

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інформаційної безпеки та електронних комунікацій

(повне найменування інституту, факультету)

Інформаційних технологій та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ
ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ BLUETOOTH

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи БК-512м

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки

Керівник Євген ОГРЕНИЧ

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій

Кафедра __ Інформаційних технологій електронних засобів _____

Ступінь вищої освіти Магістр _____

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка _____
 (код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки _____
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІТЕЗ _____

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Бредун Іван Миколайович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розробка методики та системи позиціонування об'єктів на основі технології Bluetooth _____

керівник проєкту (роботи) Огренич Євген Вікторович, к.т.н, доцент каф.ІТЕЗ _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від «11» листопада 2023 року № 448

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20 грудня _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) протоколи роботи пристроїв BlueTooth _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Методи бездротової локалізації у приміщенні, критерії ефективності оцінки системи позиціонування в приміщенні (IPS), вибір технології для реалізації, методика позиціонування на основі маяків, моделювання запропонованого методу, апаратне забезпечення для перевірки запропонованої методики, розробка бази даних, програмного забезпечення та тестування роботи системи _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

23 слайди _____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Євген ОГРЕНИЧ	03.10.23	
2	Євген ОГРЕНИЧ	17.10.23	
3	Євген ОГРЕНИЧ	07.11.23	
4	Євген ОГРЕНИЧ	21.11.23	
нормоконтроль	Ірина ПОСПЕСВА	01.12.23	

7. Дата видачі завдання «04» __вересня____2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Методи бездротової локалізації у приміщенні	9.10.23	
2	Критерії ефективності оцінки системи позиціонування в приміщенні (IPS)	11.10.23	
3	Вибір технології для реалізації	12.10.23	
4	Методика позиціонування на основі маяків	20.10.23	
5	Моделювання запропонованого методу	15.11.23	
6	Апаратне забезпечення для перевірки запропонованої методики	25.11.23	
7	Розробка бази даних, програмного забезпечення та тестування роботи системи	02.12.23	
8	Оформлення ПЗ та захист дипломного проєкту	16.12.23	

Студент(ка)

(підпис)

Іван БРЕДУН

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Євген ОГРЕНИЧ

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 94 сторінок, 40 рисунків, 9 таблиць, 26 джерел.

ПОЗИЦІОНУВАННЯ, BLUETOOTH, ПРОТОКОЛ, ПРОГРАМА, RECEIVED-SIGNAL STRENGTH, INDOOR POSITIONING SYSTEM, PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Мета роботи – дослідити існуючі методи локалізації людей та об'єктів в рамках приміщень та розробити методіку та систему позиціонування на основі технології Bluetooth, яка надасть можливість визначення місцеположення з точністю не менше 1м.

Об'єкт дослідження: методи позиціонування об'єктів у приміщеннях.

Предмет дослідження: метод та система визначення знаходження рухомого об'єкту всередині приміщень на основі технології Bluetooth.

У першому розділі розглядаються огляд області розробки та постановка завдань магістерської роботи.

У другому розділі проводиться аналіз існуючих методів бездротового позиціонування.

У третьому розділі розробляється методіка та система позиціонування в приміщеннях на основі технології BlueToth.

У четвертому розділі проводиться розробка бази даних, програмного забезпечення та тестування розробленого методу і системи на його основі.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	8
Вступ	9
1 Огляд області розробки та постановка задач.....	10
1.1 Методи бездротової локалізації у приміщенні.....	10
1.1.1 Техніка тріангуляції	11
1.1.2 Техніка зняття відбитків пальців	12
1.1.3 Техніка близькості.....	13
1.1.4 Техніка аналізу зображення	14
1.1.5 Латерація. Трилатерація. Мультилатерація.....	15
1.2 Бездротові алгоритми локалізації в приміщенні.....	16
1.2.1 Триангуляція на основі кутів	18
1.2.2 Методи на основі часу	18
1.2.3 Потужність отриманого сигналу (RSS).....	22
1.2.4 Інші бездротові алгоритми локалізації в приміщенні	23
1.2.5 Загальна класифікація методів позиціонування.....	24
1.3 Критерії ефективності оцінки системи позиціонування в приміщенні (IPS).....	24
1.3.1 Точність	26
1.3.2 Надійність.....	26
1.3.3 Вартість.....	26
1.3.4 Масштабованість	27
1.3.5 Складність	28
2 Огляд бездротових систем локалізації в приміщеннях	29

2.1	Глобальна система позиціонування (GPS/високочутливий GNSS/допоміжний GNSS/iGPS)	29
2.2	Інфрачервоні датчики	31
2.3	RFID	32
2.4	Стільниковий метод	34
2.5	UWB	35
2.6	WLAN (IEEE 802.11)	36
2.7	Bluetooth (IEEE 802.15)	36
2.8	ZigBee	40
2.9	Технологія FM	41
2.10	Технології на основі зображень	42
2.11	Псевдоліти	43
3	Розробка методики позиціонування	45
3.1	Вибір технології для реалізації	45
3.2	Методика позиціонування на основі маяків	49
3.3	Калібрування в розробленій методиці	51
3.4	Фаза виявлення в реальному часі	58
3.5	Моделювання запропонованого методу	61
3.6	Апаратне забезпечення для перевірки запропонованої методики	66
4	Розробка бази даних, програмного забезпечення та тестування роботи системи	71
4.1	Розробка бази даних та програмного забезпечення	71
4.2	Протоколи оцінки системи	76
4.3	Тестування роботи системи	79
	Висновки	89

Перелік джерел посилення	92
Додаток А – Презентація	95

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ГНСС – Глобальні навігаційні супутникові системи

GPS – Global Positioning System

AoA – Angle of Arrival

ToA – Time of Arrival

TDoA – Time Difference of Arrival

RSS – Received-Signal Strength

UWB – Ultra-Wide Band

SDSTWR – Symmetrical double-sided two-way ranging

IPS - indoor positioning system (система позиціонування в приміщенні)

BLE - Bluetooth Low Energy

VLC - Visible Light Communication (зв'язок по видимому світлу)

PSO - Particle swarm optimization (метод рою часток)

IMU - inertial measurement unit (інерційний вимірювальний пристрій)

PIR - passive ifra-red

ВСТУП

Локалізація є неоднорідною частиною польових бездротових мереж зв'язку, які відіграють життєво важливу роль у сучасному житті. Його важливість робить його одним із піонерів у галузях досліджень, а також технікою визначення положення об'єкта чи людини [1]. Система локалізації в приміщенні – це система, яка намагається визначити точне положення людини та об'єкта всередині будівлі, торгового центру тощо. Популярність мобільних комп'ютерів [2] стимулює широкі дослідження щодо локалізації людей або об'єктів. У сучасну епоху мобільних пристроїв інформація про місцезнаходження має вирішальне значення в широкому діапазоні застосувань, таких як виробництво, охорона здоров'я тощо. Щоб задовольнити потреби користувача, потрібна інформація про місцезнаходження осіб або об'єктів, яку може надати система локалізації в приміщенні.

Системи локалізації намагаються визначити положення рухомих пристроїв за допомогою деяких фіксованих вузлів і деяких мобільних комп'ютерних пристроїв. Інформацію про місцезнаходження можна використовувати для навігації [3, 4], відстеження [5], моніторингу [6] тощо. Ми не можемо використовувати однакові методи локалізації для визначення місцезнаходження як у приміщенні, так і на вулиці, оскільки:

- у приміщенні методи є більш складними;
- є перешкоди та відбиття сигналу всередині будівлі;
- якість сильно залежить від навколишнього середовища, такого як положення об'єктів, поведінка людини;
- канал зв'язку в приміщенні є ненадійним [7].

Популярність, великий вплив і велике значення зробили бездротову локалізацію всередині приміщень унікальною, а також її широкий успіх у системах позиціонування та відстеження як для людини, так і для допоміжних засобів, що також сприяє тому, щоб взяти на себе лідерство серед зовнішніх систем у рамках останніх досліджень.

1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1 Методи бездротової локалізації у приміщенні

Розробка та розгортання системи для отримання інформації про місцезнаходження в просторі приміщення є складним завданням з кількох причин, таких як конфіденційність користувача, накладні витрати на керування, масштабованість системи та жорсткий характер внутрішнього бездротового каналу (тобто відбиття металу, перешкоди з шумом) [4, 6]. Для зовнішнього середовища ми можемо використовувати фіксовані датчики або датчики на основі GPS [8]. GPS є найпоширенішою супутниковою системою позиціонування, яка забезпечує максимальне покриття [1]. GPS не можна розгортати всередині будівель, оскільки:

- потрібна передача даних між приймачами та супутниками в межах прямої видимості, що неможливо в приміщенні;
- для належної роботи потрібен ясний огляд неба;
- вартість пристроїв GPS висока для подібних систем.

Багато варіантів [5, 8] доступні для проектування системи позиціонування всередині приміщень, таких як інфрачервоне випромінювання, ультразвук, радіочастотна ідентифікація (RFID), сенсорні мережі, акустичні системи, світло, колір стін тощо. Залежно від пріоритету користувача, розроблені різні системи позиціонування. Деякі з централізованих схем включають використання самоорганізуючих карт (SOM) [9] для одночасної оцінки розташування вузлів з урахуванням кількості переходів по всій мережі. Існують деякі гібридні підходи, які поєднують переваги двох або більше різних методів.

Моделювання розповсюдження радіохвиль у закритому середовищі важко здійснити через обставини навколишнього середовища, коли немає прямої видимості, яку можна відстежувати через багатопрореневість роз'єднання та специфічні параметри сайту, такі як; розташування підлоги, рухомі об'єкти та численні поверхні, що відбивають. Наразі не існує хорошої моделі для багатопрореневої характеристики внутрішнього радіо [10]. За винятком

використання однієї з п'яти оцінок позиціонування в приміщенні: триангуляції, трилатерації, аналізу відбитків пальців, відстані та зору [2, 11]. Методи позиціонування триангуляції, зняття відбитків пальців і аналізу зору можуть надати інформацію про абсолютне, відносне та близьке розташування. Техніка близького позиціонування може надавати лише інформацію про близьке розташування. У розробці IPS деякі IPS використовують один метод позиціонування, інші поєднують деякі з цих методів позиціонування, щоб компенсувати обмеження єдиного методу позиціонування.

1.1.1 Техніка триангуляції

Використання геометричних характеристик трикутників для досягнення або оцінки розташування людини або об'єктів називається триангуляцією, і її можна розділити на: латерацію та кут (рис.1.1).

Латерація оцінює положення об'єкта шляхом вимірювання його відстані від кількох орієнтирів. балів. Тому його також називають методами вимірювання діапазону. Замість того, щоб вимірювати відстань безпосередньо за допомогою потужності прийнятого сигналу (RSS), зазвичай вимірюється час прибуття (TOA) або різниця в часі прибуття (TDOA), а відстань виводиться шляхом обчислення ослаблення потужності випромінюваного сигналу або шляхом множення на швидкість радіосигналу та час у дорозі. У деяких системах для оцінки дальності також використовується метод часу польоту (RTOF) або метод фази отриманого сигналу. Кут визначає місцезнаходження об'єкта шляхом обчислення кутів відносно кількох опорних точок.

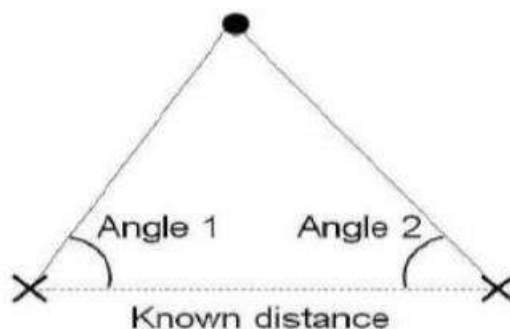


Рисунок 1.1 – Метод ангуляції

1.1.2 Техніка зняття відбитків пальців

Інша техніка – відбиток пальця позиції, який має два методи: фаза навчання (офлайн) і фаза відстеження (онлайн). На етапі навчання RSS використовується як відбиток пальця (рис. 1.2(a)). Від AP збираються в задалегідь визначених місцях, які називаються контрольними точками (RP). Метою цієї операції є створення бази даних відбитків пальців, яка використовуватиметься на етапі відстеження. Оскільки місцезнаходження мобільного користувача визначається на основі навколишніх RP, вони повинні бути розподілені в цільовій області рівномірно та однорідно. На етапі відстеження (рис. 1.2(b)) RSS-ресурси AP, що оточують MU, порівнюються з набором даних RP, зібраним на етапі навчання, щоб визначити RP, які найкраще відповідають. На етапі відстеження можуть використовуватися детерміновані та ймовірнісні алгоритми для зіставлення показань RSS у реальному часі з даними сигналу RP. База внутрішньої локалізації полягає в тому, що для кожної позиції в області особливості сигналів різні. Покладаючись на різницю сигналів у різних положеннях, можна отримати поточне місцезнаходження. Для локалізації в приміщенні на основі відбитків пальців.

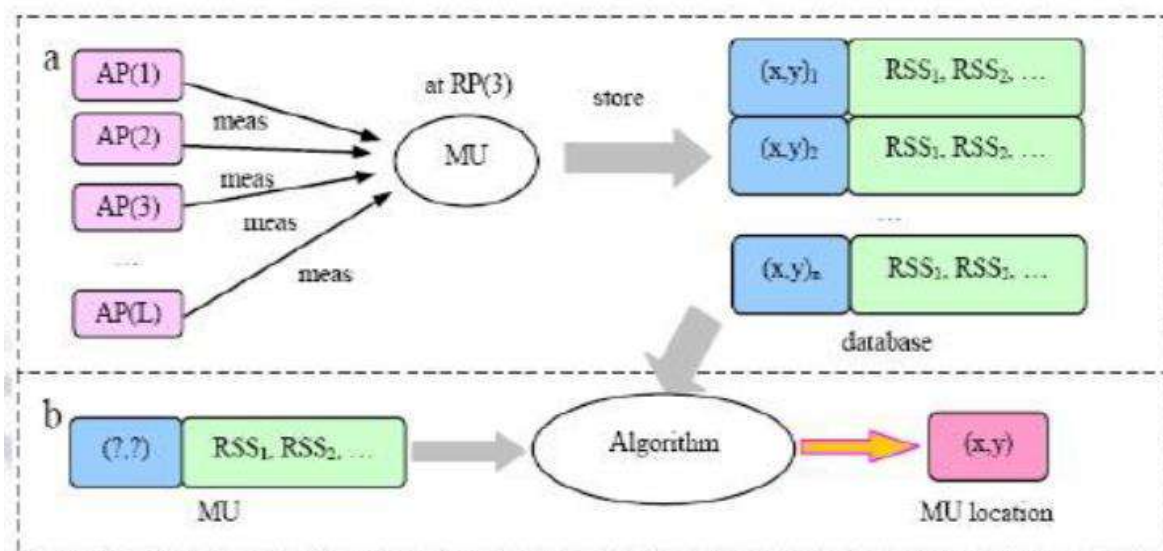


Рисунок 1.2 – Два етапи зняття відбитків пальців (а) етап навчання та (б) етап відстеження

1.1.3 Техніка близькості

Цей метод вважається простим методом локалізації, він заснований на дослідженні розташування цільового об'єкта відносно відомої позиції або області. Техніка визначення близькості повинна фіксувати кількість детекторів у відомих положеннях. Коли сповіщувана ціль виявлена детектором, вважається, що позиція цілі знаходиться в зоні близькості, позначеній детектором.

Як показано на рис.1.3, E2 і E3 є супроводжуваними цілями. Зона близькості сповіщувача D визначена та показана пунктирним квадратом на рис.1.3. E2 і E3 визначаються за допомогою моніторингу того, чи знаходяться вони в зоні близькості чи ні. Таким чином, ціль E2 знаходиться в зоні D, а E3 – ні. Таким чином, методика визначення розташування на відстані не може дати абсолютну або відносну оцінку позиції, як це стосується трьох інших методів позиціонування. Надана інформація про близьке місцезнаходження корисна для різноманітних служб і програм на основі визначення місцезнаходження. Більшість локалізацій на основі GSM використовують цей тип методу локалізації. Він досягає точності в межах 50-200 м,

що відповідає розміру комірки GSM [3]. Метод на основі близькості має високу дисперсію, яка іноді може не задовольнити потребу в локалізації. Тому цей метод більше не зустрічається в останній літературі.

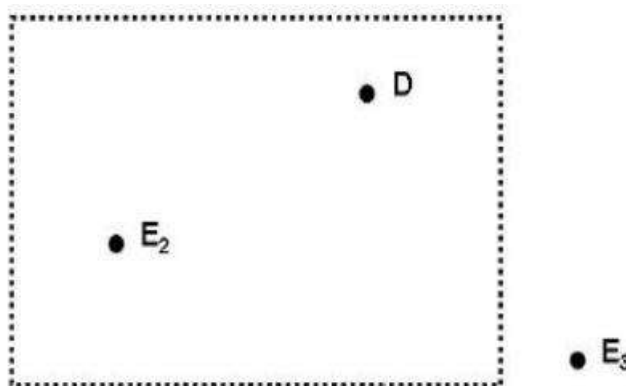


Рисунок 1.3 – Позиціонування на відстані

1.1.4 Техніка аналізу зображення

Ця техніка передбачає моніторинг великої території навколо об'єкта інтересу з певної точки спостереження. Зазвичай розгорнуті датчики мають широку зону охоплення та діапазон. Приклади включають встановлені на стелі відеокамери або пасивні інфрачервоні (PIR) датчики, як показано на рис.1.4. Позиціонування Vision забезпечує комфорт і ефективність для користувачів, оскільки особам, які відстежуються, не потрібно носити з собою додаткові відстежувані пристрої. Зазвичай одна або кілька камер фіксуються в зоні відстеження IPS, щоб охоплювати все місце та робити зображення в реальному часі. За зображеннями ідентифікуються супроводжувані цілі. Спостережувані зображення цілей шукаються в базі даних попередніх вимірювань, щоб зробити оцінку положення. Крім того, техніка зорового позиціонування може забезпечити корисний контекст розташування для служб на основі захоплених зображень.

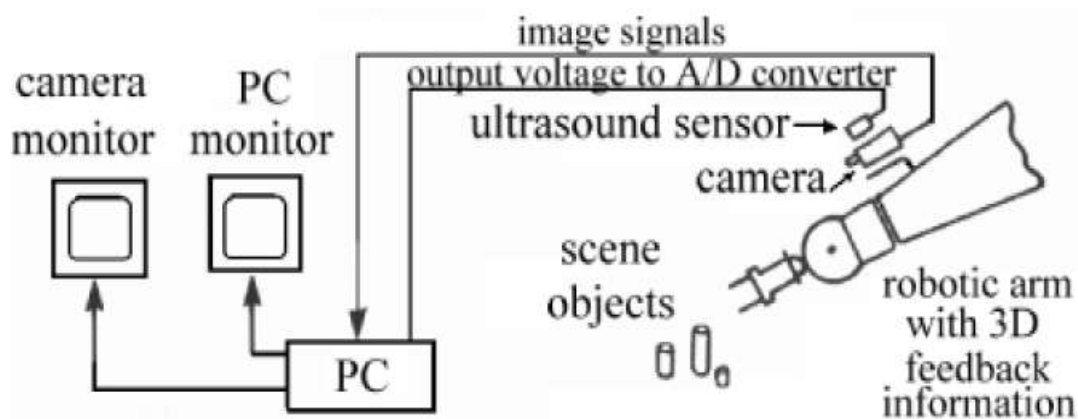


Рисунок 1.4 – Приклад використання техніки позиції бачення

1.1.5 Латерація. Трилатерація. Мультилатерація

Латерація, трилатерація та мультилатерація – усі три терміни стосуються позиції, визначеної на основі вимірювань відстані. Латерація або трилатерація визначає положення об'єкта шляхом вимірювання його відстані від кількох контрольних точок (рис. 1.5). Таким чином, її також називають технікою вимірювання дальності. У трилатерації «три» означає, що для визначення позиції необхідні принаймні три фіксовані точки. Методи, засновані на вимірюванні системи часу розповсюдження (наприклад, TOA, RTOF і TDOA), а також методах фази отриманого сигналу на основі RSS називаються методами латерації.

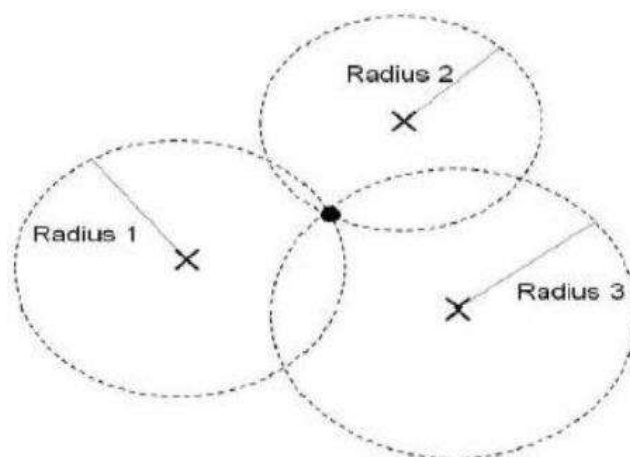


Рисунок 1.5 – Метод позиції Latertion

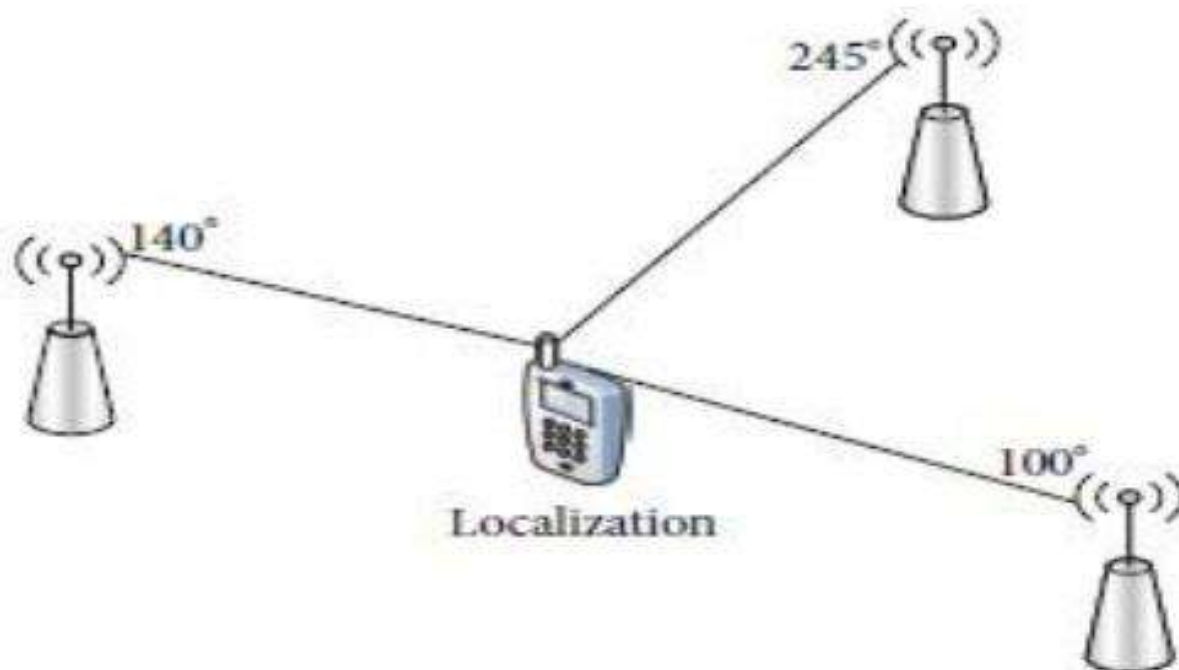


Рисунок 1.6 – Метод позиціонування за кутом прибуття

1.2 Бездротові алгоритми локалізації в приміщенні

Використовувалися різні методи обчислення, які класифікувалися залежно від методу, використаного для обчислення, тому існує чотири основні алгоритми позиціонування в приміщенні:

- методи, засновані на часі, такі як час прибуття (TOA);
- різниця в часі прибуття (TDOA), час польоту туди й назад (RTOF);
- кут на основі кута або кут прибуття (AOA);
- сила отриманого сигналу (RSS) [5, 7, 10].

Кожен із них має свої переваги та недоліки, як показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки алгоритмів внутрішнього позиціонування

Алгоритм	Переваги	Недоліки
TOA	Це найточніша техніка, яка може відфільтрувати багатопроменевий ефект у закритих приміщеннях	Він складний у реалізації [5], вимагає точної синхронізації часу всіх пристроїв, що є високою вартістю.
TDOA	Потрібно лише синхронізувати базові станції, які беруть участь у позиціонуванні, без точної синхронізації між цільовою та базовою станціями, як у TOA [3], [12]	Потрібні певні попередні знання, щоб усунути неоднозначність позиції [3], на неї впливає багатопроменевість сигналів [3].
AOA	Оскільки вся необхідна інформація про синхронізацію передавача закодована в сигналі, приймачу об'єктів не потрібно підтримувати фазову когерентність із джерелом часу будь-якого маяка	Для цього потрібні додаткові антени з можливістю вимірювання кутів, що збільшує вартість впровадження системи AOA, на неї впливає багатопроменевість і NLOS поширення сигналів, а також відбиття від стін та інших об'єктів. Через ці фактори він може значно змінити напрямок надходження сигналу і таким чином погіршити точність [3], обчислення AOA дуже чутливі до дальності. Зі збільшенням відстані від джерела точність позиціонування знижується [13].
RSS	Це просто в розгортанні порівняно з технікою, яка використовує кут прибуття (AOA) і різницю в часі прибуття (TDOA), немає потреби в спеціалізованому обладнанні на мобільній станції (MS), окрім карти інтерфейсу бездротової мережі [14].	Наявність перешкод у приміщенні може спричинити різний коефіцієнт ослаблення радіочастотних сигналів. Тому створити точну модель розповсюдження в приміщенні дуже важко. [12], обстеження будівельного майданчика займає багато часу, трудомісткість і легко піддається впливу динаміки навколишнього середовища [15].

1.2.1 Триангуляція на основі кутів

Цю техніку також можна назвати кутом прибуття (AoA)/AngulationAoA завдяки використанню кутів, тому ми кажемо, що це методика, яка визначає кут приходу мобільного сигналу, що надходить із відомого місця, де він приймається на кількох базах станції [6]. Щоб оцінити положення в двовимірній площині, підхід AoA вимагає лише двох маяків. Щоб підвищити точність, три або більше маяків використовуються для оцінки розташування (триангуляція). Для визначення напрямку потрібні високоспрямовані антени або антенні решітки. Потім можна використовувати геометричні співвідношення для оцінки місця перетину двох ліній пеленгу (LoB) із відомих опорних точок, як показано на малюнку 6 нижче. Методи, засновані на АОА, мають свої обмеження. Для АОА потрібні додаткові антени з можливістю вимірювання кутів, що збільшує вартість впровадження системи АОА. У закритому середовищі на методи, засновані на АОА, впливає багатопроменевість і поширення сигналів NLOS, а також відбиття від стін та інших об'єктів, тому це не підходить для використання в приміщенні. Через ці фактори він може значно змінити напрямок надходження сигналу і таким чином погіршити точність внутрішньої системи позиціонування на основі АОА.

1.2.2 Методи на основі часу

Для розрахунку час є основним гравцем, тому триангуляція на основі часу є одним із методів, які використовують відстань для триангуляції. Припущення триангуляції на основі часу полягає в тому, що час, використаний від маяка до точки користувача, можна використовувати для визначення відстані між двома точками. Оскільки відома швидкість передачі бездротового сигналу, яка приблизно дорівнює

швидкості світла в повітрі. Для триангуляції на основі часу існує три типи методів: ToA (час прибуття) і TDOA (різниця в часі прибуття) і час в обидва кінці (RTT).

Час прибуття (ToA)/Час польоту (ToF)

Системи Time of Arrival (ToA) базуються на точній синхронізації часу надходження сигналу, що передається від мобільного пристрою до кількох приймальних радіомаяків, як показано на малюнку 7. За допомогою TOA відстань між вузлом передачі та вузлом приймання виводиться з затримку часу передачі та відповідну швидкість сигналу наступним чином:

$$R = \text{time} \times \text{speed} \quad (1.1)$$

Де швидкість позначає швидкість переміщення сигналу, час – кількість часу, витраченого сигналом на шлях від передачі до приймального вузла, а R – відстань між передавальним вузлом і приймальним вузлом. Оскільки швидкість можна розглядати як відому постійну величину, R можна обчислити шляхом спостереження за часом у ToA, мобільний пристрій передає сигнал із міткою часу на приймальні маяки. Коли він отриманий, відстань між мобільним вузлом і приймальними маяками обчислюється на основі часу затримки передачі та відповідної швидкості сигналу.

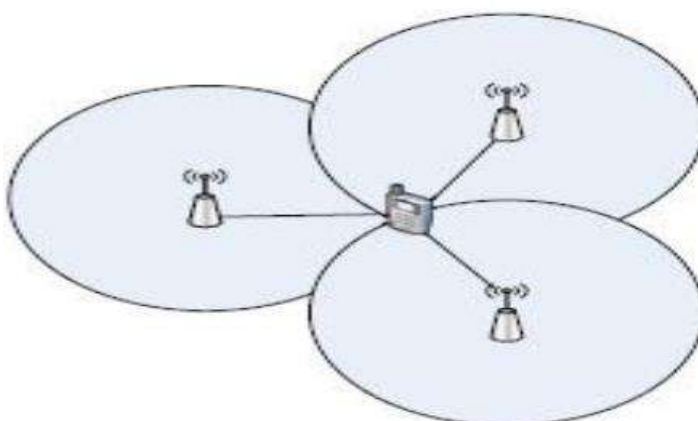


Рисунок 1.7 – Позиціонування на основі TOA/RTOF

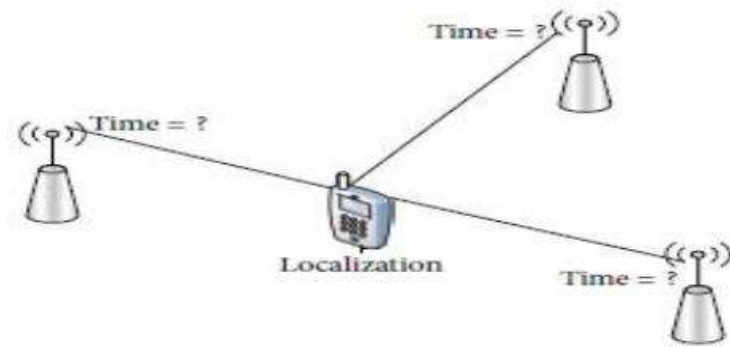


Рисунок 1.8 – Різниця в часі прибуття (TDoA)

Метод ТоА потребує точного знання часу початку передачі. Завдяки цьому всі приймальні маяки разом із мобільними пристроями точно синхронізуються з джерелом точного часу. ТоА є найточнішою технікою, яка використовується в закритих приміщеннях і може відфільтрувати багатопроменевий ефект [16]. Одним із недоліків підходу ТоА є вимога точної синхронізації часу всіх пристроїв. Для вимірювання часу затримки знадобиться додатковий сервер, що збільшить вартість системи. Разом з цим, збільшення затримки також може поширюватися через більш щільне середовище, з точки зору більшої кількості людей.

Різниця в часі прибуття (TDoA)

Методи різниці в часі надходження (TdoA) вимірюються між декількома парами контрольних точок із відомими місцями та використовують відносні вимірювання часу на кожному приймальному вузлі замість абсолютних вимірювань часу, зображених на малюнку 8. Використовується різниця в часі між цими двома типами сигналів реконструювати положення передавального вузла. Розрахунок базується на наступному:

$$\frac{R}{c_1} - \frac{R}{c_2} = t_1 - t_2 \quad (1.2)$$

де c_1 – швидкість одного типу сигналу;

c_2 – швидкість іншого типу сигналу;

t_1 і t_2 — час, протягом якого ці два сигнали проходять від одного вузла до іншого відповідно,

R – відстань між передаваними вузлом і приймальним вузлом.

TDoA не потребує використання синхронізованого джерела часу для передачі для визначення часових позначок і пошуку місцезнаходження. За допомогою TDoA передача з невідомим часом початку приймається на різних приймальних вузлах, при цьому лише приймачі потребують синхронізації часу [16]. Кожне вимірювання різниці часу прибуття створює гіперболічну криву в просторі локалізації, на якому лежить розташування мобільного вузла. Перетин кількох гіперболічних кривих визначає можливі місця розташування клієнта. Локалізація за допомогою TDOA називається мультилатерацією.

Час польоту туди й назад (RTT)/час польоту туди й назад (RtoF)

Він вимірює час проходження імпульсу сигналу від передавача до вимірювального блоку і назад [6]. Цей метод вимірювання з'являється з метою вирішення проблеми синхронізації, яку несе TOA. За допомогою RTT відстань обчислюється наступним чином:

$$2R = t_{RT} - \Delta t \cdot \text{speed} \quad (1.3)$$

де t_{RT} – час, необхідний для проходження сигналу від одного вузла до іншого й назад;

Δt — заздалегідь визначену часову затримку, необхідну апаратному пристрою для роботи на приймальному вузлі та збільшення швидкості передачі сигналу.

Зрозуміло, що RTT є реципрочною технологією [1, 17]. Замість використання двох локальних годинників в обох вузлах для обчислення затримки (як це робить технологія TOA), він використовує лише один вузол для запису часу передачі та прибуття. Таким чином, певною мірою ця технологія вирішує проблему синхронізації InTOA, обчислюючи затримку за допомогою двох локальних годинників в обох вузлах, тоді як у RTT вона використовує лише один вузол для запису часу передачі та прибуття. Завдяки цій перевазі ця технологія певною мірою вирішує проблему синхронізації. Одним із недоліків цього методу є вимірювання діапазону для кількох пристроїв, які потрібно виконувати послідовно, що може

спричинити нестабільні затримки для програм, де пристрої швидко рухаються. Налаштування позицій і план, оцінка на основі моделі можуть заощадити витрати на розгортання. Однак зміна меблів або людей, які ходять, також може якось змінити поширення бездротового сигналу, а отже, вплине на точність результату

1.2.3 Потужність отриманого сигналу (RSS)

RSS оцінює відстань від невідомого вузла до опорного вузла за деякими наборами одиниць вимірювання, використовуючи затухання потужності випромінюваного сигналу. Цей спосіб можливий лише за допомогою радіосигналів [3]. Метод локалізації RSS може використовувати або алгоритм моделі поширення, або алгоритм відбитків пальців. Алгоритм моделі поширення (PMA) встановлює модель між RSS і відстанню. Для розрахунку відстані відповідно до поширення сигналу є наступним чином:

$$p(R) = p(R_0) - 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) - \begin{cases} nW \times WAF & (nW < C) \\ C \times WAF & (nW \geq C) \end{cases} \quad (1.4)$$

де R – відстань між передавачем і приймачем;

R_0 – еталонна відстань;

$p(R)$ і $p(R_0)$ – потужність сигналу, отриманого на R і R_0 відповідно;

nW – число перешкод між передавачем і приймачем;

WAF – коефіцієнт затухання стіни;

C – максимальна кількість перешкод між передавачем і приймачем;

n – коефіцієнт загасання маршруту, який можна визначити як теоретичними, так і емпіричними розрахунками.

Як правило, чим більше значення RSS, тим ближче від точки доступу (AP). Ослаблення потужності сигналу обернено пропорційно відстані від AP на вулиці. Навпаки, це складно у внутрішньому середовищі через наявність багатьох перешкод, таких як меблі, вікна та двері обладнання, які можуть спричинити багатостороннє поширення, наприклад відбиття та дифракція заломлення [10]. Алгоритм зйомки відбитків пальців відповідає способу, описаному раніше в техніці зняття відбитків пальців.

1.2.4 Інші бездротові алгоритми локалізації в приміщенні

Фаза надходження (PoA)/різниця фаз (PD):

Цей тип алгоритму, що залежить від PoA, використовує отриману фазу несучої для визначення відстані між двома пристроями. Щоб пом'якшити згортання фази, фаза отриманого сигналу оцінюється на кількох частотах. Потім відстань визначається швидкістю зміни фази.

Дальність електромагнітного випромінювання ближнього поля (NFER):

Термін NFER стосується будь-якої радіотехнології, яка використовує властивості радіохвиль ближнього поля. Принцип полягає в тому, що фаза електромагнітного поля змінюється залежно від відстані навколо антени. NFER має потенціал для вимірювання дальності в діапазоні точності від 30 см до 1 м і робочих відстаней до 300 м.

1.2.5 Загальна класифікація методів позиціонування

На основі аналізу було побудовано схему класифікації методів позиціонування яку наведено на рис.1.9.

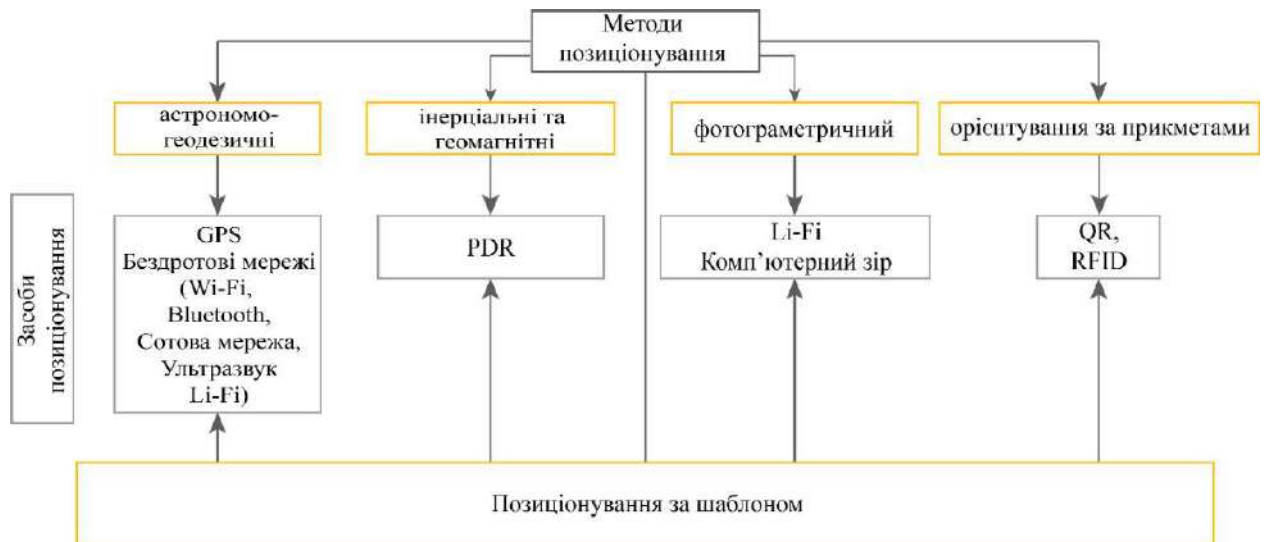


Рисунок 1.9 — Зв'язок методів та засобів позиціонування

1.3 Критерії ефективності оцінки системи позиціонування в приміщенні (IPS)

Для оцінки IPS пропонуються різні важливі параметри продуктивності системи та критерії розгортання, які описані в цьому розділі. Ми повинні запитати, навіщо нам позиціонування, а потім пояснити оцінку, тому ми почнемо з пояснення необхідності локалізації.

Позиціонування поза приміщенням має характеристики, які зробили його дуже корисним у всьому світі, але, з іншого боку, є багато характеристик, які відрізняють позиціонування в приміщенні від позиціонування на вулиці [18]. Порівняно з зовнішнім середовищем середовище в приміщенні є більш складним, оскільки існують різні об'єкти (такі як стіни, обладнання та люди), які відбивають сигнали та призводять до проблем із багатоприменістю та затримкою. Крім того,

через наявність різноманітних об'єктів усередині приміщень зазвичай використовується розповсюдження за межами прямої видимості (NLoS), коли сигнал не може поширюватися прямо по прямій траєкторії від випромінювача до приймача, що спричиняє непослідовні часові затримки в приймачі. Крім того, наявність об'єктів і перешкод призводить до сильного загасання і розсіювання сигналу. Як правило, програми позиціонування всередині приміщень вимагають більшої точності та точності порівняно з програмами позиціонування на відкритому повітрі, щоб мати справу з відносно невеликими площами та існуючими перешкодами. З іншого боку, є деякі характеристики внутрішнього середовища, які полегшують позиціонування [20]. Наприклад, невелика зона покриття робить її відносно контрольованою з точки зору задалегідь визначеної інфраструктури, коридорів, входів і виходів, невеликих градієнтів температури та вологості та повільної циркуляції повітря. Крім того, середовище в приміщенні менш динамічне через меншу швидкість переміщення всередині.

Після ясності внутрішньої локалізації (позиціонування, відстеження), необхідної для, тому ми повинні зосередитися на інших факторах, які мають великий вплив на проектування та використання внутрішніх систем локалізації, тому IPS використовують численні підходи до позиціонування, які сильно відрізняються з точки зору точності, вартості, точність, технологія, масштабованість, надійність і безпека [11, 14, 18]. Для деяких програм може знадобитися дешевша IPS, тоді як для інших може знадобитися високоточна IPS, наприклад медичне відстеження, відстеження промислового середовища, навігаційна система для сліпих у приміщенні. У цьому розділі ми описуємо різні показники продуктивності IPS, ми надаємо наступний тест продуктивності внутрішньої бездротової системи визначення місця розташування: точність, точність, складність, масштабованість, надійність і вартість. Після цього ми порівнюємо різні системи.

1.3.1 Точність

Термін «точність» означає, що ви повинні бути впевнені на 100%, або може бути визначений Об'єднаним комітетом керівництв з метрології (JCGM) як близькість узгодженості між значенням вимірної величини та справжнім значенням вимірної величини. Таким чином, точність IPS – це середня евклідова відстань між розрахунковим положенням і справжнім положенням [11]. Точність все ще є дуже складною сферою для багатьох дослідників у цій галузі [10]. Хоча точність IPS є ключовим фактором для більшості додатків, можливо, знадобляться деякі компроміси між точністю та іншими показниками продуктивності.

1.3.2 Надійність

Щоб переконатися, що система локалізації все ще працює нормально, навіть якщо деякі вимірювальні блоки можуть вийти з ладу або бути пошкодженими в несприятливих умовах, і вона зіткнулася з великою несправністю або деякі пристрої розряджаються від батареї Методи позиціонування мають [5] використовувати цю неповну інформацію для обчислення методу визначення місця розташування з високою надійністю може працювати нормально, навіть якщо деякі сигнали недоступні.

1.3.3 Вартість

Термін «вартість» у системі позиціонування має багато аспектів або факторів, які слід розглядати. Важливі фактори включають гроші, час, простір, вагу та

енергію. Фактор часу пов'язаний з установкою та обслуговуванням. Мобільні пристрої можуть мати обмежений простір і вагу. Одиниця вимірювання щільності вважається витратою простору. Іноді нам доводиться враховувати деякі безповоротні витрати. Наприклад, можна вважати, що система позиціонування, розміщена через бездротову мережу, не має жодних витрат на апаратне забезпечення, якщо всі необхідні одиниці цієї мережі вже придбано для інших цілей. Енергія вважається критично важливим ресурсом в IPS, щоб уникнути перебоїв у обслуговуванні та забезпечити рішення з високою мобільністю. Деякі мобільні пристрої (наприклад, мітки для спостереження за електронними предметами (EAS) і пасивні мітки RFID, які розглядаються пізніше) повністю енергетично пасивні. Ці пристрої реагують лише на зовнішні поля і, таким чином, можуть мати необмежений термін служби. Інші мобільні пристрої (наприклад, пристрої з акумуляторною батареєю) працюють кілька годин без підзарядки.

1.3.4 Масштабованість

Оскільки локалізація в приміщенні (позиціонування, відстеження) визначена та розроблена для потреб користувачів, IPS повинні враховувати вимоги користувачів до відстежуваних пристроїв, тому характер масштабованості системи забезпечує нормальну функцію позиціонування, коли область позиціонування стає великою. Зазвичай продуктивність позиціонування погіршується, коли відстань між передавачем і приймачем збільшується. Системі розташування може знадобитися масштабування за двома осями: географія та щільність. Географічний масштаб означає, що територія або обсяг охоплені. Щільність означає кількість одиниць, розташованих на одиницю географічної території/простору за період часу. Оскільки охоплено більше зони/простору або блоки скупчені в зоні/просторі, канали бездротового сигналу можуть стати перевантаженими, можуть знадобитися додаткові обчислення для визначення місця розташування або може знадобитися

розширена комунікаційна інфраструктура. Іншим показником масштабності є розмірний простір системи. Поточна система може знаходити об'єкти в 2-D або 3-D просторі. Деякі системи можуть підтримувати як 2-D, так і 3-D простори.

1.3.5 Складність

Складність системи позиціонування надзвичайно важлива для людей, які використовують IPS, де строгий контроль доступу до того, як збирається та використовується особиста інформація користувачів, має вирішальне значення через апаратне забезпечення, програмне забезпечення та робочі фактори. У цій роботі ми акцентуємо увагу на складності програмного забезпечення, тобто обчислювальній складності алгоритму позиціонування. Якщо обчислення алгоритму позиціонування виконується на стороні централізованого сервера, позиціонування може бути обчислено швидко завдяки потужним можливостям обробки та достатньому джерелу живлення. Якщо це здійснити на стороні мобільного пристрою, наслідки складності можуть бути очевидними. Більшості мобільних пристроїв не вистачає високої обчислювальної потужності та тривалого часу автономної роботи; тому ми б віддали перевагу алгоритмам позиціонування з низькою складністю. Зазвичай важко вивести аналітичну формулу складності різних методів позиціонування; таким чином, враховується час обчислення. Показник розташування є важливим показником складності. Швидкість подвійного розташування – це затримка розташування, яка є затримкою між переміщенням мобільної цілі в нове місце та повідомленням системи про нове місцезнаходження цієї цілі.

2 ОГЛЯД БЕЗДРОВОВИХ СИСТЕМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ В ПРИМІЩЕННЯХ

Для розміщення всередині приміщень використовуються кілька типів бездротових технологій. Ми зосереджуємося на системах бездротового позиціонування, які застосовуються в приміщеннях. Існують деякі класифікаційні підходи до обстеження внутрішньої системи позиціонування, наприклад середовища застосування (наприклад, 2-D/3-D позиціонування в офісі, на складі тощо), алгоритми позиціонування та бездротові технології. У роботі ми зосередилися на схемі на основі бездротових технологій, також розглядаючи їх алгоритми позиціонування та ситуацію їх застосування.

2.1 Глобальна система позиціонування (GPS/високочутливий GNSS/допоміжний GNSS/iGPS)

Глобальна система позиціонування вважається бездротовою технологією на коротких відстанях і є однією з важливих і надійних систем для зовнішнього позиціонування, і вона дуже успішна, але для внутрішнього позиціонування вона непридатна через обмежене покриття супутникового сигналу в приміщенні, що знижує його точність через наявність перешкод у зоні прямої видимості між супутником і приймачем, електромагнітні хвилі поширюються та послаблюються будівлями та зовнішніми перешкодами [8]. Але це найпопулярніша система навігації у всьому світі. Оскільки люди проводять більшу частину свого часу в закритому середовищі (в приміщенні), GPS не підходить для відстеження позиціонування в приміщенні. Технологія GPS використовує сервер розташування з еталонним приймачем GPS, який може одночасно виявляти ті самі супутники, що й бездротова трубка (або мобільний телефон). станція) із частковим GPS-приймачем, щоб допомогти частковому GPS-приймачу знайти слабкі сигнали GPS. Бездротова

слухавка збирає вимірювання як із системи GPS, так і з бездротової мобільної мережі. Ці вимірювання об'єднуються сервером розташування для отримання оцінки положення. Показано, що продуктивність внутрішньої GNSS із використанням технологій високої чутливості значно погіршилася порівняно з рівнем продуктивності, досягнутим у зовнішньому середовищі. GNSS можна використовувати всередині дерев'яних або цегляних будівель із точністю близько 10 м, приймаючи час збору близько 20 с. Однак HSGNSS ще не готовий до використання для пішохідної навігації в більшості громадських будівель, і тому ринок нових послуг, заснованих на визначенні місця розташування, не може бути задоволеним лише на основі HSGNSS. Однак HSGNSS може бути корисним компонентом внутрішньої навігаційної системи з кількома датчиками IMU для надання розріджених оновлень позиції. Нещодавно Atmel2 і U-blox3 оголосили про наявність нової технології відстеження слабого сигналу GPS під назвою Super Sense. Завдяки цьому новому програмному забезпеченню GPS GPS-навігація стає можливою всередині будівель і глибоких міських каньйонах завдяки його чутливості відстеження понад -158 дБм⁴ для точного визначення місця розташування як у приміщенні, так і зовні. Крім того, iGPS — це лазерна тривимірна вимірювальна система, яку можна використовувати для високоточних промислових вимірювань. Ця техніка iGPS складається з двох або більше статичних передавачів, які безперервно надсилають два обертові віялоподібні лазерні промені та опорний інфрачервоний імпульс (рис.2.1). На основі різниці в часі надходження (TDoA) між трьома сигналами відносні горизонтальний і вертикальний кути щодо приймача визначаються.

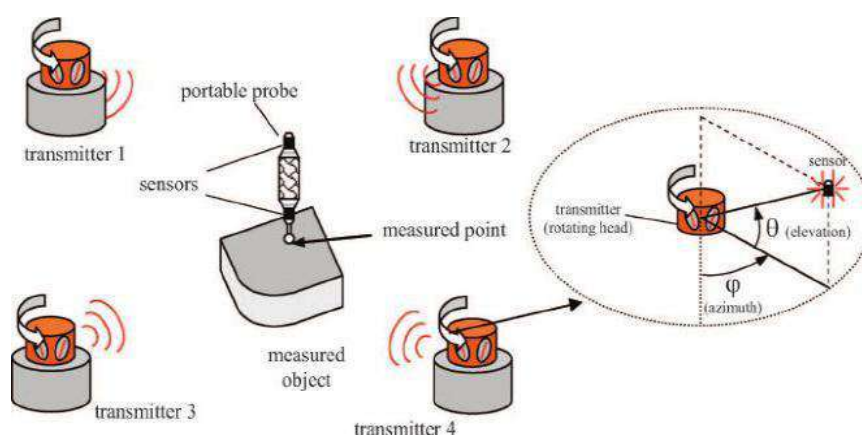


Рисунок 2.1 – Визначення масштабу iGPS

2.2 Інфрачервоні датчики

Ця техніка використовує технологію бездротового зв'язку, яка вважається найбільш часто використовуваною в системах локалізації. Вона використовує невидимий спектр світла трохи нижче червоного краю видимого спектру, що робить цю технологію менш нав'язливою порівняно з позиціонуванням у приміщенні на основі видимого світла [10, 18]. Три основні методи використання інфрачервоних сигналів: (а) використання активних маяків, (б) інфрачервоне зображення з використанням природного (тобто теплового) випромінювання або (с) штучних джерел світла. Також ІЧ можна використовувати двома різними способами; пряме ІЧ і дифузне ІЧ. IrDA (інфрачервона асоціація даних) є прикладом прямого ІЧ-зв'язку, який використовує спеціальний стандарт передачі даних «точка-точка», призначений для зв'язку з дуже низьким енергоспоживанням. IrDA вимагає зв'язку між пристроями в межах прямої видимості на дуже короткій відстані та зі швидкістю до 16 Мбіт/с. З іншого боку, дифузне ІЧ має сильніші сигнали, ніж пряме ІЧ, і, отже, має більший діапазон (9-12). метрів. Diffuse IR використовує ширококутні світлодіоди, які випромінюють сигнали в багатьох напрямках. Таким чином, він дозволяє з'єднуватися від одного до багатьох і не потребує прямої видимості [19]. Основна перевага використання ІЧ системних пристроїв полягає в тому, що вони невеликі, легкі та прості у використанні. ІЧ-системи виконують точне визначення позиціонування в приміщенні. Окрім цього, системи позиціонування всередині приміщень на основі ІЧ-протоку мають деякі недоліки, як-от проблеми з безпекою та конфіденційністю. ІЧ-сигнали мають деякі обмеження для визначення місцезнаходження, як-от перешкоди від флуоресцентного та сонячного світла [16]. Окрім цього, внутрішня система на основі ІЧ-випромінювання має дороге системне обладнання та вартість обслуговування.

2.3 RFID

Радіочастотна ідентифікація вважається простою технологією, яка має історію 50 років тому, її зазвичай використовують для визначення позиційних систем із деякими перевагами; наприклад, радіохвилі можуть легко проникати через перешкоди, такі як стіни будівель і людські тіла. Завдяки цьому система позиціонування на основі РЧ має більшу зону покриття та потребує менше апаратного забезпечення порівняно з іншими системами.

Технологія RFID базується на використанні зчитувача RFID, оснащеного однією або декількома антенами зчитувача та активними або пасивними приймачами-передавачами (тобто мітками). Загальна схема, яка показує, як працює ця технологія, представлена на рис.2.2. Активні RFID-мітки містять акумулятор і можуть передавати сигнали автономно, тоді як пасивні RFID-мітки не мають акумулятора і потребують зовнішнього джерела для передачі сигналу [20]. Як правило, дані в мітці складаються з однозначного серійного номера, але також додаткова інформація (наприклад, інформація про місцезнаходження) може зберігатися в мітці. Обсяг даних, які можуть зберігатися в тегу, залежить від розміру його пам'яті. Особливості цієї технології роблять її ідеальним кандидатом для відстеження кількох продуктів, таких як харчові продукти або ліки [17, 21] вздовж ланцюга постачання, але вона також використовується для багатьох інших цілей, включаючи локалізацію в приміщенні.

Локалізацію RFID можна класифікувати на два типи, тобто локалізацію зчитувача та локалізацію мітки залежно від того, що потрібно локалізувати між зчитувачем і тегом. У локалізації зчитувача точність системи RFID сильно залежить від щільності розміщення міток і максимальних діапазонів зчитування. У ймовірному контексті локалізації можна розгорнути велику кількість тегів RFID, які містять інформацію про місцезнаходження, щоб охопити все середовище в приміщенні. Людина з ручним зчитувачем могла прочитати найближчий тег і

отримати інформацію про свою позицію. Недоліком цього підходу є велика кількість RFID-міток, які необхідно використовувати та попередньо записувати інформацію про місцезнаходження. Крім того, RSSI можна використовувати для грубої оцінки діапазону з метою застосування методів мультилатерації. Навпаки, локалізація мітки вимагає кількох RFID-зчитувачів, розміщених у середовищі у відомих місцях.

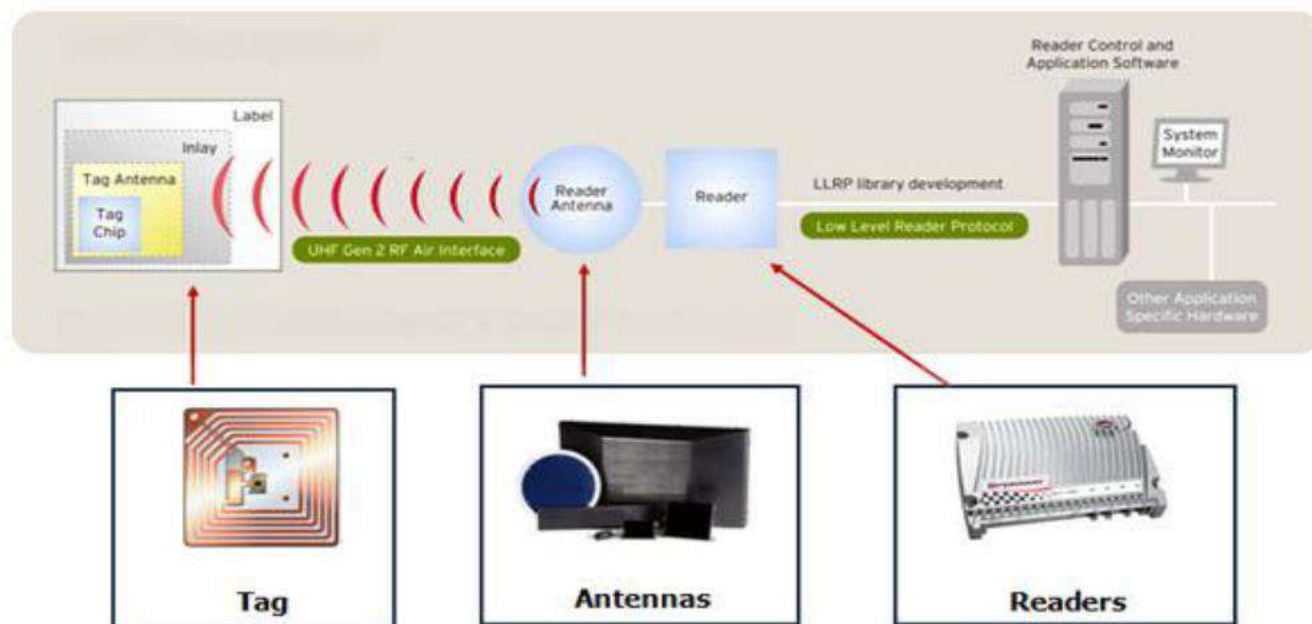


Рисунок 2.2 – Схема роботи технології RFID

Очевидно, що цей метод дорожчий, і вартість зростає зі збільшенням кількості використовуваних зчитувачів RFID. Технологія RFID працює без прямого LoS оскільки радіохвилі мають здатність проникати крізь тверді матеріали, але потужність сигналу залежить від щільності об'єктів у будівлі, тому точність часто обмежена. Типові частотні діапазони, що використовуються в RFID, класифікуються як: (i) Низька частота (LF) на 125-134 кГц; (ii) Висока частота (HF) на 13,56 МГц; (iii) Надвисокі частоти (UHF) на 860-960 МГц. Окрім можливості роботи в середовищі NLoS, іншими перевагами технології RFID є висока швидкість передачі даних, висока безпека, економічна ефективність і компактність. Основні обмеження технології LF і HF RFID пов'язані з малим діапазоном зчитування і можливістю зчитувати лише кілька тегів одночасно. Натомість, щодо технології UHF RFID, її недоліки в основному пов'язані з поглинанням або відображенням радіочастотних

хвиль у присутності рідин або металів, відповідно, основними перевагами цієї технології є те, що необхідний безконтактний зв'язок і відсутність прямого зору (N-LOS) [6]. Тому системи RFID широко застосовуються як приваблива технологія для багатьох важливих застосувань, таких як відстеження активів і промислова автоматизація.

2.4 Стільниковий метод

Ця техніка робить інвестиції у використання мобільних телефонів GSM\CDMA у всьому світі, і вона має три методи: i- GSM Fingerprinting ii- GSM-позиціонування на основі відстані iii- GSM-позиціонування на основі кута. На відміну від WLAN, GSM працює в ліцензованих діапазонах, які запобігають перешкодам від інших пристроїв, що працюють на тій же частоті [9]. Позиціонування всередині приміщень на основі мобільної стільникової мережі можливе, якщо будівля охоплена декількома базовими станціями або однією базовою станцією з потужним RSS, отриманим внутрішніми мобільними клієнтами [11]. Найпоширенішим методом GSM позиціонування в приміщенні є зняття відбитків пальців за рівнем потужності (RSS) [18, 22]. Позиціонування всередині приміщень на основі мобільної стільникової мережі можливе, якщо будівля охоплена кількома базовими станціями або однією базовою станцією з потужним RSS, який отримують внутрішні мобільні клієнти. Otsasen та ін. представили систему локалізації в приміщенні на основі GSM. Їхньою ключовою ідеєю, яка робить можливою точну локалізацію в приміщенні на основі GSM, є використання відбитків пальців із широкою інтенсивністю сигналу. Широкий відбиток пальця включає шість найсильніших GSM-стільників і зчитування до 29 додаткових GSM-каналів, більшість із яких достатньо потужні, щоб їх виявити, але занадто слабкі, щоб використовувати їх для ефективного зв'язку. Вища розмірність, введена додатковим каналом, значно підвищує точність локалізації. Вони представляють результати експериментів, проведених із

відбитками пальців, зібраними з трьох багатоповерхових будинків із застосуванням зваженої методики kNN. Результати показують, що їхня система локалізації всередині приміщень може розрізняти поверхи та досягати середньої точності в межах 2,5 м. Той самий метод можна застосувати в мобільній мережі IS-95 CDMA та 3G.

2.5 UWB

Ultra-Wide Band — це нова комунікаційна технологія, яка має великі відмінності від традиційних комунікаційних технологій. Методи позиціонування з використанням UWB можна класифікувати на: 1-Пасивна локалізація UWB, 2-UWB Virtual Anchor, 3-UWB Direct Ranging, 4-UWB Fingerprinting. Він не вимагає використання традиційного зв'язку, на відміну від інших технологій, використовує субнаносекундний радіоімпульс для передачі даних у широкому діапазоні смуги пропускання (зазвичай понад 500 МГц). Його передачу можна розглядати як фоновий шум для інших бездротових технологій, отже теоретично він може використовувати будь-який спектр без перешкод для інших користувачів. Він використовує невелику потужність передачі $-41,4$ дБм/МГц (яка обмежена FCC), що означає низьке енергоспоживання. Ще одна перевага UWB полягає в тому, що він несприйнятливий до проблем багатошляхового передачі даних. Вважається, що зв'язок малої дальності з високою пропускнуою здатністю має властивості стійкості до багатопроменевого передачі. Широке використання UWB у різноманітних програмах локалізації, які вимагають вищої точності на 20–30 см, ніж досягається за допомогою звичайних бездротових технологій (наприклад, радіочастотна ідентифікація (RFID), бездротові локальні мережі (WLAN) тощо) [23]. Типова установка UWB структурує генератор радіохвиль стимулу та приймачі, які вловлюють поширену та розсіяну хвилю. Крім того, апаратне забезпечення UWB є дорогим, що робить його дорогим для широкого використання.

2.6 WLAN (IEEE 802.11)

Стандарт бездротової локальної мережі (WLAN) середнього класу став дуже популярним у громадських точках доступу та на підприємствах протягом останніх кількох років. Стандарт IEEE 802.11 WLAN був ратифікований у червні 1997 року. Стандарт визначає протокол і сумісне з'єднання обладнання для передачі даних по повітрю в локальній мережі.

(LAN) з використанням протоколу множинного доступу із визначенням несучої з механізмом спільного використання середовища з уникненням зіткнень (CSMA/CA) [23]. IEEE 802.11 із типовою загальною швидкістю передачі даних 11, 54 або 108 Мбіт/с і діапазоном від 50 до 100 метрів наразі є домінуючим стандартом локальної бездротової мережі [19]. Використання Wi-Fi у внутрішніх системах позиціонування та навігації залежить від знання списку бездротових маршрутизаторів, доступних у зоні, де працює система. Найпопулярнішим методом позиціонування WLAN є RSS (потужність отриманого сигналу), який легко отримати в мережах 802.11. і може працювати на стандартному обладнанні WLAN [1]. Методи часу прибуття (ToA), різниці в часі прибуття (TDoA) і кута прибуття (AoA) менш поширені в WLAN через складність вимірювання часу та кутових вимірювань. Точність типових систем позиціонування WLAN, що використовують RSS, становить приблизно від 3 до 30 метрів із частотою оновлення в межах кількох секунд.

2.7 Bluetooth (IEEE 802.15)

Bluetooth — це бездротовий стандарт для бездротових персональних мереж (WPAN). На відміну від ZigBee, стандарт Bluetooth є власним форматом, керованим Bluetooth Special Interest Group (SIG) [18]. Bluetooth розроблено як технологія з дуже низьким енергоспоживанням для однорангового зв'язку, яка працює в діапазоні ISM 2,4 ГГц. Порівняно з WLAN загальна швидкість передачі даних нижча (1 Мбіт/с), а діапазон менший приблизно від 10 см до 10 метрів [11,24]. Local Positioning group — одна з груп Bluetooth SIG, яка досліджує використання бездротової технології Bluetooth для позиціонування. Мітки Bluetooth — це приймачі малого розміру. Як і будь-який інший пристрій Bluetooth, кожен тег має унікальний ідентифікатор. Цей ідентифікатор можна використовувати для визначення місцезнаходження тегу Bluetooth [3]. Тег BlueTags є типовим тегом Bluetooth.

Рішення Toraz для локального позиціонування базується на інфраструктурі Tadlys Bluetooth і аксесуарах. Це модульне рішення позиціонування складається з трьох типів елементів: сервер(ів) позиціонування, бездротові точки доступу та бездротові мітки, показані на рис.2.3. Продуктивність системи робить її придатною для відстеження людей і активів. Ця система забезпечує точність по кімнаті (або, альтернативно, 2-метрову просторову точність) із 95% надійністю. Затримка позиціонування 15–30 с. Продуктивність ще більше покращена в системі Toraz нового покоління, яка об'єднує інфрачервоні та інші перетворювачі, з можливостями позиціонування та зв'язку Bluetooth.

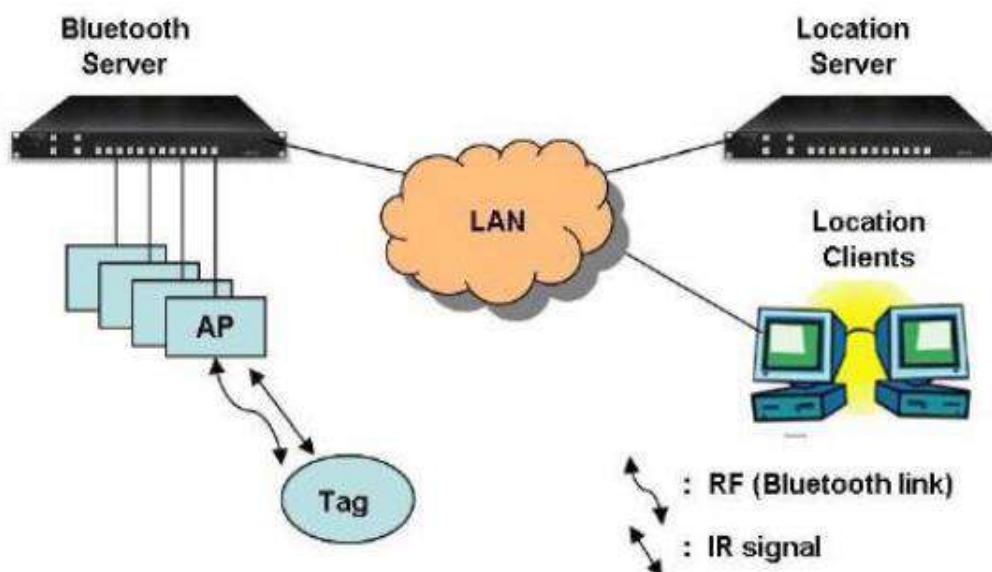


Рисунок 2.3 – Архітектура системи Toraz

В основі архітектури Bluetooth лежить пікомережа (piconet). Це централізована мережа з одним головним вузлом та до семи підлеглих вузлів, що розташовані у радіусі 10 метрів. Пікомережі зв'язуються між собою з використанням спеціального вузла – мосту. Об'єднання таких мереж складають розсіяну мережу (scatternet).

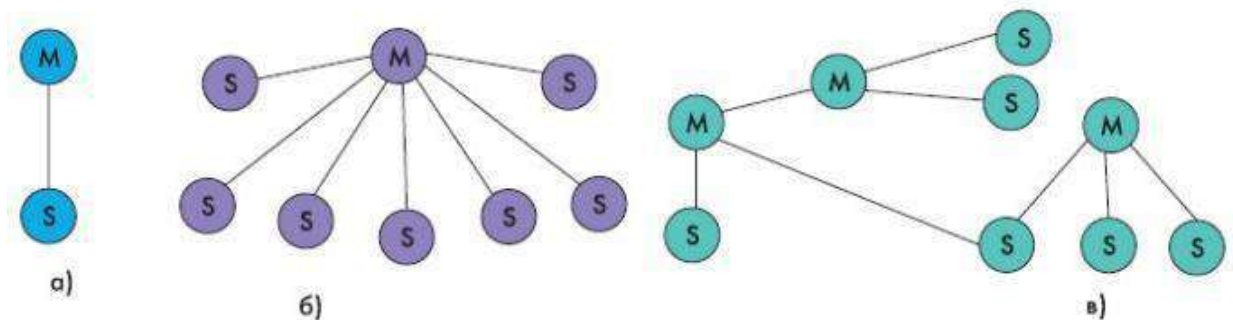


Рисунок 2.4 — Види топології мереж Bluetooth

Всі пристрої мережі поділяються на головні (M - master) та підлеглі (S - slave). Кожен пристрій може бути як головним так і підлеглим/

Характеристики пікомережі:

- в одній пікомережі існує тільки один головний пристрій, всі інші підлеглі
- максимальна кількість пристроїв однієї пікомережі, що одночасно беруть участь у передачі інформації (до 8 включно);
- загальна кількість пристроїв, що можуть бути підключені до провідного пристрою однієї пікомережі, не обмежена;
- у кожний момент часу обмін даними може йти тільки між двома пристроями в одному напрямку.

Розсіяна мережа:

- утворюється шляхом перекриття окремих пікомереж;
- кожен пристрій однієї пікомережі може входити в іншу пікомережу в якості як підлеглого, так і як головного.

В архітектурі Bluetooth реалізовано часове ущільнення — головний вузол контролює та розподіляє часові інтервали між підлеглими вузлами. Безпосередньо підлеглі вузли не пов'язані — зв'язок здійснюється через головний вузол.

Технологія Bluetooth має кілька версій які відрізняються протоколами та технічним забезпеченням.

Таблиця 1.2 — Порівняння версій Bluetooth

	4.1	4.0	3.0	2.x	1.x
Базова швидкість	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с	1 Мбіт/с
Підвищена швидкість передачі (EDR)	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	3 Мбіт/с	ні
High Speed	54 Мбіт/с	54 Мбіт/с	54 Мбіт/с	ні	ні
Дальність (макс./мін. потужність)	100 м/ 10м	100 м/ 10м	100 м/немає	100 м/немає	100 м/немає
Режим низького енергоживлення	так	так	ні	ні	ні
Подвійний профіль (одночасно Master та Slave)	так	ні	ні	ні	ні
Підтримка IPv6	готується	ні	ні	ні	ні
Спряження NFC	так	так	да	да	ні
128-бітне шифрування AES	так	так	ні	ні	ні

Найбільш розповсюджена версія Bluetooth на даний момент 4.1, вона має такі параметри:

- класичний Bluetooth що дає можливість працювати з пристроями попередніх версій;
- високошвидкісний Bluetooth який працює на протоколах WiFi;
- Bluetooth з низьким енергоспоживанням(BLE).

Смуга частот: 2402 000 000 Гц – 2480 000 000 Гц (2,402 ГГц – 2,48 ГГц)

Протокол BLE призначений, перш за все, для мініатюрних електронних датчиків (які використовуються у спортивному взутті, тренажерах, мініатюрних сенсорах, розміщуються на тілі пацієнтів і т.д.). Низьке енергоспоживання досягається рахунок використання особливого алгоритму роботи. Передавач включається лише на час надсилання даних, що забезпечує можливість роботи від однієї батареї протягом декількох років. Стандарт забезпечує швидкість передачі в 1 Мбіт/с при розмірі пакетів даних від 8 до 27 байт. Два Bluetooth-пристрої встановлюють з'єднання менш ніж за 5 мілісекунд на відстані до 100 м. При з'єднанні використовується вдосконалена корекція помилок, а необхідний рівень безпеки забезпечується 128-бітовим AES-шифруванням.

Також створено версію 5.0, в якій збільшено максимальний радіус дії у чотири рази та 5.1 в якій додано направлені антени що створює можливість використання методу AoA.

2.8 ZigBee

Ця технологія є типовою для систем локалізації всередині приміщень, її новий стандарт бездротової технології для PAN/LAN призначений для додатків, які не потребують значної пропускної здатності даних, але вимагають низького енергоспоживання, тому вона забезпечить рішення для зв'язку на короткі та середні відстані завдяки своїй численні переваги [25]. Він в основному призначений для додатків, які вимагають низького енергоспоживання, але не потребують великої пропускної здатності даних. Діапазон покриття сигналу ZigBee у приміщенні

становить від 20 до 30 метрів. Розрахунок відстані між двома вузлами ZigBee зазвичай виконується на основі значень RSSI. ZigBee відкрита для перешкод від широкого діапазону типів сигналів, що використовують ту саму частоту, що може призвести до перешкод радіозв'язку, оскільки він працює в неліцензованих діапазонах ISM. Багато досліджень розгорнули алгоритм локалізації на основі ZigBee для внутрішнього середовища [26]. Крім того, пропонуються способи покращення визначення позиції в системі визначення місця розташування в приміщенні (ILS) на основі рівнів потужності (RSSI) спеціальної мережі ZigBee.

2.9 Технологія FM

Технологія FM (частотна модуляція) вважається бездротовою технологією на великі відстані, яка використовується в усьому світі для регіонального радіомовлення. У більшості регіонів він використовує радіоспектр від 87,5 до 108,0 МГц. Використовуючи VHF (дуже високу частоту), яка є набагато нижчою, ніж WiFi та інші сучасні бездротові технології, FM менше піддається впливу погодних умов або перешкод, таких як стіни. З повсюдним поширенням FM немає необхідності будувати додаткову інфраструктуру маяків, використовуючи FM для локалізації всередині приміщень. Крім того, FM-приймач дешевий і споживає менше енергії, отже, довше працює акумулятор. Однак FM-станція знаходиться дуже далеко, а FM має велику довжину хвилі (близько 3 м), що означає, що потужність FM-сигналу не змінюється різко на короткій відстані. Тому FM краще працює на великій території. Оскільки різні FM-станції використовують FDMA для спільного використання спектру, багатоканальні сигнали можна використовувати для зменшення дисперсії або помилки, внесеної одноканальним сигналом.

2.10 Технології на основі зображень

Однією з ефективних технологій можна назвати системи візуального позиціонування. Метод аналізу бачення оцінює місцезнаходження на основі зображень, отриманих в одній або кількох точках. Його можна розділити на такі підтехнології; 1-Еталон із 3D-моделей будівель, 2-Еталон із зображень, 3-Еталон із розгорнутих закодованих цілей, 4-Еталон із спроектованих цілей, 5- Системи без еталонних зображень. Зазвичай одна або кілька камер фіксуються в зоні відстеження IPS для охопити все місце та робити зображення в реальному часі. За зображеннями ідентифікуються супроводжувані цілі. Спостережувані зображення цілей шукаються в базі даних попередніх вимірювань, щоб зробити оцінку положення. Крім того, техніка зорового позиціонування може надати корисний контекст розташування для служб на основі захоплених зображень або за допомогою недорогих двовимірних тегів (наприклад, штрих-кодів) із закодованою інформацією, яка може бути записана та оброблена мобільним пристроєм із вбудованою камерою. , як і в системі, запропонованій у [21]. Символічне розташування пристрою оцінюється шляхом пошуку ідентифікатора мітки та пов'язаного з ним розташування в базі даних розгортання або шляхом декодування інформації про місцезнаходження, вбудованої в сам тег [14]. Системи позиціонування на основі аналізу відеосцени засновані на технології комп'ютерного зору для розпізнавання відстежуваних об'єктів у відеоданих. Easy Living від Microsoft Research надає один із прикладів цього підходу [1], коли система відеоспостереження відстежує рухомі об'єкти, розпізнані у відеосценах. Крім того, мобільний пристрій може використовувати аналіз відеосцени, щоб оцінити своє місцезнаходження шляхом порівняння знімка сцени, створеного ним самим, із низкою попередньо спостережених спрощених зображень сцени, зроблених з різних позицій і точок зору. Покращена продуктивність і субметрову (1 см – 1 м) точність систем локалізації на основі камери зробили їх

перспективними рішеннями для позиціонування для застосування в промисловості, а також для локалізації та навігації роботів і пішоходів.

2.11 Псевдоліти

Ця технологія схожа на GNSS за ідеєю, але відрізняється за застосуванням. І може використовувати хвилі GNSS. Ілюстрація операції показана на малюнку 12 для огляду системи псевдоліту. Причиною номінації є псевдосупутники. Це наземні маяки, які генерують псевдошумові коди, схожі на ті, що передаються GNSS. Псевдолітна система також включає в себе мобільні приймальні пристрої (ровери), чий позиції оцінюються на основі вимірювань відстані до псевдолітних маяків, які зазвичай розгортаються на відомих позиціях. Основним призначенням псевдолітів є підтримка GNSS із додатковими діапазонами в ситуаціях, коли супутникові сигнали заблоковані, заглушені або просто недоступні, напр. у закритих приміщеннях. Спочатку псевдоліти включали лише системи, які передають на частотах GPS L1 (1575,42 МГц) та/або L2 (1227,6 МГц) для покращення геометрії супутника для використання звичайного приймача GPS. Для використання всередині приміщень він має кілька джерел помилок, властивих для позиціонування в приміщенні на основі псевдолітів: i-Multipath викликає велике занепокоєння при використанні структур сигналу, подібних до GNSS, у приміщенні ii-Проблема близького далекого розташування виникає через перешкоди сигналу псевдолітів із великими відмінностями. на відстані до приймача iii- Синхронізація часу залишається дорогим і складним завданням для вимірювань дальності псевдолітів iv-Рішення для неоднозначності фази несучої не знайдено просто для систем псевдолітів, які

покладаються на вимірювання фази, як ми бачимо. застосування в середовищах, де важко використовувати GNSS, наприклад відкритих шахтах. Ці труднощі виникають насамперед через необхідність пом'якшення багатопроменевого поширення, синхронізації часу та вирішення неоднозначності. Спокусливому підходу до трансляції сигналу GPS L1 або використання ретрансляторів GNSS перешкоджають нормативні обмеження. Тому псевдоліти комерційних систем завжди транслюють власну структуру сигналу. У той час як на відкритому повітрі можна охопити територію в кілька кілометрів, застосування всередині обмежується окремою кімнатою або частиною будівлі.

У рамках роботи, для реалізації методики орієнтування у приміщеннях, було обрано технологію Bluetooth у першу чергу через стандартизованість та невелику вартість.

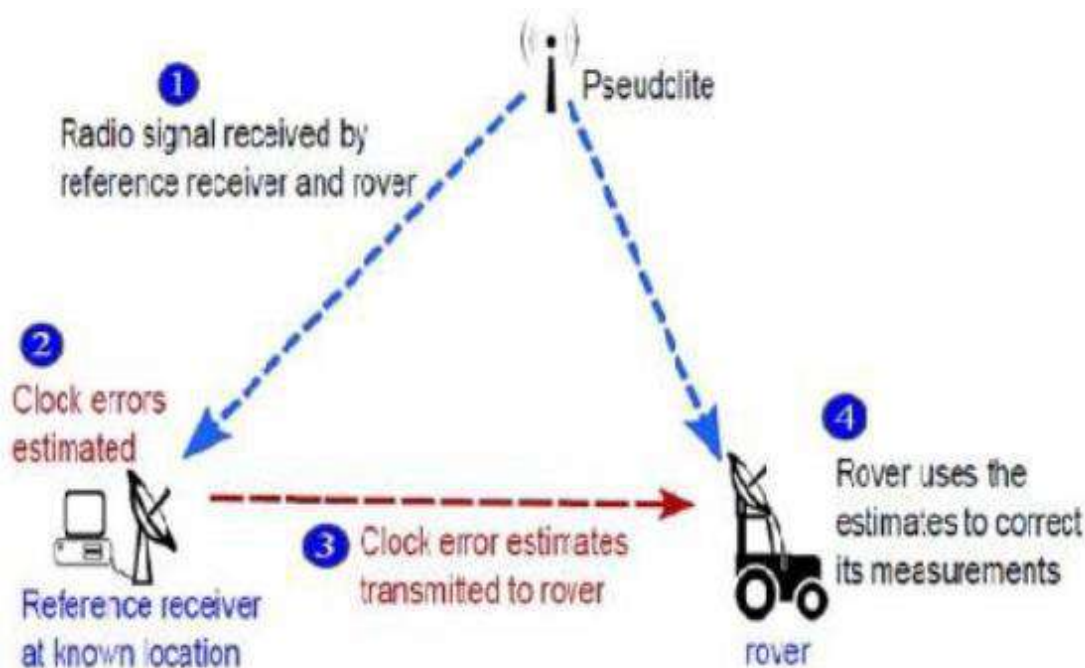


Рисунок 2.5 – Принцип роботи псевдолітів

3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

3.1 Вибір технології для реалізації

У роботі пропонується прототип IPS на основі технології BLE. Запропоноване рішення не забезпечує точного визначення місця розташування спостережуваного об'єкта в будь-який момент часу, а натомість записує проходи або сигнали прибуття в зоні передавача BLE у режимі реального часу. Це усуває потребу в дорогому апаратному забезпеченні, необхідному для точної локалізації, пов'язаному з технологією UWB, і складному налаштуванні, пов'язаному з технологією Wi-Fi. Крім того, прямий LOS не є необхідним, на відміну від технології VLC. Порівняно з технологією RFID, вона споживає набагато менше енергії та є легшою в експлуатації через відсутність великих зовнішніх антен, пов'язаних із пасивними системами RFID. Крім того, передавачі Bluetooth і зчитувачі можуть працювати від батареї.

Запропонований IPS здатний точно виявляти події, які використовуються для надання даних про переміщення предметів майже в реальному часі на складах з ручним керуванням (наприклад, невеликі роздрібні підприємства). Використовуючи розроблене рішення та додатковий аналіз отриманих даних, можна досягти більш ефективних маршрутів комплектувальника замовлень, аналізу матеріальних потоків, перевантаженості комплектувальника замовлень і загальної ефективності. Точне виявлення подій досягається за допомогою алгоритму оптимізації Nature-Inspired Optimization (NIA) для встановлення майже оптимального порогу для фільтра вимірних даних, який усуває всі вимірювання нижче встановленого порогу. Система розроблена максимально автоматично, з дуже невеликою кількістю налаштувань параметрів. Користувач керується процесом калібрування за допомогою прямого графічного інтерфейсу. Весь розроблений код доступний за запитом користувача, оскільки пропонується IPS є лише структурою, яку можна вільно адаптувати для задоволення конкретних вимог користувача.

Чотири основні переваги запропонованого IPS на основі Bluetooth:

- система автоматичного калібрування, яка потребує лише невеликого втручання завдяки процедурі автоматичного пошуку піків за допомогою алгоритму оптимізації рою частинок (PSO);

- точне виявлення подій із дуже низьким рівнем помилкових виявлень;

- проста реалізація процедури виявлення піків, здатна працювати на малопотужному апаратному забезпеченні (наприклад, Raspberry Pi);

- децентралізована архітектура, яка дозволяє передавати дані оброблятися локально, і, отже, немає витрат на сервер (у базі даних публікуються лише остаточне місцезнаходження та позначка часу).

Загалом IPS на основі Bluetooth базуються на маніпулюванні інформацією індикатора потужності отриманого сигналу (RSSI). Ці системи поділяються на три категорії за технікою, яка використовується для локалізації:

- на основі відстані;

- на основі відбитків пальців;

- методи оцінки ймовірності.

Визначити відстань за добре відомою моделлю логарифмічного нормального розповсюдження складно через шум, відбиття та багатопроменевість радіочастотного сигналу. Теоретично точність до 10 см може бути досягнута на відстані між маяками та анкерами менше ніж 1 м у середовищі з низьким рівнем шуму, коли обидва компоненти знаходяться в одній горизонтальній площині. Однак із збільшенням відстані між компонентами радіочастотний сигнал спотворюється, і точність значно падає. Ці впливи можна успішно зменшити шляхом впровадження різних фільтрів, найчастіше використовуваним є варіанти фільтра Калмана і фільтрів часток. Зняття відбитків пальців зазвичай вимагає попередньої операції калібрування, що може зайняти величезний час і зусилля; однак, якщо це зробити належним чином, це може досягти похибки позиціонування менше 1 м, особливо якщо об'єднати дані з інших датчиків. Часто цей процес потрібно повторити через деякий час через зміни навколишнього середовища. Методи оцінки ймовірності вимагають належних налаштувань параметрів, щоб працювати належним чином.

Запропонована методика не відноситься безпосередньо до жодної з вищезазначених категорій, оскільки виявляються лише події, пов'язані з місцем розташування в просторі. Однак, оскільки логарифмічно-нормальна модель використовується пасивно, методи, що ґрунтуються на відстані, є найближчими.

Методи локалізації, засновані на RSSI, зазвичай стикаються з великими помилками позиціонування або складними налаштуваннями параметрів, які можна успішно зменшити шляхом їх комбінування. Оскільки багато нових смартфонів вже мають вбудовані можливості Bluetooth, що зменшує потребу в додатковому обладнанні. Зазвичай також доступні інерціальні вимірювальні пристрої (IMU), такі як акселерометри та гіроскопи, які успішно поєднуються з можливостями Bluetooth.

Сю представили IPS, який поєднує техніку RSSI на основі відбитків пальців із системою розрахунку місцязнаходження пішоходів (PDR). Метод зняття відбитків пальців було покращено за допомогою надійного фільтра, а PDR було покращено за допомогою додаткового фільтра Махоні, що зменшило помилку дрейфу. Їх експерименти, які проводилися за допомогою смартфона та кількох маяків BLE, показали середню точність позиціонування близько 0,8 м. Дінь запропонував новий IPS на основі маяків BLE з низькою швидкістю RSSI та датчиками смартфонів. Вони застосували методику на основі відстані, яка поєднує позиціонування на основі оцінки найменших квадратів із PDR за допомогою фільтра Калмана. Їх робота також включає дослідження того, як швидкість впливає на точність системи. Точність системи становить близько 1,1 м для цілі, що йде, порівняно з 1,6 м для цілі, що біжить. Бай представили IPS, який можна використовувати для відстеження людей похилого віку. Вони запропонували метод трилатерації та відбитків пальців і порівняли результати. Вони використовували метод класифікації відбитків пальців на основі сітки та місцеположення інтересу з п'ятьма різними класифікаторами. Використовуючи наведений вище метод, вони досягли понад 90% точності в успішному визначенні цікавого місця навіть з недорогими датчиками. Но запропонував децентралізований метод позиціонування, який не потребує етапу ручного навчання перед розгортанням, а замість цього відбувається на льоту. Вузли прив'язки транслюють і отримують сигнали від інших прив'язок одночасно, для

чого необхідно змінити операцію прив'язки. Середня похибка в 1,5 м була досягнута в найкращому випадку.

Конкретно в складському господарстві нещодавно було зроблено два важливі внески в області IPS на основі BLE. Чжао розробив IPS, який відстежує зібрані навантажувачі на складі. Автор використів передавачі Bluetooth, які були поміщені в сумку, прикріплену до кожного навантажувача. Вони автоматизували процес збору даних, тож розмістили приймачі (Raspberry Pi) на стелі над навантажувачами, які повідомляють, чи зберігається навантажувач у цьому секторі. Дослідження проводилося на реальному складі, але оскільки навантажувачі пересуваються лише секторами складу, а приймачі нерухомі, проблема відносно проста. Лі та ін. розробили рішення IPS на основі технології BLE для використання в складських середовищах. Його архітектуру можна розділити на дві частини: фреймворк Інтернету речей (IoT) і модуль локалізації. Локалізація виконується на основі трилатерації, але використовується новий оцінювач відстані LSTM через значні неточності, які походять від використання моделі логарифмічного нормального поширення. Кілька самоадаптивних механізмів також були використані для підвищення точності локалізації – пружний радіус перетину, множинна зважена центроїдна локалізація та варіант фільтра Калмана. Система була випробувана в ідеальних лабораторних умовах і на великомасштабному складі Alibaba. У першому сценарії була досягнута точність локалізації близько 0,9 м і 1,5 м у другому відповідно.

Використовуючі результати багатьох розглянутих досліджень було прийнято рішення запровадити методику на основі датчиків на основі технології BLE та мікрокомп'ютера Raspberry Pi.

3.2 Методика позиціонування на основі маяків

Основним завданням мікрокомп'ютера Raspberry Pi є прийом і обробка повідомлень (рекламних даних), які передаються маяками BLE. В отриманому повідомленні є лише дві важливі частини інформації:

- MAC-адреса маяка BLE;
- RSSI.

RSSI є мірою частини отриманої потужності, надісланої від маяка BLE. На основі показників RSSI можна визначити приблизну відстань між передавачем і приймачем за моделлю нормального логарифмічного поширення. Модель визначається рівнянням:

$$p_r(d)_{dB} = \bar{p}_r(d_0)_{dB} - 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + x_d > d_0 \quad (3.1)$$

де $p_r(d)_{dB}$ – прийнята потужність на відстані d від передавача (також RSSI);

$\bar{p}_r(d_0)_{dB}$ — середнє значення всіх можливих переданих потужностей на еталонній відстані d_0 , n , якщо коефіцієнт втрати потужності, – це випадкова величина Гаусса змінна із середнім 0 і дисперсією 2, що описує випадкові ефекти затінення.

$\bar{p}_r(d_0)_{dB}$ – розраховується на основі рівняння:

$$\bar{p}_r(d_0)_{dB} = p_t - p_{d_0}, \quad (3.2)$$

де p_t — потужність передавача;

p_{d_0} — втрата потужності на контрольній відстані (1 м).

p_{d_0} отримується шляхом вимірювання або обчислюється за втратою потужності у формулі вільного простору в рівнянні (3.3).

$$p_{d_0} = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right), \quad (3.3)$$

де λ являє собою довжину хвилі переданої електромагнітної хвилі, c — швидкість світла, f — несучу частоту сигналу.

Модель розповсюдження розглядає затінення, випадкова змінна якого має гауссів (нормальний) розподіл, звідси й назву логарифмічного нормального. Наш додаток; однак не використовує жодне з наведених вище рівнянь безпосередньо, а просто спостерігає за підвищенням і падінням значень RSSI під час руху людини.

Розроблене програмне забезпечення для внутрішньої локалізації ділиться на три частини, кожна з яких працює на своїй платформі. MATLAB працює на комп'ютері з ОС Windows і використовується для алгоритмів, які не працюють у реальному часі інтенсивно використовують ЦП. Raspberry Pi працює на операційній системі Raspbian для алгоритмів локалізації, розроблених на Python. Він включає виявлення BLE, обробку сигналів і алгоритми оцінки, які працюють у кількох потоках у режимі реального часу. Виявлення BLE базується на «bluepy» бібліотеці Python. Google Spreadsheets API використовується як база даних для виявлених користувачів, які проходять повз маяки BLE. Код користувача Python, який використовується для візуалізації, працює на різних платформах і аналізує дані з електронних таблиць Google. Кожна зі згаданих частин програмного забезпечення працює відповідно до фаз використання:

- фаза калібрування;
- фаза виявлення в реальному часі;
- фаза постобробки (рис.3.1).

Фаза виявлення в реальному часі та фаза постобробки переплетені та взаємозалежні, а саме, дані з фази виявлення в реальному часі необхідні для виконання фази постобробки (візуалізації).

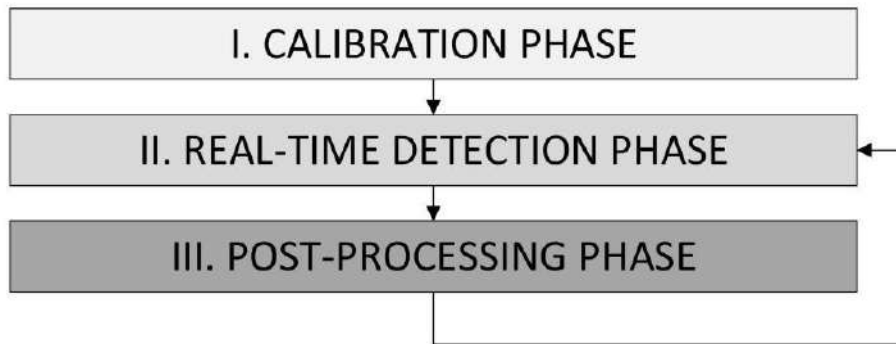


Рисунок 3.1 – Фази запропонованої внутрішньої системи позиціонування.

3.3 Калібрування в розробленій методиці

Етап калібрування необхідний для оптимізації значення порогового значення фільтра вимірних даних, що використовується на етапі локалізації, щоб забезпечити точне виявлення проходження повз маяки BLE. Електромагнітні сигнали, які випромінюють маяки, сприйнятливі до шуму, тому необроблені дані вимірювань RSSI повинні бути відфільтровані та оброблені належним чином для точного виявлення піків і придушення помилкових виявлень. Лише необроблені невідфільтровані дані зберігаються та передаються в цільову функцію, яка повинна визначити правильне порогове значення для досягнення найкращого співвідношення сигнал/шум (SNR) для покращення можливостей виявлення в реальному часі. Тому особа, яка несе приймач IPS, повинна правильно і точно визначити час, коли вона проходить повз маяк BLE. Отримані вимірювання (значення RSSI та часові позначки) імпортуються в MATLAB, який виконує процедуру калібрування (рис. 3.2).

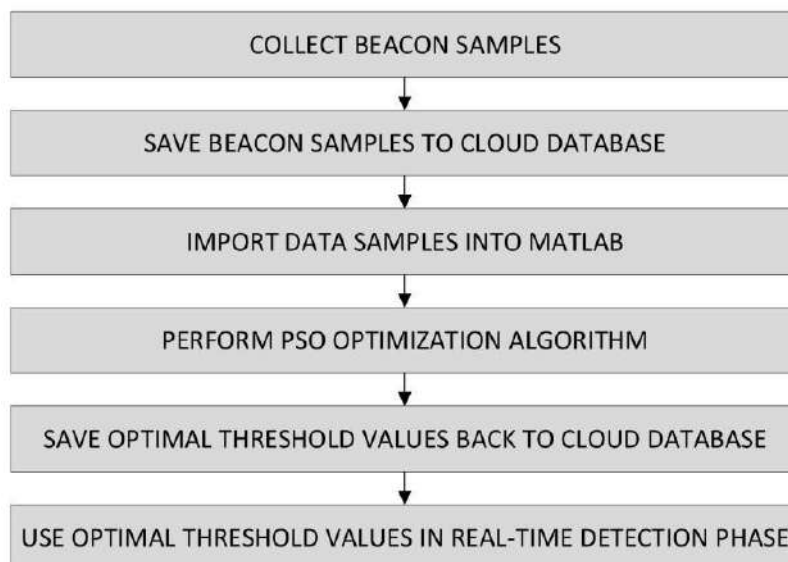


Рисунок 3.2 – Процедура калібрування.

Під час фази калібрування шість-вісім окремих вимірювань маяків BLE (шість-вісім зразків RSSI) фіксуються за певних умов, згідно протоколу вимірювань. Кожного разу, коли людина з Raspberry Pi проходить перпендикулярно маяку на фіксованій відстані, необхідно натиснути кнопку миші. Зібрані дані заархівовуються та зберігаються у веб-службі для подальшого аналізу, де MATLAB зчитує їх. Дані інтерпретуються за допомогою MATLAB і виконується завдання пошуку оптимального порогового значення, щоб переконатися, що піки не відфільтровані та не включено додаткові помилкові спрацьовування. Щоб знайти найкраще порогове значення фільтра виміряних даних, цільова функція виражається як:

$$f = (n_{\text{peak}} - n_{\text{det}}) \cdot f_1 + n_{\text{miss}}(1 - f_1) \quad (3.4)$$

де n_{peak} – кількість фактичних піків;

n_{miss} – кількість помилково виявлених піків;

n_{det} – кількість виявлених піків.

f_1 – міра чутливості.

Алгоритм PSO використовується для мінімізації цільової функції. В одному з досліджень було виявлено, що PSO алгоритм легко реалізувати, він має досить

прості налаштування параметрів і ефективно використовує обчислювальні ресурси. Крім того, PSO виявився кращим з точки зору швидкості конвергенції, що означає, що потрібно менше оцінок і швидше виконується процес оптимізації.

Алгоритм PSO був розроблений Ебенхардом і Кеннеді в 1995 році. Він заснований на поведінці певних видів тварин або комах, які живуть групами (наприклад, зграї птахів або риб). Особа в популяції називається «частинкою» і представляє собою потенційне вирішення проблеми. Частинки практично подорожують через простір пошуку. Кожна частинка має два параметри, тобто положення та швидкість. Чим краще рішення, тим краще значення його функції оцінки. Частинки проходять крізь простір і переміщують розчин, слідуючи за найкращою частинкою на даний момент. PSO також використовує пам'ять, оскільки зберігає глобальну найкращу частинку на додаток до локальної найкращої частинки. У нашій роботі ми використали так званий канонічний PSO, який є спрощенням оригінального PSO. Найкраща локальна частинка (локальна найкраща) — це найкраща позиція, яку частинка може досягти протягом заданої кількості ітерацій.

Глобальне найкраще представляє найкраще рішення, знайдене алгоритмом до певного етапу оптимізації.

Щоб знайти найкращі локальні та глобальні значення для частинки, необхідно розрахувати її швидкість, а потім нове положення частинки згідно з наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} v^{(k)}_i &= C_0 \cdot v^{(k-1)}_i + C_1 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (g^{(k)} - x^{(k)}_i) + C_2 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (p^{(k)}_i - x^{(k)}_i) \\ x^{k+1}_i &= x^{(k)}_i + v^{(k)}_i \end{aligned} \quad (3.6)$$

Функція $\text{rand}(0,1)$ обчислює випадкове значення між $[0, 1]$. Константа C_0 представляє ваговий коефіцієнт значення швидкості частинки з попередньої ітерації та являє собою інерцію руху частинки. Зазвичай значення C_0 становить від 0 до 1 (найкращі значення трохи нижче 1). Константи C_1 і C_2 є константами навчання і зазвичай приймають значення 2. Константа C_1 представляє кількість знань або

досвіду, набутого самою частинкою, а C_2 — знання, набуті роєм. Псевдокод процедури оптимізації, що містить оптимізацію PSO, виражений в Алгоритмі:

```

1: Initialize best_global_fitness.
2: Initialize population consisting of i particles with random position between [min, max].
3: Initialize generation consisting of j populations.
4: for each particle in population do
5: Calculate number of actual and miss-detected peaks with particle_position.
6: Calculate fitness function best_local_fitness.
7: best_local_solution = particle_position (i)
8: if best_local_fitness (i) < best_global_fitness then
9: best_global_fitness = best_local_fitness (i)
10: best_global_solution = best_local_solution (i)
11: end if
12: end for
13: for each population in generation do
14: for each particle in population do
15: Calculate new particle velocity new_particle_velocity.
16: Calculate new particle position new_particle_position with new_particle_velocity.
17: Calculate number of actual and miss-detected peaks with new_particle_position.
18: Calculate fitness function local_fitness.
19: if local_fitness < best_local_fitness (i) then
20: best_local_solution (i) = new_particle_position (i)
21: best_local_fitness (i) = local_fitness
22: end if
23: if local_fitness < best_global_fitness then
24: best_global_solution = new_particle_position (i)
25: best_global_fitness = local_fitness
26: end if
27: end for
28: end for
29: optimal_threshold = best_global_solution
30: return optimal_threshold

```

Завдяки кількості оцінок PSO, які використовуються в процесі оптимізації для кожного маяка ($n_{fes} = 500$), оптимальне порогове значення розраховується на ПК, а не на Raspberry Pi. Зокрема, для кожного окремого маяка необхідно виконати калібрування, щоб забезпечити оптимальне виявлення та відхилення помилкових спрацьовувань. Процес калібрування відбувається в додатку, розробленому MATLAB App Designer, який візуально супроводжує користувача через увесь процес калібрування (рис. 3.3). Графічний інтерфейс користувача програми (GUI) зручний, інтуїтивно зрозумілий, а процес калібрування майже повністю автоматичний. Однак, через коливання вимірювань, іноді пороги повинні бути точно налаштовані вручну користувачем. Звичайно, перш ніж система буде використана в остаточному застосуванні, порогові значення повинні бути перевірені відповідним чином.

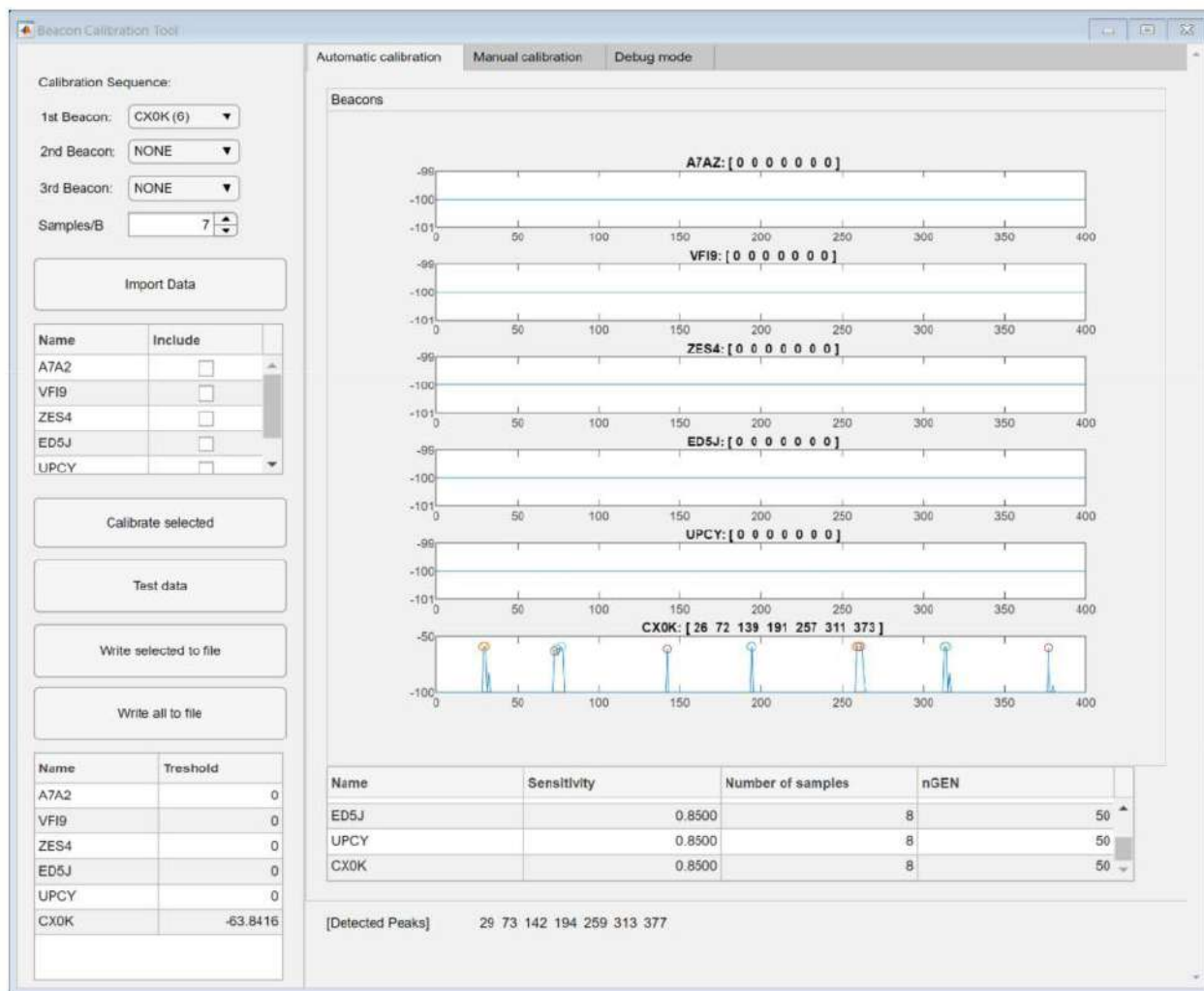


Рисунок 3.3 – Інструмент калібрування маяка, розроблений у MATLAB.

Міра чутливості (рис. 3.3) регулює ваговий коефіцієнт f_1 функції придатності f ; значення, ближчі до 1, віддають перевагу пороговим значенням, які можуть мати кілька помилкових виявлень, але також виявляють більшу кількість піків, навпаки, значення, ближчі до 0, віддають перевагу пороговим значенням, які усувають помилкові виявлення, але також можуть відфільтрувати фактично виявлені піки. Кількість зразків регулює інтервал, у якому мають бути піки. Менші значення звужують інтервал, що запобігає багаторазовому виявленню, але також може пригнічувати фактичні піки. Кількість поколінь (n_{GEN}) регулює кількість поколінь (i , отже, оцінок) для алгоритму PSO. Вищі числа зазвичай певною мірою покращують рішення, хоча для їх виконання потрібно більше часу.

Процес оптимізації представлено графічно на рис.3.4. Спочатку ініціалізується тестова популяція PSO (рій). У початковій популяції частинки ініціалізуються

випадковим чином із значеннями між $[\min, \max]$. Далі всі вимірювання конкретного маяка обробляються за допомогою фільтра вимірних даних із значенням тестової особи, що міститься в популяції. Якщо середнє значення останніх трьох вимірювань одного маяка вище або дорівнює встановленому порогу фільтра вимірних даних, він готовий до наступної фази фільтрації. На другому етапі необроблені значення спочатку обробляються за допомогою фільтра вимірних даних, а потім фільтр простого ковзного середнього (SMA) із п'ятьма зразками (3.7).

$$SMA_k = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n p_{i'} \quad (3.7)$$

де k представляє кількість точок даних (вікно фільтра), а n кількість вибірок.

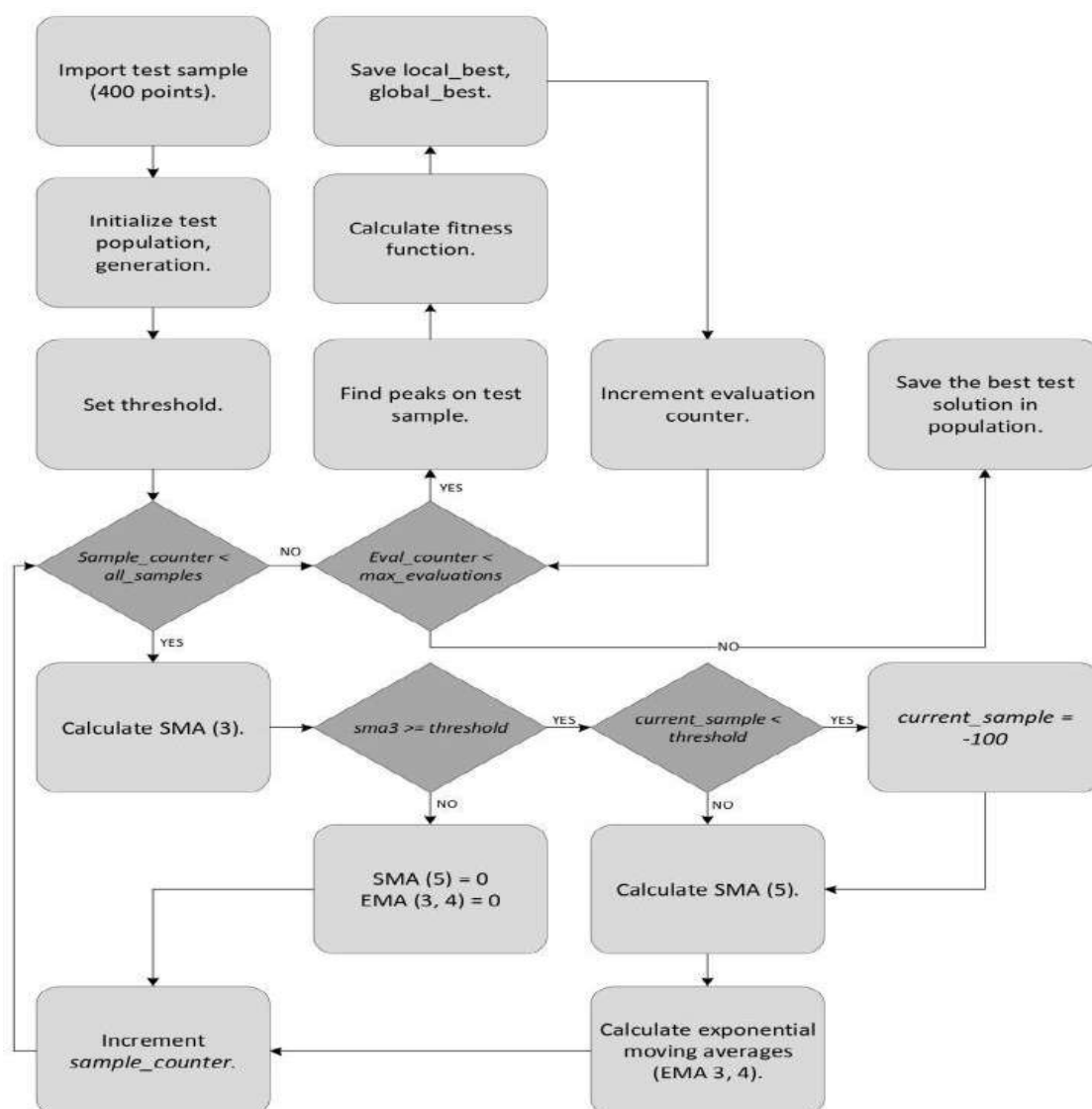


Рисунок 3.4 – Процес оптимізації PSO в MATLAB.

Нарешті, два фільтри експоненціального ковзного середнього (ЕМА) використовуються для оброблених значень SMA (3.8), перший з розміром вікна $w_1=3$, а другий з розміром вікна $w_2=4$. Згладжування ЕМА з двома різними розмірами вікна використовується для приблизного виявлення піку. Це робиться шляхом віднімання обчисленого значення фільтра ЕМА з розміром вікна $w_1 = 3$ із значення з розміром вікна $w_2 = 4$.

$$S_t = \alpha y_{t-1} + (1-\alpha)S_{t-1};$$

$$0 < \alpha \leq 1,$$

$$t \geq 3$$
(3.8)

де S_t – це спостереження згладжування;

y – вихідне спостереження та константа згладжування.

Результати двох значень ЕМА потім віднімаються. Для виявлення піку в оброблених вимірюваннях мають бути виконані три умови:

- різниця між двома значеннями ЕМА лежить між фіксованим значенням (зазвичай $<1,0$ і $>1,0$);
- перше значення ЕМА дорівнює або перевищує порогове значення, яке має поточна особа;
- друге значення ЕМА нижче за фіксоване значення.

Якщо пік виявлено, він записується у вектор, що містить піки. Виявлені піки двічі порівнюються з вимірними (заданими) піками під час фази калібрування. По-перше, алгоритм шукає точні збіги, а по-друге, шукає в інтервалі пошуку встановленого кліку, наданого користувачем. Очікується, що обчислені піки будуть запізнюватися порівняно з вимірними (заданими) через багаторазову фільтрацію вимірювань заздалегідь. Потім обчислюється функція придатності відповідно до рівняння (3.4). Частилки (порогові значення), які знаходять найбільш актуальні піки та найменші піки, яких не повинно бути, «нагороджуються» найнижчим значенням функції відповідності. Найкраще значення для фільтра вимірних даних, яке передає особа, продовжується на другому етапі оптимізації PSO, де початкові частинки

змінюються, і весь процес, описаний вище, повторюється з самого початку, доки не буде досягнуто заданої кількості оцінок. Найкращий індивід з найнижчим значенням функції фітнесу визнається найкращим рішенням проблеми та зберігається для фази виявлення в реальному часі.

3.4 Фаза виявлення в реальному часі

Фаза виявлення в реальному часі реалізована на Raspberry Pi для ефективного використання доступних обчислювальних ресурсів, а саме, уся обробка відбувається локально, крім запису в базу даних.

Алгоритм, що працює на Raspberry Pi, поділяється на три категорії:

- виявлення;
- обробка сигналу;
- оцінка та публікація даних.

Як видно з рис.3.5, кілька етапів процесу калібрування/оптимізації PSO є ідентичними, тому фази калібрування та виявлення в реальному часі повинні давати однакові результати.

Основний компонент системи, Raspberry Pi, підключений до людини, сканує довколишнє оточення на наявність будь-якого маяка з попередньо визначеною MAC-адресою. Після завершення циклу сканування система спочатку відфільтровує вимірювання, які повернули значення

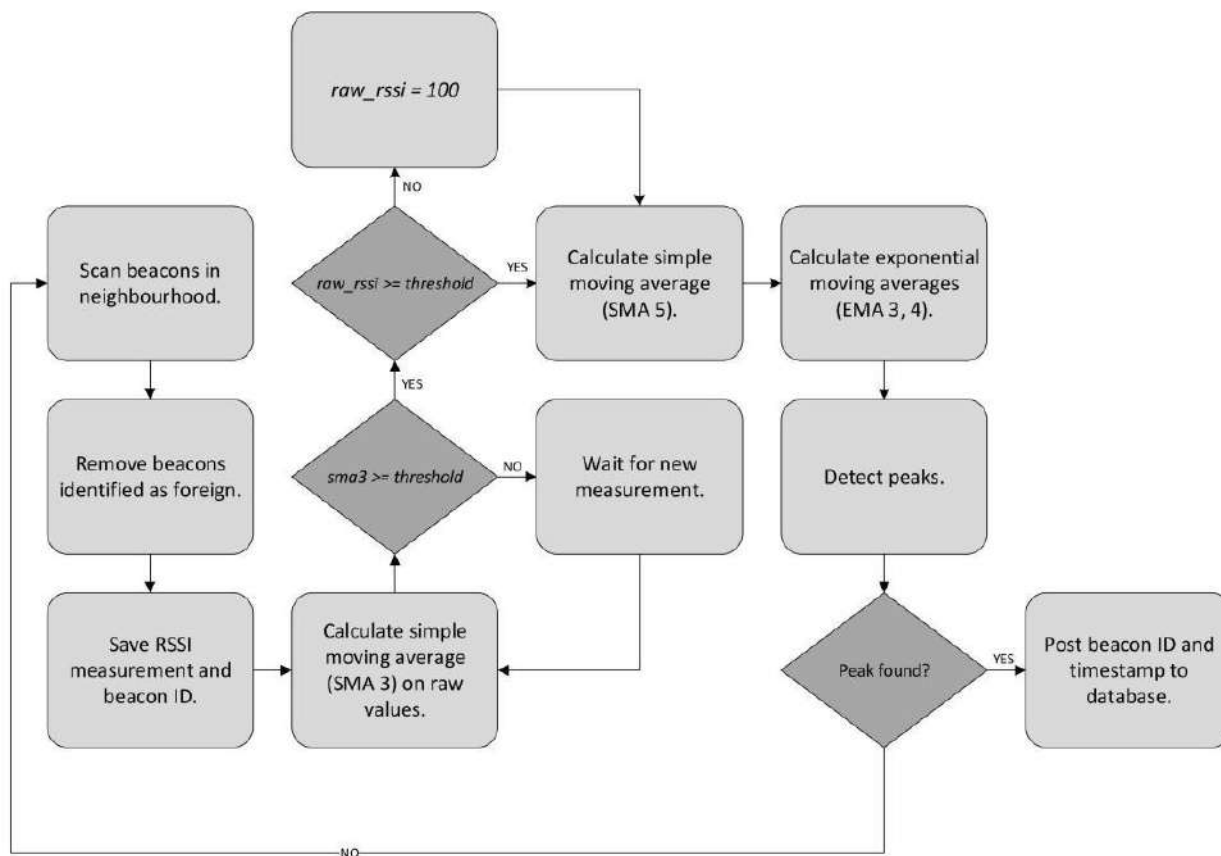


Рисунок 3.5 – Фаза виявлення в реальному часі.

Усі маяки, які не розпізнає система, автоматично видаляються та не впливають на вимірювання. Далі вимірювання кожного маяка обробляються за допомогою фільтра вимірюваних даних із відповідним порогом, встановленим на етапі калібрування. Якщо середнє значення останніх трьох вимірювань обробленого маяка вище або дорівнює встановленому порогу фільтра вимірюваних даних, ми припускаємо, що особа, яка несе приймач, знаходиться поблизу маяка та готова до наступної фази фільтрації. На другому етапі граничні значення обробляються за допомогою фільтра простого ковзного середнього (SMA) (3.7) з п'ятьма вибірками, після чого обчислюється фільтр ЕМА (3.8). Значення, спочатку оброблені за допомогою SMA, обробляються далі за допомогою фільтра ЕМА з розміром вікна $w_1 = 3$, а потім з розміром вікна $w_2 = 4$, але не послідовно.

Подібно до процесу калібрування, для виявлення піку в оброблених вимірюваннях мають бути виконані три умови:

- різниця між двома значеннями ЕМА лежить між фіксованим значенням (зазвичай $<1,0$ і $>1,0$);

- перше значення ЕМА дорівнює або перевищує порогове значення, яке переноситься поточним вимірюванням;

- друге значення ЕМА нижче за фіксоване значення.

Лише вибрана кількість маяків (шість у нашому прикладі) обробляються одночасно на другому етапі, щоб запобігти надто довгому часу обробки. Крім того, ми працюємо з припущенням, що особа, яка несе приймач IPS, не може перебувати в безпосередній близькості від більше ніж шести маяків одночасно, і що маяки розташовані належним чином.

Щойно мимохідна подія виявлена, запускається процедура для запису події в базу даних Google Spreadsheets. Ідентифікатор маяка разом із міткою часу публікується в базі даних, яка витягується на етапі візуалізації та аналізу. Якщо нова подія від того самого маяка запускається менш ніж за 2,0 с після першої події, вважається, що відбулося кілька виявлень, і лише перша подія записується в базу даних.

Механізм локалізації на Raspberry Pi працює в кількох потоках, щоб рівномірно розподілити навантаження на обробку. Перше ядро піклується про сканування маяка BLE з ідентифікацією та відхиленням. Дані з першого потоку надходять у другий потік, де відбувається обчислення фільтрів і виявлення піків. Нарешті, третій потік очікує інформацію про можливі нові піки і записує отримані дані в веб-базу даних. Процес виявлення в реальному часі та запису в базу даних виконуються в окремих потоках, тому гарантується, що запис у базу даних не заважає процедурі виявлення в реальному часі.

3.5 Моделювання запропонованого методу

Для підтвердження роботи було проведено моделювання розробленого методу за допомогою середовища MATLAB для приміщення, яке має такі параметри: довжина — 100 м, ширина — 3 м. Координати розташування Bluetooth маяків: $B_1(0; 0)$, $B_2(12.5; 3)$, $B_3(25; 0)$, $B_4(37.5; 3)$, $B_5(50; 0)$, $B_6(62.5; 3)$, $B_7(75; 0)$, $B_8(87.5; 3)$, $B_9(100; 0)$. Місцеположення об'єкта задається з проміжком 1 м, впродовж всього приміщення (рис. 3.6).

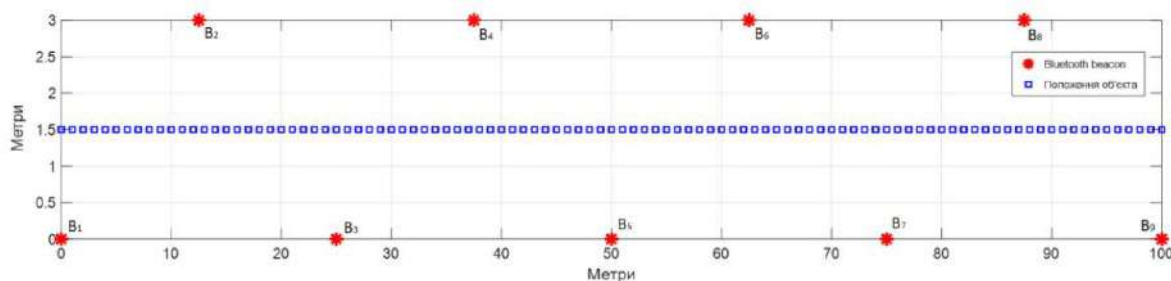


Рисунок 3.6 – Конфігурація розташування Bluetooth маяків та місцеположення об'єкта

При розрахунку на основі запропонованого методу фактичне кругове СКВ $\hat{\sigma}^{МК}$ (рис. 3.7 крива 1) похибки оцінки положення об'єкта, отримані методом Монте-Карло при розрахунку з використанням всіх датчиків приймає значення в межах від 15 до 70 м, що є значно більше за значення СКВ $\hat{\sigma}^{МК}$ яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (НГРК), яка характеризує потенційно можливу точність визначення координат об'єкту (крива 2).

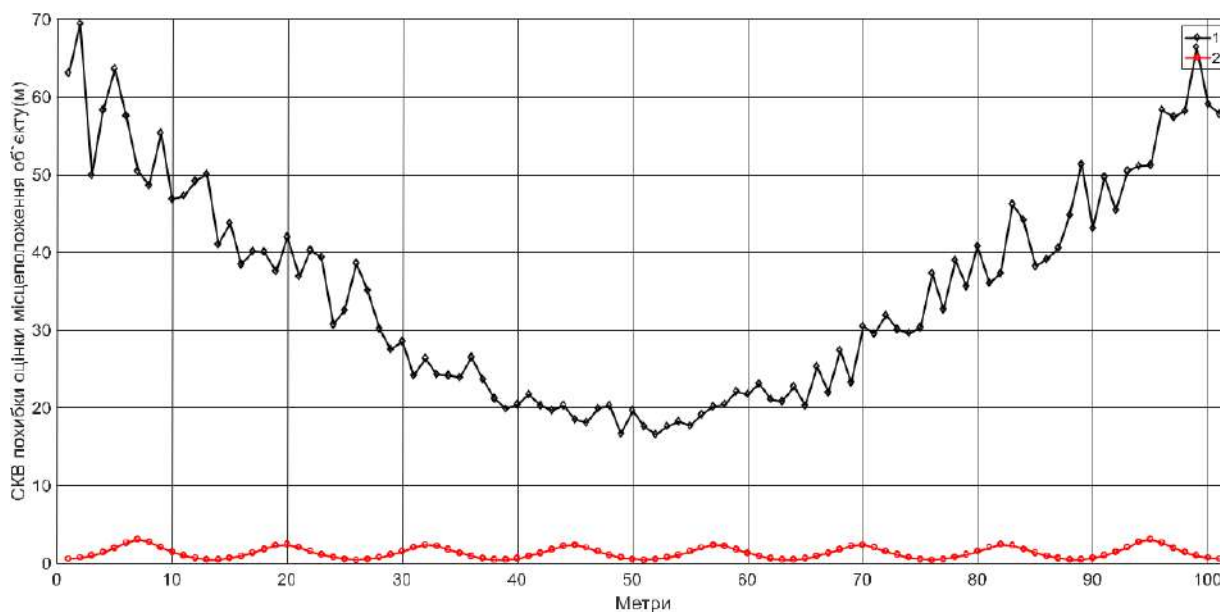


Рисунок 3.7 – СКВ похибки оцінки положення об'єкта для МНК

При конфігурації з великою кількістю Bluetooth маяків похибка в великих приміщеннях значно збільшується, через похибку що вноситься дальніми маяками, тому для усунення цієї проблеми виведено критерій відбору дальності що враховуються при розрахунку по рівню потужності прийнятого сигналу.

Для кожної нової конфігурації системи цей критерій необхідно розраховувати окремо, визначається він за діагоналю прямокутника максимально приближеного по формі до квадрата, в площі якого знаходиться щонайменше три та не більше чотирьох Bluetooth маяків, при умові рівномірного розміщення маяків в приміщенні. Розрахунок критерію виконується за моделлю поширення, що враховує тільки загасання сигналу та має вигляд:

$$P = P_0 - 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 2 \quad (3.9)$$

де P – критерій мінімальної прийнятої потужності

P_0 – потужність сигналу на відомій відстані r_0 ;

a – коефіцієнт загасання в середовищі;

r – діагональ прямокутника;

Приклади конфігурацій зображені на рис. 3.8 та 3.10, а відповідні до них порівняння ефективності розрахунку методом найменших квадратів наведені на рисунках 3.9 та 3.11.

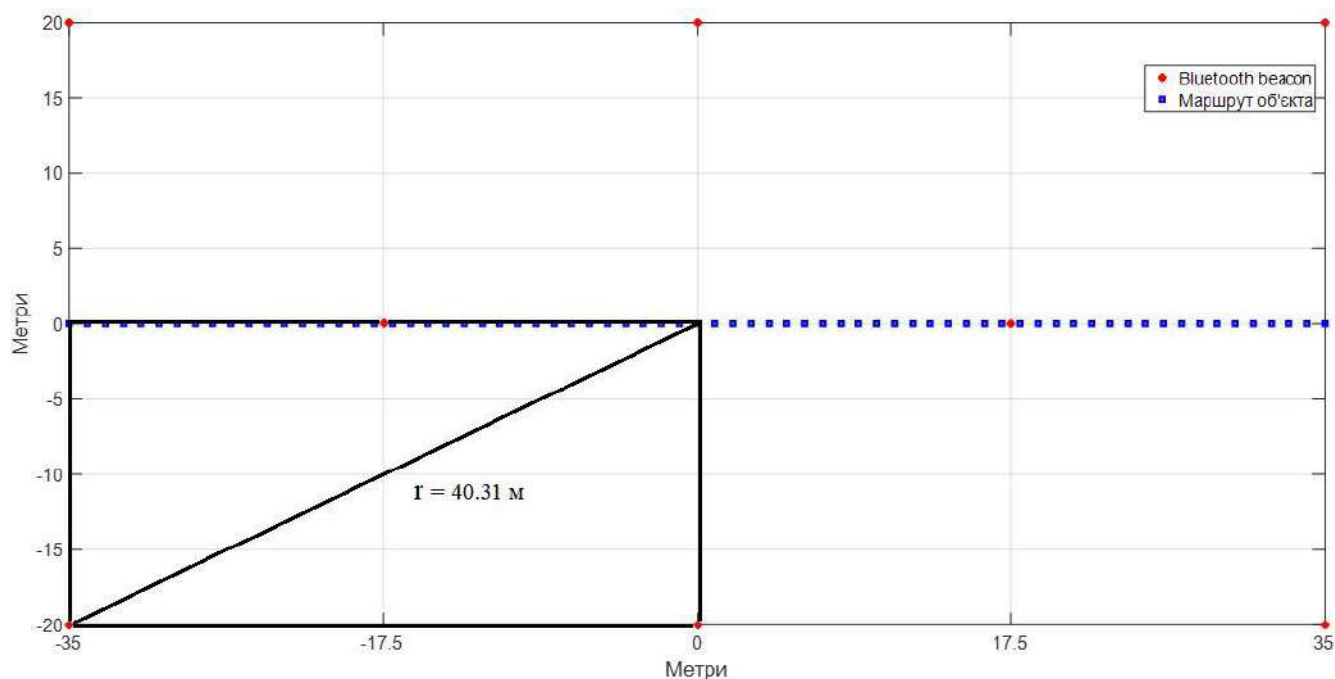


Рисунок 3.8 – Конфігурація розміщення №1

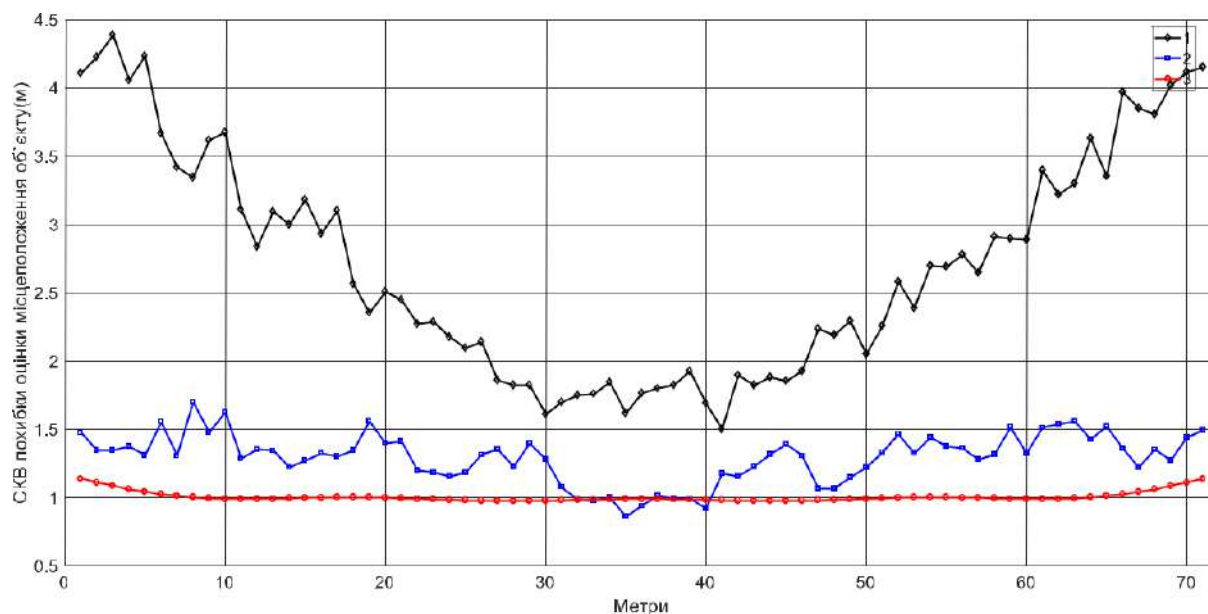


Рисунок 3.9 – Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта для конфігурації №1

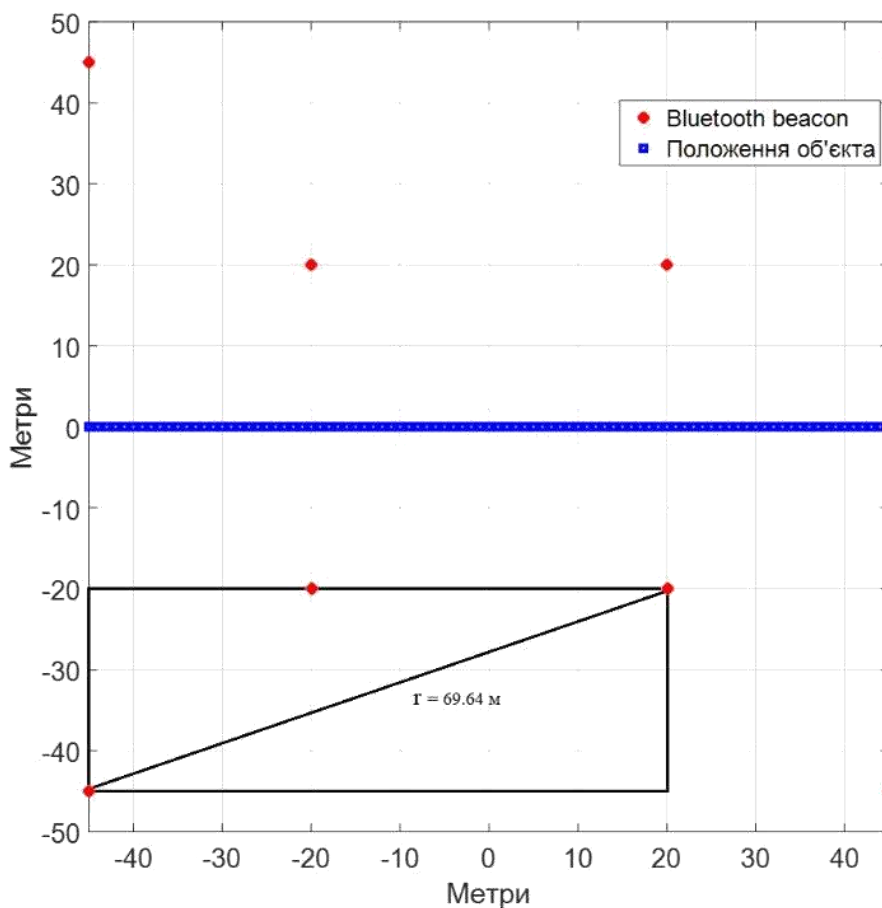


Рисунок 3.10 – Конфігурація розміщення №2

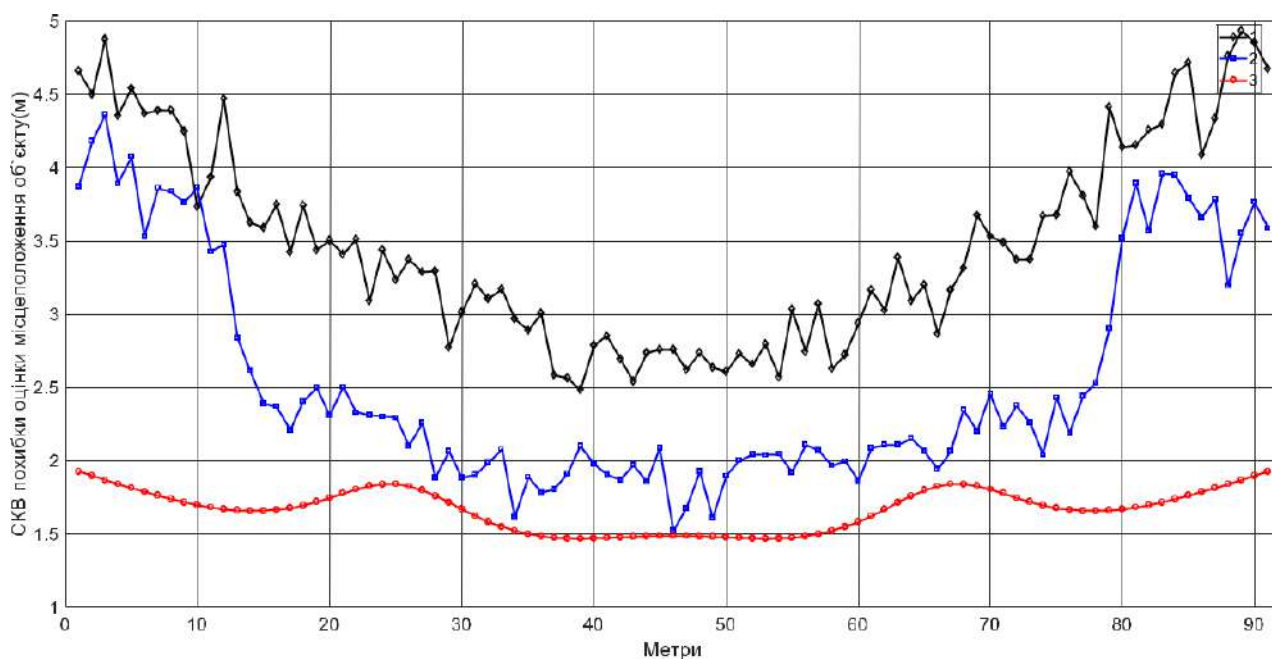


Рисунок 3.11 – Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта для конфігурації №2

Для конфігурації що розглядалась на початку підрозділу $r=25.17$ м що відповідає критерію $P \geq -82$ дБм. Як видно з рисунку 3.7, вдалось досягти значень СКВ $\hat{\sigma}^{МК}$ (рис. 3.12 крива 2) похибки оцінки положення об'єкта від 3 до 8 м, що є покращенням результату більш ніж у 5 разів

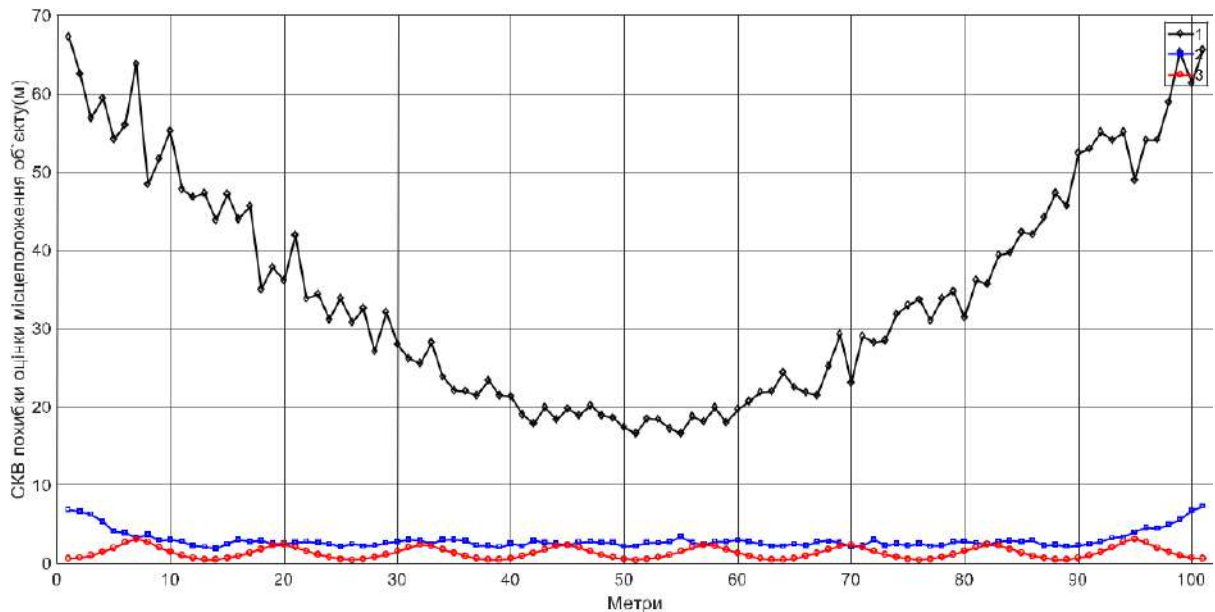


Рисунок 3.12 – Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта

Для тієї ж конфігурації кімнати виконано моделювання за розробленим алгоритмом для оцінки координат методом сферичного перетину (рис. 3.13 крива 3). Що виявило однозначну перевагу методу найменших квадратів, що проявляється в більш стабільному діапазоні значень, наближених до СКВ $\hat{\sigma}_{НГРК}$ нижньої границі Рао-Крамера.

Тому також виконано аналогічне моделювання для алгоритму на основі МНК для рівнянь гіперболічної латерації, відмінність конфігурації полягає в наявності нульового маяка що було розміщено за координатами $B_0(50; 1.5)$, який при даному розрахунку являвся початковою точною відліку координат. Отриманий результат відображено на рис. 3.13 крива 2. Отримані значення виявились стабільними, проте в середньому на 1-2 метри гіршими за показники МНК за рівняннями кругової латерації.

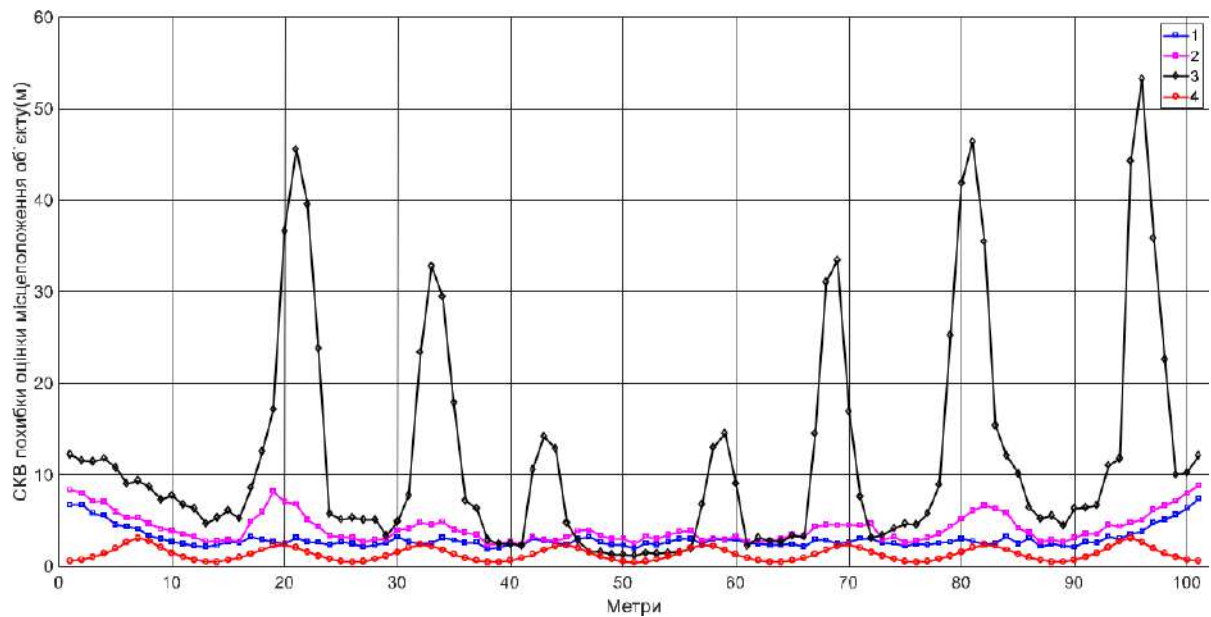


Рисунок 3.13 – СКВ похибки оцінки положення об'єкта за розробленим алгоритмом

Де 1 – СКВ $\hat{\sigma}^{\text{МК}}$ похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом МНК кругової латерації

2 – СКВ $\hat{\sigma}^{\text{МК}}$ похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом МНКгіперболічної латерації

3 – СКВ $\hat{\sigma}^{\text{МК}}$ похибки оцінки положення об'єкта при розрахунку за алгоритмом методом сферичного перетину

4 – СКВ $\hat{\sigma}_{\text{НГРК}}$ яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

3.6 Апаратне забезпечення для перевірки запропонованої методики

Для реалізації системи на базі технології Bluetooth були використані BLE маяки, які продаються в вільному доступі. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi з відповідним модулем можливо запрограмувати для виконання функціоналу маяка. Три Raspberry Pi було застосовано як маяки(рис 3.14).

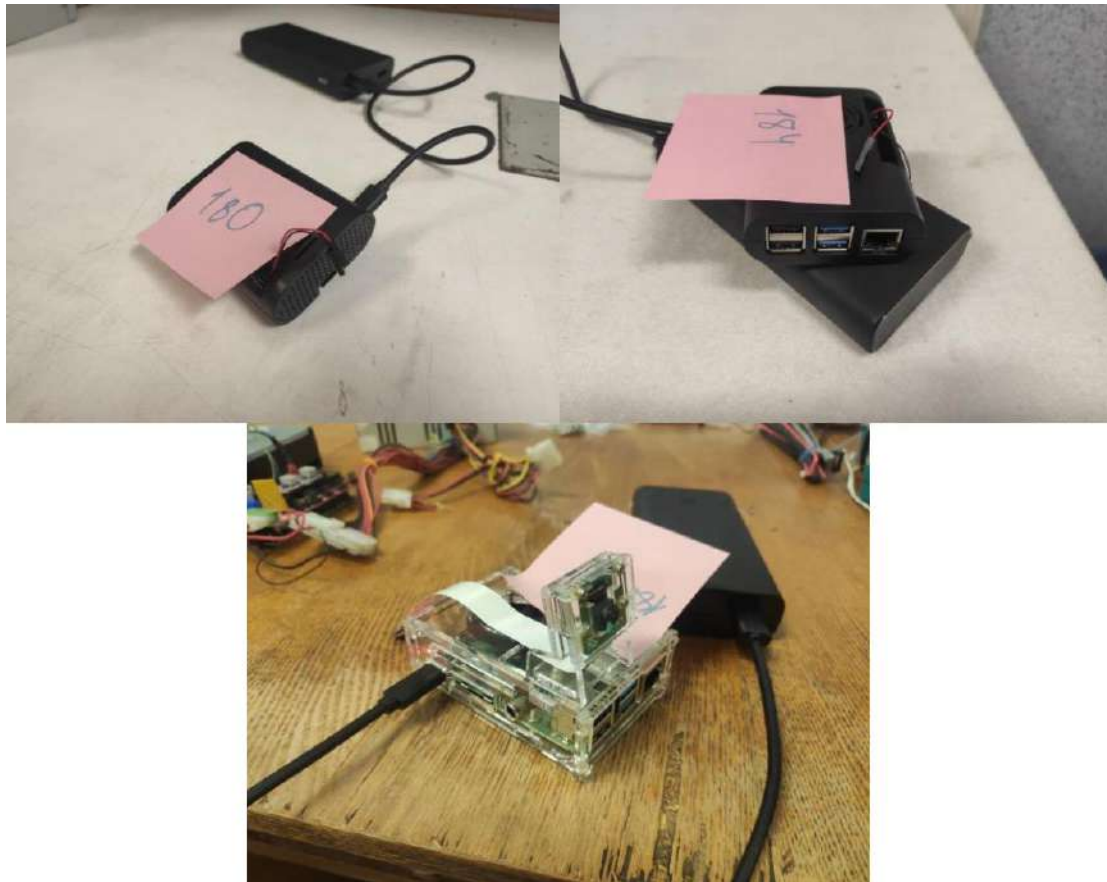


Рисунок 3.14 – Задіяні Raspberry Pi

Для того щоб Raspberry Pi виконував функції маяка в першу чергу необхідно під'єднати BLE модуль, для чого необхідно встановити деякі бібліотеки:

```
sudo apt-get install libusb-dev libdbus-1-dev libglib2.0-dev libudev-dev libical-dev libreadline-dev
```

Після чого встановлено Bluez, який являється стеком Bluetooth для Linux:

```
sudo mkdir bluez cd bluez sudo wget www.kernel.org/pub/linux/bluetooth/bluez-5.11.tar.xz
```

Після завантаження виконуються його збірка та встановлення:

```
sudo unxz bluez-5.11.tar.xz sudo tar xvf bluez-5.11.tar cd bluez-5.11 sudo ./configure --disable-systemd sudo make sudo make install
```

Після підключення BLE модуля необхідно налаштувати Raspberry Pi для мовлення, для чого виконуються команди:

```
sudo tools/hciconfig hci0 up sudo tools/hciconfig hci0 leadv 3 sudo tools/hciconfig hci0 noscanc
```

Далі налаштовується ідентифікація пристрою, для чого вводиться наступна строчка, де третій з кінця байт відповідає номеру мінору:

```
sudo hcitool -i hci0 cmd 0x08 0x0008 1E 02 01 1A 1A FF 4C 00 02 15 E2 0A 39 F4 73 F5 4B C4 A1 2F 17 D1 AD 07 A9 61 00 00 00 00 C8 00
```

Цим створюється пакет даних у шістнадцятковому форматі, сегменти якого відображені на (рис. 3.15).

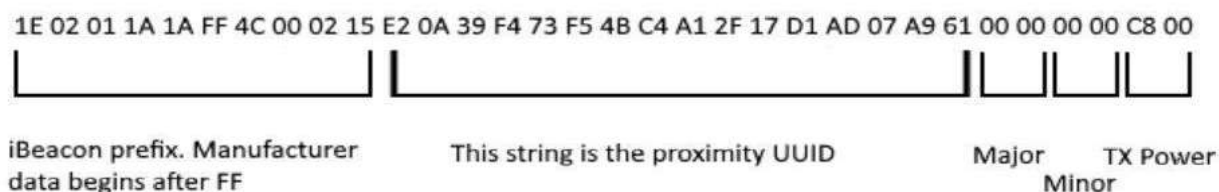


Рисунок 3.15 – Структура пакету Bluetooth маяка

Префікс завжди буде однаковим, після FF складається з 4 байтів. Два байти виділено на інформацію про виробника, в нашому випадку пристрій ідентифікується як iBeacon, один для визначення типу пакету, та останній для інформації про довжину пакету даних.

Далі іде основна частина ідентифікатора, UUID (Universally Unique Identifier) який займає 16 байт може бути присвоєним до декількох маяків в зоні дії. Після чого по 4 байти виділено на Major та Minor частини які виконують роль ідентифікаторів з однаковими UUID та Major частинами відповідно. Так отримується унікальний ідентифікатор за яким в базі даних знаходяться його координати для розрахунку.

Остання частина, TX займає 2 байти та відображає значення вимірної потужності на відстані одного метру. Перший біт в ньому знаковий, 1 — «-», 0 — «+». Значення для цієї частини зазвичай вимірюється 1 раз та більше не змінюється.

Вимір потужності прийому маяків здійснювався за допомогою додатку на смартфоні «Beacon Scanner» інтерфейс якого зображено на рис. 3.16. Отримані показники надсилаються на сервер Node.js для логування, звідки зчитуються в реальному часі на HTML сторінку на яку виводились значення прийнятої

потужності, розраховані відстані до маяків за методом RSS і внутрішнім алгоритмом маяка та розраховане положення.

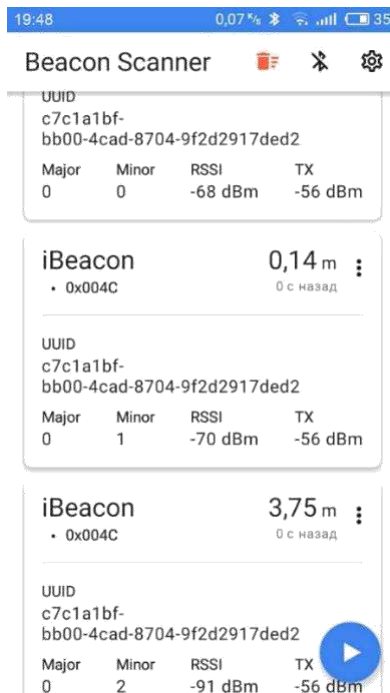


Рисунок 3.16 – Інтерфейс додатку «Beacon Scanner»

Для побудови графіку із журналу витягнуто значення для 18 точок виміру, положення яких в координатній сітці визначалось, як і положення маяків, за допомогою рулетки та відображено на рис. 3.17.

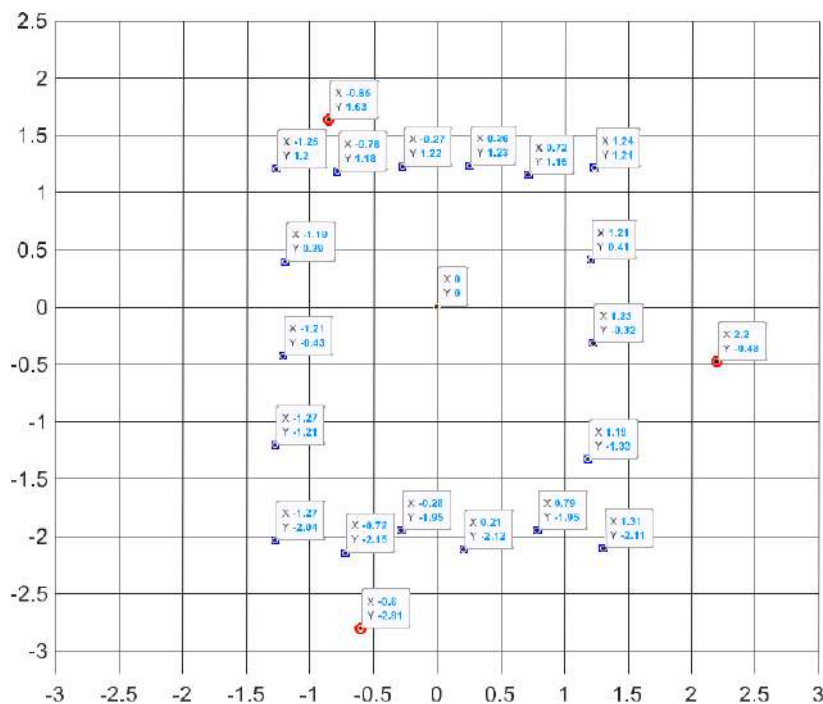


Рисунок 3.17 – Задіяні точки маршруту та положення маяків

Оскільки в попередньому розділі було визначено найкращим методом МНК, розрахунок при експерименті проводився тільки для нього. Для можливості оцінити похибку при визначенні положення в кожній точці проводилось по 10 вимірів.

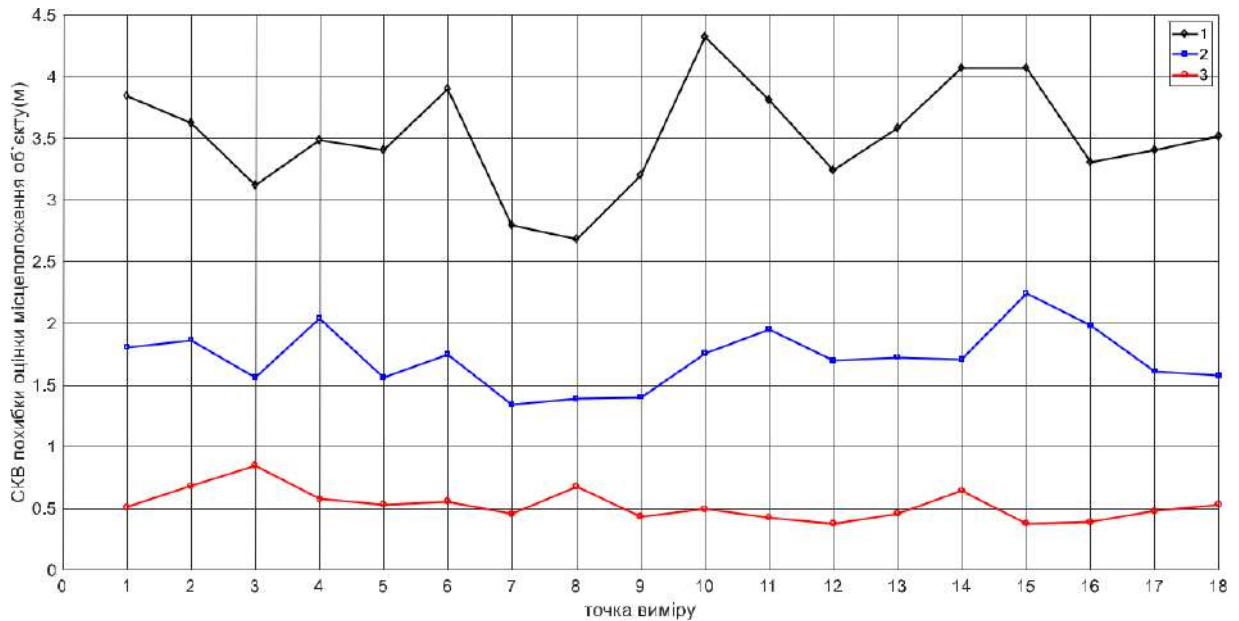


Рисунок 3.18 – Порівняння СКВ похибки оцінки положення об'єкта

1 — СКВ $\hat{\sigma}^{\text{МК}}$ похибки визначення місцеположення об'єкта отримане при експерименті

2 — СКВ $\hat{\sigma}^{\text{МК}}$ похибки визначення місцеположення об'єкта отримане статистичним моделюванням

3—СКВ $\hat{\sigma}_{\text{НГРК}}$ яке відповідає нижній границі Рао-Крамера

На першому етапі експерименту зафіксовано значні похибки в порівнянні з теоретичними результатами, це є наслідком перевідбиття та накладання сигналів маяків одне на одного, що не враховувалось в теоретичній моделі. Через що виміри для більш складної конфігурації розташування Bluetooth beacon вирішено не проводити. Для усунення даної проблеми необхідний опис більш складної моделі поширення сигналу, яка враховує перевідбиття сигналів.

4 РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ, ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ

4.1 Розробка бази даних та програмного забезпечення

Останнім етапом процедури IPS є візуалізація та аналіз отриманих даних.

Для зберігання даних про позиції, краї, кімнатні маяки та людей була розроблена база даних. На рис.4.2 показана схема бази даних. Пристрій у базі даних представляє маяк Bluetooth. Він має поле ідентифікатора, яке ідентифікує маяк. Поле BaseRSSI містить значення RSSI, яке вимірюється на відстані 1 м від маяка. MAC-адреса пристрою також зберігається в полі mac. Вирівнювання використовується, коли доступний лише один маяк, щоб визначити, з якого боку від маяка має бути користувач.

Таблиця номерів позначає кімнати в будівлі. У ньому є запис для номера та заголовок для цілей пошуку. Він також містить мешканців кімнати. Таблицю кімнат можна розширити за допомогою зображення, наприклад, у торгових центрах, де кожна кімната/магазин виглядає по-різному, але в офісних будівлях зображення не вказуються, оскільки двері виглядають однаково.

Таблиця Person містить зображення особи, назву та ім'я для пошуку.

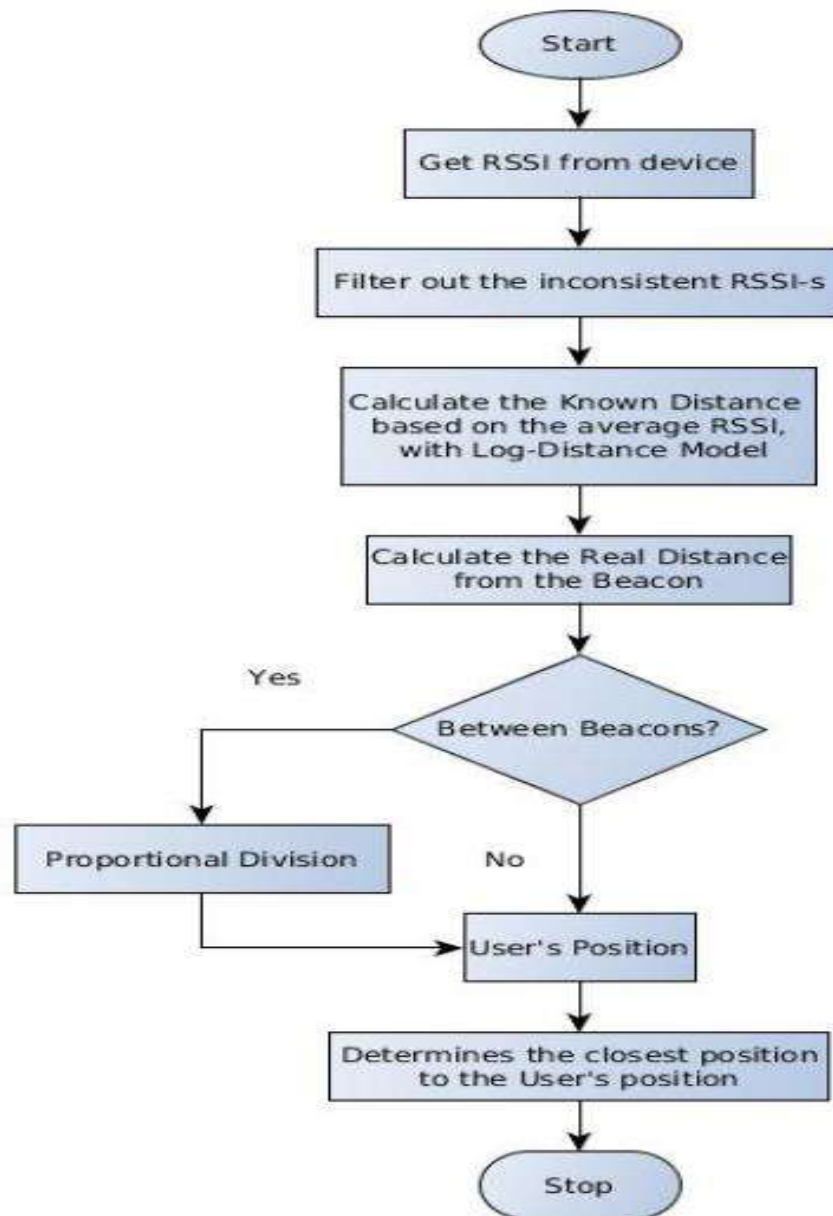


Рисунок 4.1 – Процес визначення найближчих кімнат

Сутність Position представляє позиції в будівлі. Він містить вісім полів. Поля x , y і z є декартовими координатами в будівлі. Поле коментаря містить опис розташування, яке містить більш інтуїтивно зрозумілу інформацію про положення пристрою. Поле для коментаря може бути використано у випадку несправності батареї або маяка, щоб ми могли знати місцезнаходження пристрою, навіть якщо він не працює. Чотири зображення використовуються для навігації на основі зображень. Більшість позицій належать до кімнат і маяків, але є й інші необхідні незалежні позиції, які зберігаються, щоб заповнити проміжки між кімнатами та зробити навігацію плавнішою.

Ребра зберігають два вузли (позиції) і відстань між ними. Ребра необхідні для алгоритму пошуку найкоротшого шляху.

Для розрахунку навігаційного маршруту ми використали алгоритм найкоротшого шляху, оскільки позиції вже забезпечують вузли для графа, який використовує алгоритм.

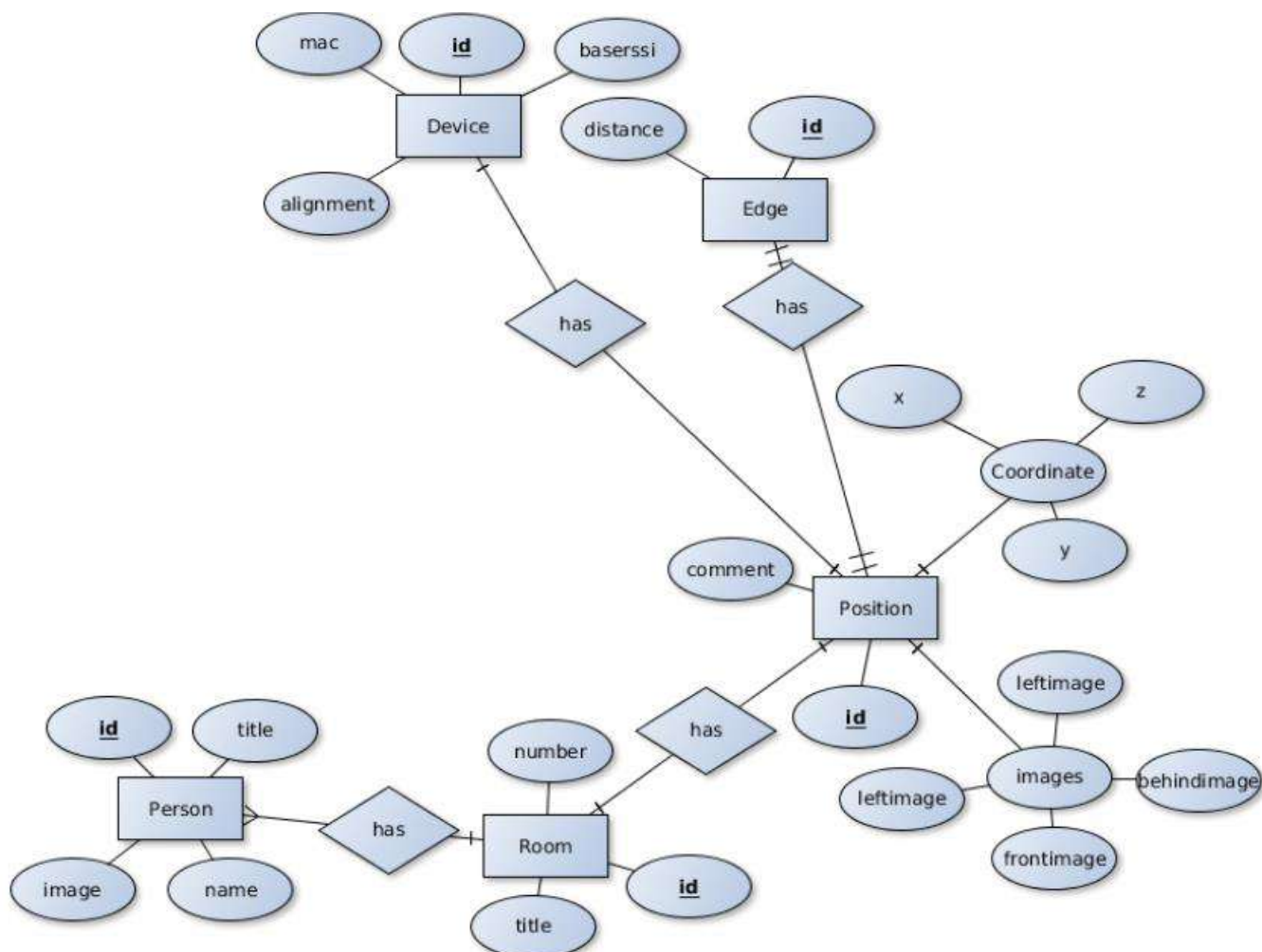


Рисунок 4.2 – ER модель бази даних

Алгоритм Дейкстри: [11] є алгоритмом пошуку найкоротшого шляху для орієнтованих графів. Алгоритм розбиває всі вузли (позиції) на два окремі набори: встановлені та невизначені. Спочатку всі позиції невизначені, тому їх потрібно оцінити. Позиція переміщується до встановленого набору, коли до неї визначено найкоротший шлях. На початку відстань від джерела до кожного вузла встановлюється на високе значення, у нашому тестовому додатку максимальне значення типу даних, що використовується для зберігання відстаней. Алгоритм працює до тих пір, поки набір неврегульованих позицій не матиме вузлів. У кожній

ітерації він вибирає найближчий вузол до джерела з невизначених позицій. Знаходить сусідів цього графа. Вузли є сусідами в графі, якщо вони мають ребро, що їх з'єднує. Для кожного сусіда, якщо відстань від джерела до цього вузла можна зменшити під час використання цього сусіда, тоді відстань оновлюється. Вузол переводиться з неурегульованого набору в урегульовані вузли. Він зберігає попередника кожної позиції. Оригінальний алгоритм призначений для орієнтованих графів і перевіряє лише сусідів, до яких ведуть ребра. Ми модифікували його, щоб перевірити вихідний і цільовий кінець ребра, тому він також працює на неорієнтованих графах. Для будівництва, наприклад, з односторонніми коридорами, цю модифікацію впроваджувати не слід. У них слід використовувати орієнтований граф з двонаправленими ребрами для двосторонніх коридорів.

Ми вибираємо позицію призначення як вихідний вузол алгоритму Dijkstra, тому системі не потрібно обчислювати найкоротший шлях кожного разу, коли позиція користувача змінюється під час руху.

Коли визначено шлях від поточного положення користувача до місця призначення, починається навігація. Додаток має два користувальницькі інтерфейси: зображення та напрямок.

Починаючи з пункту призначення, він виконує ітерацію по вузлах, і коли знаходить вузол, який за координатами x або y відповідає поточній позиції користувача, тоді відображається відстань між двома позиціями. Це краще, ніж просто відображати відстань до наступної позиції, тому що користувач отримує більш реалістичне уявлення про те, як далеко йому потрібно рухатися. Загальна відстань до пункту призначення також відображається для користувача.

Інтерфейс користувача на основі зображень показує напрямок із зображеннями, яким користувач повинен слідувати, щоб досягти пункту призначення. Кожні 5 метрів знімок робився в усіх доступних напрямках і прив'язувався до цієї позиції в базі даних. Програма знаходить найближчу позицію із зображеннями та показує відповідне зображення в напрямку наступної позиції.

Інтерфейси користувача на основі напрямку спираються на модуль компаса пристрою користувача. З експериментів ми знаємо, що будівля не має орієнтації

північ-південь, а компас завжди вказує на північ, тому ми повинні були визначити поправкові значення для напрямків усередині приміщення, як показано на рис.4.3.

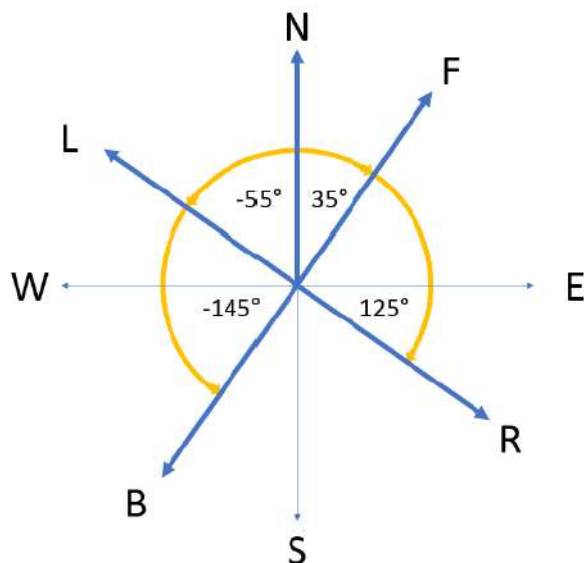


Рисунок 4.3 – Корекція кутів на магнітний схід

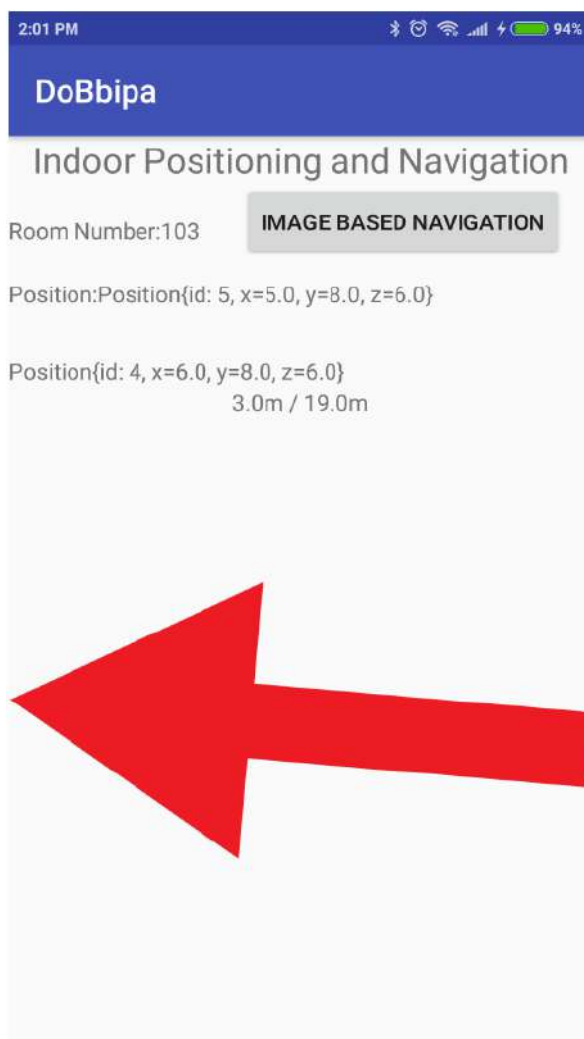


Рисунок 4.4 – Навігація на основі напрямку в розробленому додатку

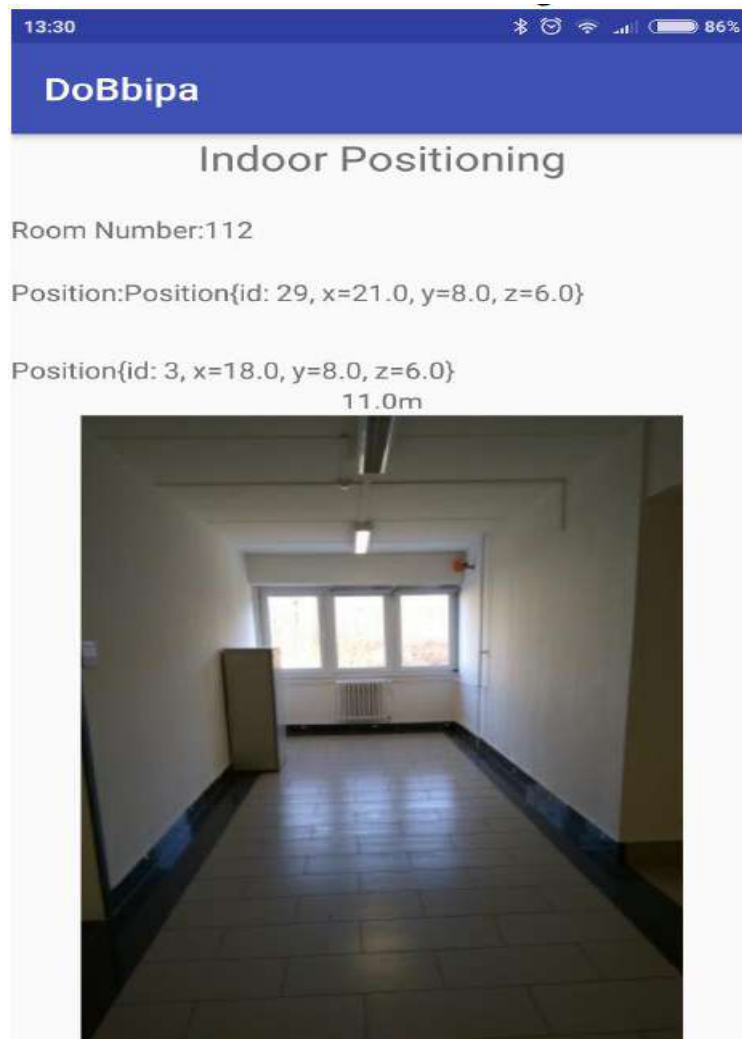


Рисунок 4.5 – Визначення позиції в додатку

Кожна таблиця в базі даних програми повинна бути розширена полем `buildingid` для середовищ із кількома окремими будівлями, щоб розділити їх.

4.2 Протоколи оцінки системи

Для отримання максимально точних результатів використовували наступні протоколи. Точність і надійність локалізації залежать головним чином від успішного завершення етапу калібрування. Кожне калібрування займає приблизно 1-2 хвилини для завершення одного маяка, що призводить до порогового значення

для фільтра, описаного у фазі виявлення в реальному часі. Калібрування можна виконувати для кількох маяків одночасно, хоча рекомендується калібрувати лише один маяк одночасно.

Фаза калібрування

Інтервал реклами маяків BLE було встановлено на фіксоване значення $T_s = 20$ мс і потужність передачі для $T_xPower = 16$ дБм відповідно. Ці значення були підібрані експериментально, що дало найкращі результати за найменшого споживання енергії та найдовшого терміну служби акумулятора. Крім того, потужність передачі має бути якомога нижчою, щоб запобігти взаємним перешкодам, якщо IPS встановлено в меншій кімнаті. Raspberry Pi виконує сканування найближчих маяків з інтервалами часу приблизно $T_{scan} = 100$ мс. Параметри фази калібрування наведено в таблиці 5. Швидкість руху вказує на нормальну швидкість ходьби суб'єкта, який носить IPS. Raspberry Pi кріпиться до пояса людини за допомогою тривимірного тримача, як показано на малюнку 11.

Таблиця 4.1 – Налаштування параметрів фази калібрування.

Параметр	Значення
Потужність передачі (T_xPower)	16 dBm
Інтервал передачі (T_s)	20 ms
Швидкість сканування Raspberry Pi (мс)	100 ms
Швидкість руху (v_m)	5 km/h
Перпендикулярна відстань від приймача до маяка (d)	0.5 m
Кількість зразків (n) на один маяк	7–9

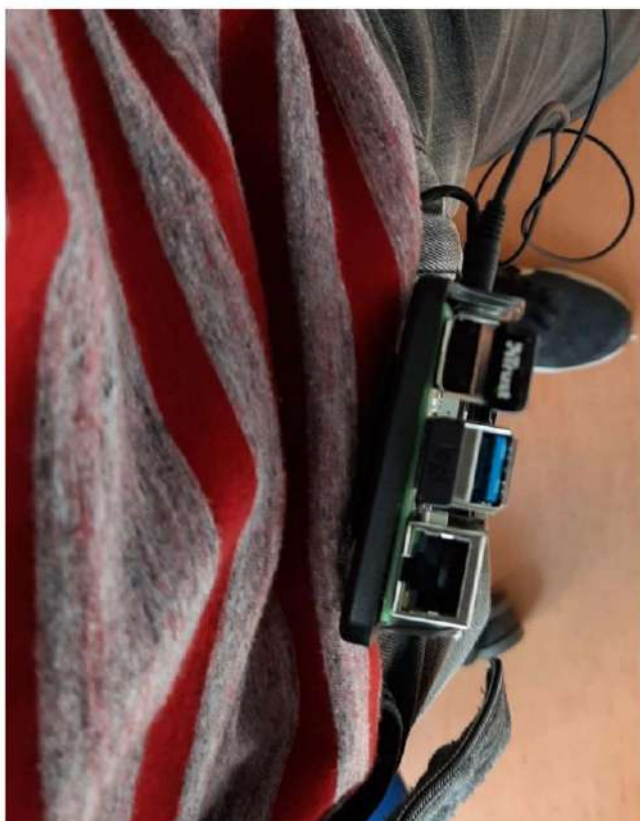


Рисунок 4.6 – Raspberry Pi, прикріплений до пояса людини.

Орієнтацію та розташування приймача не слід змінювати під час фази калібрування; однак допускаються менші варіації для врахування людини, яка йде. Батарея (USB Power Bank), що живить приймач, поміщається в найближчу кишеню людини, яка виконує калібрування. Калібрування слід виконувати за таких умов, які очікуються від системи для роботи під час фази виявлення в реальному часі. Важливо, щоб людина виконувала послідовність калібрування на відстані приблизно 0,5 м від маяка. Рекомендується, щоб особа обійшла маяки в обох напрямках три-чотири рази, зібравши шість-вісім зразків. Більше зразків забезпечує більш точну та просту процедуру калібрування. Якщо маяк розміщений у кутку, тобто людина не може пройти повз нього в обох напрямках, вона повинна наблизитися до маяка та повернутися в тому ж напрямку якомога швидше, повторюючи кроки, доки не буде зібрано достатньо зразків.

Фаза виявлення в реальному часі.

Протоколи IPS на етапі виявлення в реальному часі були створені, намагаючись імітувати поведінку комплектувальника замовлень. Налаштування

параметрів сценарію були встановлені на ті самі значення, що й на етапі калібрування. Очевидно, що розташування та висота використовуваних маяків також були встановлені так само, як і на етапі калібрування. Повні налаштування параметрів для обох сценаріїв наведено в таблиці 6. Вимірювання для кожного зі сценаріїв розпочато в нейтральному місці («Початок»), як показано в розділі 3.3. Особу було проінструктовано не зупинятися на жодній із локацій/станцій, лише проїжджаючи повз них. При наближенні до маячка на мінімальну відстань (~25 см) кнопка була натиснута, що було зафіксовано Raspberry Pi. Показниками якості успішної роботи IPS є кількість виявлених проходжень, помилкових виявлень і різниця в часі між виявленням і наявністю ближнього радіомаяка. В ідеалі різниця дорівнює нулю, тобто виявлення та наближення відбуваються одночасно. Крім того, слід враховувати людський фактор, оскільки людині потрібно до кількох сотень мілісекунд, щоб натиснути кнопку миші.

Таблиця 4.2 – Налаштування параметрів для сценаріїв 1-3.

Сценарій/Параметри	Сценарії. 1–3
Потужність передачі (TxPower).	16 дБм
Потужність передачі (TxPower).	20 мс
Швидкість сканування Raspberry Pi (мс)	100 мс
Час очікування сканера BLE (мс)	0 мс
Швидкість руху (v_m)	5 км/ч

4.3 Тестування роботи системи

Щоб оцінити роботу запропонованого IPS, було вибрано налаштування для імітації відстеження сценарію, що керується вручну.

Було обрано три сценарії з шістьма маяками. Маяки були розміщені перед вибраними станціями для моніторингу, як показано на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Розташування вибраних маяків для експериментів.

(1) комп'ютерна робоча станція, (2) 3D-принтер, (3) транспортер роликowego конвеєра, (4) робочий стіл роботизованої клітини, (5) робочий стіл для керованого складання, (6) офісний стіл.

У першому сценарії людина проходить між цими маяками за годинниковою стрілкою. У другому – рух відбувається проти годинникової стрілки, а в третьому – у випадковому порядку між станціями. У табл. 4.3 наведено номер маяка, ідентифікатор, координати та висоту.

Таблиця 4.3 – Розташування та висота маяків, що використовуються в офісі/лабораторії.

Параметр/маяк (ID)	Розташування [м]	Висота [м]
Маяк 1 (A7Az)	X: 9.01, Y: 2.92	0.85
Маяк 2 (VFI9)	X: 10.12, Y: 1.46	0.86
Маяк 3 (zEs4)	X: 9.65, Y: 6.40	1.04
Маяк 4 (ed5j)	X: 2.47, Y: 2.24	0.86
Маяк 5 (UpCY)	X: 6.45, Y: 5.28	0.99
Маяк 6 (CXOk)	X: 4.20, Y: 7.24	1.03

Спочатку оцінюється час обробки для онлайн-локалізації на Raspberry Pi. По-друге, на основі зразків, зібраних під час фази калібрування, було виконано калібрування для вибраних маяків. Це було досягнуто за допомогою спеціально розробленого інструменту калібрування маяка в MATLAB, окремо для кожної орієнтації маяка. Нарешті, точність локалізації в реальному часі була розроблена для підтвердження правильної роботи IPS.

Інтервал сканування Raspberry Pi був встановлений на 100 мс. Це означає, що протягом цього часу приймач Bluetooth прослуховує всі маяки, які знаходяться поблизу, і зберігає вхідні дані для обробки. Результати оцінки часу обробки показали, що процедура локалізації (розрахунок різних фільтрів і виявлення піків) для шести маяків, використаних в експерименті, займає приблизно 3 мс. Додавання більшої кількості маяків означає, що інтервал сканування збільшується, що може призвести до зниження точності виявлення в реальному часі. Загальний час обробки зі швидкістю сканування $T_s = 100$ мс займає $T_p = 160\text{--}175$ мс до ініціалізації нового сканування. Більша частина часу обробки (57–72 мс) припадає на завдання, поставлені бібліотекою BLE.

Калібрування відбувалося з використанням наведеного вище протоколу калібрування, який забезпечує просте та точне калібрування використовуваних маяків. Для кожного з використаних маяків було зібрано від семи до дев'яти зразків для процесу оптимізації порогового значення. Їхні пороги були визначені автоматично за допомогою Beacon Calibration Tool.

Для перевірки правильності роботи Beacon Calibration Tool був обраний один маяк із чотирма різними орієнтаціями:

- маяк було встановлено вертикально, антеною, спрямованою вбік від передньої частини столу;
- антеною, спрямованою до передньої частини столу;
- маяк було встановлено горизонтально, антеною догори;
- антеною до столу.

Калібрування проводилося для кожної зазначеної орієнтації. Виконувався один цикл вимірювань для локалізації в режимі реального часу для вибраного

радіомаяка на основі автоматично визначених порогів. Параметри калібрування наведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4 – Налаштування параметрів Beacon Calibration Tool.

Маяк	Чутливість	Кількість зразків	Кількість оцінок
1–5	0.85	8	500
6	0.85	4	500

Результати процедур калібрування та відповідних вимірювань у реальному часі наведено в табл.4.5. Перевірка проводилася лише за допомогою адаптера LM Technologies.

Таблиця 4.5 – Результати перевірки Beacon Calibration Tool за допомогою LM Technologies LM1010.

Параметр/маяк	Поріг [dBm]	Поріг [dBm]	Поріг [dBm]	Поріг [dBm]
Маяк: СХОк	63.8	65.3	72.8	72.8
Кількість збігів/зібрано зразки, проаналізовані в Beacon	7/7	7/7	8/8	8/8
Інструмент калібрування				
Кількість проїздів (n)	27	31	27	31
Хибні спрацьовування (fp)	0	0	2	2
Помилкові негативи (fn)	2	2	0	0
Успішні тригери (ns)	25	29	25	29
Рівень успішності (SR)	92.59%	93.55%	92.59%	93.55%
Середній час затримки (td)	0.79 с	0.69 с	0.10 с	0.32 с
Стандартне відхилення затримки часу (td)	0.17 с	0.28 с	0.52 с	0,49

Рівень успіху (SR) був визначений на основі наступного рівняння:

$$SR = \frac{n - f_p - f_n}{n} \cdot 100[\%] \quad (4.1)$$

де n – повна кількість проходів;

f_p – кількість помилкових спрацьовувань;

f_n — кількість помилково негативних.

Оскільки інші маяки були вимкнені під час цього початкового тесту, кількість помилкових спрацьовувань вказує на те, що відбулося багаторазове виявлення. Очевидно, що хибні негативи представляють відсутні виявлення, коли відбулося фактичне проходження. Час затримки — це різниця в часі між міткою часу, коли IPS зареєструвала подію проходження повз, і кнопкою миші з міткою часу була натиснута особою, яка виконує експерименти, як зазначено в рівнянні:

$$t_d = t_{\text{reg}} - t_p \text{ [c]} \quad (4.2)$$

Середня затримка часу була розрахована лише для успішних тригерів (n_s) у наступному рівнянні:

$$\bar{t}_d = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} t_{d_i}}{n_s} \text{ [s]}, \quad (4.3)$$

де t_{d_i} – i -та вибірка часу затримки.

Подібним чином стандартне відхилення затримки часу було розраховано за наступним рівнянням:

$$\sigma_{t_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} (t_{d_i} - \bar{t}_d)^2}{n_s - 1}} \text{ [s]} \quad (4.4)$$

Як можна помітити з результатів табл.4.5, порогові значення від калібрування відрізняються від орієнтації до орієнтації. Виходячи з результатів, рекомендується встановити маяк вертикально так, щоб антена була спрямована до передньої частини столу; отже, усі подальші тести проводилися на основі цієї орієнтації, як показано на малюнку 9. Високий відсоток (понад 92%) правильно визначених проходжень вказує на те, що процедура калібрування та інструмент калібрування Weacon працювали належним чином. Як видно з рис. 4.8, значення функції пристосованості зменшувалося з кожним новим поколінням, показуючи, що алгоритм оптимізації PSO покращив початкове рішення, як і очікувалося.

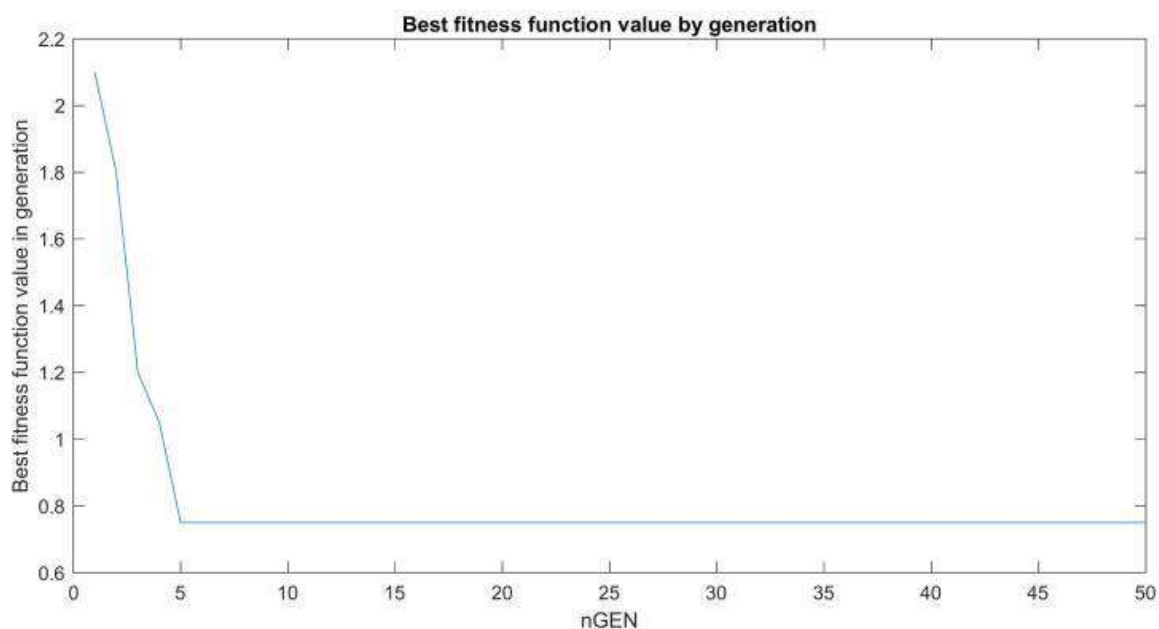


Рисунок 4.8 – Найкраще значення функції пристосування за поколінням, згенероване в Weacon Calibration Tool.

Як видно з рис.4.8, найкраще значення функції придатності покоління покращувалося до п'ятого покоління (50 оцінок) і залишалося незмінним до кінця процесу оптимізації. Алгоритм оптимізації PSO в Weacon Calibration Tool керував процесом виявлення всіх семи піків, отриманих під час процедури калібрування. На основі наведених вище результатів калібрування було виконано для всіх використаних маяків для двох USB-адаптерів Bluetooth. Для обох конфігурацій використовували однакові параметри калібрування, як показано в табл.4.2. Результати повного калібрування наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Порогові значення для USB-адаптерів Bluetooth, отримані в Beacon Calibration Tool (усі значення вказані в дБм).

Bluetooth Адаптер/маяк (ID)	USB	Manga Bluetooth4.0 USB	LM Technologies LM1010
Маяк 1 (A7Az)		61.4	60.5
Маяк 2 (VFI9)		63.2	64.0
Маяк 3 (zEs4)		57.8	60.0
Маяк 4 (ed5j)		63.5	64.5
Маяк 5 (UpCY)		63.0	63.0
Маяк 6 (CXOk)		68.5	67.0

Крім того, початкові тести локалізації в режимі реального часу показують, що локалізація була успішною більш ніж у 93,5% у найкращому випадку. У наступних обширних тестах IPS було детально проаналізовано в режимі реального сценарію.

Найважливішим показником оцінки IPS є частота успішних тригерів із фактом фактичного проходження через маяк. Крім того, система має бути стійкою до помилкових виявлень, які можуть виникнути, якщо маяки не рознесені належним чином. Тому було підготовлено три різні сценарії для оцінки продуктивності в реальному світі. Тест на точність локалізації в реальному часі було виконано з параметрами, зазначеними в табл.4.3, при цьому Сценарій 1 був еталонним сценарієм. Загалом більше 400 подій на один було зареєстровано USB-адаптер Bluetooth із загальним показником успіху виявлення 95,7% для USB-адаптера Trust Manga Bluetooth 4.0 і 95,9% для адаптера LM Technologies LM1010 відповідно. Результати представлені в табл.4.7.

Таблиця 4.7 – Результати локалізації в реальному часі для двох зовнішніх USB-адаптерів Bluetooth.

USB-адаптер Bluetooth	Trust Manga Bluetooth 4.0 USB			LM Technologies LM1010		
	1	2	3	1	2	3
Сценарій/Результат						
Кількість проїздів (n)	144	143	121	137	145	135
Помилкові спрацьовування (fp)	0	0	2	0	2	2
Помилкові негативи (fn)	5	4	6	7	0	6
Успішні тригери (ns)	139	139	113	130	143	128
Рівень успішності (SR)	96.53%	97.20%	93.39%	94.89%	98.62%	94.07%
Середній час затримки (td)	0.61 с	0.63 с	0.77 с	0.31 с	0.24 с	0.19 с
Стандартне відхилення затримки часу (td)	0.42 с	0.49 с	0.51 с	0.61 с	0.83 с	0.53 с

Тут помилкові спрацьовування були отримані шляхом вивчення файлу журналу вимірювань. Коли людина, яка йшла навколо, переходила між маяками, ідентифікатори маяків були відомі заздалегідь у попередньо визначеній послідовності (за винятком сценарію 3). У сценарії 3 особа повинна була помітити пішохідну доріжку між маяками. Якщо маячок з'являвся раніше того, який повинен був, це вважалось помилковим спрацьовуванням. Наприклад, якщо маяки будуть розташовані дуже близько один від одного та неналежним чином відкалібровані, система може виявити маяк, до якого людина не була близько, що називається хибним спрацьовуванням. Подібним чином, помилкові негативні результати були отримані таким же чином, тільки цього разу ми шукали ті, яких не було у файлі журналу вимірювань.

Результати трьох різних сценаріїв для перших адаптерів USB Bluetooth показують, що запропонований IPS працює стабільно. Згідно з аналізом Beacon Calibration Tool, у першому сценарії показник успіху становив 96,53% із п'ятьма

помилковими негативними результатами, що й очікувалося. У другому сценарії, коли збирач замовлень рухався проти годинникової стрілки, результати незначно покращилися. Останній сценарій ввів у вимірювання кілька хибнопозитивних виявлень, тому загальний рівень успішності впав на кілька відсотків. Середні часові затримки між виявленням і наближенням людини до маяків приблизно однакові, що також вірно для стандартного відхилення часової затримки. Це означає, що повторюваність вимірювань висока. Від'ємний знак вказує на те, що IPS виявлення маяка відбулося незадовго до того, як людина наблизилася до маяка на кілька сантиметрів.

Для другого використовуваного USB-адаптера Bluetooth результати також дуже схожі на ті, отримані за допомогою першого USB-адаптера Bluetooth. Однак виникли деякі відмінності в середньому часі затримки та стандартному відхиленні часу затримки. Зовнішня антена на адаптері забезпечувала більш стабільні показники RSSI, але у випадку з Beacon 5 (UpCY) маяк був виявлений набагато раніше, ніж мав бути, що сприяло позитивній затримці часу. Це пояснюється тим, що не було перешкод для сигналу між маяком і приймачем, і в разі наближення до приймача вимога виявлення виконувалася швидко. Це можна обслуговувати, експериментуючи з позиціонуванням і орієнтацією маяка або використовуючи інші USB-адаптери Bluetooth. Так само для експериментів, проведених для обох USB-адаптерів Bluetooth, було протестовано вбудований приймач Bluetooth Raspberry Pi, але результати, отримані в цих експериментах, виявилися набагато гіршими, ніж результати із зовнішніми адаптерами Bluetooth USB.

Завдяки подібності між показниками успіху першого та другого адаптерів ми перевірили, наскільки добре працює USB-адаптер Trust Manga Bluetooth 4.0 із значеннями калібрування, отриманими за допомогою адаптера LM Technologies LM1010.

Наведені вище результати вказують на те, що процедура калібрування необхідна при використанні USB-адаптерів Bluetooth іншого типу, навіть якщо використовуються однакові налаштування потужності та інтервалу передачі маяків. Результати другого сценарію можуть бути дещо дивними, враховуючи, що Сценарій

1 і Сценарій 3 досягли приблизно на 8–14% гірших результатів. Однак ці результати були наслідком встановлення порогових значень для кількох маячків неоптимально – система може виявити їх у деяких випадках, але не завжди, оскільки система відфільтрувала більше, ніж слід.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі виконано розробку методики локального позиціонування об'єкта на основі технології Bluetooth маяків в середині приміщень.

Виконано аналіз та порівняння існуючих методів визначення дальності та технологій позиціонування, та складено відповідність доступності методів до технологій локального позиціонування.

Проведено аналіз існуючих методів та алгоритмів позиціонування об'єктів на основі технології Bluetooth beacon з використанням RSS вимірювань. Виконано статистичне моделювання, яке показало що для розрахунку координат найкраще підходить метод найменших квадратів.

Розроблено методику локального позиціонування об'єкту на основі технології Bluetooth beacon за допомогою RSS вимірювань з урахуванням критерію мінімальної прийнятої потужності сигналу. Виконано статистичне моделювання на ЕОМ.

Описано принцип визначення критерію мінімальної прийнятої потужності сигналу, який дозволяє зменшити СКВ похибки визначення положення об'єктів. Для розглянутої конфігурації розташування Bluetooth маяку точність визначення координат збільшилась більш ніж у 5 разів, та майже досягає нижньої границі Рао-Крамера.

Проведено експериментальне дослідження розробленого алгоритму з використанням мікрокомп'ютерів RaspberryPi, що виконували функціонал Bluetooth маяків. Отримані результати СКВ похибки визначення положення об'єктів відрізняються від результатів статистичного моделювання в два рази, причиною чого є перевідбиття та накладання сигналів маяків. Для усунення даної проблеми необхідний опис більш складної моделі поширення сигналу, яка враховує перевідбиття сигналів.

Результати дослідження запропонованого IPS показують, що система працювала стабільно та надійно в кімнатах з невеликою кількістю помилкових виявлень. Рівень успіху до 98% у найкращому сценарії та 93% у найгіршому

сценарії відповідно. Середня затримка часу становила 0,77 с у найгіршому випадку та 0,19 с у найкращому випадку, що означає, що виявлення відбулося трохи пізніше після того, як людина наблизилася до маяка, але значення калібрування та орієнтація маяка все ще можуть бути модифіковано для досягнення кращих результатів. Стандартне відхилення часової затримки було приблизно однаковим для всіх сценаріїв, отриманих за допомогою USB-адаптера Trust Manga Bluetooth 4.0, і було трохи вищим для результатів, отриманих за допомогою адаптера LM Technologies LM1010. Рівень хибнопозитивного виявлення досягав до 5% і 1,5% проходжень, які не були виявлені в найгіршому сценарії відповідно. Використані два зовнішні USB-адаптери Bluetooth працювали приблизно однаково з точки зору рівня успіху, але досягли різних результатів з точки зору середньої затримки часу та стандартного відхилення, що говорить на користь Trust Manga Bluetooth 4.0 USB. Завдяки антені з високим коефіцієнтом посилення, яка використовується в адаптері LM Technologies LM1010, сигнал був дуже сильним, і іноді маяк виявлявся занадто рано, перш ніж людина наближалася до маяка. Це особливо вірно, якщо лінія видимості між маячком і приймачем вільна, а значення калібрування встановлено неправильно. Подібних проблем з Trust Manga Bluetooth 4.0 USB ми не виявили, що також більш прийнятно з точки зору розмірів.

Інтерфейс запропонованого IPS є простим і адаптованим з точки зору використання кількох маяків для покриття більших площ або кількох приміщень, оскільки маяки BLE є відносно дешевими пристроями. Єдиними поточними витратами є батареї, які необхідно періодично замінювати, але в іншому випадку вони не вимагають жодного обслуговування після початкової конфігурації. Кілька маяків можна масово налаштувати по повітрю (OTA); отже, фізичні з'єднання між передавачами та приймачами не потрібні. Основним недоліком запропонованого IPS є обмеження щодо розташування передавача та приймача — ми виявили, що система працює найкраще, якщо приймач прикріплений спереду, на поясі людини, яка несе приймач. Бажано, щоб приймач розташовувався якомога колінеарніше головної осі людини, яка несе систему. Сигнали, отримані від передавачів, є

найбільш стабільними, якщо вони розташовані на рівні приймача, але вище та нижче розміщення приблизно на 20 см також добре переноситься.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Dardari Davide, Pau Closas, Petar M Djurić. Indoor tracking: Theory, methods, and technologies. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2015; 64(4): 1263-1278.
2. Elloumi W, Guissous K, Chetouani A, Canals R, Leconge R, Emile B, Treuillet S. Indoor navigation assistance with a smartphone camera based on vanishing points. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2013 International Conference on*. 2013: 1-9.
3. Otsason, Veljo, et al. Accurate GSM indoor localization. *International conference on ubiquitous computing*. Springer Berlin Heidelberg. 2005.
4. Mautz R. Indoor positioning technologies. PhD thesis, Habil: ETH Zürich; 2012.
5. Mautz Rainer, Sebastian Tilch. Survey of optical indoor positioning systems. *IPIN*. 2011.
6. Sana. A Survey of Indoor Localization Techniques. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2013; 6(3): 69-76.
7. Mautz, Rainer. Overview of current indoor positioning systems. *Geodezijairkartografija*. 2009; 35(1): 18-22.
8. Razavi, Saiedeh N, Osama Moselhi. GPS-less indoor construction location sensing. *Automation in Construction*. 2012; 28: 128-136.
9. Al-Ammar, Mai A, et al. Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms. *Cyberworlds (CW), 2014 International Conference on IEEE*. 2014.
10. Ficco, Massimo, Francesco Palmieri, Aniello Castiglione. Hybrid indoor and outdoor location services for new generation mobile terminals. *Personal and ubiquitous computing*. 2014; 18(2): 271-285.
11. Luo, Xiaowei, William J O'Brien, Christine L Julien. Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites. *Advanced Engineering Informatics*. 2011; 25(2): 355-363.

12. Blankenbach, Jörg, Abdelmoumen Norrdine. Position estimation using artificial generated magnetic fields. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2010 International Conference on IEEE. 2010.
13. Montañés, José Antonio Puértolas, Adriana Mendoza Rodríguez, Iván Sanz Prieto. Smart indoor positioning/location and navigation: A lightweight approach. *IJIMAI*. 2013; 2(2): 43-50.
14. Gu, Yanying, Anthony Lo, Ignas Niemegeers. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*. 2009; 11(1): 13-32.
15. Kanaan, Muzaffer, Kaveh Pahlavan. A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment. *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, IEEE*. 2004; 1.
16. H Mehmood, NK Tripathi. *Hybrid Positioning Systems: A Review*. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011.
17. Kolodziej, Krzysztof W, Johan Hjelm. *Local positioning systems: LBS applications and services*. CRC press. 2006.
18. Mandal Atri, et al. Beep: 3D indoor positioning using audible sound. *Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC, IEEE*. 2005.
19. Popleteev Andrei, Venet Osmani, Oscar Mayora. Investigation of indoor localization with ambient FM radio stations. *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*. IEEE International Conference on IEEE. 2012.
20. Xue Jian-bin, He Fengjie, Wang Dong. Analysis and Design of Tag Antenna Based UHF RFID for Libraries. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2015; 13(3): 521-528.
21. Tukianto Christian, Harald Sternberg. Overview of current indoor navigation techniques and implementation studies. *FIG Working Week*. 2011.
22. Jiang, Zhi-Ping, et al. Communicating is crowdsourcing: Wi-Fi indoor localization with CSI-based speed estimation. *Journal of Computer Science and Technology*. 2014; 29(4): 589-604.

23. Hilsenbeck, Sebastian, et al. Graph-based data fusion of pedometer and WiFi measurements for mobile indoor positioning. Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, ACM. 2014.

24. Lukianto Christian, Christian Hönniger, Harald Sternberg. Pedestrian smartphone-based indoor navigation using ultra portable sensory equipment. Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), International Conference on IEEE. 2010.

25. Hu Xin, Lianglun Cheng, Guangchi Zhang. A Zigbee-based localization algorithm for indoor environments. Computer Science and Network Technology (ICCSNT), International Conference on IEEE. 2011; 3.

26. Zhang De, Li Gang Yan. Positioning System of Underground Coal Mines Based on ZigBee Technology. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 2014; 12(5): 3962-3968.

ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ