


Я, Шевченко Олександр Олегович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

12.12.2025 р.



(підпис)

Шевченко О. О.

(ПІБ)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра КІТАР

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
роботехніка

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та роботехнічні системи

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Шевченку Олександрю Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація методу визначення положення безпілотного
наземного мобільного робота на карті місцевості

затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1018 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Середовище програмування Visual Studio Code

Тип інтерфейсу – графічний

Мова програмування: HTML, JS, C++, C

Сервіс ThingsBoard

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Аналіз технічного завдання

Розробка оптимізованого методу відстеження місцезнаходження безпілотного
наземного мобільного робота

Реалізація та експерименти роботи

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускної кафедри) Демонстрацію та матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) = 13с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача теми проекту	01.09.2025	виконано
2	Аналіз технічного завдання та існуючих методів локалізації	05.09.2025	виконано
3	Розробка алгоритму системи на основі Extended Kalman Filter	10.10.2025	виконано
4	Вибір апаратних компонентів відповідно до алгоритму	18.10.2025	виконано
5	Збірка та налаштування апаратного модуля	03.11.2025	виконано
6	Програмна реалізація алгоритму для мікроконтролера	07.11.2025	виконано
7	Розробка веб-додатку для візуалізації даних	15.11.2025	виконано
8	Проведення експериментів та аналіз даних	05.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2025 р.

Здобувач Олександр ШЕВЧЕНКО
(підпис)

Керівник роботи проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 79с., 3 табл., 36 рис., 4 дод., 19 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, КАРТА МІСЦЕВОСТІ, СИСТЕМА ВІДСТЕЖЕННЯ, ЛОКАЛІЗАЦІЯ, EXTENDED KALMAN FILTER, SENSOR FUSION, GPS, IMU, ВЕБ-ЗАСТОСУНОК.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення точності визначення положення безпілотного наземного мобільного робота шляхом розробки та впровадження автоматизованого модуля локалізації з інтеграцією даних різнотипних сенсорів на основі Extended Kalman Filter та візуалізацією траєкторії руху у реальному часі.

Об'єктом дослідження є процес локалізації безпілотного наземного мобільного робота.

Предметом дослідження є методи та алгоритми визначення положення мобільного робота на основі багатосенсорної інтеграції даних.

Здійснено огляд та оцінку наявних технологій навігації для роботизованих систем. Створено багаторівневу структуру, де GPS-модуль NEO-6M та інерційний блок MPU6500 передають дані на обчислювальний рівень з розширеним фільтром Калмана, результати зберігаються у хмарному сервісі ThingsBoard, а веб-інтерфейс забезпечує графічне представлення траєкторії.

Досягнуті результати підтверджують ефективність розробленої системи для практичного застосування у логістичних, виробничих та транспортних завданнях, де потрібна точна навігація мобільних роботизованих платформ.

ABSTRACT

Explanatory note: 79 p., 3 tabl., 36 fig., 4 adj., 19 sources.

MOBILE ROBOT, TERRAIN MAP, TRACKING SYSTEM, LOCALIZATION, EXTENDED KALMAN FILTER, SENSOR FUSION, GPS, IMU, WEB APPLICATION.

The purpose of the qualification work is to improve the accuracy of determining the position of an unmanned ground mobile robot through the development and implementation of an automated localization module with integration of data from different types of sensors based on Extended Kalman Filter and real-time trajectory visualization.

The object of research is the localization system of an unmanned ground mobile robot.

The subject of research comprises methods and algorithms for determining the position of a mobile robot based on multi-sensor data integration.

A review and evaluation of available navigation technologies for robotic systems has been conducted. A multi-level architecture has been created, where GPS module NEO-6M and inertial unit MPU6500 transmit data to the computational level with Extended Kalman Filter, the results are stored in ThingsBoard cloud service, and the web interface provides graphical representation of the trajectory.

The achieved results confirm the effectiveness of the developed system for practical application in logistics, industrial and transportation tasks where accurate navigation of mobile robotic platforms is required.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ	10
1 Аналіз технічного завдання.....	13
1.1 Аналіз вимог технічного завдання	13
1.2 Аналіз методів відстеження місцезнаходження	15
1.3 Інтеграція сервісу з мобільним роботом	24
1.4 Постановка задач	28
2 Розробка оптимізованого методу відстеження місцезнаходження безпілотного наземного мобільного робота	29
2.1 Архітектура системи відстеження.....	29
2.2 Структура телеметричних даних.....	31
2.3 Алгоритм роботи системи.....	32
2.4 Протокол взаємодії компонентів системи	36
2.5 Математичні моделі	37
3 Реалізація та експерименти роботи.....	42
3.1 Реалізація модуля локалізації	42
3.2 Інтеграція з платформою ThingsBoard.....	46
3.3 Віртуальне підключення модуля локалізації.....	48
3.4 Реалізація веб-додатка	50
3.5 Експериментальні долідження та аналіз результатів	56
4 Охорона праці.....	67
4.1 Технічна безпека	67
4.2 Організація робочого місця	67
4.3 Безпека при роботі з обладнанням.....	68
4.4 Програмне забезпечення та надійність системи.....	69
4.5 Інформаційна безпека	69

4.6 Пожежна безпека.....	70
4.7 Безпека користувача.....	71
4.8 Висновки до четвертого розділу.....	71
Висновки	73
Перелік джерел посилання.....	77
Додаток А Код реалізації збору даних та обчислень для ESP 32	80
Додаток Б Розмітка веб-додатку	89
Додаток В Апробація наукових результатів	107
Додаток Г Демонстраційний матеріал	116

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БНМР – безпілотний наземний мобільний робот;

EKF – extended kalman filter;

GNSS – global navigation satellite system;

GPS – global positioning system;

HTML – HyperText Markup Language;

HTTPS – Hyper Text Transfer Protocol Secure;

IMU – inertial measurement unit;

IoT – internet of things;

IRU – inertial reference unit;

LE – low energy;

MRU – motion reference unit;

ROS – robot operating system;

SFM – structure from motion;

SLAM – simultaneous localization and mapping;

VO – visual odometry.

ВСТУП

Сучасний розвиток автоматизованих систем характеризується зростаючою потребою у високоточних методах встановлення географічного положення безпілотних транспортних платформ. Прецизійне відстеження переміщень таких пристроїв не обмежується лише навігаційними завданнями – це фундамент для оптимізації транспортних потоків, екологічного спостереження, забезпечення безпеки виробничих процесів та раціонального використання матеріальних ресурсів.

Проблематика стає особливо гострою у випадках роботи в умовах зі складною топографією або швидко змінюваним середовищем, де автоматизовані платформи повинні миттєво реагувати на зовнішні фактори. Класичні навігаційні рішення, що спираються на єдине джерело даних, демонструють недостатню надійність. Супутникові системи втрачають працездатність всередині будівель та у щільній міській забудові. Інерційні вимірювачі схильні до накопичення похибок внаслідок інструментального зсуву. Методи на основі оптичних та лазерних датчиків потребують суттєвих обчислювальних потужностей та залежать від умов зовнішнього освітлення.

У контексті прогресу технологій IoT, розподілених обчислень та інтелектуальних систем, автоматизовані навігаційні комплекси для мобільної робототехніки стають критично важливими. Такі рішення дають змогу агрегувати та опрацьовувати масиви інформації від різномірних вимірювальних пристроїв, синтезувати їх у єдину навігаційну картину через технології злиття даних, а також представляти результати у зручному веб-форматі з можливістю перегляду історії маршрутів. Подібний підхід забезпечує підвищену точність визначення координат, уможливорює дистанційний контроль над роботизованою платформою та створює передумови для інтеграції з сучасними системами управління.

Мета роботи підвищення точності визначення положення безпілотного наземного мобільного робота шляхом розробки та впровадження автоматизованого модуля локалізації з інтеграцією даних різнотипних сенсорів на основі Extended Kalman Filter та візуалізацією траєкторії руху у реальному часі.

Об'єкт дослідження – процес локалізації безпілотного наземного мобільного робота.

Предмет дослідження – методи та алгоритми визначення положення мобільного робота на основі багатосенсорної інтеграції даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз наявних навігаційних технологій для мобільної робототехніки з виявленням їхніх сильних та слабких сторін;
- аргументувати застосування методології злиття сенсорних даних через розширений фільтр Калмана для комбінування інформації від супутникових та інерційних пристроїв;
- спроектувати багаторівневу структуру навігаційної системи з інтеграцією апаратних елементів, обчислювальних процедур та хмарної інфраструктури;
- втілити фізичний навігаційний модуль на основі мікропроцесорної платформи ESP32 з підключенням супутникового приймача та інерційного блоку;
- створити програмну реалізацію для мікроконтролера з впровадженням математичного алгоритму розширеного фільтра Калмана та механізму передачі інформації на IoT-платформу;
- розробити веб-орієнтований інтерфейс для графічного представлення положення транспортного засобу на картографічній основі з функцією перегляду історії маршрутів та аналітики телеметричних даних;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи

здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [2].

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз вимог технічного завдання

У сучасних умовах автономні наземні мобільні роботи активно застосовуються у логістичних системах, на складах, у сільському господарстві, промисловості та для виконання моніторингових задач. Проте однією з найскладніших технічних проблем залишається точне визначення їхнього положення на карті місцевості.

Сучасні системи навігації, що базуються лише на супутникових даних GPS/GNSS, часто демонструють низьку точність у міських умовах або в приміщеннях, де сигнал супутників частково або повністю втрачається. Це призводить до значних похибок позиціонування, що робить неможливим точне керування рухом робота.

Інерційні системи (IMU) також мають обмеження – похибка їхніх вимірювань накопичується з часом, що призводить до поступового відхилення оціненого положення від реального.

Візуальні або лідарні методи (SLAM, Visual Odometry) забезпечують високу точність у локальному просторі, але вимагають значних обчислювальних ресурсів та є чутливими до освітлення та перешкод.

Таким чином, у реальних умовах жоден окремий метод локалізації не забезпечує необхідного рівня точності, стабільності та швидкодії. Це створює потребу у розробці комбінованого та оптимізованого підходу, який об'єднує інформацію з різних сенсорів (GPS, IMU, Lidar, камери) та здатний адаптуватися до змін умов середовища.

Метою проєкту є підвищення точності визначення положення безпілотного наземного мобільного робота (БНМБ) шляхом розробки та

впровадження автоматизованого модуля локалізації з інтеграцією даних різнотипних сенсорів та візуалізацією траєкторії руху у реальному часі.

Задачі, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:

- розробити алгоритм, що забезпечить визначення положення робота на основі даних із сенсорів;
- реалізувати оптимізаційний підхід для зменшення похибки оцінки координат;
- забезпечити можливість побудови та оновлення карти місцевості під час руху робота;
- створити програмний модуль, який інтегрується з платформою мобільного робота;
- провести експериментальні або симуляційні випробування для перевірки точності та стабільності роботи оптимізованого методу;
- виконати порівняльний аналіз із базовими алгоритмами локалізації для підтвердження переваг розробленого рішення.

Вимоги до розроблюваного методу та модуля локалізації:

- система повинна забезпечувати високу точність позиціонування робота на карті місцевості, з мінімальною середньоквадратичною похибкою;
- метод повинен бути стійким до шумів, втрат окремих вимірювань або зміни умов навколишнього середовища;
- алгоритм має працювати в режимі реального часу;
- модуль повинен підтримувати інтеграцію з різними типами апаратних платформ і сенсорів, використовуючи стандартизовані інтерфейси передачі даних;
- забезпечити зручний інтерфейс взаємодії або візуалізації результатів роботи;
- гарантувати стабільну та безперебійну роботу системи протягом тривалого часу експлуатації.

1.2 Аналіз методів відстеження місцезнаходження

Підходи до визначення положення наземного робота можна класифікувати за типом джерела інформації:

- супутникові методи;
- радіомаякові методи;
- інерційні методи;
- лідарні методи;
- візуальні методи;
- комбіновані методи.

Одним із найпоширеніших підходів до визначення положення мобільних роботів є використання супутникових систем позиціонування. За це відповідає глобальна навігаційна супутникова система (GNSS).

GNSS складається з сузір'я супутників, що обертаються навколо Землі за дуже специфічними траєкторіями. За оцінками, для глобального покриття сузір'ю потрібно від 18 до 30 супутників.

Навігаційні супутники надають інформацію про орбіту та точний час (та інші послуги) радіоприймачам, спеціально розробленим для прийому цих супутникових сигналів та декодування вмісту сигнальних повідомлень. За допомогою вмісту повідомлень щонайменше від чотирьох «видимих» супутників, положення на більшій частині поверхні Землі або поблизу неї можна розрахувати за допомогою математичного процесу, відомого як трилатерація.

GNSS часто узагальнено називають GPS (Глобальна система позиціонування), але ця аббревіатура насправді стосується сузір'я Сполучених Штатів (рис. 1.1). Існує кілька сузір'їв GNSS, що надаються урядами різних країн світу, зокрема:

- BeiDou – Китай;
- Galileo – Європейський Союз;
- GLONASS – Росія;

– GPS – Сполучені Штати.

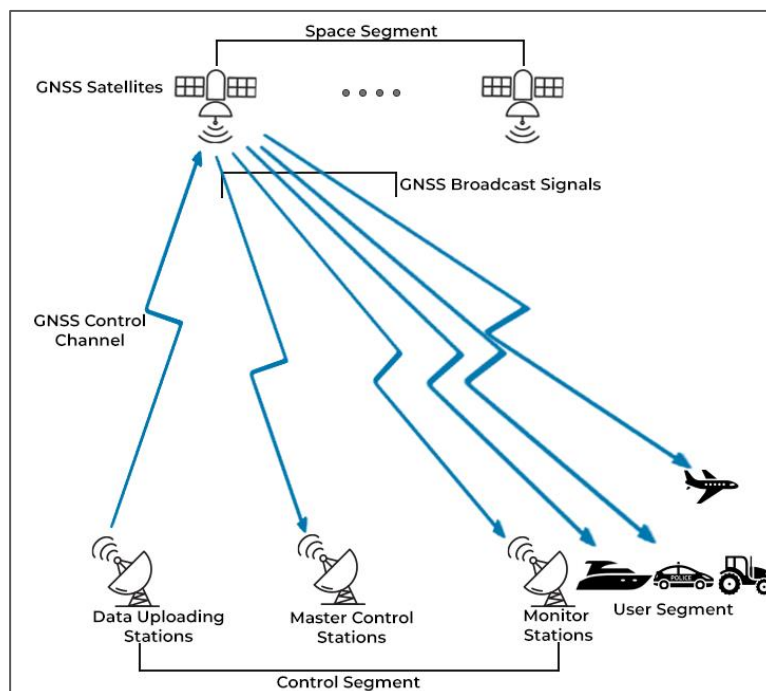


Рисунок 1.1 – Візуальна робота GNSS [3]

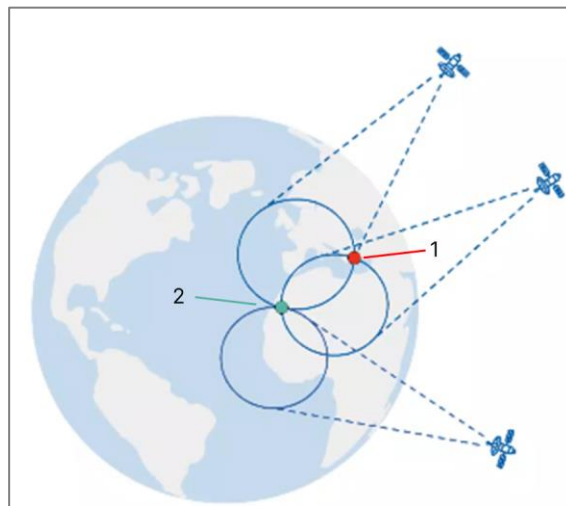
Навколо Землі обертається кілька сузір'їв супутників GNSS. Кожне з них надає дані для позиціонування в різних континентальних районах.

Сьогодні більшість приймачів GNSS можуть приймати та декодувати сигнали одночасно від кількох сузір'їв супутників. Це означає, що їх можна використовувати глобально для негайного розгортання та забезпечити ширше застосування, ніж приймачі, обмежені одним сузір'ям GNSS. Використання сузір'їв GNSS для визначення положення базується на принципі трилатерації.

Трилатерація відрізняється від триангуляції тим, що вона використовує пряме вимірювання відстані від кількох точок для визначення місцезнаходження, тоді як триангуляція вимірює кути від фіксованих точок, які сходяться для визначення місцезнаходження.

Приймач GNSS використовує трилатерацію (рис. 1.2) для обчислення свого місцезнаходження на Землі на основі відстані приймача від кількох супутників.

Сигнал від одного супутника забезпечує загальне розташування точки по периметру круглої області, яка охоплює приблизно 35% поверхні Землі – величезну площу. Розташування знаходиться не в межах зони покриття, а на периметрі, оскільки відстань до супутника є відомою довжиною, і будь-де всередині периметра буде інша, менша відстань. Коли видно другий супутник, покриття цього супутника перекриватиме частину покриття першого супутника. Це означає, що приймач GNSS знаходиться в одній з двох точок перетину периметрів зон покриття. Коли видно третій супутник, точка перетину всіх трьох периметрів зони покриття буде розташуванням приймача GNSS. Тобто, це точне двовимірне (координати довгота – X та широта – Y) положення приймача GNSS на поверхні Землі. Коли видно четвертий супутник, висоту або абсолютну висоту можна визначити за допомогою тригонометрії, використовуючи координату X - Y та додаткову «лінію» до четвертого супутника (можна сказати, що чим менша ця відстань, тим вища висота). Приймач GNSS тепер має тривимірне визначення місцезнаходження, тобто координати X - Y плюс висота/піднесення (Z). Чим більше супутників видно, тим легше визначити місцезнаходження з підвищеною точністю [4].



1 – невірна координата; 2 – вірна координата

Рисунок 1.2 – Зображення роботи трилатерації [4]

В умовах приміщень або закритих просторів, де супутникові системи позиціонування (GPS/GNSS) недоступні або неточні, ефективним підходом до локалізації мобільного робота є використання сигналів від бездротових передавачів. Серед таких джерел найпоширеніші – Wi-Fi точки доступу та Bluetooth-маячки. Цей клас методів відомий як радіомаякова локалізація (Radio-based Localization). Wi-Fi та Bluetooth – це радіосигнали, які можна використовувати для з'єднання різних пристроїв між собою. Підключений маршрутизатор надсилає сигнали на пристрої поблизу. Для свого сигналу Wi-Fi використовує діапазони частот 2,4 ГГц або 5 ГГц. Методи позиціонування в приміщенні на основі Wi-Fi забезпечують низку переваг, включаючи низьку вартість, повсюдну доступність інфраструктури та можливість оновлення місцезнаходження в режимі реального часу. Оскільки сигнали Wi-Fi можуть проходити крізь стіни та інші перешкоди, точна локалізація в приміщенні все ще досяжна, навіть за відсутності прямої видимості. Однак пристрої на базі Wi-Fi можуть втрачати точність через зовнішні змінні, включаючи ослаблення сигналу та перешкоди. Крім того, необхідність кількох точок доступу для покриття великої області може ускладнити їх розгортання та обслуговування. Зрештою, зміни фізичного оточення або налаштувань мережі можуть вплинути на точність оцінки місцезнаходження на основі Wi-Fi (рис. 1.3) [5].

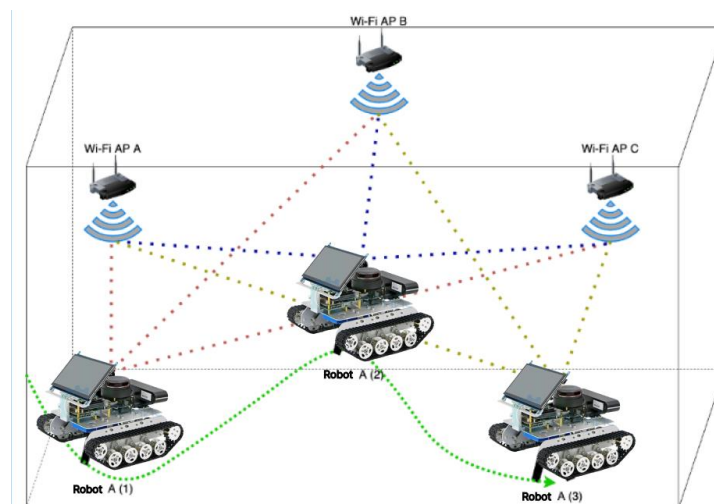


Рисунок 1.3 – Система позиціонування Wi-fi

Для роботи з неймовірно низькими рівнями енергоспоживання були розроблені радіостанції Bluetooth Low-Energy (LE). Передаючи дані по 40 каналах у неліцензованому частотному просторі ISM 2,4 ГГц. Крім того, вони підтримують низку топологій зв'язку, включаючи точка-точка, ширококомунікаційна, останнім часом, mesh-мережі, що дозволяє технології Bluetooth сприяти створенню надійних, розгалужених мереж пристроїв. Bluetooth Low Energy зараз широко використовується в Інтернеті речей та індустрії бізнес-реклами. Bluetooth LE є найкращим варіантом для довговічних пристроїв, яким потрібно лише зрідка передавати невеликі обсяги даних, оскільки він уповільнює передачу даних і використовує від 0,01 до 0,5 Вт потужності.

Іншим важливим класом методів є інерціальна навігаційна система, широко відома як INS, – це електронна система, яка використовує різноманітні датчики навколишнього середовища, здатні виявляти та вимірювати зміну руху об'єкта. Використовуючи дані датчиків, інерціальна навігаційна система може визначити положення транспортного засобу або об'єкта відносно його початкової точки – це називається відліком місця.

Існує кілька типів датчиків, що використовуються в інерціальних навігаційних системах, проте два основних типи – це акселерометри та гіроскопи (рис. 1.4).

Акселерометри можуть вимірювати зміни лінійної швидкості. Оскільки більшість об'єктів можуть рухатися в тривимірному просторі, типово використовувати три акселерометри, встановлені ортогонально; тобто вісь кожного акселерометра знаходиться під кутом 90° до інших. Зазвичай їм надають позначки: вісь X, вісь Y та вісь Z.

Гіроскопи вимірюють швидкість обертання, і знову ж таки, оскільки більшість об'єктів можуть вільно обертатися в тривимірному просторі, типовим є використання трьох осей гіроскопа. Вони також встановлені на об'єкті ортогонально та максимально вирівняні з трьома осями акселерометра [6].

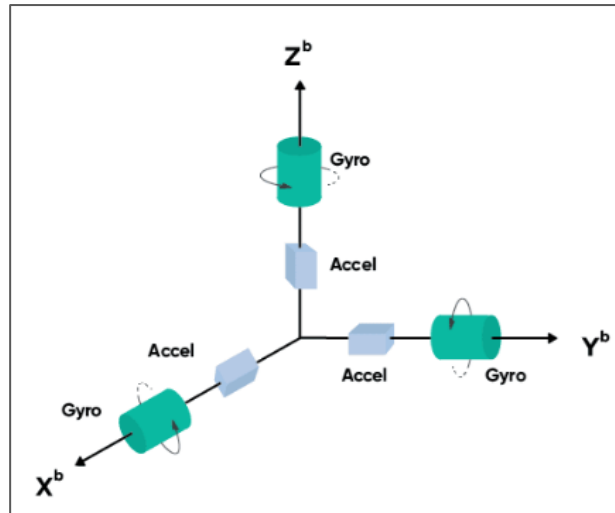


Рисунок 1.4 – Зображення акселерометрів та гіроскопів за трьома осями руху [6]

У багатьох сучасних інерційних системах навігації інерційні вимірювання виконуються модулем, відомим як інерційний вимірювальний блок (IMU), іноді також званим інерціальним опорним блоком (IRU) або опорним блоком руху (MRU). IMU видає необроблені дані про рух, які використовуються іншими компонентами IMU, як правило, спільно з GNSS і, можливо, іншими датчиками. Перевагою інерційного підходу є повна автономність, оскільки для його роботи не потрібні зовнішні джерела сигналів, а також висока частота оновлення даних, що важливо для динамічних систем.

Водночас основним недоліком є накопичення похибки (дрейф) унаслідок інтегрування шумів сенсорів, що призводить до поступового спотворення оцінки положення (рис. 1.5).

Тому інерційні системи зазвичай використовуються у поєднанні з іншими джерелами інформації для підвищення стабільності локалізації.

Сучасним і високоточним підходом є використання лідарів – пристроїв, що вимірюють відстані до об'єктів за допомогою лазерних імпульсів. На основі отриманих даних формується карта навколишнього середовища, яка використовується для одночасної локалізації та побудови карти (SLAM).

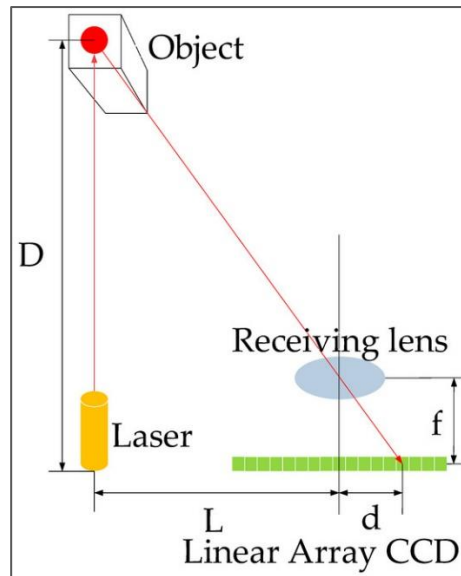


Рисунок 1.5 – Принцип вимірювання трикутної відстані [7]

Основна перевага лідарних методів полягає у високій точності визначення положення та стійкості до умов освітлення, що робить їх ефективними для роботи як у приміщеннях, так і на відкритій місцевості.

До недоліків відносять високу вартість сенсорів, а також значні обчислювальні ресурси, необхідні для обробки хмар точок у реальному часі.

Попри це, лідарні системи часто використовуються у промислових та наукових роботах, де потрібна сантиметрова точність локалізації.

Окрему групу складають візуальні методи, що використовують камери (моно, стерео або RGB-D) для аналізу зображень навколишнього середовища.

Візуальна одометрія (VO) визначається як процес оцінки руху робота (переміщення та обертання відносно системи відліку) шляхом спостереження за послідовністю зображень його середовища. VO є окремим випадком методики, відомої як Structure From Motion (SFM), яка вирішує проблему 3D-реконструкції як структури середовища, так і поз камери з послідовно впорядкованих або невпорядкованих наборів зображень [8]. Алгоритм відстежує зміни у видимих особливостях сцени – так званих ключових точках (features), таких як кути, контури або текстуровані області.

Visual Odometry забезпечує високу відносну точність на коротких відстанях, однак не формує глобальної карти середовища. Тому з часом у результаті накопичення похибок може виникати дрейф позиції, що обмежує її використання для довготривалих місій без додаткової корекції (рис. 1.6).

Метод Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) є розвитком і розширенням VO.

SLAM – це не якийсь конкретний алгоритм, а набір методів і різноманітних засобів, що допомагають виконувати завдання щодо визначення місця розташування робота та побудови карти місцевості [9].

Це дозволяє роботу запам'ятовувати побачені об'єкти, повертатися до них і використовувати для корекції накопичених похибок – процес, відомий як loop closure (замикаюча петля).

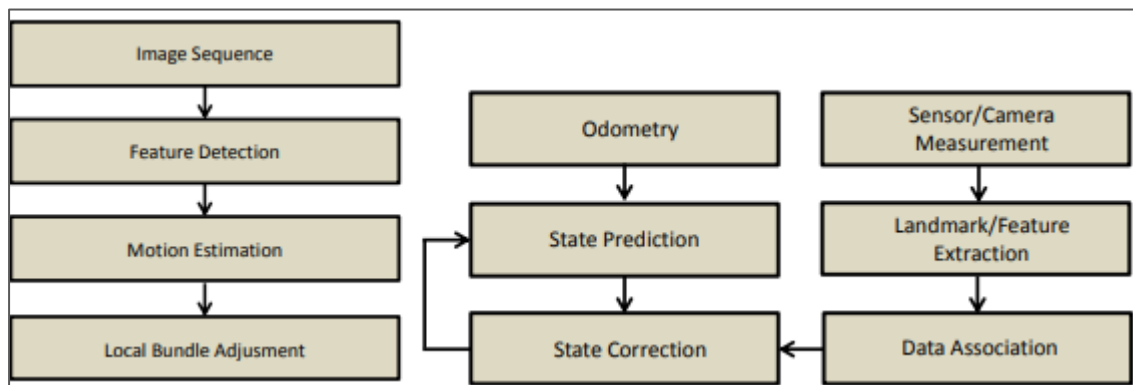


Рисунок 1.6 – Блок-схема, що показує компоненти VO системи SLAM [10]

З метою підвищення точності та надійності локалізації широко використовуються комбіновані методи, що поєднують кілька різних типів сенсорів.

Такі системи, відомі як Sensor Fusion, дозволяють компенсувати недоліки окремих методів: наприклад, об'єднання GPS і IMU дає змогу зменшити дрейф інерційних даних, тоді як інтеграція LiDAR і камери покращує сприйняття середовища.

Для інтеграції інформації зазвичай застосовуються фільтри Калмана (Kalman Filter), розширений фільтр Калмана (ЕКФ), Unscented Kalman Filter (UKF) або частинковий фільтр (Particle Filter).

Такі алгоритми забезпечують оптимальну оцінку положення на основі статистичного аналізу шумів сенсорів і моделі руху.

Комбінований підхід (рис. 1.7) дозволяє досягти високої точності, стійкості до завад та забезпечує баланс між точністю та обчислювальною складністю, що робить його найбільш придатним для реалізації в системах локалізації безпілотних наземних роботів (табл. 1.1).

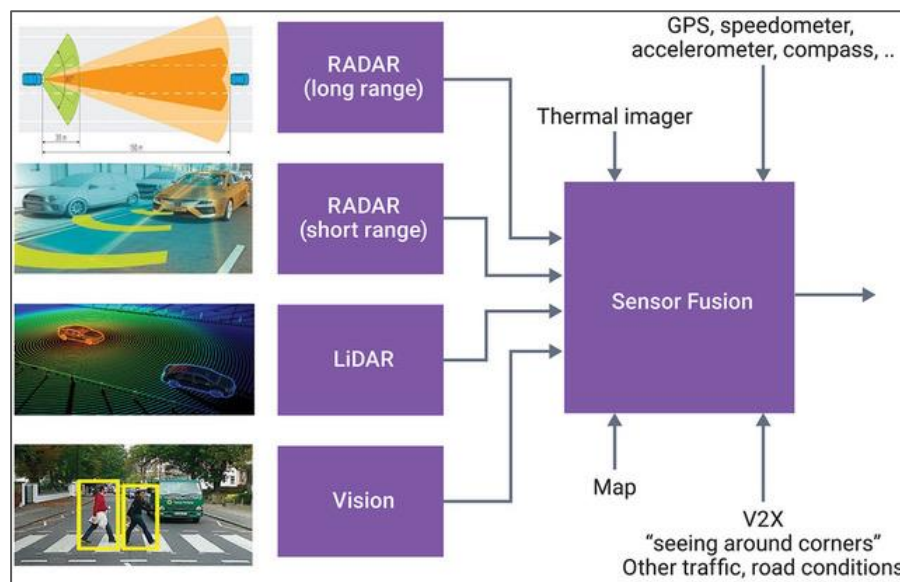


Рисунок 1.7 – Зображення використання комбінованого підходу [11]

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів локалізації наземних мобільних роботів

Метод локалізації	Середня точність	Робота в приміщенні	Реакція в реальному часі	Вартість	Основні переваги
GPS / GNSS	2-3 м	✗	✓	Середня	Простота, глобальність
IMU / одометрія	0,1-0,5 м	✓	✓	Низька	Автономність, простота

Продовження таблиці 1.1

Метод локалізації	Середня точність	Робота в приміщенні	Реакція в реальному часі	Вартість	Основні переваги
Lidar SLAM	0,02-0,1 м	✓	✓	Висока	Висока точність
Visual SLAM	0,05-0,2 м	✓	✓	Середня	Низька вартість, деталізація
Wi-Fi / Bluetooth	0,5-2 м	✓	✓	Низька	Простота впровадження
Комбінований	0,02-0,1 м	✓	✓	Середня	Баланс точності і стійкості

Для безпілотного наземного мобільного робота колісного типу найдоцільніше застосування комбінованого методу локалізації, який об'єднує дані з GPS, IMU та візуальних сенсорів. Такий підхід забезпечує компроміс між точністю, стабільністю та обчислювальними вимогами.

Лідарна або візуальна інформація може слугувати корекцією для інерційних та супутникових даних, що дозволяє уникнути накопичення похибок і забезпечити роботу системи у реальному часі в будь-яких умовах.

1.3 Інтеграція сервісу з мобільним роботом

У сучасних системах керування безпілотними мобільними роботами все більшого поширення набуває підхід, заснований на використанні хмарних обчислень. Хмарні сервіси дають змогу не лише забезпечити віддалену обробку та збереження даних, але й спростити масштабування системи, що особливо актуально для завдань моніторингу, аналізу та керування кількома роботами одночасно. Основна ідея хмарної робототехніки полягає в тому, що, як правило, робот взаємодіє зі своїм середовищем за допомогою своїх датчиків та виконавчих механізмів. Фактично це означає, що дані, отримані від датчиків,

повинні бути оброблені та використані для прийняття рішень (як зворотний зв'язок) щодо наступної дії робота. Для завдань, що потребують роботи в режимі реального часу, обробку можна перенести в хмару [12]. Приклад хмарних сервісів для інтеграції системи локалізації мобільного робота:

- Google Firebase;
- InfluxDB Cloud;
- ThingsBoard;
- AWS IoT Core.

Firebase – це хмарна платформа, розроблена компанією Google, що надає набір інструментів для зберігання, обміну даними та автентифікації користувачів у веб- і мобільних застосунках. Основні компоненти:

- Firebase Realtime Database – база даних у реальному часі, яка зберігає дані у форматі JSON (рис 1.8). Робот або сервер можуть відправляти дані про координати, орієнтацію, швидкість тощо через REST API або WebSocket-з'єднання;
- Firebase Cloud Functions – безсерверні обчислення, що дозволяють автоматично виконувати обробку даних, наприклад, фільтрацію координат або обчислення середньої швидкості;
- Firebase Hosting – для розгортання веб-інтерфейсу моніторингу.

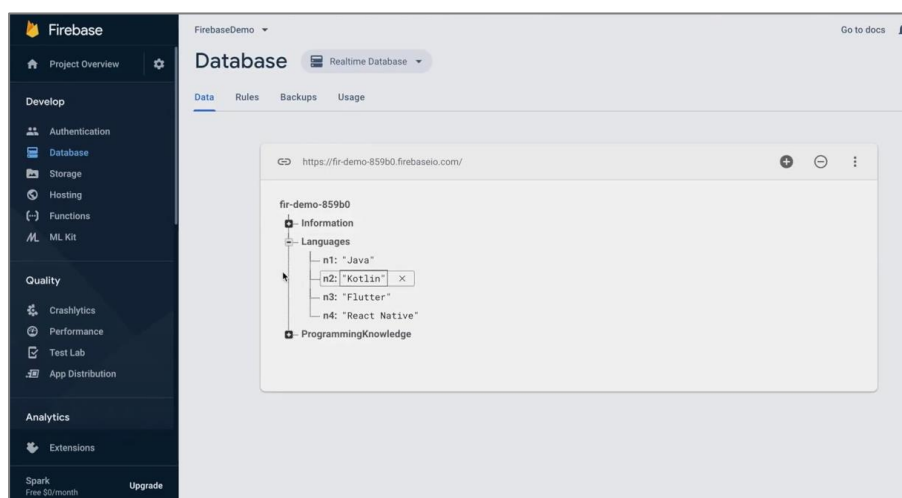


Рисунок 1.8 – Вигляд інтерфейсу сервісу Google Firebase [13]

Для проєктів, у яких важливим є збереження великих обсягів даних із часовими мітками, доцільно застосовувати InfluxDB Cloud – хмарну базу даних часових рядів (рис 1.9).

Такий підхід забезпечує високу швидкість запису потокових даних, що особливо важливо при частих оновленнях координат у процесі руху.

У поєднанні з аналітичною платформою Grafana Cloud можна будувати графіки, діаграми та просторові траєкторії руху робота, що підвищує наочність і аналітичну цінність системи.

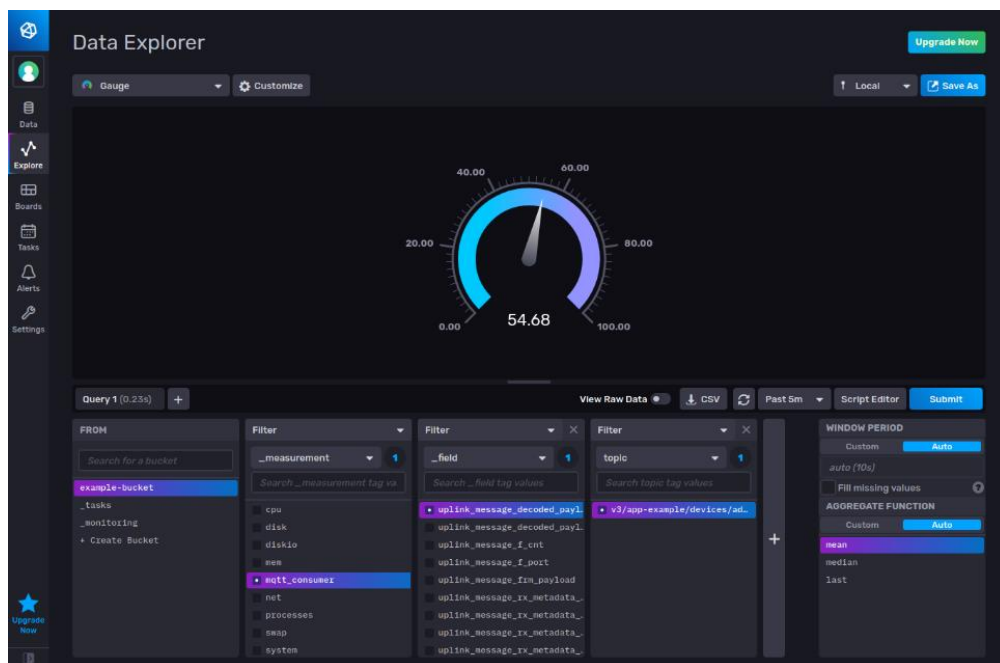


Рисунок 1.9 – Вигляд інтерфейсу сервісу InfluxDB Cloud [14]

Ще одним ефективним рішенням є ThingsBoard – відкрита IoT-платформа (рис 1.10), яка дозволяє інтегрувати робототехнічні системи за допомогою протоколів MQTT, HTTP або CoAP.

У межах даного підходу мобільний робот може передавати до хмари телеметричні дані (координати, швидкість, напрям руху), що зберігаються в системі та відображаються у вигляді інтерактивних дашбордів.

Користувач отримує змогу спостерігати за траєкторією робота на карті, а також переглядати історію переміщень із часовими мітками.

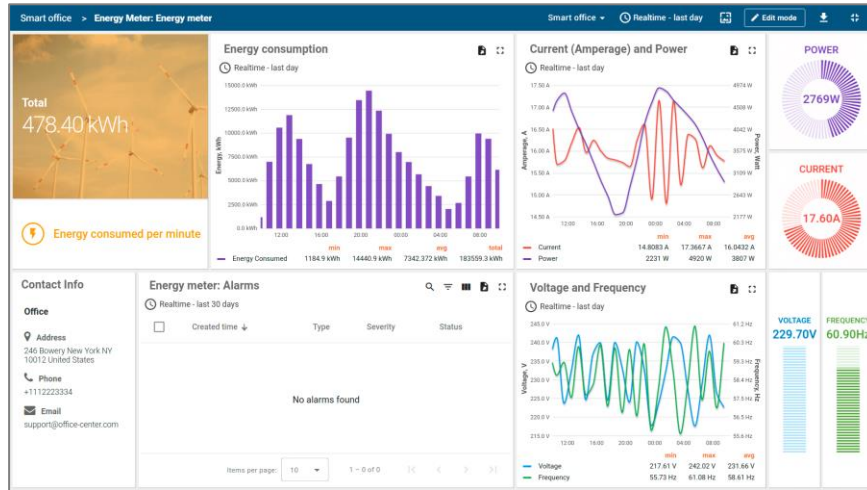


Рисунок 1.10 – Вигляд інтерфейсу сервісу ThingsBoard [15]

У більш масштабних або промислових рішеннях застосовується AWS IoT Core – сервіс екосистеми Amazon Web Services, що підтримує безпечне підключення пристроїв, обробку телеметрії через хмарні функції AWS Lambda та збереження історичних даних у DynamoDB. Такий підхід забезпечує високу надійність, проте потребує складнішого налаштування й фінансових витрат, тому в рамках навчальних систем його зазвичай не використовують (рис 1.11).

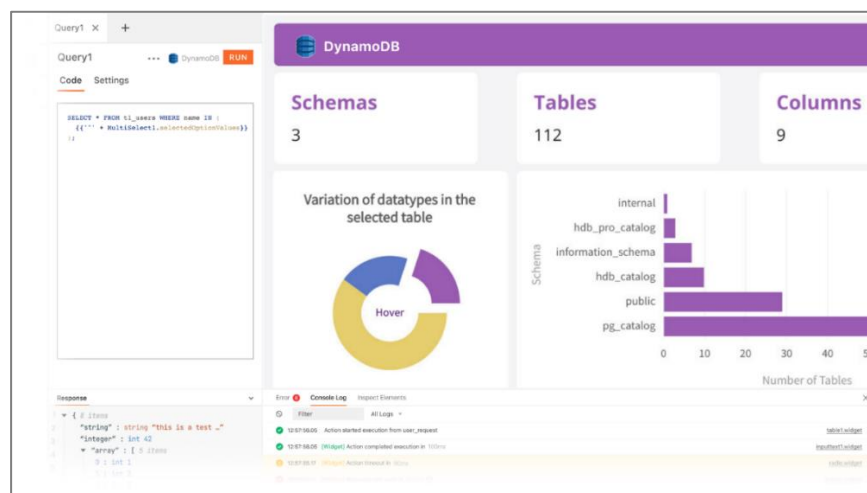


Рисунок 1.11 – Вигляд інтерфейсу сервісу AWS IoT Core [16]

Узагальнюючи, використання хмарних сервісів надає змогу створити веборієнтовану архітектуру системи локалізації мобільного робота, де хмара виконує роль центрального вузла обробки і зберігання даних, а користувач взаємодіє із системою через браузер.

Такий підхід забезпечує гнучкість, масштабованість і незалежність від конкретного апаратного забезпечення, що є важливою перевагою в розробці сучасних безпілотних робототехнічних систем.

1.4 Постановка задач

Після проведеного аналізу технічного завдання, існуючих підходів до визначення положення мобільного робота та розгляду аналогічних рішень, можна сформулювати основні задачі, які необхідно реалізувати в межах цього проєкту.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити алгоритмічний модуль локалізації, який забезпечить визначення положення робота на основі даних із сенсорів з мінімальною похибкою;
- реалізувати комбінований підхід до локалізації шляхом інтеграції даних із кількох джерел з використанням методів фільтрації;
- забезпечити обмін даними між роботом і сервером;
- розробити веб-інтерфейс користувача, що надаватиме можливість відображення карти місцевості, поточного положення робота, траєкторії його руху та історії координат;
- інтегрувати систему з хмарними сервісами для збереження даних, віддаленого доступу та побудови аналітичних візуалізацій;
- провести тестування розробленого модуля у симульованому середовищі та на реальному роботі з метою перевірки точності позиціонування та стійкості роботи системи в динамічних умовах та виконати оцінку отриманих результатів.

2 РОЗРОБКА ОПТИМІЗОВАНОГО МЕТОДУ ВІДСТЕЖЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ БЕЗПІЛОТНОГО НАЗЕМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

2.1 Архітектура системи відстеження

Розроблена система відстеження місцезнаходження безпілотного наземного мобільного робота базується на клієнт-серверній архітектурі з використанням IoT-платформи ThingsBoard для збору та зберігання телеметричних даних. Архітектура системи складається з чотирьох основних рівнів, які забезпечують повний цикл обробки сенсорної інформації від збору даних до візуалізації результатів (рис 2.1).

Перший рівень архітектури – це рівень сенсорів, який включає два основні джерела даних. GPS-приймач забезпечує абсолютне позиціонування робота з частотою оновлення близько одного герца та точністю від двох до двадцяти метрів залежно від умов приймання супутникового сигналу. Інерційний вимірювальний модуль працює з частотою до ста герц і забезпечує відносні вимірювання руху робота через акселерометр та гіроскоп. Така комбінація високочастотних IMU-вимірювань з низькочастотними але точними GPS-даними дозволяє отримати оптимальний баланс між частотою оновлення позиції та точністю визначення координат.

Другий рівень – це рівень обробки даних, де реалізовано Extended Kalman Filter для злиття інформації з GPS та IMU. Основною особливістю цього рівня є застосування розроблених методів оптимізації, які включають адаптивне налаштування матриці шуму процесу на основі поточної швидкості руху, адаптивне налаштування матриці шуму вимірювань з урахуванням точності GPS-сигналу, алгоритм Zero Velocity Update для корекції дрейфу при зупинці робота, а також три режими синхронізації сенсорів для різних сценаріїв

використання. Перед початком роботи система виконує процедуру калібрування ІМУ, під час якої робот повинен бути нерухомим на рівній поверхні протягом збору ста вимірювань для визначення систематичних зміщень сенсорів.

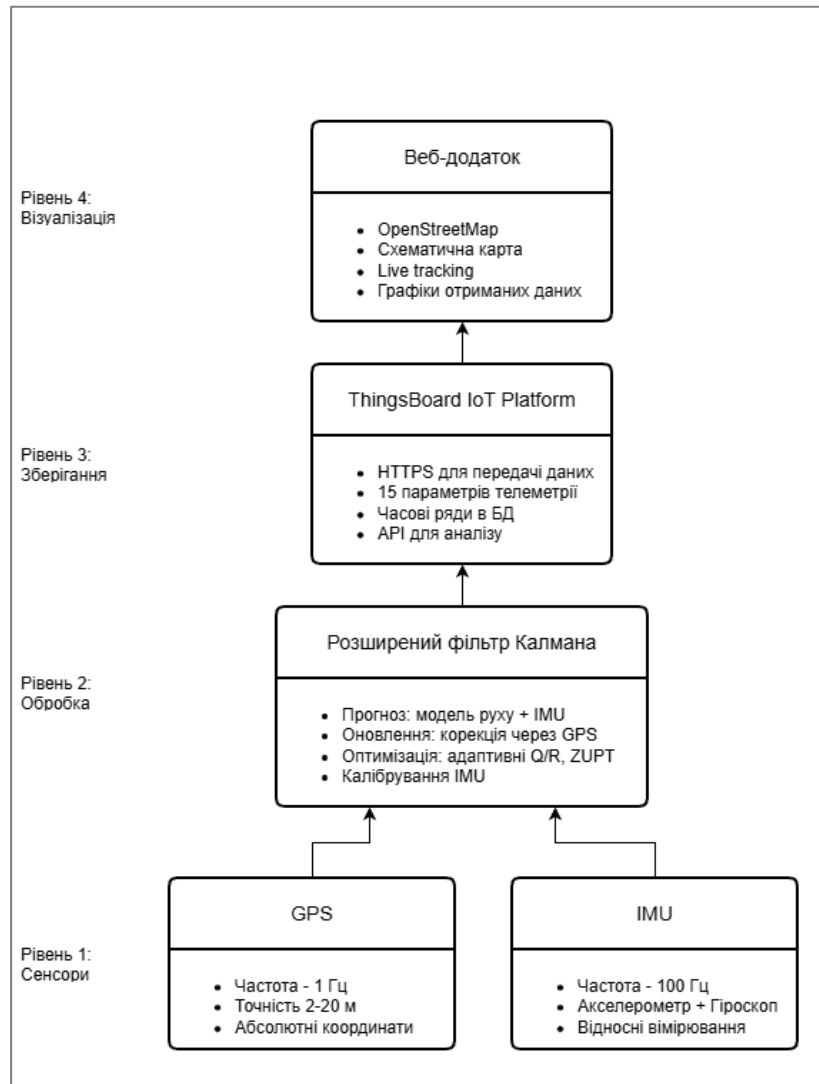


Рисунок 2.1 – Архітектура розробленої системи

Третій рівень архітектури – це рівень зберігання, який використовує ThingsBoard як централізовану IoT-платформу. Система відправляє на платформу пакети телеметричних даних, що містять п'ятнадцять ключових параметрів: мітку часу, координати EKF, координати GPS в локальній системі та географічні координати, компоненти швидкості, дані акселерометра та гіроскопа, а також метрики якості фільтрації. ThingsBoard забезпечує захищений HTTPS

REST API для передачі даних з мобільного пристрою, базу даних для зберігання часових рядів телеметрії та API для ретроспективного аналізу зібраних даних.

Четвертий рівень – це рівень візуалізації, реалізований у вигляді веб-застосунку з використанням технологій HTML5, JavaScript та бібліотек Chart.js для графіків і Leaflet для картографічної візуалізації. Цей рівень забезпечує відображення траєкторії руху на реальній карті OpenStreetMap, схематичне представлення траєкторії з можливістю масштабування, графіки похибок, швидкості та невизначеності в реальному часі, а також інструменти для відтворення записаних траєкторій з регульованою швидкістю. Додатково реалізовано режим аналізу історичних даних з CSV-файлів, що дозволяє проводити детальне дослідження характеристик системи, включаючи побудову гістограм розподілу шуму сенсорів та автоматичне виявлення зупинок роботи.

Модульна архітектура системи забезпечує можливість незалежного тестування та модифікації окремих компонентів. Зокрема, рівень обробки даних може працювати як з реальними сенсорами в режимі реального часу, так і з історичними даними з ThingsBoard для аналізу та налагодження алгоритмів. Така гнучкість архітектури дозволяє використовувати систему як для практичного відстеження мобільного робота, так і для навчальних цілей та дослідження ефективності різних конфігурацій фільтра Калмана.

2.2 Структура телеметричних даних

Телеметричні дані, що передаються на платформу ThingsBoard та зберігаються для подальшого аналізу, організовані у вигляді часового ряду з фіксованою структурою записів. Кожен запис містить п'ятнадцять параметрів, що повністю характеризують стан робота в певний момент часу та якість оцінки його положення.

Перший параметр – це мітка часу у форматі Unix timestamp в мілісекундах, яка забезпечує точну прив'язку всіх вимірювань до абсолютного часу. Наступні

два параметри - координати оцінки Extended Kalman Filter у локальній метричній системі координат, де початок координат встановлюється в точці першого валідного GPS-вимірювання. Координати GPS також представлені у двох форматах: в локальній метричній системі для обчислень похибок та у географічних координатах широти і довготи для відображення на картах.

Компоненти швидкості в системі координат тіла робота зберігаються як два окремі параметри, що дозволяє аналізувати динаміку руху та виявляти зупинки. Дані інерційного вимірювального модуля представлені трьома параметрами: прискорення вздовж осей X та Y у м/с в квадраті після компенсації калібрувального зміщення, а також кутова швидкість навколо вертикальної осі Z у $^{\circ}/с$.

Останні три параметри характеризують якість роботи фільтра. Середньоквадратична похибка обчислюється як евклідова відстань між GPS-вимірюванням та оцінкою ЕКФ і показує миттєву точність визначення положення. Діагональні елементи матриці коваріації відображають статистичну невизначеність оцінки координат робота і використовуються для адаптивного налаштування параметрів фільтра.

Така структура телеметричних даних забезпечує повну відтворюваність траєкторії руху робота та дозволяє проводити детальний аналіз ефективності алгоритму відстеження. Зокрема, наявність як сирих сенсорних вимірювань, так і результатів їх обробки фільтром дозволяє досліджувати характеристики шуму сенсорів, оцінювати збіжність фільтра та порівнювати різні методи оптимізації параметрів Extended Kalman Filter.

2.3 Алгоритм роботи системи

Загальний алгоритм роботи системи відстеження складається з двох основних фаз: фази ініціалізації та фази циклічної обробки даних. Кожна фаза

містить специфічні процедури, оптимізовані для забезпечення високої точності та ефективності обчислень (рис. 2.2).

Фаза ініціалізації виконується один раз при запуску системи і починається з критично важливої процедури калібрування інерційного вимірювального модуля. Під час калібрування робот повинен знаходитися у стані спокою на рівній горизонтальній поверхні. Система збирає сто послідовних вимірювань з акселерометра та гіроскопа, після чого обчислює середні значення, які використовуються як калібрувальні зміщення для компенсації систематичних похибок сенсорів.

Калібрувальне зміщення акселерометра по осі X обчислюється за формулою:

$$a_{x_{avr}} = \frac{\sum_{i=1}^N a_{x_i}}{N} \quad (2.1)$$

де $N = 100$ – кількість калібрувальних вимірювань;

a_{x_i} – і-те вимірювання прискорення по осі X.

Аналогічно обчислюються зміщення для осі Y та вертикальної осі Z, причому для осі Z від середнього значення віднімається стандартне прискорення вільного падіння дев'ять вісімдесят один сотих метра на секунду в квадраті, оскільки акселерометр вимірює власне прискорення тіла разом з гравітацією. Калібрувальне зміщення гіроскопа обчислюється за аналогічною формулою через усереднення ста вимірювань кутової швидкості.

Після завершення калібрування система очікує на перше валідне GPS-вимірювання з точністю менше двадцяти метрів. Це вимірювання встановлюється як початок координат локальної метричної системи координат, що використовується для всіх подальших обчислень положення робота. Початковий стан Extended Kalman Filter встановлюється як нульовий вектор шести елементів, що відповідає нульовій позиції в локальній системі координат,

нульовій орієнтації та нульовим компонентам швидкості. Початкова матриця коваріації встановлюється як одинична матриця розміром шість на шість, що відображає повну невизначеність початкового стану системи.

Після завершення ініціалізації система переходить в режим циклічної обробки сенсорних даних. При надходженні даних з акселерометра та гіроскопа виконується компенсація калібрувального зміщення. Скомпенсоване прискорення по осі X обчислюється за формулою:

$$a_x = a_{x_{raw}} - a_{x_{avr}} \quad (2.2)$$

де $a_{x_{raw}}$ – сире вимірювання акселерометра в метрах на секунду в квадраті.

Після компенсації зміщень система аналізує поточну швидкість та прискорення для визначення стану руху робота. Робот вважається нерухомим, якщо виконується наступна умова:

$$(|a_x| < 0,3) \wedge (|a_y| < 0,3) \wedge (|\omega| < 0,1) \wedge (|V| < 0,1) \quad (2.3)$$

де ω – кутова швидкість;

V – лінійна швидкість;

На основі скомпенсованих вимірювань IMU та визначеного стану руху виконується крок прогнозування Extended Kalman Filter з адаптивно налаштованими параметрами матриці шуму процесу.

Якщо робот виявлено нерухомим, додатково застосовується алгоритм Zero Velocity Update для усунення дрейфу позиції. При надходженні GPS-вимірювання виконується крок корекції фільтра з адаптивною матрицею шуму вимірювань, що враховує поточну точність GPS-сигналу.

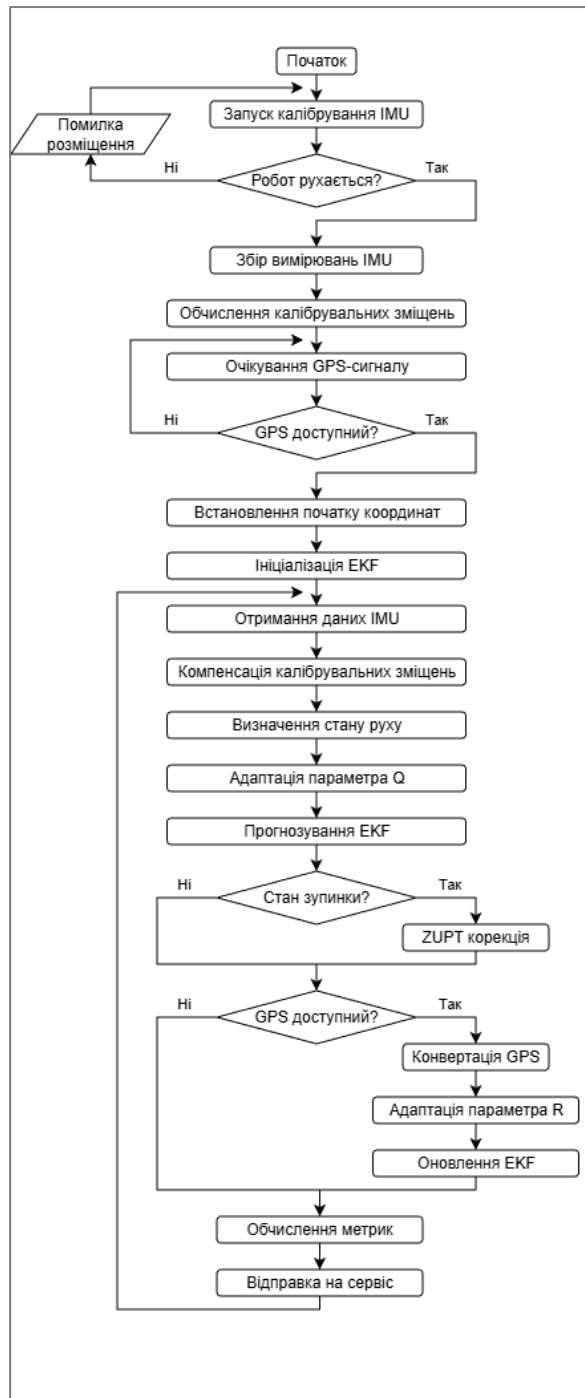


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи системи

Оновлені дані про положення, швидкість та якість оцінки формуються в пакет телеметрії та відправляються на платформу ThingsBoard для зберігання й потім відображаються на картах та графіках у реальному часі. Паралельно ведеться локальний буфер траєкторії обмеженого розміру для забезпечення

плавної візуалізації руху без перевантаження браузера. Цей циклічний процес повторюється протягом всього часу роботи системи відстеження.

Особливістю розробленого алгоритму є наявність трьох режимів синхронізації сенсорів. В асинхронному режимі крок прогнозування ЕКФ виконується на частоті IMU близько п'ятдесяти герц, а крок корекції - при надходженні GPS близько одного герца, що забезпечує найвищу частоту оновлення позиції. В GPS-синхронізованому режимі кроки прогнозування та корекції виконуються одночасно при надходженні GPS на частоті один герц, при цьому IMU-дані накопичуються в буфері і усереднюються, що найкраще підходить для навчальних цілей. В IMU-синхронізованому режимі прогнозування виконується на фіксованій частоті десять герц з усередненням IMU-даних, що є оптимальним балансом для практичного застосування.

2.4 Протокол взаємодії компонентів системи

Система відстеження використовує стандартні протоколи для забезпечення взаємодії між компонентами та сумісності з існуючими IoT-платформами.

Взаємодія з IoT-платформою ThingsBoard здійснюється через захищений протокол HTTPS з використанням методу POST для відправки телеметричних даних. Запит відправляється на endpoint, який формується з базової URL-адреси платформи, API-версії та токена доступу пристрою. Формат запиту має наступний вигляд: `POST https://{URL}/api/v1/{ACCESS_TOKEN}/telemetry`. URL – доменне ім'я або IP-адреса сервера ThingsBoard, а ACCESS_TOKEN – унікальний ідентифікатор пристрою для автентифікації.

Для отримання історичних даних використовується метод GET з параметрами запиту, що специфікують перелік ключів телеметрії через кому, початкову мітку часу в мілісекундах Unix epoch та кінцеву мітку часу: `GET https://{TB_URL}/api/v1/{ACCESS_TOKEN}/telemetry?keys={KEYS}&startTs={START}&endTs={END}`. KEYS – список ключів телеметрії через кому, START та

END – мітки часу початку та кінця періоду запиту. ThingsBoard повертає JSON-об'єкт, де кожен ключ телеметрії відповідає масиву об'єктів з полями timestamp та value, впорядкованих за часом. Така структура дозволяє ефективно отримувати часові ряди будь-якої тривалості для подальшого аналізу в режимі реального часу та в інший момент.

Протокол HTTPS обраний як основний для забезпечення конфіденційності та цілісності даних під час передачі через відкриті мережі. HTTPS використовує шифрування TLS для захисту телеметричних даних від перехоплення та підміни. Альтернативою міг би бути протокол MQTT для більш ефективної передачі даних в реальному часі з меншими накладними витратами, однак для даного застосування з частотою передачі близько одного герца використання HTTPS є оптимальним балансом між безпекою та простотою реалізації в браузерному середовищі.

2.5 Математичні моделі

Extended Kalman Filter (ЕКФ) є основним алгоритмом злиття сенсорних даних в розробленій системі. Даний розділ описує повну математичну модель ЕКФ, адаптовану для задачі відстеження наземного мобільного робота.

Стан системи в кожен момент часу повністю описується шестивимірним вектором, який містить як кінематичні характеристики положення робота, так і його динамічні характеристики руху. Вектор стану має наступний вигляд:

$$\vec{x} = [x, y, \theta, V_x, V_y, \omega]^T \quad (2.4)$$

де x – координата робота вздовж осі X;

y – координата робота вздовж осі Y;

θ – кут орієнтації робота відносно осі X;

V_x – швидкості вздовж поздовжньої осі тіла робота;

V_y – швидкості вздовж поперечної осі тіла робота;

ω – кутова швидкість обертання робота навколо вертикальної осі;

T – операція транспонування вектора.

Вибір системи координат тіла для компонент швидкості забезпечує природну інтеграцію даних акселерометра, який вимірює прискорення саме в системі координат пристрою, та спрощує моделювання динаміки руху наземного робота.

Координати положення залишаються в глобальній системі для спрощення інтеграції GPS-вимірювань та візуалізації траєкторії.

Прогнозування стану виконується на основі моделі руху наземного робота та вимірювань інерційного модуля.

Нелінійна модель еволюції стану описується функцією:

$$x_{k+1} = f(\vec{x}_k, \vec{u}_k, \Delta t) \quad (2.5)$$

де \vec{x}_k – вектор стану в момент часу k ;

\vec{u}_k – вектор управляючих впливів або вимірювань IMU в момент k ;

Δt – інтервал часу між послідовними вимірюваннями.

Функція f задається системою диференціальних рівнянь, які описують кінематику та спрощену динаміку наземного мобільного робота.

Прогнозування координат виконується за формулами (2.3)-(2.4).

Ці тригонометричні функції забезпечують перетворення швидкості з системи координат тіла в глобальну систему координат.

$$x_{k+1} = x_k + (V_x \cos \theta - V_y \sin \theta) \Delta t \quad (2.6)$$

$$y_{k+1} = y_k + (V_x \sin \theta + V_y \cos \theta) \Delta t \quad (2.7)$$

Прогнозування орієнтації робота виконується за формулою:

$$\theta_{k+1} = y\theta_k + \omega\Delta t \quad (2.8)$$

Прогнозування швидкостей включає як інтегрування прискорень, так і демпфування для врахування тертя:

$$V_{x_{k+1}} = \alpha V_{x_k} + \alpha_x \Delta t \quad (2.9)$$

де α – коефіцієнт демпфування швидкості, що моделює втрати енергії через тертя та опір повітря;

α_x – виміряне акселерометром прискорення вздовж осі X після компенсації калібрувального зміщення.

Кутова швидкість оновлюється безпосередньо з вимірювання гіроскопа без інтегрування:

$$\omega_{k+1} = \omega_k \quad (2.10)$$

Для лінеаризації нелінійної моделі обчислюється матриця Якобіана функції f відносно вектора стану, яка має розмір шість на шість і містить частинні похідні кожного елемента функції за кожним елементом стану. Матриця Якобіана використовується для прогнозування коваріації за формулою:

$$P_{k+1|k} = F_k P_k F_k^T + Q_k \quad (2.11)$$

де F_k – матриця Якобіана функції моделі процесу в момент k ;

P_k – матриця коваріації оцінки стану розміром шість на шість в момент k ;

F_k^T – транспонована матриця Якобіана;

Q_k – матриця коваріації шуму процесу.

Коли отримано GPS-вимірювання координат робота, виконується крок корекції для оновлення оцінки стану з урахуванням нової інформації. Модель вимірювань є лінійною, оскільки GPS безпосередньо вимірює координати робота, тоді двовимірний вектор GPS-вимірювань координат в метрах в локальній системі координат буде розраховуватися за формулою:

$$\vec{z}_k = Hx_k + \vec{v}_x \quad (2.12)$$

де H – матриця спостереження розміром два на шість, що проектує шестивимірний вектор стану на двовимірний простір вимірювань;

\vec{v}_x – двовимірний вектор шуму вимірювань з нульовим математичним сподіванням та матрицею коваріації R_k .

Матриця спостереження, що вибирає лише перші два елементи вектора стану, які відповідають координатам x та y матиме вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Обчислення інновації виконується за допомогою різниці між виміряними та прогнозованими координатами:

$$\vec{y}_k = \vec{z}_k - H\hat{x}_k|_{k-1} \quad (2.14)$$

де $\hat{x}_k|_{k-1}$ – прогнозований вектор стану.

Коваріація інновації обчислюється за формулою:

$$S_k = HP_k|_{k-1}H^T + R_k \quad (2.15)$$

де R_k – матриця коваріації шуму GPS-вимірювань.

Коефіцієнт підсилення Калмана обчислюється як:

$$K_k = P_k|_{k-1} H^T S_k^{-1} \quad (2.16)$$

де S_k^{-1} – обернена матриця коваріації інновації.

Коефіцієнт підсилення визначає ступінь довіри до вимірювання відносно прогнозу. Далі виконується оновлення оцінки стану за формулою:

$$\hat{x}_k|_k = \hat{x}_k|_{k-1} + K_k \vec{y}_k \quad (2.17)$$

Наостанок потрібно зробити оновлення матриці коваріації:

$$P_k|_k = (I - K_k H) P_k|_{k-1} \quad (2.18)$$

де I – одинична матриця розміром шість на шість.

Оновлена матриця коваріації відображає зменшення невизначеності оцінки після отримання нової інформації з GPS-вимірювання.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ РОБОТИ

3.1 Реалізація модуля локалізації

Для реалізації системи локалізації безпілотного наземного мобільного робота було обрано сучасні апаратні компоненти, що забезпечують оптимальне співвідношення ціни, продуктивності та функціональності. Вибір компонентів базувався на аналізі технічних характеристик, доступності на ринку та сумісності з розробленими алгоритмами sensor fusion.

Основним обчислювальним модулем системи обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32 (рис. 3.1) виробництва Espressif Systems. Модуль базується на 32-бітному процесорі Xtensa LX6 з двома ядрами та максимальною тактовою частотою 240 МГц.

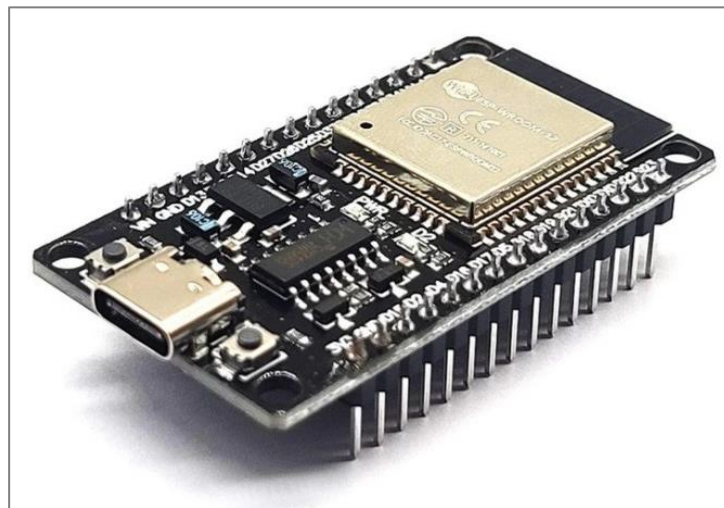


Рисунок 3.1 – Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 [17]

Вибір ESP32-WROOM-32 обґрунтований декількома ключовими факторами (табл. 3.1). По-перше, висока обчислювальна потужність двох ядер по 240 МГц дозволяє паралельно обробляти дані від сенсорів без затримок. Одне ядро може бути виділене для опитування IMU на частоті 50 Гц, тоді як друге

виконує обчислення ЕКФ та відправку даних на сервер. По-друге, вбудований Wi-Fi модуль забезпечує можливість передачі телеметрії на платформу ThingsBoard через HTTPS протокол без необхідності додаткових модулів зв'язку, що спрощує конструкцію та знижує вартість системи. По-третє, низьке енергоспоживання у режимі deep sleep (10 мкА) дозволяє збільшити час автономної роботи до 10-12 годин при використанні Li-Po акумулятора ємністю 2000 mAh.

Широкий набір інтерфейсів забезпечує гнучкість підключення периферії. Підтримка I2C використовується для підключення MPU6500, а UART для GPS модуля NEO-6M, при цьому не потрібні додаткові перетворювачі рівнів напруги. Доступність та низька вартість (3\$) роблять ESP32 економічно ефективним рішенням для прототипування. Велика спільнота розробників забезпечує наявність численних бібліотек для Arduino IDE, таких як TinyGPS++ для парсингу NMEA протоколу, MPU6050 library для роботи з IMU, та HTTPS Redirect для безпечної передачі даних.

Таблиця 3.1 – Порівняння мікроконтролерів

Параметр	ESP32-WROOM-32	Arduino Uno	Raspberry Pi Zero W
Частота	240 МГц	16 МГц	1 МГц
RAM	520 KB	2 KB	512 MB
Wi-Fi	Так	Ні	Так
Споживання	160 мА	50 мА	180 мА
Вартість	4 \$	3 \$	15 \$

Arduino Uno має недостатню обчислювальну потужність для виконання матричних операцій ЕКФ та відсутній вбудований Wi-Fi модуль. Raspberry Pi Zero W надмірно потужний для даної задачі, споживає більше енергії та має вищу вартість. ESP32 забезпечує оптимальний баланс продуктивності, функціональності та ціни для системи локалізації мобільного робота.

Для визначення абсолютних координат обрано GPS модуль NEO-6M виробництва u-blox (рис. 3.2). Модуль є одним з найпопулярніших рішень для робототехніки завдяки балансу точності.

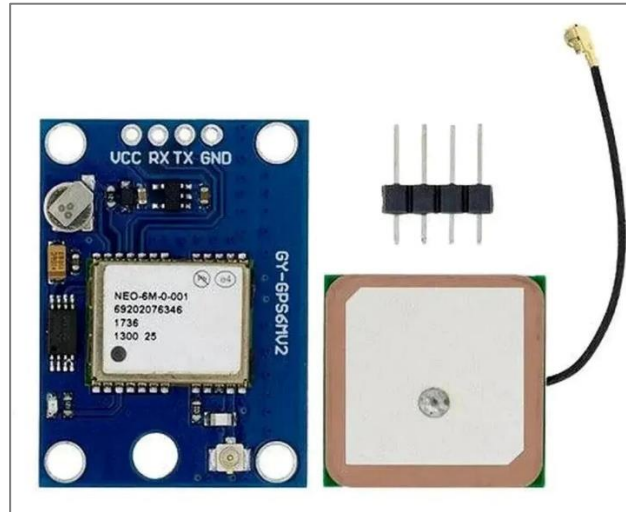


Рисунок 3.2 – GPS модуль NEO-6M [18]

Точність 2.5 м CEP відповідає вимогам для локалізації мобільного робота на відкритій місцевості. Частота оновлення 1 Гц достатня для GPS корекції у алгоритмі EKF при швидкості руху до 5 м/с. UART інтерфейс безпосередньо підключається до ESP32 через GPIO16 та GPIO17. Протокол NMEA 0183 широко підтримується бібліотекою TinyGPS++, що спрощує парсинг координат. Споживання 45 мА при активному пошуку та 20 мА при tracking дозволяє тривалу автономну роботу. Керамічна патч-антена з вбудованим LNA забезпечує стабільний прийом сигналу навіть при чутливості -161 dBm.

Для вимірювання прискорення та кутової швидкості обрано 6-осьовий MEMS модуль MPU6500 виробництва InvenSense (рис. 3.3). Модуль поставляється на платі GY-6500 з виведеними контактами для підключення через I2C. Роздільна здатність 16-bit забезпечує точні вимірювання, що критично для prediction кроку EKF. Програмовані діапазони дозволяють адаптувати чутливість під динаміку руху. Висока частота дискретизації до 1 кГц дає можливість точно

відслідковувати зміни, у проекті використовується 1 Гц. Низький шум $400 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$ для акселерометра та $0.01 \text{ }^\circ/\text{с}/\sqrt{\text{Гц}}$ для гіроскопа зменшує вплив випадкових похибок. I2C інтерфейс забезпечує просте підключення до ESP32 через GPIO21 та GPIO22. Споживання лише 3.2 мА робить модуль енергоефективним. Доступна вартість 2-5 \$ та широка підтримка бібліотеками роблять MPU6500 оптимальним вибором для системи локалізації. Ці всі датчики мають бути підключеними відповідно до наявних контактів мікроконтролера ESP32-WROOM-32 (табл 3.2).

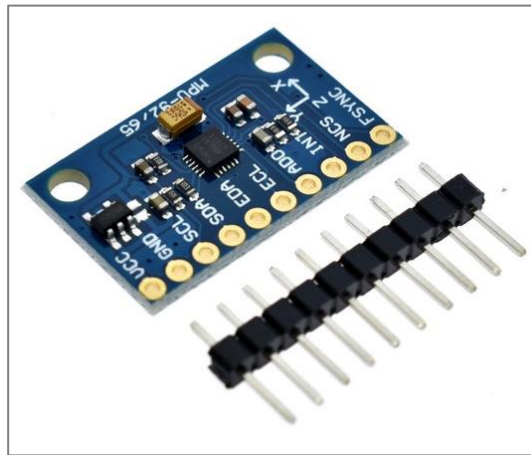


Рисунок 3.3 – Модуль MPU6500 [19]

Таблиця 3.2 – Підключення компонентів до ESP32-WROOM-32

Компонент	Пін компонента	Пін мікроконтролера
MPU6500	SDA	GPIO21
	SCL	GPIO22
	VCC	3V3
	GND	GND
NEO-6M	TX	GPIO16 (RX2)
	RX	GPIO17 (TX2)
	VCC	3V3
	GND	GND

Загальне енергоспоживання системи складає близько 210 мА (ESP32: 160 мА, NEO-6М: 45 мА, MPU6500: 3 мА) при напрузі 3,3V, що еквівалентно 0,7 Вт. При використанні Li-Po акумулятора ємністю 2000 мАh час автономної роботи становить приблизно 9,5 години.

3.2 Інтеграція з платформою ThingsBoard

Для зберігання телеметричних даних, візуалізації у реальному часі та аналізу обрано платформу ThingsBoard. Це відкрита IoT платформа для управління пристроями та візуалізації даних. Передача даних здійснюється через HTTPS протокол, що забезпечує шифрування та захист від перехоплення.

Вибір ThingsBoard обґрунтований декількома факторами. Платформа є open-source з ліцензією Apache 2.0, що дозволяє безкоштовне використання без обмежень у self-hosted варіанті.

Підтримка HTTPS забезпечує безпечну передачу даних через стандартний порт 443, який зазвичай дозволений у корпоративних мережах. TimescaleDB оптимізована для зберігання часових рядів з автоматичною компресією та агрегацією даних.

Візуалізація через WebSocket забезпечує оновлення дашбордів у реальному часі без постійного polling. Гнучкі віджети підтримують графіки, карти з траєкторіями GPS, таблиці метрик та налаштування алертів. Rule Engine дозволяє автоматичну обробку подій та відправку сповіщень при перевищенні порогових значень.

Архітектура передачі даних через HTTPS складається з кількох етапів. ESP32 підключається до Wi-Fi мережі та обчислює prediction та update кроки EKF. Після отримання даних від GPS та IMU формується JSON об'єкт з телеметрією. ESP32 відправляє HTTPS POST запит на endpoint ThingsBoard API з URL `https://server/api/v1/TOKEN/telemetry`, де TOKEN це унікальний

ідентифікатор пристрою. ThingsBoard приймає запит, валідує JSON та зберігає дані у TimescaleDB. Дашборд підписується на WebSocket та відображає оновлення у реальному часі. Rule Engine перевіряє умови алертів та відправляє сповіщення при необхідності.

Формат JSON телеметрії включає 14 полів з даними EKF, GPS та акселерометру. Поля `ekf_x` та `ekf_y` містять координати у локальній системі у метрах, `gps_lat` та `gps_lon` містять широту та довготу у градусах, `gps_accuracy` містить точність GPS у метрах. `velocity_x` та `velocity_y` містять компоненти швидкості у м/с, `theta` містить орієнтацію у градусах, `rmse` містить поточну похибку у метрах. `accel_x` та `accel_y` містять прискорення у м/с², `gyro_z` містить кутову швидкість у рад/с. `P_xx` та `P_yy` містять діагональні елементи коваріаційної матриці у м². Розмір одного JSON пакету становить приблизно 250 байт.

При частоті відправки 1 Hz загальний трафік становить 250 байт/с. Для безкоштовного tier ThingsBoard Cloud існує обмеження 1000 повідомлень на день, що відповідає приблизно 16.7 годинам роботи при частоті 1 Гц.

HTTPS протокол має переваги порівняно з незашифрованим HTTP. Шифрування TLS забезпечує конфіденційність телеметричних даних під час передачі мережею. Автентифікація сервера через сертифікат захищає від підміни endpoint. Цілісність даних гарантується криптографічними хешами.

Для того щоб виконати зберігання даних на платформі ThingsBoard було створено профіль пристрою під назвою Robot GPS Tracker. Та під цей профіль створено пристрій Robot.

Тепер можна отримати його TOKEN щоб дані надходили саме на нього. Для перевірки та візуалізації отриманих даних було додано на дашборд таблицю з отриманими даними та історію руху безпілотного мобільного робота (рис. 3.4).

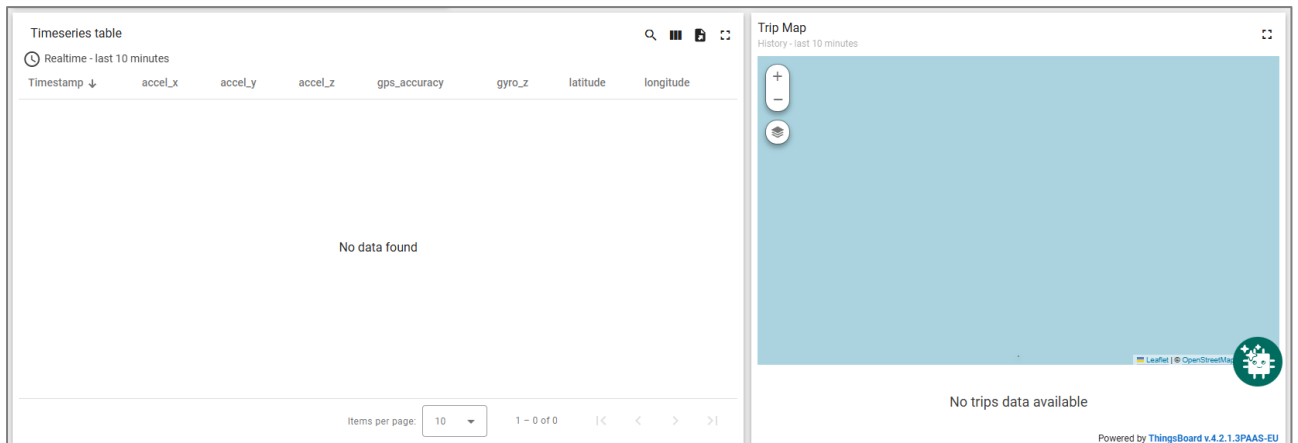


Рисунок 3.4 – Таблиця отриманих даних та блок для візуалізації руху
безпілотного мобільного робота

3.3 Віртуальне підключення модуля локалізації

Для прискорення розробки та тестування системи без необхідності фізичних компонентів було використано онлайн симулятор Wokwi.

Платформа Wokwi дозволяє емулювати мікроконтролери ESP32, Arduino та периферійні пристрої у веб-браузері з можливістю налагодження коду у реальному часі.

Особливістю даної реалізації є розробка власного віртуального GPS модуля, що імітує поведінку NEO-6M та генерує реалістичні NMEA повідомлення з траєкторією руху.

Для даного проекту ключовою особливістю стала можливість створення власного GPS модуля, оскільки бібліотека Wokwi не містить GPS сенсори. Custom Chip API дозволяє писати логіку компонентів на мові C з використанням API для взаємодії з пінами мікроконтролера, таймерами та послідовними портами.

Віртуальний GPS модуль було реалізовано як custom chip для Wokwi з повною емуляцією протоколу NMEA 0183. Модуль генерує повідомлення типу GPWGA з координатами положення, кількістю супутників та точністю, GPRMC

з координатами, швидкістю та курсом, GPGSA з інформацією про активні супутники та DOP параметри.

Всі повідомлення відправляються через UART інтерфейс на швидкості 9600 baud, що відповідає стандартним налаштуванням реального модуля NEO-6M.

У симуляторі Wokwi створено віртуальну схему (рис. 3.5) з ESP32-WROOM-32, кастомним GPS модулем, IMU модулем MPU6050 та з'єднувальними проводами. GPS модуль підключено до UART2 порту ESP32 через піни TX GPS до GPIO16 ESP32 та RX GPS до GPIO17 ESP32. IMU модуль підключено через I2C інтерфейс з SDA до GPIO21 та SCL до GPIO22. Живлення обох модулів здійснюється від піну 3.3V ESP32 з загальною землею GND. Для того щоб відображати поточні дані було додано монохромний OLED-дисплей 128×64 з інтерфейсом I2C.

Код ESP32 використовує бібліотеку TinyGPSPlus для парсингу NMEA повідомлень від віртуального GPS модуля. Бібліотека автоматично розбирає координати, швидкість, курс та інші параметри з GPGGA та GPRMC повідомлень. Для IMU використовується бібліотека MPU6050, що надає дані акселерометра та гіроскопа.

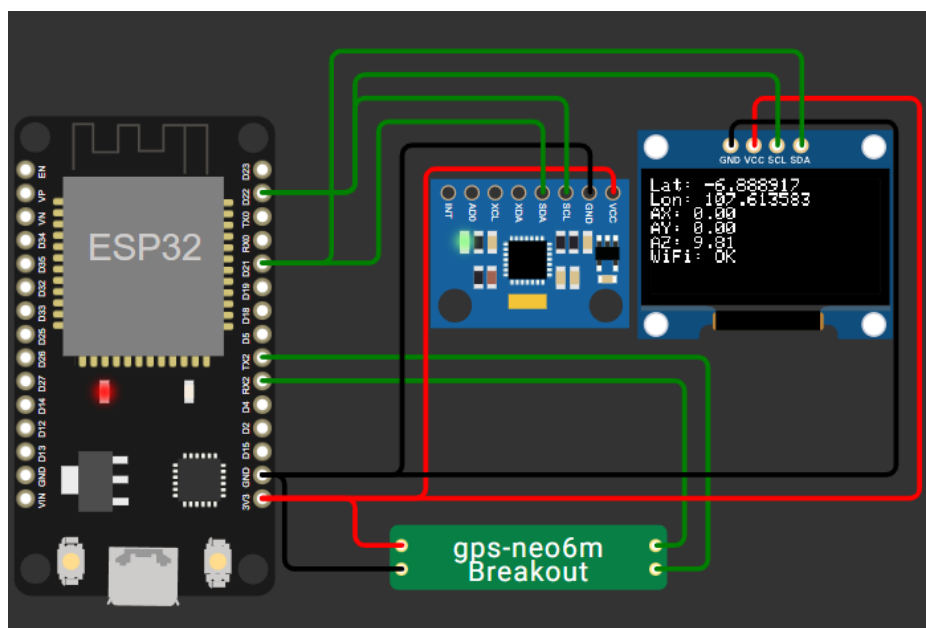


Рисунок 3.5 – Віртуальне з'єднання модуля локалізації

Після обчислення ЕКФ координат та метрик ESP32 формує JSON пакет з телеметрією та відправляє його на ThingsBoard через HTTPS (рис. 3.6). Симулятор Wokwi підтримує мережеві операції, тому віртуальний ESP32 може встановлювати реальне з'єднання з сервером ThingsBoard у мережі Інтернет. Це дозволяє тестувати повний цикл передачі даних від віртуальних сенсорів через віртуальний мікроконтролер до реального хмарного сервісу без фізичного обладнання.

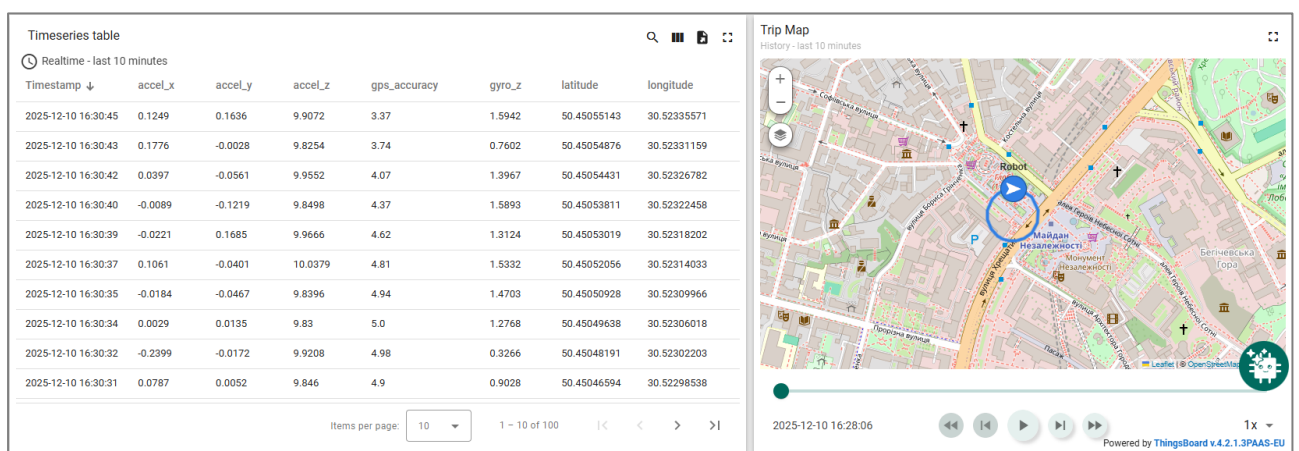


Рисунок 3.6 – Отримані дані на сервісі ThingsBoard

3.4 Реалізація веб-додатка

Для аналізу та візуалізації даних локалізації безпілотного наземного мобільного робота було розроблено веб-орієнтований додаток Sensor Fusion Tracker. Архітектура системи побудована на клієнт-серверній моделі з акцентом на клієнтську частину, де вся логіка обробки даних та візуалізації виконується безпосередньо у веб-браузері користувача засобами JavaScript.

Технологічний стек додатка включає сучасні веб-технології, що забезпечують високу продуктивність та якість візуалізації. Основою інтерфейсу користувача є HTML5 з семантичною розміткою для забезпечення доступності та коректної індексації. Стилзація реалізована за допомогою фреймворку

Tailwind CSS версії 3, який надає утилітарні класи для швидкої побудови адаптивного інтерфейсу з підтримкою різних розмірів екранів від мобільних пристроїв до настільних моніторів. Для побудови інтерактивних графіків використовується бібліотека Chart.js версії 4.4.0, яка забезпечує широкий спектр типів діаграм з підтримкою анімацій, зумування та детальних підказок при наведенні курсору. Картографічна функціональність базується на бібліотеці Leaflet версії 1.9.4 з підтримкою тайлових карт OpenStreetMap та супутникових знімків від Esri для відображення реальної географічної прив'язки траєкторій руху робота.

Програмний код організовано у модульну структуру з чітким розділенням відповідальності між компонентами. Файл `index.html` містить структуру інтерфейсу користувача з визначенням всіх візуальних елементів, панелей управління, `canvas`-елементів для графіків та контейнерів для карт. Файл `app.js` реалізує всю логіку додатка, включаючи алгоритми обробки даних, функції побудови графіків та обробники подій користувацького інтерфейсу. Додатково використовується вбудований CSS у секції `style` для специфічних налаштувань зовнішнього вигляду, які неможливо реалізувати утилітарними класами Tailwind, таких як анімації переходів, адаптивні медіа-запити та стилізація SVG-елементів схематичної карти.

Головний інтерфейс додатка організовано у вигляді вкладок для перемикання між двома основними режимами роботи. Перший режим Live Tracking (рис. 3.7) призначений для роботи з реальними датчиками GPS та IMU у режимі реального часу, що дозволяє безпосередньо спостерігати за рухом робота під час виконання місії та миттєво оцінювати якість локалізації на карті місцевості. Другий режим CSV Analysis орієнтований на детальний постфактум аналіз попередньо записаних експериментальних даних, що є основним режимом для науково-дослідницької роботи. Перемикання між режимами здійснюється через систему табів у верхній частині інтерфейсу з візуальною індикацією активного режиму через зміну кольору фону кнопки.

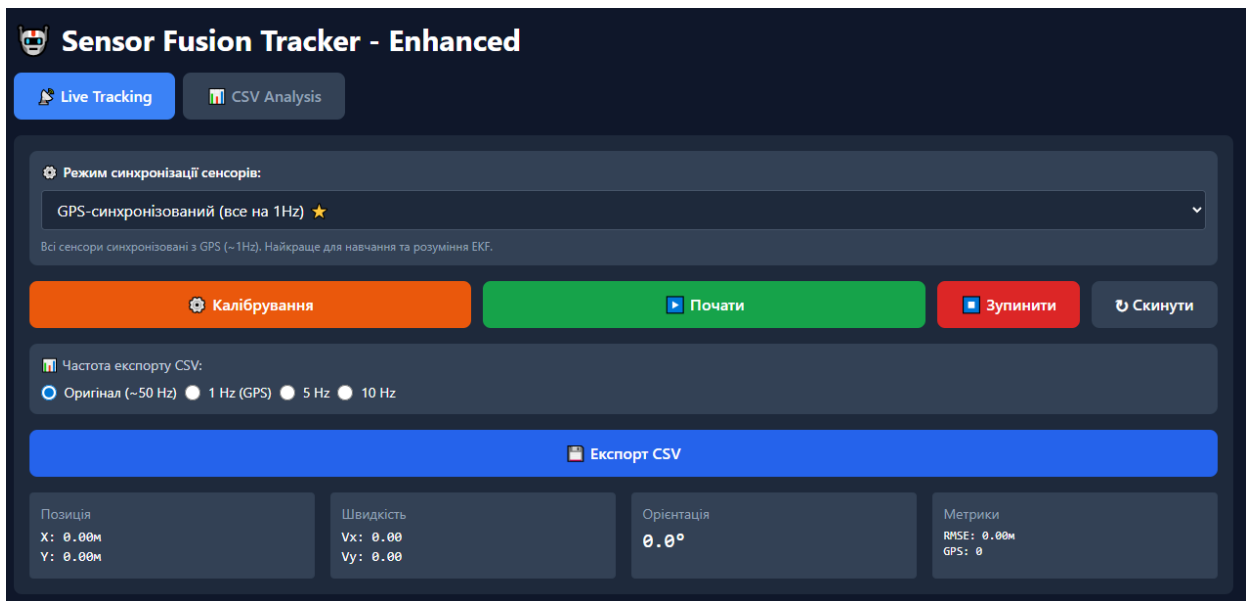


Рисунок 3.7 – Інтерфес для використання Live Tracking

Режим CSV Analysis (рис. 3.8) надає зручний механізм завантаження файлів даних через спеціальну область з підтримкою drag-and-drop функціональності. Користувач може перетягнути CSV-файл безпосередньо на позначену область інтерфейсу або скористатись традиційним діалогом вибору файлу через кнопку Вибрати файл.

При наведенні файлу на область завантаження активується візуальний ефект підсвічування рамки синім кольором, що підтверджує готовність системи прийняти файл. Після успішного завантаження та парсингу CSV-файлу з'являється інформаційна панель з базовою статистикою, яка включає назву файлу, загальну кількість записів, тривалість експерименту у секундах, середню частоту оновлення даних у герцах та середню величину RMSE у метрах. Ця інформація дозволяє швидко оцінити характеристики завантаженого набору даних перед початком детального аналізу.

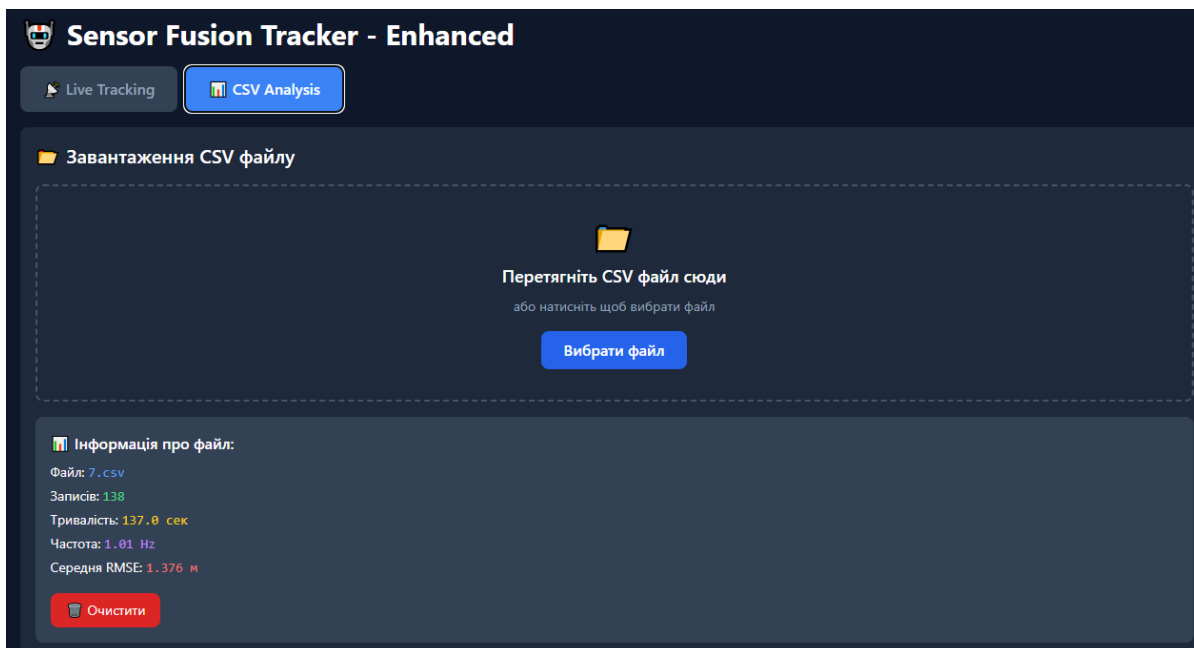


Рисунок 3.8 – Інтерфес для використання CSV Analysis

Нижче панелі завантаження розташовані два картографічні модулі для відображення траєкторій руху робота (рис. 3.9). Перший модуль базується на OpenStreetMap та показує траєкторії на реальній географічній карті міської місцевості з можливістю перемикавання між вуличною картою та супутниковими знімками.

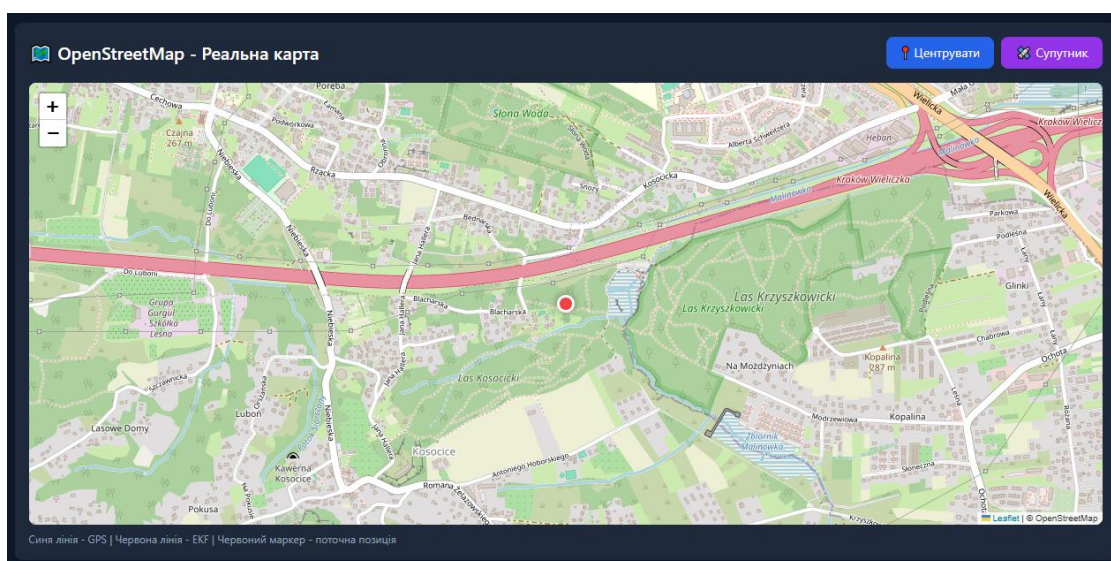


Рисунок 3.9 – Карта для відображення руху на карті місцевості

Другий модуль представляє схематичне відображення траєкторії у локальній метричній системі координат (рис. 3.10) на базі SVG-графіки з повною підтримкою інтерактивного зумування та переміщення карти мишкою. Обидва модулі синхронно оновлюються при завантаженні нових даних та відображають як сирі GPS-вимірювання, так і згладжену траєкторію після обробки розширеним фільтром Калмана.



Рисунок 3.10 – Схематичне відображення руху на карті місцевості

Під картографічними модулями розташована сітка з чотирьох основних аналітичних графіків (рис. 3.11), організованих у два ряди по два графіка у кожному. Перший графік відображає динаміку середньоквадратичної помилки RMSE у часі для оцінки точності локалізації робота.

Другий графік показує зміну невизначеності оцінок позиції через стандартні відхилення коваріаційної матриці фільтра Калмана по обох горизонтальних осях.

Третій графік демонструє профіль швидкості руху робота з окремими кривими для V_x та V_y . Четвертий графік відображає накопичену відстань, пройдену роботом за даними GPS та EKF для виявлення потенційного систематичного дрейфу навігаційної системи.



Рисунок 3.11 – Поля для аналітичних графіків

Додатковий розділ розширеного аналізу містить чотири спеціалізовані графіки для детального дослідження характеристик інерціальних сенсорів робота (рис. 3.12). Три гістограми відображають статистичні розподіли вимірювань акселерометра по осях X та Y, а також гіроскопа по осі Z, що дозволяє оцінити наявність систематичних зміщень та відповідність шуму сенсорів нормальному розподілу.



Рисунок 3.12 – Поля для розширеного аналізу інерціальних сенсорів

Четвертий графік показує часові ряди всіх ключових сенсорних даних для виявлення кореляцій та аномалій у показаннях датчиків. Окрема інформаційна панель відображає результати роботи алгоритму автоматичного виявлення зупинок робота з детальною інформацією про тривалість та координати кожної зупинки.

3.5 Експериментальні долідження та аналіз результатів

Для перевірки ефективності розробленого методу оптимізації відстеження місцезнаходження безпілотного наземного мобільного робота було проведено експериментальне дослідження в реальних умовах міської місцевості.

Основною метою експерименту було оцінити точність визначення координат робота на карті при об'єднанні даних від GPS-модуля NEO-6M та інерціального датчика MPU6500 з використанням розширеного фільтра Калмана.

Експериментальна система була налаштована з наступними параметрами. GPS-модуль працював з базовою частотою оновлення 1 Гц, що забезпечувало отримання нових координат кожну секунду. Інерціальний датчик опитувався з частотою 100 Гц для високочастотного відстеження динаміки руху робота між рідкісними GPS-оновленнями.

Акселерометр був налаштований на діапазон вимірювань ± 16 g, а гіроскоп на діапазон ± 2000 °/с, що дозволяло реєструвати широкий спектр рухів від плавних переміщень до різких маневрів.

Всі дані з сенсорів використовувались з високоточними часовими мітками для забезпечення можливості подальшого детального аналізу в розробленому веб-додатку.

Тестування проводилось на маршруті довжиною приблизно 190 метрів у міській місцевості з помірною забудовою, що забезпечило реалістичні умови роботи навігаційної системи робота.

Траєкторія містила як відкриті простори з хорошою видимістю неба для якісного GPS-прийому, так і зони з частковим екрануванням будівлями, де точність GPS могла знижуватись і на перший план виходила роль інерціальної навігації.

Характер руху включав прямолінійні ділянки, повороти різного радіусу та кілька коротких зупинок, що дозволило перевірити роботу системи при різних режимах динаміки робота.

Рисунок 3.13 демонструє модуль OpenStreetMap з відображенням реальної траєкторії руху робота на географічній карті міської місцевості.

Синя суцільна лінія представляє послідовність вимірювань від GPS-модуля NEO-6M з частотою оновлення 1 Гц, що дозволяє побачити реальний характер GPS-даних з властивим їм розкидом точок через багатопроменеве поширення радіохвиль від будівель та атмосферні завади.

Червона пунктирна лінія відображає траєкторію після обробки розширеним фільтром Калмана, яка є значно плавнішою завдяки інтеграції даних від інерціального датчика MPU6500 між GPS-оновленнями.

Червоний маркер у формі кола з білою рамкою позначає поточну позицію робота на момент завершення запису експериментальних даних.

Траєкторія має переважно лінійний характер з невеликим вигином у середній частині, що відповідає руху робота вздовж прямої вулиці з поступовим поворотом для дотримання напрямку дороги.

Максимальне відхилення окремих GPS-точок від згладженої EKF-траєкторії не перевищує кількох метрів, що відповідає паспортній точності модуля NEO-6M у міських умовах з частковим екрануванням неба будівлями.

Наявність великої відкритої площі поблизу траєкторії могла сприяти покращенню умов прийому GPS-сигналу на деяких ділянках маршруту через менше екранування супутників.

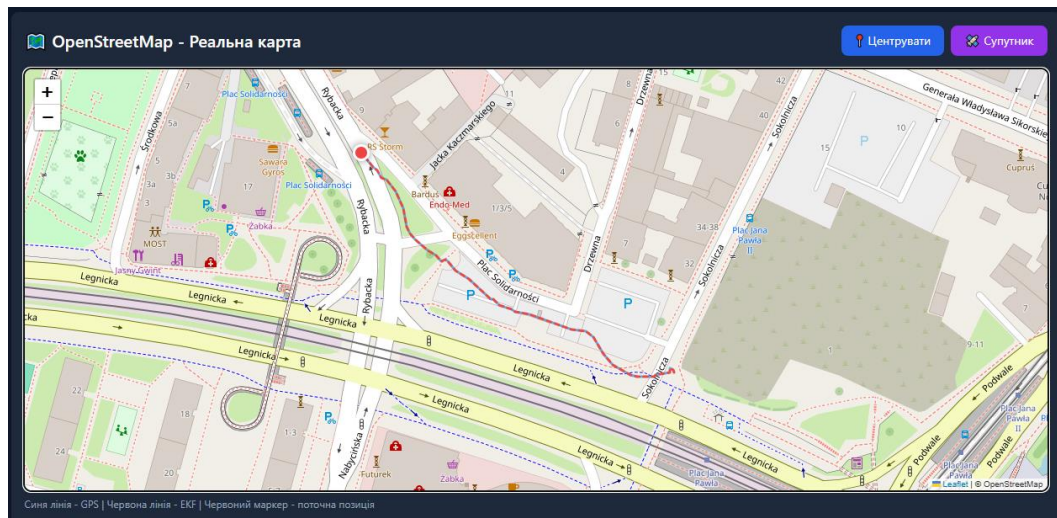


Рисунок 3.13 – Траекторія руху на карті місцевості

Рисунок 3.14 показує схематичне представлення тієї ж траекторії у локальній метричній системі координат з початком у кінцевій точці маршруту. На відміну від географічного модуля, схематична візуалізація дозволяє точно оцінити геометричні параметри руху робота без спотворень, властивих картографічним проєкціям. Синя суцільна лінія GPS та червона пунктирна лінія ЕКФ демонструють високу узгодженість траекторій з мінімальною розбіжністю, що підтверджує ефективність алгоритму злиття сенсорів. Три зелені маркери позначають автоматично виявлені зупинки робота, розташовані на різних ділянках маршруту. Фонова сітка з кроком 10 метрів дозволяє швидко оцінити масштаб траекторії та відстані між ключовими точками маршруту.

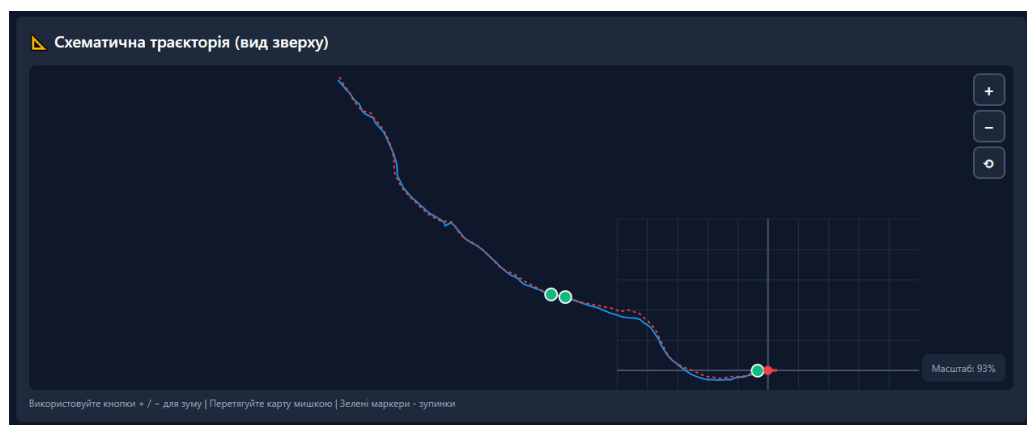


Рисунок 3.14 – Сформована схематична траекторія руху

Рисунок 3.15 відображає динаміку середньоквадратичної помилки локалізації робота протягом всього експерименту.

Графік показує RMSE як евклідову відстань між прогнозованою фільтром Калмана позицією та GPS-вимірюванням для кожного моменту часу з частотою приблизно 1 Гц. Червоний колір графіка з напівпрозорою заливкою під кривою підкреслює критичність даної метрики для оцінки якості навігаційної системи робота. Аналіз форми кривої виявляє кілька характерних фаз роботи системи локалізації.

Перші 10-15 вимірювань демонструють підвищену помилку у діапазоні 1,5-2,5 метрів, що відповідає фазі ініціалізації фільтра Калмана, коли система ще не накопичила достатньо інформації про динаміку руху та параметри шуму сенсорів робота.

Після 20-го вимірювання спостерігається стабілізація помилки на рівні близько 1 метра, що свідчить про успішну збіжність фільтра та встановлення оптимального балансу між прогнозуванням на основі IMU та корекцією за GPS. Цей рівень помилки підтримується протягом більшої частини експерименту, підтверджуючи стабільність роботи навігаційної системи робота.

В інтервалі вимірювань від 40 до 70 спостерігаються два виразні піки помилки з максимальними значеннями близько 3,5-3,8 метрів. Ці піки можуть бути спричинені зонами маршруту зі складнішими умовами GPS-прийому, де будівлі частково екранують небо, або моментами різких змін швидкості чи напрямку руху робота, коли спрощена модель руху дає менш точні прогнози. Проте навіть у ці моменти помилка не перевищує 4 метрів, а система швидко відновлюється до нормального рівня точності.

У період від 80-го до 138-го вимірювання помилка залишається стабільно низькою, переважно в межах 0,5-1,5 метра, що демонструє найкращу точність локалізації робота протягом експерименту.

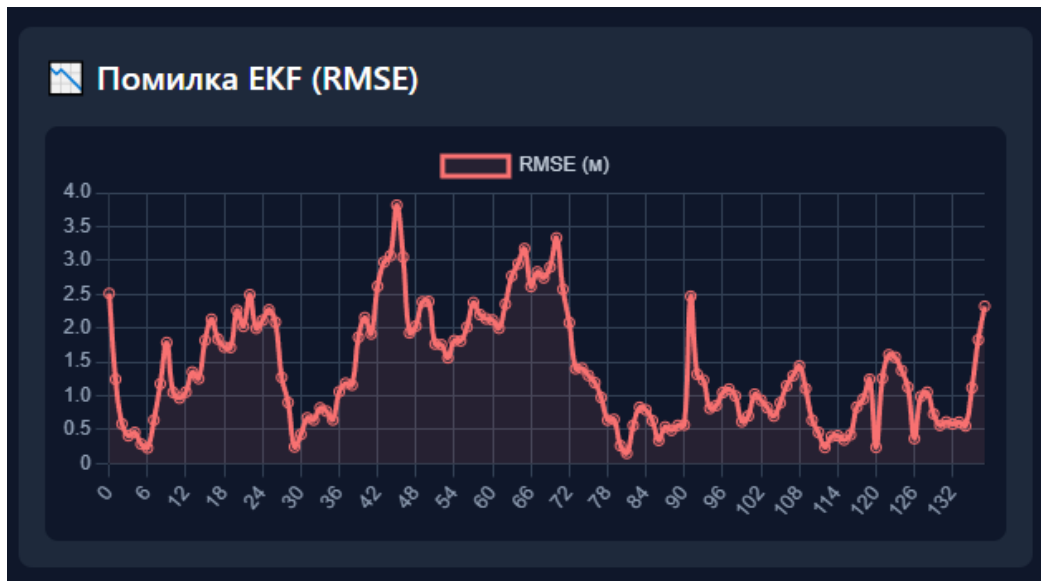


Рисунок 3.15 – Графік помилок локалізації

Рисунок 3.16 демонструє динаміку невизначеності оцінок позиції робота через стандартні відхилення σ_x та σ_y , обчислені як квадратні корені з діагональних елементів коваріаційної матриці фільтра Калмана. Синя крива представляє невизначеність по осі X у напрямку схід-захід, тоді як зелена крива відображає невизначеність по осі Y у напрямку північ-південь. Ці параметри характеризують теоретичну довіру фільтра до власних оцінок та відображають очікувану границю помилки локалізації робота на карті місцевості.

Початкове значення невизначеності становить приблизно 1,5-1,8 метрів для обох осей координат, що відповідає налаштуванням початкової коваріаційної матриці фільтра на основі паспортної точності GPS-модуля NEO-6M. Протягом перших 100 вимірювань спостерігається поступове зростання невизначеності до рівня 2,0-2,5 метрів, що відображає процес накопичення помилок від інтегрування показань інерціальних сенсорів робота між послідовними GPS-оновленнями. Критично важливою особливістю є відсутність експоненціального зростання коваріації, що підтверджує чисельну стабільність реалізації та правильність налаштування параметрів фільтра.

Обидві компоненти невизначеності змінюються практично синхронно з різницею менше 0,1 метра, що вказує на приблизно ізотропний характер невизначеності локалізації робота у горизонтальній площині. Така симетрія є очікуваною, оскільки GPS-приймач має приблизно однакову точність в обох горизонтальних напрямках, а параметри шуму процесу у фільтрі також налаштовані симетрично. Максимальна невизначеність досягає приблизно 2,6-2,7 метрів, що знаходиться в прийнятних межах для навігації робота у міському середовищі. У заключній частині експерименту спостерігається стабілізація на рівні 2,0-2,2 метра, що відповідає встановленню динамічної рівноваги між накопиченням помилок від IMU та періодичною корекцією за GPS.



Рисунок 3.16 – Графік невизначеності оцінок

Рисунок 3.17 відображає компоненти швидкості руху робота V_x та V_y у локальній системі координат. Фіолетова лінія показує швидкість по осі X, тоді як помаранчева лінія представляє швидкість по осі Y. Початкова фаза від нуля до 25-го вимірювання демонструє поступове прискорення робота з нульової швидкості до робочих значень близько 1,5-2,0 метрів на секунду.

Основна фаза руху характеризується відносно стабільними значеннями з періодичними коливаннями, де компонента V_x коливається в діапазоні від 1,0

до 2,5 м/с, а V_y демонструє антифазну поведінку, що є характерним для руху по криволінійній траєкторії при поворотах робота. Плавний характер зміни обох компонент без різких стрибків підтверджує коректність роботи фільтра Калмана.



Рисунок 3.17 – Графік швидкості руху робота

Рисунок 3.18 демонструє порівняння накопиченої відстані за даними GPS у синьому кольорі та за оцінками EKF у червоному кольорі. Найважливішою особливістю є практично повне співпадіння обох кривих протягом всього експерименту.

Кінцеві значення становлять 188,7 м для GPS та 189,18 м для EKF, що дає абсолютну різницю лише 0,47 м і відносну похибку 0,25 %. Це свідчить про відсутність систематичного дрейфу у системі локалізації робота. У районі 100-го вимірювання спостерігається ділянка з майже горизонтальним ходом кривої, що відповідає виявленій зупинці робота.

Практична ідентичність GPS та EKF кривих підтверджує високу якість калібрування інерціальних сенсорів та коректність налаштування параметрів фільтра.



Рисунок 3.18 – Графік відстаней пройденої ділянки

Рисунок 3.19 демонструє статистичні розподіли вимірювань акселерометра MPU6500. Ця панель показує розподіл прискорення по осі X з синім кольором та середнім значенням $\mu = 0,767 \text{ м/с}^2$, що вказує на значне систематичне зміщення датчика. Розподіл має дзвоноподібну форму з піком у районі $0,8 \text{ м/с}^2$ та розкидом від мінус 1 до плюс $3,5 \text{ м/с}^2$.

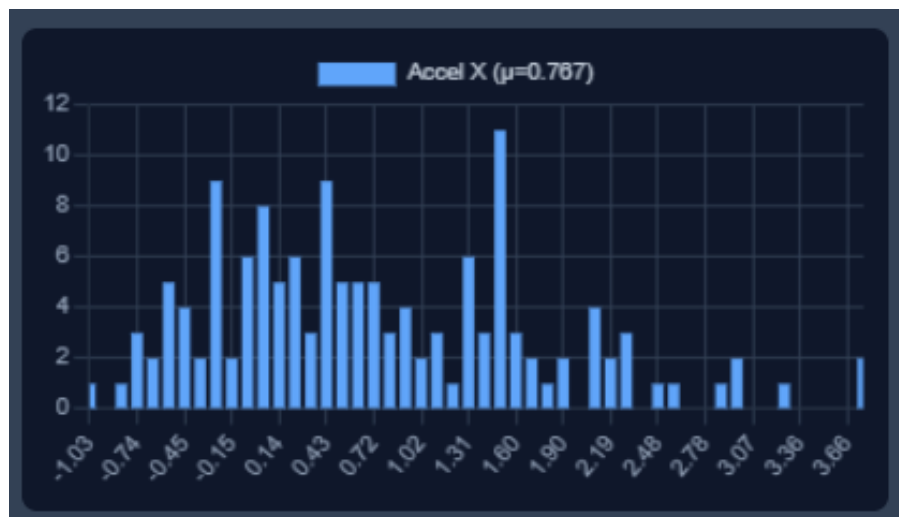


Рисунок 3.19 – Графік розподілу шуму акселерометра X

Рисунок 3.20 відображає розподіл по осі Y з зеленим кольором та $\mu = -0,162 \text{ м/с}^2$, що свідчить про значно менше зміщення. Пік розташований близько нуля з

розкидом від $-1,5$ до $1,0$ м/с². Приблизна відповідність обох розподілів нормальному закону підтверджує коректність використання гаусівської моделі шуму у фільтрі Калмана.

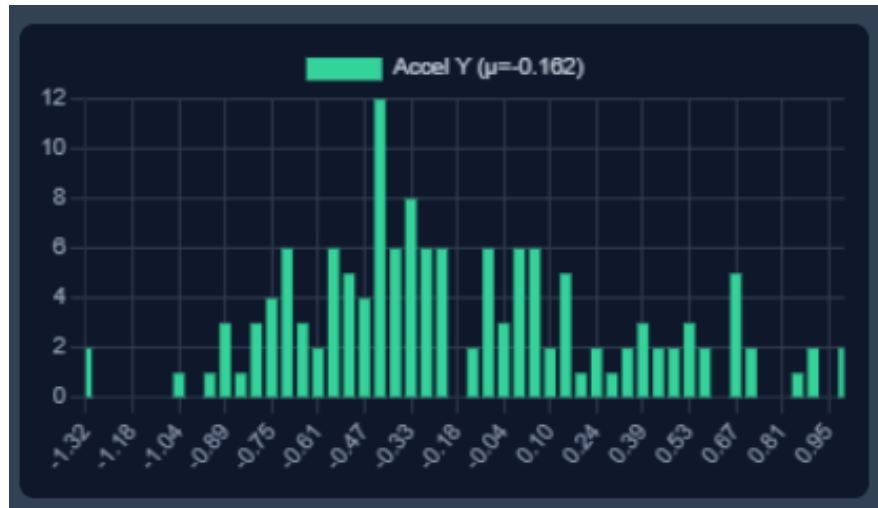


Рисунок 3.20 – Графік розподілу шуму акселерометра Y

Рисунок 3.21 відображає гістограму гіроскопа по осі Z з помаранчевим кольором та середнім значенням $\mu = 4,136$ °/с. Розподіл має нормальну форму з найвищим стовпчиком у районі 10 °/с. Розкид значень від -40 до 30 °/с відображає різноманітність кутових рухів робота при поворотах.



Рисунок 3.21 – Графік розподілу шуму акселерометра Z

Рисунок 3.22 показує часові ряди всіх сенсорів: акселерометр X синім, акселерометр Y зеленим та гіроскоп Z помаранчевим. Спостерігається чітка кореляція між піками гіроскопа та змінами акселерометрів, що є очікуваним при поворотах робота. Відсутність довготривалих трендів підтверджує термічну стабільність датчика протягом експерименту.

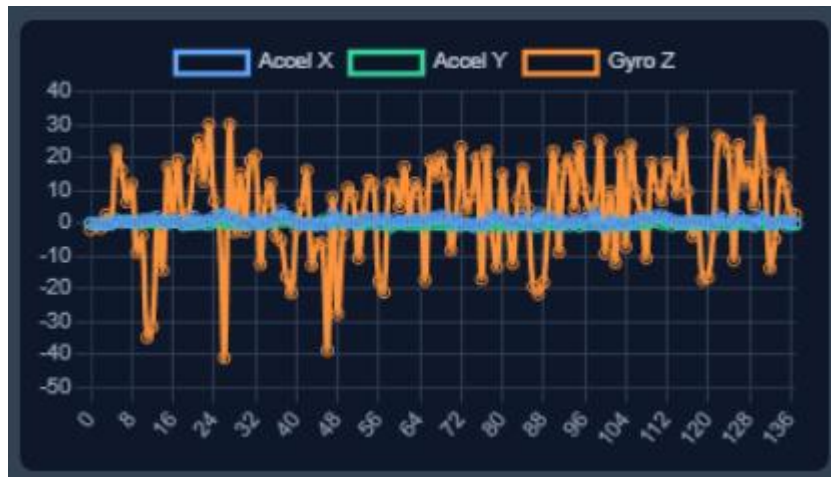


Рисунок 3.22 – Графік даних сенсорів в часі

Рисунок 3.23 демонструє результати автоматичного виявлення зупинок робота. Алгоритм ідентифікував три зупинки з різною тривалістю та координатами.

Перша зупинка має найбільшу тривалість 4 секунди та розташована в точці $(-3.40, -0.11)$ метрів майже у кінцевій точці маршруту, що відповідає завершенню місії.

Друга та третя зупинки мають тривалість 1 секунду кожна та розташовані у точках $(-67.02, 24.19)$ та $(-71.73, 25.05)$ метрів відповідно. Близькість координат другої та третьої зупинок вказує на те, що вони відбулись у межах однієї локальної зони при виконанні послідовності маневрів.

Виявлені зупинки візуалізуються на схематичній карті зеленими маркерами, що дозволяє швидко ідентифікувати точки інтересу маршруту.

II Виявлені зупинки

Виявлено зупинок: 3

Зупинка 1
Тривалість: 4.0 сек
Позиція: (-3.40, -0.11)

Зупинка 2
Тривалість: 1.0 сек
Позиція: (-67.02, 24.19)

Зупинка 3
Тривалість: 1.0 сек
Позиція: (-71.73, 25.05)

Рисунок 3.23 – Результати виявлення зупинок

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Технічна безпека

На етапі проектування та складання модуля локалізації були дотримані всі норми електробезпеки. Всі електронні компоненти, такі як мікроконтролер ESP32-WROOM-32, GPS-модуль NEO-6M та 6-осьовий гіроскоп-акселерометр MPU6500, обрані з урахуванням їх відповідності міжнародним стандартам безпеки. Використання компонентів з низькою напругою живлення забезпечує безпечну роботу без ризику ураження електричним струмом.

Для захисту від статичної електрики під час роботи з електронними компонентами використовувалися антистатичні браслети та підкладки. Всі з'єднання між модулями виконані за допомогою роз'ємних проводів, що дозволяє легко демонтувати та замінювати компоненти без пайки. Схема підключення компонентів була ретельно перевірена перед подачею живлення, що виключає можливість короткого замикання та виходу обладнання з ладу.

Живлення модуля здійснюється від безпечного джерела через USB-порт або від зовнішнього стабілізованого блоку живлення. Використання стандартизованих інтерфейсів та роз'ємів зменшує ризик неправильного підключення та пошкодження обладнання. При виборі джерела живлення враховувалося загальне споживання струму всіма компонентами модуля для забезпечення стабільної роботи без перевантажень.

4.2 Організація робочого місця

Робоче місце розробника системи локалізації організовано відповідно до санітарних норм роботи з комп'ютерною технікою. Приміщення має достатню площу, природне та штучне освітлення, систему вентиляції для підтримання

комфортних умов праці. Робочий стіл та крісло мають ергономічну конструкцію, що дозволяє підтримувати правильну позу під час тривалої роботи.

Освітлення робочого місця забезпечує достатню видимість для роботи з дрібними електронними компонентами без надмірного напруження зору. Температура та вологість повітря в приміщенні підтримуються на комфортному рівні за допомогою систем опалення та кондиціонування. Рівень шуму не перевищує допустимих норм для виконання робіт, що вимагають концентрації уваги.

Режим праці включає регламентовані перерви для відпочинку відповідно до санітарних норм роботи з комп'ютером. Протягом робочого дня виконуються вправи для очей та опорно-рухового апарату для профілактики професійних захворювань. Всі співробітники проходять інструктажі з охорони праці перед допуском до роботи.

4.3 Безпека при роботі з обладнанням

При роботі з електронним обладнанням дотримуються правила електробезпеки. Всі роботи з підключенням та налаштуванням компонентів проводяться при вимкненому живленні. Використовується справне обладнання з цілісною ізоляцією проводів та надійними з'єднаннями. При необхідності пайки компонентів застосовується паяльник з заземленим жалом для запобігання пошкодженню чутливих електронних елементів.

Робоче місце обладнане засобами індивідуального захисту, включаючи антистатичні браслети для роботи з мікросхемами. При роботі з паяльником використовується спеціальна підставка з негорючого матеріалу та витяжка для відведення шкідливих випарів. Легкозаймісті матеріали зберігаються в спеціально відведених місцях у відповідних контейнерах.

Тестування модуля в польових умовах проводиться з дотриманням правил безпеки. При випробуваннях забезпечується безпечна відстань до модуля

локалізації. Всі випробування проводяться в спеціально відведених зонах без присутності сторонніх осіб.

4.4 Програмне забезпечення та надійність системи

На етапі програмування та тестування використовувалися методи, що зменшують ризики виникнення програмних збоїв та помилок. Використання стабільних і перевірених бібліотек для роботи з GPS-модулем, гіроскопом та мережевими з'єднаннями забезпечило високу надійність програмного забезпечення. Тестування програмних модулів проводилося ретельно, щоб мінімізувати можливість виникнення помилок під час експлуатації системи.

В програмному коді реалізовано обробку помилок та винятків, що дозволяє системі продовжувати роботу навіть при виникненні нештатних ситуацій. Використано механізми автоматичного перезапуску системи при критичних збоях. Впроваджено систему логування подій для можливості діагностики та усунення проблем на ранніх стадіях.

Алгоритм `sensor fusion` оптимізовано для роботи в реальному часі без затримок та зависань. Передбачено автоматичне перемикання між джерелами даних у разі відмови одного з сенсорів. Це забезпечує безперервність роботи системи локалізації навіть при несприятливих умовах, таких як втрата GPS-сигналу або тимчасові збої інших датчиків.

4.5 Інформаційна безпека

При роботі з хмарною IoT-платформою ThingsBoard було забезпечено високий рівень інформаційної безпеки. Всі дані, що передаються між модулем локалізації і сервером ThingsBoard, захищені через систему токенів доступу. Кожен пристрій в системі має унікальний токен автентифікації, який

використовується для ідентифікації та авторизації при відправці телеметричних даних про координати робота.

Токени доступу зберігаються в захищеному вигляді в конфігураційних файлах ESP32 та не включаються у відкритий програмний код. При підключенні модуля до ThingsBoard використовується HTTP API з передачею токена в заголовках запитів, що дозволяє платформі перевірити легітимність джерела даних. Система ThingsBoard автоматично відхиляє запити з невірними або відсутніми токенами, запобігаючи несанкціонованому доступу до системи моніторингу.

Для додаткового захисту в ThingsBoard налаштовано контроль доступу на основі ролей, що дозволяє розмежувати права різних користувачів системи. Адміністратори мають повний доступ до налаштувань пристроїв та перегляду даних, тоді як звичайні користувачі можуть тільки переглядати дані телеметрії на дашбордах. Дашборди ThingsBoard захищені паролями та доступні тільки авторизованим користувачам через веб-інтерфейс платформи.

Платформа ThingsBoard забезпечує автоматичне резервне копіювання всіх телеметричних даних, що запобігає їх втраті при технічних збоях. Впроваджено систему моніторингу з'єднання пристроїв, яка відстежує статус підключення модулів та сповіщає адміністраторів про тривалу відсутність зв'язку. Це важливо для захисту конфіденційної інформації про маршрути та місцезнаходження робота і забезпечення надійності системи локалізації.

4.6 Пожежна безпека

Приміщення для розробки та тестування системи обладнане первинними засобами пожежогасіння відповідно до правил пожежної безпеки. Використовуються вогнегасники, призначені для гасіння електроустановок. На видному місці розміщено план евакуації та інструкції щодо дій при виникненні пожежі. Забезпечено вільний доступ до евакуаційних виходів.

При роботі з електронним обладнанням дотримуються правила, що запобігають виникненню пожежі. Не допускається залишати увімкнене обладнання без нагляду. Електропроводка має справну ізоляцію та регулярно перевіряється на відсутність пошкоджень. При виявленні запаху горілого або інших ознак несправності обладнання негайно відключається від мережі.

4.7 Безпека користувача

Для зменшення ризиків, пов'язаних з людським фактором, був створений інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача. Веб-інтерфейс для моніторингу положення робота має простий та зрозумілий дизайн, що допомагає запобігти помилковим діям користувачів. Це зменшує ймовірність збоїв у роботі системи або неправильної інтерпретації даних про місцезнаходження мобільного робота.

Під час монтажу та експлуатації модуля дотримуються всі необхідні заходи безпеки. Всі роботи з підключення та налаштування електронних компонентів проводяться з дотриманням правил охорони праці, що включає використання відповідних інструментів та засобів індивідуального захисту. Користувачі системи проінструктовані щодо безпечного використання модуля, що додатково знижує ризики травм та пошкоджень обладнання.

4.8 Висновки до четвертого розділу

Отже, в процесі розробки та впровадження системи оптимізації методу визначення положення безпілотного наземного мобільного робота на карті місцевості були враховані всі необхідні заходи охорони праці та безпеки. Забезпечено відповідність електронних компонентів стандартам безпеки, застосовано захист від статичної електрики, правильне підключення за перевіреними схемами та використання безпечних напруг живлення.

Робоче місце розробника організовано відповідно до санітарних норм з забезпеченням комфортних умов праці. Впроваджено регламентовані перерви для відпочинку та систему інструктажів з охорони праці. Дотримуються правила електробезпеки та пожежної безпеки, приміщення обладнане первинними засобами пожежогасіння.

Використання надійних програмних бібліотек, реалізація обробки помилок та ретельне тестування забезпечили високу стабільність роботи системи. Впроваджено високий рівень інформаційної безпеки через шифрування. Створено інтуїтивний інтерфейс користувача та детальну документацію для безпечної експлуатації системи.

Реалізація всіх зазначених заходів забезпечила створення безпечної, надійної та ефективної системи локалізації, яка відповідає всім стандартам безпеки і може бути використана без ризику для здоров'я і життя розробників та користувачів.

ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі знайдено розв'язок актуального науково-прикладного завдання щодо покращення точності визначення географічного положення безпілотного наземного транспортного засобу через створення та впровадження автоматизованого навігаційного комплексу з інтеграцією інформації від різнотипових вимірювальних пристроїв.

Проведено всебічне дослідження наявних технологій навігації для мобільної робототехніки, охоплюючи супутникові системи GNSS, інерційні вимірювальні блоки, лазерні сканери з функцією SLAM та системи візуальної навігації. Виявлено, що застосування єдиної технології не може гарантувати достатню точність та стабільність у всіх експлуатаційних умовах. Супутникова навігація демонструє помилки у 2-3 метри у закритих просторах, інерційні блоки схильні до прогресуючих відхилень через дрейф датчиків, лазерні системи вимагають високопродуктивних обчислювачів. Обґрунтовано доцільність використання гібридного підходу на основі розширеного фільтра Калмана, що забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, стабільністю роботи та обчислювальною ефективністю.

Спроектовано модульну структуру навігаційної системи з чотирма функціональними рівнями: перший рівень включає супутниковий приймач NEO-6M та інерційний блок MPU6500, другий рівень забезпечує обробку даних через оптимізований розширений фільтр Калмана, третій рівень реалізує зберігання інформації на IoT-платформі ThingsBoard, четвертий рівень представлений веб-застосунком для візуалізації. Визначено організацію телеметричних даних у вигляді 15 параметрів, що повністю описують стан транспортного засобу. Детально розкрито двоетапний процес функціонування системи: етап ініціалізації з калібруванням інерційних датчиків та встановленням початкової

системи координат, та етап безперервної обробки з циклами прогнозування та корекції розширеного фільтра Калмана.

Втілено фізичний навігаційний модуль на базі мікроконтролера ESP32-WROOM-32 з двоядерним процесором Xtensa LX6 тактовою частотою 240 МГц, супутниковим приймачем NEO-6M та шестиосьовим блоком MPU6500. Вибір компонентної бази аргументовано їхніми технічними можливостями: потужність ESP32 дозволяє паралельне опрацювання потоків даних від сенсорів, інтегрований Wi-Fi модуль забезпечує передачу телеметрії на хмарну платформу через захищений протокол, низький струм споживання у режимі глибокого сну (10 мкА) дає змогу досягти 10-12 годин автономності при використанні Li-Po акумулятора 2000 мАг. Створено програмне забезпечення для мікроконтролера, що реалізує алгоритм розширеного фільтра Калмана з адаптивним коригуванням коефіцієнтів, процедуру калібрування інерційних датчиків та відправлення JSON-структур телеметрії на платформу ThingsBoard.

Для емуляції роботи системи без фізичних компонентів задіяно онлайн-симулятор Wokwi. Спроектовано власний віртуальний GPS-модуль з повною імітацією протоколу NMEA 0183, що формує повідомлення форматів GPGLL, GPRMC та GPGSA через послідовний інтерфейс UART зі швидкістю 9600 біт/сек. Сформовано віртуальну електричну схему з мікроконтролером ESP32, кастомним GPS-модулем, інерційним блоком MPU6050 та монохромним дисплеєм OLED 128×64 пікселі. Платформа Wokwi забезпечує підтримку мережних з'єднань, що дозволило випробувати повний ланцюг передачі даних від віртуальних датчиків до реального хмарного сервісу ThingsBoard.

Створено інтерактивний веб-додаток Sensor Fusion Tracker для візуалізації та аналітичної обробки навігаційних даних. Технологічна база включає HTML5 з семантичною структурою документа, фреймворк Tailwind CSS для адаптивного дизайну інтерфейсу, бібліотеку Chart.js версії 4.4.0 для побудови динамічних графіків та Leaflet версії 1.9.4 для картографічного представлення з підтримкою тайлів OpenStreetMap та супутникових знімків Esri. Впроваджено два

функціональні режими: Live Tracking для спостереження у реальному часі через WebSocket з'єднання з платформою ThingsBoard та Analysis для поглибленого вивчення архівних даних з CSV-файлів. Веб-застосунок забезпечує відображення траєкторії на географічній карті, схематичне представлення з функцією масштабування, графіки відхилень, швидкості та статистичної невизначеності у режимі реального часу.

Виконано комплексне емпіричне вивчення функціональних характеристик системи. Побудовано статистичні гістограми показань акселерометра MPU6500, що виявили систематичне відхилення по осі X з середнім значенням $0,767 \text{ м/с}^2$ та менш виражене зміщення по осі Y зі значенням $-0,162 \text{ м/с}^2$. Наближення розподілів до нормального закону валідує коректність застосування гаусівської моделі шумів у фільтрі Калмана. Автоматизовано процес ідентифікації моментів зупинки транспортного засобу через аналіз векторів швидкості, що дозволяє виявляти критичні точки на маршруті. Емпірично підтверджено ефективність розробленого навігаційного модуля та його спроможність забезпечувати прецизійне визначення координат транспортного засобу у режимі реального часу.

Проведено аналіз організаційних та технічних вимог охорони праці під час експлуатації електронного устаткування. Забезпечено виконання норм електричної безпеки через підбір компонентів з низьковольтним живленням, застосування антистатичних засобів захисту та використання справного обладнання. Організовано робочий простір відповідно до санітарних вимог для роботи з комп'ютерною технікою з належним освітленням, вентиляційними системами та ергономічним меблюванням. Гарантовано високий рівень захисту інформації при використанні IoT-платформи ThingsBoard через механізм токенів автентифікації та протокол HTTPS з криптографією TLS.

Розроблена навігаційна система має значний потенціал для практичного використання у різних секторах економіки: транспортно-логістичних комплексах для автоматизації складських операцій та переміщення вантажів, виробничих підприємствах для моніторингу автономних транспортних засобів, аграрному

секторі для відстеження сільськогосподарської техніки та роботизованих систем, охоронних службах для патрулювання та спостереження за об'єктами. Модульна організація та застосування відкритих протоколів передачі даних створюють можливості для інтеграції системи з різноманітними робототехнічними платформами та розширення функціональності через додавання нових типів сенсорів.

Впровадження створеної навігаційної системи сприяє підвищенню продуктивності виробничих та логістичних процесів через автоматизацію та оптимізацію маршрутів переміщення мобільних роботів, зниження витрат матеріальних ресурсів та поліпшення умов безпеки праці через використання автономних систем.

Перспективними векторами подальших наукових пошуків визначено розширення системи додатковими типами вимірювальних пристроїв (лазерні сканери, стереоскопічні камери) для підвищення точності навігації у складних умовах, реалізацію алгоритмів штучного інтелекту для динамічного налаштування параметрів фільтра на підставі аналізу історичних даних, інтеграцію з системами картографування та планування маршрутів для досягнення повної автономності мобільної платформи, створення мультиагентної системи для координації групи роботів з централізованим моніторингом на спільній платформі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.

3. GNSS Meaning, Working, Applications, 2022. Spiceworks Inc. URL: <https://www.spiceworks.com/tech/iot/articles/what-is-gnss/> (дата звернення: 05.10.2025).

4. Global Navigation Satellite System (GNSS) and Satellite Navigation Explained | Advanced Navigation. Advanced Navigation. URL: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/global-navigation-satellite-system-gnss-and-satellite-navigation-explained/> (дата звернення: 06.10.2025).

5. Inertial Navigation Systems (INS) – An Introduction | Advanced Navigation. Advanced Navigation. URL: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-navigation-systems-ins-an-introduction/#:~:text=The%20law%20of%20inertia%20states%20that%20an,into%20play%20that%20affects%20the%20inertial%20measurement.> (дата звернення: 10.10.2025).

6. A Review of 2D Lidar SLAM Research. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/7/1214> (дата звернення: 10.10.2025).

7. Scaramuzza, D., Fraundorfer, F.: Visual odometry: Part i the first 30 years and fundamentals.

8. An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM: Applications to Mobile Robotics. URL: https://www.researchgate.net/publication/284136264_An_Overview_to_Visual_Odometry_and_Visual_SLAM_Applications_to_Mobile_Robotics (дата звернення: 16.10.2025).

9. I. Nevlyudov, S. Novoselov, and K. Sukhachov, "Method of Simultaneous Localization and Mapping for Construction of 2.5D Maps of the Environment Using ROS" Innovative technologies and scientific solutions for industries, 2023, Vol. 2 (24), pp. 145-160, DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.145.

10. Radio Signals-Based Positioning / R. M. M. R. Rathnayake et al. Academic Encyclopedia - Scientific Entries, Videos & Images | Encyclopedia MDPI. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/45216> (дата звернення: 16.10.2025).

11. A DSP For Implementing High-Performance Sensor Fusion On An Embedded Budget. Semiconductor Engineering. URL: <https://semiengineering.com/a-dsp-for-implementing-high-performance-sensor-fusion-on-an-embedded-budget/> (дата звернення: 18.10.2025).

12. I. Nevliudov, S. Omarov, S. Tesliuk, S. Novoselov, and O. Sychova, "Robot Group Interaction Technology Using a Cloud Server" Journal of Natural Sciences and Technologies, 2022 2023, Vol. 1 (1), pp. 85-92.

13. What is Firebase Realtime: A Review of Serverless Database Features. Bejamas. URL: <https://bejamas.com/hub/serverless-database/firebase-realtime-database> (дата звернення: 20.10.2025).

14. InfluxDB Cloud 2.0. The LoRaWAN Network server for scale | The Things Industries. URL: <https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/cloud-integrations/influxdb-cloud/> (дата звернення: 19.10.2025).

15. thingsboard. Working with IoT dashboards. ThingsBoard. URL: <https://thingsboard.io/docs/user-guide/dashboards/> (дата звернення: 20.10.2025).

16. Build a DynamoDB GUI to Streamline Database Management. Appsmith | Open-Source Low-Code Application Platform. URL: <https://www.appsmith.com/use-case/dynamo-db-gui> (дата звернення: 20.10.2025).

17. ESP-WROOM-32 Development Board Type C. Αντωνιάδης | antoniadis.com.cy. URL: <https://www.antoniadis.com.cy/en/stem-robotics-programming/esp32esp8266-boards/esp-wroom-32-development-board-type-c> (date of access: 01.12.2025).

18. NEO-6M 3V-5V moduł GPS GY-NEO6MV2 Super sygnał z anteną dla Arduino. 38-3D. URL: https://38-3d.co.uk/pl/products/modul-gp-neo6mv2-neo-6m?srsltid=AfmBOoqQPgIgw4_4QukQjSV4ARouhQiEskVmyKQLqfNTNdgJHf9Ydhk8 (дата звернення: 01.12.2025).

19. MPU-6500 6-Axis Accelerometer + Gyro. Pixel Electric Company Limited. URL: <https://www.pixelelectric.com/sensors/load-pressure-flow-vibration/imu-acc-mag-gyro/mpu-6500-6-axis-accelerometer-gyro/?srsltid=AfmBOordwqvj944lBFyXpVklBSNZir5R2-954Ux7sSFqc4m-sETmTK0L> (дата звернення: 01.12.2025).