

УДК 004.722.45:621.396.946]:[528.85:69]
DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2025-1-14>

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА БУДІВЕЛЬНИХ МАЙДАНЧИКАХ

Лебедєва-Дичко А. С.

*аспірант кафедри комп'ютерних наук
Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна
orcid.org/0009-0003-1931-1861
ldas.1405@gmail.com*

Ключові слова: *зонування території, якість сигналу, точність координат об'єктів, супутникові технології, UWB, Wi-Fi, обробка та візуалізація даних, база даних, позиціонування у реальному часі.*

У статті пропонується архітектура системи позиціонування об'єктів на будівельних майданчиках, де динамічно змінюється конфігурація простору. Розроблено гібридну систему, що інтегрує супутникову (GPS або Starlink) та дві локальні технології (UWB, Wi-Fi) для забезпечення оптимального співвідношення заданої точності, надійності позиціонування об'єктів у реальному часі та мінімальної вартості.

Для підвищення надійності системи запропоновано підхід, що ґрунтується на зонуванні території будівельного майданчика за рівнем критичності, що дає змогу адаптувати систему позиціонування залежно від умов середовища. У зонах із високою критичністю використовується комбінація трьох технологій, що забезпечує точність до 50 см навіть за наявності металевих перешкод. У середньокритичних зонах доцільним є поєднання двох технологій, вибір яких залежить від конфігурації майданчика. У зонах низької критичності (відкриті простори без значних перешкод) використовується одна з доступних технологій залежно від умов покриття. Архітектура має чотири рівні. На першому рівні здійснюється збір інформації від сенсорів і модулів супутникового зв'язку. Другий рівень відповідає за обробку отриманих даних, фільтрацію шумів і корекцію похибок, що реалізується за допомогою фільтра Калмана. Третій рівень виконує збереження інформації, що організовується за допомогою багаторівневої системи, включно з оперативним, довготривалим та архівним сховищами. Це дає змогу зберігати й аналізувати поточні та історичні дані, забезпечуючи можливість прогнозування руху об'єктів і підвищення ефективності логістики. Четвертий рівень забезпечує інтеграцію системи в загальну інфраструктуру управління, даючи можливість операторам здійснювати моніторинг об'єктів у реальному часі, прогнозувати можливі відхилення.

Запропонована архітектура дає змогу налаштовувати та масштабувати систему з огляду на особливості будівельного майданчика, зважаючи на складність середовища, критичність зон і вимоги до точності позиціонування. З використанням адаптивного зонування можна ефективно розподіляти технології позиціонування, забезпечуючи баланс між точністю, надійністю й економічною доцільністю.

ARCHITECTURE OF POSITIONING SYSTEMS FOR OBJECTS ON CONSTRUCTION SITES

Lebedieva-Dychko A. S.

Postgraduate Student at the Department of Computer Science

Zaporizhzhia National University

Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine

orcid.org/0009-0003-1931-1861

ldas.1405@gmail.com

Key words: *territory zoning, signal quality, accuracy of object coordinates, satellite technologies, UWB, Wi-Fi, data processing and visualisation, database, real-time positioning.*

The article proposes the architecture of a system for positioning objects on construction sites where the space configuration is dynamically changing. A hybrid system has been developed that integrates satellite (GPS or Starlink) and two local technologies (UWB, Wi-Fi) to ensure the optimal ratio of the specified accuracy, reliability of real-time positioning of objects and minimum cost.

To improve the system's reliability, an approach based on zoning the construction site by the level of criticality is proposed, which allows the positioning system to adapt to the environment. In areas of high criticality, a combination of three technologies is used to ensure accuracy of up to 50 cm even in the presence of metal obstacles. In medium-critical areas, a combination of two technologies is advisable, the choice of which depends on the site configuration. In low-criticality areas (open spaces without significant obstacles), one of the available technologies is used depending on the coverage conditions.

The architecture includes four levels. The first level collects information from sensors and satellite communication modules. The second level is responsible for processing the received data, filtering noise and correcting errors, which is implemented using a Kalman filter. The third tier is responsible for storing information, which is organised through a multi-level system, including operational, long-term and archival storage. This allows you to store and analyse current and historical data, providing the ability to predict the movement of objects and improve logistics efficiency. The fourth level ensures the integration of the system into the overall management infrastructure, allowing operators to monitor facilities in real time and predict possible deviations.

The proposed architecture allows the system to be customised and scaled to suit the specifics of the construction site, taking into account the complexity of the environment, criticality of areas and positioning accuracy requirements. The use of adaptive zoning allows for the efficient distribution of positioning technologies, ensuring a balance between accuracy, reliability and economic feasibility.

Вступ. В умовах стрімкого технологічного розвитку питання точного позиціонування об'єктів стає дедалі актуальнішим, особливо в будівельних зонах, де безпека й ефективність виконання робіт є пріоритетними завданнями. Системи позиціонування дають змогу не лише контролювати місцезнаходження об'єктів, а й мінімізувати ризики аварійних ситуацій, оптимізувати процеси та забезпечувати ефективне управління ресурсами.

Основні критерії ефективності систем позиціонування – точність, надійність та економічність. У контрольованих умовах багато сучасних технологій демонструють високу точність визначення координат об'єктів. Однак на майданчиках зі змінною конфігурацією простору, як-от будівельні майданчики, кар'єри, нафтові платформи або про-

мислові об'єкти, використання однієї технології виявляється недостатньо ефективним.

Динамічні зміни ландшафту, встановлення тимчасових металоконструкцій, поява нових будівель і технічного обладнання можуть суттєво впливати на якість сигналу та точність позиціонування.

Класичний підхід до вирішення цієї проблеми – збільшення кількості контрольних точок або застосування більш потужних сенсорів – призводить до значного зростання витрат. Це робить використання однієї універсальної технології нерентабельним для мобільних і тимчасових робочих зон.

У зв'язку із цим усе більшої уваги набуває розробка гібридних систем позиціонування, що інтегрують кілька технологій для компенсації недо-

ліків кожної з них. Перспективним підходом є комбінування супутникових систем із локальними технологіями.

Використання фільтра Калмана для обробки даних із різних джерел дає змогу згладжувати шумові складові, коригувати неточності та підвищувати точність визначення координат об'єктів у реальному часі. Такі рішення сприятимуть адаптивності системи до змінних умов експлуатації, що особливо важливо для будівельних і промислових майданчиків.

Отже, об'єктом дослідження є визначення координат технічних об'єктів і персоналу в реальному часі із заданою точністю. Метою роботи є розробка архітектури гібридної системи позиціонування об'єктів на будівельних майданчиках, що поєднує супутникові та локальні технології, забезпечує мінімізацію похибок позиціонування, підвищує надійність системи й економічну ефективність.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення таких задач:

- визначення видів технологій;
- вибір методики зонування території;
- обробка сигналів та зменшення рівня шуму;
- збереження даних.

Огляд літератури. На сьогодні інтерес науковців до проблематики позиціонування об'єктів у складних середовищах, зокрема на будівельних майданчиках, відображається у значній кількості досліджень, які спрямовані на пошук більш ефективних рішень. Будівельні майданчики відзначаються динамічністю, змінною конфігурацією та обмеженою інфраструктурою, що ускладнює використання традиційних засобів позиціонування [1]. У таких умовах саме багатосенсорні системи стають технологічною основою для створення гнучкої, адаптивної архітектури позиціонування.

У роботі [2] продемонстровано, що в умовах промислових об'єктів точність супутникового позиціонування істотно знижується – похибка може сягати 20–50 метрів, особливо за наявності металевих конструкцій або відсутності прямої видимості до супутників. Дослідження роботи технології UWB демонструє вищу точність позиціонування у відкритому середовищі, однак робота системи передбачає точне і стабільне розміщення антен на відомих відносних позиціях, що ускладнює масштабування та роботу системи за зміни конфігурації простору [3]. Усе це обумовлює необхідність використання альтернативних або комбінованих рішень.

У цьому контексті [4] пропонують архітектуру гібридного позиціонування, яка передбачає автоматичне перемикавання між різними джерелами залежно від якості сигналу. Такий підхід дає змогу підвищити стабільність позиціонування й оптимізувати енергоспоживання пристроїв. Проте система

була реалізована у відносно стабільних умовах, що обмежує можливість її застосування в умовах постійної просторової динаміки, властивій будівельним майданчикам.

У дослідженні [5] інтегровано дані з UWB та IMU з використанням комплементарного фільтра і фільтра Калмана. Запропонована система досягає високої точності. Вона ефективна в умовах обмеженої видимості та дає можливість зберігати безперервність позиціонування. Водночас практичне застосування такої технології у відкритих і динамічних просторах ускладнюється необхідністю щільного та стабільного розміщення антен, що важко для реалізації та масштабування на будівельних майданчиках.

Дослідження [6] показує контекстно залежне гібридне рішення для позиціонування, що адаптується до змін GNSS-похибок у часі. Такий підхід демонструє високу точність у складних просторових сценаріях, проте потребує складного сенсорного комплексу та не є орієнтованим на економічно ефективне розгортання в умовах будівництва.

Методи. Для реалізації гібридної системи позиціонування запропоновано архітектуру на основі супутникових технологій, UWB та Wi-Fi. Залежно від рівня необхідної точності та надійності системи, складності майданчика, а також з огляду на можливу динамічну зміну його конфігурації ці технології можуть комбінуватися різними варіантами.

Запропонований підхід дає змогу адаптивно налаштовувати систему до умов заданого майданчика, використовуючи переваги кожної технології. Для цього в процесі розробки системи позиціонування ключовим завданням є ефективне зонування території, що дає змогу оптимально розміщувати датчики.

Для опису архітектури системи використовується ієрархічний підхід, що надає можливість розглянути особливості реалізації системи на апаратному та програмному рівні, врахувати особливості території будівельного майданчика та зміни його конфігурації з часом.

Результати. Одним із найбільш ефективним підходів до організації зонування території майданчика є використання гексагональної (шестикутної) сітки [7]. Основні переваги цього підходу:

- рівномірне покриття без прогалів. Гексагональна сітка дає змогу рівномірно покривати всю територію без накладань або прогалів в покритті;
- мінімізація відстані між сусідніми точками. У гексагональній сітці кожна зона має однакову відстань до всіх шести сусідів, що знижує затримки під час передавання сигналу та покращує ефективність розміщення датчиків;

– ефективне використання обчислювальних ресурсів. Гексагональна сітка потребує менше

обчислювальних для розрахунку розташування об'єктів порівняно з квадратною або круговою структурою. Це полегшує алгоритми визначення найближчих сусідів і зменшує навантаження на систему обробки даних;

– оптимальне використання датчиків. У гексагональній схемі кожен датчик може взаємодіяти із шістьма сусідніми зонами, що забезпечує надійність покриття та дає змогу швидко адаптувати систему до змін у середовищі (наприклад, у разі встановлення нових перешкод або зміни планування території).

Визначення зон базується на ключових факторах, які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Фактори, що впливають на якість позиціонування

Фактор	Характеристики
Електромагнітні перешкоди	металеві конструкції, промислового обладнання, джерел випромінювання (високовольтні лінії або радіозв'язок)
Динамічність середовища	зміни у конфігурації майданчика (тимчасові споруди, рухомі механізми, збільшення металевих конструкцій)
Тип середовища	відкритий простір або приміщення

На зони також можуть накладатися додаткові вимоги до точності позиціонування, що пов'язані з безпечним перебуванням об'єктів на певній ділянці.

З огляду на це майданчик розподіляється на зони ризику, які класифікуються за рівнем критичності:

– критичні зони (зони підвищеної небезпеки) потребують найвищої точності позиціонування, тому використовується комбінація супутникових технологій, UWB та Wi-Fi;

– зони середньої критичності передбачають використання двох технологій без втрати точності даних (наприклад, UWB та Wi-Fi для закритих майданчиків або GPS та Wi-Fi/GPS та UWB для комбінованих майданчиків);

– зони низької критичності використовують одну технологію залежно від доступності сигналу та вимог до точності;

– «мертві зони» (ділянки, де неможливе позиціонування) виникають у місцях, де сигнал відсутній або надто нестабільний через перешкоди, рельєф чи інші завади.

У таблиці 2 наведено показники надійності, точності й економічності для технологій, які використовуються в гібридній системі позиціонування.

Робота системи позиціонування ґрунтується на чотирирівневій архітектурі, наведеній на рис. 1.

Сенсорний рівень обладнано GPS-приймачами, які отримують сигнали від супутників і 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

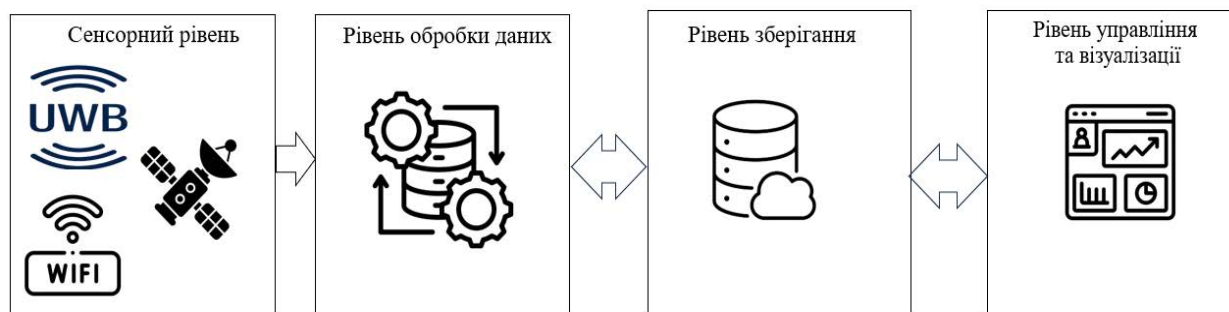


Рис. 1. Архітектура системи позиціонування

Таблиця 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

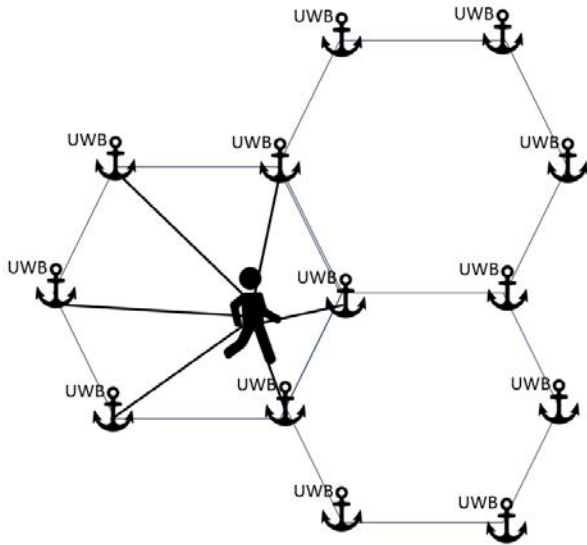


Рис. 2. Розміщення датчиків з технологією UWB

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 в зонах зі складною забудовою або на територіях, де прямий доступ до супутникових сигналів може бути обмеженим.

Для підвищення точності в таких умовах додатково застосовуються стаціонарні UWB-якорі (рис. 2), які отримують сигнали від переносних міток і визначають їх розташування на основі методу вимірювання часу проходження сигналу.

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 потрібно додатково підвищити точність і зменшити вплив перешкод, застосовується технологія Wi-Fi для позиціонування (рис. 3), 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.

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

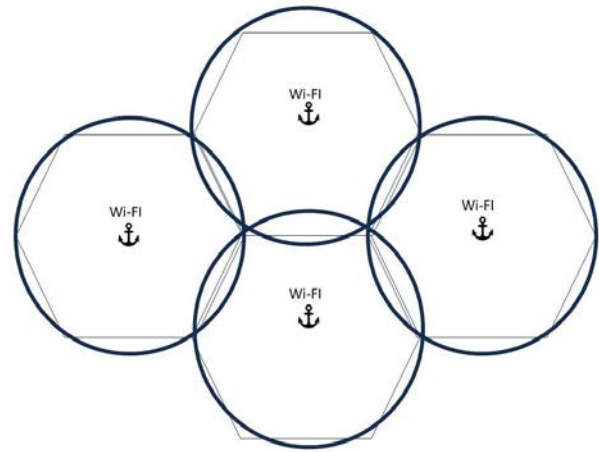


Рис. 3 Розміщення датчиків з технологією Wi-Fi

багатопроменевого поширення сигналу, впливу перешкод або змін у навколишньому середовищі (рис. 4). Використання цього методу дає змогу згладжувати коливання координат і забезпечувати стабільність визначення місця розташування навіть за умов нестабільного приймання сигналів.

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 [8].

Обчислення вагового коефіцієнта ґрунтується на трьох основних чинниках:

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

Кожен коефіцієнт розраховується за адаптивною моделлю:

$$W_i = \frac{Q_i}{\sum Q_i},$$

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

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

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

Оцінка якості сигналу Q_i розраховується так:

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

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

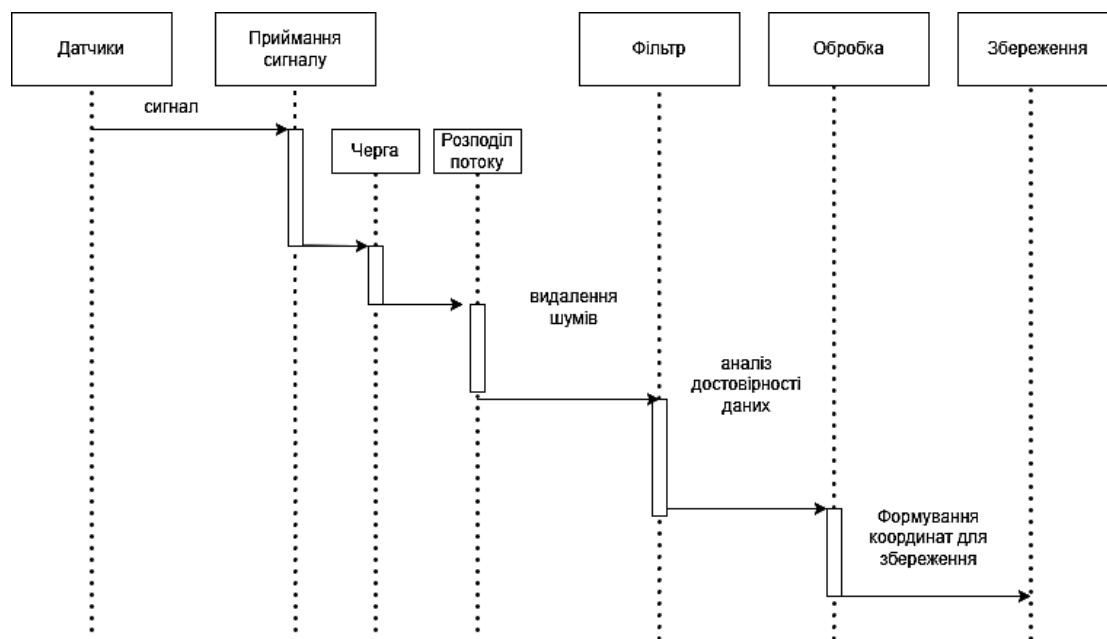


Рис. 4. Діаграма послідовності на рівні обробки сигналу

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

C_i — коригувальний коефіцієнт для середовища (перешкоди, метал, відкритий простір);

α, β, γ — коефіцієнти впливу.

Оскільки всі величини подані в різних одиницях виміру, застосуємо метод нормалізації [9]. Для цього кожне значення перетворюється за формулою:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

де $x_{\max}$ — максимальне значення в наборі даних;

$x_{\min}$ — мінімальне значення в наборі даних.

Таблиця 3

**Розрахункові коефіцієнти довіри
для технологій**

Технологія	σ (м)	SNR (dB)	C	Оцінка Qi	Варіа 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 перемикається 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 й 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 потребують використання багаторівневої архітектури збереження інформації.

Запропоновано підхід до організації системи збереження, що має три основні рівні: оперативне, довготривале та архівне сховища (рис. 5).

Структура збереження інформації ґрунтується на концептуальній моделі бази даних (рис. 6), що містить основні сутності, наведені в таблиці 4.

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 інтерва-

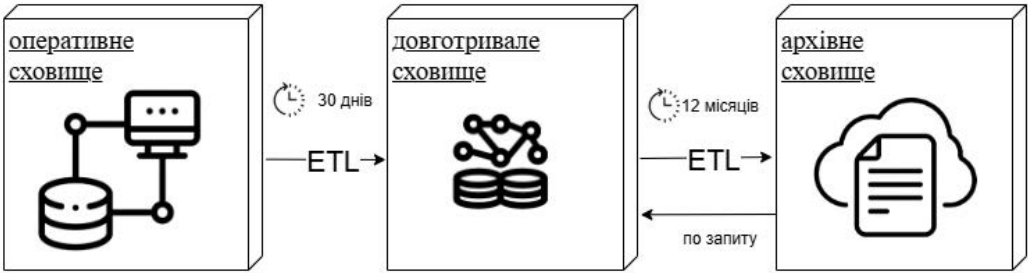


Рис. 5. Організація системи збереження

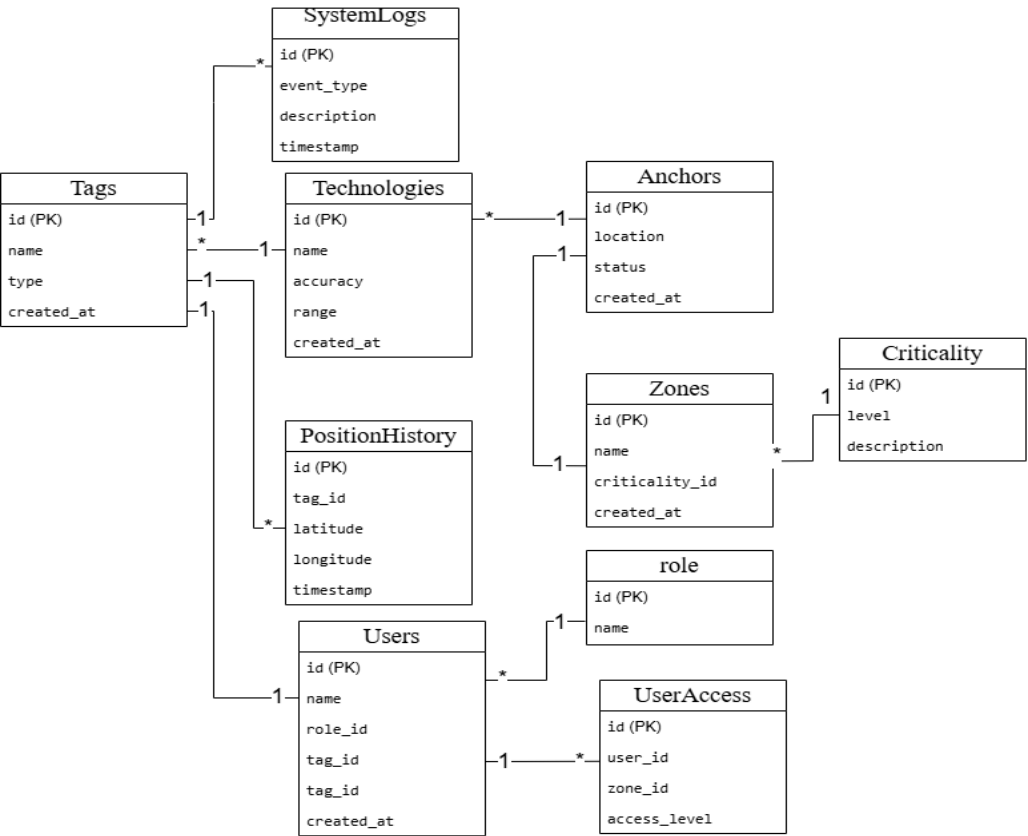


Рис. 6. Концептуальна модель бази даних

Таблиця 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 за рівнем критичності позиціонування
Technologies	типи застосовуваних технологій позиціонування
SystemLogs	журнал подій, який фіксує помилки, втрату зв'язку та зміну конфігурації системи
Criticality	типи критичності зон
Users	перелік об'єктів, що підлягають позиціонуванню
Role	довідник ролей для доступу до системи позиціонування
UserAccess	права доступу до об'єктів у системі

лами, 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.

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 в 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 і 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.

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:

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

Доступ до архівних даних здійснюється за запитом, а в разі потреби 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 із системою використовується вебінтерфейс, що дає змогу відстежувати переміщення персоналу та техніки. 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 й 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 здійснювати моніторинг розташування об'єктів у реальному часі, аналізувати історичні дані й оцінювати ефективність використання технологій позиціонування. Інтерфейс містить графічні елементи, як-от 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. 7).

Дані, що використовуються для побудови аналітики, можуть надходити з різних джерел. Зокрема, SQL-база та API забезпечують обмін інформацією з іншими інформаційними системами й отримання оновлених значень у реальному часі. Для покращення взаємодії із зовнішніми модулями система підтримує можливість

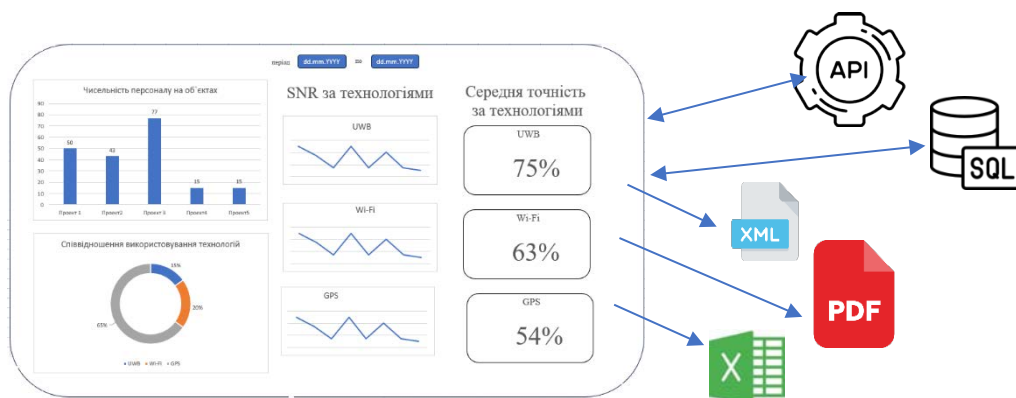


Рис. 7. Приклад дашборду для системи позиціонування

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 й обробки інформації.

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

Обробка сигналів із декількох технологій здійснюється за допомогою адаптивного алгоритму з фільтрацією шумів, що дає змогу досягти стабільної точності навіть в умовах часткових перешкод або втрати прямої видимості. Такий підхід забезпечує не лише точність, але й стійкість до змін структури простору, що є характерною рисою будівельних об'єктів.

На відміну від роботи [5], 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 завдяки впровадженню механізму зонування та використання кількох типів технологій відповідно до критичності зон. Такий підхід дає змогу не лише підтримувати необхідну точність, а й оптимізувати витрати, враховуючи економічну доцільність розгортання системи.

Порівняно з підходом, описаним у [6], 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 й адаптивна сенсорна інтеграція дають можливість створити масштабовану, портативну та ефективну систему, придатну для швидкого розгортання на об'єктах із різними характеристиками, що вигідно вирізняє її серед існуючих рішень.

Подальші дослідження будуть зосереджені на оптимізації розміщення сенсорів і використанні метаевристичних методів для автоматизації налаштувань системи в режимі реального часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Park M., Tran D.Q., Bak J., Park S. Small and overlapping worker detection at construction sites. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 154. Article 105117. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105117.
2. Li D., Lei Y., Zhang H. A novel outdoor positioning technique using LTE network fingerprints. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 6. Article 1691. DOI: 10.3390/s20061691.
3. Rykała Ł., Typiak A., Typiak R. Research on developing an outdoor location system based on the ultra-wideband technology. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 21. Article 6171. DOI: 10.3390/s20216171.
4. Fernández P.J., Santa J., Skarmeta A.F. Hybrid positioning for smart spaces: Proposal and evaluation. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No. 12. Article 4083. DOI: 10.3390/app10124083.
5. 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. DOI: 10.3390/s20020344.
6. 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. DOI: 10.3390/ijgi13030072.
7. Apte M., Agarwadkar Y., Azmi S., Inamdar A. Understanding grids and effectiveness of hexagonal grid in spatial domain [Електронний ресурс]. *ResearchGate*. 2013. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/235429421>.
8. 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. DOI: 10.3390/app112110397.
9. Starovoitov V.V., Golub Y.I. Data normalization in machine learning // *Informatics*. 2021. Vol. 18. No. 3. P. 83–96. DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-3-83-96.