

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ТА ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Шило Г. М.

*доктор технічних наук,
завідувач кафедри комп'ютерних наук
Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна
orcid.org/0000-0002-5020-6707
shilo.gn@gmail.com*

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: *позиціонування об'єктів, промислові зони, Starlink, обробка сигналів, фільтр Калмана.*

У статті розглядається задача підвищення точності позиціонування об'єктів на промислових майданчиках, де традиційні системи, такі як GPS і Wi-Fi, часто не забезпечують достатньої точності через різноманітні технічні обмеження та умови середовища. Особливо це стосується відкритих просторів із високою концентрацією металевих конструкцій та зі змінною конфігурацією території, що може призводити до значних похибок у визначенні місця розташування об'єктів. У таких умовах точність визначення координат стає критично важливою, оскільки традиційні системи не завжди можуть гарантувати необхідну якість позиціонування. Дослідження зосереджене на підвищенні точності визначення місця розташування об'єктів на відкритих, віддалених від міста ділянках, де використання стандартних рішень обмежене, а похибки можуть бути занадто великими для задоволення потреб підприємств. Основну увагу приділено аналізу даних, що отримано із супутникової системи Starlink, яка надає нові можливості для визначення позиціонування. Ця система дозволяє отримувати сигнали, що можуть бути більш стабільними у порівнянні з іншими системами, однак навіть вона має свої обмеження через вплив навколишніх факторів. Для зменшення шумів і підвищення точності сигналу, одержуваного від Starlink, застосовується фільтр Калмана. Цей фільтр дозволяє більш ефективно обробляти сигнали, відфільтровуючи непотрібні шумові дані, і таким чином покращувати точність кінцевих результатів позиціонування. Експериментальні результати показують, що використання фільтра Калмана знижує похибки позиціонування і забезпечує більш точні результати порівняно з традиційними методами. Завдяки фільтрації шумів та поліпшенню обробки сигналів, система на основі Starlink з фільтром Калмана може забезпечити більш високу точність визначення місця розташування об'єктів навіть у складних умовах. Проте, незважаючи на значне підвищення точності, досягнута точність залишається недостатньою для використання на критично важливих об'єктах. Це робить необхідним подальший аналіз і розробку гібридних систем позиціонування.

ANALYSIS OF POSITIONING ACCURACY USING SATELLITE SYSTEMS AND NOISE FILTERING IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Shilo G. M.

*Doctor of Technical Sciences,
Head of the Department of Computer Science
Zaporizhzhia National University
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine
orcid.org/0000-0002-5020-6707
shilo.gn@gmail.com*

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: *object positioning, industrial zones, Starlink, signal processing, Kalman filter.*

This article discusses the problem of improving the accuracy of object positioning at industrial sites, where traditional systems such as GPS and Wi-Fi often do not provide sufficient accuracy due to various technical limitations and environmental conditions. This is especially true in open spaces with a high concentration of metal structures and a variable territory configuration, which can lead to significant errors in determining the location of objects. In such conditions, the accuracy of coordinate determination becomes critical, as traditional systems cannot always guarantee the required quality of positioning. The study focuses on improving the accuracy of object location in open areas remote from the city, where the use of standard solutions is limited and errors can be too large to meet the needs of enterprises.

The main focus is on analyzing data obtained from the Starlink satellite system, which provides new opportunities for positioning. This system provides signals that can be more stable than other systems, but even it has its limitations due to the influence of environmental factors. A Kalman filter is used to reduce noise and improve the accuracy of the signal received from Starlink. This filter allows for more efficient signal processing by filtering out unnecessary noise data, thus improving the accuracy of the final positioning results.

Experimental results show that the use of the Kalman filter reduces positioning errors and provides more accurate results than traditional methods. Due to noise filtering and improved signal processing, the Starlink-based system with Kalman filter can provide higher accuracy in object location even in difficult conditions. However, despite the significant increase in accuracy, the achieved accuracy remains insufficient for use at critical facilities. This makes it necessary to further analyze and develop hybrid positioning systems.

Вступ. В умовах стрімкого технологічного прогресу питання точного позиціонування об'єктів стає дедалі актуальнішим. Надійні системи позиціонування відіграють ключову роль у таких галузях, як промисловість, будівництво, логістика та інші, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність і безпеку процесів [1]. Важливо забезпечувати високу точність позиціонування, зберігаючи при цьому мобільність і економічність рішень, особливо на об'єктах зі змінною конфігурацією майданчиків.

Зміни конфігурації майданчиків можуть істотно вплинути на якість сигналу, ускладнюючи точне визначення місця розташування об'єкта. Традиційні мобільні системи, а саме GPS, можуть показувати похибку від 10 метрів до кількох кілометрів і втрачати сигнал на майданчиках зі складною конфігурацією та металевими конструкціями. Системи Wi-Fi можуть давати точність до 3-5 метрів, але вимагають великої кількості точок доступу, що збільшує вартість і складність установки [2].

Останніми роками дедалі більше уваги приділяється супутниковим системам, таким як Starlink, які пропонують унікальні переваги завдяки своїй стійкості та ширококутовому сигналу, що перевершує потужності традиційних систем. Starlink забезпечує глобальне покриття через мережу супутників на низькій навколоземній орбіті, що дає змогу підтримувати стабільний зв'язок в умовах відсутності стільникового покриття та у віддалених регіонах [3].

Сигнали Starlink мають високу потужність, що покращує якість зв'язку і знижує втрати сигналу в складних умовах, наприклад, за наявності множинних перешкод. На відміну від GPS, призначеного тільки для навігації, Starlink підтримує високошвидкісний інтернет і передачу великих обсягів даних, що особливо важливо за необхідності відстеження значної кількості об'єктів одночасно.

Однак Starlink має обмеження щодо точності. Хоча Starlink пропонує більш потужні сигнали, ніж GPS, обидва супутникових типи схильні до спотворень, спричинених атмосферними умовами та багатопроменевими ефектами. Це особливо впливає при зміні ландшафту і наявності металевих конструкцій, які можуть блокувати пряму видимість супутників. Тому метою дослідження є аналіз точності позиціонування об'єктів за допомогою супутникової технології Starlink на відкритому промисловому майданчику.

Методи. Для аналізу даних щодо місця знаходження об'єкту та відхилень Starlink від його базової установки було проведено дослідження на будівельному майданчику, де проводились роботи з монтажу металокопункцій та їх установлення у проектне положення за допомогою великого кранового обладнання. Спочатку 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 уже встановлених металокопункцій, які знаходились на будівельному майданчику (рис. 1), 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.

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.

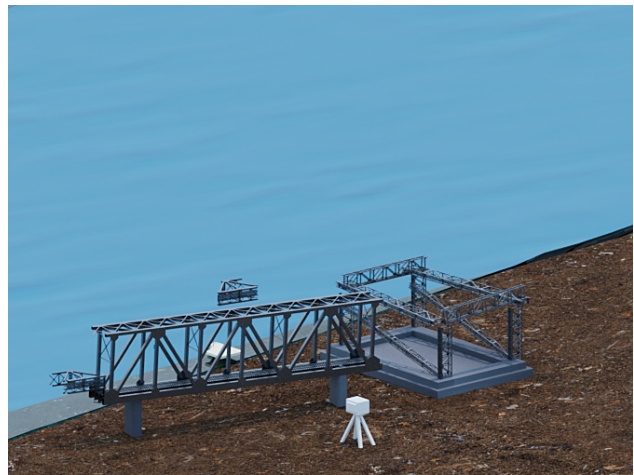


Рис. 1. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на перший місяць

Протягом п'яти місяців структура і зовнішній вигляд майданчика значно змінювались, положення Starlink не змінювалось. Майданчик розширювався у вертикальному та у горизонтальному напрямках (рис. 2). Збільшилася кількість металокопункцій, а поблизу розташування Starlink перебувала великогабаритна кранова техніка (рис. 3).

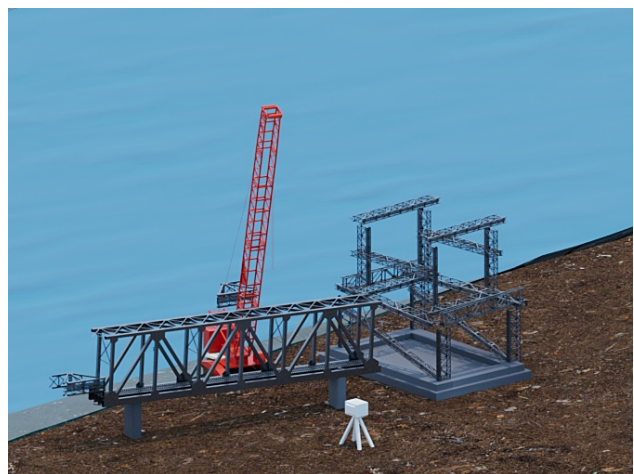


Рис. 2. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на третій місяць

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

Для підвищення точності даних і згладжування отриманих шумів, що обумовлено зовнішніми факторами, доцільно застосувати методи фільтрації даних [4]. Одним із найефективніших підходів у даному випадку є використання фільтра Калмана [5]. Цей метод дає змогу прогнозувати та коригувати показання в реальному часі, зни-

жуючи 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 зробить дані визначення позиції об'єкту більш точними та надійними в умовах мінливого навколишнього середовища [6].

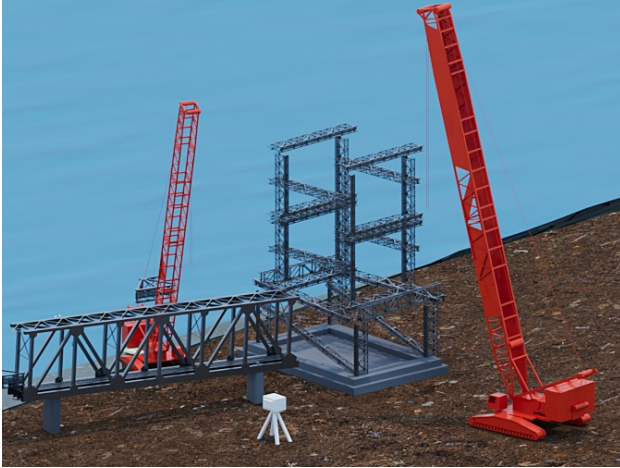


Рис. 3. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на п'ятий місяць

Метод Калмана, також відомий як лінійний фільтр Калмана, підходить для систем, які можна описати за допомогою лінійних рівнянь.

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

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 (1) 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 (1) для визначення стану системи зводиться до:

$$x_k = I x_{k-1} + w_k, \quad (2)$$

де I - одинична матриця.

Для врахування наявного шуму та корекції на основі фактичних вимірів, ми використовуємо процедуру коригування за виразом (3), який доз-

воляє 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.

$$x_k = x_{k-1} + K_k (z_k - H_k x_k), \quad (3)$$

де z_k - виміряне значення;
 H_k - матриця спостережень;
 K_k - коефіцієнт Калмана.

$$K_k = \frac{P_k}{P_k + R}, \quad (4)$$

де P_k - коваріація помилок передбачення;
 R - коваріація шуму вимірювань.

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

$$Var(\Delta x) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\Delta x_k - \bar{\Delta x})^2, \quad (5)$$

де n - кількість вимірювань;
 $\bar{\Delta x}$ - 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:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (e_k - \bar{e})^2, \quad (6)$$

де n - кількість вимірювань;
 e_k - середнє значення змін;
 \bar{e} - середнє значення похибки.

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

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

Результати. 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. 1).

Таблиця 1

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 сиг-

налу 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.

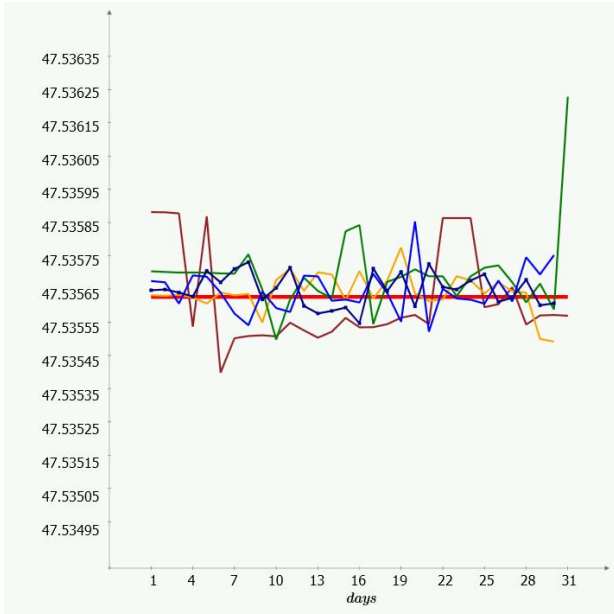


Рис. 4. Графік змін широти відносно встановленої константи широти (1- еталонне значення, 2-перший місяць, 3-другий місяць, 4-третій місяць, 5-четвертий місяць, 6-п'ятий місяць)

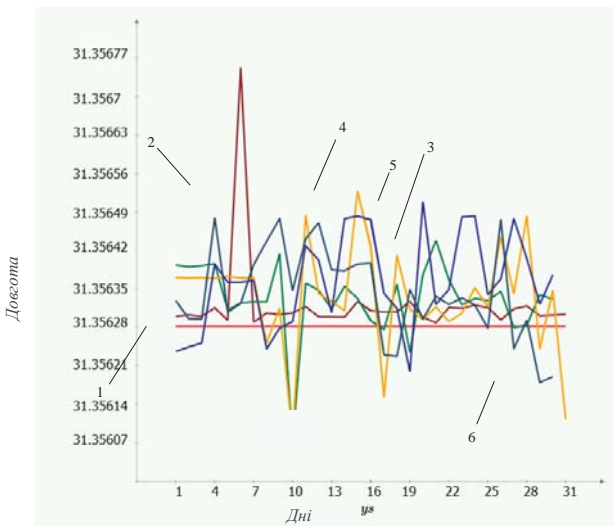
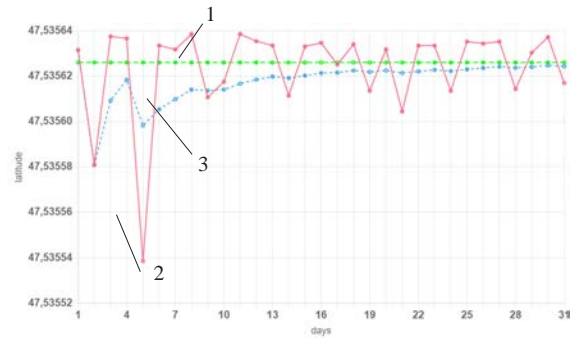
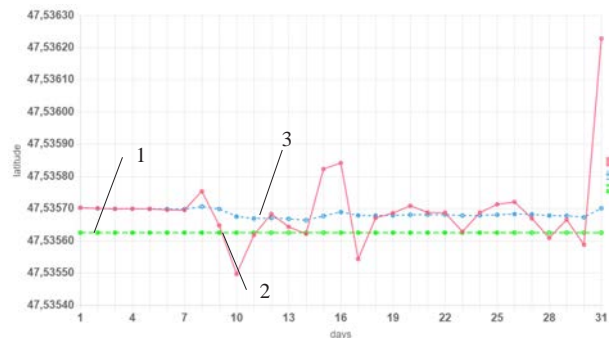


Рис. 5. Графік змін довготи відносно встановленої константи довготи (1- еталонне значення, 2-перший місяць, 3-другий місяць, 4-третій місяць, 5-четвертий місяць, 6-п'ятий місяць)

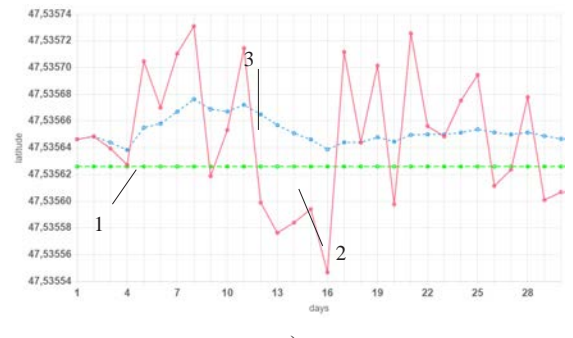
За результатами, представленими на рис. 6 і 7, фільтр Калмана було застосовано для зниження рівня шумів під час обробки сигналу. На графіку зображено три криві, що відображають етапи корекції даних: 1 – еталонне значення, 2 – вимірне значення, 3 – значення після обробки фільтром.



а)



б)



в)

Рис. 6. Графік зниження шумів на показник широти 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

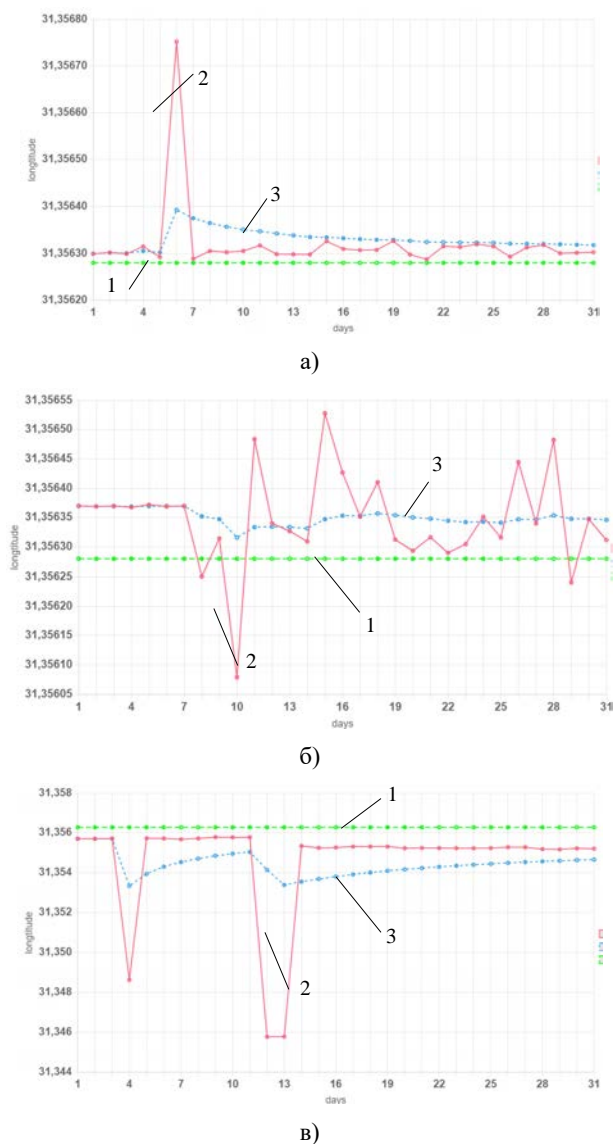


Рис. 7. Графіки зниження шумів на показник довготи із застосуванням фільтра Калмана за місяцями (а – перший, б – третій, в – п'ятий)

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 підлаштуватися під такі чинники, як зміна конфігурації майданчика, наявність металевих конструкцій і погіршення якості сигналу.

Висновок. 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.

Однак 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.

Для подальшого поліпшення точності позиціонування та мінімізації похибок необхідно інтегрувати додаткові технології визначення розташування об'єкта на майданчику. Одним із перспективних рішень є використання технології Bluetooth, яка може надавати додаткові дані. Інтеграція результатів глобального і локального позиціонування дозволяє підвищити загальну точність визначення місцеположення об'єкта. Перевірка адаптивного фільтра Калмана в умовах злиття даних із різних пристроїв, а саме Starlink і Bluetooth-датчиків, дасть змогу підвищити точність і надійність системи позиціонування.

Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення гібридної системи, що використовує дані позиціонування, отримані за допомогою різних технологій, для досягнення більшої точності в умовах складної конфігурації будівельного майданчика та динамічної зміни ландшафту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Groves, P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed., Artech House, 2013.
2. Outdoor Positioning for Industrial Workplace Lebedieva-Dychko, A., Shilo, G. 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023 - Proceedings, 2023
3. Grayver E., Nelson R., McDonald E., Sorensen E., Romano S. Позиціонування та навігація за допомогою Starlink, 2024.
4. Fadali, M. S. (2024). Introduction to Random Signals, Estimation Theory, and Kalman Filtering. [Publisher details not available].

5. Li, X., & Zhao, Y. (2022). Kalman Filtering and Information Fusion: Theory and Applications. [Publisher details not available].
6. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2020). Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB (4th ed.). Hoboken, NJ : Wiley.
7. Шмана К.С., Красножон О.В. Використання фільтрів Калмана та Маджвіка для обробки показань інерційних датчиків. *Новітні технології в науковій діяльності та навчальному процесі*. Чернігівський національний технологічний університет, 2022.

REFERENCES

1. Groves, P. D. (2013) Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed., Artech House.
2. Outdoor Positioning for Industrial Workplace Lebedieva-Dychko, A., Shilo, G. 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023 - Proceedings, 2023.
3. Grayver E., Nelson R., McDonald E., Sorensen E., Romano S. (2024) Pozytsionuvannia ta navihatsiia za dopomohoiu Starlink.
4. Fadali, M. S. (2024). Introduction to Random Signals, Estimation Theory, and Kalman Filtering. [Publisher details not available].
5. Li, X., & Zhao, Y. (2022). Kalman Filtering and Information Fusion: Theory and Applications. [Publisher details not available].
6. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2020). Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
7. Shmana K. S., Krasnozhon O. V. (2022) Vykorystannia filtriv Kalman ta Madzhvika dlia obrobky pokazan inertiinykh datchykyv // Modern Technologies in Scientific Activity and Educational Process. Chernihiv National University of Technology.