке:

- середня точність позиціонування в умовах відкритого майданчика склала від 3 до 5 метрів;
- у зонах з наявністю металевих конструкцій похибка досягала 30–50 м,

особливо при розташуванні пристрою між металевими бар'єрами;

- умови багатопроменевості (reflection/multipath) спричиняли нестабільне значення RSSI, що призводило до «стрибків» координат;
- система мала помітні проблеми у визначенні координат по вертикалі, оскільки всі точки доступу перебували приблизно в одній площині, що не дозволяє виконувати 3D-позиціонування;
- в реальному режимі спостерігається періодичність появи MAC-адреси, пов'язана з енергозбереженням пристрою, що знижувало частоту оновлення координат.

Wi-Fi-технології є потенційно придатними для систем позиціонування об'єктів в умовах виробничого середовища завдяки широкому розповсюдженню інфраструктури та відносній дешевизні впровадження. Водночас, результати дослідження показали, що в реальних умовах точність значно знижується внаслідок:

- високої чутливості до багатопроменевих перешкод;
- нестабільності сигналу RSSI, особливо в рухомому середовищі;
- відсутності вертикальної роздільної здатності, що критично в багаторівневих конструкціях;
- залежності від кількості та розташування точок доступу.

Отже, Wi-Fi-системи не можуть бути основою точного позиціонування в ізоляції, проте мають перспективу як компонент гібридної системи, що поєднується з іншими методами (BLE, GPS, IMU, UWB) та фільтрацією даних.

2.3 Технології позиціонування з використанням системи Starlink PNT

Для аналізу даних щодо місцезнаходження об'єкту та відхилень Starlink від його базової установки було проведено дослідження на будівельному майданчику, де проводились роботи з монтажу металоконструкцій та їх

встановлення у проєктне положення за допомогою великого кранового обладнання. Координати для установки Starlink були визначені за допомогою геодезичної зйомки, проведеної з використанням приладу Leica GS18 T. Цей прилад поєднує високу точність GNSS з технологією компенсації нахилу, що спрощує і прискорює роботи на місцевості, даючи змогу отримувати координати з точністю $3 \text{ мм} + 0.5 \text{ ppm}$ (широта, довгота, висота). Отримані експериментальним шляхом координати були прийняті за еталонні.

За допомогою API Starlink на сервері було зібрано дані за період у п'ять місяців. Дослідження проводили в умовах вже встановлених металоконструкцій, які знаходились на будівельному майданчику (рис. 2.11), що від самого початку впливало на точність вимірювань місця знаходження об'єкту. Додатковим фактором, який міг впливати на точність даних, був ефект багаторазового відбиття сигналу [93].

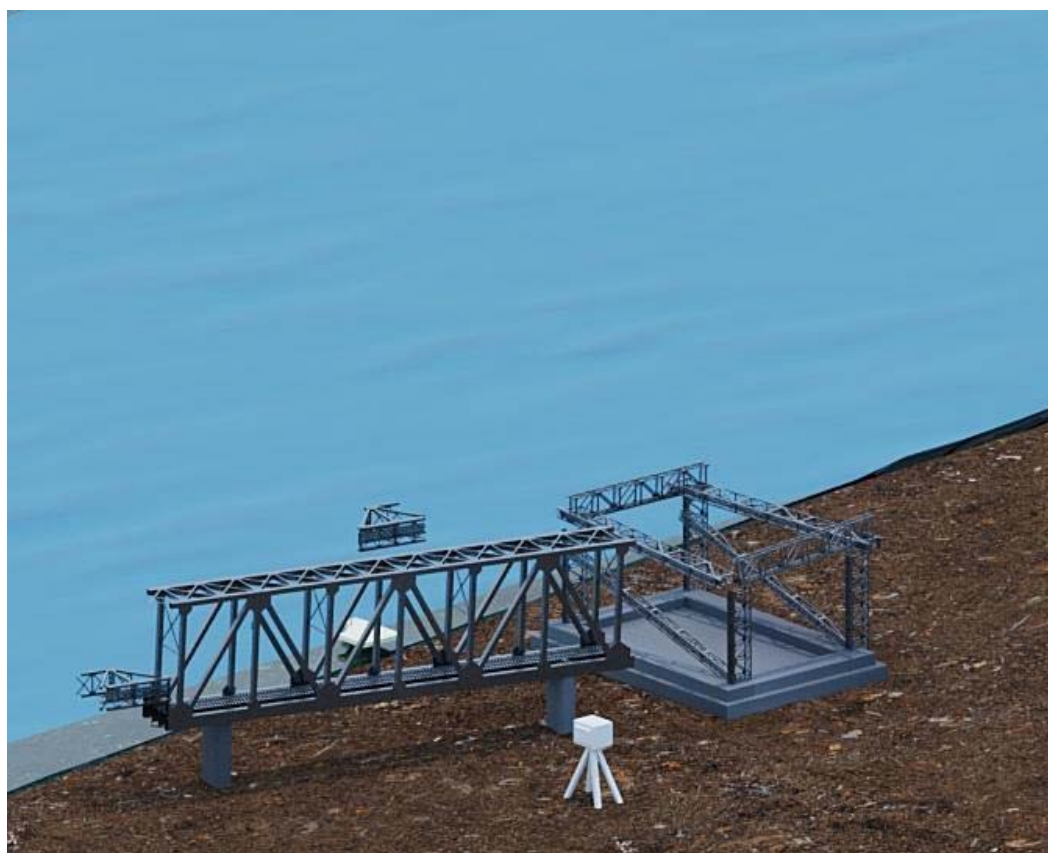


Рисунок 2.11 – Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на перший місяць

Отже, у процесі дослідження було зібрано дані, які дадуть змогу провести аналіз точності позиціонування за допомогою Starlink в умовах, що характерні для об'єктів зі змінним ландшафтом.

Протягом п'яти місяців структура і зовнішній вигляд майданчика значно змінились, положення Starlink не змінювалось. Майданчик розширювався у вертикальному та у горизонтальному напрямках (рис. 2.12). Збільшилася кількість металоконструкцій, а поблизу розташування Starlink перебувала великогабаритна кранова техніка (рис. 2.12).

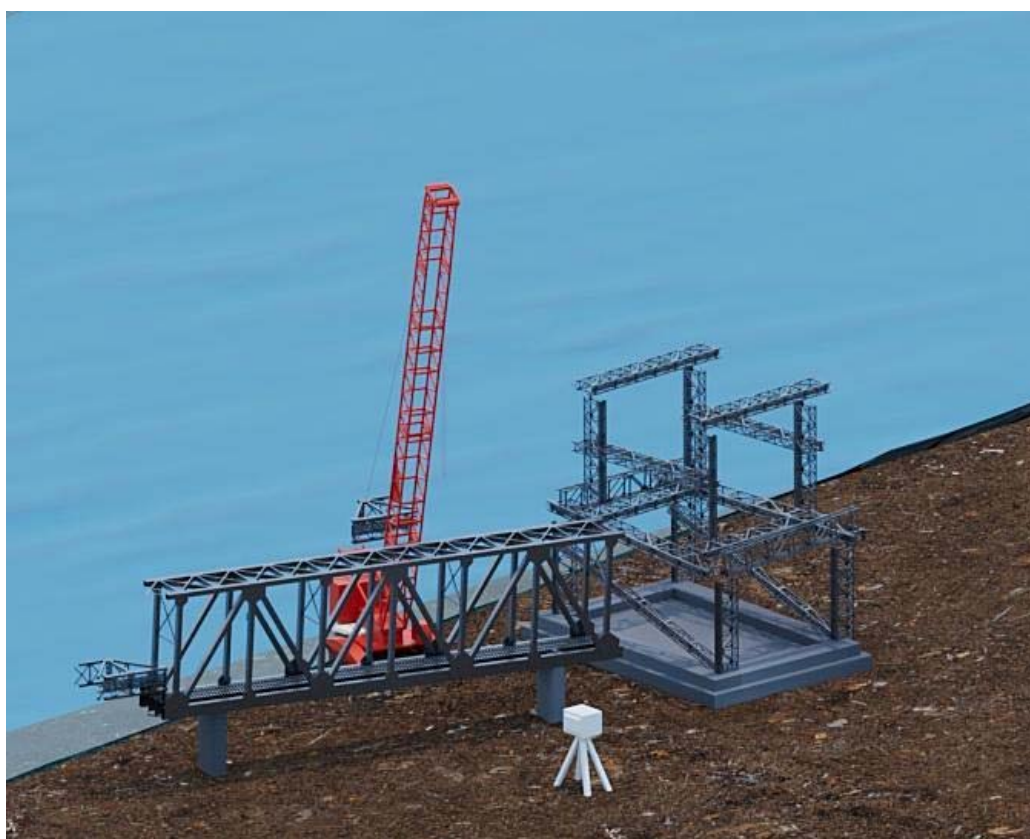


Рисунок 2.12 – Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на третій місяць

Ці зміни могли значно вплинути на якість сигналу, створюючи додаткові джерела багаторазових віддзеркалень і, як наслідок, збільшуючи ймовірність появи похибок у позиціонуванні (рис. 2.13).

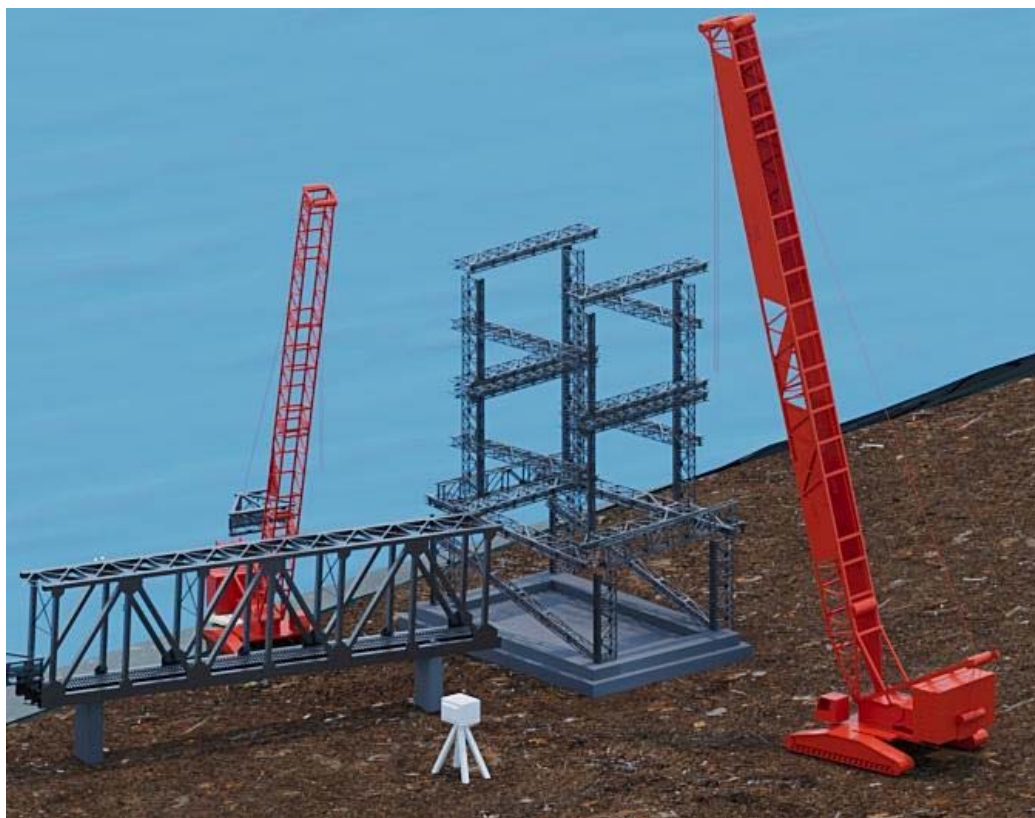


Рисунок 2.13 – Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на п'ятий місяць

Для підвищення точності даних і згладжування отриманих шумів, що обумовлено зовнішніми факторами, доцільно застосувати методи фільтрації даних [94]. Одним із найефективніших підходів у даному випадку є використання фільтра Калмана [95]. Цей метод дає змогу прогнозувати та коригувати показання в реальному часі, знижуючи рівень шумів і впливу неконтрольованих чинників на дані про положення. Фільтр Калмана здатний врахувати як динамічні зміни ландшафту майданчика, так і тимчасові спотворення у сигналі, що робить дані визначення позиції об'єкту більш точними та надійними в умовах мінливого навколишнього середовища [96].

Метод Калмана, також відомий як лінійний фільтр Калмана, підходить для систем, які можна описати за допомогою лінійних рівнянь [95]:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad (2.4)$$

де x_k – поточний стан (позиція, швидкість);

F_k – матриця переходу стану;

B_k – матриця управління;

u_k – керуючий вплив;

w_k – шум системи.

У формулі Калмана матриця переходу стану F_k визначає як система переходить із одного стану до іншого. Враховуючи статичне розташування Starlink, матриця F_k зводиться до одиничної матриці, оскільки координати об'єкта не повинні змінюватися в часі.

У класичній формулі Калмана (2.4) матриця управління B_k описує керуючий вплив на систему. У даному експерименті, оскільки об'єкт статичний, керуючих впливів немає, і матриця B_k може бути виключена. А вектор w_k , який представляє шум або відхилення від еталонного значення, залишається.

Отже, вираз (2.5) для визначення стану системи зводиться до:

$$x_k = Ix_{k-1} + w_k, \quad (2.5)$$

де I – одинична матриця.

Для врахування наявного шуму та корекції на основі фактичних вимірів, ми використовуємо процедуру коригування за виразом (2.6), який дозволяє точніше визначити стан системи на основі отриманих даних. Корекція на основі вимірювань надає можливість отримувати прогнозоване значення координат, наближаючи його до фактичного, залежно від рівня шуму у вимірах.

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - H_k x_k), \quad (2.6)$$

де z_k – виміряне значення;

H_k – матриця спостережень;

K_k – коефіцієнт Калмана.

$$K_k = \frac{P_k}{P_k + R}, \quad (2.7)$$

де P_k – коваріація помилок передбачення;

R – коваріація шуму вимірювань.

Значення коваріації шуму процесу Q можна прийняти як дисперсію змін $Var(\Delta x)$ координат:

$$Var(\Delta x) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\Delta x_k - \underline{\Delta x})^2, \quad (2.8)$$

де n – кількість вимірювань;

$\underline{\Delta x}$ – середнє значення змін.

Отже, коваріація шуму процесу Q приблизно дорівнює 0,0000035. Такий підхід дозволяє оцінити наскільки координати змінюються між вимірюваннями. Значення коваріації шуму вимірювань R можна обчислити за формулою:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (e_k - \underline{e})^2, \quad (2.9)$$

де n – кількість вимірювань;

e_k – середнє значення змін;

$\underline{e}$ – середнє значення похибки.

Отже, на основі даних було розраховано коваріацію шуму вимірювань $R \approx 0,0000645$.

Під час аналізу зібраних даних про позиціонування Starlink було виявлено, що під час зміни кількості та розмірів металоконструкцій на будівельному майданчику середні значення відхилень місця знаходження об'єкту значно варіювалися (табл. 2.3).

За результатами обчислень було побудовано графіки, які ілюструють динаміку зміни координат (широти та довготи) протягом п'яти місяців.

Таблиця 2.3 – Відхилення даних позиціонування від еталонного значення

Номер місяця	Середнє відхилення ,м
1	766,67
2	771,7
3	807,2
4	875,4
5	869,36

Ці зміни були викликані виникненням шумів у даних через ефект багаторазового відбиття сигналу і погіршення умов видимості супутникової мережі Starlink. Виходячи з наведених у таблиці відхилень, зі збільшенням кількості перешкод і складних конструкцій середнє відхилення позиціонування об'єкту зросло з 766,67 м у першому місяці до 875,4 м у останньому.

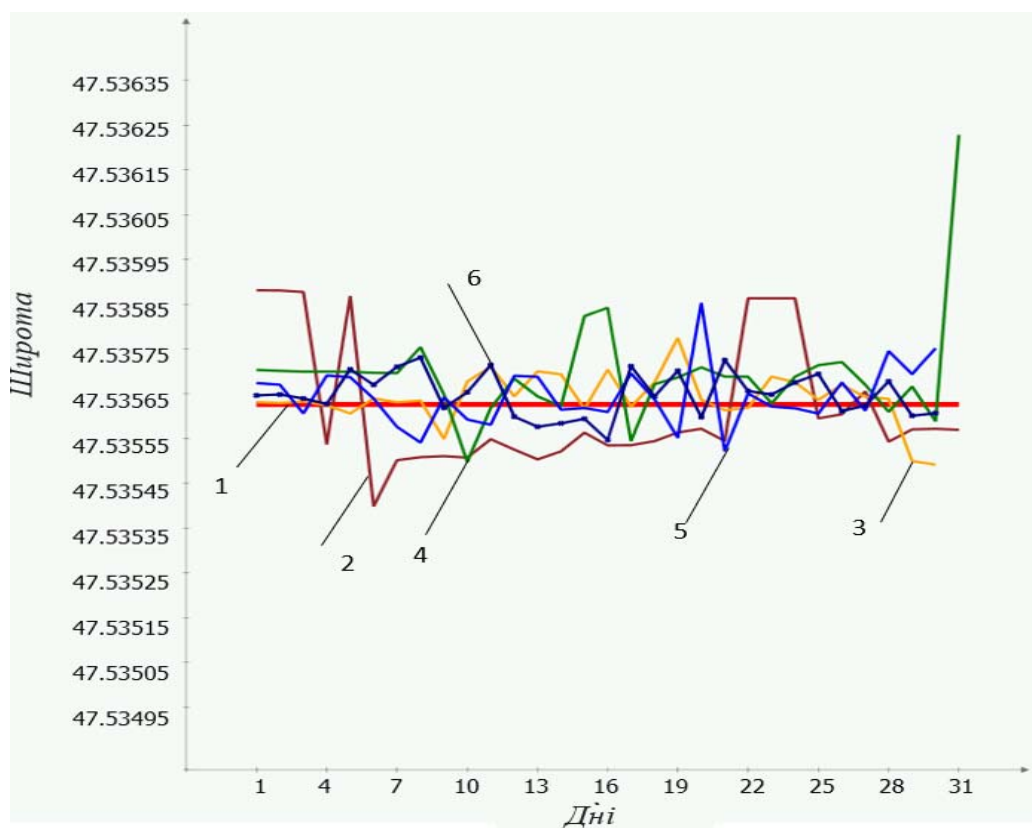


Рисунок 2.14 – Графік змін широти відносно встановленої константи широти (1 – еталонне значення, 2 – перший місяць, 3 – другий місяць, 4 – третій місяць, 5 – четвертий місяць, 6 – п'ятий місяць)

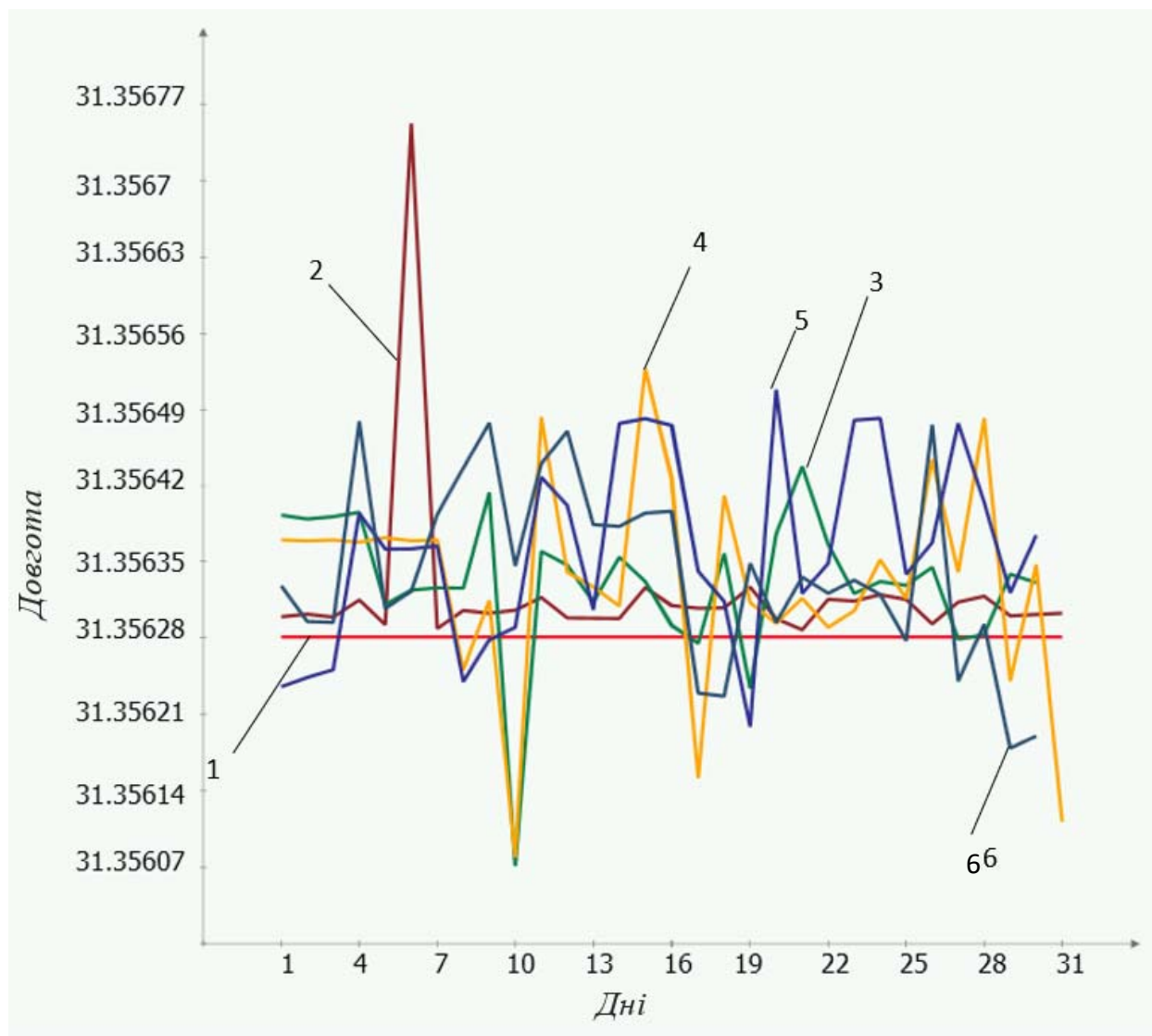
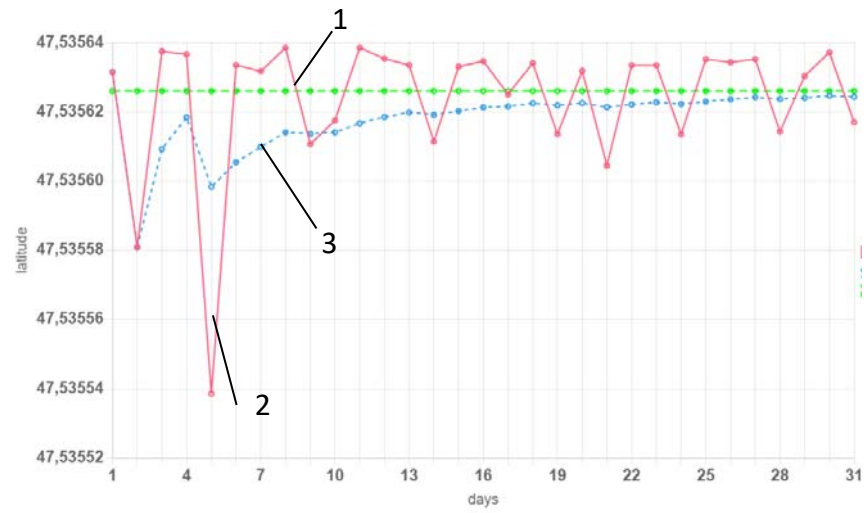
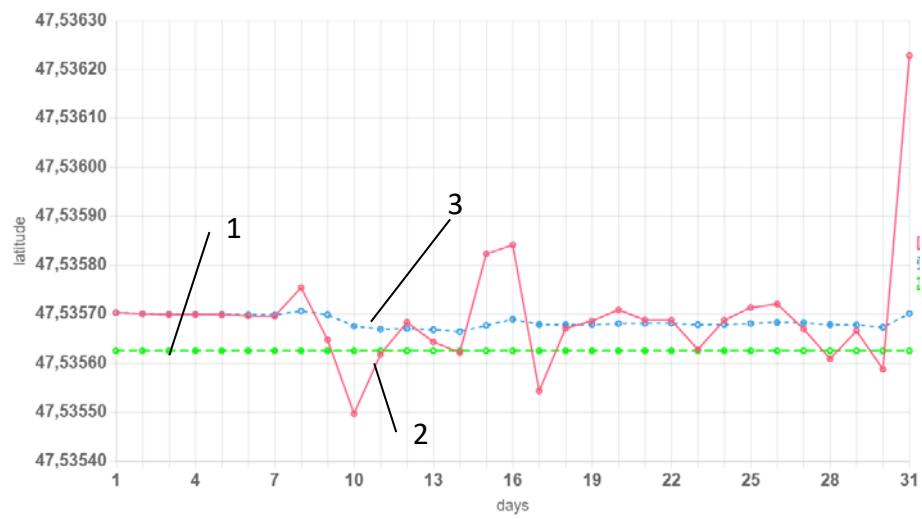


Рисунок 2.15 – Графік змін довготи відносно встановленої константи довготи (1 – еталонне значення, 2 – перший місяць, 3 – другий місяць, 4 – третій місяць, 5 – четвертий місяць, 6 – п'ятий місяць)

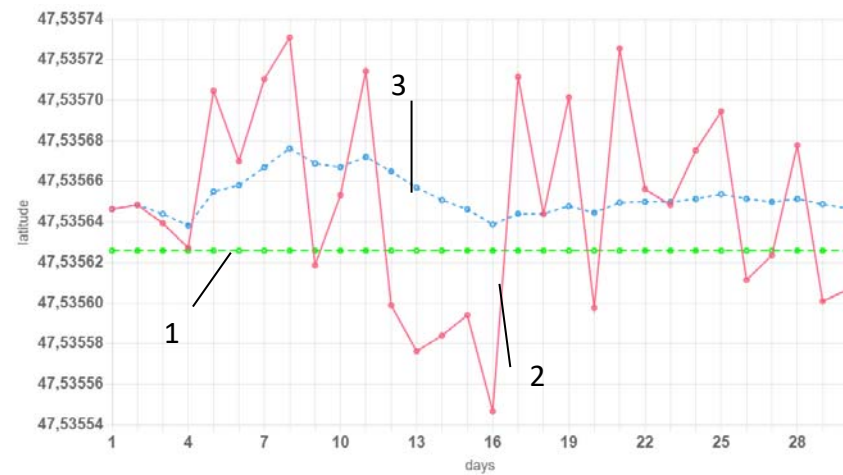
За результатами, представленими на рис. 2.14 і 2.15, фільтр Калмана було застосовано для зниження рівня шумів під час обробки сигналу. На рисунку 2.16 зображено три криві, що відображають етапи корекції даних: 1 – еталонне значення, 2 – виміряне значення, 3 – значення після обробки фільтром.



a)

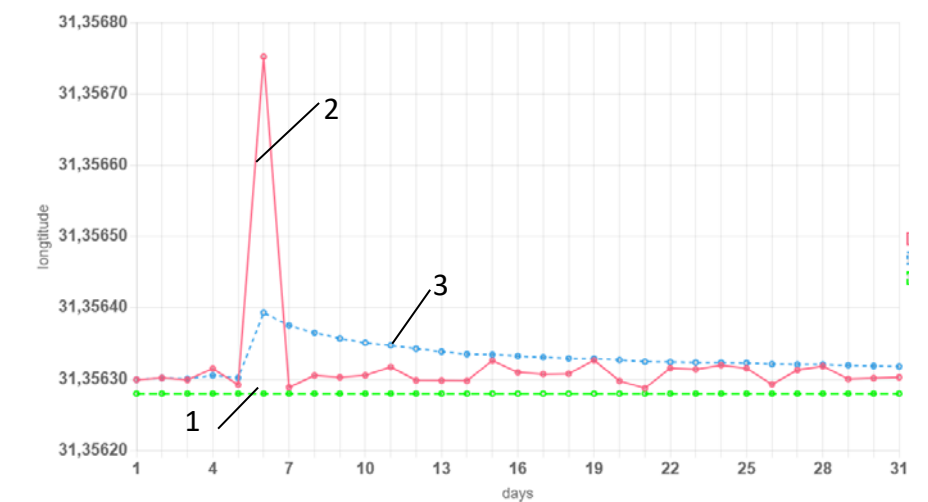


б)

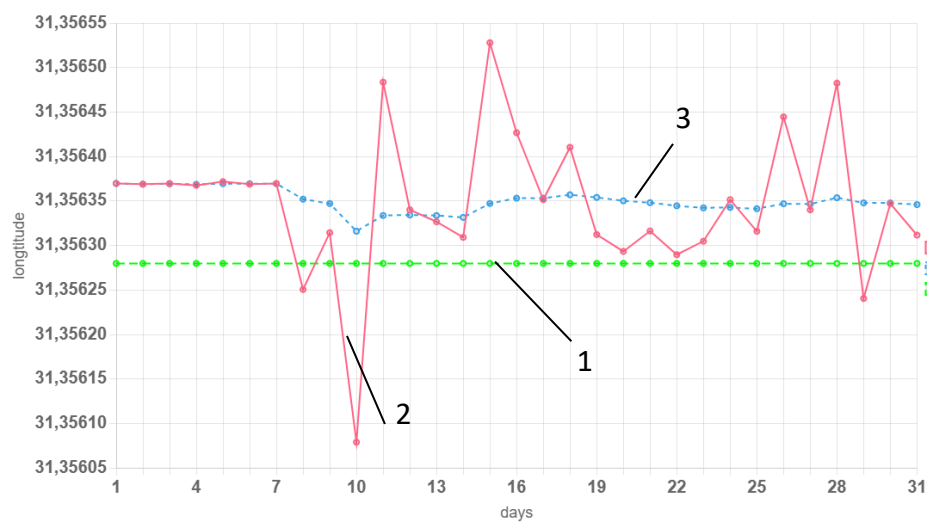


в)

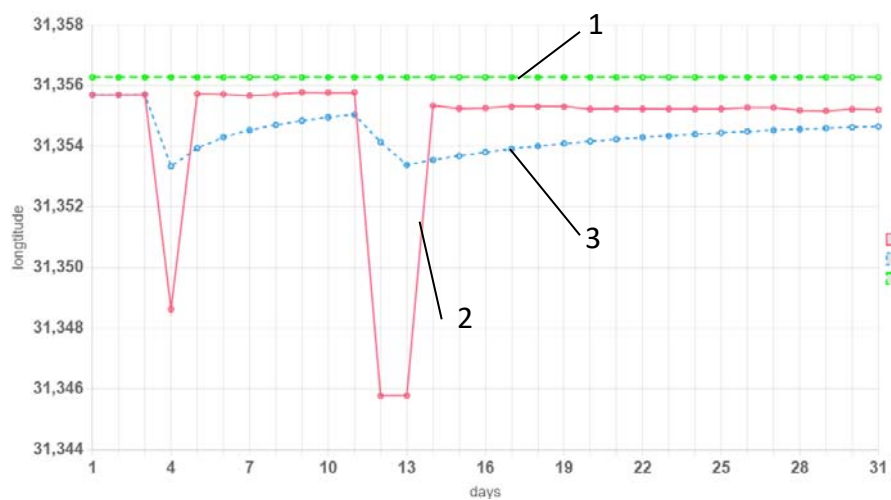
Рисунок 2.16 – Графік зниження шумів на показник широти із застосуванням фільтра Калмана за місяцями (а – перший, б – третій, в – п'ятий)



а)



б)



в)

Рисунок 2.17 – Графіки зниження шумів на показник довготи із застосуванням фільтра Калмана за місяцями (а – перший, б – третій, в – п'ятий)

Як видно з графіків, дані, отримані за допомогою фільтра Калмана, дають менше похибку по відношенню до еталонного положення об'єкту, порівняно з необробленими даними. Проте відхилення у середньому по місяцях дорівнює 314 м. Це демонструє ефективність методу, який дає змогу мінімізувати різницю між виміряним і реальним положенням об'єкта, але точність недостатня.

Представлені розрахунки показують, що використання фільтра Калмана для корекції помилок робить систему позиціонування гнучкішою та стійкішою до змін в умовах середовища. Функція адаптації дає змогу системі підлаштовуватися під такі чинники, як зміна конфігурації майданчика, наявність металевих конструкцій і погіршення якості сигналу.

Під час проведеного дослідження системи позиціонування з використанням Starlink на будівельному майданчику з умовами, що змінюються було встановлено, що фільтр Калмана надає можливість значно знизити рівень шумів і зменшити похибку визначення місцеположення. Застосування цього підходу під час експерименту дозволило скоротити відхилення геопозиції в середньому з 800 до 314 метрів в реальних умовах із завадами у вигляді металевих конструкцій та великогабаритного кранового обладнання.

Отже, для вирішення завдань, що потребують більшої точності, особливо в умовах, що динамічно змінюються, поточний рівень точності залишається недостатнім. Найбільш значущі джерела похибки пов'язані з багаторазовим відбиттям сигналу від металевих конструкцій та водних поверхонь. Також значний вплив на точність вносить поява наземних перешкод, що погіршують видимість супутників та зменшують якість сигналу.

2.4 Технології позиціонування на основі UWB

Метою даного експерименту було оцінити можливості надширокосмугової технології (Ultra-Wideband, UWB) для точного позиціонування об'єктів в умовах

відкритого та напівзакритого промислового майданчика. Обрана апаратна платформа – Decawave DWM1001 – є одним із найбільш доступних рішень для побудови систем позиціонування у режимі реального часу [97, 98].

Особливістю UWB є заявлена висока точність (до 10 см), стійкість до багатопроменевого розповсюдження сигналу та коротка тривалість імпульсу, що дозволяє уникати інтерференцій у складному середовищі (метал, бетон, обладнання).

Експеримент проводився в зоні відкритого майданчика площею близько 20×20 м. До тестового комплекту входили:

- 3 стаціонарні якорі (Anchors), розміщені на фіксованих координатах по кутах площі;
- 1 мобільна мітка (Tag) – встановлена на об'єкт (жилет працівника);
- Raspberry Pi Gateway для збирання координат через UART/MQTT.

Позиціонування відбувалося за методом Time Difference of Arrival (TDoA) та Two-Way Ranging (TWR) з використанням вбудованого прошитого стека Decawave RTLS. Дані зчитувались через Node-RED та логувались для подальшого аналізу.

На рисунку 2.18 зображено узагальнену архітектуру системи позиціонування, побудованої з використанням надширокопasmугової технології UWB на базі модулів Decawave DWM1001.

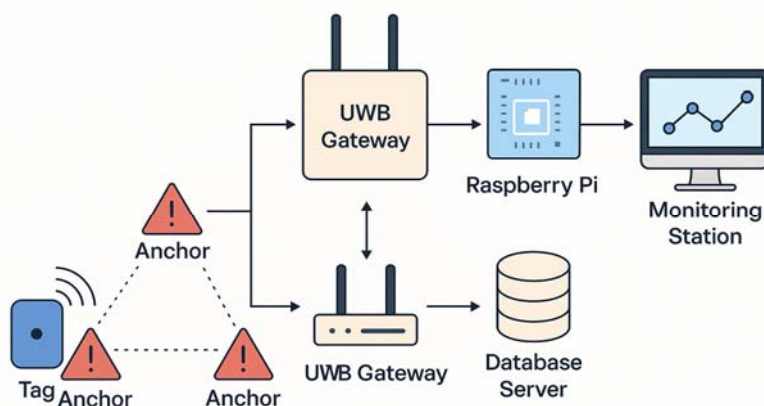


Рисунок 2.18 – Архітектура системи позиціонування на базі UWB-сенсорів Decawave

Система складається з таких основних компонентів:

- мобільна мітка (Tag) – пристрій, що закріплюється на працівнику або об'єкті. Мітка передає імпульсні сигнали у діапазоні UWB з інтервалами, визначеними прошивкою;
- якорі (Anchors) – стаціонарно розташовані приймачі, встановлені в контрольованій зоні на відомих координатах. Для коректної роботи системи необхідно щонайменше три якорі (оптимально – чотири і більше) в полі видимості кожної мітки;
- обчислювальний шлюз (Gateway) – пристрій (наприклад, Raspberry Pi), що збирає координатні дані з якорів через UART або Bluetooth-з'єднання; Шлюз може виконувати попередню фільтрацію даних або пересилати їх до хмари або сервера локальної мережі;
- інтерфейс користувача / аналітичний модуль – програмне забезпечення, яке відображає місцезнаходження об'єктів у реальному часі та зберігає історичні дані для подальшого аналізу [99].

Комунікація між якорями та тегом здійснюється за допомогою протоколу Two-Way Ranging (TWR) або Time Difference of Arrival (TDoA), що дозволяє досягати сантиметрової точності у визначенні координат. Визначене положення тега надсилається на шлюз, який далі передає інформацію у зовнішню систему обліку або моніторингу. Запропонована архітектура є модульною та масштабованою, що дозволяє легко адаптувати систему до різних за розміром і складністю зон контролю.

З метою оцінки точності позиціонування на основі надширокосмугових технологій (UWB) в умовах промислового майданчика було проведено експериментальне дослідження у 480 контрольованих точках. Основні параметри наведено в таблиці 2.4.

Критерії оцінки:

- середня та максимальна похибка;
- стабільність координат у динаміці;
- вплив металевих перешкод;

– простота налаштування системи.

Таблиця 2.4 – Основні параметри експериментального дослідження

№	Параметр дослідження	Значення
1	Кількість днів експерименту	20 робочих дня
2	Тривалість фіксації координат на день	8 годин
3	Періодичність фіксації	3 хвилин
4	Кількість об'єктів	1

У результаті дослідження були отримані такі дані:

- середня похибка позиціонування в межах зони склала 7–12 см;
- максимальна зафіксована похибка не перевищувала 25 см, переважно в зонах перешкод (поблизу металевих ємностей);
- частота оновлення координат – до 10 Гц, що дозволяє відстежувати рух працівника у режимі реального часу;
- при переміщенні об'єкта зі швидкістю до 1 м/с не спостерігалось "ривків" або стрибків координат;
- втрати зв'язку були незначними – лише за межами зони покриття (понад 20 м від якорів);
- система продемонструвала стійкість до багатопроменевих завад у порівнянні з GPS і Wi-Fi.

Отже, отримані результати експериментального дослідження, варто зазначити, що тестування проводилось на обмеженій території промислового майданчика зі сталою конфігурацією простору. Усі якорі мали фіксоване положення, не змінювалося розташування техніки або будівельних конструкцій, а умови сигналопоширення залишались стабільними протягом усіх вимірювань.

Цей фактор суттєво вплинув на якість сигналу та точність позиціонування, оскільки відсутність змін у середовищі знижує рівень шумів, багатопроменевих відбиттів і мікрозатінь, які зазвичай виникають у реальному виробничому процесі. Отже, отримані результати можуть бути оптимістичними щодо

стабільності роботи системи UWB і не повною мірою відображати умови реального динамічного середовища, характерного для відкритих будівельних або монтажних майданчиків.

2.5 Висновки

Проведений аналіз показав, що GPS-технологія має низку суттєвих обмежень в умовах промислових майданчиків – зокрема через багатопроменевість, втрату сигналу та відсутність вертикального позиціонування. Це зумовлює її обмежену ефективність позиціонування в динамічних середовищах, GPS може бути лише допоміжною технологією в гібридній системі.

В свою чергу, дослідження показали, що Wi-Fi позиціонування має потенціал завдяки інфраструктурній доступності, але вразливе до багатопроменевих перешкод, нестабільності сигналу RSSI і обмежень у вертикальному вимірі. Це також виключає його як основну технологію, але робить корисною для інтеграції з іншими методами позиціонування.

У результаті експериментальних досліджень з використанням супутникової системи Starlink було виявлено закономірності зміни похибки позиціонування залежно від просторової конфігурації середовища. Встановлено, що на точність координат об'єкта істотно впливають динамічні перешкоди та екранування сигналу.

Для компенсації виявлених спотворень було застосовано фільтр Калмана, що дозволило здійснювати згладжування шумів і коригування координат з урахуванням динаміки середовища. Це забезпечило можливість підвищення

точності та надійності позиціонування об'єктів у складних умовах промислових майданчиків.

Технологія UWB показала найвищу точність, але виявилась чутливою до відхилень антени, впливу металевих об'єктів і вимагала високої вартості впровадження. Необхідне додаткове доповнення інерційними модулями для компенсації похибок.

Досліджені технології не забезпечують достатнього рівня точності, надійності та стабільності в умовах динамічного середовища промислових майданчиків самостійно. З огляду на це, доцільним є впровадження гібридної мережі сенсорів, яка поєднує у собі різні типи технологій з метою забезпечення високого рівня покриття, точності та стійкості до завад.

В результаті експериментальних досліджень встановлено закономірності впливу просторових та середовищних чинників на точність позиціонування, а саме:

- наявність металоконструкцій зумовлює багатопроменевість та затінення сигналу;
- динамічні зміни ландшафту (переміщення техніки, тимчасові споруди) істотно впливають на стабільність каналів зв'язку;
- вертикальні переміщення та багаторівнева архітектура об'єктів знижують ефективність одношарових технологій позиціонування.

Урахування цих закономірностей дозволяє аргументовано здійснювати вибір технологічних засобів під час проєктування гібридної системи позиціонування, адаптованої до специфіки промислових майданчиків із динамічною просторовою конфігурацією.

З огляду на виявлену залежність між характеристиками середовища та точністю позиціонування, особливої актуальності набуває питання раціонального просторового розміщення елементів сенсорної інфраструктури. Ефективність гібридної системи значною мірою визначається не лише вибором технологій, а й їхнім топологічним розташуванням у межах об'єкта моніторингу.

У промислових умовах, де наявні зони з обмеженою видимістю, високою

концентрацією металевих об'єктів та складною геометрією, некоректне або нераціональне розміщення сенсорів призводить до погіршення якості сигналу, втрати точності та зниження надійності функціонування системи. Водночас економічні обмеження унеможливають надмірну надлишковість у покритті, що вимагає оптимізації кількості, типу та положення сенсорних вузлів.

Отже, оптимізація просторової структури розміщення сенсорів у складі гібридної системи позиціонування постає як ключовий етап, що забезпечує адаптацію системи до умов конкретного середовища та сприяє досягненню балансу між точністю, надійністю та економічною ефективністю. Це обумовлює необхідність формалізації відповідної задачі та застосування методів математичної оптимізації для визначення конфігурації, яка забезпечує максимальну інформативність та стійкість у реальному середовищі експлуатації.

У результаті досліджень отримав подальший розвиток метод розрахунку координат об'єкта на базі глобальної та локальних технологій позиціонування з використанням фільтра для згладжування шумів, що надає можливість підвищити точність та надійність позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією. Основні практичні та наукові висновки другого розділу опубліковано в роботах [100-103].

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ У ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

3.1 Постановка задачі оптимізації структури сенсорної мережі

Проведений аналіз сучасних технологій позиціонування показав, що жодна з них не здатна самотійно забезпечити необхідний рівень точності, стабільності та масштабованості у складних умовах промислового майданчика. У зв'язку з цим, найбільш ефективним підходом виявилось створення гібридної системи позиціонування, яка комбінує переваги глобальних та локальних методів. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до реального середовища, зменшити похибки та підвищити надійність.

Не менш важливою складовою побудови системи позиціонування на промислових майданчиках є економічна доцільність запропонованого рішення. Хоча інтеграція кількох технологій у межах гібридної системи дозволяє суттєво підвищити точність і надійність позиціонування, вона водночас призводить до збільшення кількості сенсорів, підвищених вимог до інфраструктури, складності обслуговування і загального бюджету реалізації. У реальних умовах підприємств це створює обмеження, які не дозволяють застосовувати суцільне або надмірне покриття території високоточними засобами.

Отже, постає задача багатокритеріальної оптимізації, в якій необхідно досягти заданого рівня точності та надійності при мінімально можливих витратах. Це означає пошук такої конфігурації сенсорної мережі, яка забезпечує покриття всіх функціонально значущих зон майданчика з урахуванням:

- просторової нерівномірності вимог до точності;
- обмежень на кількість та тип сенсорів;
- вартості розгортання та обслуговування елементів системи;

– змінної топології середовища, що вимагає адаптивності до перебудови мережі.

Поставлена задача зводиться до пошуку компромісу між якістю позиціонування та ресурсними витратами. Для вирішення цієї задачі необхідно насамперед чітко визначити вимоги до системи: яку точність (просторову похибку позиціонування) та надійність (ймовірність успішного визначення координат у складних умовах) ми хочемо досягти, і якою ціною це є допустимим для підприємства [104, 105].

Отже, першим етапом оптимального проєктування сенсорної мережі є формалізація вимог до якості обслуговування:

- допустима похибка локалізації в межах кожної функціональної зони;
- гранична ймовірність втрати зв'язку або неправильної локалізації;
- максимальний бюджет на розгортання і обслуговування інфраструктури.

Ефективність рішення суттєво залежить від геометричної конфігурації території, на якій розгортається система.

Конфігурація майданчика, а саме його форма, розміри, багаторівневність, наявність внутрішніх порожнин або технічних проходів - впливає на:

- ефективність поширення сигналу;
- формування зон з нестабільним покриттям або значними відбиттями;
- щільність розміщення сенсорів, необхідну для досягнення заданої точності;
- вибір типу сенсора з точки зору потужності, дальності дії та енергоспоживання.

Для реалізації запропонованого підходу до побудови сенсорної мережі розглянемо 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. 3.1,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. 3.1, 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. 3.1,в) [106].

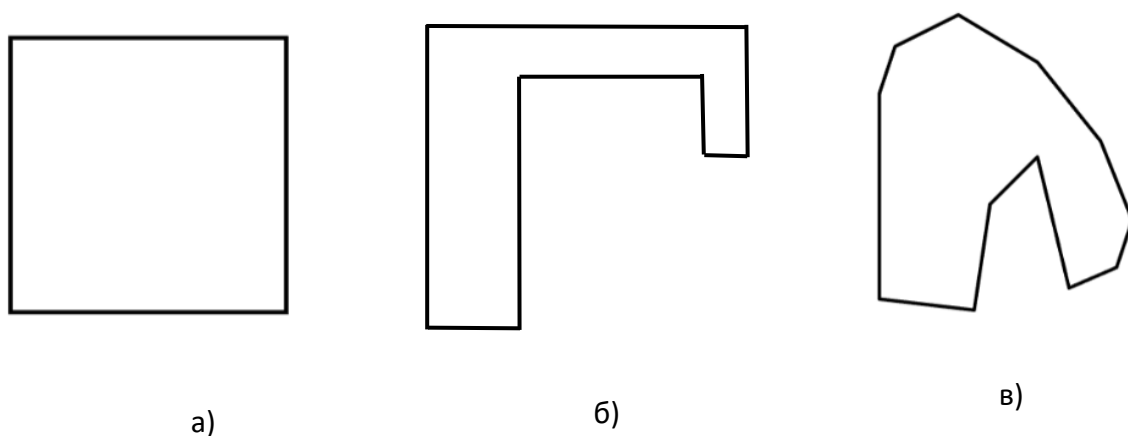


Рисунок 3.1 – Топологія майданчиків

Окрім геометрії, важливо враховувати просторову неоднорідність у розміщенні об'єктів позиціонування та інтенсивності їх взаємодії із середовищем.

У межах одного майданчика різні зони можуть суттєво відрізнятись за функціональним навантаженням: деякі області характеризуються високою щільністю об'єктів, інтенсивним рухом техніки, виконанням точних технологічних операцій та наявністю великої кількості джерел завад, тоді як інші зони можуть бути відносно стабільними або навіть пасивними. У зонах з підвищеною критичністю додатковим фактором ризику є численні відмови сенсорних елементів або вузлів через перегрів, механічні пошкодження чи

електромагнітні завади. Це зумовлює необхідність врахування відмовостійкості під час оптимізації розміщення сенсорів та передбачення резервних шляхів збору даних.

Це означає, що ефективне проектування сенсорної мережі має враховувати не лише топологію території, а й ступінь критичності її окремих ділянок до точності позиціонування. У цьому контексті доцільно ввести концепцію зонування, яка дозволяє диференціювати територію за рівнем вимог до точності, стабільності та ресурсних витрат.

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.

Отже, врахування просторової структури території, функціонального навантаження зон та економічних обмежень дає змогу обґрунтовано сформулювати задачу проєктування сенсорної мережі як оптимізаційну задачу, в якій необхідно досягти заданого рівня точності й надійності при мінімальних витратах на впровадження системи.

Щоб здійснити обґрунтований вибір конфігурації сенсорної мережі та забезпечити можливість її оптимального проєктування, необхідно перейти до математичної формалізації задачі.

Цільова функція:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_t} c_{ij} \cdot N_{k_{ij}} \rightarrow \min \quad (3.1)$$

де M – кількість зон, які потрібно покрити;

N_t – тип технологій позиціонування;

$i=1,2,\dots,M$ – індекси зон;

$j=1,2,\dots,N_t$ – індекси технологій;

$N_{k_{ij}} \in \{0,1\}$ – встановлення сенсор типу j в зоні i ;

c_{ij} – числове значення вартості цього встановлення.

Задача оптимального розміщення сенсорів може бути сформульована в термінах неперервного простору, однак її практична реалізація ускладнюється через високу обчислювальну складність, нечіткість меж покриття та труднощі формалізації просторових обмежень.

Отже, для ефективного пошуку оптимального рішення доцільно перейти до дискретизації області позиціонування, поділивши її на скінченну кількість елементарних зон. Такий підхід забезпечує структуроване представлення простору, дозволяє враховувати локальні особливості середовища, відмінності у вимогах до точності та створює передумови для застосування алгоритмічних методів оптимізації.

3.2 Геометричні моделі дискретизації простору промислового майданчика

Промислові майданчики зазвичай мають довільну форму. Працювати з довільною кривою складно, тому напочатку потрібно виконати апроксимацію області, тобто замінити форму на багатокутник із певною кількістю вершин. Це дозволяє надалі зручно працювати з математичними моделями.

В дослідженні гібридна система позиціонування включає технології UWB, Wi-Fi та GPS, важливо враховувати особливості кожної з них. На відміну від GPS, UWB та Wi-Fi характеризуються обмеженим радіусом дії. У зв'язку з цим природно формалізувати задачу покриття площі у вигляді моделі з колами покриття, кожне з яких відповідає зоні дії конкретного сенсора. Однак робота з колами у контексті геометричного моделювання та чисельних обчислень є складною, особливо при реалізації алгоритмів оптимізації.

Тому для пошуку оптимального рішення щодо розміщення сенсорів ми будемо розбивати область позиціонування на елементарні частини – полігони. Така дискретизація дозволяє структуровано представити простір, формалізувати вимоги до точності в окремих ділянках та створити основу для застосування алгоритмів оптимізації. 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.

Отже, дискретизація простору є не лише технічним прийомом для зручності моделювання, а й концептуальною основою побудови адаптивної, масштабованої та аналітично керованої системи позиціонування в складних умовах промислового середовища. Ефективність такої дискретизації значною мірою залежить від того, які саме геометричні фрагменти обрано для представлення простору.

При дискретизації важливо визначити стратегію заповнення простору елементарними частинами. У залежності від обраної логіки заповнення – зліва направо, згори вниз або по спіралі – можуть виникати перекриття, неузгодженості сітки або локальні порушення щільності покриття. В дослідження обрано центроорієнтовану стратегію заповнення: простір дискретизується, починаючи з центральної точки області (центроїда), з поступовим розширенням у напрямку до периферії. Для пошуку центру області використовуємо формулу центроїда багатокутника широко, яка використовується в інженерному проєктуванні, і враховує координати всіх вершин. Площа багатокутника знаходиться, як:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i) \quad (3.2)$$

де n – кількість вершин багатокутника;

x_i, y_i – координати i -ї вершини багатокутника.

Координати центру багатокутника знаходяться, як:

$$x_c = \frac{1}{6S} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i) \quad (3.3)$$

$$y_c = \frac{1}{6S} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} \cdot y_i) \quad (3.4)$$

Центроорієнтоване заповнення ефективне на виробничих об'єктах із зональною організацією процесів. Такий підхід забезпечує низку переваг:

- рівномірне нарощування покриття з урахуванням зон пріоритету;
- можливість гнучко реагувати на зміни форми майданчика;
- централізоване управління щільністю сітки;
- покращене вирівнювання контурів сітки при складній геометрії області.

Тип фрагментів визначає топологію покриття, щільність сітки, просторову точність і стабільність мережевої конфігурації, а отже – безпосередньо впливає на якість та вартість розгортання системи позиціонування. Постає задача вибору форми елементарної зони, яка забезпечить баланс між геометричною адаптивністю, обчислювальною ефективністю та зручністю реалізації.

Були розглянуті три базові типи геометричних фрагментів, які застосовуються при просторовому моделюванні та побудови сенсорних мереж:

- квадратні полігони – найпростіша та найбільш поширена форма сітки, зручна для реалізації та інтеграції з растровими картами;
- трикутні полігони – елемент, дозволяє гнучко адаптуватися до складної геометрії об'єкта, особливо в умовах нерівномірного розподілу;
- гексагональні полігони – компроміс між регулярністю та щільністю покриття, забезпечує рівномірну топологію та мінімізує надлишкове перекриття.

Вибір цих трьох типів обумовлений прагненням охопити основні підходи до дискретизації простору: ортогональні (квадратні), адаптивно-топологічні (трикутні) та ізотропні (гексагональні). Кожен із них має свої переваги та недоліки в контексті задачі позиціонування на майданчику з динамічною конфігурацією. З метою подальшого порівняльного аналізу було реалізовано дискретизацію простору із застосуванням вказаних трьох базових геометричних елементів: рівносторонніх трикутників, квадратів та правильних шестикутників. Такий підхід дозволяє оцінити придатність кожної структури для різних типів майданчиків – від регулярних до складних топологій з внутрішніми перешкодами. На рис. 3.2 наведено приклади просторової сітки, сформованої на основі кожного з розглянутих типів елементарних фрагментів.

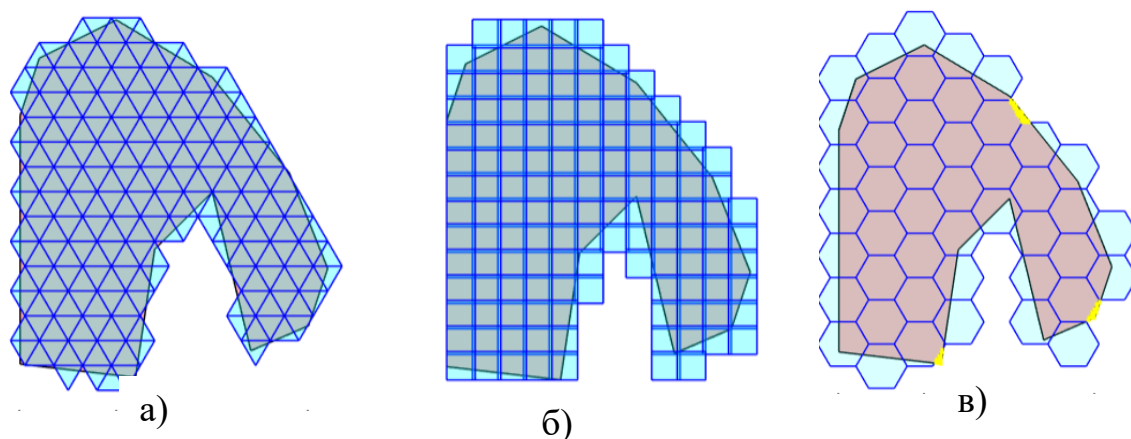


Рисунок 3.2 – Дискретизація простору з використанням базових геометричних елементів

Для забезпечення повного та надійного покриття всієї області позиціонування сенсорами необхідно визначити максимальні розміри елементарних фрагментів сітки, які гарантують виконання заданої умови: у кожному вузлі має забезпечуватись дія щонайменше трьох сенсорів, розташованих на відстані, що не перевищує радіус R . Такий підхід дозволяє забезпечити мінімальний рівень надмірності, необхідний для стійкої багатоточкової локалізації та зменшення похибки в умовах завад.

У зв'язку з цим для кожного типу сітки було обчислено граничне значення сторони елемента (полігона) залежно від R , виходячи з геометричних властивостей відповідної структури.

Сторона полігона a_k у формі квадрату визначається за формулою (3.5):

$$a_k \leq \frac{R}{\sqrt{2}}, \quad (3.5)$$

де a_k – сторона полігона у формі квадрату.

У трикутній сітці сторона a_T трикутника визначається за формулою (3.6):

$$a_T \leq R, \quad (3.6)$$

де a_T – сторона полігона у формі трикутника.

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

$$a_{III} \leq \frac{2R}{\sqrt{3}}, \quad (3.7)$$

де a_{III} – сторона полігона у формі шестикутника (гексагону).

Кожен із типів геометричних елементів має свої особливості, які безпосередньо впливають на параметри побудови сенсорної мережі, зокрема на:

- щільність покриття – кількість сенсорів, необхідних для повного охоплення області при заданому радіусі дії;
- економічну ефективність – залежно від того, наскільки щільно елементи прилягають один до одного без надмірного перекриття;
- обчислювальну складність – пов’язану з кількістю сусідів у топології, формуванням маршрутів і оцінкою видимості;
- стійкість до геометричних викривлень – адаптацію сітки до нерегулярних або асиметричних форм майданчиків.

У таблиці 3.1 наведено порівняння основних характеристик трьох типів геометричних структур в контексті їх застосування для задачі дискретизації простору при побудові системи позиціонування.

Порівняльний аналіз показав, що вибір геометричної структури сітки має суттєвий вплив на ефективність сенсорного покриття. Гексагональна модель забезпечує найкращу щільність покриття, квадратна є найпростішою в реалізації, а трикутна – найбільш гнучкою щодо адаптації до складної геометрії майданчика.

З огляду на складну топологію критичних зон і вимогу до максимально точного опису просторових меж, подальший аналіз зосереджено на трикутній сітці, яка демонструє високу здатність до адаптації в умовах нерегулярного розміщення об’єктів.

Таблиця 3.1 – Порівняння геометричних моделей дискретизації простору

Тип елемента	Щільність покриття	Кіл-ть сусідів	Стійкість до викривлень	Обчислювальна складність	Переваги	Недоліки
Квадрат	Середня ($\approx 78.5\%$ при круговому покритті)	4 (ортогонально) або 8	Низька для складних контурів	Низька	Простота реалізації, сумісність із растровими форматами	Перекриття по діагоналях, неефективне на вигнутих межах
Трикутник (рівносторонній)	Висока (можлива щільна адаптація)	6	Висока адаптивність до складної геометрії	Середня	Гнучкість моделювання нерівномірних областей	Ускладнення у визначенні покриття і маршрутизації
Гексагон (шестикутник)	Найвища ($\approx 90.7\%$ ефективного покриття)	6	Середня–висока	Вища, ніж у квадрата	Рівномірна відстань до сусідів	Складність реалізації у прямокутній системі координат

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. 3.3). 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.

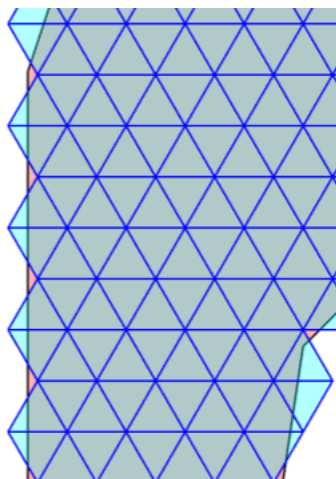


Рисунок 3.3 – Зниження щільності сенсорного покриття на периферії майданчика при центроорієнтованому заповненні

У процесі моделювання сенсорного покриття було прийнято умову, що для кожного вузла сітки необхідно забезпечити видимість щонайменше трьох сенсорів у межах радіусу дії R . Така вимога зумовлена тим, що більшість алгоритмів локалізації, зокрема методи трилатерації, потребують щонайменше трьох незалежних вимірів для визначення координат об'єкта в двовимірному просторі. Це дозволяє не лише обчислити положення, а й зменшити похибку за рахунок надмірності та забезпечити стійкість до збоїв окремих сенсорів [107].

Запропоновані варіанти дискретизації були реалізовані для різних конфігурацій майданчика з урахуванням розподілу зон за критичністю. Для кожного типу сітки виконано моделювання сенсорного покриття з дотриманням цієї умови – наявності щонайменше трьох сенсорів у кожному елементі.

Результати моделювання заповнення з використанням трьох типів сітки – квадратної, трикутної та гексагональної – наведені в табл. 3.2. У ній узагальнено ключові характеристики покриття: кількість необхідних сенсорів, рівномірність сітки та ефективність використання простору.

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.

Таблиця 3.2 – 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

З наведених даних видно, що трикутна сітка забезпечує найвищу щільність покриття в умовах складної геометрії, хоча й потребує більшої кількості сенсорів для досягнення заданої надмірності. Гексагональна сітка дозволяє зменшити кількість елементів і точок розміщення, демонструючи добру просторову ефективність, однак дещо поступається за охопленням на нерегулярних межах. Квадратна сітка – найпростіша у реалізації, але виявляє меншу однорідність покриття при складній конфігурації середовища.

Для більш глибокого аналізу впливу структури сітки на просторову ефективність та точність позиціонування було проведено серію експериментів із різними варіантами розміщення сенсорів у межах трьох базових типів майданчиків: прямокутної, П-подібної та складної конфігурації з перешкодами.

У кожному випадку дискретизація виконувалась відповідно до обраного типу сітки – квадратної, трикутної або гексагональної, – з однаковими початковими параметрами (радіус дії, цільова надмірність покриття, критичність зони).

Оцінювання здійснювалось за такими показниками:

- середня точність позиціонування;

- кількість якорів на одну точку (коефіцієнт надмірності);
- частка площі критичної зони, покрита сенсорами з заданою точністю.

Узагальнені результати розміщення сенсорів у вузлах елементів сітки для кожної з конфігурацій майданчиків наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – 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 проведеним аналізом, трикутна дискретизація демонструє найкращі показники точності позиціонування на всіх типах майданчиків, включно з об'єктами складної конфігурації. Завдяки високій геометричній гнучкості та можливості точного обрисовування меж критичних зон, ця сітка забезпечує щільне та стабільне покриття навіть у випадках складної топології. Водночас трикутна структура потребує найбільшої середньої кількості якорів на одну точку позиціонування, що призводить до суттєвого зростання витрат на реалізацію системи.

Гексагональна сітка забезпечує оптимальний компроміс між точністю та економічністю, дозволяючи істотно скоротити кількість сенсорів при збереженні прийняттого рівня точності у середньокритичних зонах. Вона показує стабільну ефективність для типових конфігурацій майданчиків без різких змін геометрії, хоча й поступається трикутній у деталізації покриття на нерегулярних межах.

Квадратна дискретизація має найменшу реалізаційну складність, однак її ефективність швидко знижується зі збільшенням структурної складності простору. Така сітка доцільна лише в умовах простої прямокутної геометрії з рівномірним розподілом критичності.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що жоден тип дискретизації не є універсальним, а ефективність їх застосування залежить від форми майданчика, просторової динаміки та пріоритетів (точність чи вартість). Це підтверджує необхідність адаптивного підходу до побудови сенсорної мережі, в якому структура сітки та конфігурація сенсорів підбираються індивідуально для кожного об'єкта.

З огляду на складність задачі, її дискретну природу, численні параметри та необхідність пошуку компромісу між суперечливими критеріями, подальше розв'язання задачі оптимального розміщення сенсорів буде здійснюватися з використанням метаевристичного підходу [108, 109]. Такий підхід дозволяє ефективно опрацьовувати великі конфігураційні простори, забезпечує наближене, але прийнятне за якістю рішення в обмежений час і добре масштабується на випадки з високою складністю геометрії майданчика.

3.3 Метаевристичні підходи до оптимізації структури сенсорної мережі

З огляду на складність та багатовимірність задачі оптимального розміщення сенсорів у складному середовищі промислового майданчика, а

також недоцільність використання точних комбінаторних методів через їхню обчислювальну непрактичність, було обґрунтовано застосування метаевристичних підходів. Їхня здатність ефективно шукати субоптимальні рішення у великих і структурно складних просторах без необхідності повного перебору конфігурацій забезпечує гнучкість та масштабованість проєктованої системи позиціонування.

На основі цього рішення реалізовано фрагментарну еволюційну модель, у якій кожен полігон розглядається як окремий підпростір оптимізації, а повна конфігурація сенсорної мережі формується як комбінація локально оптимізованих фрагментів

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 [110 - 111], 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:

$$F(x) = N(x) + \lambda_1 \cdot P_n(x) + \lambda_2 \cdot P_t(x) \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

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.

При проектуванні системи позиціонування для кожної технології існує жорстке обмеження на мінімальну кількість якорів у кожній зоні для кожної технології, поява недостатнього покриття є неможливою. Відповідно, введення функції штрафу $P_n(x)$ є надлишковим, і вона не використовується в остаточній постановці задачі оптимізації, тому цільова функція для кожного фрагменту формуються у вигляді:

$$F(x) = N(x) + \lambda_2 \cdot P_t(x) \rightarrow \min, \quad (3.9)$$

Для врахування точності позиціонування використовується функція $P_t(x)$:

$$P_t(x) = \sum_{i=1}^N \begin{cases} \max(0, d_{\max}^{i,UWB} - 15)^2 + \max(0, d_{\max}^{i,WIFI} - 30)^2, & \text{для } k_i = 1 \\ \max(0, d_{\max}^{i,WIFI} - 30)^2, & \text{для } k_i = 2 \\ 0, & \text{для } k_i = 3 \end{cases} \quad (3.10)$$

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.3.4), що забезпечує рівномірне покриття зони.

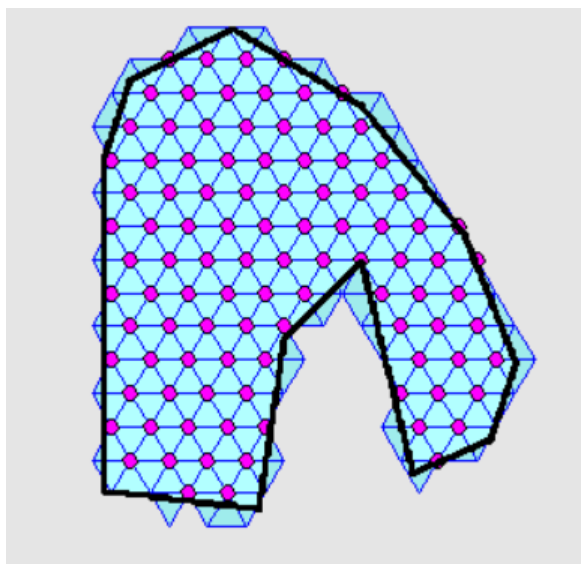


Рисунок 3.4 – Покриття критичної зони за допомогою трикутної дискретизації та розміщення сенсорів

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 табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – 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 рис. 3.5 представлено результати оптимального розміщення сенсорів для двох різних технологій позиціонування (Wi-Fi та UWB) на основі трикутної

дискретизації критичної зони.

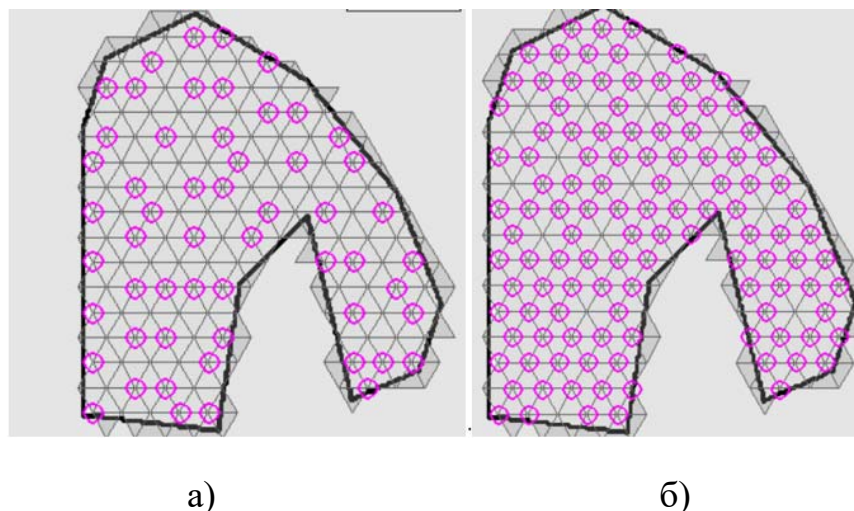


Рисунок 3.5 – Оптимальне розміщення сенсорів Wi-Fi та UWB у критичній зоні після еволюційної оптимізації

Результати оптимізації розміщення сенсорів для різних технологій (рис. 3.5) показали, що зменшення кількості сенсорів без зниження точності локалізації для технології UWB складає 15%, для WiFi – 79%.

Для порівняння отриманих результатів та оцінки ефективності еволюційного підходу було розглянуто метод покоординатної оптимізації. Його особливістю є те, що він виконує пошук оптимального рішення шляхом поетапного вдосконалення кожної координати сенсора окремо, при фіксованих значеннях усіх інших змінних. Такий підхід є локальним, детермінованим і добре придатним до задач, у яких простір рішень допускає неперервне представлення.

Покоординатна оптимізація дозволяє точково коригувати конфігурацію сенсорів, зменшуючи похибки або надмірність локалізації, не змінюючи загальної структури сітки. У рамках дослідження цей метод використовувався для:

- локального покращення конфігурацій, отриманих регулярним або евристичним заповненням (наприклад, трикутною сіткою);
- зниження вартості або кількості сенсорів у зонах, де була зафіксована надмірність;

– перевірки стабільності рішень, знайдених еволюційним алгоритмом, шляхом їх локального уточнення.

З огляду на локальний характер покоординатної оптимізації, для оцінки якості рішень у цьому підході було сформовано відповідну цільову функцію, яка відображає баланс між основними техніко-економічними критеріями ефективності сенсорної мережі. На відміну від еволюційного підходу, де оптимізація орієнтована на мінімізацію кількості сенсорів і штрафів за порушення просторових обмежень, у цьому випадку завдання полягає у покращенні вже наявної конфігурації через мінімізацію загальних витрат, підтримання необхідного рівня покриття критичних зон і контроль над надмірністю.

Функція якості, яка використовувалась у процесі покоординатного пошуку, має агрегований вигляд і враховує наступні компоненти:

$$F(x) = \alpha \cdot C(x) + \beta \cdot (1 - P(x)) + \gamma \cdot \theta(x) \quad (3.11)$$

де C – загальна вартість конфігурації (враховує типи сенсорів);

$P \in [0, 1]$ – рівень покриття критичних зон (фракція задоволених точок);

θ – індекс надмірності (середня кількість якорів на точку);

α, β, γ – вагові коефіцієнти для об'єднання критеріїв.

Покриття критичних точок

$$P(x) = \frac{1}{m} \sigma(z_i, x) \quad (3.12)$$

де m – це кількість точок, які потребують покриття;

z_i – критичні точки.

В свою чергу, індикаторна функція покриття критичної точки:

$$\sigma(z_i, x) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } t \in \{UWB, Wi-Fi\} \text{ з } N_j^{(t)}(x) \geq 3 \\ 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

де $t \in \{UWB, Wi-Fi\}$ – тип технології.

Для оцінки умовного покриття точки заданим типом технології, використовується наступний розрахунок:

$$N_j^{(t)}(x) = \sum_{i=1}^n T(x_i) = t \wedge d(x_i, z_i) \leq R_t \quad (3.14)$$

де $T(x_i)$ – тип сенсора;

$d(x_i, z_i)$ – відстань від сенсору до точки.

Для кількісної оцінки ступеня резервування критичних точок якорями технологій важливим є урахування надмірності покриття. Це дає нам змогу підвищити надійність та відмовостійкість системи позиціонування. Такий підхід забезпечує можливість виявлення надлишкового або недостатнього покриття окремих зон, що, в свою чергу, сприяє оптимальному розміщенню якорів технологій із урахуванням вимог до точності, витрат і технологічних обмежень.

$$\theta(x) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \mathbb{I} \left[d(x_i, z_j) \leq R_{T(x_i)} \right] \quad (3.15)$$

де $R_{T(x_i)}$ – радіус дії технології T .

Для врахування кількості критичних точок, для яких умова наявності щонайменше трьох сенсорів одного типу не виконується вводимо штрафну функцію.

$$\psi(x) = \sum_{j=1}^m \mathbb{I} \left[\forall t \in \{UWB, Wi-Fi\}, N_j^{(t)}(x) < 3 \right] \quad (3.16)$$

На основі цього вводиться фінальна функція:

$$F(x) = \alpha \cdot C(x) + \beta \cdot (1 - P(x)) + \gamma \cdot \theta(x) + \mu \cdot \psi(x) \quad (3.17)$$

В якості початкового рішення використовуємо фіксовану конфігурацію сенсорів $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, яка сформована регулярним сітковим методом (рис. 3.6).

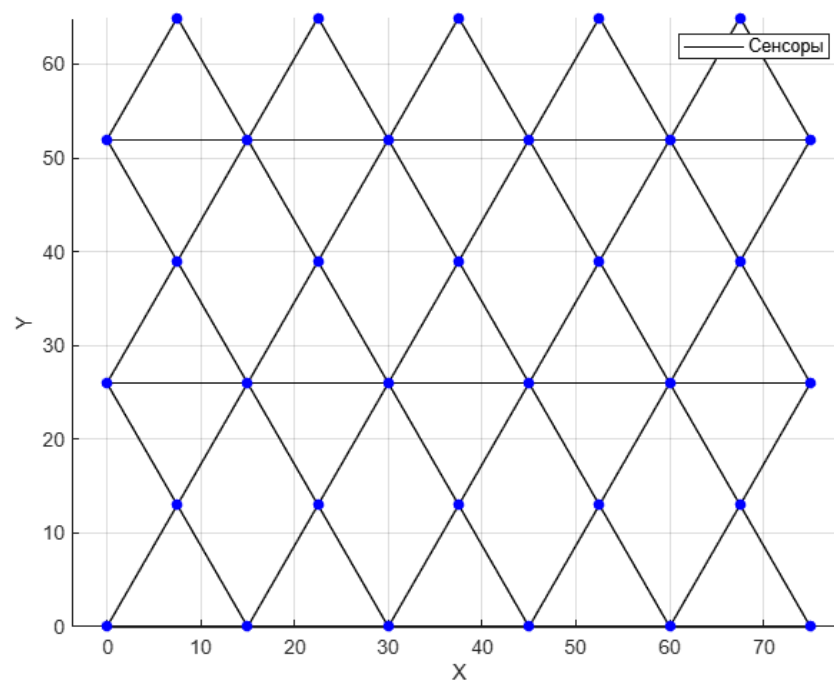


Рисунок 3.6 – Початкове розміщення сенсорів

Початкове розміщення сенсорів здійснювалось на основі регулярної трикутної сітки, що забезпечує базову рівномірність і покриття. Для кожного сенсора окремо виконувалось покрокове зміщення в межах допустимої зони вздовж координат x та y з фіксованим кроком. Під час кожного зсуву оцінювалось значення цільової функції, що відображає ступінь покриття контрольних точок.

У даному підході критерієм якості рішення обрана кількість точок, що потрапляють у зону дії хоча б одного сенсора. Якщо нова позиція сенсора дозволяє покрити більшу кількість точок, вона фіксується як поточна. Якщо жодне з допустимих зміщень не призводить до покращення, положення сенсора

не змінюється.

Процес повторюється ітеративно для всієї конфігурації до досягнення стабільного стану або перевищення максимально допустимої кількості ітерацій.

На рис.3.7 наведено розміщення сенсорів після оптимізації.

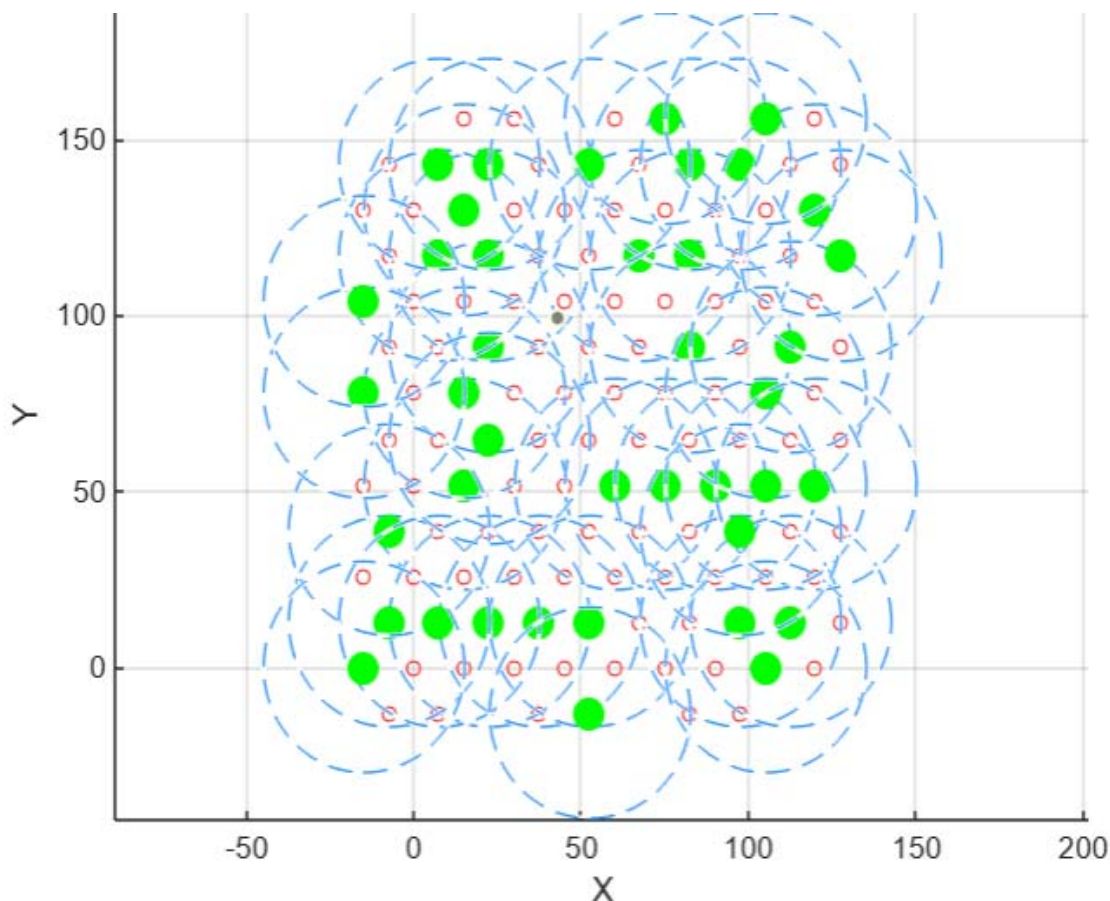


Рисунок 3.7 – Розміщення сенсорів після оптимізації

Застосування покоординатної оптимізації показало покращення у розміщенні сенсорів та покритті. Локальна оптимізація дозволила зменшити кількість сенсорів, при цьому зберігши необхідний рівень покриття та точність позиціонування в критичних зонах. Метод продемонстрував свою ефективність у локальному вдосконаленні конфігурацій, отриманих на етапі глобальної оптимізації, та у зниженні надмірності мережі без порушення її стабільності.

Результати оптимізації свідчать про здатність алгоритму ефективно адаптувати сенсорну мережу до реальних умов, зокрема в умовах складної геометрії та змінних вимог до покриття. Покоординатний пошук забезпечив

зниження загальної кількості сенсорів, зберігаючи при цьому високу якість позиціонування, що підтверджує ефективність цього методу для адаптивних та економічно доцільних рішень у сфері позиціонування.

Отже, обидва методи оптимізації продемонстрували свою здатність адаптувати сенсорну мережу до реальних умов, забезпечуючи ефективне покриття при мінімальних витратах. Проте важливо зазначити, що вибір між еволюційним алгоритмом і покоординатною оптимізацією залежить від конкретних вимог до системи, таких як час виконання, точність та ресурси, що виділяються на оптимізацію.

Враховуючи отримані результати, буде проведено детальний аналіз ефективності застосованих методів, порівняння їх результатів за різними критеріями (наприклад, точність, кількість сенсорів, економічність) та оцінка досягнутих покращень у порівнянні з початковими конфігураціями. Це дозволить сформулювати рекомендації щодо оптимального вибору підходу для різних умов експлуатації.

3.4 Аналіз результатів оптимізації

Для розв'язання задачі оптимального розміщення сенсорів на промислових майданчиках зробимо детальний аналіз метаевристичних методів оптимізації, які можуть бути використані для ефективного розміщення сенсорів з метою мінімізації загальної вартості системи при забезпеченні заданого рівня точності позиціонування.

Метаевристичні алгоритми імітують природні процеси, що дозволяє ефективно працювати в великих пошукових просторах і знаходити прийнятні рішення за обмежений час. Вони дають змогу одночасно враховувати кілька критеріїв та швидко адаптуватися до змін у середовищі. У зв'язку з цим, метаевристичні методи є оптимальними для вирішення задачі, де потрібно

знайти компроміс між економічністю та точністю.

Для оцінки ефективності обраних методів оптимізації були вибрані наступні ключові показники:

- середня точність позиціонування в критичній зоні, яка показує, наскільки точним є позиціонування;

- покриття, що вимірюється як відсоток території, охопленої сенсорами. Це важливий показник для визначення ефективності розміщення сенсорів у тих частинах майданчика, де точність позиціонування має бути найвищою;

- кількість необхідних сенсорів, оскільки економічна доцільність є важливим чинником.

У табл. 3.5 наведені результати порівняння ефективності еволюційного алгоритму та покоординатної оптимізації. Для кожного методу представлені значення до та після оптимізації за усіма основними показниками. Це дозволяє визначити, який підхід дає кращі результати з точки зору точності, кількості сенсорів та часу на розрахунки.

Таблиця 3.5 – Порівняння результатів оптимізації

Показник	Еволюційний алгоритм (після оптимізації)	Покоординатна оптимізація (після оптимізації)
Середня точність позиціонування (UWB)	0,15 м	0,15 м
Середня точність позиціонування (Wi-Fi)	2,8 м	2,9 м
Середнє число якорів на одну точку (UWB)	3,52	3,9
Середнє число якорів на одну точку (Wi-Fi)	5,9	6,5
Покриття зони (UWB)	90,02%	98,5%
Покриття зони (Wi-Fi)	99,85%	99,3%
Кількість сенсорів (UWB)	115	113
Кількість сенсорів (Wi-Fi)	28	50

Для порівняння використання еволюційного алгоритму та покоординатної оптимізації доцільно також розглянути оцінку часової складності застосованих методів. Оцінка часової складності дозволяє не лише кількісно порівняти обчислювальні витрати, але й зробити обґрунтований вибір оптимізаційного підходу залежно від умов експлуатації системи.

Часова складність для еволюційного алгоритму обчислюється, як:

$$O(G \cdot P \cdot (T_f + \log P)) \quad (3.18)$$

де G – кількість поколінь;

P – розмір популяції;

$\log P$ – приблизна оцінка часу селекції (сортування);

T_f – час обчислення функції якості.

Часова складність для покординатної оптимізації обчислюється, як:

$$O(K \cdot n \cdot T_f) \quad (3.19)$$

де K – кількість ітерацій;

n – кількість координат (X , Y для кожного сенсора);

T_f – час обчислення функції якості.

Результати порівняння, представлені в табл. 3.5, показали, що кожен з методів має свої переваги та недоліки:

– еволюційний алгоритм забезпечує високий рівень глобальної оптимізації, дозволяючи значно зменшити кількість сенсорів без зниження точності позиціонування. Це робить його економічно ефективним методом для зниження витрат на систему. Однак цей метод потребує більшого часу на розрахунки, що може бути обмеженням у випадку необхідності швидкої адаптації до змін у середовищі. Крім того, існує ризик потрапляння в локальний екстремум, що може вплинути на досягнення глобального оптимуму, хоча за допомогою стратегій, таких як збільшення розміру популяції або множинні

запуски, цей ризик можна мінімізувати;

– покоординатна оптимізація є швидким методом, що дозволяє оперативно адаптувати конфігурацію сенсорів без значних обчислювальних витрат. Цей метод ефективно покращує вже існуючі конфігурації, знижуючи надмірність сенсорів і забезпечуючи достатній рівень покриття. Проте він має свої обмеження: локальний характер цього методу не дозволяє знайти глобально оптимальні рішення, і на етапі локального покращення точність для Wi-Fi була трохи гірша, ніж у результатах еволюційного алгоритму.

З огляду на ці особливості, кожен метод має свої сфери застосування. Еволюційний алгоритм є більш підходящим для глобальної оптимізації та досягнення високої економічної ефективності в складних системах з багатьма змінними та критеріями. Він дозволяє ефективно поєднувати точність позиціонування та зниження кількості сенсорів. У той час як покоординатна оптимізація є більш швидким методом для локальних коригувань, що робить його корисним у ситуаціях, коли важлива оперативність та адаптація до змінних умов.

Отже, вибір методу оптимізації залежить від конкретної ситуації: якщо завдання полягає в глобальній оптимізації з фокусом на зниження витрат, то доцільніше застосовувати еволюційний алгоритм. Якщо ж необхідно швидко адаптувати конфігурацію системи або виконати локальні коригування, більш доцільним буде використання покоординатної оптимізації.

Комбінований підхід, який поєднує еволюційний алгоритм для глобальної оптимізації та покоординатну оптимізацію для локальних коригувань, може забезпечити максимальну ефективність та гнучкість системи, дозволяючи одночасно досягти високої точності, економічності та швидкості адаптації до змін у середовищі.

3.5 Висновки

Отже, проведено аналіз методів оптимізації розміщення сенсорів у гібридних системах позиціонування, що працюють на промислових майданчиках із динамічною просторовою конфігурацією. Використовується метод геометричної дискретизації простору, що враховує рівень критичності зон для забезпечення надійного покриття сигналом. Це стало важливим кроком вперед, оскільки дозволяє адаптувати систему позиціонування до змінюваних умов майданчика та забезпечити виконання безпекових вимог на критичних ділянках.

Завдяки такому підходу, вдається ефективно масштабувати систему і забезпечити її мобільність, що є важливими аспектами для реальних промислових об'єктів, де інфраструктура часто змінюється, а вимоги до позиціонування залежать від постійно змінюваних умов. Крім того, особливу увагу було приділено оптимізації за такими критеріями, як точність, надійність та економічна доцільність сенсорної мережі.

Впровадження методів оптимізації розміщення сенсорів, що враховують рівень критичності зон, радіус дії сенсорів в умовах промислового середовища дозволяє вирішувати задачу розміщення сенсорів з високим рівнем точності, враховуючи потреби як безпеки, так і економічної ефективності. Розроблений метод надає можливість адаптивного налаштування параметрів системи в залежності від специфічних умов роботи та змін в інфраструктурі майданчиків.

Отже, запропоновані в цьому розділі методи оптимізації мають високий потенціал для реальних промислових застосувань. Вони дозволяють підвищити ефективність систем позиціонування, а також забезпечити їх масштабованість і адаптивність до динамічних змін, що робить їх актуальними та корисними для майбутніх досліджень і практичних розробок у сфері безпекових та промислових технологій. Основні практичні та наукові висновки другого розділу опубліковано в роботах [113].

РОЗДІЛ 4

АРХІТЕКТУРНИЙ ПАТЕРН ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

4.1 Технологія проєктування системи позиціонування

У процесі проєктування інформаційних систем, зокрема систем позиціонування, існує низка концептуальних підходів до побудови архітектури. Кожен із них має специфічні переваги та обмеження, що зумовлює доцільність їх застосування залежно від вимог до функціональності, масштабованості, надійності та адаптивності системи.

Загальноприйнятим є виділення таких основних архітектурних підходів: монолітна архітектура, мікросервісна архітектура, сервіс-орієнтована архітектура, багаторівнева (ієрархічна) архітектура, об'єктно-орієнтована архітектура [114, 115].

Для реалізації системи позиціонування критично важливо враховувати низку технічних та організаційних факторів, серед яких – загальна складність системи, чітке функціональне розділення компонентів, здатність до масштабування, адаптивність до змін середовища, а також підтримка гібридності у виборі технологій позиціонування. Крім того, важливими критеріями є зниження складності процесу розгортання системи та забезпечення ефективного управління потоками даних. До важливого аспекту віднесемо також стійкість до численних відмов сенсорних або обчислювальних компонентів, що потребує врахування механізмів кешування, резервування, динамічного перепідключення елементів у разі локальних збоїв.

При формуванні архітектурного патерну системи позиціонування з урахуванням функціональних вимог, обмежень середовища та потреб інтеграції мобільних і стаціонарних компонентів, доцільно виділити такі основні рівні, які мають бути реалізовані й логічно розмежовані:

- сенсорний рівень – включає апаратні засоби збору даних, що безпосередньо взаємодіють із фізичним середовищем;
- рівень обробки – реалізує алгоритми обробки сигналів, фільтрації шумів, визначення координат, а також механізми агрегування даних із різних джерел;
- рівень збереження – відповідає за зберігання історичних даних, журналів позицій, конфігурацій обладнання та інших метаданих, необхідних для подальшого аналізу та відтворення ситуацій;
- інтерфейсний рівень – забезпечує взаємодію користувача або зовнішніх систем з архітектурою позиціонування, включаючи візуалізацію, моніторинг, налаштування параметрів, API-доступ для зовнішніх сервісів.

Отже, актуальним завданням є розробка технології проєктування систем позиціонування для промислових майданчиків, яка забезпечує ефективність архітектурного проєктування, а також здатна гарантувати необхідну точність, гнучкість і адаптивність до особливостей виробничого середовища.

Сенсорний рівень – перш завдання при проєктуванні системи позиціонування, основна мета якого є формування структури сенсорної мережі, здатної забезпечити повне покриття майданчика з урахуванням заданих вимог до точності позиціонування. Для формування структури сенсорної мережі повинні бути враховані такі вхідні дані та обмеження, які безпосередньо впливають на точність і ефективність позиціонування (табл. 4.1).

Послідовність операцій формування сенсорної мережі з урахуванням зазначених даних подано на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Операції по формуванню сенсорного рівня в системі позиціонування

Таблиця 4.1 – Вхідні параметри для формування сенсорної мережі

№	Параметр	Призначення
1	Вимоги до точності системи	заданий поріг максимально допустимої похибки позиціонування для різних зон
2	Геометрія майданчика	визначає контури, перешкоди, типи зон, які потребують покриття
3	Інформація про технологічні процеси	визначає критичні зони, маршрути об'єктів, місця з високою динамікою руху
4	Масштаб проєкту	за тривалістю, об'ємом фінансування тощо
5	Технічні характеристики технологій	дальність дії, точність, частота оновлення, енергоспоживання

Після формування структури сенсорної мережі наступним є завдання обробки даних, який відіграє ключову роль у перетворенні первинних даних сенсорів у структуровану інформацію, придатну для подальшого аналізу та візуалізації. Для реалізації цього завдання необхідно враховувати топологію побудованої сенсорної мережі, яка визначає маршрути проходження даних, типи сенсорів, джерела похибок та затримок. На основі цієї структури реалізуються методи нормалізації, фільтрації та визначення координат об'єктів у просторі. Послідовність операцій обробки даних подано на рисунку 4.2.

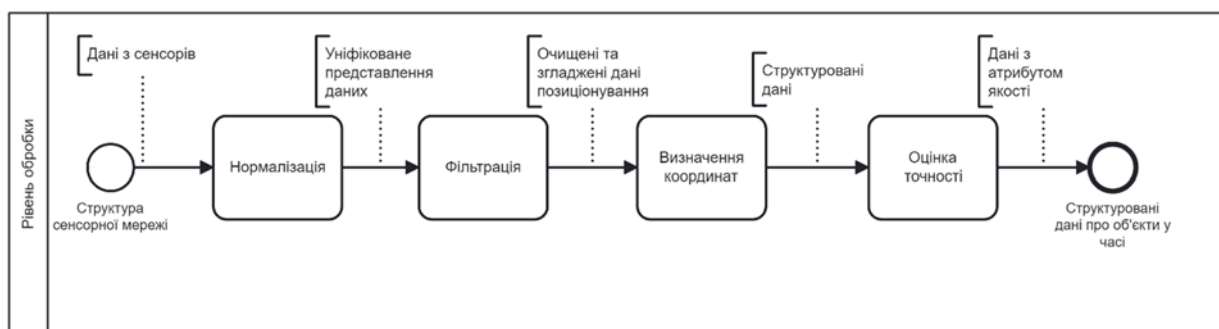


Рисунок 4.2 – Операції по формуванню рівня обробки даних у системі

У результаті формується структурований набір даних про об'єкти у часі, що включає координатну інформацію, метадані про джерела сигналу, а також оцінку достовірності.

Після отримання структурованих даних про об'єкти у часі, наступним

кроком є організація їхнього зберігання. У системах позиціонування такі дані надходять з певною періодичністю та в значних обсягах, оскільки кожен об'єкт генерує координатну інформацію з часовими мітками протягом усього періоду свого переміщення. Виникає необхідність у проєктуванні оптимальної структури рівня збереження інформації, яка забезпечить масштабованість, ефективність доступу, можливість інтеграції з модулями аналітики, візуалізації та експорту.

З урахуванням цього доцільно розглядати три рівні збереження інформації:

– оперативне (тимчасове) зберігання, яке буде використовуватись для обробки останніх надходжень, забезпечує швидкий доступ у реальному часі (кеш);

– довготривале зберігання, яке орієнтоване на зберігання історії переміщень протягом тривалого періоду з можливістю аналітики та агрегації;

– архівне зберігання, яке застосовується для передачі історичних даних у сховища з низькою частотою звернень.

Операції по формуванню рівня збереження інформації представлені на рисунку 4.3.

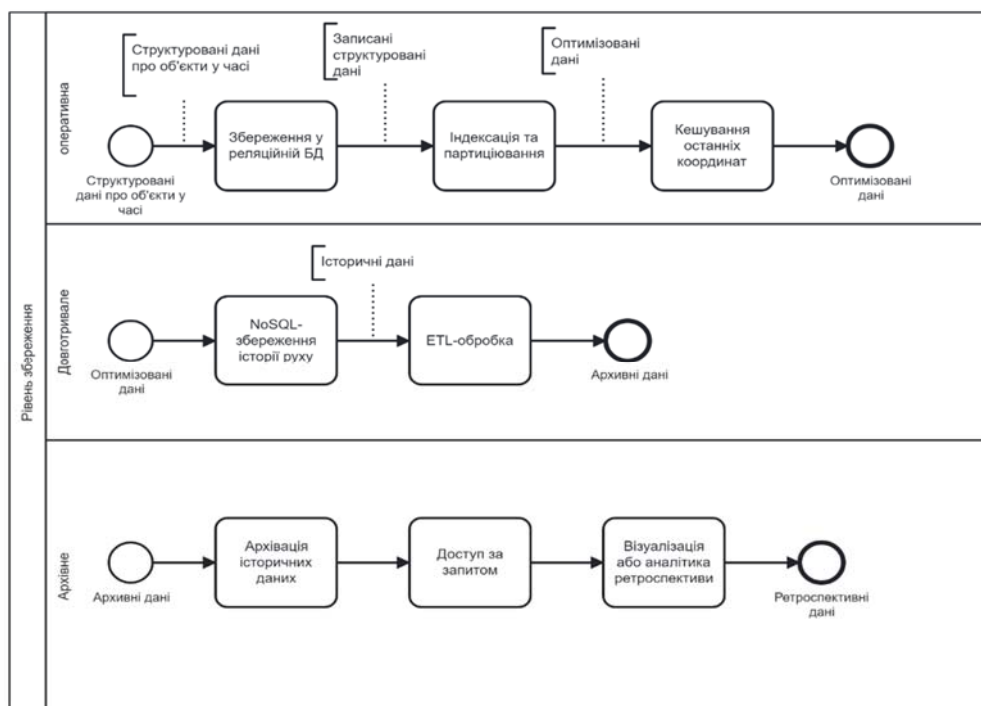


Рисунок 4.3 – Операції для формування рівня збереження даних у системі позиціонування.

Структурування дозволяє балансувати між продуктивністю системи, обсягами даних і витратами на обчислювальні ресурси.

Наступним завданням після організації системи збереження є рівень управління та інтерфейсу, який забезпечує взаємодію користувача з системою позиціонування та доступ до оброблених і збережених даних (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 –Операції для формування рівня управління та інтерфейсу системи позиціонування

Інтерфейсний рівень є критично важливим для підтримки процесу прийняття рішень, забезпечення зрозумілості роботи системи для користувача та адаптації до різних ролей і сценаріїв експлуатації. Він надає можливість користувачеві аналізувати як поточні координати об'єктів і історію їх переміщення, так і загальний стан і ефективність функціонування системи позиціонування. Завдяки реалізації функцій доступу до оброблених даних, а також можливості експорту інформації у зручних форматах, забезпечується основа для формування повноцінної системи моніторингу об'єктів у промисловому середовищі.

Отже, описана технологія проєктування розглядається як набір функціональних операцій, що реалізуються за допомогою методів, алгоритмів і прийомів для кожного рівня системи позиціонування. Застосовані рішення формують основу для побудови архітектурного патерна.

4.2 Апаратна та програмна реалізація архітектурного патерна гібридної системи позиціонування

Побудова реалізації архітектурного патерна починається з визначення вимог до точності та надійності системи позиціонування. Ці вимоги безпосередньо впливають на вибір технологій, що використовуються у відповідних зонах критичності.

Обґрунтування такого вибору здійснюється з урахуванням показників точності, надійності та економічності доступних технологій. У табл. 4.2 наведено показники надійності, точності та економічності для технологій, які використовуються у гібридній системі позиціонування.

Таблиця 4.2 – Показники технологій гібридної системи

Технологія	Надійність	Точність	Економічність
Супутникова	висока, працює в будь-яких умовах за наявності сигналу від супутників	3-5 м на відкритих територіях	GPS-приймачі доступні, але підключення до Starlink потребує додаткових витрат
UWB	висока, добре працює навіть у складних умовах (металеві конструкції, бетонні стіни)	до 50 см, що робить його найкращим варіантом для критичних зон	потребує інфраструктури (якорі + мітки), але виправдовує витрати у високоточних сценаріях
Wi-Fi	середня, залежить від конфігурації мережі.	1-3 м	потребує інфраструктури

Робота системи позиціонування ґрунтується на чотирирівневій архітектурі, наведений на рисунку 4.5.

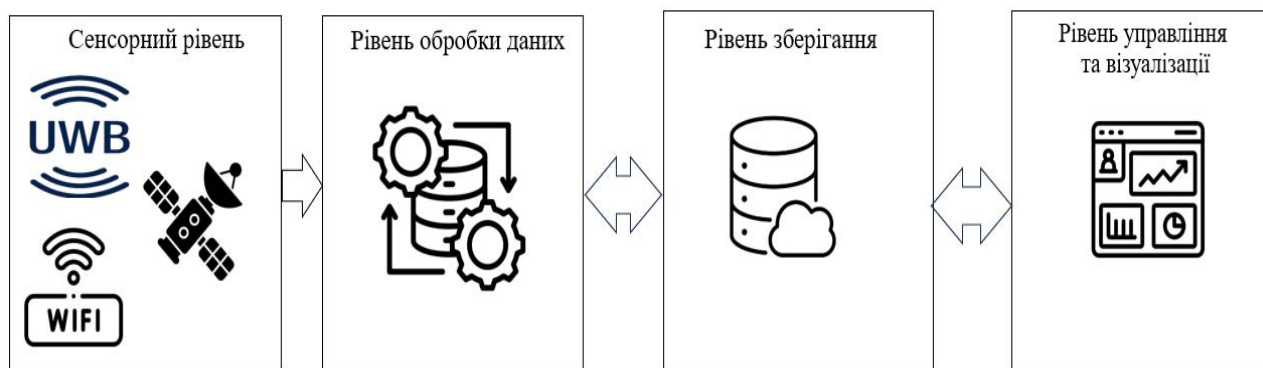


Рисунок 4.5 – Архітектура системи позиціонування

Сенсорний рівень архітектури реалізує гібридну мережу сенсорів, яка включає компоненти різної фізичної природи та забезпечує комплексний збір даних із високою точністю і стійкістю до завад. Цей рівень обладнано GPS-приймачами, які отримують сигнали від супутників та визначають координати об'єктів. Однак у віддалених регіонах, де можливі затримки сигналу або погіршення точності через рельєф місцевості та наявність перешкод, додатково застосовується супутникова система Starlink, яка забезпечує стабільний зв'язок і зменшує похибки в процесі обробки геолокаційних даних. Завдяки інтеграції Starlink із наземними приймальними станціями з'являється можливість отримувати точніші координати та покращувати якість позиціонування в режимі реального часу. Проте використання лише супутникових технологій не завжди забезпечує необхідний рівень точності, особливо у зонах зі складною забудовою або на територіях, де прямий доступ до супутникових сигналів може бути обмеженим.

Для підвищення точності у таких умовах додатково застосовуються стаціонарні UWB-якорі (рис.4.6), які отримують сигнали від переносних міток та визначають їх розташування на основі методу вимірювання часу проходження сигналу.

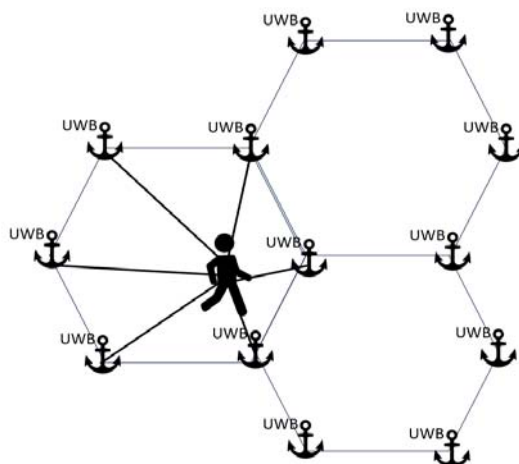


Рисунок 4.6 – Розміщення датчиків с технологією UWB

UWB технологія дає змогу значно зменшити похибку та забезпечити високу точність позиціонування навіть у зонах із металевими конструкціями та іншими джерелами завад. В умовах, де необхідно додатково підвищити точність і зменшити вплив перешкод, застосовується технологія Wi-Fi для позиціонування (рис. 4.7), яка ґрунтується на аналізі часу проходження сигналу між пристроєм і точками доступу. Це дає змогу коригувати дані, отримані з інших джерел, і підвищувати точність визначення координат у критичних зонах.

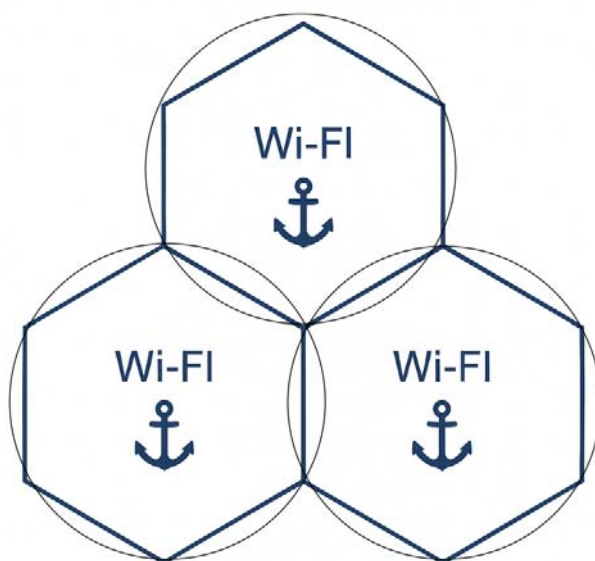


Рисунок 4.7 – Розміщення датчиків с технологією Wi-Fi

Рівень обробки даних виконує аналіз, фільтрацію та корекцію отриманих сигналів, забезпечуючи підвищення точності визначення розташування об'єктів. Дані, отримані від супутникових технологій, UWB та Wi-Fi, передаються на сервер, де застосовується фільтр Калмана для усунення шумів і похибок, що виникають унаслідок багатопроменевого поширення сигналу, впливу перешкод або змін у навколишньому середовищі (рис. 4.8). Використання цього методу дає змогу згладжувати коливання координат і забезпечувати стабільність визначення місця розташування навіть за умов нестабільного приймання сигналів. На цьому рівні реалізується основна логіка системи моніторингу, включно з агрегуванням інформації з різних джерел, застосуванням фільтрів та аналізом просторово-часових залежностей для прийняття рішень у реальному часі

У випадках масштабування системи – як за кількістю відстежуваних об'єктів, так і за кількістю промислових майданчиків – доцільним є використання паралельної та розподіленої обробки даних, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність, скоротити затримки та підтримувати актуальність позиційної інформації в реальному часі [35-37].

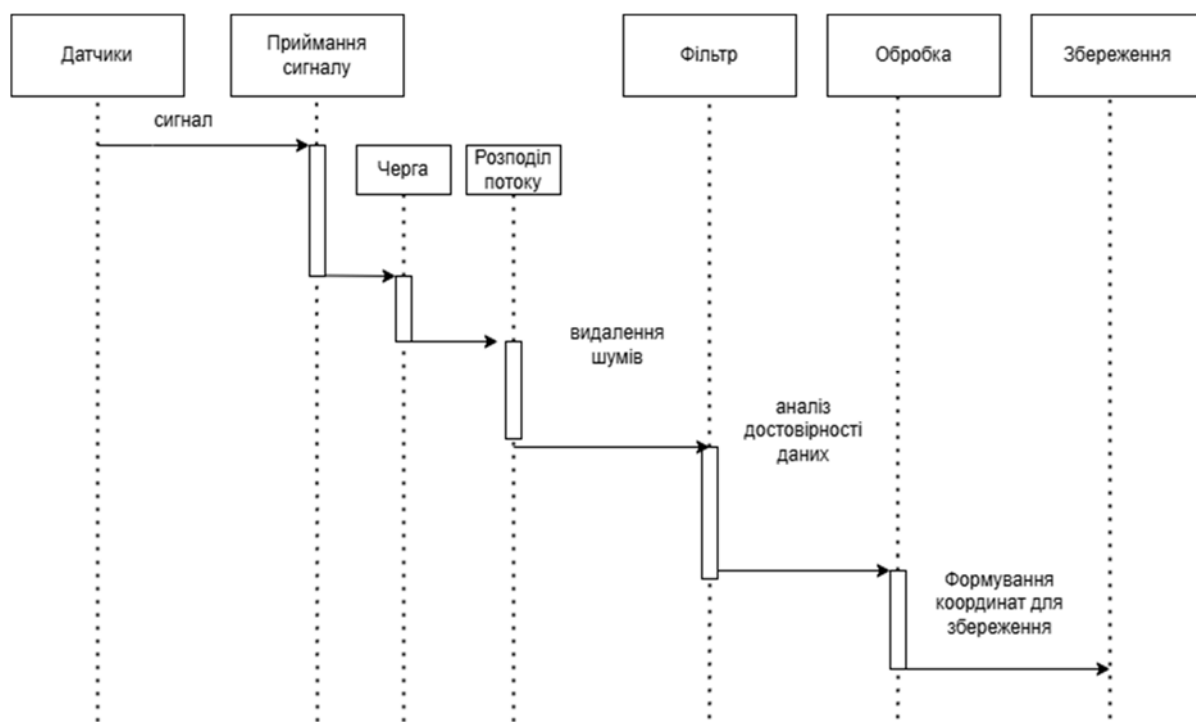


Рисунок 4.8 – Діаграма послідовності на рівні обробки сигналу

В умовах одночасного використання кількох технологій одночасно важливим є аналіз достовірності даних. Ваговий коефіцієнт W_i визначає, наскільки можна довіряти даним від певної технології під час обчислення точного розташування. Чим вищий коефіцієнт, тим більше довіри до джерела [116].

Обчислення вагового коефіцієнта ґрунтується на трьох основних чинниках:

- стабільність сигналу (σ) – наскільки сильно змінюються координати у часі;
- якість сигналу (SNR, потужність сигналу, втрати);
- перешкоди в середовищі – вплив металевих конструкцій, погоди, багатопроменевого поширення.

Кожен коефіцієнт розраховується за адаптивною моделлю:

$$W_i = \frac{Q_i}{\sum Q_i} \quad (4.1)$$

де W_i – ваговий коефіцієнт технології i (GPS, UWB, Wi-Fi);

Q_i – оцінка якості сигналу технологій i (GPS, UWB, Wi-Fi).

Сума всіх W_i дорівнює 1 (щоб балансувати вплив кожної технології).

Оцінка якості сигналу Q_i розраховується так:

$$Q_i = \alpha \frac{1}{\sigma_i} + \beta \cdot SNR_i + \gamma \cdot C_i, \quad (4.2)$$

де σ_i – стандартне відхилення координат (чим менше, тим точніше);

SNR – рівень сигналу (чим більше, тим краще);

C_i – коригуючий коефіцієнт для середовища (перешкоди, метал, відкритий простір);

α, β, γ – коефіцієнти впливу.

Оскільки всі величини подані в різних одиницях виміру, застосуємо метод

нормалізації [117]. Для цього кожне значення перетворюється за формулою:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (4.3)$$

де x_{max} – найкраще значення в наборі даних;

x_{min} – найгірше значення в наборі даних.

Таблиця 4.3 – Розрахункові коефіцієнти довіри для технологій

Технологія	σ (м)	SNR (dB)	C	Оцінка Qi	Вага Wi
GPS	3	35	0.9	1.15	0.158
UWB	0.5	50	1.0	3	0.619
Wi-Fi	2	30	0.8	1.2	0.223

Інтеграція даних із різних джерел дає змогу компенсувати слабкі сторони кожної технології. У разі блокування або значного погіршення точності сигналу GPS система може перемикатися на використання даних, отриманих від UWB або Wi-Fi (за наявності), що забезпечує безперервне позиціонування.

Такий підхід підвищує стійкість системи до зовнішніх факторів, зокрема погодних умов, наявності металевих конструкцій або динамічних змін конфігурації простору.

Після корекції дані зберігаються для подальшого аналізу та використання. Централізоване сховище інформації дає змогу здійснювати ретроспективний аналіз, будувати прогнози руху об'єктів і оптимізувати логістичні процеси, що особливо важливо для промислових підприємств і великих будівельних майданчиків.

Такий підхід забезпечує створення адаптивної системи позиціонування, здатної працювати у змінних умовах і гарантувати високу точність та надійність визначення координат об'єктів.

Надійне та ефективне збереження інформації є критично важливим завданням у системах позиціонування об'єктів. Динамічність конфігурації

простору, зміна умов роботи сенсорів і необхідність обробки великого обсягу даних вимагають використання багаторівневої архітектури збереження інформації.

Запропоновано підхід до організації системи збереження, що включає три основні рівні: оперативне, довготривале та архівне сховища (рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – Організація системи збереження

Структура збереження інформації ґрунтується на концептуальній моделі бази даних (рис. 4.10), що містить основні сутності, наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Основні сутності бази даних рівня збереження інформації

Найменування	Опис
Tags	ідентифікатори мобільних об'єктів, що підлягають позиціонуванню
Anchors	стаціонарні опорні точки, що отримують сигнали від мобільних об'єктів
PositionHistory	історія переміщень об'єктів із прив'язкою до часу та просторових координат
Zones	розбиття простору зважаючи на рівень критичності позиціонування
Technologies	типи застосовуваних технологій позиціонування
SystemLogs	журнал подій, який фіксує помилки, втрату зв'язку та зміну конфігурації системи
Criticality	типи критичності зон

Найменування	Опис
Users	перелік об'єктів, що підлягають позиціонуванню
Role	довідник ролей для доступу в систему позиціонування
UserAccess	права доступів об'єктів в системі

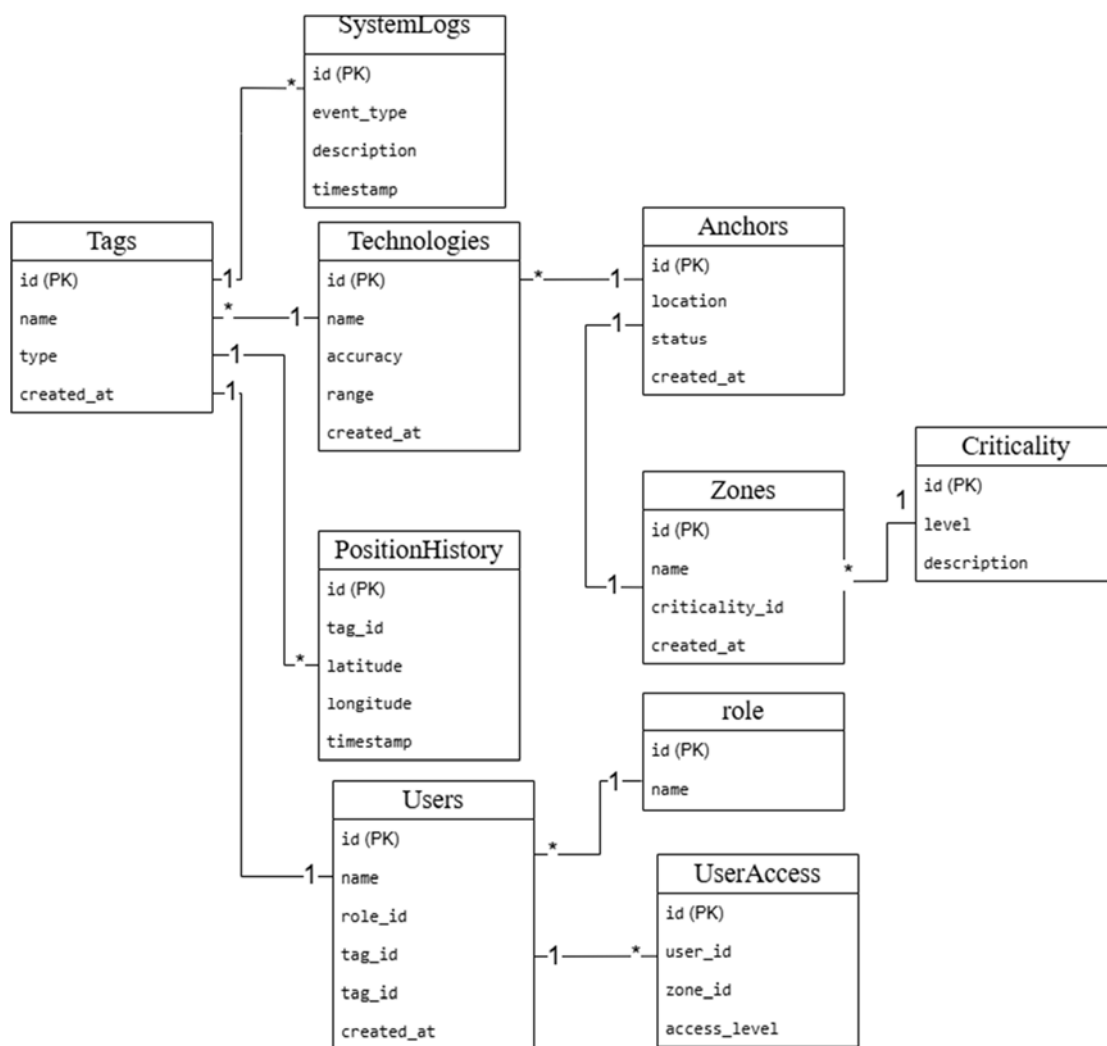


Рисунок 4.10 – Концептуальна модель бази даних

На оперативному рівні зберігаються дані, необхідні для обчислення координат у режимі реального часу. Основу сховища становить реляційна база даних, що забезпечує структуроване збереження інформації та швидкий доступ до актуальних записів.

Для підвищення продуктивності застосовується індексація координатних

даних, а також поділ таблиць, що містять історію переміщень. Зокрема, поділ виконується за часовими інтервалами, що дає змогу зменшити навантаження на запити вибірки даних.

Кешування забезпечує миттєвий доступ до останніх координат мобільних об'єктів, а також до основних параметрів роботи сенсорної мережі. Для ефективного оновлення кешу без блокування основного потоку даних доцільним є використання окремого кеш-сервісу, який працює за принципами декларативної інвалідації [118, 119].

Інформація, що накопичується в процесі роботи системи, переміщується до NoSQL-сховища, що дає змогу ефективно працювати з великими обсягами даних, зокрема історією переміщень об'єктів та логами функціонування сенсорів.

До основних категорій даних, що зберігаються у довготривалому сховищі, належать:

- відстеження змін координат об'єктів у часовому розрізі;
- фіксація зон, у яких перебував об'єкт у різні моменти часу;
- логування змін рівня сигналу для аналізу точності позиціонування;
- журнал подій, який містить інформацію про втрату зв'язку, помилки датчиків та взаємодію користувачів із системою.

Переміщення даних із реляційного сховища до NoSQL здійснюється за допомогою ETL-процесів, що автоматично фільтрують, агрегують і передають інформацію на основі визначених часових вікон. Для налаштування логіки трансформації застосовується декларативний підхід у вигляді формальних схем або конфігураційних патернів без необхідності жорсткого програмного кодування. Це забезпечує простоту адаптації ETL-механізмів до змін у структурі даних або вимог до аналітики.

Дані, які не використовуються для активних розрахунків або аналітики, але можуть знадобитися для ретроспективного аналізу, переносяться до архівного сховища. Це дає змогу розвантажити основну систему збереження, водночас забезпечуючи довготривалий доступ до історичних записів.

До категорії архівних даних належать:

- сторія позиціонування об'єктів, що зберігається понад 12 місяців;
- файли картографічних даних, використані для візуалізації майданчиків;
- архівні журнали подій та користувацької активності.

Доступ до архівних даних здійснюється за запитом, а в разі необхідності інформація тимчасово відновлюється у NoSQL-сховище для проведення аналітичних розрахунків.

Рівень управління та візуалізації забезпечує доступ користувачів до оброблених даних про розташування об'єктів. Для взаємодії з системою використовується вебінтерфейс, що дає змогу відстежувати переміщення об'єктів. Користувачі можуть переглядати актуальні координати, аналізувати історію переміщень і отримувати аналітичні дані про використання ресурсів на території об'єкта.

Для адміністрування використовується спеціалізована панель керування, яка дає змогу налаштовувати рівні доступу користувачів, керувати параметрами відстеження, конфігурацією обладнання та інтеграцією з іншими інформаційними системами. Адміністратори можуть контролювати роботу системи, налаштовувати правила сповіщень, проводити діагностику пристроїв і здійснювати оновлення програмного забезпечення для стабільної та безпечної роботи системи.

Візуалізація даних у системі позиціонування здійснюється за допомогою інтерактивного дашборду, що дає змогу користувачам моніторити розташування об'єктів у реальному часі, аналізувати історичні дані та оцінювати ефективність використання технологій позиціонування. Інтерфейс містить графічні елементи, такі як гістограми, кругові діаграми та лінійні графіки, що відображають частоту використання різних технологій позиціонування, динаміку зміни рівня сигналу (SNR) і середню точність методів визначення координат, зокрема UWB, Wi-Fi та GPS (рис. 4.11).

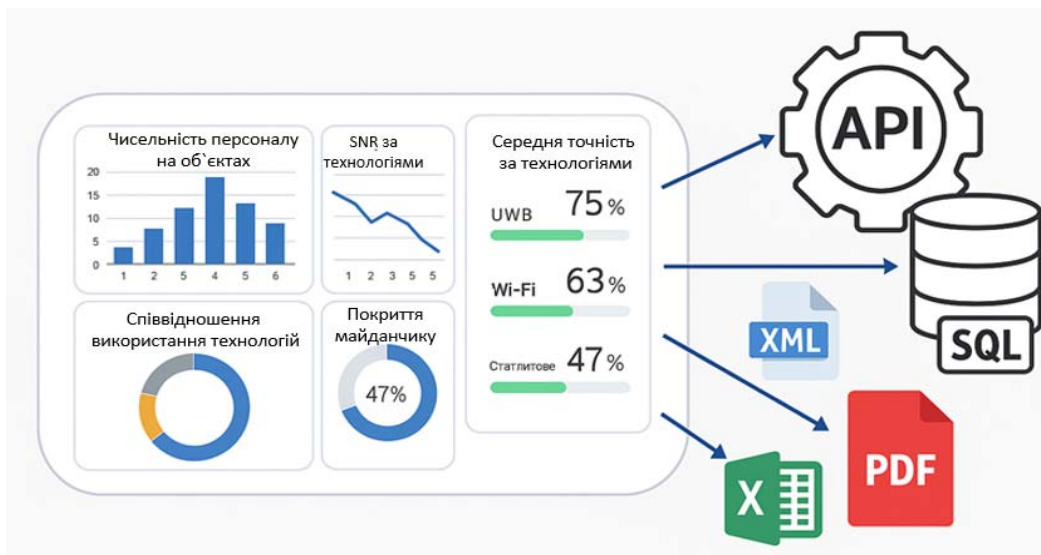


Рисунок 4.11 – Приклад дашборду для системи позиціонування

Дані, що використовуються для побудови аналітики, можуть надходити з різних джерел. Зокрема, SQL-база та API забезпечують обмін інформацією з іншими інформаційними системами та отримання оновлених значень у реальному часі. Для покращення взаємодії із зовнішніми модулями система підтримує можливість експорту даних у форматах XML, що використовується для інтеграції з іншими програмними комплексами, PDF – для створення звітності, а також Excel (XLSX) – для проведення детального аналізу та обробки інформації.

Запропонована у дослідженні архітектура системи позиціонування ґрунтується на концепції зонування об'єкта за рівнем критичності, що дозволяє, залежно від конфігурації простору та динамічності будівельного майданчика, гнучко підбирати комбінацію технологій відповідно до заданих вимог щодо точності, надійності та економічної доцільності. У зонах з високими вимогами до точності активуються супутникові технології у поєднанні з двома локальними. У менш критичних зонах, де достатньо базового позиціонування, система перемикається на енергозберігаючі та економніші рішення.

Обробка сигналів з декількох технологій здійснюється за допомогою адаптивного алгоритму з фільтрацією шумів, що дозволяє досягти стабільної точності навіть в умовах часткових перешкод або втрати прямої видимості.

Такий підхід забезпечує не лише точність, а й стійкість до змін структури простору, що є характерною рисою будівельних об'єктів.

На відміну від роботи [121], де розглянуто гібридну систему позиціонування з високим рівнем точності, але з вимогою статичного розміщення антен, що суттєво обмежує її адаптивність у змінному середовищі, запропонована в цьому дослідженні архітектура враховує просторову динаміку за рахунок впровадження механізму зонування та використання кількох типів технологій відповідно до критичності зон. Такий підхід дозволяє не лише підтримувати необхідну точність, а й оптимізувати витрати, враховуючи економічну доцільність розгортання системи.

Порівняно з підходом, описаним у [122], який орієнтований на зміну конфігурації середовища й адаптується до просторових умов, але базується на складному та дорогому сенсорному комплексі (GNSS + VIO), запропоноване рішення досягає аналогічного рівня адаптивності шляхом більш раціонального поєднання технологій залежно від зон критичності. Завдяки цьому забезпечується баланс між точністю, надійністю та вартістю, що є ключовим чинником для використання в умовах мобільних і тимчасових об'єктів, зокрема будівельних майданчиків.

Отже, гнучке зонування та адаптивна сенсорна інтеграція дозволяють створити масштабовану, портативну та ефективну систему, придатну для швидкого розгортання на об'єктах із різними характеристиками, що вигідно вирізняє її серед існуючих рішень.

4.3 Методики вибору технологій позиціонування об'єктів

Аналіз технологій позиціонування, а також детальний розгляд методів оптимізації розміщення сенсорів на промислових майданчиках дозволяють сформувати цілісну методологію проектування систем позиціонування.

Врахування ключових характеристик середовища, параметрів точності, надійності та вартості дає змогу перейти від загальної архітектури системи до адаптації її під конкретні умови використання.

На цьому етапі важливим є не лише вибір технічних рішень, а й правильна класифікація проєкту, визначення його масштабу, тривалості, складності, а також цілей впровадження. Саме ці чинники суттєво впливають на обґрунтованість вибору архітектурних та технологічних рішень у межах розробки системи позиціонування.

У зв'язку з цим доцільно розглянути підходи до класифікації проєктів та вплив основних параметрів проєкту на формування конфігурації системи.

Для вибору відповідного способу організації позиціонування об'єктів та технологій важливо враховувати масштаб, тривалість, складність проєкту, забезпечуючи оптимальне відповідність між вимогами проєкту та ресурсами [123-125]. Також особливу увагу треба звернути на цілі впровадження системи позиціонування.

Існують різні підходи до класифікації проєктів, представлені в різних джерелах. Усі інвестиційні проєкти можна поділити за критеріями наведених у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Критерії для класифікації проєктів

Критерій	Категорія	Опис
За тривалістю	- Короткострокові - Середньострокові - Довгострокові	Засновано на часі, необхідному для завершення проєкту.
За метою	- Комерційні - Соціальні - Екологічні	Комерційні націлені отримання прибутку; соціальні - на покращення умов життя; екологічні - на збереження природи.
По об'єкту інвестування	- Реальні - Фінансові	Реальні проєкти пов'язані з вкладенням у матеріальні активи (заводи, обладнання), а фінансові - у цінні папери або інші фінансові інструменти

Критерій	Категорія	Опис
За масштабом	- Малі - Середні - Великі	Малі вимагають невеликих вкладень, великі мають масштабний характер та високі фінансові витрати.
За рівнем ризику	- Високорисковані - Помірні - Низькорисковані	Залежать від ймовірності отримання очікуваної прибутку та можливих втрат
За сферою застосування	- Виробничі - Невиробничі	Виробничі спрямовані на випуск продукції, не виробничі пов'язані з соціальними та культурними сферами
За джерелом фінансування	- Власні - Позикові - Змішані	Джерела включають капітал компанії, банківські кредити або їх комбінацію
За інноваційністю	- Традиційні - Інноваційні	Інноваційні проекти використовують нові технології або традиційні методи базуються на вже перевірених рішеннях
За рівнем завершеності	- Нові - Розширення - Модернізація - Заміна	Нові створюють принципово нові об'єкти; розширення збільшує потужності; модернізація оновлює існуючі об'єкти; заміна - застарілі активи.
За географічним охопленням	- Локальні - Регіональні - Національні - Міжнародні	Локальні проекти обмежені невеликими територіями, а міжнародні охоплюють кілька країн.
За видом діяльності	- Промислові - Сільськогосподарські - Торгові - Транспортні - Будівельні	Відбивають специфіку галузі, в якій реалізується проект.
За ступенем терміновості	- термінові - нестрокові	Термінові вимагають негайного виконання, нетермінові допускають гнучкість у термінах реалізації

Критерій	Категорія	Опис
За рівнем державної підтримки	- Приватні - Державні - Змішані	Приватні фінансуються повністю з недержавних джерел, державні бюджету, змішані - спільні.

В умовах завдання позиціонування об'єктів на відкритих майданчиках розглянемо проекти за такими критеріями:

- за термінами реалізації;
- за масштабом;
- по виду діяльності.

За термінами реалізації виділяють категорії проектів, які наведені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Категорії проектів за термінами реалізації

Категорія	Тривалість	Характеристики
Короткострокові	До 1 року	- Швидка окупність - Мінімальні ризики - Рішення оперативних завдань
Середньострокові	Від 1 до 3 років	- модернізація процесів - Значний внесок у розвиток - Середній рівень ризиків
Довгострокові	Понад 3 роки	- Високі капітальні вкладення - Довга окупність - Стратегічні цілі

За масштабами можна виділити категорії, які наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Категорії проектів за термінами масштабами

Масштаб проекту	Бюджет (млн USD)	Терміни (міс.)	Число учасників
Малий	до 0.1	До 6	До 10
Середній	Від 0.1 до 1	6–18	10–50
Великий	Від 1 до 10	18–36	50–200
Мегапроект	Понад 10	Понад 36	Понад 200

За характером майданчика для систем позиціонування виділяють характеристики наведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Категорії проектів за термінами за характером майданчика

Характер майданчика реалізації	Опис	Приклади проектів
Відкриті майданчики	Проекти, що реалізуються на відкритому повітрі або без обмеженого доступу.	Будівництво доріг, мостів, енергетичних об'єктів.
Закриті майданчики	Проекти, що реалізуються в закритих, контрольованих умовах.	Виробничі лінії, модернізація будівель, лабораторії.
Змішані майданчики	Проекти, які частково реалізуються як на відкритих, так і на закритих майданчиках.	Будівництво житлових комплексів з елементами благоустрою.
Мобільні майданчики	Проекти, що виконуються на переміщуваних об'єктах або в умовах тимчасових майданчиків.	Тимчасові медичні центри, мобільні дослідження.

Класифікація проектів за основними критеріями (масштаб, тривалість, характер майданчика, рівень критичності тощо) дозволяє сформувати систему вимог до архітектури системи позиціонування. Це забезпечує обґрунтований вибір технологій, масштабів інфраструктури, рівня автоматизації та бюджету реалізації.

Врахування цих чинників є передумовою створення адаптивної та ефективної конфігурації системи позиціонування, яка відповідає специфіці проєкту.

З урахуванням зазначених факторів постає необхідність формалізувати процес вибору технологій позиціонування залежно від умов експлуатації системи. Для цього доцільно впровадити методику прийняття рішень, яка дозволяє зіставити технічні вимоги (точність, стійкість), економічні обмеження та просторові характеристики майданчика. Такий підхід забезпечує системність на етапі проєктування та дозволяє ефективно обґрунтувати вибір того чи іншого рішення для кожної зони.

У зв'язку з цим як інструмент багатокритеріальної оцінки виберемо метод аналізу ієрархій [126]. Метод дозволяє формалізувати процес прийняття рішень шляхом побудови ієрархічної структури цілей, критеріїв та альтернатив, а також застосування експертного оцінювання для визначення вагової значущості кожного з елементів.

Для формалізації задачі вибору технологій позиціонування на майданчику побудуємо ієрархічну модель (рис.4.12), де головна мета поділяється на критерії та альтернативи, які порівнюються попарно для визначення відносної важливості.

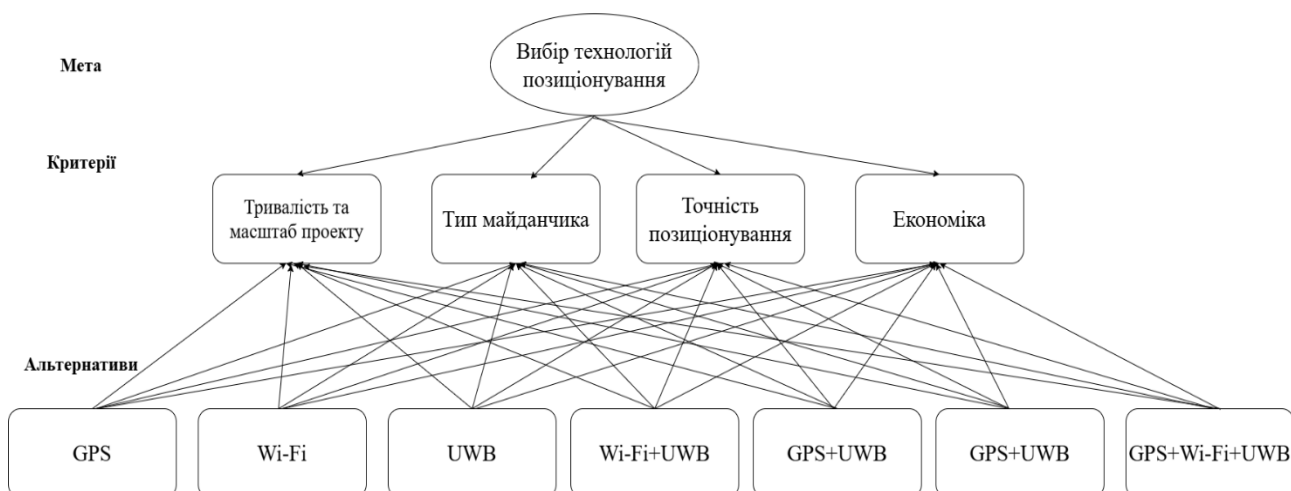


Рисунок 4.12 – Ієрархічна модель вибору технологій позиціонування

Перехід від якісних до кількісних оцінок критеріїв, використовуємо шкалу Сааті. В основі шкали лежить метод попарного порівняння елементів. Експерти пріоритетними визначили точність та економіку, вони отримали найвищі оцінки при порівнянні з іншими критеріями. Відповідна матриця наведена у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Матриця попарного порівняння критеріїв для вибору технологій в системі позиціонування

Критерії	Тривалість	Масштаб	Тип майданчика	Точність	Економіка
Тривалість	1	1	1/2	1/3	1/3
Масштаб	1	1	1/2	1/3	1/3
Тип майданчика	2	2	1	1/2	1/2
Точність	3	3	2	1	1
Економіка	3	3	2	1	1

На основі таблиці 4.9, що відображає відповідність між критеріями, формуємо матрицю порівняння альтернатив, яка буде згодом зважена відповідно до визначеного вектору ваг критеріїв. У таблиці 4.10 формуємо матрицю локальних оцінок альтернатив за критеріями.

Таблиця 4.10 – Матриця локальних оцінок альтернатив за критеріями

Альтернатива	Точність	Економіка	Тип майданчика	Тривалість	Масштаб
GPS + Wi-Fi	6	6	8	7	6
GPS + UWB	9	4	9	6	5
UWB + Wi-Fi	9	3	9	5	5
GPS + Wi-Fi + UWB	9	3	9	6	5
GPS	3	9	7	9	7
Wi-Fi	5	7	9	7	5
UWB	9	3	9	5	5

Оцінки базуються на аналізі технічних характеристик технологій та експертному судженні. Щоб врахувати відносну ефективність кожної альтернативи в межах критерію, необхідно нормалізувати оцінки (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Нормалізовані та зважені оцінки альтернатив

Альтернатива	Точність	Економіка	Тип майданчика	Тривалість	Масштаб	Глобальний рейтинг
GPS + Wi-Fi	0,051	0,062	0,029	0,018	0,017	0,177
GPS + UWB	0,077	0,041	0,032	0,015	0,014	0,179
UWB + Wi-Fi	0,077	0,031	0,032	0,013	0,014	0,167
GPS + Wi-Fi + UWB	0,077	0,031	0,032	0,015	0,014	0,169
GPS	0,026	0,093	0,025	0,023	0,019	0,185
Wi-Fi	0,043	0,072	0,032	0,018	0,014	0,179
UWB	0,077	0,031	0,032	0,013	0,014	0,167

На основі глобального рейтингу у табл. 4.12 сформовано рекомендовані конфігурації технологій позиціонування залежно від ключових критеріїв: вимог до точності, рівня допустимих витрат і типу конфігурації майданчика. Це дозволяє швидко визначити доцільні технології для кожної категорії умов, забезпечуючи баланс між технічною ефективністю та економічною доцільністю.

Таблиця 4.12 – Рекомендовані технології позиціонування залежно від умов застосування

№	Тривалість	Масштаб	Тип майданчика	Точність позиціонування	Економіка	Рекомендовані технології позиціонування
1	Короткостроковий	Малий	Відкритий	Базова (3–10 м)	Низькі витрати	GPS
2	Короткостроковий	Малий	Відкритий / мобільний	Базова	Низькі витрати	GPS + Starlink
3	Короткостроковий	Малий	Змішаний	Середня (0.5–3 м)	Середні витрати	Wi-Fi + GPS
4	Середньостроковий	Середній	Закритий	Висока (≤ 0.3 м)	Середні витрати	UWB

№	Тривалість	Масштаб	Тип майданчика	Точність позиціонування	Економіка	Рекомендовані технології позиціонування
5	Середньостроковий	Середній	Змішаний	Середня	Середні витрати	Wi-Fi + GPS
6	Середньостроковий	Середній	Відкритий	Базова	Середні витрати	GPS або GPS + Starlink
7	Довгостроковий	Середній	Відкритий	Середня	Середні витрати	GPS + Wi-Fi
8	Довгостроковий	Великий	Закритий	Висока	Високі витрати	UWB + Wi-Fi
9	Довгостроковий	Великий	Змішаний	Висока	Високі витрати	UWB + Wi-Fi + GPS
10	Короткостроковий	Середній	Відкритий	Базова	Низькі витрати	GPS
11	Середньостроковий	Малий	Закритий	Середня	Середні витрати	Wi-Fi

Матриця вибору технологій позиціонування, сформована на основі інтеграції ключових параметрів проєкту – тривалості реалізації, масштабу, типу майданчика, вимог до точності та економічних обмежень – дозволяє обґрунтовано визначити доцільну конфігурацію технічних засобів для конкретного випадку.

Висока точність позиціонування (≤ 0.3 м) є критично важливою для проєктів, що реалізуються в складних або закритих умовах, і передбачає використання технології UWB, іноді в поєднанні з Wi-Fi. У випадках змішаного або відкритого середовища із середніми вимогами до точності доцільним є використання гібридних конфігурацій Wi-Fi + GPS, що забезпечують баланс між точністю та вартістю впровадження. Для базового моніторингу об'єктів у відкритому просторі та в умовах обмеженого бюджету ефективним залишається застосування GPS, з можливістю доповнення каналом Starlink у віддалених

районах або при відсутності стабільної телекомунікаційної інфраструктури.

Отже, запропонований підхід дозволяє реалізувати адаптивну, масштабовану архітектуру систем позиціонування, яка відповідає специфіці проєктів, їх масштабам та умовам реалізації, забезпечуючи необхідний рівень функціональності при оптимальних витратах. Однак перед проєктуванням системи позиціонування необхідно чітко розуміти, які саме показники мають вплив на точність, та як вони змінюються залежно від типу середовища, обраної технології або конфігурації сенсорної мережі.

4.4 Висновки

Запропонована технологія проєктування гібридної системи позиціонування об'єктів забезпечує комплексний підхід до побудови систем із урахуванням вимог до точності, надійності, вартості та динамічних змін просторової конфігурації промислового середовища. Такий підхід надає можливість масштабувати систему, адаптувати її до реальних умов експлуатації, а також ефективно використовувати ресурси для обробки та збереження великих обсягів даних.

На основі запропонованої технології архітектурний патерн гібридної системи позиціонування з динамічною зміною конфігурації апаратного забезпечення, що забезпечить збір, збереження та обробку великих даних з використанням алгоритмів паралельних обчислень.

Методика вибору технологій позиціонування залежно від умов експлуатації, враховує критичність зон, просторові обмеження, характеристики сигналу та економічні аспекти впровадження. Це дозволяє формувати адаптивні, надійні та економічно доцільні конфігурації гібридних систем позиціонування.

Отже, 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.

Основні практичні та наукові висновки четвертого розділу опубліковано в роботі [127].

ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу підвищення ефективності систем позиціонування об'єктів шляхом розроблення методів та моделей проєктування, що забезпечують визначення оптимальної структури сенсорної мережі та процесів збору, зберігання та обробки даних. Запропоновані методи дозволяють суттєво покращити процес впровадження таких систем у складних умовах промислової експлуатації. Реалізація гібридного підходу забезпечує підвищення точності позиціонування, адаптивність до змін середовища, можливість масштабування архітектури та зменшення витрат на розгортання інфраструктури. Це створює передумови для ефективного моніторингу переміщення об'єктів, підвищення рівня автоматизації та безпеки технологічних процесів. Досягнуто наступних результатів:

- проведено аналіз структури існуючих систем позиціонування та виявлено їх обмеження в умовах відкритих та змінних промислових середовищ. Виявлено, що класичні системи недостатньо ефективні в умовах значного рівня завад, що обґрунтовує необхідність гібридного підходу;

- сформульовано етапи проєктування гібридних систем, на яких виникає потреба в удосконаленні: вибір технологій, геометрична дискретизація простору, розміщення сенсорів і архітектура системи. Визначено ключові вимоги до підвищення точності, надійності та адаптивності систем у змінному середовищі;

- проведено комплексний аналіз сучасних глобальних та локальних технологій позиціонування, зокрема GPS, Starlink, Wi-Fi, UWB. Показано, що жодна з технологій не забезпечує достатньої точності в умовах динамічних перешкод, що підтверджує доцільність створення гібридних систем;

- розроблено методику вибору технологій позиціонування на основі багатокритеріального підходу із врахуванням типу майданчика, завад, вимог до точності та економічної доцільності. Метод дозволяє обґрунтовано підбирати оптимальні технології для конкретних умов експлуатації;

- запропоновано метод розробки геометричної моделі дискретизації простору промислового майданчика, що передбачає формування зон за рівнем критичності точності. Це дозволяє адаптувати налаштування системи під конкретні просторові умови та покращити її стійкість до змін середовища;

- розроблено метод оптимізації сенсорної мережі, який враховує зони критичності, радіус дії сенсорів, вимоги до точності та витрати на розгортання. Метод забезпечує гнучке масштабування системи та її адаптацію до змін конфігурації майданчика;

- 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.

У сукупності запропоновані методи становлять наукову основу для автоматизованого проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на складних промислових майданчиках, сприяють підвищенню точності, надійності, економічності та адаптивності таких систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Teizer J., Allread B. S., Fullerton C. E., Hinze J. Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system // Automation in Construction. – 2010. – Vol. 19, No. 5. – P. 630–640.
2. Shamsollahi D., Moselhi O., Khorasani K. Data integration using deep learning and real-time locating system (RTLS) for automated construction progress monitoring and reporting // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 159. – Article No. 105778.
3. Liu K. J. Ray. Wireless AI: Wireless Sensing, Positioning, IoT, and Communications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 402 p.
4. Wu Z. H., Han Y., Chen Y., Liu K. J. R. A Time-Reversal Paradigm for Indoor Positioning System // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2015. – Vol. 64, No. 4. – P. 1331–1339.
5. Bahl P., Padmanabhan V. N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System // Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000. – 2000. – Vol. 2. – P. 775–784.
6. Bahl P., Padmanabhan V. N., Balachandran A. Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System. Microsoft Research Technical Report MSR-TR-2000-12. – February 2000. – 13 p.
7. Skorobohatko S., Fesenko H., Kharchenko V., Yakovlev S. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems // Cybernetics and Systems Analysis. – 2024. – Vol. 60. – P. 293–304.
8. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Kliushnikov I., Morozova O., Sachenko A., Skorobohatko S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 7. – Article 409.

9. Sun Y., Fesenko H., Kharchenko V., Zhong L., Kliushnikov I., Illiashenko O., Morozova O., Sachenko A. UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 17. – Article 6444.
10. Averyanova Y., Kutsenko O., Konin V. Interference Suppression at Cooperative Use of GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, Sept. 21–25, 2020. – IEEE.
11. Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.: іл. – Бібліогр.: с. 320–325. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/27548>.
12. Bezkorovainyi V., Kolesnyk L., Gopejenko V., Kosenko V. The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty // *Advanced Information Systems*. – 2024. – Vol. 8, No. 2. – P. 27–38.
13. Beskorovainyi V., Kolesnyk L., Mgbere C. Mathematical models for determining the Pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria // *Information Technologies and Security of Systems and Infrastructure*. – 2023. – No. 24.
14. Бескоровайний В. В., Драз О. М. Mathematical models of decision support in the problems of logistics networks optimization // *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. – 2021. – № 4. – С. 5–14.
15. Козін І. В., Нарзуллаєв У. Х., Алломов З. К. Алгоритм перемішаних стрібаючих жаб у задачі розміщення виробництва // *Computer Science and Applied Mathematics*. – 2023. – № 1. – С. 11–17.
16. Козін І. В., Селютін Є. К., Полюга С. І. Jumping frog method for optimal classifications // *International Academy Journal Web of Scholar*. – 2021. – Т. 2, № 52. – С. 1–6.
17. Козін І., Максишко Н., Терешко Ю. Метод імітації відпалу для задачі рівноважного розміщення // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. – 2021. – № 32. – С. 152–158.

18. Rvachev V. L., Stoyan Yu. H. K zadache raspoznavaniya neperesecheniya figur spetsial'nogo vida // Kibernetika. – 1965. – № 6. – S. 85–94.
19. Rvachev V. L., Stoyan Yu. H. Algoritmy postroeniya neravenstv, kotorym udovletvoryayut parametry razmeshcheniya neperesekayushchikhsya tel // Kibernetika. – 1966. – № 7. – S. 82–92.
20. Rvachev V. L., Stoyan Yu. H., Glushko A. H. K voprosu o poiske absolyutnogo ekstremuma v odnoi zadache optimal'nogo raskroya // Algoritmicheskie yazyki, optimizatsiya, programmirovaniye. – 1966. – Vyp. 2. – S. 70–81.
21. O'Rourke J. Art Gallery Theorems and Algorithms. – Нью-Йорк: Oxford University Press, 1987. – 282 с. – (International Series of Monographs on Computer Science). – ISBN 0-19-503965-3.
22. O'Rourke J. Computational Geometry in C. – Кембридж: Cambridge University Press, 1998. – 392 с. – ISBN 978-0-521-64976-6.
23. de Berg M., Cheong O., van Kreveld M., Overmars M. Computational geometry: algorithms and applications. – 3rd ed. – Berlin: Springer, 2008. – 386 p.
24. Floater M. S. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations // Computer Aided Geometric Design. – 1997. – Vol. 14, No. 3. – P. 231–250.
25. Floater M. S., Gotsman C. Visualization of Floater and Gotsman's morphing algorithm // ACM Transactions on Graphics. – 2014. – Vol. 33, No. 4. – Article 1.
26. Zaharia M., Chowdhury M., Das T., Dave A., Ma J., McCauley M. та ін. Resilient Distributed Datasets: A Fault-Tolerant Abstraction for In-Memory Cluster Computing // Proceedings of the 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI). – 2012. – P. 15–28.
27. Zaharia M., Chowdhury M., Franklin M. J., Shenker S., Stoica I. Spark: Cluster Computing with Working Sets // Proceedings of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing (HotCloud). – 2010. – P. 1–7.

28. Zaharia M., Xin R. S., Wendell P., Das T., Armbrust M., Dave A. та ін. Apache Spark: A Unified Engine for Big Data Processing // Communications of the ACM. – 2016. – Vol. 59, No. 11. – P. 56–65.
29. Armbrust M., Das T., Xin R. S., Zaharia M., Stoica I. Structured Streaming: A Declarative API for Real-Time Applications in Apache Spark // Proceedings of the VLDB Endowment. – 2015. – Vol. 9, No. 13. – P. 1379–1390.
30. Das S. K., Min K. B. Data Structures for Parallel Processing // У кн.: Zomaya A. Y. (ред.). Parallel and Distributed Computing Handbook. – New York: McGraw-Hill, 1996. – Розд. 15. – С. 15.1–15.35.
31. Das S. K., Harvey D. J., Biswas R. Latency Hiding in Dynamic Partitioning and Load Balancing of Grid Computing Applications // У кн.: Proceedings of the 2001 International Conference on Parallel Processing. – 2001. – С. 497–504.
32. Chatterjee M., Das S. K., Turgut D. WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks // У кн.: Proceedings of the 2002 International Conference on Parallel Processing Workshops. – 2002. – С. 192–198.
33. Roy S., Das S. K. Principles of Cyber-Physical Systems: An Interdisciplinary Approach. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – ISBN: 9781107187101.
34. Stoyan Yu. G., Romanova T. A. Mathematical Models of Placement Optimization: Two- and Three-Dimensional Problems and Applications // У кн.: Fasano G., Pintér J. (ed.). Modeling and Optimization in Space Engineering. – Cham: Springer, 2012. – P. 327–366. – (Springer Optimization and Its Applications; Vol. 73).
35. Гоменюк С. І., Козуб В. Ю. Алгоритм паралельних обчислень у методі скінченних елементів // Computer Science and Applied Mathematics. – 2022. – № 2. – С. 65–71.
36. Гоменюк С. І., Козуб В. Ю. Особливості використання паралельних обчислень в пакеті прикладних програм «МІРЕЛІА+» // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 6, т. 2 (315). – С. 60–64.

37. Гоменюк С. І., Гребенюк С. М., Панасенко Є. В. Вебреалізація постпроцесора з відкритим початковим кодом // *Computer Science and Applied Mathematics*. – 2025. – № 1. – С. 104–110.

38. Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2023 року: Постанова Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 [Електронний ресурс] // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/942-2011-п>

39. Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні: Постанова Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476 [Електронний ресурс] // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/476-2024-п>

40. Кабінет Міністрів України. Стратегія цифрового розвитку інновацій України WINWIN [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://winwin.gov.ua/assets/files/WINWIN_Main%20Presentation.pdf

41. Costin A., Pradhan A., Cech J. Real-time locating systems and safety in construction sites: A literature review // *Safety Science*. – 2019. – Vol. 117, No. 3. – P. 229–242.

42. Nasr E., Shehab T., Vlad A. Tracking systems in construction: Applications and comparisons // *Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*. – 2013

43. Донченко М. В., Коваленко І. І. Геоінформаційні системи : навч. посіб. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2015. – 194 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/449/1/Донченко%20М.%20В.%20Геоінформаційні%20системи.pdf>

44. Kudin O., Kryvokhata A., Gorbenko V. I. Developing a deep learning sound classification system for a smart farming // ECS Meeting Abstracts. – 2020. – Vol. MA2020-01. – P. 1853.

45. Hniezdovskyi O., Kudin O., Belokon Y., Kruglyak D., Ilin S. Designing an object-oriented architecture for the finite element simulation of structural elements // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 6, No. 2 (120).

46. Стадник І. М., Грицик В. М. Проблеми та перспективи розвитку Індустрії 4.0 в Україні за умов євроінтегрування // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. – 2022. – № 906. – С. 378–386.

47. Гусак Н. С. Виклики Індустрії 4.0 у контексті її становлення на глобальному і національному рівнях // Економіка України. – 2020. – № 6. – С. 42–54.

48. Podoliaka K. Ye. Matematicheskie modeli i metody reinzhiniringa topologicheskikh struktur sistem krupnomasshtabnogo monitoringa : dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.12. – Kharkiv, 2016. – 158 s. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Dissertation/Dis_Podolyaka-K.E._fin.pdf

49. Zekavat S. A., Buehrer R. M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. – Wiley, 2011. – 696 p.

50. Шахрай Р. Р., Безкоровайний В. В. Системологічний аналіз проблеми синтезу систем моніторингу виробничих технологічних процесів // Матеріали конференції КІТ-2023, 22 листопада 2023 р., Харків. – Харків: ХНАДУ, 2023. – С. 26–29.

51. Готовська А. В., Безкоровайний В. В. Декомпозиція процедури підтримки прийняття рішень в технології проектування роботизованого виробничого процесу // Матеріали конференції КІТ-2023, 22 листопада 2023 р., Харків. – Харків: ХНАДУ, 2023. – С. 285–289.

52. Сучасні технології моніторингу доквілля на прикладі Київської агломерації / за ред. Т. Є. Іваненко. – Київ: ДЕА, 2022.

53. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. – 3rd ed. – Boston: Artech House, 2017.
54. Misra P., Enge P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. – 2nd ed. – Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
55. Meurer M., Antreich F. Signals and modulation // Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / eds. Teunissen P. J. G., Montenbruck O. – 1st ed. – Cham: Springer, 2017. – P. 91–119.
56. Gill E., Morton J., Axelrad P., Akos D. M., Centrella M., Speretta S. Overview of space-capable global navigation satellite systems receivers: Heritage, status and the trend towards miniaturization // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 17. – Article ID: 7648.
57. Нестеренко С. В., Єрмоленко Д. А., Шефер О. В., Клепко А. В. Українська навігаційна супутникова система: стан і перспективи // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – Вип. 3 (65). – С. 4–7. – DOI: 10.26906/SUNZ.2021.3.004.
58. Gleason S., Gebre-Egziabher D. GNSS Applications and Methods. – Norwood, MA: Artech House, 2009.
59. El-Rabbany A. Introduction to GPS: The Global Positioning System. – Boston: Artech House, 2002. – 176 p.
60. Van Diggelen F. A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS. – 1st ed. – Boston: Artech House, 2009. – ISBN 978-1596933743.
61. Parkinson B. W., Spilker J. J. (Eds.). Global Positioning System: Theory and Applications. – Vol. 2. – Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. – 592 p. – (Progress in Astronautics and Aeronautics; Vol. 164).
62. Mendrzik R., et al. Joint GNSS and 5G Positioning // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 207216–207229.
63. Brena R. F., García-Vázquez J. P., Galván-Tejada C. E., et al. Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey // Journal of Sensors. – 2017. – Article ID: 2630413.

64. Zafari F., Gkelias A., Leung K. K. A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, No. 3. – P. 2568–2599.
65. Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems//IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics.– 2007.
66. Park S., et al. A Smartphone-Based Hybrid Indoor Positioning System Combining Wi-Fi and Magnetic Field Data // Sensors. – 2015. – Vol. 15, No. 8.
67. Faragher R., Harle R. Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33, No. 11. – P. 2418–2428.ScienceDirect
68. Jiménez Ruiz A. R., Seco F. Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB Systems for Indoor Positioning // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16, No. 7. – P. 2173–2181.
69. Zhou Y., Chen X., Li X., Zhang Y. A Passive Location Model Based on Angle Information // Procedia Computer Science. – 2023. – Vol. 222. – P. 431–439.
70. Chen J., Fang X., Hu J., Zhou D. Fusion positioning algorithm of indoor WiFi and Bluetooth based on discrete mathematical model // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2020. – Vol. 2020, No. 1. – Article 227.
71. Sreeja K., Reddy V., Rani N. Hybrid Bat Optimization algorithm for stochastic indoor localization using noisy data // Measurement. – 2024. – Vol. 213. – Article 112650.
72. Zhang Y., Wang H., Li F., Liu Y. A Data-Driven Factor Graph Model for Anchor-Based Positioning // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 12. – Article 5660.
73. Hightower J., Borriello G. Location systems for ubiquitous computing // Computer. – 2001. – Vol. 34, No. 8. – P. 57–66.
74. Gu Y., Lo A., Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2009. – Vol. 11, No. 1. – P. 13–32.
75. Teunissen P. J. G., Montenbruck O. (Eds.). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. – Cham: Springer, 2017.

76. Козін І. В. Еволюційні моделі в дискретній оптимізації: монографія. – Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2019. – 128 с.
77. Beskorovainyi V. V., Soboleva E. V. Evristicheskaia protsedura dlia metodov optimizatsii topologii sistem s radial'no-uzlovymi strukturami // Systemy obrobky informatsii. – Kharkiv: KhU PS, 2008. – Vyp. 7(74). – S. 22–27.
78. Касіцький О. В. Метод покоординатного спуску з евристикою середньозваженого напрямку // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2021. – № 1(135). – С. 45–50. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua>.
79. Luo Z. Q., Tseng P. On the convergence of the coordinate descent method for convex differentiable minimization // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1992. – Vol. 72, No. 1. – P. 7–35.
80. Gan X., Hu C., Huo Z., Peng A., Shi H. Research on Key Technologies of Passive Positioning System for Personnel under Intelligent Modeling // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). – 2022.
81. Sultana S., Tahsin M., Reza T., Hossam-E-Haider M. An innovative implementation of indoor positioning system using GPS // 2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT). 2016.
82. Grayver E., Nelson R., McDonald E., Sorensen E., Romano S. Позиціонування та навігація за допомогою Starlink. 2024.
83. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013. 823 p.
84. GPS-трекер ТК-102: повне керівництво з налаштування, експлуатації та невідомих функцій, основане на відгуках користувачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://steklostav.ru/gps-treker-tk-102-polnyy-rukovodstvo-s-nastroykoy-ekspluatatsiy-i-neizvestnymi-fishkami-osnovannoe-na-otzyvah-polzovateley/>.
85. Bensky A. Wireless Positioning Technologies and Applications. 2nd ed. Boston; London: Artech House, 2016. 205 p.

86. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide. Cisco Systems, Inc. Text Part Number: OL-11612-01.
87. Lee N., Han D. Magnetic indoor positioning system using deep neural network // 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). 2017. P. 1–8.
88. Wu T., Chen L., Hong Y. A vision-based indoor positioning method with high accuracy and efficiency based on self-optimized-ordered visual vocabulary // 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2016. P. 48–56.
89. Li B., Wang Y., Lee H. K., Dempster A., Rizos C. Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN // IEE Proceedings – Communications. 2005. Vol. 152, No. 5. P. 580–586.
90. Kuo S., Tseng Y. Discriminant minimization search for large-scale RF-based localization systems // IEEE Transactions on Mobile Computing. 2011. Vol. 10, No. 2. P. 291–304.
91. Li G., Geng E., Ye Z., Xu Y., Lin J., Pang Y. Indoor positioning algorithm based on the improved RSSI distance model // Sensors. 2018. Vol. 18. Article No. 2820.
92. Fadali M. S. Introduction to Random Signals, Estimation Theory, and Kalman Filtering. 2024.
93. Грейвер Е., Нельсон Р., Макдональд Е., Соренсен Е., Романо С. Позиціонування та навігація за допомогою Starlink. 2024.
94. Li X., Zhao Y. Kalman Filtering and Information Fusion: Theory and Applications. 2022.
95. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2020.
96. Шмана К. С., Красножон О. В. Використання фільтрів Калмана та Маджвіка для обробки показань інерційних датчиків // Новітні технології в науковій діяльності та навчальному процесі. – Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет, 2022.

97. Mouser Electronics, Inc. MDEK1001 Development Kit – Qorvo Mouser [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eu.mouser.com/new/qorvo/qorvo-mdek1001-kit/>.

98. Decawave. Technology – Decawave [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.decawave.com/technology1/>.

99. Green E. R., Roy S. System architectures for high-rate ultra-wideband communication systems: A review of recent developments. – Hillsboro, OR, USA: Intel Labs.

100. Lebedieva-Dychko A., Shilo H. Outdoor Positioning for Industrial Workplace // Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Systems (ICIS), 2023.

101. Shilo G., Romaniuk D., Pysarskyi A., Lebedieva-Dychko A. Cost-Effective Indoor Positioning Using IoT Solutions // Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Dortmund, Germany, 17–18 September 2020. – P. 161–165.

102. Romaniuk D., Lebedieva-Dychko A., Shilo G., Pysarskyi A., Shaptala S. Indoor and Outdoor Positioning Technology at the Industrial Enterprises // Тиждень науки – 2020: 36. тез доповідей щоріч. наук.-практ. конф. серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 13–17 квітня 2020. – С. 58–60.

103. Шило Г. М., Лебедєва-Дичко А. С. Аналіз точності позиціонування за допомогою супутникових систем та фільтрація шумів у промислових умовах // Computer Science and Applied Mathematics. – 2024. – № 2. – С. 102–108.

104. 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.

105. Wang Y., Ma S., Li X. Spatial Positioning Method Based on Range-Only Measurement of Multi-Station Radar // Heliyon. – 2023. – Vol. 9, Issue 12.

106. Crespillo 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.

107. Shahmansoori A., Chorti A., Poor H.V. Stealthy Optimal Range-Sensor Placement for Target Localization // *arXiv preprint*. – 2023. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2412.04316>.

108. 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.

109. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley, 1989. – 412 p.

110. Deb K. Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. – Wiley, 2001. – 528 p.

111. Kozin I. V. Fragment structures and evolutionary algorithms // In: Kiselyova O. (Ed.). Problems of applied mathematics and mathematical modeling: Collection of scientific works. – Dnipropetrovsk: Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 2008. – P. 138–146. – ISSN 2074-5893.

112. Kozin I. V., Maksyshko N. K., Perepelitsa V. A. Fragmentary structures in discrete optimization problems // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2017. – Vol. 53. – P. 931–936.

113. Лебедєва-Дичко А. С., Шилю Г. М. Оптимізація сенсорного покриття в гібридних системах позиціонування // *Computer Design Systems. Theory and Practice*. – 2025. – Т. 7, № 1. – С. 300–309.

114. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2020. – 432 с.

115. Poltorak D. Architectural Metapatterns: The Pattern Language of Software Architecture. – Budapest: PublishDrive, 2024. – 300 с.

116. Ezell B., Lynch C. J., Hester P. T. Methods for weighting decisions to assist modelers and decision analysts: A review of ratio assignment and approximate techniques // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 21. – Article 10397.

117. Starovoitov V. V., Golub Y. I. Data normalization in machine learning //

Informatics. – 2021. – Vol. 18, No. 3. – P. 83–96.

118. Falkevych V., Lisniak A. Cache invalidation based on a declarative approach for separating business logic of microservices from cache update rules // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 2, No. 2(134). – P. 68–74.

119. Falkevych V. G., Lisniak A. O. Methodology of Cache Invalidation in Microservices Architecture of the Web Applications // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т. 34, № 1. – С. 131–135.

120. Кривий Я. В., Лісняк А. О. Мікросервісна архітектура систем скінченно-елементного аналізу // Computer Science and Applied Mathematics. – 2024. – № 1. – С. 75–82.

121. Zhang C., Gao W., Xiao S. N., Meng L. Cost-effective wearable indoor localization and motion analysis via the integration of UWB and IMU // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – Article 344.

122. Angelats E., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G. Enhanced seamless indoor–outdoor tracking using time series of GNSS positioning errors // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2024. – Vol. 13, No. 3. – Article 72.

123. Бушуєв С. Д., Барановська С. В. Управління проектами: підручник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011.

124. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. – Wiley, 2017.

125. Кірсанов Д. А., Мезенцева Т. А. Управління інноваційними проектами. – Київ: Либідь, 2009.

126. Синенко М. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу // Інтелект XXI. – 2018. – № 1. – С. 235–238.

127. Лебедева-Дичко А. С. Архітектура систем позиціонування об'єктів на будівельних майданчиках // Computer Science and Applied Mathematics. – 2025. – № 1. – С. 119–127.

ДОДАТКИ

Додаток А

Додаток про впровадження у навчальний процес Запорізького національного університету



Затверджую
В.о. ректора Запорізького
національного університету
О.Г. Бондар

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи Лебедевої-Дичко
Анастасії Сергіївни
«Методи проектування гібридних систем позиціонування об'єктів
на промислових майданчиках»
Лебедева-Дичко Анастасія Сергіївна

Складено комісією у складі:

Голова: доктор технічних наук, професор, декан математичного факультету
Гоменюк Сергій Іванович

Членів комісії: заступника декана математичного факультету з навчальної
роботи, к.т.н.: Спиця Оксана Геннадіївна;
доцент кафедри комп'ютерних наук, к.т.н. Матвіїшина Надія Вікторівна.

Засвідчує, що результати дисертаційної роботи: метод оптимізації розміщення сенсорів у гібридній системі позиціонування об'єктів на промислових майданчиках з динамічною просторовою конфігурацією використано в освітній діяльності кафедри комп'ютерних наук Запорізького національного університету при викладанні дисципліни «Інтернет речей» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 122 - Комп'ютерні науки.

Голова комісії: Гоменюк Сергій Іванович

Члени комісії: Спиця Оксана Геннадіївна

Матвіїшина Надія Вікторівна

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи ПАТ «Запоріжсталь»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор з інжинірингу ПАТ «Запоріжсталь»
М.В.Петряков

«14» квітня 2025 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
«Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на
промислових майданчиках»
Лебедєва-Дичко Анастасія Сергіївна

«14» квітня 2025 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голова Начальник ПКУ ПАТ «Запоріжсталь» Сидоренко А.В.
(посада, ПІБ)

Членів комісії: Начальник ВМУ ПКУ Ажажа В.А.
(посада, ПІБ)

Начальник ВЗП ПКУ Олійник В.А.
(посада, ПІБ)

Комісія провела роботу щодо визначення фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Лебедєвої-Дичко А.С.

У результаті підтверджено впровадження методу розробки геометричної моделі дискретизації промислового майданчика з урахуванням рівня критичності щодо надійності покриття сигналу, що забезпечує адаптацію параметрів системи позиціонування до умов динамічної зміни конфігурації та вимог безпеки.

Використання запропонованого методу дозволило:

- оптимізувати розміщення засобів позиціонування на підприємстві;
- отримати більш точний та стабільний сигнал у зонах підвищеної критичності.

Голова комісії: _____ А.В.Сидоренко

Члени комісії _____ В.А.Ажажа

_____ В.А.Олійник

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи ТОВ «АЛД ІНЖИНІРИНГ ТА БУДІВНИЦТВО»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор виконавчий
ТОВ «АЛД ІНЖИНІРИНГ ТА БУДІВНИЦТВО»
П.О. Мірошніченко
«28» квітня 2025 р



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
«Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на
промислових майданчиках»
Лебедева-Дичко Анастасія Сергіївна

«28» квітня 2025 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голова головний інженер О.В. Дуденко;

Членів комісії: директор з економіки Є.О. Близнюк ;
в.о. директора з персоналу Ісаєва Ю.В.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Лебедевої-Дичко А.С. – «Методи проєктування гібридних систем позиціонування об'єктів на промислових майданчиках». Було впроваджено систему позиціонування персоналу, що дозволило підвищити ефективність моніторингу переміщення працівників у реальному часі та знизити ризики перебування персоналу в небезпечних зонах завдяки точному визначенню їхнього місцезнаходження.

Голова комісії: _____ О.В. Дуденко

Члени комісії _____ Є.О. Близнюк

_____ Ю.В. Ісаєва