

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Проектування системи автоматизації для локального позиціонування мобільної
платформи з використанням модулів ESP32
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання групи КІТПВм-23-2
Тимошенко Микола Володимирович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Новоселов С.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

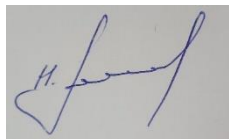
Зав. кафедри _____
(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Я Тимошенко Микола Володимирович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

« 25 » Грудня 2024р.

A square image containing a handwritten signature in blue ink. The signature is stylized and appears to be 'M. V. Tymoshenko'.

Тимошенко М. В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Тимошенку Миколі Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування системи автоматизації для локального
позиціонування мобільної платформи з використанням модулів ESP32

затверджена наказом по університету від _____ 22.11. 2024 р. № 1231 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 13.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Апаратна платформа – ESP32

3.2 Середовище розробки – Visual Studio Code

3.3 Технологія передавання даних – BLE

3.4 Тип переміщення мобільної платформи – лінійне.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Розробка методу автоматизованого визначення координат мобільного робота

4.3 Опис експериментальної установки

4.4 Програмна реалізація ПІД регулятора

4.5 Експериментальні дослідження

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint.

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи	10.10.24 – 17.10.24	Виконав
2	Аналіз предметної області	18.10.24 – 30.10.24	Виконав
3	Розробка методу автоматизованого визначення координат мобільного робота	01.11.24 – 16.11.24	Виконав
4	Опис експериментальної установки	17.11.24 – 10.12.24	Виконав
5	Експериментальні дослідження	11.12.24 – 20.12.24	Виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	21.12.24 – 25.12.24	Виконав
7	Подання роботи на рецензію		
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри		

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Тимошенко М. В.

(прізвище, ініціали)

проф. Новоселов С.П.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 2 табл., 45 рис., 2 дод., 23 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, ЛОКАЛЬНЕ ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ESP32, BLE, БАЗОВА СТАНЦІЯ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес локального позиціонування мобільних роботів.

Предмет дослідження – автоматизована система управління мобільним роботом з використанням базових станцій на основі модулів ESP32 та технології BLE.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності методу позиціонування мобільного робота в просторі завдяки використанню базових станцій на основі модулів ESP32 та технології BLE. Проведено аналіз методів локалізації мобільного робота в просторі. Розглянуті основні типи датчиків, що використовується для визначення положення мобільного робота в виробничому просторі.

Виконано аналіз існуючих систем навігації мобільних автономних робототехнічних засобів, показані їх переваги та недоліки. Визначено, що системи навігації можуть бути пасивними та активними. Наведено огляд даної технології та виконано огляд аналогічних рішень із застосуванням BLE маяків. Розроблена системи автоматизації для локального позиціонування з використанням модулів ESP32. Виконані експериментальні дослідження для підтвердження працездатності запропонованого методу позиціонування.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.2 «Забезпечити розширення використання електротранспорту та відповідної мережі інфраструктури».

ABSTRACT

Explanatory note: 80 p., 2 tab., 45 fig., 2 appendices, 23 sources.

MOBILE ROBOT, LOCAL POSITIONING, ESP32, BLE, BASE STATION, AUTOMATED SYSTEM

The object of research in this work is the process of local positioning of mobile robots.

The subject of research is an automated mobile robot control system using base stations based on ESP32 modules and BLE technology.

The purpose of this work is to increase the efficiency of the method of positioning a mobile robot in space through the use of base stations based on ESP32 modules and BLE technology. An analysis of methods for localizing a mobile robot in space is carried out. The main types of sensors used to determine the position of a mobile robot in the production space are considered.

An analysis of existing navigation systems for mobile autonomous robotics is performed, their advantages and disadvantages are shown. It is determined that navigation systems can be passive and active. An overview of this technology is provided and a review of similar solutions using BLE beacons is performed. An automation system for local positioning using ESP32 modules is developed. Experimental studies are performed to confirm the operability of the proposed positioning method.

Also, the results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely item 9.2 "Ensure the expansion of the use of electric transport and the corresponding infrastructure network".

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Аналіз способів використання мобільних роботів на виробництві.....	12
1.2 Аналіз системи навігації в виробничому просторі.....	16
1.3 Метод позиціонування на основі технології BLE в виробничому просторі	21
1.4 Висновки по першому розділу.....	29
2 Розробка методу автоматизованого визначення координат мобільного робота	30
2.1 Аналіз методів визначення місцезнаходження	30
2.2 Розробка архітектури автоматизованої системи.....	33
2.3 Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи	36
2.4 Висновки по другому розділу	38
3 Опис експериментальної установки.....	40
3.1 Вибір компонентів	40
3.2 Розробка програмного забезпечення для виконання експериментальних досліджень	46
3.3 Синтез структурної схеми управління мобільним роботом	54
3.4 Висновки по третьому розділу	59
4 Експериментальні дослідження.....	60
4.1 Визначення оптимальної орієнтації антен модулів ESP32.....	60
4.2 Експериментальні дослідження залежності RSSI від відстані до базової станції	71

4.3 Висновки по четвертому розділу.....	74
Висновки	75
Перелік джерел посилань	78
Додаток А Вихідний код програми	82
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень	87
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	95

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ІНП – інерційно навігаційна система;

ПЗ – програмне забезпечення;

ТМЦ – товарно-матеріальні цінності;

АОА – angle of arrival;

BLE – bluetooth low energy;

GPS – global positioning system;

JOSM – java openstreetmap editor;

RSSI – received signal strength indicator;

SLAM – simultaneous localization and mapping;

TOA – time of arrival;

UUID – universally unique identifier;

UWB – ultrawideband.

ВСТУП

Локальне позиціонування мобільних платформ знаходить широке застосування в таких сферах, як логістика, сільське господарство, охорона, виробництво, та навіть домашні роботи. Зі зростанням потреб в автономних роботизованих системах, ефективні рішення для позиціонування набувають особливої актуальності. Модулі ESP32 відзначаються низькою вартістю, широкими можливостями інтеграції з різними сенсорами та стабільною роботою, що робить їх чудовим вибором для створення систем позиціонування.

Проектування автоматизованих систем локального позиціонування для мобільних платформ є важливим завданням в умовах розвитку сучасних роботизованих систем. Здатність точно визначати положення мобільного робота у просторі є ключовою для його ефективної навігації, уникнення перешкод і виконання завдань. Одним із популярних рішень для побудови таких систем є використання мікроконтролерів ESP32, які забезпечують високу продуктивність, енергоефективність та можливість підключення до мережі через Wi-Fi або Bluetooth.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності методу позиціонування мобільного робота в просторі завдяки використанню базових станцій на основі модулів ESP32 та технології BLE.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес локального позиціонування мобільних роботів.

Предмет дослідження – автоматизована система управління мобільним роботом з використанням базових станцій на основі модулів ESP32 та технології BLE.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– виконати аналіз методів локалізації мобільного робота в просторі;

- розглянути основні типи датчиків, що використовується для визначення положення мобільного робота в виробничому просторі;
- провести аналіз існуючих систем навігації мобільних автономних робототехнічних засобів;
- провести аналіз методів локального позиціонування на основі радіомаяків (WiFi та BLE);
- подобувати структурну схему автоматизованої системи локального позиціонування та архітектури системи керування наземними мобільними дронами;
- виконати побудову алгоритму та розробити програму для ESP32 для проведення експериментальних досліджень;
- розробити пристрій для проведення експериментальних досліджень;
- виконати експериментальні дослідження для підтвердження правильності теоретичних рішень.

Пояснювальну записку необхідно оформити згідно [1 – 3]. Робота пройшла апробацію на XXVIII Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз способів використання мобільних роботів на виробництві

Одним з напрямків застосування мобільних роботів на виробництві є автоматизація складських операцій із застосуванням мобільних автономних роботів. Саме для виконання таких задач особливо важливо використання засобів локальної навігації.

Мобільні роботи, що призначені для роботи на складах, є автономними пристроями, здатними переміщатися у просторі та виконувати різні завдання без постійного контролю з боку людини (рис. 1.1). Ці роботи оснащені різними сенсорами, системами навігації та управління, які дозволяють їм орієнтуватися у просторі, уникати перешкод та точно дотримуватися маршрутів.

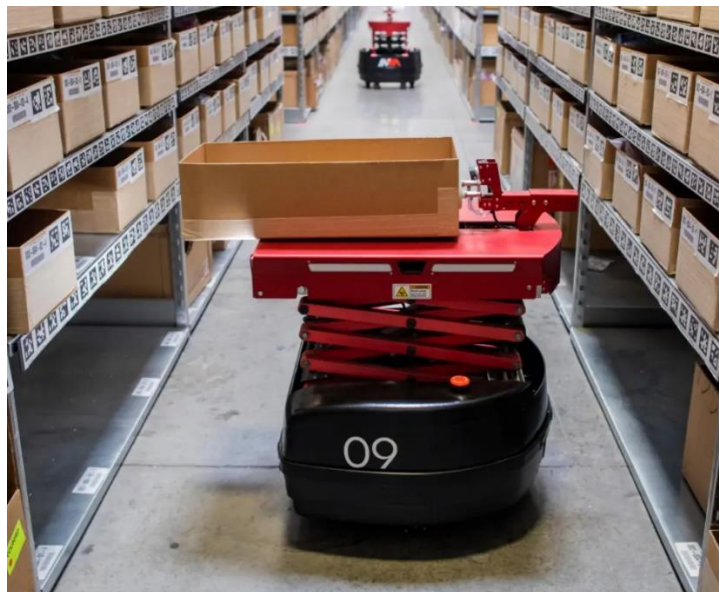


Рисунок 1.1 – Складський робот inVia

Ці технології забезпечують роботів можливістю «бачити» навколишнє середовище, розпізнавати об'єкти та будувати карти місцевості в реальному часі. Це дозволяє роботам коригувати свої маршрути, уникати зіткнень та працювати у динамічному середовищі, де присутні люди та інші транспортні засоби.

Існує кілька типів мобільних роботів, які використовуються на складах. Один із найпопулярніших – автоматизовані транспортні засоби (Automated Guided Vehicles, AGV). AGV зазвичай слідує за заздалегідь визначеними маршрутами з використанням оптичних, магнітних або радіочастотних міток. Однак більш сучасні рішення передбачають використання автономних мобільних роботів (Autonomous Mobile Robots, AMR), які здатні будувати свої маршрути в реальному часі та адаптуватися до змін у середовищі.

Автономні роботи зазвичай мають ряд датчиків, що відносять до навколишнього середовища. Такі вимірювання називають абсолютними вимірюваннями, вони забезпечують інформацію про місцезнаходження робота, яка не залежить від попередніх вимірювань [6]. Перевага абсолютного позиціонування проти відносного позиціонування у тому, що немає необмеженого накопичення помилок позиції робота.

Один з методів локалізації за даними екстероцептивних датчиків – це використання орієнтирів, що легко виявляються та ідентифікуються. Орієнтири можна поділити на активні та пасивні. Активні орієнтири, які також називають маяками; активно надсилають інформацію про своє місцезнаходження. Активний орієнтир зазвичай реалізується у формі радіобуя або іншої радіопередавальної апаратури. Робот приймає сигнали орієнтирів визначення своєї позиції. Два методи зазвичай використовуються для визначення абсолютного становища робота з використанням активного орієнтиру: триангуляція і трилатерація.

Метод триангуляції використовує відстані та напрямки на три або більше активних орієнтирів, а метод трилатерація використовує лише відстані для визначення положення та орієнтації робота (рис. 1.3) [7].

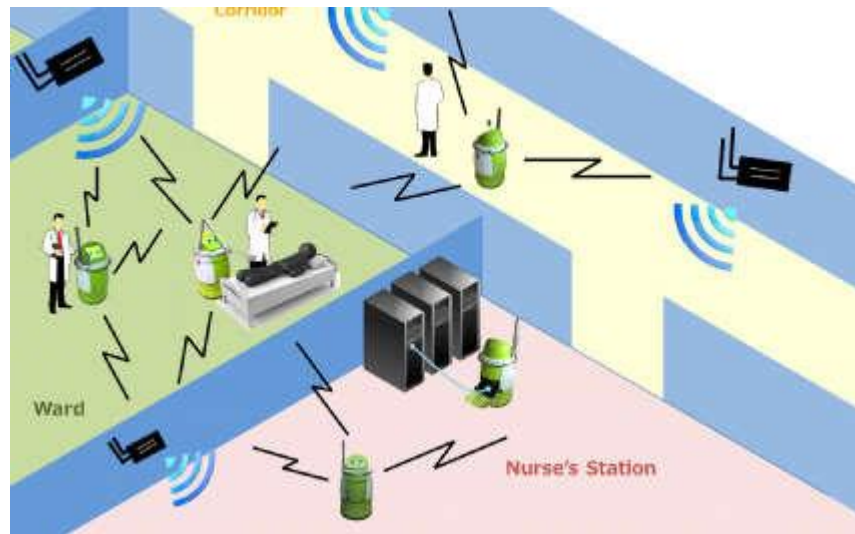


Рисунок 1.3 – Метод триангуляції для визначення положення в просторі

У разі пасивних орієнтирів робот повинен їх активно шукати, щоб визначити свої координати. Наприклад, у разі виявлення орієнтирів з використанням системи технічного зору використовуються методи обробки зображення. При виявленні трьох або більше орієнтирів, можна використовувати методи триангуляції або трилатерації для визначення положення робота. Пасивний орієнтир може бути штучним або природним і продуктивність системи локалізації залежить від типу орієнтиру.

Використання штучних орієнтирів має низку недоліків. Одним із них є те, що якщо робот знаходиться далеко від орієнтиру, тоді система локалізації оцінює позиції робота не дуже точно. Проектування та побудова штучних орієнтирів сама собою є складною проблемою. Як альтернативний підхід до проблеми позиціонування використовуються природні орієнтири. Такими орієнтирами у міських умовах є, наприклад, будівлі та інші споруди.

1.2 Аналіз системи навігації в виробничому просторі

Для досягнення мети (поставлених координат) роботу необхідно вирішити проблему побудови карти навколишнього середовища в виробничому просторі.

Побудова карти – вирішення проблеми збору та інтеграції інформації, зібраної з датчиків, встановлених на борту. Одним із прикладів такого збору інформації є лазерні далекоміри, ультразвукові генератори (сонари). Однак поодинокі використання даних приладів є проблематичним. Лазерний промінь допоможе отримати образ середовища тільки в зоні прямої видимості, а дрібні перешкоди на шляху променю даватимуть похибки в координатах, тоді як ультразвукові датчики мають властивість великого часу відгуку сигналу, що не дозволяє роботу швидко пересуватися. Застосування даних датчиків залежить від середовища роботи мобільного робота. Також варто зазначити, що для побудови точної тривимірної карти в режимі реального часу необхідні суттєві обчислювальні потужності, що не зовсім задовольняє параметри мобільності, автономності та енергонезалежності робота.

Наступний спосіб побудови карти характеризується його формальним, структурованим «словесним» описом, що можна досягти з допомогою технічного зору. Машинний зір, у свою чергу, несе з собою низку інших проблем, пов'язаних із оклюзією, оптичними помилками, правильним розпізнаванням об'єктів тощо.

Робот повинен знати своє реальне місцезнаходження, а воно майже завжди відрізняється від того, що зберігається в бортовій системі [7].

Для вирішення проблеми визначення місця розташування робота на карті (локалізації), тобто визначення його координат, виділяються три навігаційні схеми:

– локальна – визначення координат пристрою щодо стартової точки. Ця схема затребувана розробниками безпілотних літальних апаратів та наземних

роботів, які виконують місії в межах заздалегідь відомої області, з готовою картою;

- глобальна – визначення абсолютних координат пристрою під час руху на незнайомому маршруті;

- персональна – позиціонування роботом частин свого тіла та взаємодія з прилеглими предметами, що актуально для пристроїв, забезпечених маніпуляторами.

Системи навігації можуть бути пасивними та активними. Пасивна система навігації передбачає прийом інформації про власні координати та інші характеристики свого руху від зовнішніх джерел, а активна розрахована визначення місця розташування лише самотужки. Як правило, усі глобальні схеми навігації пасивні, локальні бувають і тими та іншими, а персональні схеми завжди активні.

Прикладами пасивної навігації є системи визначення координат радіомаяків, за допомогою маркерів, тріангуляційним способом. У більш масштабному варіанті використовуються GSP або Galileo. Даний тип навігації має свої мінуси:

- точність залежить від кількості репітерів у системі;
- необхідність маяків на певній площі;
- похибка у визначенні координат за рахунок особливостей рельєфу;
- недоступність сигналу в складних метео або магнітних умовах та ін.

Також точність даних систем іноді перевищує розміри мобільного пристрою. Таким чином, ця система ще досить довго не зможе використовуватися як основна задача глобальної навігації невеликих апаратів (мобільних роботів) [8].

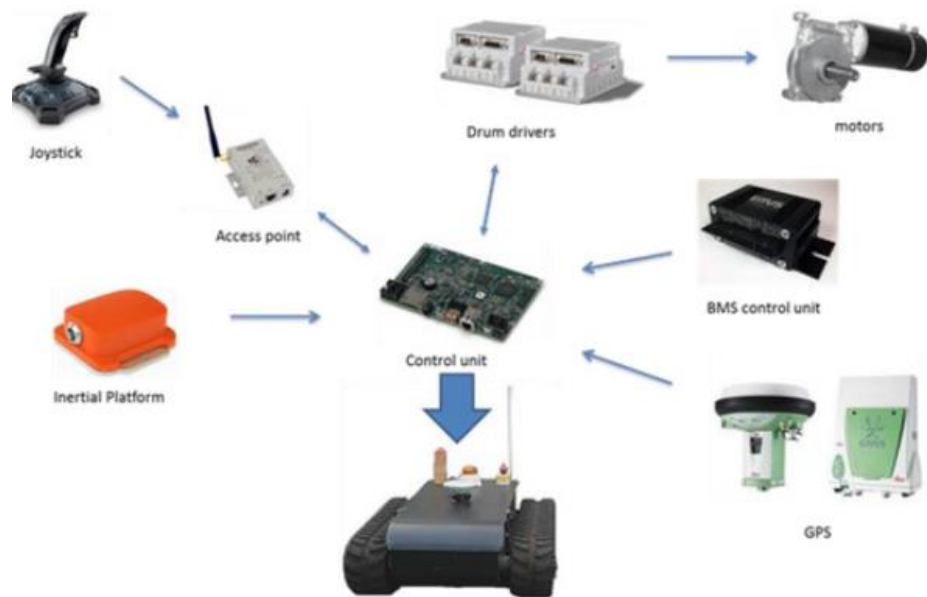


Рисунок 1.4 – Принцип використання системи GPS для навігації

Найвідоміший представник активної навігації – інерційні навігаційні системи. Цей тип навігації повністю автономний. Основна ідея отримання координат полягає в інтегруванні отриманих даних, звідси випливають їх основні мінуси цього типу навігації [9].

Поява помилки при інтегруванні та накопичення помилок за час активної роботи, тобто чим довше в русі знаходиться об'єкт, оснащений інерційною навігаційною системою (ІНП), тим більшою буде похибка у визначенні координат. Крім того, ІНС малоефективні у випадках, коли швидкість об'єкта часто і різко змінюється.

Недолік перелічених вище способів навігації пов'язаний з відсутністю реалізації в пристроях інтелектуальної складової. Гібридна бортова система управління роботом використовує навігаційні засоби всіх видів, але займається, перш за все, оцінкою навколишнього оточення, аналізом виконуваного завдання та прийняттям рішень. Апарат намагається побудувати власний образ середовища, в якому йому доводиться діяти, після чого формує маршрут і рухається ним, постійно зіставляючи свою карту простору з даними, отриманими від пристроїв навігації. Метод одночасної навігації та побудови

карти стає дуже популярним і називається SLAM (від англ. Simultaneous Localization And Mapping) [7]. Застосуванням даного методу вирішуються два питання навігації: робот будує карту та знаходить свої координати на ній. Складність технічного процесу визначення поточного розташування та побудови карти обумовлена низькою точністю приладів, що беруть участь у процесі обчислення поточного розташування.

Значно перспективніше формування точної геометричної моделі навколишнього простору. Але для цього треба мати максимально детальну інформацію про навколишнє середовище, а надати його можуть пристрої візуального спостереження (машинний зір) високої роздільної здатності та хороші системи розпізнавання об'єктів [10].

Перспективи цього методу дуже хороші: використання методів штучного інтелекту, розширеного фільтра Калмана покращують швидкість SLAM-методу.

У зв'язку з необхідністю застосування груп мобільних роботів значно зріс інтерес до проблем групової навігації та інтелектуального управління рухом мобільних роботів як агентів складних мультиагентних робототехнічних систем, що колективно вирішують спільне завдання. У зарубіжних виданнях з'являється термін "мультиагентні автономні системи навігації". До складу таких рішень входить група мобільних роботів, які використовують на своєму борту гібридні рішення навігації, що базуються на ІНС, зокрема безінерційні навігаційні системи. У таких умовах кожен агент робить свій внесок у побудову карти. Загальна глобальна навігація може здійснюватись шляхом розподіленого обчислення.

Система глобального позиціонування дозволяє збільшити точність до 1 м, потужність сигналу зростає в кілька разів, що дозволяє приймачам легше сприймати сигнали, особливо у містах з висотними будинками, під кронами дерев і навіть у приміщеннях. Планується введення єдиної частоти роботи супутників, завдяки чому пристрої зможуть визначати місце розташування, комбінуючи дані супутників різних систем навігації.

Найважливішим чинником при обчисленні координат є час. Тому, забезпечивши мобільну інерційну навігаційну систему мініатюрним атомним годинником з великою точністю, можна домогтися збільшення точності у підрахунку координат.

Створення інтелектуальних маяків, «локальний» варіант GPS, стає популярним в авіації та гірничій промисловості. Так звана система позиціонування без GPS (NGBPS) компанії Locata може забезпечити точне позиціонування в умовах неможливості GPS. У новій системі LocataNet для визначення розташування об'єкта в просторі застосовується алгоритм, дуже схожий на визначення координат у системі GPS. Однак LocataNet використовує крім космічних навігаційних супутників ще й приймачі сигналу, розташовані на поверхні Землі.

Бурхливе зростання ринку мобільних пристроїв ініціює створення нової комерційної ніші – "доповнена реальність". Впровадження технології базуватиметься на апаратних особливостях Bluetooth 4.0 та Wi-Fi і матиме суто програмно-алгоритмічний апарат.

Оскільки багато вищеописаних технологій все частіше використовують повсякденні сигнали Wi-Fi, Bluetooth, GPS-пристроїв, а ті, у свою чергу, зустрічаються майже скрізь, можна сказати, що застосування і комплексування інформації з такої великої кількості датчиків, дозволить збільшити точність визначення координат у кілька разів. Створення якогось інформаційного поля навігації та маршрутизації дозволить картографувати та локалізуватися на місцевості з великою точністю.

Збільшення обсягу завдань перед мобільними роботами ставить роль мультиагентних робототехнічних систем нового рівня [11]. Поняття "мультиагентні автономні навігаційні системи" застосовує нові алгоритми. Використання методів штучного інтелекту дозволить комплексувати інформацію з різних датчиків, не використовуючи великі обчислювальні потужності, але в умовах великої невизначеності. Мультиагентність системи забезпечуватиме принцип надмірності навігаційної інформації, а експертні

системи дозволять фільтрувати інформацію в різних умовах роботи мобільного робота.

Майбутнє за інтегруванням інформації про положення об'єкта, з різних типів приладів отримання. У кожного типу навігації є свої плюси та мінуси, а інтелектуальні системи зможуть виявити та застосувати точні, правильні значення – це перспективи розвитку мобільної навігації.

1.3 Метод позиціонування на основі технології BLE в виробничому просторі

Навігація є першорядною системою, яка допомагає користувачу переміщатися роботизованим пристроєм з точки А в точку Б. На даний момент існує два типи навігаційних систем: навігація на вулиці та в приміщенні [12].

Зовнішня навігація – це техніка навігації, яка використовує супутниковий сигнал. Без сигналу від супутника навігація не працюватиме належним чином, оскільки вона значною мірою залежить від системи глобального позиціонування (GPS). Однак GPS практично неможливо використовувати в приміщенні, оскільки сигнал не може проникнути всередину будівлі. Оскільки такі будівлі, як торговельний комплекс, лікарня та аеропорт, стають більшими, це може створити проблему під час пошуку конкретного місця, отже, необхідно запровадити нову техніку внутрішньої навігаційної системи.

Bluetooth – це дешевий пристрій, який в основному використовується для передачі даних або зв'язку з іншими пристроями. Остання технологія Bluetooth називається Bluetooth Low Energy (BLE) або Bluetooth 4.0.measurements. Ця система має тривалий час сканування, що підходить для вирішення задачі позиціонування мобільних роботизованих пристроїв в приміщенні під час сканування великої площі. Тому внутрішню навігаційну систему можна розробити за допомогою Bluetooth 4.0.

Незважаючи на те, що GPS дуже корисний для визначення точного розташування смарт-пристрою лише з невеликими похибками, він все одно не здатний здійснювати навігацію в приміщенні, оскільки супутниковий сигнал не може проникнути крізь товсту стіну. Навігація в приміщенні також важлива в наші дні, оскільки будівля стає все більшою та складнішою, тому майже неможливо знайти конкретне місце в будівлі, не звертаючись до плану поверху. Крім того, витрачається час на переміщення в будівлю в пошуках конкретного місця чи продукту. Усе це можна вирішити за допомогою системи внутрішньої навігації, яка може відстежувати місцезнаходження користувача в режимі реального часу за допомогою шукача шляху, щоб показати користувачеві найкоротший маршрут. Замість використання супутника для точного визначення місцезнаходження користувача, BLE замінить супутник і визначить місцезнаходження користувача.

Загалом маяки BLE будуть розміщені в радіусі від 10 до 100 м у будівлі, щоб створити велике покриття сигналів Bluetooth, які можуть приймати спеціальні приймачі, або, навіть смартфони. Коли приймач наблизиться до зони сигналу Bluetooth, BLE почне визначати місцезнаходження найближчого маяка BLE. Коли маяк ідентифікує приймач, він надішле унікальний ідентифікатор маяка та покаже розташування приймача в спеціальній програмі. Отже, таким чином, можна локалізувати розташування приймача в будівлі.

Існує багато подібних досліджень, пов'язаних із маяком Bluetooth, наприклад Indoor.rs [13]. Це одна з компаній-розробників програмного забезпечення, яка вивчає технологію позиціонування та навігації в приміщеннях за допомогою маяків BLE. Indoor.rs створює додаток для смартфона, який може направляти користувача до певної області.

Окрім Indoor rs, існує ще одна служба, яка призначена для навігації в приміщеннях під назвою Wikibeacon.org. Ідентифікатор маяка BLE і місцезнаходження надаються службою з Wikibeacon.org. Wikibeacon також має власні програми для iOS та Android, призначені для маяка. Їхні маяки

будуть додані на карту як маркери з інформацією про їх останнє відоме місцезнаходження. Wikibeacon також може допомогти створити універсальний унікальний ідентифікатор (UUID), головний і другорядний для маяка. Таким чином, вони не будуть подвійними UUID і призведуть до зіткнення маяків один з одним.

До маяка BLE більшість попередніх робіт використовували класичне позиціонування Bluetooth і техніку від близькості до трилатерації та, нарешті, до відбитків пальців. Однак у класичному Bluetooth є обмеження. Час, необхідний телефону для сканування найближчого маяка, занадто довгий, оскільки це займає близько 10 секунд [5], отже, через це обмеження використання класичного маяка Bluetooth не є популярним.

Найпершим підходом до навігації в приміщенні є використання переносних датчиків. Користувач повинен носити спеціальне обладнання, яке включає в себе дисплей і датчики, які допомагають збирати всі необхідні дані. У цій системі використовуються такі датчики, як 3D-акселерометр, 3D-магнітометр, флуоресцентний детектор і датчик температури.

Одним із методів, який використовує принцип, подібний до навігації в приміщенні, є позиціонування в приміщенні. Позиціонування призначене для визначення та вимірювання розташування позиції. Тоді як навігація в приміщенні більше зосереджена на орієнтуванні. Окрім використання датчика, інші дослідження показують, що система UltrawideBand (UWB) підходить для внутрішньої системи позиціонування [14]. UWB – це сигнал, який надсилається супутником, де він проникає в будівлю, а потім подається на маяк, який поширює радіосигнал по всій будівлі. Інформацію можна отримати, натиснувши на щоглу за допомогою UWB радіо.

Bluetooth Low Energy або BLE використовується для передачі або отримання сигналів від інших пристроїв Bluetooth або до них. Головною перевагою BLE є те, що він споживає менше енергії порівняно з попередником. BLE споживає лише 15 мА під час пікової передачі та 1мкА у

стані сну. Крім того, сам BLE призначений для надсилання невеликих пакетів даних, щоб не споживати багато енергії [12].

На рисунку 1.5 показано канал і частоту для BLE. BLE працює в ширині 2 МГц і має 40 каналів. Оскільки BLE працює лише протягом дуже короткого часу, це точно може зменшити споживання електроенергії. Помаранчевий сигнал означає рекламні сигнали. У цьому каналі Bluetooth буде надсилати дані на приймач [15]. Враховуючи, що основною метою BLE є скорочення витрат, зменшення затримки та підвищення ефективності позиціонування, BLE розділяє рекламні канали шляхом резервування виділених рекламних каналів. Це пояснюється тим, що використання лише одного каналу для реклами може спричинити масову боротьбу за цей канал.

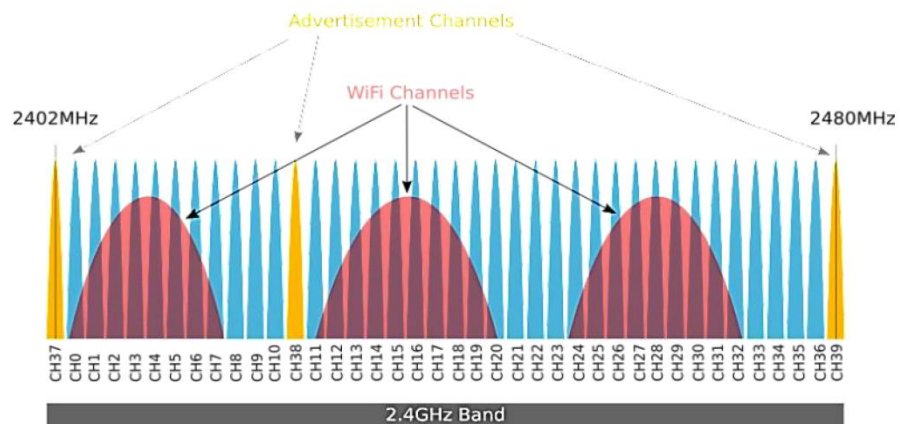


Рисунок 1.5 – Канали та частоти, що характерні для BLE

Тестовий сигнал BLE відповідає періодичному протоколу. З кожним початком тестового періоду кожен сигнал передає своє повідомлення по кожному виділеному каналу. Таким чином, він шукатиме пристрої для прослуховування. Через те, що багато сигналів розташовано в одному місці, він може використовувати той самий розмір періоду тестового сигналу, де кожен сигнал випадковим чином додає до 10 мкс зміщення до кожного періоду передавання, щоб можна було уникнути повторних зіткнень. Якщо два

сигнали мають перекриття, що передаються протягом активного періоду, додане зміщення значно зменшує ймовірність іншого зіткнення. Якщо рекламне повідомлення невелике, цей метод дозволяє уникнути сильних колізій у розгортаннях до 200 або більше сигналів.

Унікальний ідентифікатор (UUID) повідомлення діятиме як відбиток пальця, який можна диференціювати та розпізнавати. Окрім цього, зняття «відбитків пальців» також є процесом створення колекції окремих місць. Коли користувач або мобільний пристрій проходить у зони, що обладнані маяками, поточна потужність сигналу на основі розташування маяка буде вимірюватися та порівнюватися з базою даних для визначення місцезнаходження користувача [16].

На рисунку 1.6 показано процес роботи системи позиціонування на основі BLE маяків [12].

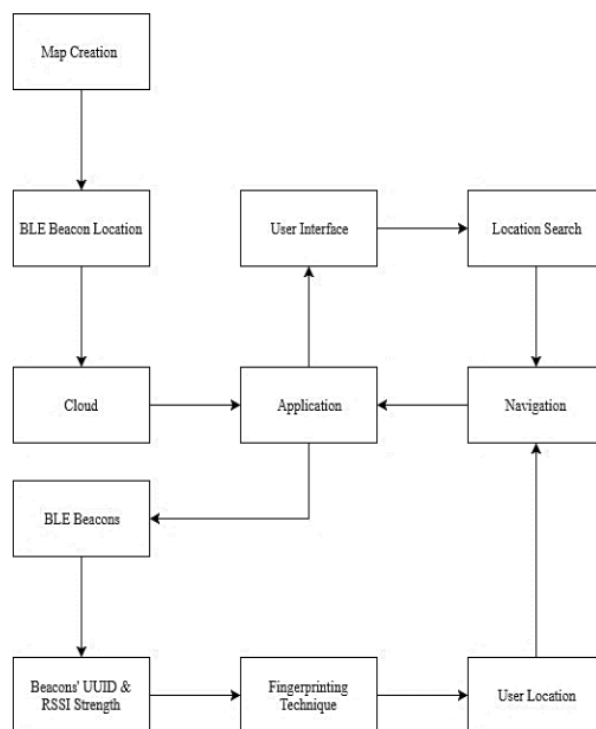


Рисунок 1.6 – Процес впровадження та роботи системи позиціонування на основі BLE маяків

Процес визначення позиції мобільного пристрою починається зі створення плану поверхів цільового розташування. Далі на місці буде розміщено чотири маяки з загальним радіусом дії від 70 м, оскільки максимальна дальність маяка становить 14 м. Якщо маяки розміщені за межою максимальної дальності, буде зона, яку неможливо виявити, тому метод триангуляції не працюватиме належним чином. Після визначення місцезнаходження маяка та карти їх розташування завантажують у хмару, щоб програма для Android могла отримати дані (місцезнаходження маяка та карту).

Інтерфейс користувача програми містить екран входу, де користувач може увійти та отримати доступ до хмари. У додатку також буде функція пошуку місцезнаходження, щоб користувач міг легко знайти місцезнаходження. Після вибору місцезнаходження воно буде відображено в програмі та готове для навігації.

Щоб навігація працювала, додаток має бути підключено до Інтернету. Основна функція маяка – надсилати сигнали, а не отримувати дані зі смартфона. Кожен маяк має власний ідентифікатор, який використовуватиметься для визначення того, який маяк є найближчим до смартфона. Індикація рівня отриманого сигналу (RSSI) використовується для порівняння кожного маяка на основі відстані між маяком і смартфоном. Чим далі приймач від маяка, тим менше значення RSSI, отже, розташування маяка можна визначити правильно. Після визначення цільового місця розташування користувача можна нанести на карту та розпочати навігацію.

Карта створена за допомогою Java OpenStreetMap Editor (JOSM). Макет розроблений у 2D, щоб програма JOSM могла декодувати та читати карту. Кожна з ділянок приміщення має відповідну назву відповідно до розташування.

Оптимальна кількість маяків BLE визначається за допомогою рівняння (1.1):

$$N_{beacon} = \frac{Area}{\pi \cdot R^2}, \quad (1.1)$$

де R – максимальний радіус передавання маяка, м,

$Area$ – площа приміщення, де розгортається мережа BLE-маяків.

У тестовому випробуванні площа становить приблизно 3500 м², а радіус встановлено на 14 м (на основі показань RSSI), тому оптимальна кількість маяків – шість. Обраним місцем є ряд промислових приміщень, де кожна кімната представлятиме виробничу або складську ділянку. Таким чином, один маяк використовується для кожної кімнати та два маяки на відстані близько 14м один від одного. На рисунку 2.7 показано розташування маяків у тестовому приміщенні [12].

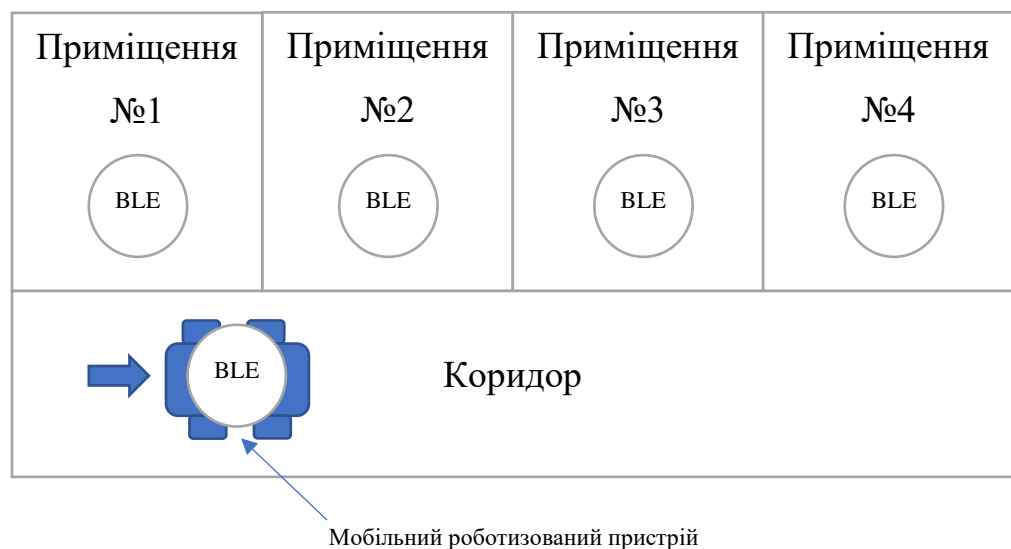


Рисунок 1.6 – Розташування маяків у тестовому приміщенні сховища на виробництві

Після розміщення маяка ідентифікаційні номери готові до налаштування та завантаження в хмару. Щоб записати сигнал ідентифікаційних номерів, потрібно запустити програму та налаштувати її на запис сигналу від BLE маяка. Під час цієї процедури програма буде активно сканувати всі маяки в області. Пристрій, який запускає програму, повинен рухатись від одного маяка

до іншого. Причиною цього є отримання показань сигналів RSSI. Якщо сигнал RSSI високий, програма визначить, що приймач знаходиться близько до маяка, тому збереже знайдений UUID в базу даних. Потім, під час руху до місця з двома або більше маяками, він перевірить UUID і визначить найближчий до нього маяк на основі сигналу рівня RSSI. Після того, як усі маяки буде відскановано, програма завантажить дані в хмару, і основна програма буде готова до використання, оскільки запис відбитків пальців буде завершено.

На рисунку 1.8 показано типову зміну сигналу RSSI в залежності від відстані приймача від маяка [12].

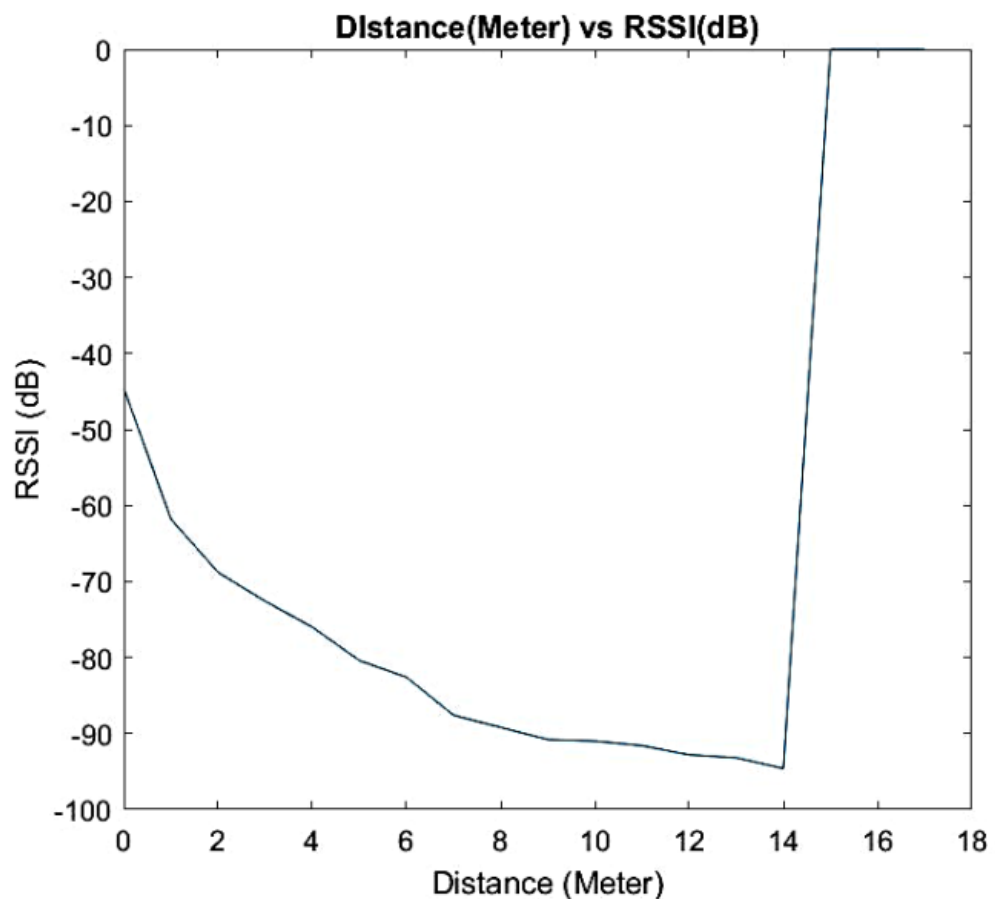


Рисунок 1.8 – Типова зміна сигналу RSSI в залежності від відстані приймача від маяка

З графіка на рисунку 1.8 видно, що коли приймач знаходиться поруч із маяком, середнє значення RSSI становить -44,6 дБ, а коли маяк знаходиться на відстані 14 метрів від маяка, середнє значення RSSI становить -94,6 дБ. Однак, як тільки приймач переходить на відстань понад 14 м, зв'язок між приймачем і радіомаяком розривається [12].

1.4 Висновки по першому розділу

В результаті виконання першого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз методів локалізації мобільного робота на виробництві. Розглянуті основні типи датчиків, що використовується для визначення положення мобільного робота в виробничому просторі.

Виконано аналіз існуючих систем навігації мобільних автономних робототехнічних засобів, показані їх переваги та недоліки. Визначено, що системи навігації можуть бути пасивними та активними. Розглянуті системи GPS навігації, метод одночасної навігації та побудови карти, що називається SLAM та візуальної одометрії. Наведено стислий огляд даної технології та виконано огляд аналогічних рішень із застосуванням BLE маяків.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

2.1 Аналіз методів визначення місцезнаходження

Відомі декілька методів визначення позиції в просторі [17]. На рисунку 2.1 показані принципи визначення координат за методами АОА та ТОА.

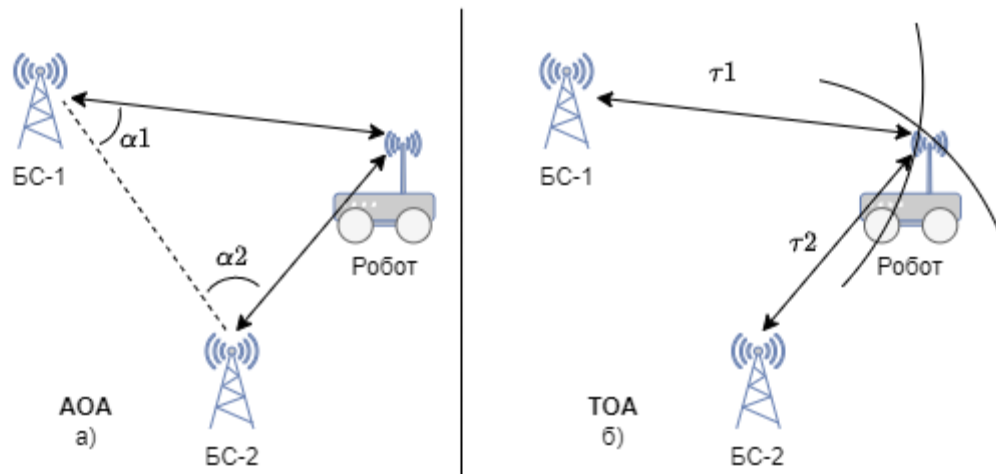


Рисунок 2.1 – Принципи визначення координат за методами АОА та ТОА.

Метод АОА (Angle of arrival) (рисунок 2.1, а) – розташування пристрою визначається в межах трикутника, утвореного перетином осей антен трьох базових станцій (метод модифікованої триангуляції). Базові станції використовують спрямовані антени або антенні масиви для визначення кута вхідних сигналів, що надсилаються мобільним пристроєм.

В системах позиціонування, що використовують метод ТОА (Time of Arrival) (рисунок 2.1, б) [17], вимірюється час проходження сигналу від пристрою до базової станції. За даним методом відстань до об'єкта розраховується на підставі різниці між часом надсилання сигналу та його

отримання. У той же час цей підхід вимагає суворого дотримання часу синхронізації часу відправника та одержувача, що досить важко досягти. Одним із різновидів використання даного принципу, є застосування ультраширокого діапазону (ultra-wide band) смуги вимірювання.

На рисунку 2.2 показані принципи визначення координат за методами TDOA та RSSI.

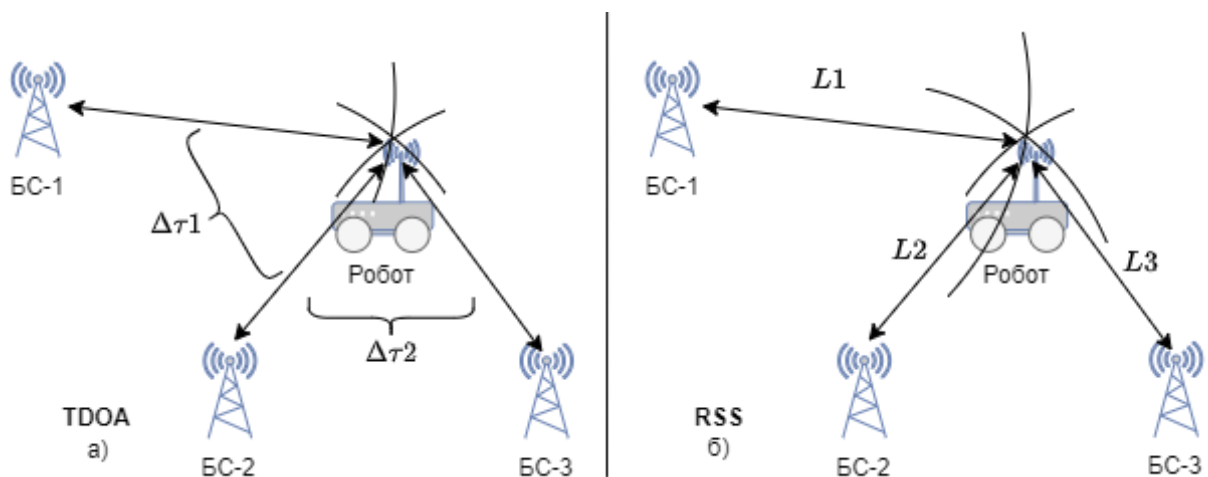


Рисунок 2.2 – Принципи визначення координат за методами TDOA та RSSI.

У системах TDOA (рис. 2.2, а) [17], мобільний пристрій посилає сигнали позиціонування до оточуючих базових станцій, та розраховує часову різницю прибуття отриманих сигналів. Основною перевагою систем TODA є те, що необхідно лише синхронізувати вимірювальні вузли (базові станції). Ця синхронізація, як правило, здійснюється через локальну мережу.

RSSI (Received Signal Strength Indication) використовується для вимірювання рівня потужності сигналу [18]. Найпростіші схеми розробляються, щоб прийняти вхідний сигнал і сформувати аналогову вихідну напругу (або відповідний цифровий код, одержуваний після подачі цієї напруги на АЦП), пропорційну потужності прийнятого сигналу. Можна використовувати даний показник, щоб оцінити відстань до передавача або до базової станції.

Метод позиціонування, заснований на отриманні даних RSSI (рис. 2.2, б) використовує характеристику розповсюдження радіо сигналу (потужність сигналу). Використовуючи правильну модель розповсюдження, ми можемо розрахувати відстані між мобільним пристроєм та базовою станцією, тим самим визначається місце розташування мобільного робота. Цей метод добре працює на невеликих відстанях, але із збільшенням діапазону дає велику помилку через специфіку розповсюдження радіосигналу.

Враховуючи специфіку пристроїв з вбудованим BLE приймачем, наприклад, ESP32 та інші, де радіус дії радіосигналу визначається в межах 10 метрів, дану технологію можна застосувати для визначення положення мобільного робота в промисловому приміщенні відносно певної кількості базових станцій.

На рисунку 2.3 показано принцип визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій

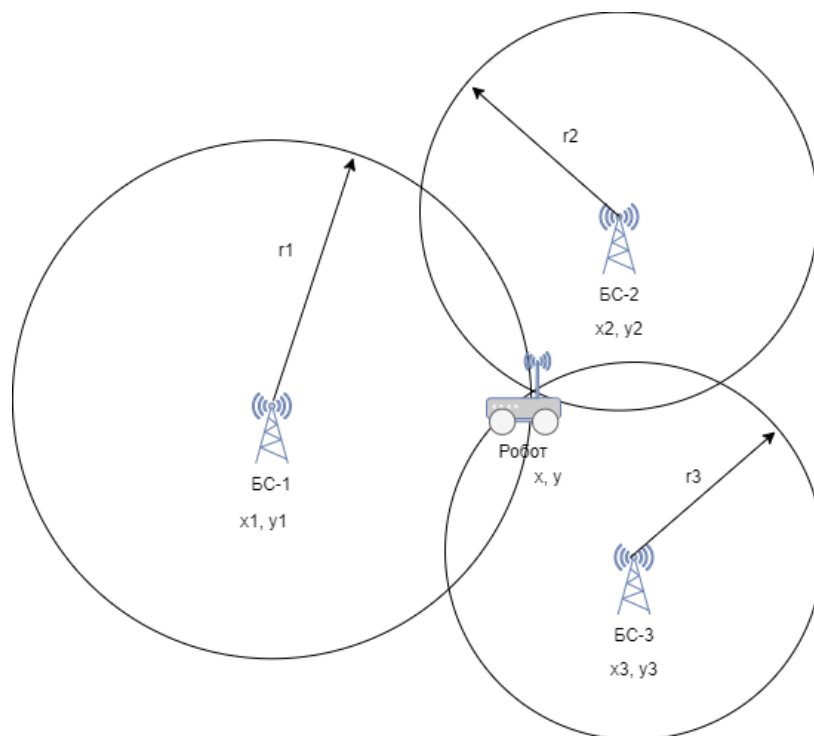


Рисунок 2.3 – Принцип визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій

2.2 Розробка архітектури автоматизованої системи

Для визначення місцезнаходження мобільного робота в промисловому приміщенні буде використовуватись метод триангуляції. Триангуляція – це метод, який використовується для розрахунку відносного розташування пристрою за допомогою відстаней, отриманих шляхом розрахунків на основі вимірюваних значень RSSI. Дані триангуляції показують відстань мобільного пристрою від базових станцій, що побудовані на основі ESP32, використовуючи фіксовані координати станцій (x_n, y_n) . Щоб визначити точне положення робота, цей метод використовує площу перекриття, утворену трьома колами з радіусами у центрі розташування базових станцій, що задає область локалізації для вимірних відстаней.

На рисунку 2.3 кола представляють всі можливі місця мобільного пристрою на заданій відстані (радіусу) від базової станції. Метою даного методу є розрахунок координат (x, y) розташування мобільного робота в просторі, що є точкою перехрестя трьох кіл. Найменш квадратний метод (LSQ) є ефективним способом визначення положення мобільного пристрою [19].

Координати кожної базової станції задаються на етапі підготовки до експерименту, або у вигляді констант (наприклад, на рисунку 2.3, БС-1 (x_1, y_1) , БС-2 (x_2, y_2) , БС-3 (x_3, y_3)).

Архітектура запропонованого програмно-апаратного комплексу показана на рисунку 2.4 [20].

Для визначення місцезнаходження безпілотного наземного мобільного робота застосовуються базові станції на основі модулів ESP32. Для визначення положення робота мінімальна необхідна кількість станцій дорівнює трьом. Кожна станція має автономне джерело живлення. Мобільний пристрій послідовно підключається до всіх станцій, що знаходяться в зоні його видимості. Для цього кожні 5 - 10 секунд відбувається сканування діапазону радіочастот та визначаються пристрої, що відповідають характеристикам

базових станцій. Після підключення до станції пристрої обмінюються повідомленнями для визначення потужності радіосигналу за допомогою RSSI.

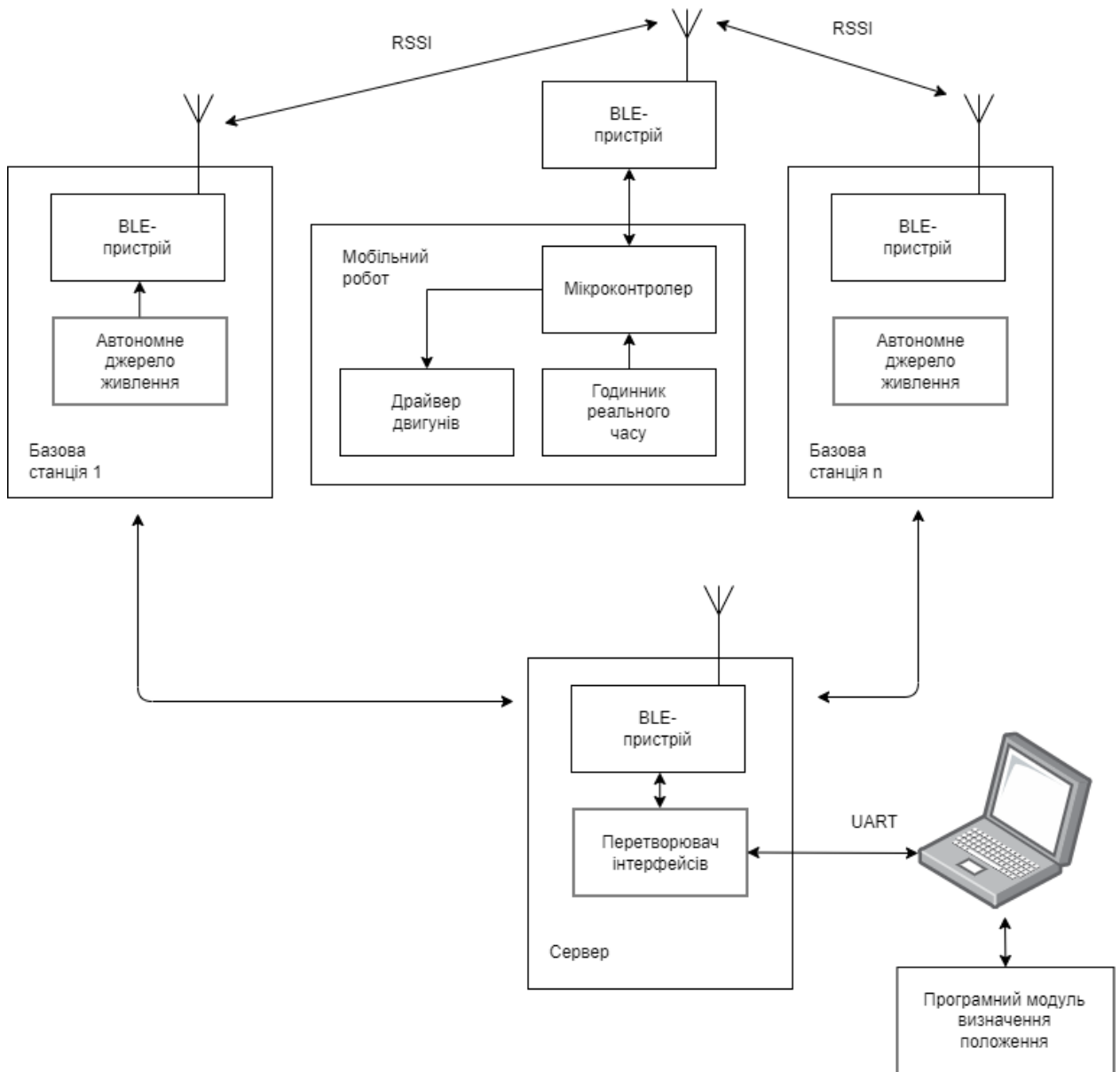


Рисунок 2.4 – Архітектура системи автоматизації локального позиціонування

Кожна базова станція зберігає дані про останній сеанс зв'язку у внутрішній пам'яті. Сервер програмно-апаратного комплексу з певною періодичністю опитує всі наявні базові станції та одержує від них набір даних останніх сеансів.

Кожний набір даних містить ID пристрою, MAC адресу пристрою та базової станції, значення RSSI, що було отримано в процесі сеансу зв'язку. Ці дані за допомогою одного інтерфейсів зв'язку, наприклад, UART, потрапляють до персонального комп'ютера, де програмний модуль визначає координати місцезнаходження мобільного роботу.

Як показано на рисунку 2.3, щоб розрахувати координати позиції мобільного роботу (BLE-пристрою), необхідні координати центрів трьох кіл $((x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3))$, що є попередньо визначеними координатами базових станцій. Радіуси кожного кола – це відстань між кожним BLE-пристроєм та роботом. Для кожна кола справедливо рівняння [18, 20, 21]:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (2.1)$$

В результаті ми отримує наступні рівняння:

$$\begin{cases} (-x_1 + x_2)2x + (-y_1 + y_2)2y = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ (-x_2 + x_3)2x + (-y_2 + y_3)2y = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \end{cases} \quad (2.2)$$

Перепишемо ці два рівняння, використовуючи константи A, B, C, D, E, F, що призводить до наступної системи із двох рівнянь:

$$\begin{cases} A_x + B_y = C \\ D_x + E_y = F \end{cases} \quad (2.3)$$

Вирішуючи рівняння для x та y, отримуємо:

$$x = (C \cdot B - F \cdot B) / (E \cdot A - B \cdot D), \quad (2.4)$$

$$y = (C \cdot D - A \cdot F) / (B \cdot D - A \cdot E). \quad (2.5)$$

Таким чином, отримуємо координати x та y у визначеному при проектуванні просторі.

Для отримання радіусів r_1, r_2, r_3 необхідно обчислити відстань від мобільного пристрою до відповідної базової станції на основі даних RSSI. Для рішення даної задачі скористуємось рівнянням [22]:

$$L = 10^{\left(\frac{\text{Measured Power} - \text{RSSI}}{10 \cdot N}\right)}, \quad (2.6)$$

де Measured Power – вимірювана потужність (RSSI) на відстані 1 м від передавача;

RSSI – отримане значення RSSI з базових станцій;

$N = 2$.

Необхідно відмітити, що на якість сигналу впливає розташування модулів зв'язку, орієнтація антени, віддаленість базових станцій та мобільного пристрою від стін будівлі, наявність інших пристроїв в ефірі. Також важливу роль відіграє частота роботи пристроїв, в нашому випадку 2,4 ГГц. В даному випадку такі завади, як людина в приміщенні, можуть впливати на результати виміру відстані між пристроями. Таким чином, для збільшення точності позиціонування пропонується використовувати більше базових станцій, ніж мінімально можливо для конкретного типу приміщення.

2.3 Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи

Алгоритм роботи автоматизованої системи показано на рисунку 2.5. Даний алгоритм передбачає рух мобільної роботизованої платформи прямолінійно вздовж виробничих приміщень або стелажів у сховищі. На рисунку 2.6 показана схема автоматизованого сховища.



Рисунок 2.5 – Алгоритм роботи автоматизованої системи

На початку роботи формується широкомовний запит до всіх базових станцій, що знаходяться в полі зору BLE передавача мобільного робота. Після цього очікуються відповіді від наявних базових станцій.

Якщо відповідь отримана, то перевіряється параметри базової станції:

- назва станції;
- поточні координати розташування станції;
- потужність радіосигналу RSSI.

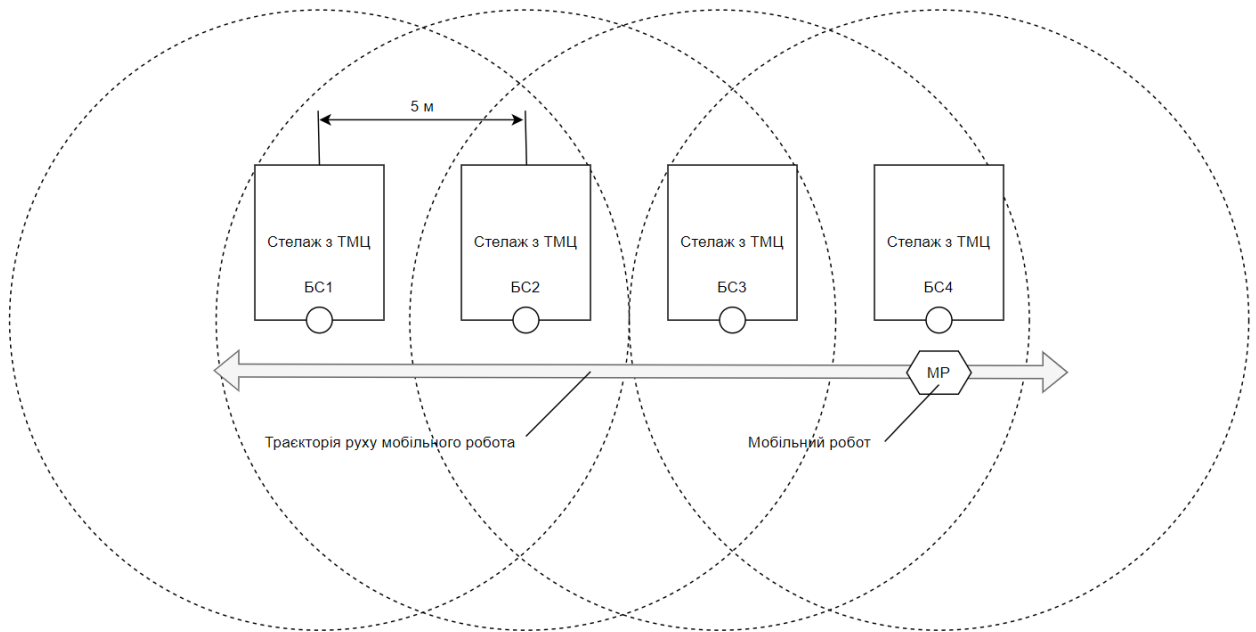


Рисунок 2.6 – Схема автоматизованого сховища ТМЦ

На основі RSSI визначається відстань до базової станції. На основі інформації про місцезнаходження базової станції визначаються поточні координати мобільного робота.

Далі цикл роботи повторюється для всіх базових станцій, що знаходяться в радіусі дії BLE приймача модуля ESP32. Чим більше базових станцій буде знаходитись в радіусі дії приймача, тим точніше можна визначити поточне розташування мобільного робота.

2.4 Висновки по другому розділу

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз методів визначення місцезнаходження. Показані принципи визначення координат за методами AOA та TOA та показані порівняння з принципами визначення координат за методами TDOA та RSSI.

Метод позиціонування, заснований на отриманні даних RSSI використовує характеристику розповсюдження радіо сигналу (потужність сигналу). Використовуючи правильну модель розповсюдження, ми можемо розрахувати відстані між мобільним пристроєм та базовою станцією, тим самим визначається місце розташування мобільного роботу.

Розроблена архітектура автоматизованої системи локального позиціонування з використанням модулів ESP32.

Розроблено алгоритм роботи системи автоматизації локального позиціонування. Даний алгоритм передбачає рух мобільної роботизованої платформи прямолінійно вздовж виробничих приміщень або стелажів у сховищі.

3 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Вибір компонентів

Для побудови базових станцій та мобільного рухомого пристрою будемо використовувати модулі з чипами ESP32. Мікроконтролери та модулі на базі ESP32 від компанії Espressif Systems завоювали велику популярність серед розробників завдяки своїм багатим функціональним можливостям та доступності. Вони широко використовуються для проектів, пов'язаних з інтернетом речей (IoT), побудови бездротових мереж, а також для взаємодії через Wi-Fi та Bluetooth. Однією з найважливіших функцій ESP32 є підтримка Bluetooth Low Energy (BLE).

ESP32 – це 32-бітний мікроконтролер з вбудованими можливостями для бездротового зв'язку. Він має такі основні характеристики:

- двоядерний процесор (XTensa LX6), що працює на частоті до 240 МГц;
- інтеграція Wi-Fi (стандарт 802.11 b/g/n) та Bluetooth;
- підтримка Bluetooth Classic та BLE;
- вбудовані цифрові та аналогові інтерфейси: GPIO, ADC, DAC, I2C, SPI, UART;
- флеш-пам'ять до 16 МБ та оперативна пам'ять (RAM) до 520 КБ;
- підтримка безпроводного оновлення програмного забезпечення (OTA);
- низьке енергоспоживання, що робить ESP32 підходящим для автономних рішень.

Ці модулі знаходять застосування в різних проектах: від смарт-дімів і носимих пристроїв до промислових систем моніторингу та управління. ESP32 підтримує два основні стандарти Bluetooth:

- Bluetooth Classic – призначений для обміну великими об'ємами даних та сумісності з аудіо;

– Bluetooth Low Energy (BLE) – оптимізований для передачі невеликих обсягів даних із мінімальним енергоспоживанням, що робить його ідеальним для IoT-пристроїв.

BLE – це енергоефективний стандарт бездротового зв'язку, призначений для передачі невеликих пакетів даних на короткі відстані. Він розроблений для додатків, де важлива низька потужність при тривалому часу роботи від батареї. Основні сфери застосування BLE включають фітнес-трекери, носимі пристрої, медичне обладнання, системи безпеки, маяки (beacons) та інші пристрої IoT.

Дані пристрої можуть працювати роками на одному акумуляторі, завдяки оптимізації споживання енергії, коли пристрій перебуває у режимі очікування.

BLE з'єднання створюється швидко, зазвичай за мілісекунди, що дозволяє зекономити енергію. BLE призначений для обміну невеликими обсягами даних, що робить його ідеальним для сенсорних мереж або пристроїв, що передають інформацію періодично.

BLE може працювати на відстані до 100 метрів (залежить від умов), що дозволяє використовувати його для розумних будинків, маяків та інших додатків IoT.

Важливою особливістю є те, що ESP32 може працювати як у ролі периферійного пристрою (peripheral), так і центрального пристрою (central), що забезпечує гнучкість у побудові мереж.

Периферійний пристрій (Peripheral) – це пристрій, який транслює свої дані для з'єднання з іншими пристроями. Типові приклади – базові станції або маяки (beacons).

Центральний пристрій (Central) – це пристрій, який ініціює з'єднання та опитує периферійні пристрої. ESP32 може виконувати роль центрального пристрою для підключення до різних сенсорів.

BLE на ESP32 підтримує режими глибокого сну (deep sleep), де більшість компонентів пристрою вимикається, а лише мінімальні функції BLE

залишаються активними для підтримки з'єднання або виявлення подій. Це дозволяє пристроям працювати дуже тривалий час на батареї.

Пристрої на базі ESP32 використовують профілі, що визначають набір даних і дій, які підтримує пристрій. Стандартні профілі, такі як GATT (Generic Attribute Profile), широко використовуються для сенсорних і медичних пристроїв. Кожен профіль має набір послуг (services), які в свою чергу містять характеристики (characteristics), що описують дані для обміну.

Проведемо порівняльний аналіз двох модулів на базі ESP32 та визначимо, який буде використовуватись в якості базової станції, а який в якості центрального модуля. В таблиці 3.1 наведені порівняльні характеристики двох модулів.

Таблиці 3.1 – Порівняльні характеристики модулів ESP32 LoLin та ESP32 WROOM

Характеристика	ESP32 LoLin	ESP32 WROOM
Розмір	Більший	Компактний
Антенa	Вбудована або рідко з конектором для зовнішньої	Зовнішня антена через U.FL
Bluetooth зв'язку якість	Середня (обмежена вбудованою антеною)	Вища завдяки зовнішній антені
Доступні порти	Більше пінів	Менше пінів, залежить від варіанту
Придатність для інтеграції	Для прототипів і DIY проектів	Для вбудованих рішень, що потребують стабільного зв'язку
Ціна	Дешевша	Дорожча через додаткові компоненти

ESP32 LoLin – це популярна плата на базі чипа ESP32, що вирізняється зручним форм-фактором для прототипування. Особливістю даної плати є наявність ланцюга живлення та роз'єму для підключення зовнішньої LiPo батареї.

Зовнішній вигляд модуля ESP32 LoLin показано на рисунку 3.1.

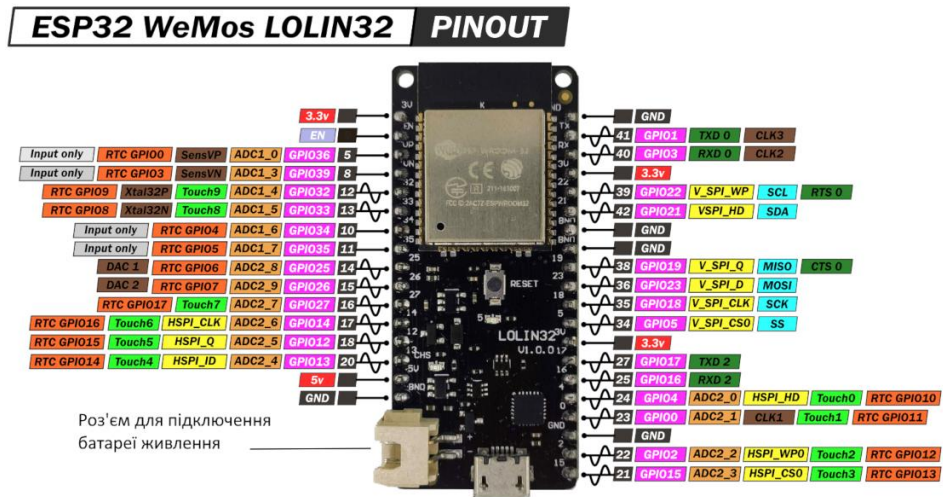


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд модуля ESP32 LoLin

Для живлення модулю обрано LiPo батарею живлення ємністю 560 мАг, рисунок 3.2.

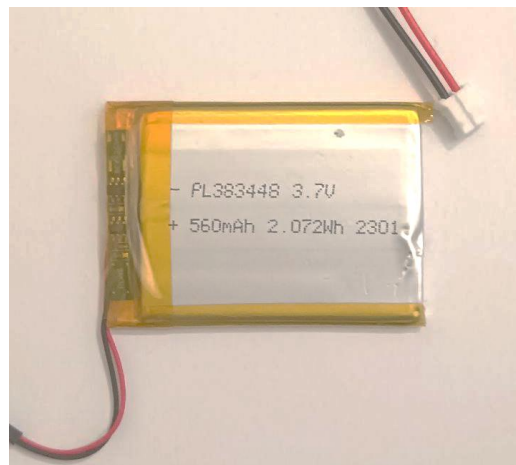


Рисунок 3.2 – LiPo батарея живлення ємністю 560 мАг

На рисунку 3.3 показано модуль ESP32 LoLin в якості базової станції.

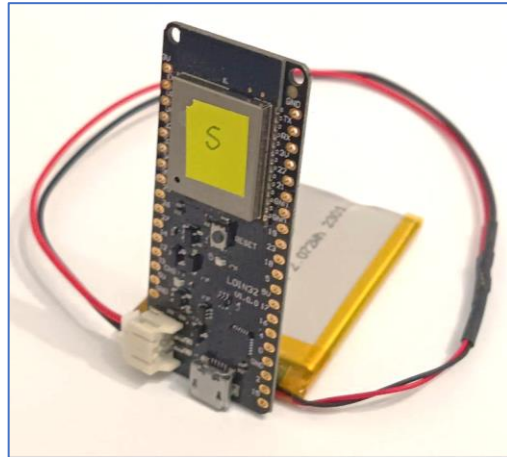


Рисунок 3.3 – Модуль ESP32 LoLin в якості базової станції

ESP32 WROOM має роз'єм для підключення зовнішньої антени і, таким чином, більше підходить для проектів, де важлива стабільність бездротового з'єднання, а також для вбудованих рішень, які потребують надійного і далекого з'єднання. Завдяки можливості використання зовнішньої антени, цей модуль забезпечує краще покриття Bluetooth і може використовуватись у складних умовах, де важливим є якісний сигнал.

Зовнішній вигляд модуля ESP32 WROOM показано на рисунку 3.4.

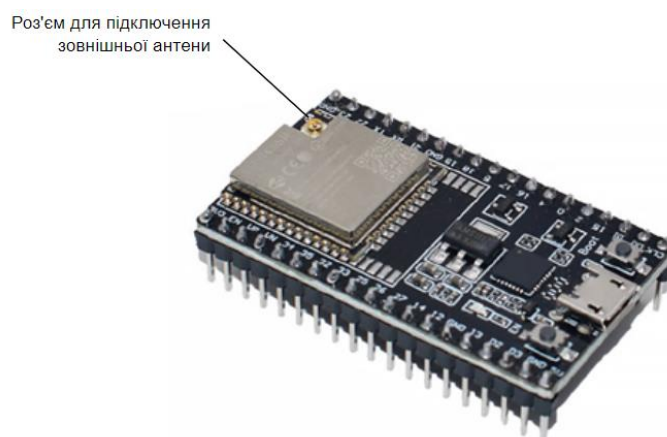
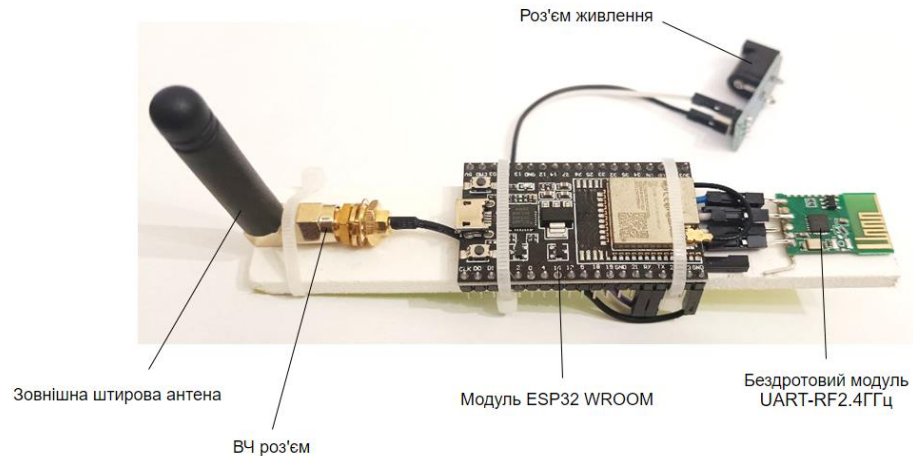


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд модуля ESP32 WROOM

На основі даного модуля зібрано окремий блок сканування мережі та отримання даних про RSSI. Зовнішній модуль сканування мережі та пошуку базових станцій показано на рисунку 3.5.



Рисунк 3.5 – Зовнішній модуль пошуку базових станцій

Зовнішній модуль пошуку базових станцій складається з наступних КОМПОНЕНТІВ:

- модуль ESP32 WROOM;
- зовнішня антена;
- ВЧ роз'єм для поєднання з модулем ESP32 WROOM;
- бездротовий модуль UART-RF2.4ГГц;
- роз'єм живлення.

Бездротовий модуль UART-RF2.4ГГц призначений для віддаленого підключення модуля пошуку базових станцій до персонального комп'ютеру або ноутбуку.

UART-RF2.4ГГц – це UART радіоподовжувач на 2,4 ГГц призначений для прозорі передачі між контролерами з аналогічними модулями на відстань до 150-200 метрів. Інформація перевіряється на цілісність даних під час передачі/прийому. У даному модулі використовується вбудована антена

(безкорпусна), але також є можливість підключення зовнішньої антени – передбачений майданчик для розпаювання IPEX.

3.2 Розробка програмного забезпечення для виконання експериментальних досліджень

Модулі ESP32 є одними з найбільш популярних і багатофункціональних мікроконтролерів завдяки їхній підтримці Wi-Fi та Bluetooth Low Energy (BLE). Використовуючи BLE, можна створювати низькоенергетичні бездротові рішення для передачі даних між пристроями на коротких відстанях. Однією з ключових можливостей роботи з BLE на ESP32 є сканування навколишніх пристроїв та отримання інформації про них. Для цього в бібліотеці ESP32 використовується файл `BLEAdvertisedDevice.h`, що є частиною пакету `esp32-snippets`, розробленого Нілом Колбаном.

`BLEAdvertisedDevice.h` містить клас `BLEAdvertisedDevice`, який є основним інструментом для роботи з пристроями, знайденими під час сканування BLE. Клас дозволяє отримати різноманітну інформацію про віддалений пристрій, а саме:

- MAC-адресу, що отримується за допомогою методу `getAddress()`;
- назву пристрою, що отримується через `getName()`, якщо пристрій публікує своє ім'я;
- рівень сигналу (RSSI) через метод `getRSSI()`;
- UUID сервісу для отримання унікальних ідентифікаторів сервісів, які публікує пристрій, використовується метод `getServiceUUID()`;
- корисне навантаження, що отримується через метод `getPayload()` дозволяє отримати сировинний пакет рекламних даних для подальшого аналізу.

Клас `BLEAdvertisedDevice` часто використовується у парі з класом `BLEScan`. Основне завдання `BLEScan` – це ініціювати сканування навколишніх

пристроїв, після чого кожен знайдений пристрій представляється у вигляді об'єкта `BLEAdvertisedDevice`.

Після того як сканування завершено, можна переглянути всі знайдені пристрої, їх характеристики та рівень сигналу. Для отримання зворотного зв'язку від сканування можна створити власні зворотні виклики (callbacks), які виконуватимуться кожного разу, коли знаходиться новий пристрій.

Приклад реалізації подібної функції показано на рисунку 3.6.

```
class MyAdvertisedDeviceCallbacks: public BLEAdvertisedDeviceCallbacks {
  void onResult(BLEAdvertisedDevice advertisedDevice) {
    std::string name = advertisedDevice.getName();
    Serial.printf("Advertised Device: %s \n", advertisedDevice.toString().c_str());

    if (name.length() == 6)
    {
      //std::_cxx11::string sign = name.substr(0, 2);
      std::string sign = name.substr(0, 3);
      Serial.println(sign.c_str());
      if (sign == "BS-")
      {
        Serial.print(name.c_str());
        Serial.print(" ");
        Serial.println(advertisedDevice.getRSSI());
        Serial.printf("Advertised Device: %s \n", advertisedDevice.toString().c_str());
      }
    }
    if (advertisedDevice.getName() == "Long name works now")
    {
      Serial.printf("Advertised Device: %s \n", advertisedDevice.toString().c_str());
    }
  }
};
```

Рисунок 3.6 – Приклад реалізації функції зворотного зв'язку

Функція `onResult`, що належить до класу `MyAdvertisedDeviceCallbacks`, відповідає за обробку знайдених BLE-пристроїв під час сканування і виведення їх характеристик, що дозволяє розробникам ефективно взаємодіяти з навколишніми пристроями.

Функція `onResult` є важливим елементом роботи з BLE-пристроями на ESP32. Вона дозволяє фільтрувати знайдені пристрої за певними критеріями (довжина імені, префікс імені) і виводити їх характеристики в консоль. Такий

підхід дає змогу ефективно налаштовувати взаємодію з BLE-пристроями і використовувати тільки ті, які відповідають заданим вимогам.

Дана функція є частиною об'єкта зворотного виклику (callback) і викликається кожного разу, коли під час сканування знаходиться новий BLE-пристрій. Основні завдання цієї функції:

- отримати інформацію про рекламований пристрій (advertised device);
- фільтрувати пристрої за певними критеріями;
- виводити в консоль інформацію про знайдені пристрої.

Коли під час BLE-сканування знаходиться новий пристрій, функція отримує його ім'я за допомогою методу:

```
std::string name = advertisedDevice.getName().
```

Це дозволяє ідентифікувати кожен пристрій за його ім'ям, що дуже корисно, коли необхідно взаємодіяти тільки з певними пристроями.

Далі функція виводить інформацію про пристрій у консоль:

```
Serial.printf("Advertised Device: %s \n", advertisedDevice.toString().c_str()).
```

Метод `toString()` повертає строкове представлення всіх даних про пристрій, таких як MAC-адреса, рівень сигналу RSSI, служби, що рекламуються, тощо. Це дозволяє бачити повну картину про кожен знайдений пристрій.

Функція продовжує свою роботу, якщо довжина імені знайденого пристрою дорівнює 6 символам. Це необхідно для фільтрації пристроїв і відбору тільки тих, що відповідають певному формату.

У наступному кроці функція витягує перші три символи імені за допомогою:

```
std::string sign = name.substr(0, 3).
```

Ця операція використовується для порівняння префікса імені з конкретним значенням:

```
if (sign == "BS-") {
    // виведення даних
}
```

Якщо ім'я пристрою починається з "BS-", функція виводить його ім'я та рівень сигналу (RSSI):

```
Serial.print(name.c_str());
Serial.print(" ");
Serial.println(advertisedDevice.getRSSI());
```

Ця частина коду показує, що функція призначена для взаємодії з пристроями, які мають певний префікс в імені, наприклад, "BS-".

Функція також має перевірку на конкретне ім'я пристрою:

```
if (advertisedDevice.getName() == "Long name works now") {
    Serial.printf("Advertised          Device:          %s          \n",
advertisedDevice.toString().c_str());
}
```

Якщо знайдений пристрій має точне ім'я "Long name works now", знову виводиться вся інформація про цей пристрій.

Для отримання розрахункових даних про відстань до базової станції використовується наступний код:

```
// Розрахунок відстані
float distance = pow(10.0, (A - rssi) / (10 * n));
```

```
Serial.print("Estimated distance: ");
Serial.print(distance);
Serial.println(" meters");
```

Розрахунок виконується за формулою 2.6. В наведеному кодї:

– A – це RSSI на відстані 1 метра. Зазвичай використовують значення - 59 дБм, але для нашого модуля це значення становить 58 дБм на основі експериментальних випробувань.

n — це коефіцієнт загасання сигналу. Для вільного простору значення зазвичай становить близько 2. У густішому середовищі, наприклад, у приміщенні, це значення може бути більшим.

Цей метод розрахунку відстані базується на RSSI, і його точність залежить від багатьох факторів, таких як перешкоди, відбиття сигналу, матеріали, які можуть блокувати сигнал. Тому отримані результати можуть бути приблизними і не завжди точними.

На рисунку 3.7 показано приклад роботи програми в режимі сканування та пошуку базових станцій.

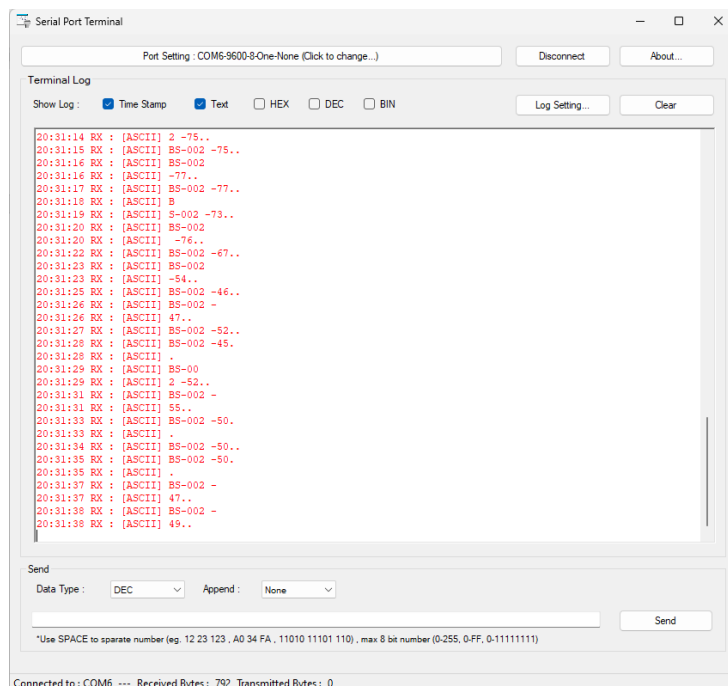


Рисунок 3.7 – Приклад сканування та пошуку базових станцій

Для отримання даних з модуля сканування використовується зібраний перетворювач інтерфейсу на базі модуля FT232RL. На рисунку 3.8 показано зовнішній вигляд даного перетворювача.

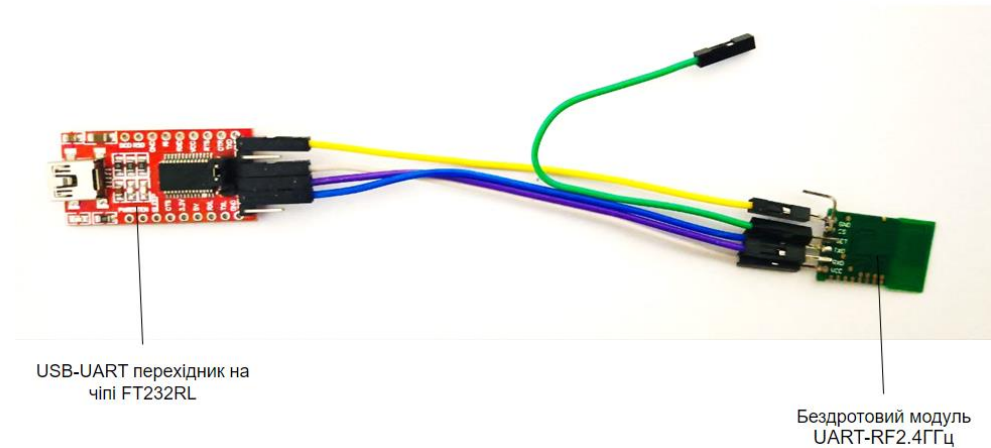


Рисунок 3.8 – Перетворювач інтерфейсу на базі модуля FT232RL

USB-UART перехідник на чіпі FT232RL представляє з себе інтерфейс USB – послідовний UART і використовується для установки з'єднання між комп'ютером і модулем ESP32 через бездротовий модуль UART-RF2.4ГГц. Від аналогів даний перехідник відрізняється тим, що на платі виведені всі інтерфейсні виходи мікросхеми, що дозволяє використовувати її в схемах, в яких потрібне використання всіх сигналів послідовного порту а також для використання перехідника як програматора.

Кожна базова станція прошита однаковим вихідним кодом. На рисунку 3.9 показано приклад вихідного коду базової станції.

Базова станція працює в режимі серверу та створює BLE-сервіс із унікальним ідентифікатором та характеристикою, яку можна читати та змінювати. Крім того, за допомогою оголошення пристрій повідомляє про свою наявність у мережі BLE, дозволяючи іншим клієнтам знаходити та підключатися до нього.

```

#include <BLEDevice.h>
#include <BLEUtils.h>
#include <BLEServer.h>

// See the following for generating UUIDs:
// https://www.uuidgenerator.net/

#define SERVICE_UUID          "4fafc201-1fb5-459e-8fcc-c5c9c331914b"
#define CHARACTERISTIC_UUID  "beb5483e-36e1-4688-b7f5-ea07361b26a8"
const std::string BS_NAME = "BS-004";

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Starting BLE work!");

  BLEDevice::init(BS_NAME);
  BLEServer *pServer = BLEDevice::createServer();
  BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);
  BLECharacteristic *pCharacteristic = pService->createCharacteristic(
    CHARACTERISTIC_UUID,
    BLECharacteristic::PROPERTY_READ |
    BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE
  );

  std::string txt = "Base station " + BS_NAME + " started!";
  pCharacteristic->setValue(txt);
  pService->start();
  // BLEAdvertising *pAdvertising = pServer->getAdvertising(); // this still is working for backward compatibility
  BLEAdvertising *pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();
  pAdvertising->addServiceUUID(SERVICE_UUID);
  pAdvertising->setScanResponse(true);
  pAdvertising->setMinPreferred(0x06); // functions that help with iPhone connections issue
  pAdvertising->setMinPreferred(0x12);
  BLEDevice::startAdvertising();
  Serial.println("Base station started!");
}

```

Рисунок 3.9 – Вихідний коду базової станції

BLE-оголошення використовується для оприлюднення доступності пристрою для підключення. Оголошення включає UUID сервісу, який передається в оголошеннях для пошуку клієнтами:

```

BLEAdvertising *pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();
pAdvertising->addServiceUUID(SERVICE_UUID);
pAdvertising->setScanResponse(true);
pAdvertising->setMinPreferred(0x06);
pAdvertising->setMinPreferred(0x12);

```

В даному фрагменті коду addServiceUUID() додає сервіс до оголошення. Властивість setScanResponse(true) дозволяє пристрою відповідати на запити від клієнтів під час сканування.

Параметри `setMinPreferred(0x06)` та `setMinPreferred(0x12)` налаштовують параметри для кращої сумісності з мобільними пристроями.

В даному коді використовується кілька бібліотек ESP32: `BLEDevice.h`, яка відповідає за ініціалізацію та управління BLE на пристрої, `BLEUtils.h` – для допоміжних операцій, та `BLEServer.h` – для створення сервера, що обробляє підключення клієнтів.

Щоб сервер міг надавати певні функціональні можливості, спочатку потрібно оголосити унікальні ідентифікатори `UUID` для сервісу та характеристики, з якими працюватимуть клієнти BLE. У цьому коді для сервісу і характеристики використовуються конкретні `UUID`, що дозволяють однозначно ідентифікувати ці об'єкти в рамках протоколу BLE.

На початку роботи викликається функція `Serial.begin(9600)`, яка встановлює швидкість передачі даних для послідовного монітора, що дозволяє виводити інформацію для налагодження. Далі, викликається `BLEDevice::init()`, яка ініціалізує BLE з назвою пристрою, що в нашому випадку є "BS-004". Ця назва буде відображатися під час сканування клієнтами BLE.

Ключовою частиною коду є створення сервера BLE за допомогою функції `createServer()`. Цей сервер відповідає за взаємодію з клієнтами BLE, що підключаються до нього. На сервері створюється сервіс, використовуючи унікальний `UUID` для сервісу. Даний сервіс має одну характеристику, яка може як зчитуватися клієнтами, так і змінюватися ними. Для цього характеристиці призначаються властивості `PROPERTY_READ` та `PROPERTY_WRITE`.

Для характеристики також задається початкове значення, яке інформує про запуск базової станції: "Base station BS-004 started!". Це значення буде доступне для клієнтів, які підключаються до сервісу і зчитуватимуть його.

Далі, після створення сервісу, налаштовується публічна інформація. Оголошення в BLE дозволяє пристрою повідомляти про свою наявність у мережі, використовуючи специфічні параметри.

Нарешті, сервер запускає процес повідомлення, використовуючи функцію `startAdvertising()`, що робить пристрій доступним для пошуку іншими пристроями. Після цього, у консоль виводиться повідомлення про успішний запуск базової станції.

Таким чином, цей код створює простий BLE-сервер на ESP32, який передає інформацію про базову станцію і дозволяє клієнтам зчитувати або записувати дані через характеристику BLE.

Разом з програмою сканування ми отримуємо програмну частину автоматизованої системи визначення відстані від мобільного рухомого робота до кожної базової станції, що знаходиться в радіусі видимості.

3.3 Синтез структурної схеми управління мобільним роботом

Управління рухом мобільного робота з використанням технології позиціонування на основі BLE міток зводиться до узгодженого управління швидкостями обертання провідних коліс на основі отриманих даних про поточне положення та кінцеву ціль руху. Для цього швидкість обертання кожного колеса вимірюватимемо інкрементним датчиком. Кутову орієнтацію робота у локальному просторі визначимо з допомогою модуля ESP32 на основі поточних даних про координати розташування робота. В результаті отримуємо загальну функціональну схему системи управління мобільним роботом, що наведена на рисунку 3.10.

На рисунку 3.10 використовуються наступні скорочення:

- ESP32 – модуль визначення поточного місцезнаходження;
- МК – мікроконтролер;
- П – підсилювач;
- Дв – двигун;
- Р – редуктор;
- ДШ – датчик швидкості;

– ОУ – об'єкт управління.

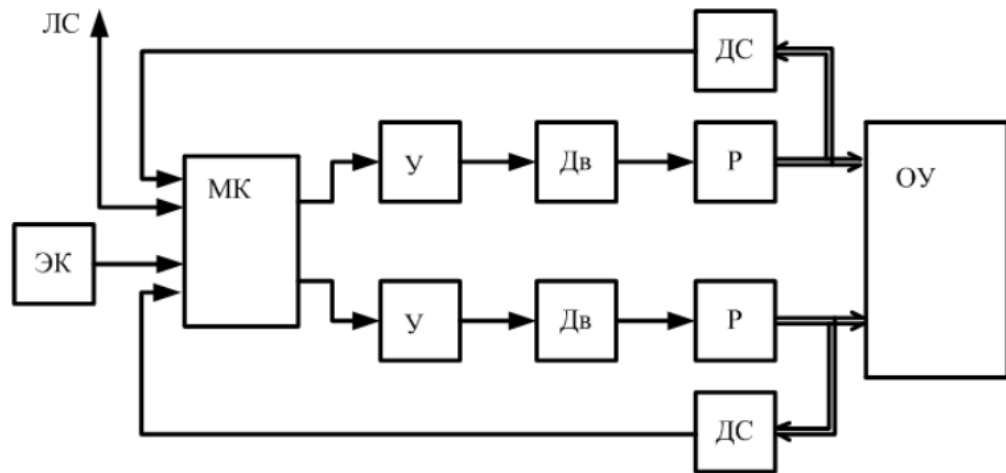


Рисунок 3.10 – Загальна функціональна схема системи управління мобільним роботом

Керуючий мікроконтролер (МК) виробляє сигнали управління швидкістю обертання кожним із двох електродвигунів Дв. Ці сигнали посилюються за потужністю підсилювачами У. Зазвичай у сучасних цифрових системах управління сигнали управління двигунами використовується широтно-імпульсна модуляція.

Використання широтно-імпульсної модуляції дозволяє суттєво зменшити габарити підсилювачів потужності за рахунок суттєвого збільшення коефіцієнта корисної дії.

Електродвигуни через понижуючі редуктори обертають провідні колеса візка робота (об'єкта управління ОУ), забезпечуючи його рух.

Швидкість обертання кожного колеса вимірюється інкрементним датчиком швидкості ДС, сигнали від яких постукають на мікроконтролер МК, що управляє. У результаті мікроконтролер надходить інформація про кутах повороту провідних коліи, пройденому шляху і швидкості руху, що дозволяє організувати зворотні зв'язки в системі управління.

Система управління робота складається з керуючої, виконавчої та вимірювальної частин. Керівна частина реалізується у вигляді програми роботи мікроконтролера МК. Виконавча частина включає підсилювачі потужності У, електродвигуни Дв, редуктори Р та об'єкт управління ОУ.

Вимірювальна частина складається з датчиків швидкості обертання коліс ДШ та датчика напрямку руху (ESP32). Особливості організації системи управління рухом візка розглянемо в рамках лінійних моделей першого наближення.

Розглянута задача при прийнятій моделі ОУ полягає у забезпеченні управління швидкістю поздовжнього переміщення $V_{пр}$ та напрямом руху φ_p робота. Для цієї реалізації на вхід керуючої частини повинні надходити задане значення швидкості поздовжнього переміщення V_z робота і заданий напрямок його руху φ_z . Для замикання системи образними зв'язками від вимірювальної частини повинні надходити виміряні поточні значення $V_{пр}$ та φ_p робота. Так як робот не має датчика швидкості поздовжнього руху $V_{пр}$, то поточне значення цієї величини необхідно обчислювати за сигналами датчиків швидкості коліс. В результаті отримуємо структурну схему системи управління рухом робота, як показано на рисунку 3.11.

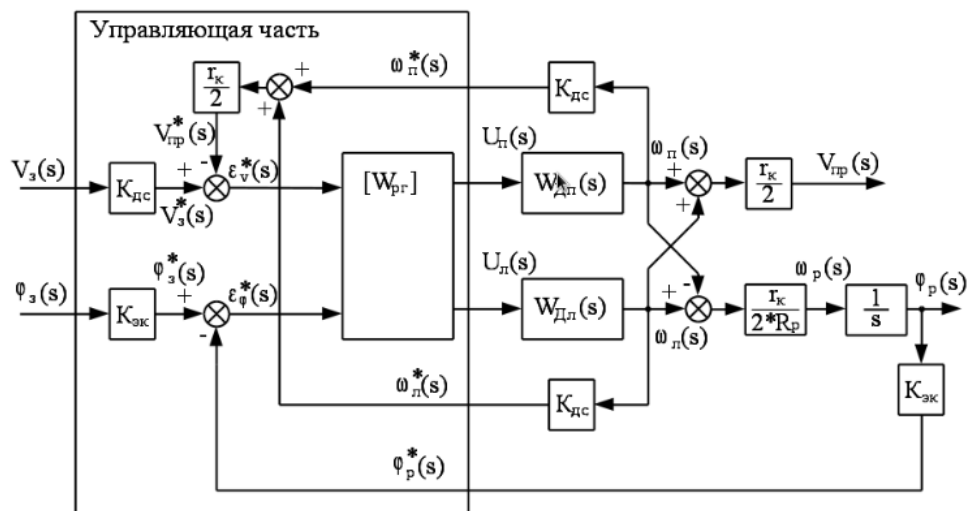


Рисунок 3.11 – Структурна схема системи управління рухом робота

Від датчиків швидкості коліс до керуючої частини надходять сигнали $\omega_{\text{п}}^*(s)$ і $\omega_{\text{л}}^*(s)$. За цими даними обчислюється оцінка $V_{\text{пр}}^*(s)$ швидкості поздовжнього руху робота, що дорівнює

$$V_{\text{пр}}^*(s) = \frac{r_{\text{к}}}{2} \cdot (\omega_{\text{п}}^*(s) + \omega_{\text{л}}^*(s)) \quad (3.1)$$

або з урахуванням коефіцієнту передавання датчика швидкості $K_{\text{дш}}$,

$$V_{\text{пр}}^*(s) = \frac{r_{\text{к}}}{2} \cdot (K_{\text{дш}} \cdot \omega_{\text{п}}^*(s) + K_{\text{дш}} \cdot \omega_{\text{л}}^*(s)). \quad (3.2)$$

З модуля позиціонування ESP32 в частину управління надходить сигнал $\varphi_{\text{р}}^*(s)$, що дорівнює

$$\varphi_{\text{р}}^*(s) = K_{\text{поз}} \cdot \varphi_{\text{р}}(s). \quad (3.3)$$

Крім цих сигналів цифрової лінії зв'язку від пристрою управління верхнього рівня в керуючу частину подаються значення заданих швидкості поздовжнього руху $V_3^*(s)$ і кута напрямку руху $\varphi_3^*(s)$. У загальному випадку ці сигнали надходять у цифровому вигляді з деяким масштабом, таким чином, можемо записати (у лінійному наближенні)

$$V_3^*(s) = M_v \cdot V_3(s), \quad (3.4)$$

$$\varphi_3^*(s) = M_{\varphi} \cdot \varphi_3(s), \quad (3.5)$$

де $V_3(s)$ – завдана швидкість поздовжнього руху;

$\varphi_3(s)$ – завдання необхідного напрямку руху;

$V_3(s)$, $\varphi_3(s)$ – подання сигналів керуючої частини з урахуванням масштабів змінних;

M_v, M_φ – постійні масштабні коефіцієнти за швидкістю та кутом напрямку руху, відповідно.

У керуючій частині виміряні та задані значення параметрів руху робота порівнюються. Порівнюючи пристрої формують сигнали неузгодженості:

– за швидкістю поздовжнього руху:

$$\varepsilon_v^*(s) = V_3^*(s) - V_{пр}^*(s); \quad (3.6)$$

– за кутом напрямку руху:

$$\varepsilon_\varphi^*(s) = \varphi_3^*(s) - \varphi_p(s). \quad (3.7)$$

Для коректного виконання операцій порівняння бажано, щоб масштаби уявлення порівнюваних величин були однаковими, тобто. щоб масштаби M_v та M_φ подання параметрів руху були обрані рівними коефіцієнтами передачі $K_{дш}$ і $K_{поз}$ датчиків, відповідно. Слід зазначити, що іноді компенсації помилок роботи систем управління, масштаби уявлення змінних роблять різними. Однак цей випадок ми розглядати не будемо, а вважатимемо, що для передачі по лінії зв'язку заданих параметрів руху обрані масштаби:

$$M_v = K_{дш}, \quad (3.8)$$

$$M_\varphi = K_{поз}. \quad (3.9)$$

Використання попередніх рівнянь дозволяє визначити сигнали неузгодженості у вигляді:

$$\varepsilon_v^*(s) = K_{дш} \cdot V_3(s) - \frac{r_k}{2} \cdot (K_{дш} \cdot \omega_p(s) + K_{дш} \cdot \omega_l(s)), \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{\varphi}^*(s) = K_{\text{поз}} \cdot \varphi_3(s) - K_{\text{поз}} \cdot \varphi_p(s). \quad (3.11)$$

Враховуючи, що швидкість поздовжнього руху робота дорівнює

$$V_{\text{пр}}(s) = \frac{r_k}{2} \cdot (\omega_{\text{п}}(s) + \omega_{\text{л}}(s)),$$

і виносячи за дужки постійні множники, отримуємо:

$$\varepsilon_v^*(s) = K_{\text{дш}} \cdot (V_3(s) - V_{\text{пр}}(s)), \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{\varphi}^*(s) = K_{\text{поз}} \cdot (\varphi_3(s) - \varphi_p(s)). \quad (3.13)$$

На цьому, синтез структурної схеми системи управління рухом мобільного робота на основі модуля ESP32 можна вважати закінченим.

3.4 Висновки по третьому розділу

В результаті виконання третього розділу кваліфікаційної роботи виконано огляд характеристик та вибір компонентів для побудови макету для проведення експериментальних досліджень.

Для побудови базових станцій та мобільного рухомого пристрою використано модулі з чипами ESP32 – ESP32 LoLin та ESP32 WROOM. Наведені порівняльні характеристики модулів.

Розроблена програма мовою програмування CPP для завантаження в модулі ESP сервера та мобільного робота.

Виконано синтез структурної схеми управління мобільним роботом для опису автоматичної системи слідкування за заданим курсом руху мобільної платформи.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Визначення оптимальної орієнтації антен модулів ESP32

Для тестування обрана друкована та штирова антени на частоту 2,4 ГГц. Друкована та штирова антени мають різні діаграми направленості обумовлені різними конструктивними виконанням. Друкована антена – це антена, яка інтегрована безпосередньо в друковану плату (PCB) пристрою. Вона виготовляється шляхом нанесення провідникових доріжок на шар плати, що дозволяє зекономити місце та зменшити кількість зовнішніх компонентів.

Зовнішній вигляд друкованої антени показаний на рисунку 4.1. Саме такий тип антен використовується в модулі ESP32 LoLin.



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд друкованої антени

Діаграма спрямованості PCB антени зазвичай є всеспрямованою у площині, паралельній до друкованої плати. Це означає, що сигнал розповсюджується рівномірно у всіх напрямках у горизонтальній площині. Однак через особливості конструкції, в напрямку перпендикулярно до площини плати (вздовж осі Z) сигнал може значно слабшати.

Штирова антена – це проста зовнішня антена, що зазвичай виглядає як металевий стрижень (штир), підключений до пристрою. Вона має більшу ефективну площу для передачі сигналу і може забезпечити кращі характеристики порівняно з друкованою антеною.

На рисунку 4.2 показано вигляд штирової антени.



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд штирової антени

За рахунок простої і відкритої конструкції штирова антена забезпечує кращу передачу сигналу і більшу дальність. Вона зазвичай виноситься за межі корпусу пристрою, що дозволяє мінімізувати вплив самого корпусу на сигнал. Також потрібно враховувати, що штирова антена вимагає додаткових компонентів і місця, що збільшує вартість і складність конструкції.

Штирова антена зазвичай має всеспрямовану діаграму спрямованості у горизонтальній площині, але її радіосигнал рівномірно розповсюджується вздовж осі антени у вигляді "бублика". Сигнал сильний в усіх горизонтальних напрямках, проте у вертикальній площині діаграма може мати мінімуми (зони з ослабленим сигналом).

Проведемо експериментальні дослідження залежності потужності RF сигналу модуля ESP32 в залежності від розташування модулю та напрямку повороту. На рисунку 4.3 показані різні варіанти орієнтації антени при тестуванні.

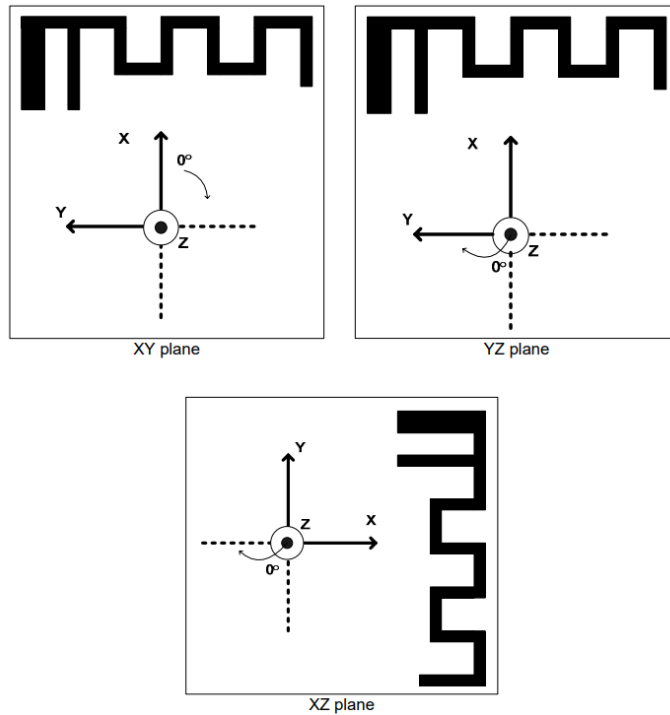
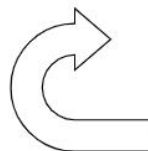


Рисунок 4.2 – Орієнтації антени при тестуванні

Перший тест виконаємо для варіанта розташування та обертання модуля ESP32 в площині Y – Z, як показано на рисунку 4.4.



Y-Z

Рисунок 4.4 – Перший тест, обертання модуля ESP32 в площині Y – Z

Отриманий набір даних RSSI в залежності від кута оберту показано на рисунку 4.5.

Axis Angle (degrees)	Axis Value Polar 1	Axis Value Polar 2
0	30	30
30	23	31
60	28	28
90	30	26
120	32	28
150	30	29
180	31	28
210	28	29
240	21	32
270	22	28
300	25	24
330	28	26

Значення RSSI в залежності від кута оберту в площині Y - Z

Рисунок 4.5 – Отримані експериментальні дані

Діаграма направленості антени, що побудована на основі отриманих даних показана на рисунку 4.6.

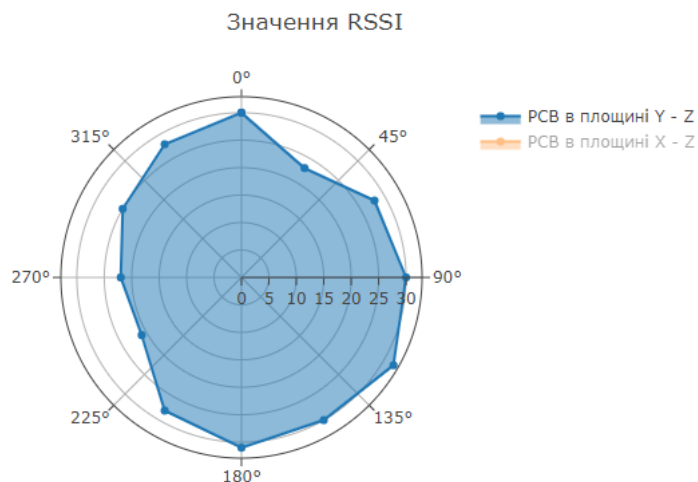
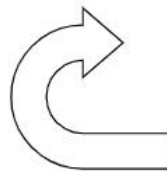


Рисунок 4.6 – Діаграма направленості антени в площині Y – Z

Полярний графік на рисунку 4.6 показує, як змінюється потужність сигналу під час обертання модуля. RSSI базується на логарифмічній шкалі, тому зміна на 10 одиниць RSSI є 10-кратною зміною потужності сигналу.

Проведений тест показав, що потужність сигналу, що випромінюється, дуже міняється в залежності від куту оберту. Це обумовлено наявністю компонентів плати на шляху випромінювання, які екранують радіочастотний сигнал та зменшують його потужність.

Другий тест проводимо для площини X – Z. Розташування плати та напрям оберту показані на рисунку 4.7.



x - z

Рисунок 4.7 – Другий тест, обертання модуля ESP32 в площині X – Z

Отримані результати тестування показані на рисунку 4.8.

Axis Angle (degrees)	Axis Value Polar 1	Axis Value Polar 2
0	30	30
30	23	31
60	28	28
90	30	26
120	32	28
150	30	29
180	31	28
210	28	29
240	21	32
270	22	28
300	25	24
330	28	26

Значення RSSI в
залежності від кута оберту
в площині X - Z

Рисунок 4.5 – Отримані експериментальні дані в площині X - Z

На рисунку 4.8 наведена діаграма направленості, побудована на основі отриманих даних.

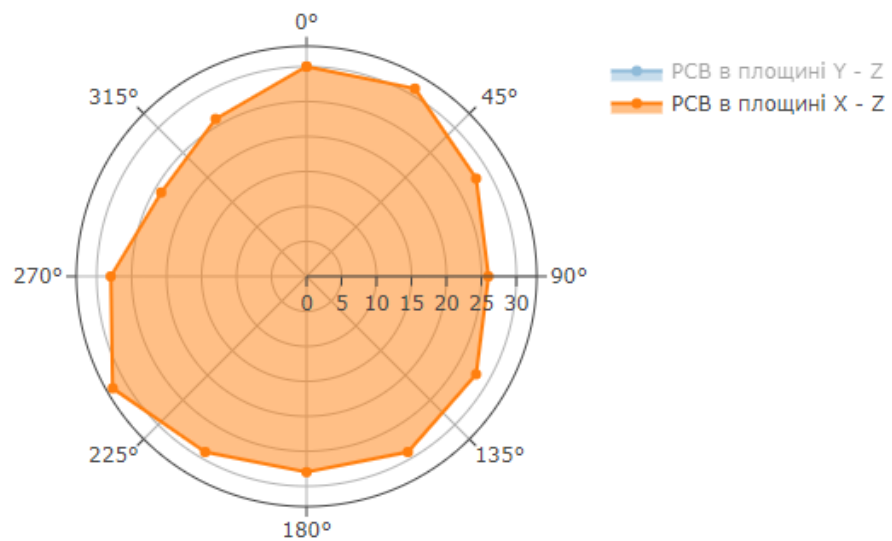


Рисунок 4.8 – Діаграма направленості, побудована на основі отриманих даних в площині X - Z

На рисунку 4.9 показано порівняння діаграм направленості в площинах $Y - Z$ та $X - Z$.

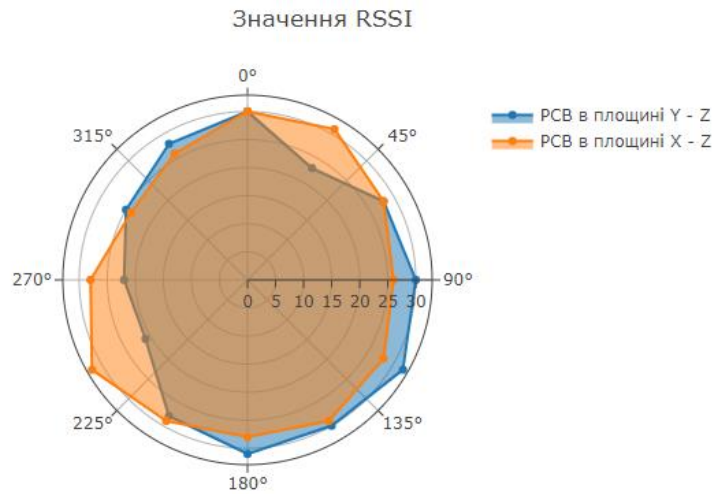
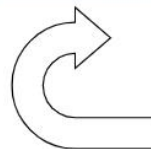


Рисунок 4.9 – Порівняння діаграм направленості в площинах $Y - Z$ та $X - Z$

Наступний тест виконаємо для варіанта розташування та обертання модуля ESP32 в площині $X - Y$, як показано на рисунку 4.10.



X - Y

Рисунок 4.10 – Перший тест, обертання модуля ESP32 в площині $X - Y$

Таке положення модуля відкриває друковану антену для постійного випромінювання тому що ніякі елементи на друкований платі не заважають цьому.

Отриманий набір даних RSSI в залежності від кута оберту показано на рисунку 4.11.

Axis Angle (degrees)	Axis Value Polar 1	Axis Value Polar 2
0	41	28
30	39	30
60	42	29
90	40	30
120	40	31
150	41	31
180	38	27
210	40	29
240	41	28
270	39	29
300	42	30
330	40	27

Значення RSSI в
залежності від кута оберту
в площині X - Y

Рисунок 4.11 – Отримані експериментальні дані в площині X – Y

На рисунку 4.12 показана діаграма направленості друкованої антени при обертанні в площині X – Y.

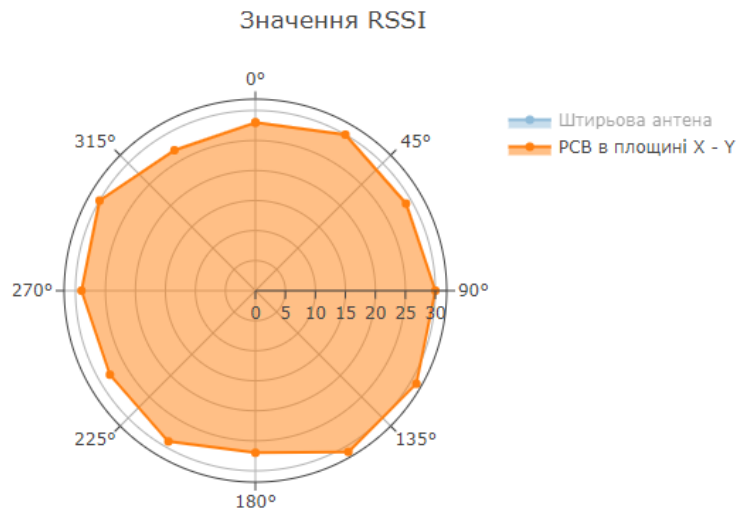


Рисунок 4.12 – Діаграма направленості друкованої антени при обертанні в площині X – Y.

Проведені експерименти показали, що для друкованої антени найкращим варіантом є встановлення модуля вертикально та обертання навколо нього в площині X – Y.

Четвертий тест був проведений з використанням штирової антени. Отримані експериментальні дані представлені на рисунку 4.13.

Axis Angle (degrees)	Axis Value Polar 1	Axis Value Polar 2
0	41	28
30	39	30
60	42	29
90	40	30
120	40	31
150	41	31
180	38	27
210	40	29
240	41	28
270	39	29
300	42	30
330	40	27

Значення RSSI для штирової антени

Рисунок 4.13 – Значення RSSI для штирової антени

На рисунку 4.14 показана отримана діаграма направленості штирової антени.

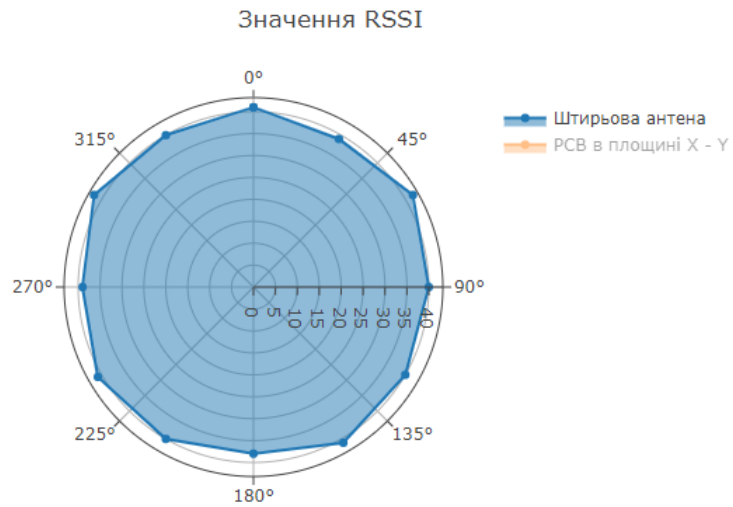


Рисунок 4.14 – Отримана діаграма направленості штирової антени.

На рисунку 4.15 показано порівняння діаграми направленості для кращого з варіантів випробування для друкованої антени та штирової.

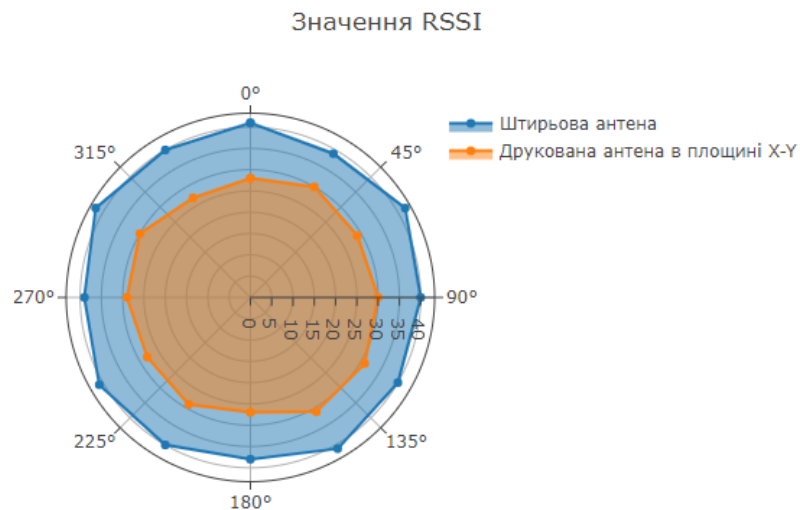


Рисунок 4.15 – Порівняння діаграми направленості для кращого з варіантів випробування для друкованої антени та штирової

Таким чином, можна зробити висновки, що штирова антена забезпечує краще покриття і стабільніший сигнал, особливо на великих відстанях, але займає більше місця і дорожча у виробництві.

Проведені дослідження дали нам змогу визначити орієнтацію модулів ESP32 LoLin та обрати для мобільного рухомого робота варіант зі штировою антеною.

Третій тест з антеною у верхній частині модуля дає найвищий сигнал. Крім того, найкраще положення, коли доріжка друкованої плати звернена до приймача сигналу. Найгірші результати отримані в першому тесті, де на платі є багато екранування від інших компонентів. В другому тесті також можна помітити провали потужності обумовлені екранування від компонентів, але є деякі позиції, де доріжка друкованої плати має вільний шлях до приймача.

Проведені дослідження показали, що найкращий спосіб встановлення модуля – антеною вгору так, щоб доріжки друкованої плати була спрямована до приймача. У цьому випадку ми можемо очікувати потужність сигналу близько 35 одиниць.

Таким чином, стаціонарно зафіксовані базові станції можуть використовувати друковані антени тому що їх діаграма направленості дозволяє отримувати сигнал, що випромінюється, з будь якого боку при правильній орієнтації модуля.

Штирова антена на рухомому модулі дає змогу не залежати від кута розташування роботу відносно базової станції. Таке рішення робить рішення більш універсальним.

4.2 Експериментальні дослідження залежності RSSI від відстані до базової станції

Для визначення координат мобільного робота в виробничому просторі потрібно провести дослідження залежності RSSI від відстані до базової станції. Далі на основі даних RSSI необхідно визначити реальну відстань мобільного пристрою від базової станції та розрахувати дистанцію в метрах.

Схема проведення експерименту показана на рисунку 4.16.

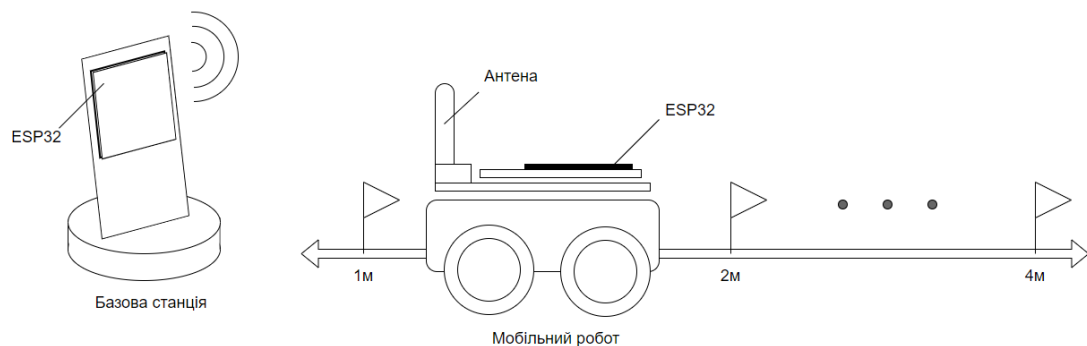


Рисунок 4.16 – Схема проведення експерименту

Базова станція закріплюється стаціонарно та вертикально. Антена повинна бути направлена в бік мобільного робота, як це було показано в попередньому розділі.

Мобільний робот лінійно рухається від базової станції із зупинками кожні 0,5м для виконання виміру RSSI. В кожні точці зупинки робиться 11 замірів рівня RSSI та всі вони заносяться в таблицю для подальшого аналізу.

Приклад зроблених експериментальних замірах RSSI наведено в таблиці на рисунку 4.17.

На основі вимірних даних робиться розрахунок середнього значення потужності випромінювання, що заносяться в окремий рядок.

Distance, m	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
RSSI	-47	-51	-58	-63	-64	-69	-66	-69
	-46	-51	-58	-61	-62	-65	-68	-70
	-45	-50	-59	-60	-64	-67	-68	-72
	-47	-51	-59	-60	-62	-65	-67	-69
	-47	-51	-58	-61	-63	-66	-67	-67
	-46	-51	-59	-62	-64	-66	-66	-70
	-47	-50	-60	-63	-63	-70	-70	-71
	-46	-49	-58	-62	-63	-64	-68	-67
	-47	-49	-59	-63	-64	-66	-62	-70
	-46	-49	-59	-61	-64	-65	-68	-70
	-50	-51	-60	-63	-63	-64	-68	-69
Середнє	-46,727	-50,273	-58,818	-61,727	-63,273	-66,091	-67,091	-69,455
Розрахункова відстань	0,76176	1	1,92685	2,4089	2,71227	3,36723	3,63585	4,35907

Рисунок 4.17 – Приклад зроблених експериментальних замірах RSSI

На рисунку 4.18 показана залежність RSSI від відстані між мобільним роботом і базовою станцією.

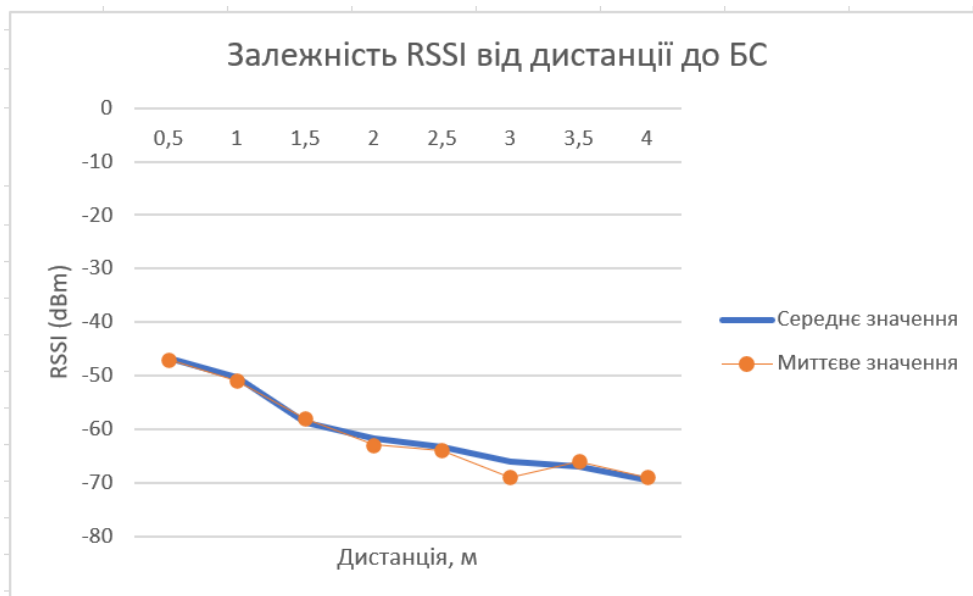


Рисунок 4.18 – Залежність RSSI від відстані між мобільним роботом і базовою станцією

На графіку також можна бачити різницю між середнім значенням 11 вимірів та одного з миттєвих значень. Для прикладу взято перший рядок з таблиці на рисунку 4.19.

З даних вимірювань видно, що зі збільшенням дистанції між BLE-сервером і клієнтом середнє значення рівня сигналу RSSI зменшується. Це очікувано, оскільки потужність сигналу знижується з відстанню через втрати в середовищі передачі.

Для визначення точності позиціонування

У таблиці 4.1 наведено розрахункові відстані на основі моделі поширення сигналу.

Таблиця 4.1 – Розрахункові відстані на основі моделі поширення сигналу

Фактична відстань, м	Розрахункова відстань, м	Похибка
0,5	0,76	0,26
1,0	1,00	0,00
1,5	1,93	0,43
2,0	2,41	0,41
2,5	2,71	0,21
3,0	3,37	0,37
3,5	3,64	0,14
4,0	4,36	0,36

Для порівняння реальної дистанції з розрахунковою використовуються дані про середній рівень сигналу. При цьому бачимо, що похибка між фактичною та розрахунковою відстанями незначна.

На графіку на рисунку 4.20 наочно можна побачити та оцінити похибку в позиціонування на відстані до 4 метрів.

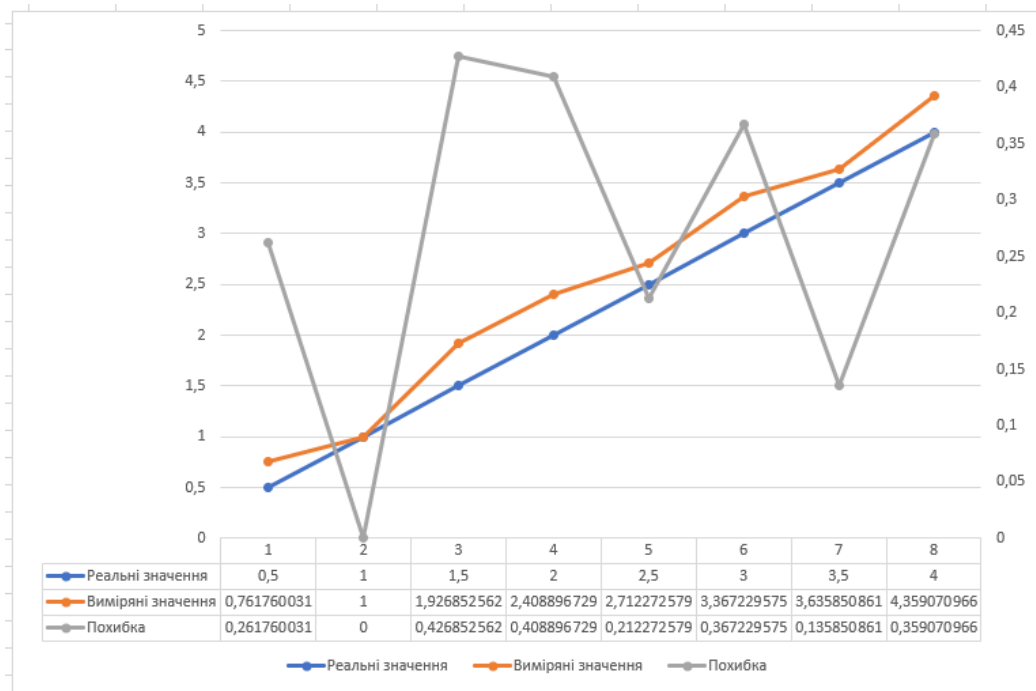


Рисунок 4.20 – Похибка в позиціонування на відстані до 4 метрів

4.3 Висновки по четвертому розділу

Таким чином, зменшення значень RSSI із збільшенням відстані вказує на типову логарифмічну залежність, яку можна очікувати від радіосигналів, що поширюються в реальному середовищі. Середні значення RSSI показують загальний тренд на зниження потужності сигналу, що дозволяє зробити висновок, що сигнали ESP32 добре піддаються прогнозуванню в залежності від відстані.

Похибки між фактичною та розрахунковою відстанями в межах декількох десятків сантиметрів свідчать про прийнятну точність розрахунків на основі RSSI. Однак, враховуючи залежність сигналу від факторів навколишнього середовища, таких як відбиття, затухання та перешкоди, навіть невеликі коливання в сигналі можуть призводити до похибок в обчисленнях відстані.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено макет системи автоматизації для локального позиціонування мобільного робота на основі технології BLE з використанням модулів ESP32.

Проведено аналіз методів локалізації мобільного робота в просторі. Розглянуті основні типи датчиків, що використовується для визначення положення мобільного робота в виробничому просторі.

Виконано аналіз існуючих систем навігації мобільних автономних робототехнічних засобів, показані їх переваги та недоліки. Визначено, що системи навігації можуть бути пасивними та активними. Розглянуті системи GPS навігації, метод одночасної навігації та побудови карти, що називається SLAM та візуальної одометрії.

Окремо розглянуті системи позиціонування на основі радіомаяків (WiFi та BLE). В результаті для подальшого дослідження обрано метод локалізації мобільного роботизованого засобу на основі BLE. Наведено стислий огляд даної технології та виконано огляд аналогічних рішень із застосуванням BLE маяків.

Розроблена архітектура автоматизованої системи локального позиціонування з використанням модулів ESP32. Запропонований метод дозволяє вирішувати задачу локалізації мобільного робота в промисловому приміщенні із використанням модулів радіозв'язку, що працюють за технологією BLE.

Проведено аналіз методів визначення місцезнаходження. Показані принципи визначення координат за методами AOA та TOA та показані порівняння з принципами визначення координат за методами TDOA та RSSI.

Метод позиціонування, заснований на отриманні даних RSSI використовує характеристику розповсюдження радіо сигналу (потужність

сигналу). Використовуючи правильну модель розповсюдження, ми можемо розрахувати відстані між мобільним пристроєм та базовою станцією, тим самим визначається місце розташування мобільного робота.

Розроблена архітектура автоматизованої системи локального позиціонування з використанням модулів ESP32.

Розроблено алгоритм роботи системи автоматизації локального позиціонування. Даний алгоритм передбачає рух мобільної роботизованої платформи прямолінійно вздовж виробничих приміщень або стелажів у сховищі.

Для побудови базових станцій та мобільного рухомого пристрою використано модулі з чипами ESP32 – ESP32 LoLin та ESP32 WROOM. Наведені порівняльні характеристики модулів.

Розроблена програма мовою програмування CPP для завантаження в модулі ESP сервера та мобільного робота.

Виконано синтез структурної схеми управління мобільним роботом для опису автоматичної системи слідкування за заданим курсом руху мобільної платформи.

Проведені експериментальні дослідження показали, що зменшення значень RSSI із збільшенням відстані вказує на типову логарифмічну залежність, яку можна очікувати від радіосигналів, що поширюються в реальному середовищі. Середні значення RSSI показують загальний тренд на зниження потужності сигналу, що дозволяє зробити висновок, що сигнали ESP32 добре піддаються прогнозуванню в залежності від відстані.

Похибки між фактичною та розрахунковою відстанями в межах декількох десятків сантиметрів свідчать про прийнятну точність розрахунків на основі RSSI. Однак, враховуючи залежність сигналу від факторів навколишнього середовища, таких як відбиття, затухання та перешкоди, навіть невеликі коливання в сигналі можуть призводити до похибок в обчисленнях відстані.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.2 «Забезпечити розширення використання електротранспорту та відповідної мережі інфраструктури».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 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, 2023. 55 с..
3. Основи наукових досліджень : підручник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Prague : OKTAN PRINT, 2024. – 468 с.
4. Новоселов С., Тимошенко М. СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ В ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ. Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті. Т. 2 : Конференція "Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування". Харків, Україна, 2024. URL: <https://doi.org/10.30837/iyf.asctredb.2024.056> (дата звернення: 30.12.2024).
5. Mones, Zainab & Feng, Guojin & Muo, Ugo & Wang, Tie & Gu, Fengshou & Ball, Andrew. (2016). Performance evaluation of wireless MEMS accelerometer for reciprocating compressor condition monitoring: Proceedings of the International Conference on Power Transmissions 2016 (ICPT 2016), Chongqing, P.R. China, 27–30 October 2016. 10.1201/9781315386829-129.
6. Nevlyudov I., Novoselov S., Sukhachov K. 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. No. 2 (24). pp 145-160 DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.145>

7. Font J. M., Batlle J. A. Mobile robot localization. revisiting the triangulation methods. IFAC Proceedings Volumes. 2006. Vol. 39, no. 15. P. 340–345. URL: <https://doi.org/10.3182/20060906-3-it-2910.00058> (date of access: 13.10.2024).

8. The 4 advantages of a GPS robotic mower - Belrobotics. Belrobotics. URL: <https://www.belrobotics.com/en/blog/choose-a-robot/the-4-advantages-of-a-gps-robotic-mower/> (date of access: 13.10.2024).

9. C. Jiang, D. Zhao, Z. Li and R. Ding, "Improved Adaptive Estimation Approach for Aircraft and Land Vehicle Applications," in IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3478763.

10. I. Nevliudov, S. Novoselov, O. Sychova and S. Tesliuk, "Development of the Architecture of the Base Platform Agricultural Robot for Determining the Trajectory Using the Method of Visual Odometry," 2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Polyana (Zakarpattya), Ukraine, 2021, pp. 64-68, doi: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468008.

11. Yalovets A. L. The architecture and functionality of the multi-agent system Navigation. PROBLEMS IN PROGRAMMING. 2017. No. 1. P. 083–096. URL: <https://doi.org/10.15407/pp2017.01.083> (date of access: 13.10.2024).

12. Bluetooth Based Indoor Navigation System / C. Utraphan et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 917. P. 012055. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/917/1/012055> (date of access: 13.10.2024).

13. B. Dong, T. Burgess, and H. B. Neuner, "Indoor CaLibre - Unsupervised database free RSSI calibration indoor navigation," 2017 Eur. Navig. Conf. ENC 2017, pp. 198–205, 2017.

14. S. J. Ingram, D. Harmer, and M. Quinlan, "Ultra wide band indoor positioning systems and their use in emergencies," *Rec. - IEEE PLANS, Position Locat. Navig. Symp.*, pp. 706–715, 2004.
15. R. Faragher and R. Harle, "Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 11, pp. 2418–2428, 2015.
16. C. Fabritz, M. Abdelrahim, S. Wirsz, and T. Wang, "Open Specification for Indoor-Navigation," *Proc. - IEEE 11th Int. Conf. Semant. Comput. ICSC 2017*, pp. 354–359, 2017.
17. Wang, Yapeng & Yang, Xu & Zhao, Yutian & Liu, Yue & Cuthbert, Laurie Bluetooth positioning using RSSI and trian-gulation methods. 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference. CCNC 2013. pp. 837-842.
18. MohdEzaneeRusli, Mohammad Ali, Norziana Jamil, Marina Md Din An Improved Indoor Positioning Algorithm based on RSSI-Trilateration technique for Internet of Things (IOT). *International Conference on Computer & Communication Engineering (ICCCCE)*. IEEE July 2016.
19. S. Novoselov Study of Mobile Device Wireless Control Technology in the Visible Range of the Electromagnetic Radia-tion. *Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S & T)*. Kharkiv. 2016. pp. 123-124.
20. Nevliudov, I. ., Novoselov, S. ., Sychova, O. ., & Tesliuk, S. . (2022). Determining the coordinates of a mobile robot in an industrial space using BLE technology based on RSSI data received from base stations. *Radiotekhnika*, 2(209), 185–191. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.18>
21. Dravya, & Holla, Ujwal & K N, Pushpalatha Indoor Navigation System using BLE and ESP32. 2020.
22. Golestanian, Mehdi & Siva, Joshua & Poellabauer, Christian Radio Frequency-Based Indoor Localization in Ad-Hoc Networks. 2017.

23. Polar Chart Overlays Maker. Barcelona Field Studies Centre. URL: <https://geographyfieldwork.com/PolarChartOverlayMaker.html> (date of access: 15.12.2024).