

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем**

«На правах рукопису»
УДК 621.396.96

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Сергій ЖУК
«__» _____ 2024р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Алгоритм визначення місцеположення декількох БПЛА на ос-
нові сенсорної мережі»**

Виконав:
студент II курсу, групи РС-з21мп

Гайдай Артем Вікторович



Керівник:

к.т.н. Товкач Ігор Олегович



Рецензент:

к.т.н., доц. каф ПРЄ Сушко Ірина Олександрівна

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць ін-
ших авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2024 року

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТС
_____ Сергій ЖУК

«13» листопада 2023 року

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту (тці)**

Гайдай Артем Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема дисертації** _____ **Алгоритм визначення місцеположення
декількох БПЛА на основі сенсорної мережі**

науковий керівник дисертації

Товкач Ігор Олегович, к.т.н.

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

затверджені наказом по університету від «09» листопада 2023 р. №5206-с

2. **Термін подання студентом дисертації**

_____ **08 січня 2023 року**

3. **Об'єкт дослідження:** процес визначення місцеположення декількох БПЛА.

4. **Вихідні дані:** Методи пасивної локації, сенсорна мережа, програмне середовище MATLAB.

5. **Перелік завдань, які потрібно розробити:**

1. Розглянути сучасні системи позиціонування;
2. Аналіз проблем визначення місцеположення декількох БПЛА;
3. Розглянути існуючі методи визначення місцеположення;
4. Розробити алгоритм визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі;
5. Проаналізувати розроблений алгоритм.

6. **Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:** слайди для презентації результатів роботи над магістерською дисертацією.

7. **Орієнтовний перелік публікацій:** 1 тези доповіді на науково-практичній конференції.

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіо-технічного факультету.

9. Дата видачі завдання: 14 листопада 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Усвідомлення завдання на виконання кваліфікаційної роботи	1 вересня по 14 вересня 2023р.	Виконано
2	Робота над 1 розділом кваліфікаційної роботи. Дослідження існуючих систем позиціонування, дослідження позиціонування об'єктів в сенсорній мережі, дослідження актуальності БПЛА.	14 вересня 2023р. по 14 жовтня 2023 р.	Виконано
3	Робота над 2 розділом кваліфікаційної роботи Аналіз математичних принципів обчислення місцеположення. аналіз методів визначення координат, аналіз існуючих алгоритмів визначення місцеположення. Формування проблеми визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі	14 жовтня 2023 р по 14 листопада 2023 року	Виконано
4	Розробка алгоритму визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі	14 листопада 2023 року по 14 грудня 2023 року	Виконано
5	Аналіз розробленого алгоритму визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі	14 грудня 2023 року по 25 грудня 2023	Виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи у відповідності до вимог та методичних рекомендацій	25 грудня 2023 р. по 05 січня 2024 року	Виконано
7	Подання кваліфікаційної роботи керівнику на підготовку відгука	05 січня 2024 року	Виконано
8	Підготовка матеріалів та результатів роботи до попереднього захисту	06 по 07 січня 2023 року	Виконано
9	Попередній захист результатів дисертаційних досліджень	09 січня 2024р.	Виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи на рецензію	09 січня 2024 р.	Виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи для перевірки на дотримання академічної доброчесності	10 січня 2024 р.	Виконано

Студент



(підпис)

Артем ГАЙДАЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник



(підпис)

Ігор ТОВКАЧ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки магістерської дисертації становить 98 сторінки, які включають в себе 5 розділів, 45 ілюстрації, 14 таблиць, 75 бібліографічних найменувань за переліком джерел посилань, 1 додаток.

Актуальність теми дослідження. В сучасному світі актуальність безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зростає з кожним роком через їх великий потенціал у різних галузях. Разом з цим збільшуються вимоги до контролю руху БПЛА. Оскільки для самопозиціонування БПЛА зазвичай використовує GPS. І місцеположення БПЛА відоме тільки оператору БПЛА.

Існуючі системи виявлення та позиціонування БПЛА (радары, аналізатори радіочастотного спектру, аудіо та відео виявлення), були розроблені для цілей великогабаритних при цьому ці системи дорогі та складні у розгортанні.

Тому в останні роки розробляються різні системи на основі безпроводних сенсорних мереж з використанням для локалізації ToA, TDoA, RSS виміри. Однак ці методики орієнтовані для визначення місцеположення однієї цілі. Тому розробка алгоритму визначення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі є актуальною науковою задачею

Мета та завдання. Дослідження існуючих методи локалізації в сенсорних мережах та розробка алгоритму визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі використовуючи RSS вимірювання.

Об'єкт дослідження. Процес визначення місцеположення декількох БПЛА.

Предмет дослідження. Методи оцінювання місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи статистичної теорії прийняття рішень, статистичного моделювання на ЕОМ і метод експериментального дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено алгоритм оцінювання місцеположення декількох БПЛА на основі RSS-вимірювань, в якому,

на відмінну від існуючих, визначається місцеположення декількох БПЛА і реалізований критерій відбору істинних місцеположень БПЛА з поміж хибних.

Практична цінність. Даний алгоритм дозволяє розрізнити 2 БПЛА відстань між якими складає більше ніж 8 метрів з ймовірністю більше 95%.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися на: V Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів та аспірантів «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В XXI СТОЛІТТІ»

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 1 теза доповіді.

Ключові слова. RSS, WSN, UAV, визначення місцеположення, MATLAB.

ANNOTATION

The volume of the explanatory note of the master's dissertation is 98 pages, which include 5 sections, 1 appendix, 45 illustrations, 14 tables, 75 bibliographic titles according to the list of reference sources, 1 appendix.

Relevance of the research topic. In today's world, the relevance of unmanned aerial vehicles (UAVs) is growing every year due to their great potential in various fields. At the same time, the requirements for UAV traffic control are increasing. Since UAVs usually use GPS for self-positioning. And the location of the UAV is known only to the UAV operator.

Existing UAV detection and positioning systems (radar, radio frequency spectrum analyzers, audio and video detection) were developed for large-scale targets, while these systems are expensive and difficult to deploy.

Therefore, in recent years, various systems have been developed based on wireless sensor networks using ToA, TDoA, RSS measurements for localization. However, these techniques are oriented to determine the location of a single target. Therefore, the development of an algorithm for the detection of several UAVs based on a sensor network is an urgent scientific task.

Purpose and tasks. Research of existing methods of localization in WSN and development of an algorithm based on RSS measurements for localization several UAVs using WNS.

Object of research. The process of localization several UAVs.

Subject of research. Methods of estimating the location of UAVs based on RSS measurements with WNS.

Research methods. For Thesis used the methods of: statistical theory of decision-making, statistical computer modeling and the method of experimental research.

Scientific novelty of the obtained results. An algorithm for estimating the location of several UAVs based on RSS measurements has been developed, in which, unlike the existing ones, the location of several UAVs is determined and a criterion for selecting true UAV locations from false ones is implemented.

Practical value. This algorithm allows you to distinguish between 2 UAVs, the distance between which is more than 8 meters with a probability of more than 95%.

Testing the results of the thesis. The materials of the dissertation and the main propositions obtained in the work were presented at: V All-Ukrainian scientific and technical conference of students and postgraduates "RADIO ELECTRONICS IN THE XXI CENTURY"

Publications. Based on the results of the dissertation work, 1 abstract of the report was published.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	—	безпілотний літальний апарат
GNSS	—	Global Navigation Satellite System
FHSS	—	Frequency Hopping Spectrum Spreading
SDR	—	Software Defined Radio
ToA	—	Time of Arrival
TDoA	—	Time Difference of Arrival
AoA	—	Angle of Arrival
DoA	—	Direction of Arrival
RSS	—	Receive Signal Strength
ToF	—	Time of Flight
WNS	—	Wireless Sensor Networks
GPS	—	Global position system
LPS	—	Local position system
INS	—	Inertial navigation system
RFID	—	Radio Frequency identification
WLPS	—	Wireless local positioning system
TCAS	—	traffic alert and collision avoidance systems
IDR	—	Id-request
DBS	—	Dynamic Base Station

2.1.5 Переваги та недоліки	47
2.2 Методи визначення координат	48
2.2.1 Метод визначення координат на основі часу прибуття сигналу (Time of Arrival далі ToA)	48
2.2.2 Метод визначення координат на основі різниці часу прибуття сигналу (Time Difference of Arrival далі TDoA).....	49
2.2.3 Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу (Angle of Arrival далі AoA).....	51
2.2.4 Метод визначення координат на основі вимірювання потужності сигналу (Receive Signal Strength далі RSS).....	52
2.2.5 Порівняння методів визначення координат	54
2.3 Базові геометричні принципи для визначення місцеположення ...	55
2.3.1 Триангуляція.....	55
2.3.2 Мультилатерація	56
2.3.3 Гіперболічний принцип.....	57
2.4 Існуючі алгоритми локалізації.....	59
2.4.1 Централізовані алгоритми.....	59
2.4.2 Адаптивне розташування вузлів.....	60
2.4.3 Розподілені алгоритми локалізації.....	64
2.5 Проблема локалізації декількох БПЛА на основі сенсорної мережі	70
2.6 Висновки по розділу	73
3 Синтез алгоритму визначення місцеположення Декількох БПЛА на основі сенсорної мережі	74
3.1 Модель поширення сигналу.....	74
3.1.1 Характеристика RSSI.....	77

3.1.2 Огляд моделей поширень сигналу RSSI.....	78
3.2 Оцінка координат	81
3.3 Моделювання алгоритму.....	83
3.4 Висновки до розділу	84
4 Аналіз синтезованого алгоритму визначення багатьох БПЛА на основі сенсорної мережі	85
4.1 Аналіз різної конфігурації сенсорних вузлів та БПЛА	85
4.1.1 Моделювання для конфігурації сенсорної мережі з трьох датчиків	85
4.1.2 Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі з 6 датчиків	86
4.1.3 Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі з 9 датчиків	87
4.2 Аналіз впливу відстані між БПЛА на роботу алгоритму, визначення роздільної здатності.....	88
4.3 Висновок до розділу	90
5 Розробка стартап-проекту	92
5.1 Опис ідеї проекту	92
5.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї	93
5.3 Технологічний аудит ідеї проекту.....	93
5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	94
5.5 Визначення потенційних клієнтів	95
5.6 Аналіз ринкового середовища	96
5.7 Аналіз сильних та слабких сторін	96
5.8 Висновки по розділу	98

Висновки	99
Перелік використаних джерел	101
Додаток А.....	110

ВСТУП

У наш час можливість відстежувати об'єкти та людей має вирішальне значення для величезної кількості застосувань, таких як медичні програми (моніторинг пацієнтів) або незалежні програми, які вимагають дуже високої точності та роздільної здатності в процесі позиціонування.

Труднощі в позиціонуванні, визначенні місцезнаходження та оцінці відстеження вирішувалися багатьма системами протягом десятиліть, основною стала глобальна система позиціонування (GPS). GPS є основним прикладом визначення місцезнаходження з високою точністю на бездротових лініях зв'язку на великих відстанях. Однак GPS показує слабкість у середовищі без прямої видимості, і при тому потребує синхронізації між об'єктом локалізації і супутниками.

Останніми роками використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для збору даних та проведення вимірювань набуло популярності. Часто використання БПЛА дозволяє знизити витрати та покращити інші критерії ефективності. Дійсно, незважаючи на свої невеликі розміри, БПЛА можуть перевозити корисне навантаження до одного кілограма або більше, і вони оснащені камерами та системами бездротового зв'язку. І є велика небезпека в тому що БПЛА можуть використовуватися в злочинних діях. Тому виникає проблема яка потребує рішення, а саме виявлення та визначення місцеположення БПЛА для попередження про можливу небезпеку.

Метою роботи є: дослідження існуючих методи локалізації в сенсорних мережах та розробка алгоритму визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі використовуючи RSS вимірювання.

Об'єктом дослідження: є процеси визначення місцезнаходження БПЛА на основі RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Предметом дослідження є: методи оцінювання місцеположення БПЛА на основі RSS- вимірювань сенсорної мережі.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ ДЕКІЛЬКОХ БПЛА

Останнім часом багато уваги привертають безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, оскільки вони представляють новий потенційний ринок. Поряд зі зрілістю технології та відповідними правилами очікується розгортання цих БПЛА по всьому світу. Завдяки високій мобільності дронів їх можна використовувати для багатьох застосувань, таких як надання послуг, зменшення забруднення, сільське господарство та в рятувальних операціях. Завдяки своїй повсюдній зручності використання, БПЛА відіграватиме важливу роль у баченні Інтернету речей (IoT), і він може стати основним ключовим фактором, що забезпечує це бачення. Хоча ці БПЛА будуть розгорнуті для конкретних цілей (наприклад, надання послуг), вони можуть бути використані для надання нових додаткових послуг IoT, коли вони оснащені відповідними пристроями зв'язку машинного типу (МТС) з дистанційним керуванням (тобто датчиками, камерами та виконавчими механізмами). Однак розгортання БПЛА для передбачених цілей не може бути здійснене до подолання відповідних складних проблем. Ці проблеми включають не тільки технічні проблеми, такі як фізичне зіткнення, але й питання регулювання, оскільки ця технологія, що зароджується, може бути пов'язана з такими проблемами, як порушення конфіденційності людей або навіть використання її для незаконних операцій, таких як контрабанда наркотиків.

1.1 Технології визначення місцеположення

Системи позиціонування визначають місцезнаходження людини чи об'єкта відносно відомого положення, або в межах системи координат. В останні кілька десятиліть було розроблені різні системи позиціонування.

Деякі сфери застосування систем позиціонування включають (але не обмежуються ними) правоохоронні органи, безпеку, безпеку дорожнього руху,

відстеження персоналу, транспортних засобів та інших активів, обізнаність про ситуацію.

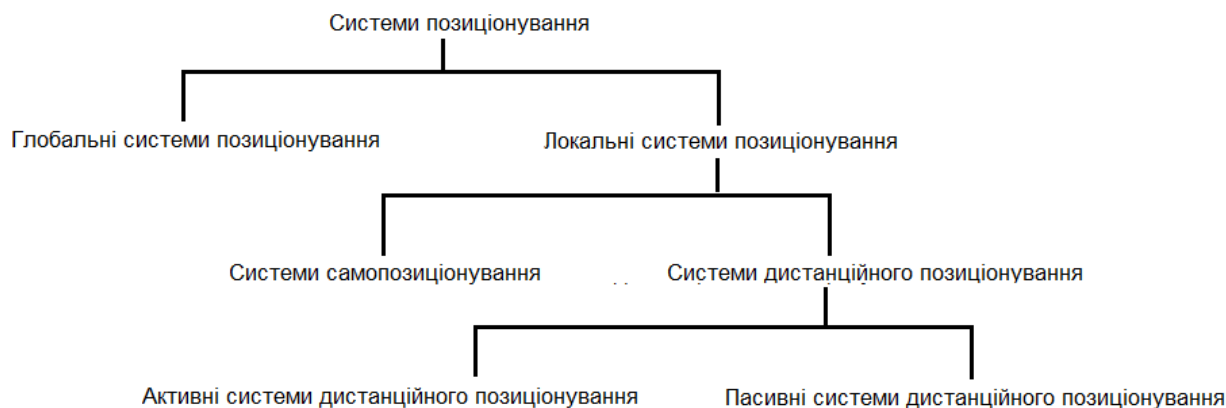


Рисунок 1.1 — Класифікація систем позиціонування на основі визначення дистанції

Загалом системи локалізації поділяються на дві категорії: на основі визначення відстані та без визначення відстані. Методи локалізації на основі визначення відстані використовують функції отриманого сигналу, такі як TOA [1], [2], DOA [3] та потужність отриманого сигналу (RSS). Локалізація без визначення відстані використовує підключення до мережі та локалізацію мережі.

Як показано на рисунку 1.1 метод локалізації на основі визначення дистанції можуть бути класифіковані на дві категорії:

1. Глобальні системи позиціонування;
2. Локальні системи позиціонування.

Системи глобального позиціонування (GPS) дозволяють кожному мобільному телефону знаходити своє власне положення на земній кулі. Локальна система позиціонування (LPS) є системою відносного позиціонування і може бути класифікована на само- та дистанційне позиціонування. Системи самопозиціонування дозволяють кожній людині або об'єкту знайти своє власне положення по відношенню до статичної точки в будь-який момент часу і в будь-якому місці. Прикладом таких систем є інерціальні навігаційні системи (INS).

Система дистанційного позиціонування дозволяє кожному вузлу знаходити взаємне розташування інших вузлів, розташованих в зоні його покриття. Тут вузли можуть бути статичними або динамічними. Системи дистанційного позиціонування поділяють на:

1. Активні системи дистанційного позиціонування;
2. Пасивні системи дистанційного позиціонування.

У першому випадку ціль активна і співпрацює в процесі позиціонування, тоді як у другому ціль пасивна і не співпрацює. Прикладами активних систем позиціонування цілей є радіочастотна ідентифікація (RFID), бездротові системи локального позиціонування (WLPS) [4], а також системи попередження про дорожній рух та запобігання зіткненням (TCAS) [4]. Прикладами пасивних систем позиціонування цілі є радары та системи візуального позиціонування.

1.1.1 Global Position System

GPS базується на штучному сузір'ї з 27 супутників, що обертаються навколо Землі (24 в роботі і три додаткові на випадок виходу з ладу одного). Використовуючи ці супутники, людина або об'єкт може локалізувати своє положення з точки зору широти, довготи та висоти [5]. Ці супутники обертаються навколо Землі на висоті 12 000 миль і здійснюють два оберти кожні 24 години. Орбіти цих супутників влаштовані так, що в будь-який момент часу в будь-якій точці Землі добре видно не менше чотирьох супутників. GPS-приймач, розміщений на Землі, може локалізувати своє місцезнаходження за допомогою будь-якого набору з чотирьох видимих супутників.

Хоча GPS можна ефективно використовувати для багатьох навігаційних програм, він має обмеження. Він не здатний визначати місцеположення об'єктів в будівлях і шахтах через загасання сигналу. Його продуктивність також погіршується в умовах сильного розсіювання сигналу, в таких місцях як міські райони в центрі міста. GPS – це система самопозиціонування. Щоб увімкнути цю систему для віддаленого позиціонування, що необхідно для таких додатків, як мережі без точок доступу, кожен вузол повинен бути оснащений

системою зв'язку, яка також дозволяє йому передавати самолокалізовані дані іншим вузлам. Крім того, оскільки функції передачі даних GPS відомі, ці системи можуть бути заглушені супротивником. Це також обмежує його застосування в обороні. Такі системи, як INS, можуть бути об'єднані з GPS, щоб забезпечити локалізацію в закритих приміщеннях і шахтах. Крім того, WLPS були розроблені для забезпечення локалізації в середовищах, де заборонено GPS [6].

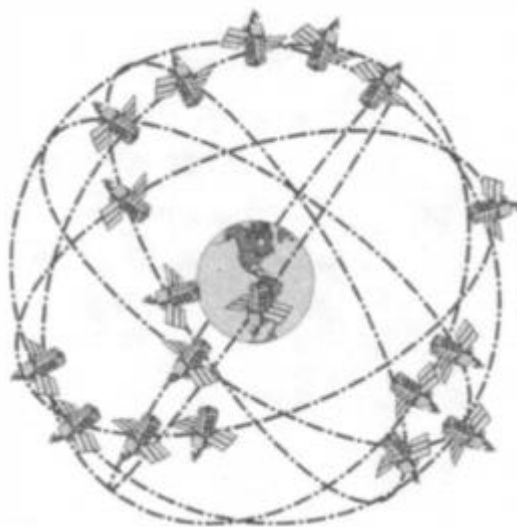


Рисунок 1.2 — Система супутників GPS

Для здійснення процесу локалізації за допомогою GPS необхідна наступна інформація: 1) Відстань від GPS-приймача до супутників 2) Положення кожного супутника з точки зору його широти, довготи і висоти.

Визначення дистанції від приймача до супутників. Якщо припустити, що годинники GPS-приймача і супутника ідеально синхронізовані, то відстань визначається за допомогою методу ТоА. Зокрема, для визначення відстані використовується затримка між сигналом, що передається супутником, і сигналом, що генерується на GPS-приймачі. Наприклад, якщо супутник починає передавати довгий унікальний сигнал(псевдовипадковий код) опівночі, а GPS-приймач також починає генерувати той самий сигнал опівночі, то затримка визначається шляхом порівняння двох моделей.

Для точних розрахунків місцеположення потрібна синхронізація годинника з точністю до наносекунд. Тому в ідеальних умовах і приймач, і супутник повинні бути оснащені високоточними годинниками, наприклад, атомними. Однак, оскільки ці годинники дорогі, виробники приймачів зазвичай використовують звичайні кварцові годинники. В результаті виходить так що супутник і приймач не можуть бути синхронізованими з нано-секундною точністю, тому для визначення місцеположення необхідний ще один етап. Цей етап має назву *синхронізація*. На цьому етапі використовується четвертий супутник для визначення похибки годинника приймача. Оскільки сигнал від супутника має пройти велику дистанцію (більше 15 000 км), то сфери, які будуть отримані трьома супутниками після розрахунків отриманого сигналу досить великі щоб перетнутися одна з одною і створити двох можливих кандидатів на позицію GPS-приймача.

Коли приймач і супутниковий годинник ідеально синхронізовані, точка перетину трьох сфер ближче до Землі буде вважатися положенням приймача. Сфера, яка утвориться в результаті четвертого вимірювання, неодмінно перетнеться місці перетину трьох інших. Але, якщо приймач і супутниковий годинник не синхронізовані, малоймовірно, що поверхня четвертої сфери проходить через будь-яку з двох точок, що перетинаються. Для обчислення похибки використовується різниця між відстанню передбачуваного положення приймача від четвертого супутника і псевдорадіусом дії четвертого супутника (радіусом четвертого супутника або відстанню до четвертого супутника, виміряною GPS-приймачем).

Крім синхронізації звичайних кварцових годинників-приймачів, періодично коригуються і супутникові атомні годинники [7]. Ця періодична корекція необхідна для того, щоб релятивістські ефекти були усунені, а супутникові атомні годинники були синхронізовані з наземними атомними годинниками. Ці релятивістські ефекти ґрунтуються на двох явищах, що пояснюються теорією відносності: а) годинники які перебувають у слабкому гравітаційному

полі йдуть швидше б) годинники які рухаються йдуть повільніше. Таким чином, атомний годинник на супутнику йде швидше в порівнянні з атомним годинником на землі через слабше гравітаційне поле на орбіті; Це відбувається через відносно більшу швидкість. Хоча теоретично ці два ефекти компенсують один одного, у випадку з супутниковим годинником GPS, де супутниковий годинник іде швидше, а той що знаходиться на землі повільніше. Тому відбуваються періодичні бортові розрахунки для корекції атомного годинника супутника та усунення релятивістських ефектів.

Визначення положення супутників. Цю другу інформацію можна отримати з невеликими труднощами, оскільки GPS-приймач може просто зберігати альманах, який визначає положення кожного супутника в будь-який момент часу. Вплив гравітаційного тяжіння Місяця і Сонця на орбіти супутників постійно відстежується США. Міністерство оборони, яке передає будь-які коригування на всі GPS-приймачі в рамках переданих сигналів. Коли інформація про відстань від супутників і їх положення відома, для знаходження тривимірного положення GPS-приймача використовується мультилатерація (процес, схожий на триангуляцію в TOA).

1.1.2 Інерціальні навігаційні системи

Інерційні навігаційні системи INS використовують акселерометри та гіроскопи для відстеження положення, швидкості та орієнтації об'єкта відносно відомої початкової точки, швидкості та орієнтації. Гіроскопи і акселерометри - це датчики руху, які вимірюють швидкість обертання (кутову швидкість) і лінійне прискорення відповідно [8].

Тоді виходить, що якщо для об'єкта відомі початкове положення, швидкість і орієнтація, то оновлене положення, швидкість і орієнтація визначаються шляхом інтеграції інформації, отриманої від датчиків руху. Таким чином, об'єкт може безперервно відстежувати своє положення, швидкість і орієнтацію без необхідності використання зовнішньої інформації.

Місцеположення об'єкту в просторі може бути описане шістьма параметрами: трьома поступальними (лінійне прискорення в напрямках x , y і z), і трьома обертальними параметрами (кутова швидкість в напрямках x , y і z). Для того, щоб визначити рух об'єкта, на ньому встановлюються три ортогональних акселерометра і три ортогональних гіроскопа. Ортогональний акселерометр - це прилад, який вимірює прискорення вздовж однієї осі. Три ортогональні акселерометри розташовані таким чином, що вони вимірюють лінійне прискорення в напрямках північ-південь, схід-захід і вертикально. Ортогональні гіроскопи також відомі як «інтегруючі» гіроскопи, оскільки їх вихід пропорційний куту повороту навколо фіксованих осей.

Математичне інтегрування прискорення $a(t)$ дає швидкість $v(t)$, яка, в свою чергу, інтегрується для визначення відстані, пройденої від початкової точки $r(t)$, як показано на рисунку 3b. Орієнтацію $\phi(t)$ можна знайти, інтегрувавши кутову швидкість $\omega(t)$, також показану на рисунку 3b. Ці обчислення виконуються періодично для відстеження руху об'єкта щодо глобальної системи відліку. Під час інтегрування положення об'єкта прискорення сили тяжіння віднімається від вертикальної складової прискорення.

Отримана кутова швидкість та прискорення, від датчиків руху, може мати похибку. При інтегруванні цих величин похибки датчиків впливають і на обчислення орієнтації та місцеположення. В додаток до цього, похибка вводиться ще й тому, що об'єкт чисельно інтегрує вимірювання на кожному такті часу. В INS така похибка має назву *дрейф інтеграції*. Для того щоб позбутися цієї похибки, INS поєднують з іншими системами позиціонування наприклад GPS.

INS переважно використовується у військовій сфері для відстеження підводних човнів, військових кораблів, безпілотних літальних апаратів, безпілотних наземних транспортних засобів, ракет, повітряного спостереження та навігації, пошуково-рятувальних груп.

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a(t) dt$$

$$r(t) = r(0) + \int_0^t v(t) dt$$

1.1.3 Радіочастотна ідентифікація RFID

Радіочастотна ідентифікація RFID це система визначення місцеположення в безпроводних системах зв'язку, яка ідентифікує мітки, що прикріплені до об'єкта. RFID-система складається зі зчитувача і RFID-міток. RFID-системи поділяються на дві категорії залежно від того, чи використовують вони пасивні або активні мітки [9].

Пасивні мітки не містять джерела живлення і тому підходять для використання на коротких відстанях. Пасивні RFID-мітки мають антену, яка збуджується вихідними сигналами на певних частотах, після чого мітка активується енергією сигналу що надійшов. Активна система RFID фактично є повноцінним приймально-передавальним пристроєм, що включає процесор, антену та акумулятор. Таким чином, активна мітка містить як радіотранспондер, так і джерело живлення для транспондера. RFID-зчитувач постійно посилає радіочастотні електромагнітні хвилі, які приймаються RFID-міткою поблизу нього. RFID-мітка модулює хвилю, додаючи свою ідентифікаційну інформацію і відправляє її назад зчитувачу. Зчитувач перетворює модульований сигнал у цифрову форму для визначення ідентичності мітки. Активні мітки ідеально підходять для ідентифікації великооб'ємної продукції, що проходить через блок обробки.

RFID можна використовувати для локалізації положення об'єкта. До об'єкта може бути прикріплена активна RFID-мітка, яка передає сигнал на RFID-зчитувач. Використовуючи RSS-вимірювання та принцип трилатерації можна визначити місцеположення об'єктів. Оскільки об'єкти, які потрібно позиціонувати за допомогою RFID, зазвичай знаходяться в закритому середовищі, існують багатопроневі ефекти, які можуть знижувати точність системи. Щоб підвищити точність системи позиціонування на основі RFID, система використовує додаткові зчитувачі та довідкові мітки. Однак ці додаткові зчитувачі

збільшують вартість системи. Для того, щоб знизити витрати, Ni et al. [10] запропонували інноваційний підхід, який використовує ідею встановлення додаткових фіксованих довідкових тегів. Такий підхід називається LANDMARC (визначення місцезнаходження на основі динамічного активного калібрування RFID). Подібно до географічних орієнтирів, які ми використовуємо в повсякденному житті, фіксовані теги служать орієнтирами в системі.

1.1.4 Бездротові системи локального позиціонування WLPS

WLPS – це гібридний метод позиціонування ToA та AoA з різноманітними застосуваннями, включаючи автономне водіння. Виходячи з класифікації, наведеної на рисунку 1.1, її також можна розглядати як активну систему дистанційного позиціонування. Система складається з мобільного блоку моніторингу (або динамічної базової станції) та цільового мобільного блоку (або активної цілі) [11], [12]. Активна ціль містить транспондер і йому присвоюється унікальний ідентифікаційний (ідентифікаційний) код. Як показано на рисунку 1.3, динамічна базова станція (DBS) посилає сигнал ID-запиту (IDR) всім активним цілям у межах своєї дії.



Рисунок 1.3 — Система локалізації WLPS

Отримавши сигнал від DBS активна ціль, відповідає, посылаючи пакети, що містять його ідентифікаційний код. DBS розпізнає кожну ціль за її унікальним ідентифікаційним кодом. Після чого використовуючи методи ToA і AoA DBS визначає місцеположення цілі. Метод AoA можливий завдяки антенним решіткам які встановлені на DBS. Користуючись виміряними значеннями, вдається локалізувати положення активних цілей відносно відомого положення DBS.

WLPS можна розглядати як вузол у бездротовій мережі без точок доступу ad-hoc, яка дозволяє всім вузлам (або конкретним вузлам, оснащеним DBS) локалізувати всі вузли, розташовані в зоні їх покриття. Складність цих систем полягає в основному в DBS, так як в них для локалізації використовуються антенні решітки. Вартість і складність приймально-передавальних вузлів дуже низька. У багатьох сферах застосування, таких як командування та управління на полі бою, потрібна невелика кількість DBS (дорогі одиниці, які перевозять командири) та більша кількість активних цілей (недорогі одиниці, які несуть солдати). Таким чином, загальна вартість цих систем у всіх вузлах мінімальна.

1.1.5 Системи попередження про рух та запобігання зіткнень TCAS

Система оповіщення про рух і запобігання зіткненням (TCAS) використовується для виявлення і супроводу повітряних суден-мішеней які знаходяться в безпосередній близькості від літака [13]. Він подає попереджувальний сигнал пілоту в присутності іншого повітряного судна, яке може становити небезпеку зіткнення в повітрі. Сигнал подається пілоту незалежно від диспетчера управління повітряним рухом [13]. Він складається з двох компонентів: запитувача і транспондера. Кожен літак оснащений обома компонентами. Запитувач в одному повітряному судні опитує транспондери в іншому літаку і аналізує відповіді, щоб визначити дальність, пеленг і відносну висоту (див. рис.1.4). Дальність визначається за рахунок часу поширення сигналу від запитувача до транспондера.



Рисунок 1.4 — Система TCAS

Для визначення пеленгу та напрямку літака-цілі використовується спрямована антена. TCAS отримує інформацію про висоту в отриманій відповіді від транспондера на літаку-мішені. Для визначення висоти використовується часово-частотна система, яка використовує синхронізований час і частоту (за допомогою надзвичайно точних осциляторів на борту літака) для передачі закодованої інформації про висоту. Кожному літаку призначається певний часовий інтервал у кілька мілісекунд протягом кожного інтервалу в одну секунду, який використовується для передачі закодованого сигналу висоти.

1.2 БПЛА

Дрони, тобто невеликі безпілотні літальні апарати (БПЛА), сьогодні переживають вибухове зростання, і вони знайшли широке застосування в багатьох сферах (аерофотозйомка, моніторинг дорожнього руху, моніторинг стихійних лих тощо).



Рисунок 1.5 — Вигляд БПЛА з камерою

Що стосується їх використання, то застосування БПЛА можна умовно розділити на цивільні та військові моделі. Перші можуть бути використані в урядових або недержавних цілях; наприклад, використання БПЛА в рятувальних операціях для відновлення після великомасштабних катастроф, таких як великий землетрус у Східній Японії [14], стихійні лиха в Індонезії [15] та землетрус у Непалі [16]. Потім БПЛА використовувалися для розподілу продуктів харчування та медикаментів серед постраждалих, а також для координації роботи

рятувальних груп. Однак у найближчому майбутньому дрони будуть використовуватися не тільки для операцій із захисту населення та ліквідації наслідків стихійних лих [17], [18], але й для багатьох інших цивільних, комерційних та державних служб. Хорошими прикладами є спостереження та рекогносцировка [19], громадська безпека [20], внутрішня безпека [21], [22], моніторинг лісових пожеж [23], моніторинг навколишнього середовища [24], спостереження за безпекою та кордоном [17], сільське господарство [18] або навіть доставка через Інтернет [25], [26], спостереження за архітектурою [27], транспортування товарів [28], [29], такі як Amazon Prime Air [30], призначені для безпечної доставки посилок клієнтам протягом 30 хвилин за допомогою невеликих дронів. Завдяки своїм незліченним застосуванням, БПЛА скоро стануть впливовою частиною нашого повсякденного життя; Необхідна технологія, схожа на сучасні смартфони. Більш того, існують унікальні послуги, які можуть бути надані тільки з висоти (тобто з неба). Таким чином, дрони дуже корисні для операцій з високим ризиком, небезпечних для життя, таких як політ над вулканом для перевірки рівня його активності або над радіаційно забрудненим регіоном

1.2.1 Класифікація

БПЛА можуть бути класифіковані на основі ваги, висоти та дальності, крил і гвинтів, а також їх застосування.

Класифікація на основі ваги:

- *Нано*: БПЛА вагою менше 250 грамів;
- *Мікро*: БПЛА з масою понад 250 г та вагою менше 2 кг;
- *Малі*: БПЛА з вагою більше 2 кг та менше 25 кг;
- *Середні*: БПЛА з вагою понад 25 кг та менше 150 кг;
- *Великі*: БПЛА вагою понад 150 кг.

Класифікація на основі висоти та дальності польоту:

- *Ручні*: БПЛА, які можуть літати на висоті менше 600 м і мають дальність польоту менше 2 км;

— *Близького польоту*: БПЛА з висотою менше 1500 м і дальністю польоту менше 10 км;

— *Середнього польоту*: БПЛА з висотою менше 3000 м і дальністю польоту менше 50 км;

— *Тактичні*: БПЛА з висотою менше 5500 м та дальністю польоту менше 160 км;

— *Середньої висоти довгого польоту*: БПЛА з висотою менше 9100 м і дальністю польоту менше 200 км;

— *Високої висоти довгого польоту*: БПЛА з висотою понад 9100 м та невизначеною дальністю;

— *Гіперзвукові*: БПЛА з висотою близько 15200 м і дальністю польоту понад 200 км.

Класифікація на основі типу крил та роторів:

— *Фіксоване крило*: БПЛА, які нагадують конструкцію літака з нерухомими крилами;

— *Одно роторні*: БПЛА, які нагадують конструкцію вертольота з одним несучим гвинтом і іншим маленьким у хвості;

— *Багато роторні*: БПЛА, які мають більше одного ротора. Найчастіше зустрічаються трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери і октакоптери;

— *Гібридні БПЛА з фіксованим крилом*: гібридні БПЛА з довшим часом польоту. Вони мають стійкість БПЛА з нерухомим крилом, а також здатність зависати, злітати та приземлятися вертикально.

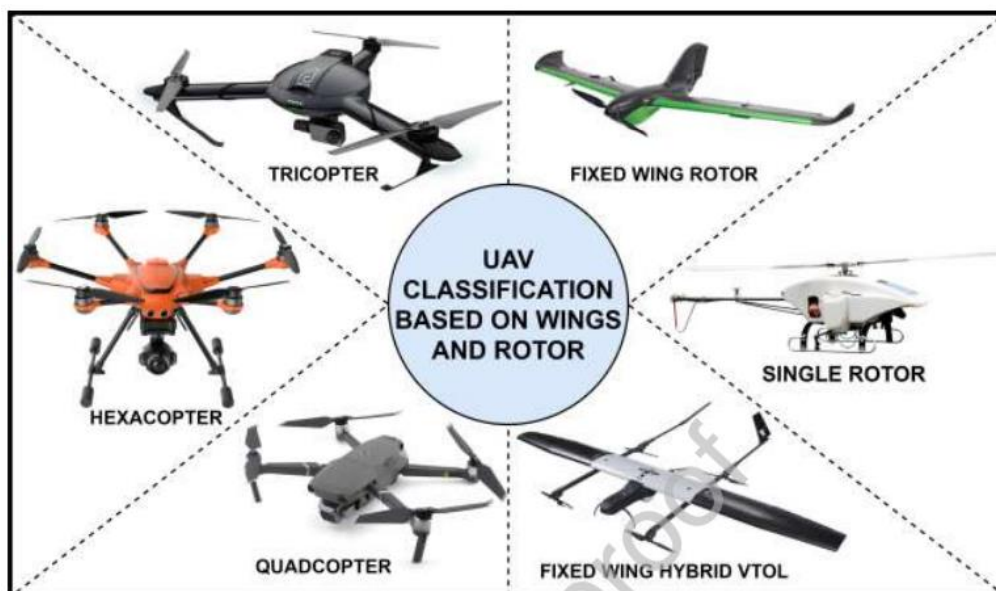


Рисунок 1.6 — Класифікація БПЛА на основі типу крил та роторів

Класифікація БПЛА на основі юридичного застосування:

- *Персональні*: використовуються для таких програм, як відеозйомка та розваги;
- *Комерційний*: використовується для таких застосувань, як моніторинг інфраструктури, доставка продукції та аерофотозйомка;
- *Державні та правоохоронні органи*: використовується для таких застосувань, як пожежогасіння та патрулювання;
- *Військові*: використовуються для таких застосувань, як спостереження та бойові атаки.

1.2.2 Застосування

IoT. У той час як БПЛА використовуються для своїх початкових завдань (наприклад, доставка посилок Amazon, моніторинг ліній електропередач SharperShare), вони можуть бути одночасно застосовані для надання численних додаткових послуг (*value added services VAS*), особливо в Інтернеті речей (IoT), коли вони оснащені пристроями IoT, що віддалено здійснюються. Таким чином, БПЛА сформують інноваційну платформу IoT на базі БПЛА в небі [31]. Це зменшить граничні та операційні витрати на створення нової екосистеми.

За допомогою цієї платформи дані IoT можуть збиратися за допомогою дистанційно керованих пристроїв IoT, встановлених на БПЛА, щоразу, коли вони вмикаються та вимикаються в потрібний час, у запланованих положеннях та/або відповідно до конкретних подій. Виходячи з необхідної енергії, зібрані дані можуть бути оброблені локально на борту БПЛА або вивантажені на хмарні сервери на землі. Для створення ефективної платформи IoT на основі БПЛА потрібен управляючий сервер платформи (централізований або розподілений), який знає різноманітну контекстуальну інформацію про БПЛА, таку як їхні маршрути польотів, обладнання IoT та їхній статус польоту. Наприклад, у випадку, коли відділ поліції запитує відеозапис з певної позиції, відповідний літаючий БПЛА має відхилитися від початкової траєкторії, щоб виконати завдання. Для цього обов'язковими стають знання про поточний стан БПЛА, такі як його поточне географічне положення та енергія, що залишилася [32].

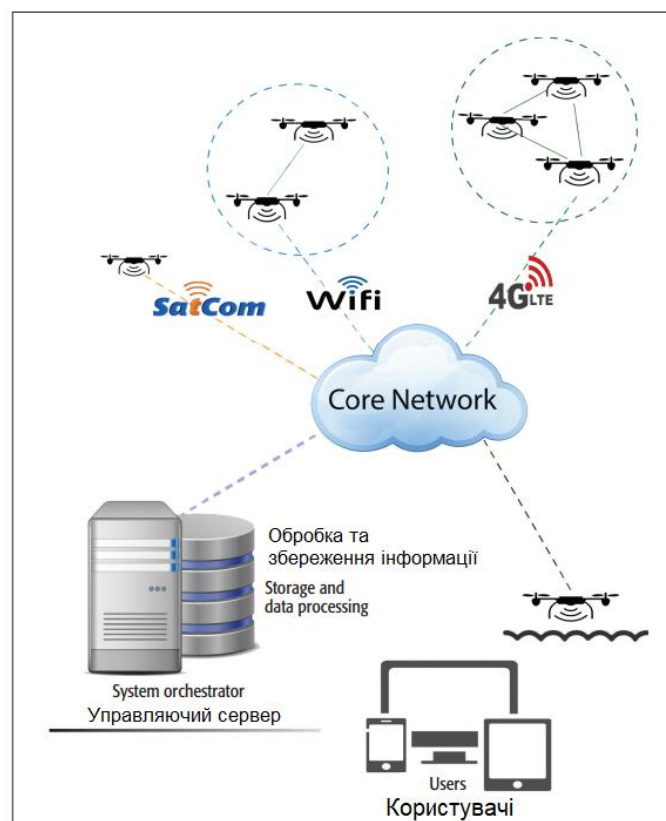


Рисунок 1.7 — Участь БПЛА в платформі IoT

На рисунку 1.7 показано передбачувану архітектуру для платформи IoT на основі БПЛА. На рисунку зображено широку мережу літаючих БПЛА, кожному з яких призначено певне завдання: одні літають, а інші готові до польоту, коли це необхідно.

Доставка даних з БПЛА може здійснюватися будь-якою бездротовою технологією, яка підходить для цільового застосування БПЛА, наприклад, WiFi та стільниковими мережами (наприклад, 4G-LTE, 5G). Вибір бездротової технології може залежати від різних факторів, таких як необхідна безпека, надійність і надійність системи. Замість зв'язку між БПЛА та землею, БПЛА також можуть утворювати кластери у вигляді літаючих мереж без точок доступу (*flying ad-hoc network* FANET), використовуючи свої технології бездротового зв'язку малого радіусу дії (наприклад, Bluetooth та WiFi), щоб отримати вигоду від спільного використання своїх бортових пристроїв IoT, обчислювальних ресурсів та каналів передачі даних. У керівником кластера може бути обраний БПЛА для передачі зібраних даних IoT від імені інших БПЛА на наземну станцію. Такий підхід до кластеризації може бути корисним у ситуаціях, коли БПЛА не мають достатньої індивідуальної потужності/ресурсів для виконання завдання або може знадобитися доповнити пристрої IoT один одного для виконання завдання IoT.

Smart City. Існує кілька можливостей використання БПЛА для підтримки розумного міста. Ці можливості будуть дуже корисними для будь-яких розумних міст, які використовуватимуть БПЛА для свого економічного зростання та розвитку.

Геопросторова та геодезична діяльність. Однією з нових тенденцій цивільного застосування БПЛА в розумних містах є використання БПЛА в геопросторовій зйомці. Основне проектування розумного міста вимагає оптимізації потоків даних, що забезпечуються бездротовими сенсорними мережами, оскільки датчики є основним компонентом будь-якої автономної системи, наприклад, за участю БПЛА

Завдяки надійності більшості конструкцій БПЛА, інтеграція таких технологій дозволяє встановлювати бездротові датчики на борту, щоб зробити БПЛА придатними для використання в геопросторових, геодезичних та геоінформаційних системах (ГІС) у розумних містах, а також корисними для аналізу навколишнього середовища. Ці можливості можуть призвести до скорочення витрат і скорочення кількості робочих годин, задіяних у такій діяльності

Контроль за цивільною безпекою. Інтеграція рішень на основі БПЛА з стільниковим зв'язком і потоковим відео в реальному часі підвищила б роль БПЛА в сферах громадської безпеки. Крім того, тенденції до розвідки та видобутку даних дають БПЛА можливість брати участь у діяльності цивільної безпеки, наприклад, надавати послуги безпеки для розумних міст. Ця нова тенденція переведе керівництво міста від реактивності до проактивності та використання даних.

Управління трафіком і натовпом. Однією з можливостей БПЛА в розумних містах є управління безпекою (Urban Security). Використання БПЛА на такій території дозволить місту розгорнути оперативну кімнату, оновлену ефективним потоком даних, а також дозволить місту безперешкодно проводити великі публічні заходи з величезною кількістю відвідувачів, а також забезпечувати повне технічне покриття.

1.3 Безпроводні сенсорні мережі WSN

Бездротові сенсорні мережі (WSN) — це клас бездротових мереж ближнього радіусу дії, що складаються з ряду сенсорних вузлів і одного або декількох базових вузлів, які обмінюються даними між собою через бездротовий приймач-передавач.

Сенсорний вузол зазвичай складається з декількох частин: бездротового приймача-передавача для зв'язку, одного або декількох датчиків (наприклад, температури, тиску, вологості, акселерометра і т.д.), блоку мікроконтролера і джерела енергії, як правило, акумулятора. У деяких випадках сенсорні вузли також оснащені виконавчими механізмами, що дозволяють вузлу виконувати

певні дії (наприклад, зменшення освітленості) у відповідь на конкретні умови навколишнього середовища (наприклад, занадто високий рівень освітленості). Якщо мережа складається з вузлів, деякі з яких також включають виконавчі механізми, вона називається бездротовою мережею датчиків і виконавчих механізмів. Розмір, складність і вартість сенсорного вузла сильно варіюються в залежності від конкретного сценарію застосування: можуть бути сенсорні вузли розміром з монету вартістю в кілька доларів, а також сенсорні вузли розміром з коробку з-під взуття вартістю в сотні доларів.

Базові вузли є відносно більш потужними вузлами, які зазвичай не оснащені датчиками/виконавчими механізмами, але вони мають потужніший процесор, можливо, потужніший бездротовий приймач-передавач та інші мережеві інтерфейси, які зазвичай дозволяють підключатися до інтернету. Крім того, базові вузли зазвичай підключаються до джерела живлення, тому споживання енергії, яке є основним обмеженням для вузлів-сенсорів, не є критичним для базових вузлів. Особливим класом базових вузлів є мобільні приймачі, які зазвичай реалізуються шляхом встановлення базового вузла на мобільному роботі, мета яких полягає в тому, щоб пересуватися по зоні розгортання бездротової сенсорної мережі та збирати дані, зібрані вузлами датчиків.

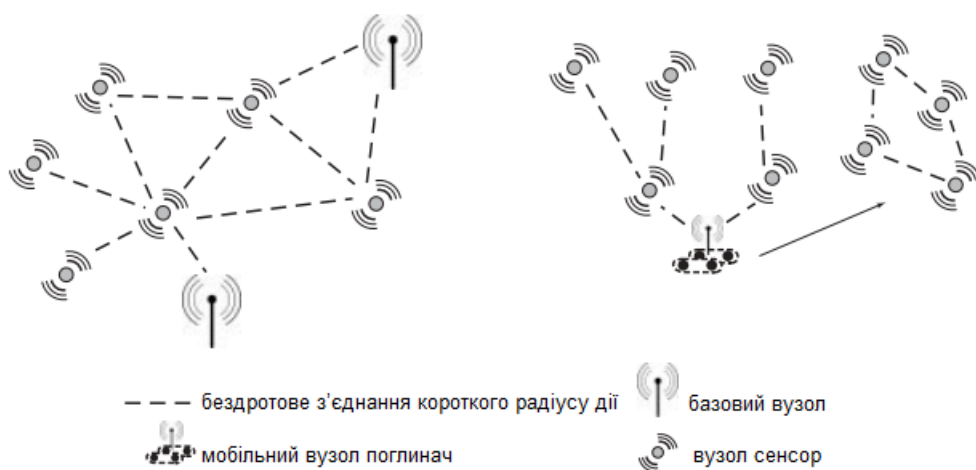


Рисунок 1.8 — Типова архітектура WSN

Типова архітектура бездротової сенсорної мережі показана на рисунку 1.8, кілька сенсорних вузлів розташовані в географічному регіоні і використовують бездротові трансивери для встановлення бездротового зв'язку між собою. Один або кілька базових вузлів розташовані в контрольованій області; Ці вузли діють як точки збору даних, а також, можливо, реалізують функції координації мережі. У зв'язку з серйозними енергетичними обмеженнями на сенсорних вузлах, оснащених батареями, бездротовий приймач-передавач на сенсорних вузлах передає сигнали з невеликою потужністю, але, отже, дальність передачі відносно невелика – зазвичай близько декількох десятків метрів. Крім того, багатострибковий «multi-hop» зв'язок, як правило, є обов'язковою умовою для передачі даних, зібраних на віддалених сенсорних вузлах, до базового вузла. У більшості сценаріїв застосування, вузли датчика і базові вузли нерухомі рисунок 1.8, ліворуч. Також сенсорні вузли (або, принаймні, їх частина) можуть бути мобільними, наприклад, коли сенсорні вузли встановлюються на тварин для спостереження за їх переміщенням [33]. В деяких випадках вузли датчиків нерухомі, поки базові вузли рухаються, з метою опитування вузлів датчиків і безпосереднього збору їх зібраних даних – рисунок 1.8, праворуч.

1.3.1 Операційні системи для WSN

TinyOS виконує вимоги до операційних систем сенсорних мереж наступним чином [34]:

— Обмежені ресурси: образ прикладної програми *.hex займає невеликий розмір після компіляції; оптимізація компіляції всієї програми, та між компонентна оптимізація за для уникнення переповнення;

— Реактивна конкурентність «concurrency»: TinyOs обробляє велику кількість потенційної конкурентності (коли одночасно виконуються декілька підпрограм програми) за допомогою своєї компонентної моделі; компілятор ви-

являє потенційні «race condition»(ситуація коли в умовах конкурентності виконується доступ до доступних даних для обох підпрограм які виконуються в умовах конкурентності) та модифікує код за для уникнення «race condition»;

— Гнучкість: невеликі за розмірами компоненти дозволяють створювати з великої кількості таких компонентів гнучкі алгоритми; підтримка дво-направлених інтерфейсів та підтримка подій; прозорість апаратно\програмного забезпечення дозволяє переміщувати програму на різні апаратні платформи;

— Низьке споживання енергії: TinyOs гарантує, що жодні непотрібні функції не споживають енергію.

LiteOS — інтерактивна, UNIX-подібна операційна система з відкритим вихідним кодом, розроблена для WSN [35].

За допомогою інструментів, що постачаються з LiteOS, ви можете керувати одним або декількома WSN подібно до UNIX, передаючи дані, встановлюючи програми, отримуючи результати або налаштовуючи датчики. Ви також можете розробляти програми для вузлів і бездротовим способом розповсюджувати такі програми серед сенсорних вузлів

Web of Things (WoT) – це архітектура програмного забезпечення та програмування, яка дозволяє реальним об'єктам бути частиною Інтернету. Архітектура має чотири шари:

— Шар доступу: Цей шар робить можливим доступ до вузлів через Інтернет. Він надає послуги вузлів через веб-API. Це критично важливо, оскільки гарантує, що вузли мають Web-доступний API, таким чином перетворюючи вузли на програмовані вузли. У зв'язку з тим, що пристрої, що живляться від батарейок, такі як бездротові сенсорні вузли, повинні економити енергію і тому вважають за краще не підключатися безпосередньо до Інтернету, тому такі пристрої можуть виходити в Інтернет через розумні шлюзи. Smart Gateways – це шлюзи трансляції протоколів на межі мережі [36], [37];

— Шар видимості: Функція цього шару полягає в тому, щоб забезпечити спосіб пошуку та знаходження об'єктів в Інтернеті [38];

— Шар обміну: ідея полягає в тому, щоб дати можливість WSN передавати дані в Інтернет на сервера і використовувати ці обчислювальні потужності для агрегації та аналізу. Існує декілька можливих реалізацій наприклад на основі соціального контексту, створення соціальних мереж для створення мережі вузлів [39], [40];

— Шар високого рівня: За допомогою шару високого рівня сервіси та дані WSN можуть бути інтегровані у веб-інструменти вищого рівня, наприклад, аналітичне програмне забезпечення та змішані програми, такі як IFTTT, що спрощує створення додатків за участю об'єктів, WSN та віртуальних веб-сервісів.

1.3.2 Стандартизація мережевих протоколів WSN

Для полегшення зв'язку в галузях запроваджується кілька стандартів зв'язку та промислових протоколів. Ці стандарти в першу чергу націлені на потік інформації від датчиків до центру управління за допомогою промислових, наукових і медичних (ISM) радіо діапазонів.

IEEE 802.15.4 [41]. IEEE 802.15.4 (IEEE 2011) є найважливішим стандартом, вперше затвердженим у 2003 році, який визначає специфікацію рівнів РНУ та MAC для недорогих, енергоефективних бездротових персональних мереж. Оскільки в стандарті IEEE 802.15.4 основна увага приділяється максимальному зниженню енергоспоживання, швидкість передачі даних відносно низька, а дальність зв'язку відносно коротка (від 10 до 75 м). Крім того, в специфікації включена підтримка управління потужністю передачі. На рівні РНУ стандарт працює в радіодіапазонах ISM: 868 МГц в Європі, 915 МГц в США і Австралії і 2,4 ГГц в більшості регіонів світу. Швидкість передачі даних становить 20/40 кбіт/с у діапазонах 868 і 915 МГц (збільшена до 250 кбіт/с у ви-

пуску стандарту 2006 року) і 250 кбіт/с у діапазоні 2,4 ГГц. На рівні MAC стандарт реалізує CSMA/CA подібно до того, як визначено в стандарті IEEE 802.11

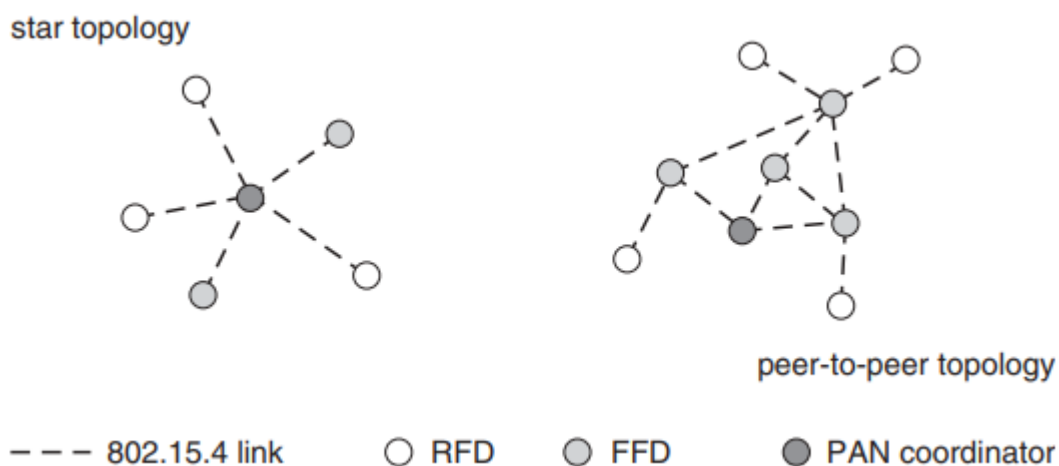


Рисунок 1.9 — IEEE 802.15.4 архітектура мережі

Стандарт IEEE 802.15.4 визначає два типи мережевих вузлів: повнофункціональний пристрій (*full function device* FFD), який може служити координатором персональної мережі (*personal area network* PAN) або загальним вузлом, і включає розширені комунікаційні можливості, такі як ретрансляція повідомлень; і пристрій зі зниженою функцією (*reduced-function device* RFD), який є спрощеним пристроєм з обмеженими можливостями зв'язку і може обмінюватися даними лише з FFD. IEEE 802.15.4 дозволяє формувати два типи топології мережі (див. рисунок 1.9): топологію «зірка», в якій всі пристрої безпосередньо взаємодіють з центральним пристроєм, званим координатором PAN, і однорангову топологію, в якій пристрої можуть створювати мережу без точок доступу з одноранговими бездротовими каналами.

ZigBee [42]. У той час як IEEE 802.15.4 визначає специфікації для нижніх рівнів мережевої архітектури, для протоколів верхнього рівня були визначені інші стандарти. ZigBee — специфікація (вперше випущена в 2005 році) для набору протоколів, що охоплюють мережевий рівень і вище, для мереж на ос-

нові бездротових каналів 802.15.4 (Alliance 2011). Як і в IEEE 802.15.4, основною метою ZigBee є зниження енергоспоживання пристроїв: просто щоб дати уявлення про цей акцент на зниженому енергоспоживанні, окремий пристрій повинен мати термін служби батареї не менше двох років, щоб пройти сертифікацію ZigBee.

Починаючи з рівнів PHY і MAC, визначених в IEEE 802.15.4, ZigBee вводить в стандарт чотири основні компоненти: мережевий рівень, прикладний рівень, об'єкти пристроїв ZigBee (*ZigBee Device Objects ZDO*) і визначені виробником прикладні об'єкти.

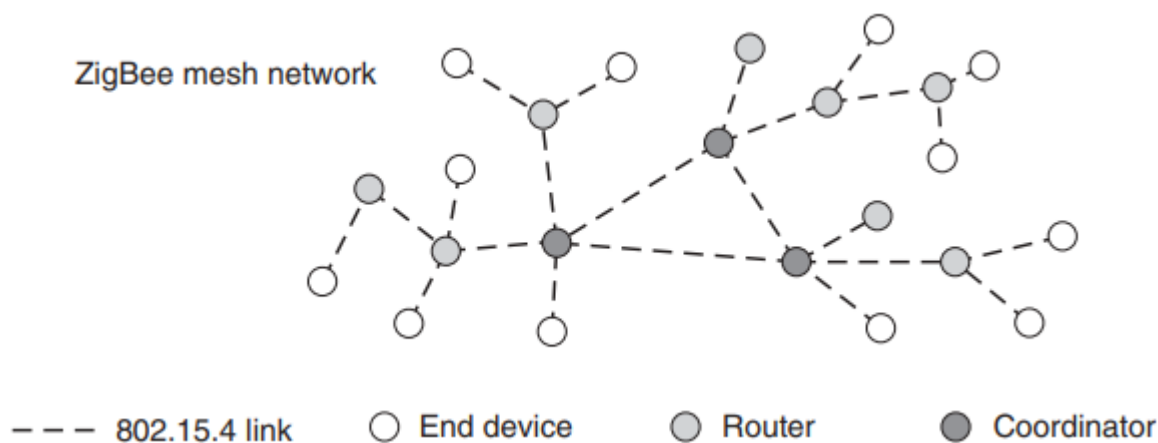


Рисунок 1.10 — Приклад ZigBee mesh мережі

На мережевому рівні ZigBee використовує векторну маршрутизацію відстані без точок доступу (*ad hoc on-demand distance vector AODV*) (спочатку розроблена для мереж без точок доступу) для маршрутизації повідомлень у мережі. Прикладний рівень є рівнем найвищого рівня, визначеним специфікацією, і він включає більшість компонентів, доданих специфікацією ZigBee: ZDO та відносні процедури управління, а також об'єкти застосування, визначені виробниками. ZDO відповідає за визначення ролі пристрою як координатора, маршрутизатора або кінцевого пристрою. Координатор є найбільш потужним пристроєм ZigBee: він формує корінь мережевого дерева і може діяти як міст до інших мереж ZigBee. У кожній мережі ZigBee є рівно один координатор, який є пристроєм, який заустив мережу спочатку. Маршрутизатор – це

пристрій, який може виконувати роль проміжного маршрутизатора, ретранслюючи повідомлення від інших пристроїв. Нарешті, кінцевий пристрій є найпростішим пристроєм, і він охоплює функціональність для зв'язку з батьківським вузлом (координатором або маршрутизатором). Кілька окремих мереж ZigBee можуть бути з'єднані для формування більшої бездротової сенсорної мережі з топологією mesh рисунок 1.10.

1.3.3 Сценарії застосування WSN

Головне застосування WSN це спостереження і збір кількісних характеристик подій, явищ або процесів з подальшою ціллю проаналізувати отримані дані та прийняти рішення чи виконати якусь дію у відповідь на отриману інформацію. Це дозволяє контролювати складні і високо організовані процеси.

Орієнтовно спостереження можна розділити на такі категорії як: екологічний моніторинг, промисловий моніторинг, моніторинг здоров'я та благополуччя, точне землеробство, сейсмічний та структурний моніторинг, виявлення вторгнень та відстеження об'єктів, людей чи тварин.

Моніторинг екологічного стану території

Бездротові сенсорні мережі (WSN) можуть використовуватися для віддаленого моніторингу необхідних параметрів навколишнього середовища у відносно великих географічних районах. Наприклад, бездротова мережа датчиків може бути розгорнута в міській місцевості для моніторингу рівня забруднення. При цьому сенсорні вузли оснащуються датчиками, здатними виявляти забруднюючі гази і частинки. Перевага використання WSN замість традиційних (провідних) систем для моніторингу забруднення в місті полягає в тому, що завдяки використанню бездротових технологій розгортання датчиків обходиться набагато дешевше. В інших випадках WSN можуть використовуватися для моніторингу параметрів навколишнього середовища в небезпечних регіонах, наприклад, вулканічних регіонах, де використання провідних сенсорів практично неможливо. Іншим прикладом можливого використання WSN є моніторинг руху землі з метою запобігання або швидкого сповіщення про зсуви.

Аналогічним чином, WSN можна використовувати для моніторингу льодовиків і стану снігу, щоб швидко попередити про можливе сходження лавин.

У сценаріях моніторингу навколишнього середовища дані, зібрані WSN (можливо, відповідним чином агреговані самими сенсорними вузлами), передаються до базових вузлів, а звіти надсилаються користувачеві для віддаленого моніторингу (модель безперервного моніторингу даних). У деяких випадках може бути реалізована автоматична система оповіщення для швидкого інформування людини-оператора, коли параметри навколишнього середовища перевищують певні порогові значення, що відповідають виникненню потенційно небезпечних подій (подієва модель *event-driven model*).

Особливим класом WSN, який може використовуватися для цілей моніторингу, є клас підводних WSN. У цьому класі зв'язок між сенсорними вузлами реалізується або за допомогою акустичного, або оптичного зв'язку, оскільки радіохвилі не поширюються під водою.

Моніторинг промислових об'єктів та процесів

WSN можуть використовуватися для моніторингу складних промислових процесів, наприклад таких як процес нафтопереробки, моніторинг води або стічних вод, робота електростанцій або атомних електростанцій. У цих сценаріях використання бездротових технологій відкриває унікальні можливості для зниження витрат: чим складніший технологічний процес тим більше місця для цього він потребує, і відповідно необхідні великі обсяги дротового з'єднання, тому WSN можуть стати способом економії. Однак безпека та надійність WSN виходить на перший план у цьому класі додатків, що досить непросто зробити на відмінну від дротового з'єднання. У багатьох випадках WSN, що використовуються в промисловому моніторингу, є бездротовими мережами датчиків і виконавчих механізмів: наприклад, при виявленні небезпечного рівня тиску в трубі нафтопереробного заводу може бути активований певний привід, щоб повернути клапан і знизити тиск. Таким чином, сама мережа бездротових датчиків і виконавчих елементів може вжити негайних заходів у

відповідь на потенційно небезпечну ситуацію, не вимагаючи втручання людини-оператора.

Моніторинг стану здоров'я

Ще один важливий клас сценаріїв користувача WSN пов'язаний з моніторингом здоров'я або зручності. Наприклад, невелика WSN може бути прикріплена до пацієнта, який страждає на серцеві захворювання, щоб постійно контролювати артеріальний тиск, частоту серцевих скорочень тощо. Дані, зібрані з WSN, можна передавати по бездротовому зв'язку на базовий вузол який розташований у будинку. При виявленні якогось аномального стану вузол видає попередження в найближчу лікарню з проханням про медичну допомогу. Таким чином, пацієнт може вільно пересуватися вдома без будь-яких фізичних обмежень, при цьому його стан здоров'я постійно контролюється. Ще одне застосування WSN - моніторинг стану учасників великих спортивних подій, таких як марафон: оснастивши кожного учасника бездротовим пристроєм, наділеним датчиками тиску, температури і т.д., можна дистанційно контролювати стан здоров'я кожного спортсмена.

Моніторинг сільського господарства

WSN можуть бути використані для забезпечення моніторингу вирощення сільськогосподарських культур у сільському господарстві. Моніторинг виноградників є одним з найбільш класичних прикладів. Мета полягає в тому, щоб скоротити зрошення водою та якомога швидше передбачити або виявити хвороби виноградної лози. Це не тільки мінімізує витрати на вирощування виноградної лози за рахунок меншого використання води, але й дозволяє органічно вирощувати з низьким використанням пестицидів. Використовувані датчики включають температуру повітря, вологість повітря, сонячну радіацію, тиск повітря, вологість ґрунту, вологість листя, ультрафіолетове випромінювання, пльовіометр (датчик дощу) та анемометр (датчик вітру). Датчики, як правило, розміщуються на великій площі виноградника і передають свою інформацію в зовнішню базу даних, в якій інформація обробляється спеціальними моделями

навколишнього середовища. Результати показуються вченому або виноградарю і можуть бути автоматично підключені до системи зрошення. На рисунку 1.11 показаний типовий вузол датчика винограду, встановлений на винограднику в Словаччині від SmartVineyard Solution [43]



Рисунок 1.11 — Сенсорний вузол від SmartVineyard Solutions, встановлений на органічному винограднику в Словаччині.

Подібний сценарій сенсорної мережі використовується для багатьох інших сільськогосподарських застосувань, які часто називають точним землеробством. Прикладами реальних систем є моніторинг картоплі в Єгипті [44], моніторинг посівів у Малаві [45] або рішення для моніторингу овочів на органічній фермі в Південній Іспанії [46].

Моніторинг структурних споруд, будівель, тощо

Ще один важливий клас додатків WSN пов'язаний з моніторингом великих споруд або будівель. Наприклад, бездротові сенсорні вузли можуть бути встановлені в певних точках великої конструкції, наприклад, мосту, щоб контролювати рух різних частин, що складають конструкцію, і оперативно виявляти можливі критичні умови. Прикладом такої WSN являється шестисмуговий міст Харілаос-Трикупіс в Греції, який проходить через Коринфську затоку рисунок 1.12. Він відкрився в 2003 році, з системою моніторингу з більш ніж

300 сенсорних вузлів, оснащених 3D-акселерометрами, нахиломірами, тензіомаг-датчиками і багатьма іншими. Незабаром після відкриття мережа датчиків сигналізувала про аномальну вібрацію кабелів конструкції, що змусило інженерів встановити додаткові обважнювачі для стабілізації.



Рисунок 1.12 — Міст Charilaos Trikoupi у Греції, з мережею датчиків

Бездротові мережі датчиків і виконавчих механізмів також можна використовувати для моніторингу та управління великою будівлею: датчики можна використовувати для моніторингу температури, освітленості, вологості в будівлі, а виконавчі механізми можна використовувати для виконання відповідних дій у відповідь на деякі виявлені умови. Наприклад, якщо температура в кімнаті занадто висока, а освітлення занадто інтенсивне, вікна в цій кімнаті можуть автоматично закриватися.

Моніторинг території яка забороняється

WSN можуть використовуватися також для виявлення зловмисників на певній території або в будівлі. Наприклад, датчики руху, які зазвичай доповнюються деяким сенсорним вузлом, можуть бути встановлені на паркані, що

оточує зону обмеженого доступу, щоб виявити можливі вторгнення. Як правило, WSN, що використовуються для виявлення вторгнень, підкоряються моделі, керованій подіями, тобто попереджувальне повідомлення надсилається віддалено розташованому оператору-людині, щоб попередити про можливе вторгнення.

Моніторинг руху об'єктів, людей, тощо

Ще один клас додатків WSN пов'язаний з відстеженням об'єктів, людей або тварин. Наприклад, WSN можна використовувати для відстеження переміщення об'єктів на великому складі. Стеження за об'єктами або людьми знаходить застосування у військових сценаріях, наприклад, для відстеження пересування солдатів у полі або пересування танків та іншої військової техніки вздовж доріг.

1.4 Висновки по розділу

1. Існують різні технології визначення місцеположення вони поділяються на дві групи локальні та глобальні. Всі вони орієнтовані на визначення місцеположення і навігації що дозволяє: орієнтуватися на місцевості, прокладати маршрути, застосовувати інформацію про місцеположення за для систем безпеки.

2. Ринок БПЛА стрімко йде вгору, оскільки БПЛА знаходять все більше й більше застосувань це означає що в майбутньому виникатимуть проблеми з відстеженням руху БПЛА, і тому зростає необхідність в алгоритмах виявлення і локалізації БПЛА.

3. WSN зарекомендували себе як доступні і недорогі системи для моніторингу різних процесів які відбуваються на великих територіях. Отримана інформація від WSN може використовуватися, як для аналізу і автоматизації процесів, так і для спостереженням за явищами. Тому WSN можуть використовуватися для відстеження руху БПЛА.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ БПЛА

Існують різні методи контролю присутності БПЛА та планування контр-атак. Це важлива сфера, яка зростає зі стрімким збільшенням кількості БПЛА. І промисловість, і наукові кола працюють над впровадженням доступних методів і придумують нові. Моніторинг БПЛА в основному складається з чотирьох операцій:

1. Виявлення: виявлення присутності БПЛА;
2. Ідентифікація: Верифікація та аналіз БПЛА та його властивостей;
3. Локалізація: Відстеження місцезнаходження БПЛА;
4. Реагування: Такі дії, як трансляція попередження, нейтралізація або оповіщення.

Тому проаналізуємо: існуючі технології виявлення присутності БПЛА, методи та принципи відстеження місцеположення БПЛА, та розглянемо існуючі методи які застосовуються в безпроводних сенсорних мережах.

2.1 Існуючі технології виявлення присутності БПЛА

Існуючі технологічні рішення можна поділити на декілька груп за використанням технологій. Розглянемо радари, аналізатори радіодіапазону, відеоспостереження та способи ідентифікації на основі звуку.

2.1.1 Радар

Радіолокаційні методи можна використовувати у випадку часткової автономності або повністю автономних БПЛА, де немає радіозв'язку. Для виявлення радіолокацією, як правило, передаються радіохвилі, які при відбитті від об'єкта піддаються відбиттю і зміні таких властивостей, як поляризація. На основі властивостей прийнятих сигналів, таких як ефект Доплера і поляризації прийнятих радіохвиль, можна обчислити інформацію про наявність об'єкта. Доплерівські радари здатні відкидати об'єкти які не рухаються і відстежувати тільки рухомі об'єкти.



Рисунок 2.1 — Система моніторингу на основі радару

Мікро-доплерівські радары здатні виявляти рух, зокрема різницю швидкостей у рухомих об'єктах. Оскільки БПЛА мають основні рухомі частини, такі як пропелери, які створюють великий спектр лінійних різниць швидкостей, це хороший підхід. Радіолокатори міліметрового діапазону, над широко-смугові радары та радары без прямої видимості є одними із найбільш поширених радіолокаційних методів.

2.1.2 Радіочастотні аналізатори

При цьому методі радіочастотні хвилі, що надходять від БПЛА, перехоплюються. Як правило, БПЛА з ручним керуванням зв'язується з наземною станцією (GS) та GNSS для своєї роботи. І те, і інше може бути відсутнім для автономного БПЛА, що працює виключно на бортових датчиках.



Рисунок 2.2 — Система моніторингу на основі аналізатору радіодіапазону

Такі методи, як FHSS, часто застосовуються для зв'язку між GS та БПЛА. Однак для більшості комерційних БПЛА може бути реалізований алгоритм класифікації на основі штучного інтелекту, який аналізує спектр за допомогою

програмно-визначеного радіозв'язку (SDR) і на основі таких особливостей, як послідовність стрибків, прогнозує наявність БПЛА разом із подробицями про нього [47] [48] [49]. Також, виходячи з рівня сигналу, можна відстежувати та локалізувати БПЛА. Крім того, БПЛА може передавати інформацію про себе, як-от координати та відеопотік, який можна перехопити та проаналізувати для локалізації.

Ці методи мають хорошу дальність виявлення в залежності від потужності передачі БПЛА. Однак вони, як правило, дорогі. Програмно-конфігуроване радіо – це новітня технологія, яка дозволить здешевити такий підхід [50].

2.1.3 Відеоспостереження

Іншим підходом до виявлення та моніторингу БПЛА є використання комп'ютерного зору. Відеоспостереження зі стратегічно розташованих камер у певній місцевості може здійснюватися за допомогою моделей глибокого навчання, навчених виявляти та відстежувати БПЛА.



Рисунок 2.3 — Приклад системи відеоспостереження

Ці моделі глибокого навчання навчаються за допомогою наборів даних зображень і відео БПЛА, з яких вони в кінцевому підсумку витягують особливості, які допомагають розрізнити та відстежувати БПЛА. Моделі можуть ґрунтуватися або на визначенні зовнішнього вигляду БПЛА, або на їхньому русі. Для швидшого виявлення можна використовувати кілька камер з різним полем зору [51] [52]. У ситуаціях, коли навколишнє освітлення низьке, звичайним

системам важко здійснити виявлення через відсутність контрастності та функцій. У таких сценаріях може бути використана тепловізійна зйомка [53].

2.1.4 Аудіоспостереження

У цьому підході різні звуки, що видаються БПЛА через його рухомі частини, такі як двигуни, пропелери та вібрація шасі, аналізуються за допомогою машинного навчання та глибокого навчання, щоб виявити його присутність. Звуки БПЛА можуть бути записані в середовищах управління для створення наборів даних, які можуть бути доповнені за допомогою шумних середовищ для імітації реального середовища. За допомогою цих доповнених наборів даних можна розробити різні моделі на основі опорних векторних машин (SVM) та нейронних мереж для виявлення БПЛА. Крім цього, можуть також використовуватися фундаментальні підходи до обробки аудіо, такі як аудіо відбитки пальців. Також можна відстежувати положення БПЛА за допомогою кількох мікрофонів за допомогою таких методів, як тріангуляція.



Рисунок 2.4 — Акустична система моніторингу

Кращих результатів можна досягти, поєднуючи два або більше з вищезгаданих методів, таких як камери разом з мікрофонами, які допомагають один одному в їх роботі. Може бути розроблена система, яка використовує акустичні датчики для ідентифікації БПЛА за допомогою звукових відбитків пальців, а також визначення напрямку джерела, після чого камера може обернутися,

щоб помітити ціль. Після того, як БПЛА буде успішно виявлено та локалізовано, наступним кроком є вжиття відповідних заходів реагування. Реакція залежить від того, наскільки вона виявлена, ідентифікована та локалізована.

2.1.5 Переваги та недоліки

Складемо таблицю 2.1 порівняння існуючих технологій виявлення присутності БПЛА і визначення їхнього місцеположення.

Таблиця 2.1 — Підсумки існуючих технологій моніторингу БПЛА

Технологія	Перевага	Недолік
Радар	Велика дальність дії Постійне супроводження яке може обробляти багато цілей одночасно Точне позиціонування Незалежність від погодних умов Здатність супроводжувати автономні БПЛА	Велика вартість Радіус дії залежить від розміру БПЛА
Радіочастотний аналізатор	Низька вартість Може ідентифікувати та локалізувати декілька БПЛА та передавачів Не залежить від погоди	Не може виявляти автономні БПЛА Малий радіус дії Не ефективний у зашумленому радіочастотному діапазоні
Відеоспостереження	Хороший варіант для ідентифікації типу БПЛА	Малий радіус дії та малий кут спрямованості Залежить від погоди Необхідно декілька відеокамер для позиціонування
Аудіо спостереження	Все спрямований за межами прямої видимості Здатний ідентифікувати автономні БПЛА	Не ефективний у шумному середовищі Короткий радіус дії Високий рівень помилкових спрацювань

2.2 Методи визначення координат

У загальному визначення місцеположення складається з алгоритму який має три етапи. На першому етапі відбувається отримання сигналу, і фіксація його характеристик. Фіксовані характеристики сигналу, використовуються на наступному другому етапі, на якому визначається напрям або віддаленість об'єкту від пристрою локалізації. На останньому, третьому етапі, оцінки відстані або напрямку об'єднуються за для визначення місцеположення.

Знаходження місцеположення може бути здійсненим на основі різних вимірювань, таких як: час прибуття (ToA), різниця в часі прибуття (TDoA), кут прибуття (AoA) або потужність отриманого сигналу (RSSI).

2.2.1 Метод визначення координат на основі часу прибуття сигналу (Time of Arrival далі ToA)

З назви випливає, що в цьому методі проводяться вимірювання часу прибуття отриманого сигналу на опорний «якірний» вузол, координати якого відомі. Він заснований на часі поширення сигналу Time of Flight (ToF), який визначається як час поширення сигналу від об'єкту до «якірного» вузла. Таким чином, знання точного часу випромінювання сигналу t_m від об'єкту і точного часу прибуття сигналу t_i на «якірний» вузол необхідні для застосування методу ToA. Дистанція d_i між ціллю і «якірним» вузлом обчислюється за формулою:

$$d_i = C \cdot (t_i - t_m) \quad (2.1)$$

де C — швидкість світла.

Після того, як відстань d_i отримана, визначаються всі можливі координати знаходження об'єкту. Використовуючи геометричний принцип мультилатерації як показано на рисунку 2.5, визначаються кола навколо «якірних» вузлів з розрахованими радіусами за формулою (2.1). Виходячи з цього «якірні» вузли знаходиться в точках (x_i, y_i) , то координати об'єкту (x, y) , повинні задовольняти умові:

$$d_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$$

Для оцінки координат в 2D просторі необхідні вимірювання щонайменше від трьох «якірних» вузлів, і тоді положення об'єкту буде визначатися перетином трьох кіл. Також цей метод може бути використаний і для 3D простору, але для цього необхідні вимірювання щонайменше чотирьох «якірних» вузлів.

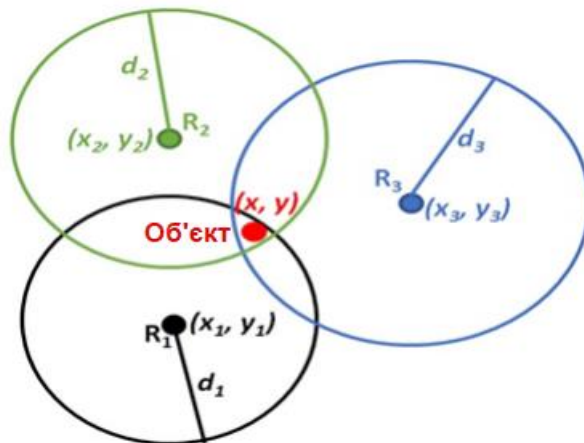


Рисунок 2.5 — Визначення координат методом ТоА використовуючи геометричний принцип мультилатерації

Цей метод забезпечує достатньо високу точність визначення місцеположення об'єкту, навіть якщо відстань між «якірним» вузлом і об'єктом збільшується. Але головною вимогою для цього методу є часова синхронізація між «якірними» вузлами та між ними і об'єктом. Основними джерелами помилок можуть бути: слабка часова синхронізація між вузлів між собою і об'єкта; багатопроменеве поширення; та низьке співвідношення сигнал/шум.

2.2.2 Метод визначення координат на основі різниці часу прибуття сигналу (Time Difference of Arrival далі TDoA)

В ситуаціях коли час випромінювання сигналу невідомий t_m і використання методу ТоА неможливо. Використовується метод визначення координат на основі різниці часу прибуття сигналу (Time Difference of Arrival TDoA). Як і ТоА, в цьому методі використовується час поширення сигналу від об'єкту до

«якірного» вузла, але замість часу випромінювання об'єкту, який невідомий, в ньому використовується різниця в часі прибуття сигналу до кожного «якірного» вузла, для оцінки відстані до кожного з них. Таким чином, знати час передачі більше непотрібно, а різниця в часі прибуття тепер достатня для оцінки відстаней [54].

Після того, як сигнал прибув на два «якірні» вузли m і n , різниця часу прибуття Δt_{mn} використовується для обчислення різниці відстаней Δd_{mn} між ціллю та двома «якірними» вузлами за формулою:

$$\Delta d_{mn} = C \cdot \Delta t_{mn} \quad (2.2)$$

де $m \neq n$.

Якщо припустити, що два «якірних» вузли розташовані за координатами (x_m, y_m) та (x_n, y_n) , то ціль повинна лежати на гіперболоїді з постійною різницею дальності між «якірними» вузлами для кожного виміру TDoA, як показано на рисунку 2.6. А координати цілі (x, y) повинні задовольняти рівнянню гіперболоїда:

$$\Delta d_{mn} = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2} - \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2}$$

де $m \neq n$.

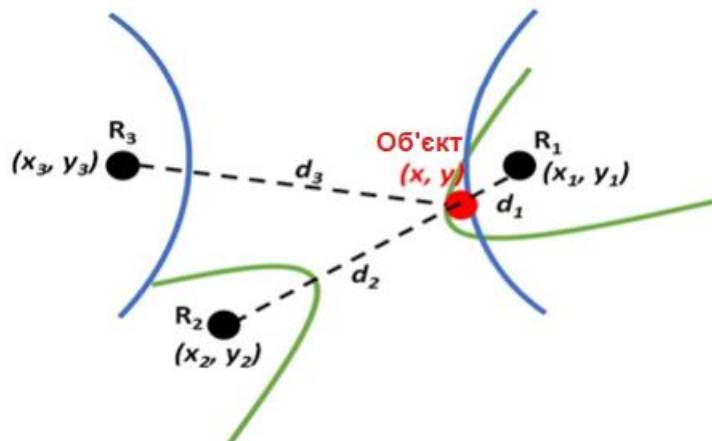


Рисунок 2.6 — Визначення координат методом TDoA використовуючи геометричний принцип гіперболоїда

Для визначення місцеположення в 2D просторі TDoA вимірювання повинні бути виконані на трьох фіксованих «якірних» вузлах, для утворення двох гіпербол, перетин яких визначає положення цілі.

Подібно до методу основаному на ToA вимірюваннях, та любых інших заснованих на часі, на точність впливає багатопроменеве поширення та низьке співвідношення сигнал/шум. На відмінну від ToA синхронізація в часі необхідна лише між «якірними» вузлами, оскільки місцеположення цілі визначається різницею часу прибуття сигналу від об'єкта до кожного з них. Також об'єкт не потребує синхронізації за часом між кожним «якірним» вузлом, оскільки відстань між об'єктом та вузлом не враховується при визначенні місцеположення.

2.2.3 Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу (Angle of Arrival далі AoA)

Метод визначення координат на основі кута отриманого сигналу Angle of Arrival AoA, ґрунтується на вимірюванні кута, під яким сигнал приймається «якірним» вузлом [55].

На основі отриманого кута прийнятого сигналу, «якірний» вузол визначає пряму лінію зі свого положення, яка вказує можливі положення цілі. Точне положення цілі, буде перетином декількох таких ліній від декількох «якірних» вузлів.

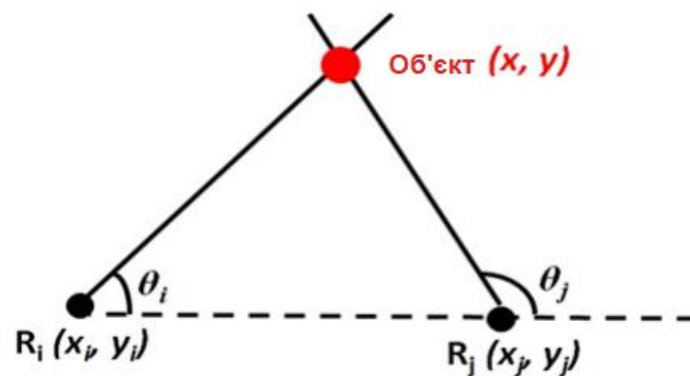


Рисунок 2.7 — Визначення координат методом AoA використовуючи геометричний принцип триангуляції

Об'єкт з координатами (x, y) передає сигнал, який отримує i -й «якірний» вузол R_i , з координатами (x_i, y_i) . Як показано на рисунку 2.7, пряма що з'єднує об'єкт та «якірний» вузол утворює кут з віссю (R_i, R_j) . Таким чином кут θ_i прибуття сигналу від об'єкту до «якірного» вузла можна виразити співвідношенням, що виходить з геометричного методу триангуляції:

$$\tan \theta_i = \frac{y - x_i}{x - y_i}$$

Для знаходження місцеположення об'єкта у 2D просторі, методу AoA необхідно щонайменше два «якірні» вузли, R_i та R_j . Тоді точне положення цілі буде перетином двох ліній напрямків θ_i та θ_j . Для знаходження місцеположення об'єкта у 3D просторі, для методу AoA необхідно щонайменше три «якірні» вузли.

На відмінну від методів ToA і TDoA, метод AoA не потребує часової синхронізації як вузлів між собою, так і вузлів з об'єктом. Крім того, зменшується кількість необхідних вузлів для визначення місцеположення об'єкта (два вузли для 2D і три вузли для 3D). Точність визначення місцеположення знижується зі збільшенням відстані між об'єктом та вузлами. Цей метод добре працює в умовах прямої видимості, і відповідно гірше якщо на шляху сигналу до вузла є перешкода, оскільки з'являється багатопроменеве поширення сигналу.

2.2.4 Метод визначення координат на основі вимірювання потужності сигналу (Receive Signal Strength далі RSS)

Метод визначення координат на основі вимірювання потужності сигналу оснований на вимірній напруженості поля сигналу, яка вимірюється в точці прийому. У цьому методі вимірний рівень потужності прийнятого сигналу використовується для визначення місцеположення об'єкту за допомогою геометричного принципу мультилатерації використовуючи або моделі поширення сигналу [56], або дактилоскопічний методу [57].

На основі моделі загасання сигналу, відстань d_i між об'єктом та i -тим «якірним» вузлом може бути отримана на основі найпростішої моделі поширення сигналу так званої «прямої моделі поширення»:

$$\frac{P_i}{P_0} = \left(\frac{d_0}{d_i}\right)^n$$

де P_i — виміряна потужність сигналу i -тим «якірним» вузлом; P_0 — виміряна потужність на відомій d_0 ; n — коефіцієнт затухання сигналу (близький до 2).

Однак модель загасання сигналу не завжди може бути застосована через велике затінення сигналу або сильного багатопроменевого затухання. Тому ці моделі складно застосовувати, в умовах коли на приймаючий сигнал впливає складний характер середовища де він поширюється, наприклад це може бути в умовах поширення сигналу в приміщенні, або ж в тісно забудованому місті.

Використання дактилоскопічний методу дозволяє уникнути складного моделювання поширення сигналу. Цей метод складається з двох фаз: тренування і визначення позиції. Перший етап полягає у розбитті приміщення або ж місцевості на якій будуть проводитися визначення місцеположення об'єктів на кластери. Далі відбуваються вимірювання потужності сигналу в кожному кластері в ході тестової передачі сигналу і його отримання, в результаті чого буде отримана база даних виміряних потужностей сигналу. На другому етапі відбувається порівняння виміряне значення потужності з базою даних і співвідношення з співпавшим кластером і буде місцеположення об'єкта.

Використовуючи цей метод для визначення місцеположення в 2D просторі необхідно щонайменше три «якірні» вузли, а для 3D простору щонайменше чотири «якірні» вузли.

Метод має високу точність в середовищах ближнього радіусу дії та умовах прямої видимості. На відмінну від методів ToA і TDoA метод не потребує синхронізації часу між «якірними» вузлами системи.

2.2.5 Порівняння методів визначення координат

Складемо таблицю 2.2 в якій порівняємо розглянуті методи визначення координат за характеристиками сигналу

Таблиця 2.2 — Порівняння методів між собою

Критерій		ToA	TDoA	АоА	RSS
Оцінка позиції		Час який необхідний сигналу для проходження від об'єкту до «якірного» вузла	Різниця в часі між прибуттям сигналу на різні «якірні» вузли	Перетин декількох ліній які утворюються з кута прибуття сигналу	Потужність прийнятого сигналу який випромінює ціль
К-ть вузлів	2D	3	3	2	3
	3D	4	4	3	4
Синхронізація		Всі об'єкти та вузли в системі повинні бути добре синхронізовані	Тільки «якірні» вузли повинні бути добре синхронізовані	Можлива, але не обов'язкова	Не потребує
Робота в умовах прямої видимості		—	—	Потребує вільного простору між об'єктом і вузлом	Для підвищення точності потребує вільного простору
Проблеми		Відносність часового зсуву між об'єктом і вузлом	Нижча точність ніж ToA при тій же самій геометрії системи	Низька помилка в оцінці кута несе великий вплив на точність. Потребує великого масиву дорогих антен	Потребує щільне розміщення «якірних» вузлів між собою

2.3 Базові геометричні принципи для визначення місцеположення

Найбільш наглядним способом представлення місцеположення об'єкта є геометричний опис. Оскільки він характеризує простір з його геометричною формою на якій можна розмістити точки з координатами в декартовій системі координат.

2.3.1 Тріангуляція

Геометричний принцип тріангуляція використовує геометричні властивості трикутника для визначення місцеположення об'єкта. Для прикладу розглянемо випадок коли є два «якірні» вузла (N_1 та N_2) і точка (Т) в якій знаходиться об'єкт. Перетин лінії з точки N_1 до точки Т і лінії з точки N_2 до точки Т, ми отримаємо два кути φ_1 та φ_2 як показано на рисунку 2.8.

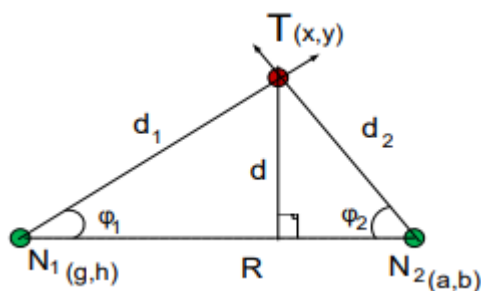


Рисунок 2.8 — Геометричний принцип тріангуляція

Використовуючи геометричні функції можна розрахувати місцеположення об'єкту:

$$R = \frac{d}{\tan \varphi_1} + \frac{d}{\tan \varphi_2}$$

$$d = \frac{R \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{h-Y}{g-X} \right)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{b-Y}{a-X} \right)$$

де R — лінія (відстань) між «якірними» вузлами N_1 та N_2 ; d — перпендикуляр проведений між лінією R та об'єктом Т; d_1 — лінія (відстань) між об'єктом Т та між вузлом N_1 ; d_2 — лінія (відстань) між об'єктом Т та між вузлом N_2 ;

φ_1 — кут між лініями d_1 та R; φ_2 — кут між лініями d_2 та R; (g, h) — координати «якірного» вузла N_1 ; (a, b) — координати «якірного» вузла N_2 ; (X, Y) — координати об'єкта T.

Координати об'єкта можуть бути розраховані за формулами:

$$Y = x \cdot \tan \varphi_1 + (b - a \cdot \tan \varphi_1)$$

$$X = \frac{b - h - a \cdot \tan \varphi_2 + g \cdot \tan \varphi_1}{\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2}$$

Розрахунок відстані між вузлами N_1, N_2 та об'єктом T проводять за наступними формулами:

$$d_1 = \|g - X\| = \sqrt{(g - X)^2 - (h - Y)^2}$$

$$d_2 = \|a - X\| = \sqrt{(a - X)^2 - (b - Y)^2}$$

2.3.2 Мультилатерація

Геометричний принцип мультилатерація розширює принцип триангуляції з більш ніж трьома «якірними» точками. Отже, якщо є три точки N_1, N_2 та N_3 , як показано на рисунку 2.9, і якщо відстані від точок до об'єкта відомі, тоді точка перетину трьох кіл і буде місцеположенням об'єкта.

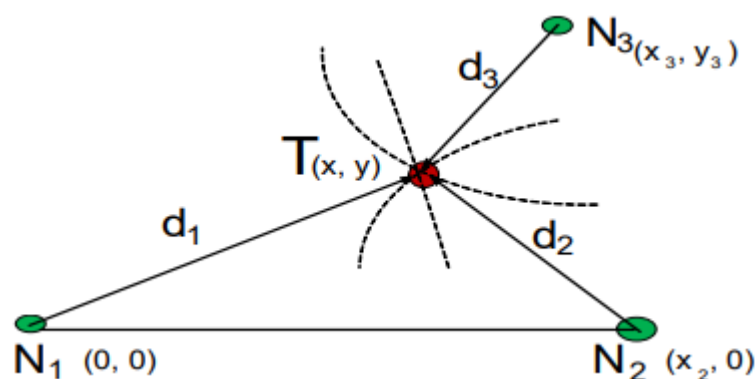


Рисунок 2.9 — Геометричний принцип мультилатерація

Перше коло має радіус d_1 , друге коло має радіус d_2 , відстані зазвичай обчислюються за допомогою різних метрик сигналу, до прикладу візьмемо ToA вимірювання.

Для розрахунку координат об'єкту Т спочатку розраховуються відстані між кожною «якірною» точкою і об'єктом Т за наступними формулами:

$$d_1 = (t_1 - t_0) \cdot C$$

$$d_2 = (t_2 - t_0) \cdot C$$

$$d_3 = (t_3 - t_0) \cdot C$$

де C — швидкість світла ($3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$); t_0 — час коли сигнал був випромінений від об'єкта Т; d_1 — відстань між N_1 та Т; d_2 — відстань між N_2 та Т; d_3 — відстань між N_3 та Т; t_1 — час прибуття сигналу від об'єкта Т до вузла N_1 ; t_2 — час прибуття сигналу від об'єкта Т до вузла N_2 ; t_3 — час прибуття сигналу від об'єкта Т до вузла N_3 .

Рівняння для трьох кіл з центрами в «якірних» вузлах та з радіусами рівними відстані від об'єкту Т, мають вигляд:

$$d_1^2 = x^2 + y^2$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + y^2$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2$$

де (x, y) — координати об'єкта Т; $(0, 0)$ — координати «якірного» вузла N_1 ; $(x_2, 0)$ — координати «якірного» вузла N_2 ; (x_3, y_3) — координати «якірного» вузла N_3 .

Вирішенням цих рівнянь будуть координати об'єкта Т:

$$x = \frac{x_2^2 + d_1^2 - d_2^2}{2 \cdot x_2}$$

$$y = \frac{x_3^2 + y_3^2 + d_1^2 - d_3^2 - 2 \cdot x \cdot x_2}{2 \cdot y_3}$$

2.3.3 Гіперболічний принцип

Геометричний принцип на основі гіперболи використовує рівняння гіперболи для визначення місцеположення об'єктів. Для цього методу необхідні часові характеристики прийнятого сигналу від об'єкту. Тому зазвичай гіперболічний принцип використовується в таких методах як TDoA, ToA.

Гіпербола — це множина точок на площині, відстань від яких до двох «якірних» точок мають постійну різницю. Кожна точка представляє собою фокус гіперболи, яка в свою чергу являє собою «якірний» вузол або точку відліку. Для розрахунку місцеположення за цим принципом, об'єкт розташований на одній із гіперболічних кривих між двох фокусів. Ці криві мають фіксовані відстані до кожного фокуса гіперболи рисунок 2.10.

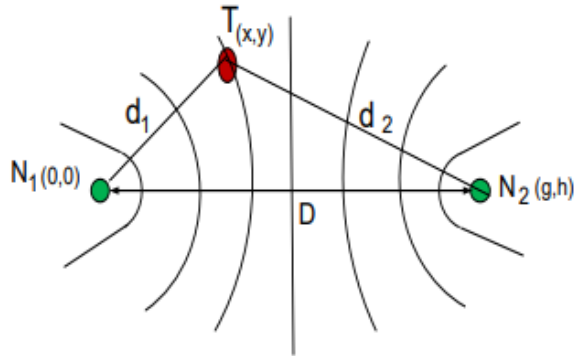


Рисунок 2.10 — Визначення місцеположення об'єкта за допомогою гіперболічного принципу

Рівняння гіперболи має наступний вигляд:

$$1 = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$$

$$a^2 = \left(\frac{\Delta d}{2}\right)^2$$

$$b^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - a^2$$

де D — відстань між двома фокусами гіперболи; Δd — різниця відстаней між двома фокусами і об'єктом.

Різницю відстаней Δd можна визначити за наступною формулою:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = C \cdot (t_1 - t_2)$$

де C — швидкість світла; t_1 — час прибуття сигналу до першого фокусу; t_2 — час прибуття сигналу до другого фокусу.

2.4 Існуючі алгоритми локалізації

Алгоритми локалізації можна розділити на централізовані та розподільні. У централізованих алгоритмах один потужний вузол обчислює позиції невідомих вузлів. Так невідомий вузол надсилає виміряну інформацію, таку як положення відносно центрального вузла та відстань до нього, тоді як останній вузол надсилає назад передбачуване положення до першого вузла. Проблема централізованого підходу полягає в тому, що багато пакетів обмінюються між центральним та невідомими вузлами, і, як наслідок, масштабованість є реальною проблемою. Якщо розмір мережі збільшується, то збільшується і споживання електроенергії за рахунок зв'язку. У дистрибутивних схемах локалізації невідомий вузол оцінює власне місце розташування.

2.4.1 Централізовані алгоритми

MDS-MAP

MDS-MAP [58] є алгоритмом централізованої локалізації. У цьому алгоритмі WSN представляється як незважений граф, де вузли це вершини, а зв'язок між двома вузлами це ребро, при умові що відстань між ними менше або дорівнює дальності зв'язку радіо. Граф зв'язку приймається як зв'язний граф, який є шляхом між будь-якою парою вузлів. Спочатку алгоритм створює відносну карту мережі, а потім вона перетворюється в абсолютні позиції. Завдання на знаходження відносної карти має дві фази. На першому етапі виявляються сусіди кожного вузла і створюється граф зв'язку. На другому етапі цей граф розкладається на дво- або тривимірну карту. На абсолютній карті географічні координати кожного вузла відомі.

Припустимо, є вузли з відомими координатами в трьох вимірному просторі, а також відомі прямі відстаней між ними. Багатовимірне масштабування MDS може відображати вузли тільки на двох вимірному просторі. При цьому вузли розміщуються на основі трьох вимірних відстаней між ними. Алгоритм MDS починається з утворення матриць наближень, які формуються з точок багатовимірних просторів. Після чого, MDS відбувається розміщення точок на

двовимірному просторі, де відстані між точками зберігають початкову схожість.

Алгоритм MDS-MAP складається з наступних кроків:

1. Обробка отриманих даних від мережі, і розрахунок розрідженої матриці R . Тут r_{ij} — це відстань між вузлами i та j , якщо відстань не відома то нуль;

2. Знаходяться найкоротші відстані між усіма парами вузлів в області. Після чого вони використовуються для розрахунку матриці відстаней D , для MDS;

3. Класична MDS застосовується на матриці відстаней D . Двовимірне (або тривимірне) відносне відображення будується шляхом збереження перших двох (або трьох) найбільших власних значень і власних векторів;

4. Якщо існує достатня кількість опорних вузлів, то відносне відображення перетворюється в абсолютне відображення на основі абсолютних координат опорних вузлів.

2.4.2 Адаптивне розташування вузлів

Маячкові «*beacon*» вузли або якірні вузли знають своє географічне розташування і виступають в якості орієнтира в алгоритмах локалізації [59]. У підходах оснований на дистанції щільність і розміщення маяків впливає на якість локалізації (див. рис. 2.11). Кожен вузол повинен мати мінімальну кількість зв'язків з вузлами-маяками, і ці маяки повинні бути неколінеарними (розташовуватись не на одній прямій лінії). Рівномірний і щільний розподіл маяків не є ефективним, хоча може здатися, що розподіл покращує якість локалізації. Маячкові вузли дорого коштують; Таким чином чим більша кількість маяків тим вища вартість WSN. Висока щільність маяків означає, що зростає і ймовірність зіткнень через трансмісію. Так, обмежена кількість маяків потрібна для зменшення кількості колізій, економії електроенергії і, отже, продовження терміну служби мережі. Навколишнє середовище (або місцевість) є ще одним вирішальним фактором

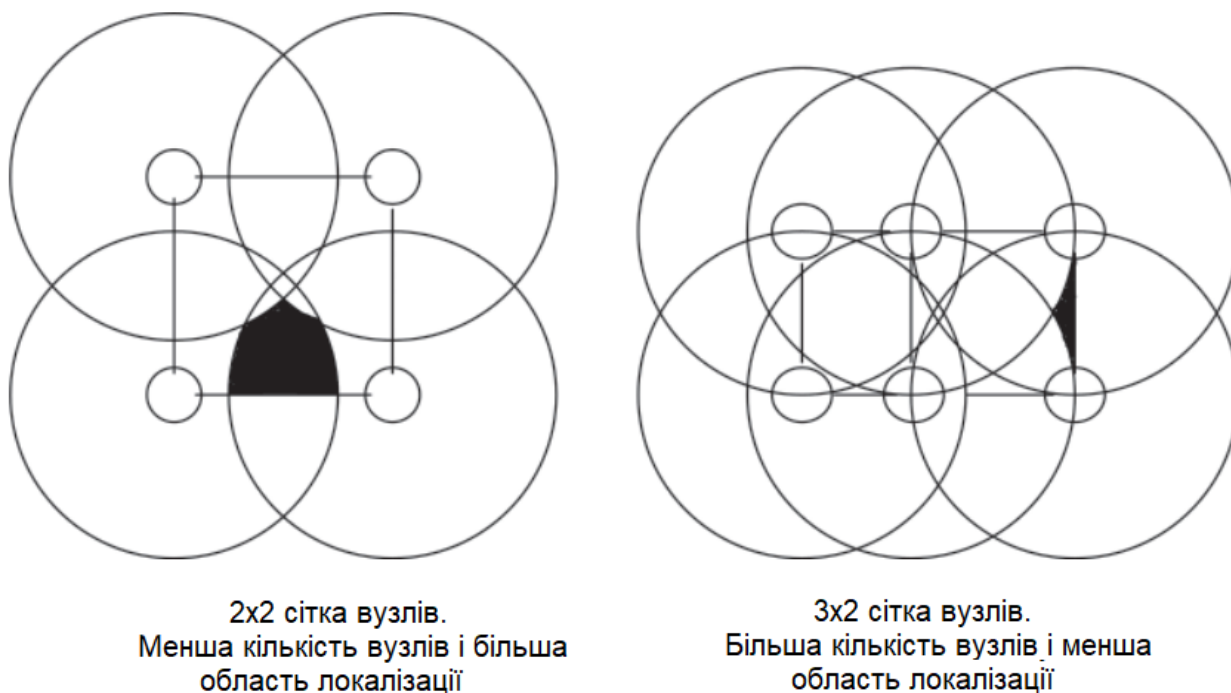


Рисунок 2.11 — Порівняння щільного розташування з зернистим

Маякові вузли розміщені за координатами (X_B, Y_B) , і періодично з інтервалом t вони відправляють інформацію. Клієнти прислухаються до проміжку часу $t \gg T$. Якщо кількість повідомлень, отриманих клієнтом від певного маяка, перевищує порогове значення, то означає що цей клієнт пов'язаний з маяком. Після чого клієнт оцінює своє положення (X_E, Y_E) , оскільки він є центроїдом усіх з'єднаних маяків.

Якщо фактична позиція клієнтів (X_A, Y_A) , то помилка локалізації LE дорівнює [15]:

$$LE = \sqrt{(X_E - X_A)^2 + (Y_E - Y_A)^2}$$

Зі збільшенням щільності вузлів-маяків розмір області локалізації стає дрібнішим, а отже, зменшується похибка локалізації. Центроїдний підхід вносить деяку похибку згідно з [59], якщо номінальна дальність передачі маяка дорівнює R , то відстань між двома сусідніми маяками дорівнює d , і тоді коефіцієнт перекриття діапазону $\frac{R}{d} = 1$, в результаті чого максимальна похибка становить $0,5d$. Ця похибка зменшується зі збільшенням значення коефіцієнта перекриття діапазону.

У [15] автори запропонували підхід до локалізації, при якому локалізація поступово вдосконалюється за рахунок коригування положення вузлів маяків або додавання деяких нових маяків. Це поліпшення ґрунтується на існуючій локалізації в будь-який момент часу. Для локалізації використовуються мобільні роботи, оснащені GPS. Ці роботи також мають радіоприймач, схожий на датчики, щоб оцінити похибку локалізації в будь-якій точці місцевості. Роботи також несуть додаткові маяки. Роботи оцінюють правильне положення для розгортання маяків на своїх розрахунках помилок локалізації.

Автори припустили, що площа є квадратом, де довжина сторони дорівнює S . Діапазон кожного робота дорівнює s , а діапазон передачі маяків - R . Запропоновано три алгоритми розміщення маяків, а саме – Random, Max та Grid [59].

Random має наступні кроки:

1. Точка (X_r, Y_r) обирається випадково;
2. За координатами цієї точки розташовується вузол-маяк.

Цей алгоритм використовується для обчислення похибки локалізації іншого алгоритму

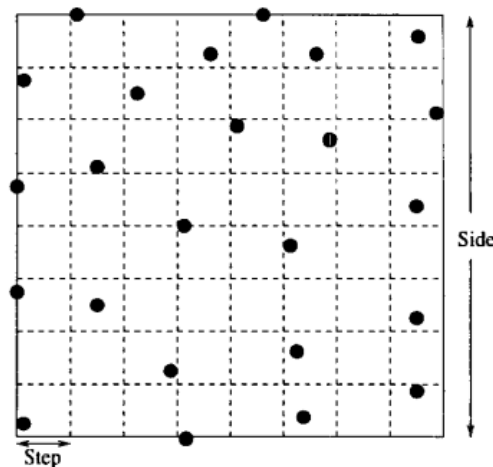


Рисунок 2.12 — Ілюстрація Max методу

Max має наступні кроки:

1. Місцевість розбивається на квадрати з площею $s \cdot s$;

2. Обчислюється похибка локалізації в кожній точці. Координати кожної точки $(i \cdot s, j \cdot s)$, де $0 \leq i, j \leq S/s$.

$DP_T = \left(\frac{S}{s} + 1\right)^2$ кількість точок даних на місцевості.

3. Новий маяк додається до точки (X, Y) , яка має максимальну похибку локалізації серед усіх точок.

На **Max** можуть впливати ефекти поширення сигналу або випадковий шум. В результаті в певній точці похибка локалізації може бути високою, в той час як похибка локалізації сусідньої точки може залишатися низькою.

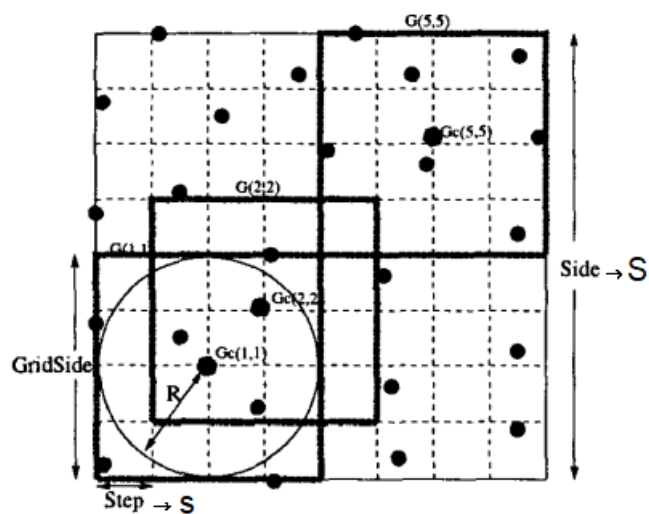


Рисунок 2.13 — Ілюстрація Grid методу

У підході **Grid** точка-кандидат оцінюється шляхом обчислення сукупних похибок локалізації для декількох сіток які перекриваються на місцевості.

Grid має наступні кроки:

1. Місцевість розбивається на квадрати з площею $s \cdot s$;
2. Обчислюється похибка локалізації в кожній точці. Координати кожної точки $(i \cdot s, j \cdot s)$, де $0 \leq i, j \leq S/s$;

3. Місцевість додатково розділяється на N_G сіток що частково перекриваються, це відбувається наступним чином:

- 3.1) Кожна сітка має сторону яка рівна $\text{gridSide} = 2R$;

3.2) Центр сітки $G(i, j) = (X_c(i, j), Y_c(i, j))$,

де $1 \leq i, j \leq \sqrt{NG}$,

$$X_c(i, j) = \frac{gridSide}{2} + \frac{(i-1)(S-gridSide)}{\sqrt{NG}-1},$$

$$Y_c(i, j) = \frac{gridSide}{2} + \frac{(j-1)(S-gridSide)}{\sqrt{NG}-1}.$$

4. Для кожної сітки $G(i, j)$, розраховується сукупна похибка локалізації $LE(i, j)$ для всіх похибок отриманих на кроці 2, які розташовані у сітці $G(i, j)$. Кількість точок на сітку розраховується за:

$$DP_G = DP_T \cdot \frac{S^2}{(2 \cdot R)^2}.$$

5. Новий вузол маяк додається в точці $G_c(i, j)$ сітки $G(i, j)$, яка має найбільшу сукупну похибку локалізації.

2.4.3 Розподілені алгоритми локалізації

Алгоритми локалізації в основному повинні задовольняти трьом умовам. Вони повинні бути самоорганізованими, надійними та енергоефективними [60]. Оскільки сенсорні вузли, які розподіляються випадковим чином в момент монтажу мережі, коли датчики розміщуються неконтрольовано, наприклад, при розгортанні датчиків з літака. Тому, датчики повинні самоорганізовуватися в таких сценаріях. Алгоритми повинні бути стійкими до відмови вузлів та енергоефективними, оскільки заряд батареї є критично важливим ресурсом. Вузли без GPS можуть знаходити своє місцезнаходження в три фази [60]:

1. Знаходження відстані між якірними вузлами та самим вузлом;
2. Розрахунок місцеположення використовуючи знайдені відстані;
3. Уточнення та перевірка розрахованого місця розташування за допомогою сусідів.

Алгоритм «дифузія»

Алгоритм «дифузія» випливає з дуже простої ідеї: найбільш вірогідне положення вузла знаходиться в центрі позицій його сусідів. Алгоритми дифузії вимагають лише даних про радіозв'язок.

У алгоритмі «дифузія» [61], невідомий вузол спочатку знаходить положення сусідніх вузлів. Потім невідомий вузол оцінює своє положення як центроїд для своїх сусідів. У підході, запропонованому в [62], вузли знаходять всі сусідні вузли маяка і визначають їх положення як середнє значення усіх положень маяків. Ця техніка проста, але схильна до помилок. Якщо щільність маяків низька, або якщо сусідні маяки нерівномірно розподілені на цій ділянці, то розраховані позиції неточні.

В підході описаному в [63] кожен вузол оцінює своє положення як центроїд своїх сусідів, маяків і невідомих вузлів. Невідомі вузли запускають цей процес до тих пір, поки результат не збіжиться. Цей алгоритм складається з наступних кроків:

1. Невідомий вузол приймає своє положення як $(0,0)$;
2. Невідомий вузол знаходить місцеположення всіх сусідів;
3. Невідомий вузол оцінює своє положення як середнє арифметичне положення всіх сусідів;
4. Повторюються кроки 2 і 3 поки результат не зійдеться.

Точність цього процесу також залежить від кількості вузлів маяків і їх розподілу. Якщо розподіл вузлів нерівномірний, то розрахунок схильний до помилок. Крім того, другий спосіб є енерговитратним, оскільки вузли декілька разів змінюють своє розрахункове положення.

Алгоритм обмежувального квадрату

Алгоритм обмежувального квадрату [64] [65] є обчислювально простим методом локалізації вузлів з урахуванням їх діапазонів до декількох маяків. Приклад наведено на рисунку 2.14. По суті, кожен вузол припускає, що він знаходиться в межах перетину обмежувальних квадратів своїх маяків. Обмежувальний квадрат для маяка b центрується в положенні маяка (x_b, y_b) і має висоту і ширину $2 d_b$, де d_b - відстань вузла до вимірювання маяка.

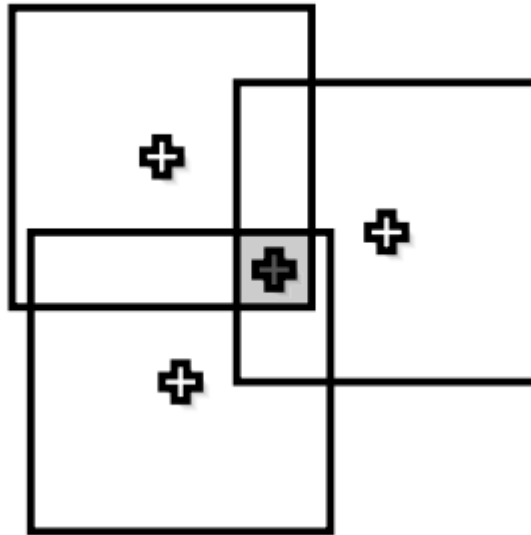


Рисунок 2.14 — Приклад перетину обмежувальних квадратів

Перетин обмежувальних рамок можна обчислити без використання операцій з плаваючою комою:

$$\left[\max(x_i - d_i), \max(y - d_i) \right] \cdot \left[\min(x_i + d_i), \min(y_i + d_i) \right] \quad i = 1 \dots n$$

Whitehouse [66] аналізує розподілену версію цього алгоритму [65], показуючи, що, на жаль, ця версія дуже сприйнятлива до зашумлених оцінок діапазону, особливо до невеликих оцінок, які мають тенденцію до поширення. Точність підходу до обмежувального квадрату найкраща, коли фактичне положення вузлів ближче до центру їх маяків. Simic і Sastry [65] доводять результати про збіжність, помилки і складність.

Алгоритм АРІТ

АРІТ [67] дещо відрізняється від описаних досі розподілених алгоритмів на основі маяків. АРІТ використовує новий підхід, заснований на площі, в якому передбачається, що вузли можуть приймати сигнал від досить великої кількості маяків. Однак АРІТ не припускає, що вузли можуть радіувати цим маякам. Натомість, вузол утворює деяку кількість «трикутників-маяків», де трикутник-маяк — це трикутник, утворений трьома довільними маяками

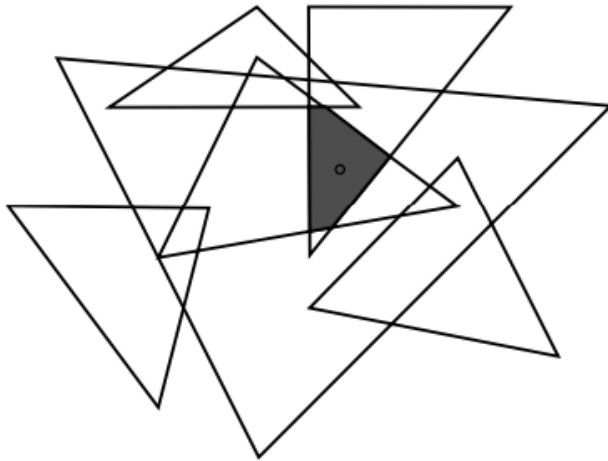


Рисунок 2.15 — Алгоритм АРІТ

Метод, який використовується для оцінки можливої вузької області, в якій можна знайти вузол, відомий як тест «точка в триангуляції» (*point-in-triangulation test* РІТ). У цьому тесті вузол вибирає будь-які три вузли маяка і перевіряє, чи знаходиться він всередині трикутника, утвореного вибраними маяками, чи ні, порівнюючи потужність сигналу сусідів, які не мають маяків. АРІТ повторює тест РІТ з різними комбінаціями сусідніх маяків, доки всі комбінації не будуть вичерпані або не буде досягнута бажана точність.

Після РІТ тестування АРІТ обчислює центр ваги (COG) перетину всіх трикутників, щоб оцінити положення вузла. Алгоритм складається з чотирьох кроків

1. Вузол отримує повідомлення від усіх маяків, де відстань між вузлом і будь-яким маяком менше r , де r — дальність зв'язку вузла;

1.1) Після отримання повідомлень від маяків, кожен вузол формує таблицю, де записами є ідентифікатор маяка, положення маяка та потужність отриманого сигналу;

1.2) Вузли обмінюються таблицею з усіма сусідніми вузлами і будують супертаблицю, використовуючи інформацію від усіх сусідів;

2. Тестування РІТ проводиться для заздалегідь визначеної кількості комбінацій маяків;

3. Цей крок називається агрегацією АРІТ, в якій знаходять площу перетину всіх трикутників, оцінену на кроці 2;

4. Розраховується центр ваги.

Під час тесту РІТ вузол визначає, чи знаходиться він всередині трикутника, утвореного трьома маяками, чи ні. Припустимо, що трьома маяками є А, В і С. Якщо вузол знаходиться всередині трикутника ΔABC і він переміщається в нове положення, то він переміщається ближче до маяків А, В або С. Якщо вузол знаходиться поза ΔABC , то існує такий напрямок, що якщо вузол зміщується, то він робить це в напрямку трикутника або від нього. Якщо існує точка р ближче до вузла така, що в цій точці р вузол знаходиться ближче/далі до всіх А, В або С, то вузол знаходиться за межами ΔABC . Але на практиці вузол може бути не в змозі рухатися в цілому. Отже, Approximate РІТ (АРІТ) перевіряє це по-іншому. Якщо потужність сигналу маяка В у вузлі Х більша за потужність сигналу В у точці Y, то Y припускає, що Х ближче до В. Така ситуація показана на рисунку 2.16.

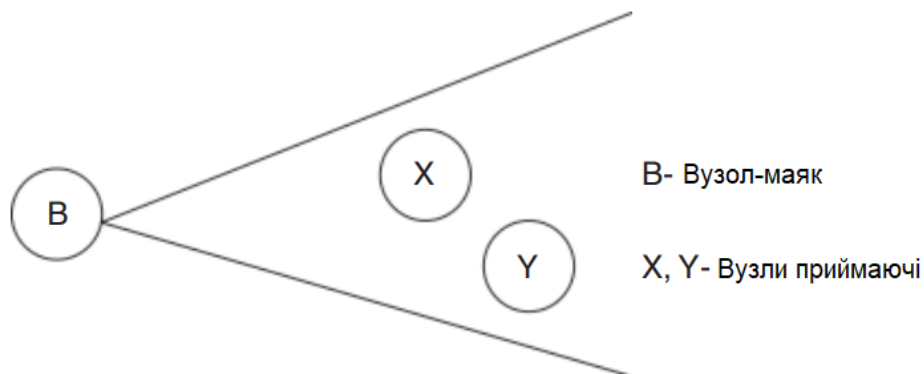


Рисунок 2.16 — Зміна потужності сигналу залежно від відстані [20]

У тесті АРІТ, якщо будь-який сусід вузла N знаходиться ближче або віддалений від усіх трьох маяків А, В і С одночасно, то N припускає, що він знаходиться за межами трикутника ΔABC . В іншому випадку передбачається, що він знаходиться всередині трикутника. Цей сценарій показаний на рисунку 2.17.

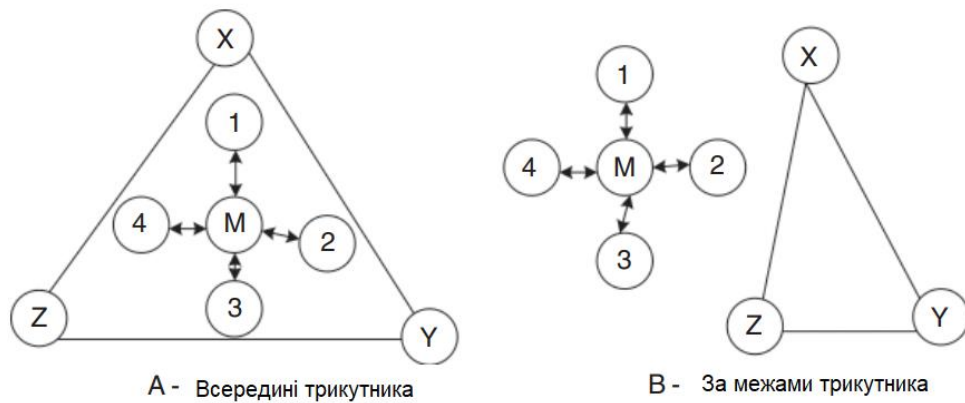


Рисунок 2.17 — Приклад RIT тесту [67]

В алгоритмі APIT агрегована точка знаходиться алгоритмом grid-SCAN. У цьому алгоритмі вся територія розбивається на сітки. Довжина сторони сітки залежить від необхідної точності. Для кожного APIT в рішенні (коли вузол знаходиться в межах регіону) значення областей сітки, які знаходяться всередині розглянутого трикутника, збільшуються. Для кожного зовнішнього рішення APIT (коли вузол знаходиться за межами трикутника) значення відповідних областей сітки зменшуються. Після обчислення всіх трикутних областей отримана інформація використовується для знаходження максимальної площі перекриття для знаходження центру ваги (COG) (рис.2.18).

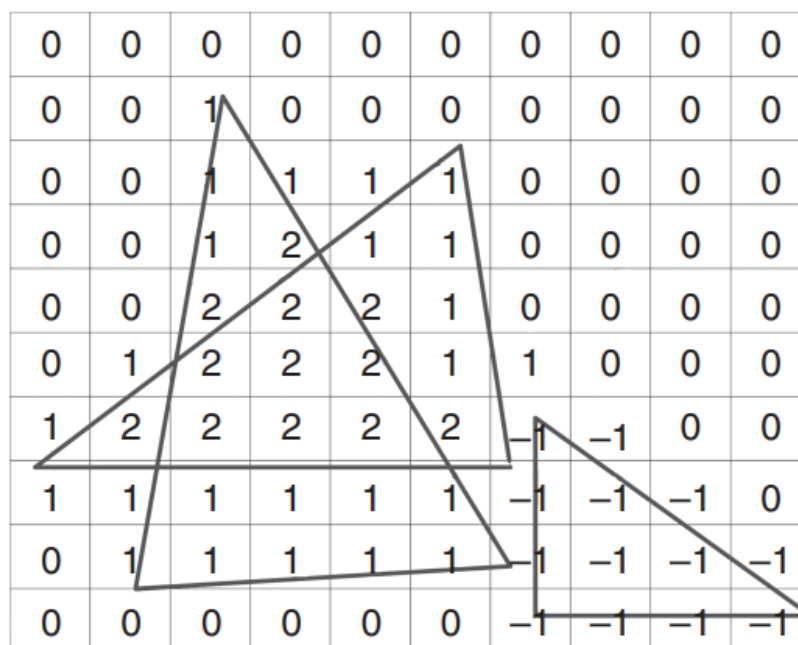


Рисунок 2.18 — Знаходження центру ваги [67]

2.5 Проблема локалізації декількох БПЛА на основі сенсорної мережі

Використовуючи любий з методів з ToA, TDoA, RSSI, AoA, для визначення місцеположення одного об'єкту, ми отримуємо його місцеположення. У випадку коли кількість об'єктів більше одного різні методи будуть вирішувати проблему розрізнення місцеположення об'єктів між собою наприклад. У методах ToA і TDoA сенсорний вузол і об'єкт синхронізовані між собою за часом і тому розрізнення відбувається за часом. В методі AoA розрізнення можна здійснити за отриманим кутом, так при цьому можуть виникати проблеми при знаходженні двох об'єктів на одній і тій же самій лінії але з різними дистанціями. Методи AoA, TDoA, ToA мають способи для вирішення даної проблеми.

Але особливо сильно ця проблема виражена в методі RSSI, оскільки єдину інформацію яку отримує і-й сенсор є потужність сигналу. І у випадку коли об'єктів більше двох не зрозуміло яка з отриманих потужностей належить кожному з об'єктів.

Наприклад розглянемо ситуацію коли існує 3 сенсорних вузла, і 2 об'єкта. Графічне зображення можна побачити на рисунку 2.19.

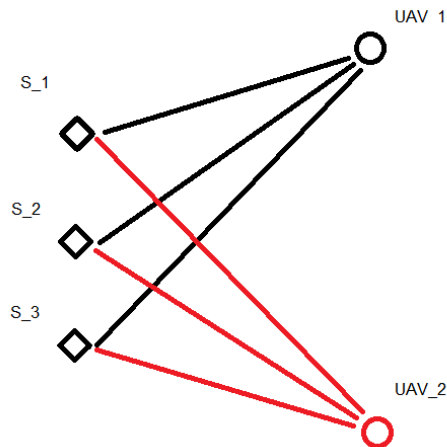


Рисунок 2.19 — Графічна ілюстрація проблеми ідентифікації визначення місцеположення об'єктів методом RSSI

Дану проблему можна описати матрицею:

$$\begin{matrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \\ S_{31} & S_{32} \end{matrix}$$

де S_{ij} — це потужність яку отримує i -й сенсор від j об'єкту.

В реальних умовах на вхід алгоритму (детальніше алгоритм буде розглянутий в наступному 3 розділі) визначення обчислення місцеположення поступає та ж сама матриця але з невідомими індексами об'єкту.

$$\begin{matrix} S_{1x} & S_{1y} \\ S_{2x} & S_{2y} \\ S_{3x} & S_{3y} \end{matrix}$$

Таким чином невідомо сигнал від якого об'єкту прийшов на i -й сенсор. Єдине що відомо це потужність сигналу, і що об'єкта 2. І відповідно невірно співставленні дані на початку алгоритму можуть призвести до отримання хибних місцеположень.

Для ілюстрації всіх можливих місцеположень при вхідних даних: 3 сенсорні мережі і 2 об'єкти від яких отримуємо потужність сигналу проведено

модельовання, яке враховує всі можливі комбінації приходу сигналів на i -й сенсор.

Таким чином всі можливі комбінації співставлень i -го сенсору з j -м об'єктом будуть виглядати наступним чином:

$$\begin{array}{cc}
 S_{11} & S_{12} & & S_{12} & S_{11} & & S_{11} & S_{12} & & S_{11} & S_{12} \\
 S_{21} & S_{22} & & S_{21} & S_{22} & & S_{22} & S_{21} & & S_{21} & S_{22} \\
 S_{31} & S_{32} & & S_{31} & S_{32} & & S_{31} & S_{32} & & S_{32} & S_{31}
 \end{array}$$

В результаті k -ть можливих місцеположень об'єктів при 3 сенсорах і 2 об'єктах буде становити 6 хибних і 2 істинних місцеположень, що можна побачити на рисунку 2.20.

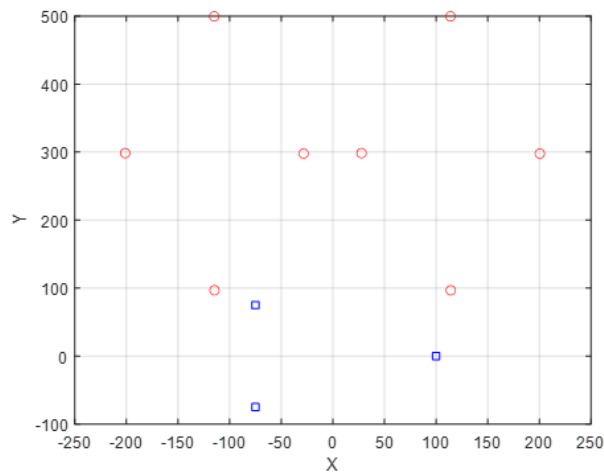


Рисунок 2.20 — Результат модельовання можливих комбінації співставлень сигналу з сенсорам при 3 сенсорах і 2 об'єктах

На основі модельовання було виведено співвідношення за яким можна оцінити яку k -ть співставлень потужностей від об'єкту до вузлів сенсорної мережі можна отримати:

$$N = U + US(U - 1) \quad 2.3$$

де N — k -ть співставлень потужностей до вузлів мережі і відповідно k -ть можливих місцеположень, U — k -ть БПЛА, S — k -ть вузлів сенсорної мережі.

2.6 Висновки по розділу

1. Існуючі технології виявлення та визначення місцеположення БПЛА досить вартісні, і розраховані на велико-габаритні об'єкти. Тому слід орієнтуватися на методи пасивної локалізації при задачах визначення місцеположення БПЛА.

2. Розглянуті методи обчислення БПЛА мають свої особливості: ToA потребує синхронізації між приймачем та передавачем, якої неможливо досягти для БПЛА, AoA та TDoA потребують складного обладнання, і при цьому являються точними. Найбільше для задачі визначення місцеположення БПЛА підходить метод на основі RSS-вимірювання, оскільки є дешевим, і найбільш доступним

3. Алгоритми локалізації у WSN застосовуються для нерухомих вузлів, головною задачею яких являється побудова всього графу розгорнутої мережі з метою покращення карти покриття.

4. Розглянута проблема ідентифікації сигналу від двох БПЛА для методу визначення місцеположення на основі RSS-вимірювань. Актуальною науковою задачею є розробка алгоритму локалізації декількох БПЛА на основі RSS вимірювань використовуючи сенсори WSN.

3 СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ ДЕКИЛЬКОХ БПЛА НА ОСНОВІ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

В пункті 2.5 була описана проблема яка виникає при визначенні місцеположення на основі вимірів потужності. В цьому розділі буде описано запропоноване рішення даної проблеми.

3.1 Модель поширення сигналу

Цей метод заснований на моделі поширення сигналу для оцінки відстані між вузлом датчика та приймачем з антеною, яка може точно вимірювати потужність сигналу. Таким чином, знаючи потужність сигналу, що передається, набрана потужність антена і ефекти різних джерел похибки поширення роблять можливим локалізацію. Зв'язок між силою сигналу та відстанню становить ($\text{Signal Strength} \propto \frac{1}{d^2}$) [68]

RSSI: це вимірювання, яке показує стан отриманої потужності в якірних вузлах, і воно використовується в більшості стандартів бездротового зв'язку. RSSI: це показник, який демонструє розмір енергії електромагнітної хвилі в середовищі (отриманої антеною в наших сенсорних вузлах), і більшість бездротових пристроїв можуть вимірювати потужність отриманого сигналу [69].

Теоретично RSSI є функцією відстані і, як правило, на них впливає навколишнє середовище (і будь-які зміни в навколишньому середовищі). У методі RSSI невідомий вузол датчика транслює кадри на всю мережу та інші датчики в зоні зв'язку, а потім відстань обчислюється на основі отриманих значень RSSI. Структура кадру який передається проілюстрована на рисунку 3.1 [70].

Packet_Type	Node_ID	RSSI	Other
-------------	---------	------	-------

Рисунок 3.1 — Структура кадра [71]

Packet_Type показує тип кадру, *Node_ID* виражає id датчика-відправника, RSSI демонструє значення RSSI, яке невідомий датчик надсилає одержувачу,

а інше поле використовується для надсилання іншої відповідної інформації. Коли відстань між невідомим вузлом і якорем збільшується, значення RSSI зменшується, а коли невідомий вузол знаходиться близько до якорів, значення RSSI високе. Виходячи з теорії, потужність отриманого сигналу від датчика є монотонно спадною функцією, враховуючи наступне рівняння [4]:

$$P_r(D) = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)$$

де P_t та G_t — потужність передачі антени і коефіцієнт посилення антени передавального сигналу відповідно в дБм; P_r та G_r — потужність приймальної антени і коефіцієнт посилення приймальної антени; λ — довжина хвилі сигналу; D — дистанція між двома антенами.

Ця формула є ідеєю випадку для вимірювання відстані. У реальних експериментах локалізація на основі RSSI не є дуже точною, оскільки умови навколишнього середовища та зміни впливають на значення RSSI, і тому важко визначити посилення антени. Тому для пояснення залежності між відстанню та силою прийнятого сигналу використовується наступна спрощена формула [4].

$$P_r(D) = P_{r1} - \beta \cdot \log_{10}(D)$$

де P_{r1} — це отримана потужність на певній відстані (один метр) в дБм; β — коефіцієнт втрат; D — відстань між приймачем та передавачем. P_{r1} та β визначають емпірично. На рисунку 3.2 ілюстрація цієї формули.

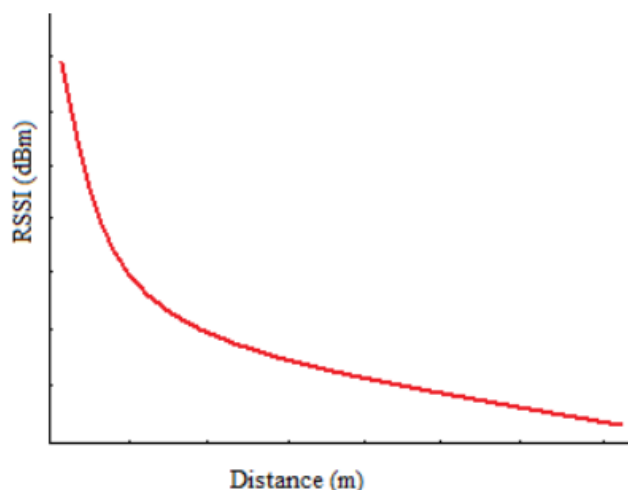


Рисунок 3.2 — Зв'язок між потужністю прийнятого сигналу і дистанцією

Фактично, метод RSSI знаходить відстань на основі порівняння різниці між потужністю передачі та отриманою потужністю, що називається «коефіцієнтом втрат» або ослабленням сигналу. У реальному світі з різними середовищами приріст втрати шляху різний через різну відстань. Таким чином, характеристики середовища можуть бути продемонстровані у вигляді «експоненти втрати шляху (β)» у формулі RSSI. Коефіцієнт втрат є одним із значущих параметрів, зміни значення якого мають значний вплив при вимірюванні відстані. Рисунок 3.3 ілюструє взаємозв'язок між значеннями RSSI та відстанню при різних значеннях « β ».

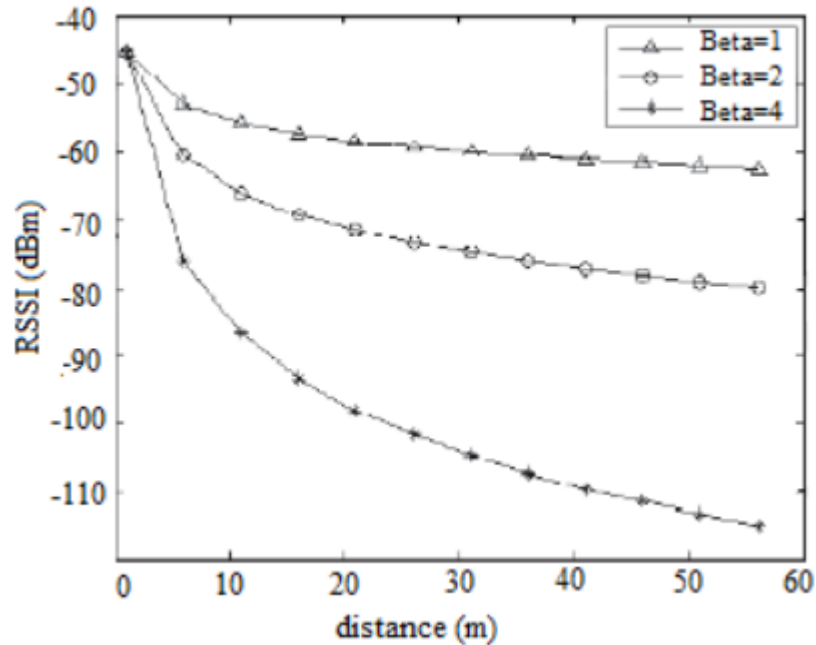


Рисунок 3.3 — Зв'язок між значеннями RSSI і відстанню по відношенню до різних експонент втрати шляху (β) [72]

На рисунку 3.3, всі криві мають однакову початкову точку, яка пояснює фіксовану отриману потужність P_{r1} у формулі. Таким чином, P_{r1} є ще одним важливим параметром, який можна пояснити в різних середовищах [72]. У контексті методу вимірювання RSSI важливим є розгляд відстеження місцезнаходження в приміщенні або на вулиці. Оскільки, різні сценарії розташування (внутрішні або зовнішні) впливають на модель коефіцієнту втрат (лінійний або нелінійний), точність (в невеликих приміщеннях дуже значна), простір, розгортання (знайти і розмістити якорі в стратегічних місцях для спрощення алгоритму оцінки), карту і потужність передачі.

3.1.1 Характеристика RSSI

Щоб зрозуміти характеристики RSSI, ми повинні розглянути поширення сигналу між передавачем і приймачем, а також ефекти багатопроменевого згасання. Насправді електромагнітні хвилі поширюються різними шляхами різної довжини і приходять до антени в різний час через множинні відбиття. Відображення пов'язане з різними об'єктами та перешкодами в навколишньому середовищі. Взаємодія цих хвиль спричиняє багатопроменеве згасання, що

впливає на силу сигналу (зменшення сили) залежно від відстані між передавачем і приймачем. Відбиття, дифракція і розсіювання є важливими поняттями в поширенні сигналу. Згасання поділяється на довгострокове згасання та короткочасне згасання [73].

На значення RSSI істотно впливає місце експерименту і багатопроменеве згасання. По суті, RSSI залежить від навколишнього середовища. Дослідження показують, що при невеликій зміні положення, форми сигналів сильно відрізняються. Це пов'язано зі змінами в сприйнятті відстані і шляху. Оскільки багатопроменеве згасання та зміни середовища мають значний вплив на значення RSSI, навіть при великій кількості спроб зберегти середовище незмінним, немає жодної повторюваності та регулярності значень RSSI.

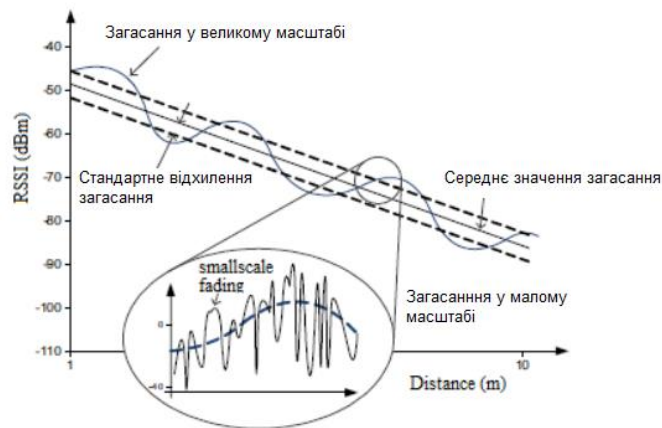


Рисунок 3.4 — Загасання від відстані [73]

Таким чином і на основі досліджень, у часовій і частотній області сигнали RSSI не є періодичними, дисперсія сигналу RSSI не пов'язана безпосередньо з його інтенсивністю, але обидва вони (дисперсія та сила) залежать від умов середовища. Рисунок 3.4 ілюструє зв'язок між втратами від дистанції та ефектом загасання.

3.1.2 Огляд моделей поширень сигналу RSSI

Модель поширення сигналу у вільному просторі: ця модель пояснює потужність прийнятого сигналу, коли між передавачем і приймачем є шлях прямої

видимості без будь-яких перешкод. Співвідношення прийнятої потужності передавача і, отже, одержуваної енергії антеною приймача становить:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\sqrt{G_t \cdot G_r} \lambda}{4\pi d} \right)^2 \longrightarrow P_r(d) = \frac{P_t P_r G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

де $P_r(d)$, P_t — відповідно отримана і передана потужність; G_t , G_r — коефіцієнт підсилення антени приймача і передавача відповідно; λ — довжина хвилі в метрах.

Наведене вище рівняння в більшості випадків не є точним при використанні окремо, оскільки при поширенні радіоканалу один прямий шлях між відправником і приймачем зустрічається нечасто.

Двопроменева модель потужності прийнятого сигналу: ця модель заснована на геометричній оптиці та приділяє увагу траєкторії відбиття землі, а також прямому шляху між передавачем і приймачем. Прогнозований рівень сигналу в цій моделі більш точний, ніж у моделі вільного простору [74].

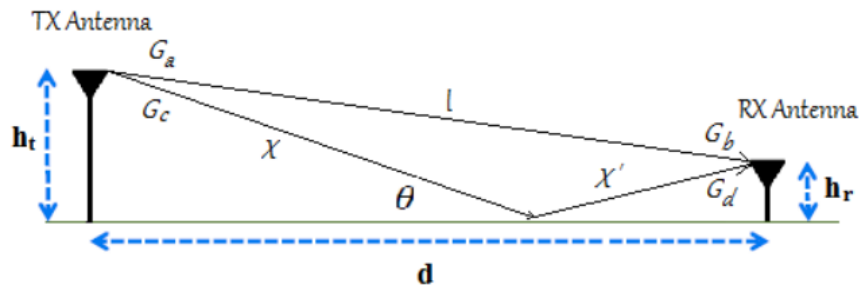


Рисунок 3.5 — Двопроменева модель

Прийнята потужність за цією моделлю:

$$P_r(d) = P_t G_a G_b \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4}$$

де G_a , G_b — коефіцієнтом посилення антени приймача та передавача відповідно; h_r , h_t — висота антени передавача та приймача відповідно;

Співвідношення між отриманою потужністю і відстанню ($P_r \propto \frac{1}{d^4}$), маємо швидку втрату шляху в двопроменевому режимі [74].

Спрощена модель втрат сигналу від дистанції: наступна формула пояснює найпростішу модель втрати шляху:

$$P_r = P_t K \left(\frac{d_0}{d} \right)^\gamma$$

де d_0 — задана відстань, яка задається та вимірюється поблизу передавача; K — постійний коефіцієнт втрат; γ — експоненційний показник затухання сигналу[7].

Оскільки на одній і тій же відстані зазвичай різне затухання сигналу, необхідно враховувати фактор «тіньового згасання». По суті, спрощена модель загасання сигналу показує середнє значення і не враховує навколишнє середовище. Відношення потужності передачі до прийому (P_t/P_r) вважається випадковим (гаусова випадкова величина в децибелах, що дорівнює нулю, а її стандартне відхилення зазвичай становить 4-10) з логарифмічним нормальним розподілом (на основі емпіричних вимірювань) [74]:

$$f_x(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\log x - \mu^2}{2\sigma^2}}$$

де x — випадкова величина; μ — середнє значення; σ^2 — дисперсія в децибелах.

Тепер, поєднуючи спрощену модель затухання та ефект «тіньового загасання», ми маємо застосовну модель поширення, яка враховує навколишнє середовище.

Модель нормального тіньового затухання сигналу [75]: у цій моделі зв'язок між відстанню та отриманою потужністю можна показати за допомогою наступної формули:

$$P_L = P_L(d_0) + 10\beta \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3.1)$$

де $P_L(d)$ — затухання сигналу на певній відстані d в децибелах. Фактично $P_L(d)$ це $\log \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$, де відправлена і прийнята потужності у ватах. $P_L(d_0)$ зату-

хання сигналу на відстань d_0 (зазвичай ця дистанція рівна 1 метру). β — коефіцієнт затухання; X_σ — це випадкова величина тіньового затухання ($X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$) з середнім значенням рівним нулю і дисперсією σ^2

3.2 Оцінка координат

Для того щоб оцінити координати на основі виміряних потужностей RSSI, необхідно застосувати модель нормального тіньового затухання сигналу (3.1 і з рівняння визначити дистанцію на основі отриманої потужності.

$$d_{ij} = d_0 10^{\frac{P_{0i} - P_{ij} + v_{ij}}{10\beta}}$$

де d_{ij} — дистанція від i -го сенсора до j -го БПЛА, d_0 — це дистанція в 1 м на якій відоме значення потужності сигналу P_{0i} , P_{ij} — потужність отримана від i -го сенсора та j -го БПЛА, β — коефіцієнт загасання в середовищі, v_{ij} — помилка вимірювання потужності сигналу.

Далі використовуючи геометричний принцип мультилатерації складається система рівнянь які представляють рівняння кіл, центри яких знаходяться за координатами вузлів, а дистанція від вузла до БПЛА є радіусом цього кола, в результаті перетин цих кіл і буде місцеположення БПЛА(рівняння записані в загальному вигляді):

$$\begin{aligned} d_1 &= (x_u - x_1)^2 + (y_u - y_1)^2 \\ &\vdots \\ d_n &= (x_u - x_n)^2 + (y_u - y_n)^2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Далі систему можна спростити віднімаючи $n - 1$ рівняння від n рівняння, і отримаємо:

$$\begin{aligned} x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x_u + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y_u &= d_1^2 - d_n^2 \\ &\vdots \\ x_1^2 - x_n^2 - 2(x_1 - x_n)x_u + y_1^2 - y_n^2 - 2(y_1 - y_n)y_u &= d_1^2 - d_n^2 \end{aligned}$$

Спростивши і привівши доданки до вигляду лінійного рівняння

$$Ax = b$$

де

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_1^2 - d_n^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_{n-1}^2 - d_n^2 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \end{bmatrix}$$

Тепер можна розв'язати систему лінійних рівнянь використовуючи метод найменших квадратів, і тоді рішення системи буде виглядати:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b$$

Тепер оскільки невідомо які отримані потужності сигналів відносяться до істинних положень БПЛА необхідно розрахувати N місцеположень БПЛА (N можна оцінити за формулою 2.3). Отримані N місцеположень БПЛА, з яких U місцеположень БПЛА дійсні. Для визначення необхідних U місцеположень БПЛА пропонується порівняти виміряні потужності та отримані L місцеположень БПЛА, які перераховані в дальність від сенсора до БПЛА – D_{iu} та D_{in} , відповідно.

$$D_{iu} = D_0 10^{\frac{P_0 - P_{iu} + v_{iu}}{10\beta}}$$

$$D_{in} = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}$$

Оскільки ймовірність того, що випадкова величина відхилиться від свого математичного очікування більш ніж на три середньоквадратичні відхилення, не перевищує 0,28%. Тому дисперсія вимірювання дальності i -тим сенсором обчислюється за допомогою виразів:

$$\sigma_{iu}^2 = \frac{(D_{iu \max} - D_{iu \min})^2}{12}; D_{iu \max} = D_{iu} \cdot 10^{\frac{3\sigma_p}{10\beta}}; D_{iu \min} = D_{iu} \cdot 10^{-\frac{3\sigma_p}{10\beta}}$$

Тоді нерівність яка повинна виконуватись для знаходження дійсних U положень БПЛА має вигляд:

$$D_{iu} - 3\sigma_{D_{iu}} \leq D_{in} \leq D_{iu} + 3\sigma_{D_{iu}}$$

3.3 Моделювання алгоритму

Моделювання алгоритму проведено для конфігурації сенсорної мережі яка складається з 6 датчиків з координатами:

$D_1(100; 150)$, $D_2(-150; 0)$, $D_3(-100; -150)$, $D_4(100; -150)$, $D_5(150; 0)$, $D_6(100; 150)$. СКВ помилки вимірювання $\sigma_p = 1$ дБ. $\nu = 1$ дБ

На рисунку 3.6 показані координати БПЛА в результаті розрахунку системи рівнянь 3.2. Оскільки невідомо відповідність сигналів до БПЛА, то на першому етапі алгоритму отримуємо 14 фактичних координат. Другий етап алгоритму дозволить відкинути помилкові координати та виявити дійсні, як показано на рисунку 3.7.

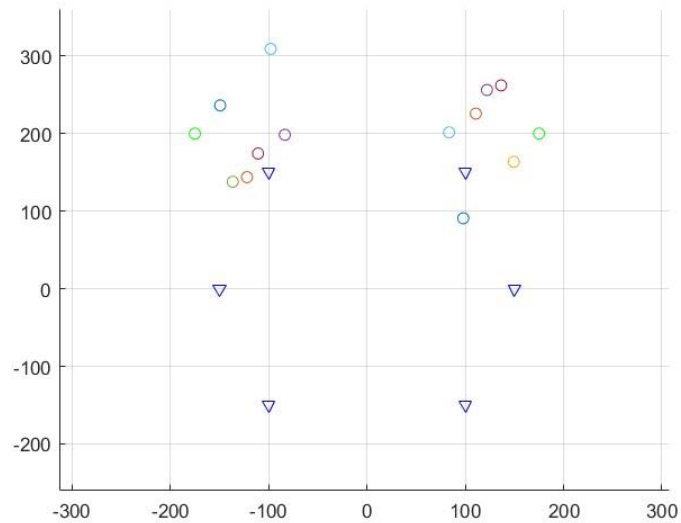


Рисунок 3.6 — N місцеположень БПЛА при 6 сенсорах і 2 БПЛА

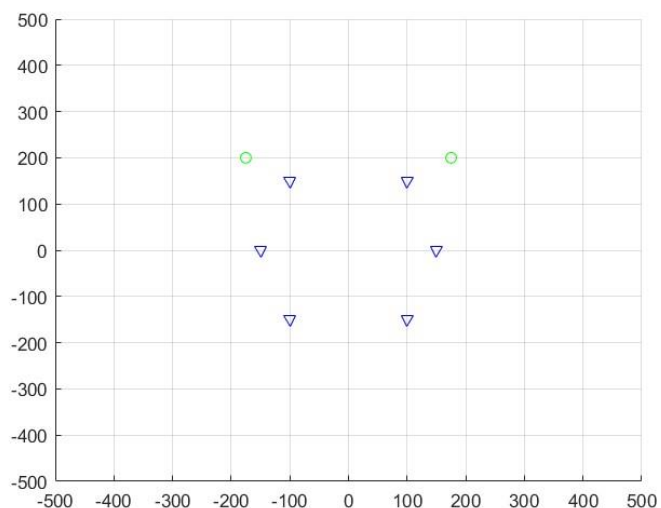


Рисунок 3.7 — U положень БПЛА, при 6 сенсорах і 2 БПЛА

3.4 Висновки до розділу

1. Був розроблений алгоритм визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі використовуючи RSS-вимірювання та метод найменших квадратів.

2. Проведено моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі з 6 датчиків для визначення місцеположення 2 БПЛА з параметром СКВ помилки вимірювання в 1дБ.

4 АНАЛІЗ СИНТЕЗОВАНОГО АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ БАГА- ТЬОХ БПЛА НА ОСНОВІ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Розроблений алгоритм був промодельований при конфігурації 6 сенсорних мереж і двох БПЛА. Необхідно проаналізувати алгоритм на предмет різної конфігурації сенсорних вузлів та різної кількості БПЛА. Також слід оцінити роботу алгоритму при умові що БПЛА будуть прямувати один до одного і в якийсь момент наблизяться.

4.1 Аналіз різної конфігурації сенсорних вузлів та БПЛА

Для аналізу алгоритму застосуємо велику кількість ітерацій комп'ютерного моделювання. Метою моделювання буде визначення впливу кількості сенсорних вузлів і кількості БПЛА які будемо знаходити. Головним оціночним показником буде ймовірність визначення заданих місцеположень БПЛА. Ймовірність буде розраховуватись за наступною формулою:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i} \cdot 100\% \quad 4.1$$

де n — к-ть ітерацій моделювання, Y — к-ть заданих положень БПЛА; \hat{Y} — к-ть знайдених БПЛА.

Моделювання буде виконуватись наступним чином, для кожної конфігурації сенсорної мережі буде проведено декілька моделювань з різною к-тю БПЛА. Моделювання буде запущено 100 разів після чого за формулою 4.1 буде розрахована ймовірність розрізнення декількох БПЛА. Таке моделювання допоможе оцінити залежність алгоритму від к-ті сенсорних вузлів та к-ті БПЛА.

4.1.1 Моделювання для конфігурації сенсорної мережі з трьох датчиків

Моделювання алгоритму проведено для конфігурації сенсорної мережі (див. рис.4.1) з трьох вузлів. Моделювання алгоритму було проведено для таких к-тей БПЛА (2, 4, 10, 20). СКВ помилки вимірювання рівна 1 дБ.

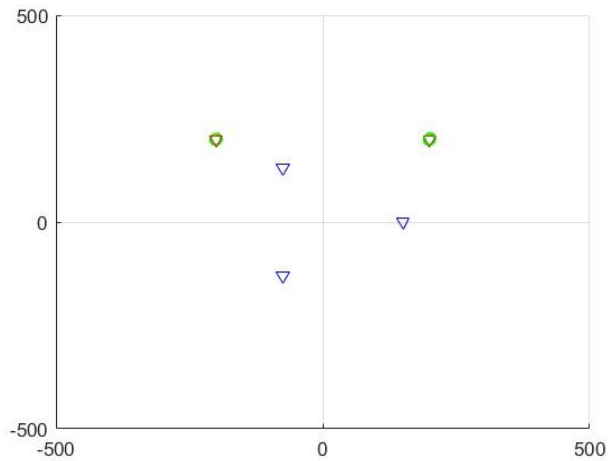


Рисунок 4.1 — Одна з ітерацій моделювання для конфігурації сенсорної мережі з 3 датчиків

Результати моделювання для різних к-стей заданих БПЛА при конфігурації сенсорної мережі з трьох датчиків зображені в таблиці 4.1. На рисунку 4.1 можна побачити випадок коли алгоритм розрізняє усі задані БПЛА.

Таблиця 4.1 — Значення ймовірностей визначення алгоритмом заданих БПЛА, конфігурація мережі 3 датчиків

К-ть БПЛА	2	4	10	20
Ймовірність	96,5%	93,5%	73,6%	56,25%

Моделювання показує що конфігурація з трьох датчиків дозволяє успішно розрізнити 2 БПЛА з ймовірністю 96 %, а при умові що до умовного об'єкту буде наближатися 20 БПЛА, алгоритм успішно розрізняє усі БПЛА у 56 випадках зі 100 промодельованих.

4.1.2 Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі з 6 датчиків

Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі (див. рис. 4.2) з 6 вузлів. Моделювання алгоритму було проведено для таких к-тей БПЛА (2, 4, 10, 20). СКВ помилки вимірювання рівна 1 дБ.

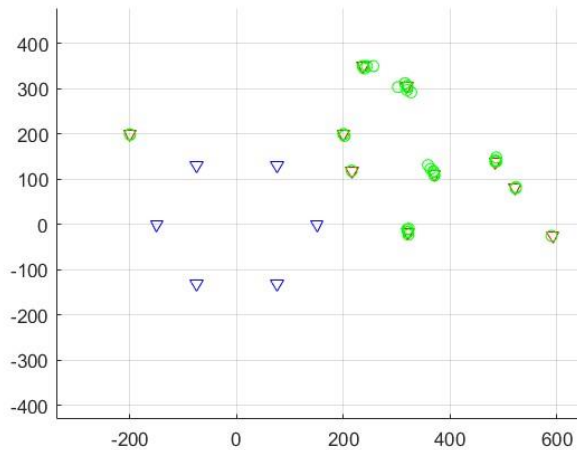


Рисунок 4.2 — Одна з ітерацій моделювання для конфігурації сенсорної мережі з 6 датчиків

Результати моделювання для різних к-стей заданих БПЛА при конфігурації сенсорної мережі з трьох датчиків зображені в таблиці 4.2. На рисунку 4.2 можна побачити випадок коли алгоритм розрізняє усі задані БПЛА.

Таблиця 4.2 — Значення ймовірностей визначення алгоритмом заданих БПЛА, конфігурація мережі 6 датчиків

К-ть БПЛА	2	4	10	20
Ймовірність	97%	92%	78%	68,5%

Моделювання показує що конфігурація з трьох датчиків дозволяє успішно розрізнити 2 БПЛА з ймовірністю 95 %, а при умові що до умовного об'єкту буде наближатися 20 БПЛА, алгоритм успішно розрізняє усі БПЛА у 68 випадках зі 100 промодельованих.

4.1.3 Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі з 9 датчиків

Моделювання алгоритму для конфігурації сенсорної мережі (див. рис. 4.3) з 9 вузлів. Моделювання алгоритму було проведено для таких к-тей БПЛА (2, 4, 10, 20). СКВ помилки вимірювання рівна 1 дБ.

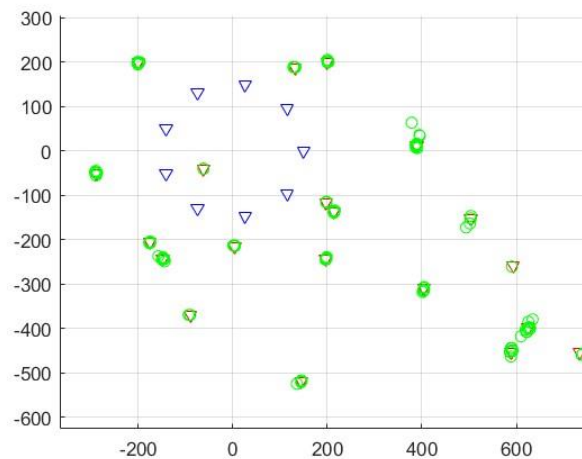


Рисунок 4.3 — Одна з ітерацій моделювання для конфігурації сенсорної мережі з 20 датчиків

Результати моделювання для різних к-стей заданих БПЛА при конфігурації сенсорної мережі з трьох датчиків зображені в таблиці 4.3. На рисунку 4.3 можна побачити випадок коли алгоритм розрізняє усі задані БПЛА.

Таблиця 4.3 — Значення ймовірностей визначення алгоритмом заданих БПЛА, конфігурація мережі 6 датчиків

К-ть БПЛА	2	4	10	20
Ймовірність	100%	100%	90%	80%

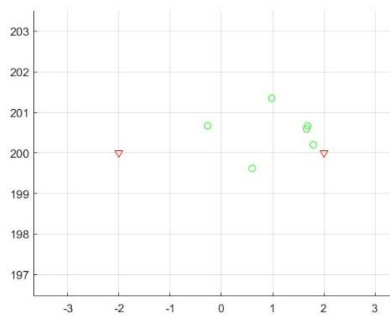
Моделювання показує що конфігурація з трьох датчиків дозволяє успішно розрізнити 2 БПЛА з ймовірністю 100 %, а при умові що до умовного об'єкту буде наближатися 20 БПЛА, алгоритм успішно розрізняє усі БПЛА у 80 випадках зі 100 промодельованих.

4.2 Аналіз впливу відстані між БПЛА на роботу алгоритму, визначення роздільної здатності

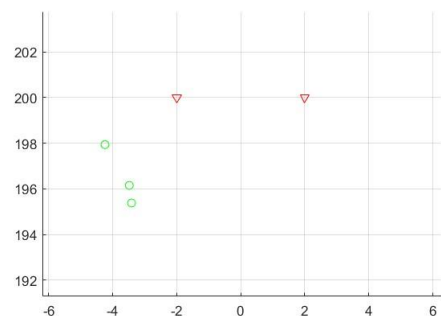
Слід розуміти що точність визначення місцеположення БПЛА за вимірами потужності прийнятого сигналу дуже сильно залежить від середовища в якій поширюється сигнал. Алгоритм може мати складності в розрізненні декількох БПЛА які знаходяться дуже близько один коло одного (1-6 метрів). Проведемо

моделювання для конфігурації сенсорної мережі з 3 датчиків (див. рис. 4.1) коли відстань між БПЛА складає 4 і 8 метрів, протягом моделювання збільшимо показник СКВ вимірювання потужності сигналу до 10 дБ. Результати можна побачити на рисунках 4.4, 4.5.

Моделювання алгоритму при відстані між БПЛА 4 метри показує, що розрізнення алгоритмом заданих БПЛА погіршується, і алгоритм починає приймати хибні місцеположення за істинні.



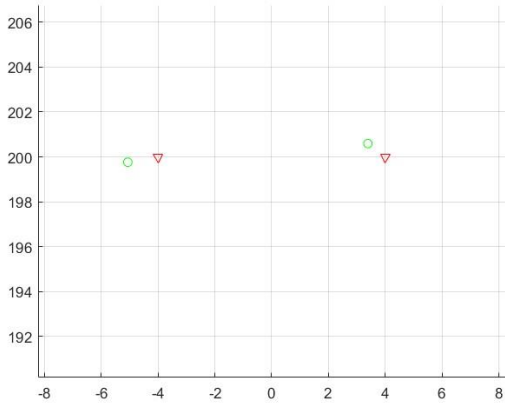
4 метри СКВ 1 дБ



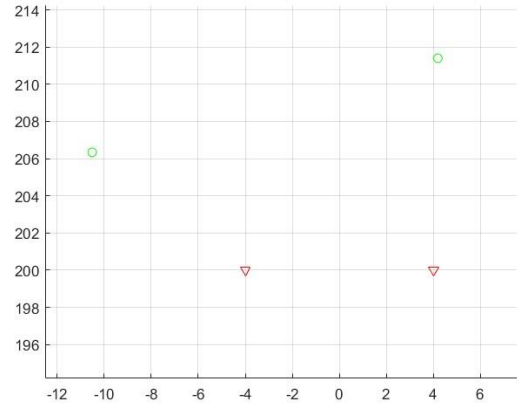
4 метри СКВ 10 дБ

Рисунок 4.4 — Моделювання алгоритму з відстанню 4 метри між двох БПЛА для СКВ вимірів потужностей в 1 і 10 дБ

При відстані між БПЛА у 8 метрів, алгоритм успішно розрізняє 2 БПЛА, при чому як для СКВ в 1 дБ так і для 10 дБ.



8 метри СКВ 1 дБ



8 метри СКВ 10 дБ

Рисунок 4.5 — Моделювання алгоритму з відстанню 8 метри між двох БПЛА для СКВ вимірів потужностей в 1 і 10 дБ

В результаті моделювання стає зрозумілим що спроможність визначення, алгоритмом, місцеположення двох БПЛА значно погіршується при їх наближенні на відстань менше ніж 8 метрів.

4.3 Висновок до розділу

1. Проведено статистичне моделювання розробленого алгоритму на предмет впливу k -ті вузлів і k -ті БПЛА на роботу алгоритму. В якості оцінки використовуємо ймовірність розрізнення алгоритмом усіх заданих БПЛА. Результати моделювання показали що для різних конфігурацій сенсорних мереж результати дещо відрізняються. Для 3 датчиків ймовірність розрізнення двох БПЛА складає 96%, а для десяти — 73%. Для конфігурації мережі з 20 датчиків ймовірність розрізнення двох БПЛА складає 100%, а для десяти — 90%. Як бачимо k -ть заданих БПЛА погіршує показник ймовірності розрізнення заданих БПЛА, в той же час підвищення k -ті сенсорів значно покращує роботу алгоритму.

2. Проведено моделювання алгоритму на предмет визначення місцеположення двох БПЛА які знаходяться близько один до одного. Визначено що при

відстанях між БПЛА менше 8 метрів алгоритм приймає хибні значення за істинні.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

В даному розділі виконаний аналіз алгоритму локалізації декількох БПЛА на основі сенсорної мережі с точки зору маркетингу та конкурентної спроможності при виході на ринок.

5.1 Опис ідеї проекту

Основна ідея проекту та напрямки застосування наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 — Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Виявлення, ідентифікація та визначення місцеположення БПЛА	Маркетинг	
	Транспортна сфера	Навігація БПЛА у місті зі щільною забудовою
	Промисловість	
	Розумні міста	
	Військові дії	

Визначення місцеположення БПЛА, а також їх моніторинг на сьогоднішній день дуже актуальна задача. Сучасні системи відстеження повинні забезпечувати виявлення і визначення місцеположення БПЛА. В Україні схожі системи виробляють в безліч компаній. Особливістю системи є використання розробленого алгоритму дозволить удешевити визначення місцеположення об'єктів та в рази збільшити об'єм оброблюваних даних і тим самим збільшити енергоефективність за рахунок зменшення розрахункових витрат. Система моніторингу буде складатись із пасивних датчиків, зчитувача, антен, блоку зберігання даних, користувацького інтерфейсу. Розроблений алгоритм буде взаємодіяти з даними зібраними з датчиків і переданих в базу даних, а звідти після розрахунків будуть відображатись поточні координати об'єктів.

5.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

Щоб проаналізувати потенційні техніко-економічні переваги ідеї скористаємося моделлю М.Портера, яка вирізняє п'ять основних факторів, що впливають на привабливість вибору ринку з огляду на характер конкуренції.

Конкурентів, що створюють системи моніторингу в Україні не дуже багато. З конкурентів можна виділити: Компанії «Smart Vision», «RFID Ukraine», розміщені у Києві.

Таблиця 5.2 — Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари\концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1	Доступ до ресурсів	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн		+	
2	Розмір капіталу	Невеликі	Великі	Великі	+		
3	Точність	Висока	Помірні	Помірні			+
4	Швидкодія	Висока	Низька	Помірна		+	
5	Контроль якості	Низький	Високий	Високий	+		
6	Постійні витрати	Середні	Дуже високі	Високі			+
7	Переваги у затратах виробництва	Низькі	Високі	Високі			+

5.3 Технологічний аудит ідеї проекту

Необхідно проаналізувати аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових таблиця 5.3.

Таблиця 5.3 — Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Система визначення місцеположення декількох БПЛА	Алгоритм розрахунку місцеположення	Наявна	Так
2		Оброблення даних	Наявна	Так
3		Взаємодія з базою даних	Потрібно розробити	Так
4		Відображення оброблених даних	Потрібно розробити	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Застосування розробленого алгоритму				

Для реалізації ідеї обрано розроблений алгоритм визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі і створення єдиної системи моніторингу.

5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В межах даного підрозділу проводиться визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Визначення цих можливостей дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Аналіз попиту проводиться в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 — Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3

2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	невідомо
---	-----------------------------------	----------

Продовження таблиці 5.4

3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для виходу (вказати характер обмежень)	Необхідні ліцензії, дозволи
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідно дотримуватись якості продукції
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідомо

Попит є, систему використовуватимуть різні виробничі, охоронні компанії та військові. Ринок дуже привабливий, така система зможе забезпечити постійний дохід, адже вона буде дешевою і буде виконувати свою функцію. Права з ринку можуть витіснити більш крупні конкуренти в яких буде більше постачальників сировини і вони охоплюватимуть більшу частину ринку.

5.5 Визначення потенційних клієнтів

Цільовою групою по збуту готової продукції будуть заводи, склади, будівельні заводи, військові, експорт в інші країни, продаж в місцеві організації. Характеристика потенційних клієнтів наведена в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Дешеві системи моніторингу які швидко розгортаються і можуть визначати місцеположення об'єктів	Приватні особи Будівельні заводи Приватні підприємці Військові	Дешевизна продукції	Продукція має відповідати нормам.

5.6 Аналіз ринкового середовища

Для аналізу скористаємося даними представленими в таблицях 5.6–5.7.

Таблиця 5.6 — Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Якість сировини	Датчики не відповідатимуть заявленим вимогам та характеристикам	Додаткова перевірка сировини
2	Оборот сировини	Якщо не буде достатньої кількості сировини, то прибутковість зменшиться	Знаходження нових постачальників
3	Не відповідність нормам	Продукція може бути нижчої якості ніж у конкурентів, що призведе до не конкурентноспроможності	Проведення досліджень і виявлення причин

Таблиця 5.7 — Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Дешевий алгоритм розрахунку координат	Технологія яка дозволить отримати послугу за менші кошти	Покращення точності алгоритму

5.7 Аналіз сильних та слабких сторін

Для аналізу сильних та слабких сторін системи потрібно провести SWOT-аналіз, що показує, які потенційні можливості матиме система. Аналіз проведено в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 — SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Простота Дешевизна	Слабкі сторони: Невідома компанія Велика конкуренція
Можливості: Розширення функціоналу Нові технології Масштабування	Загрози: Не відповідність нормам Не стабільність системи

Збільшення конкуренції призводить до зниження цінності продукту, що негативно може відобразитись на малих підприємствах, таких як наш проект. Низькі витрати на виробництво дозволяють отримати максимальний прибуток. Для поширення продукту він повинен володіти рядом факторів, які відрізняють його від існуючого конкурента. З огляду на SWOT-аналіз можна прийти до висновку що нема потреби розробляти альтернативи ринкового впровадження цього проекту. Розробимо три-рівневу маркетингову модель товару з метою уточнення ідеї продукту, його фізичних складових, особливостей його надання таблиця 5.9.

Таблиця 5.9 — Три-рівнева маркетингова модель

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар(згідно концепції), її основної функціональної вигоди
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	Нові способи відтворення результатів. Зниження вартості більш точного виміру дистанції
	Якість стандарти, нормативи, параметри тестування тощо
	Пакування
	Марка: назва організації-розробника + назва товару

Закінчення таблиці 5.9

III. Товар із підкріпленням	До продажу – рівень розробки
	Після продажу – система із розробленим алгоритмом
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності	

5.8 Висновки по розділу

Дана система має перспективу забезпечити визначення місцеположення об'єктів використовуючи ефективну і дешеву апарату, але є ряд факторів, які негативно вплинуть на вихід на ринок. Великі компанії можуть витіснити малий бізнес з ринку, але якщо система буде показувати кращі характеристики ніж аналоги, то можливе подальше розростання бізнесу і залучення нових інвесторів.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих технологій визначення місцеположення. Здійснений огляд безпроводних сенсорних мереж та складена класифікація БПЛА. Аналіз показує що попит на БПЛА зростає і виникає проблема у відстеженні їх руху. Тому зростає необхідність в алгоритмах виявлення і локалізації БПЛА використовуючи сенсори безпроводних сенсорних мереж.

2. Розглянуті основні готові системи для визначення місцеположення БПЛА аналіз показує що вони є дорогими і орієнтовані на велико-габаритні БПЛА. Розглянуто основні методи та основні алгоритми визначення місцеположення в безпроводних сенсорних мережах. Аналіз показує що найбільш доступним і дешевим є методом визначення місцеположень БПЛА є метод заснований на вимірах потужності сигналу.

Була розглянута та промодельована проблема ідентифікації прийнятої потужності сигналів від декількох БПЛА, які приходять на датчики сенсорної мережі. Після моделювання була виведена формула, яка дозволяє розрахувати к-ть співставлень потужностей прийнятих сигналів на датчикі сенсорної мережі, що дозволяє оцінити можливу реалізацію алгоритму в реальних умовах. Знання необхідних обчислювальних потужностей необхідних для алгоритму, дозволить підібрати необхідну елементну базу.

3. Розроблено алгоритм визначення місцеположення декількох БПЛА на основі сенсорної мережі використовуючи RSS-вимірювання. Був використаний метод найменших квадратів, та модель поширення сигналу у просторі.

4. Розроблений алгоритм був проаналізований на предмет впливу на роботу к-ті БПЛА і к-ті датчиків сенсорної мережі. Проведене статистичне моделювання показало що ймовірність розрізнення двох БПЛА між собою складає більше 95%. В результаті статистичного моделювання, було визначено наступне:

— Зі зростом k -ті БПЛА ймовірність їх розрізнення між собою знижується, так для конфігурації з трьох датчиків і 20 БПЛА ймовірність становить 56% що у 1.5 рази гірше результату для двох БПЛА;

— Зі зростом k -ті датчиків сенсорної мережі ймовірність розрізнення БПЛА між собою значно покращується. Так для конфігурації з 20 датчиків при 20 заданих БПЛА, ймовірність їх розрізнення становить 80% що у 1.5 рази краще ніж при конфігурації з трьох датчиків. Тоді маємо що при збільшенні k -ті датчиків у 6 разів отримуємо покращення результату у 1.5 рази.

Було проведено моделювання на предмет мінімальної відстані між БПЛА при якій алгоритм розрізняє 2 БПЛА. Результати показали що при відстані між БПЛА менш ніж 8 метрів, алгоритм починає приймати хибні місцеположення за істинні. Оскільки для відокремлення істинних значень місцеположення з поміж хибних алгоритм порівнює кожне місцеположення перераховане у відстань з відстанню отриманою з потужності сигналу яка не перевищує 3 середньо квадратичні відхилення. То виходить, що чим ближче два БПЛА один до одного, (а ми враховуємо 3 середньо квадратичні відхилення вимірювання потужності), тим сильніше починають перекриватися діапазони середньоквадратичних відхилень потужностей. І виходить так, що чим ближче один БПЛА наближається до іншого тим кучніше будуть розташовані хибні місцеположення, і тоді виходить що хибні місцеположення підпадають під нашу умову, і алгоритм приймає їх за істинні.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Jamalabdollahi and S. A. Zekavat, "Joint neighbor discovery and time of arrival estimation in wireless sensor networks via OFDMA," *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 10, pp. 5821–5833, 2015.
2. M. Pourkhaatoun and S. A. Zekavat, "A novel high resolution ICA-based TOA estimation technique for multi-path environments," *IET Commun.*, vol. 5, no. 10, pp. 1440–1452, 2011.
3. A. Kolbus, X. Yang, Z. Wang, J. Pourrostam, and M. Pourkhaatoun, "A novel implementation of doa estimation for node localization on software defined radios: Achieving high performance with low complexity," in *Proc. of IEEE ICSPC 2007*, Dubai.
4. H. Tong and S. A. Zekavat, "A novel wireless local positioning system via a merger of DS-CDMA and beamforming: Probability-of-detection performance analysis under array perturbations," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 1307–1320, 2007.
5. G. M. Djuknic and R. E. Richton, "Geolocation and assisted GPS," *IEEE Comput.*, vol. 34, no. 2, pp. 123–125, 2001.
6. S. A. Zekavat, *Wireless Local Positioning System (WLPS)*, US Patent 7,489,935, 2004.
7. I. A. Getting, "The global position system," *IEEE Spectr.*, vol. 30, no. 12, pp. 36–47, Dec. 1993.
8. M. Omerbashich, "Integrated INS/GPS navigation from a popular perspective," *J. Air Transp.*, vol. 7, no. 1, pp. 103–118, 2002.
9. J. Werb and C. Lanzl, "Designing a positioning system for finding things and people indoors," *IEEE Spectr.*, vol. 35, no. 9, pp. 71–78, Sep. 1998.
10. L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, "LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID," *Wireless Netw.*, vol. 10, no. 6, pp. 701–710, 2004..
11. H. Tong and S. A. Zekavat, "A novel wireless local positioning system via a merger of DS-CDMA and beamforming: Probability-of-detection performance

analysis under array perturbations,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, no. 3, pp. 1307–1320, 2007.

12. H. Tong and S. A. Zekavat, “A novel wireless local positioning system via asynchronous DS-CDMA and beam-forming: Implementation and perturbation analysis,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, no. 3, pp. 1307–1320, May 2007..

13. T. Williamson and N. A. Spencer, “Development and operation of the traffic alert and collision avoidance system (TCAS),” IEEE Control Syst. Mag., vol. 77, no. 11, pp. 1735–1744, Nov. 1989.

14. Economic Research Office. (2011). Information and Communications in Japan, Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC), Japan. [Онлайн]. Доступ: <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/eng/WP2011/2011-index.html>.

15. A. Qiantori, A. B. Sutiono, H. Hariyanto, H. Suwa, and T. Ohta, “An emergency medical communications system by low altitude platform at the early stages of a natural disaster in Indonesia,” J. Med. Syst., vol. 36, no. 1, pp. 41–52, 2010.

16. J. Rogers, “How drones are helping the Nepal earthquake relief effort,” FoxNews.Com. Apr. 2015. [Онлайн]. Доступ: <http://www.foxnews.com/tech/2015/04/30/how-drones-are-helpingnepal-earthquake-relief-effort.html>.

17. R. Debra and C. McCullough, Unmanned Aircraft Systems (UAS) Guidebook in Development. [Онлайн]. Доступ: http://cops.usdoj.gov/html/dispatch/08-2014/UAS_Guidebook_in_Development.asp.

18. S. W. Loke, “The Internet of Flying-Things: Opportunities and challenges with airborne fog computing and mobile cloud in the clouds,” Dept. Comput. Sci. Inf. Technol., La Trobe Univ., Melbourne VIC, Australia, Jul. 2015.

19. D. G. Baran, and B. B. Luu, “Ad hoc networking for unmanned ground vehicles: Design and evaluation at command, control, communications, intelligence, surveillance and reconnaissance on-the-move,” ARL, Adelphi, MD, USA, Army Res. Lab. Tech.

20. IAFC (International Association of Fire Chiefs). Use of Unmanned Aerial Vehicles in Public Safety Emergency Response, Adopted by IAFC Board of Directories. [Онлайн]. Доступ: <http://www.iafc.org/IAFC-position-Use-of-Unmanned-Aerial-Vehicles>.

21. C. C. Bolkcom, “Homeland security: Unmanned aerial vehicles and border surveillance,” Federation Amer. Sci., Congr. Res. Service (CRS), Washington, DC, USA, Tech. Rep., Jul. 2010.

22. M. T. McCaul, “Using unmanned aerial systems within the homeland: Security game changer?” House Committee Homeland Security, Washington, DC, USA, Tech. Rep. 112-107, Jul. 2012.

23. W. Staff, “Fighting forest fires before they get big—With drones,” WIRED, Jun. 2015. [Онлайн]. Доступ: <http://www.wired.com/2015/06/fighting-forest-fires-get-big-drones/>

24. J. K. Hart and K. Martinez, “Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science?” *Earth Sci. Rev.*, vol. 78, nos. 3–4, pp. 177–191, Oct. 2006.

25. P. Dockrill, “Facebook is preparing its Internet-beaming drone for maiden launch,” *ScienceAlert*. Accessed on Mar. 7, 2016. [Онлайн]. Доступ: <http://www.sciencealert.com/facebook-is-preparing-its-internet-beaming-drone-for-maiden-launch>.

26. D. Sahota, “Internet.org building drones to connect remote communities,” *Telecoms.com*, Mar. 2014. [Онлайн]. Доступ: <http://telecoms.com/239252/internet-org-building-drones-to-connect-remotecomunities/>.

27. T. Skinner, “Nokia and Du launch network testing drones in Dubai,” *Telecoms.com*, Jul. 2015. [Онлайн]. Доступ: <http://telecoms.com/430141/du-and-nokia-launch-network-testing-drones-in-dubai/>.

28. G. Kimchi et al., “Unmanned aerial vehicle delivery system,” U.S. Patent 20 150 120 094, Apr. 2015.

29. D. Lee, “Google plans drone delivery service for 2017,” BBC News. Accessed on Mar. 7, 2016. [Онлайн]. Доступ: <http://www.bbc.com/news/technology-34704868>.
30. Amazon, “Amazon prime air,” Accessed on Mar. 7, 2016. [Онлайн]. Доступ: <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>.
31. N. H. Motlagh, T. Taleb, and O. Arouk, “Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicles-Based Internet of Things Services: Comprehensive Survey and Future Perspectives,” *IEEE Internet of Things J.*, vol. 3, no. 6, Dec.. 2016, pp. 899–922.
32. N. H. Motlagh, M. Baga, and T. Taleb, “UAV Selection for a UAV-Based Integrative IoT Platform,” *Proc. IEEE GLOBECOM 2016*, Washington, DC, Dec. 2016.
33. Swain. D., G. Bishop-Hurley, and J. Griffiths. Automatic cattle control systems -grazing without boundaries. *Farming Ahead*, June 2009.
34. P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, , *TinyOS: An Operating System for Sensor Networks*, Computer Science Division, Electrical Engineering and Computer Sciences Department, University of California Berkeley.
35. Q. Cao, T. Abdelzaher, J. Stankovic, and T. He, *The LiteOS Operating System: Towards Unix-Like Abstractions for Wireless Sensor Networks*, *IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks 2008*.
36. D. Guinard, V. Trifa, and E. Wilde, *A Resource Oriented Architecture for the Web of Things*. *Internet of Things 2010 International Conference (IoT 2010)*, Tokyo, Japan, November 29–December 1, 2010.
37. V. Trifa, S. Wieland, D. Guinard, and B. Thomas, *Design and Implementation of a Gateway for Web-Based Interaction and Management of Embedded Devices*. *International Workshop on Sensor Network Engineering (IWSNE 09)*, Marina del Rey, CA, June 2009.
38. D. Guinard, *A Web of Things Application Architecture—Integrating the Real-World into the Web*, ETH, Zurich, 2011.

39. D. Guinard, V. Trifa, and M. Fischer, Sharing Using Social Networks in a Composable Web of Things. First IEEE International Workshop on the Web of Things (WOT2010), IEEE PerCom 2010, Mannheim, Germany, March 2010..
40. T.-Y. Chung, I. Mashal, O. Alsaryrah, V. Huy, W.-H. Kuo, and D.P. Agrawal, Social Web of Things: A Survey. International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), Seoul, December 15–18, 2013, pp. 570–575. doi:10.1109/ICPADS.2013.102.
41. IEEE (2006) IEEE Standard for Information Technology—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 15.4. Standard 802.15.4-2006, IEEE, London, 1–320.
42. 1451.5-2007 - IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuator -- Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats., doi/10.1109/IEEESTD.2007.4346346 [Статья].
43. SmartVineyard Solution., Электронный ресурс: <http://smartvineyard.com/>.
44. Sherine M. Abd El-kader and Basma M. Mohammad El-Basioni. Precision Farming Solution in Egypt Using the Wireless Sensor Network Technology. Egyptian Informatics Journal, 14(3):221–233, 2013. ISSN 1110-8665.
45. M. Mafuta, M. Zennaro, A Bagula, G. AultSuccessful deployment of a Wireless Sensor Network for precision agriculture in Malawi. In IEEE 3rd International Conference on Networked Embedded Systems for Every Application (NESEA), pages 1–7, Dec 2012.
46. J. A. Lopez Riquelmea, F. Sotoa, J. Suardiaza, P. Sancheza, A. Iborraa, and J. A. Verab. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. Computers and Electronics in Agriculture, 68(1), 2009.
47. H. Shin, K. Choi, Y. Park, J. Choi, and Y. Kim, “Security analysis of fhss-type drone controller,” in Security Analysis of FHSS-type Drone Controller, vol. 9503, 01 2016, pp. 240–253.

48. M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir, and I. Guvenc, "Micro-uav detection and classification from rf fingerprints using machine learning techniques," in 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019, pp. 1–13.
49. M. Al-Sa'd, A. Al-Ali, A. Mohamed, "Rf-based drone detection and identification using deep learning approaches: An initiative towards a large open source drone database," *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, 05 2019.
50. F. Le Roy, C. Roland, D. Le Jeune, and J. Diguët, "Risk assessment of sdr-based attacks with uavs," in 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), 2019, pp. 222–226.
51. E. Unlu, E. Zenou, N. Riviere, and P.-E. Dupouy, "Deep learning-based strategies for the detection and tracking of drones using several cameras," *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 11, no. 1, p. 7, 2019. [Онлайн]. // Доступ: <https://doi.org/10.1186/s41074-019-0059-x> .
52. K. Muhammad, T. Hussain, M. Tanveer, G. Sannino, "Cost-effective video summarization using deep cnn with hierarchical weighted fusion for iot surveillance networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 4455–4463, 2019.
53. P. Andras̃i, T. Radis̃ic', M. Mus̃tra, and J. Ivos̃evic', "Night-time detection of uavs using thermal infrared camera," *Transportation Research Procedia*, vol. 28, pp. 183–190, 01 2017.
54. B.O'Keefe, "Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques," ECE Senior Capstone Project, 2017.
55. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007..
56. J. Zhu and G.D. Durgin, "Indoor/Outdoor Location of Cellular Handsets Based on Received Signal Strength," *Vehicular Technology conference*, vol. 1, pp. 92–69, 2005.
57. B. Li, "Terrestrial Mobile User Positioning Using TDOA and Fingerprinting Techniques," PhD thesis, School of Surveying & Spatial Information Systems, University of New South Wales, 2006.

58. Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang and M. P. J. Fromherz, "Localization from mere connectivity," in Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc Networking & Computing, Annapolis, Maryland, USA, pp. 201–212, 2003.
59. N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "Adaptive beacon placement," in Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems, Phoenix, Arizona, April 2001.
60. K. Langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison," *Computer Networks*, Vol. 43, pp. 499–518, 2003.
61. N. Bulusu, V. Bychkovskiy, D. Estrin and J. Heidemann, "Scalable, ad hoc deployable RFbased localization," in Proceedings of Grace Hopper Celebration of Women in Computing Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, 2002.
62. J. Bachrach and C. Taylor, "Localization in sensor networks," *Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures*, ISBN: 978-0-471-68472-5, 2005.
63. S. Fitzpatrick and L. Meertens, "Diffusion based localization," private communication, 2004.
64. A. Savvides, C.-C. Han, and M. B. Srivastava. Dynamic fine-grained localization in adhoc networks of sensors. In Proceedings of the 7th Annual Conference on Mobile Computing and Networking, pages 166 – 179, Rome, Italy, July 2001.
65. S. Simic and S. Sastry. Distributed Localization in Wireless Ad Hoc Networks. Memorandum No. UCB/ERL M02/26, University of California, Berkeley, 2002.
66. Cameron Whitehouse. The Design of Calamari: An Ad-Hoc Localization System for Sensor Networks. Master's thesis, University of California at Berkeley, 2002.

67. T. He, C. Huang, B. Blum, J. Stankovic, and T. Abdelzaher. Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks. Paper Submitted to MobiCom 2003.

68. Chuan-Chin Pu, Chuan-Hsian Pu and Hoon-Jae Lee (2011). Indoor Location Tracking Using Received Signal Strength Indicator, Emerging Communications for Wireless Sensor Networks, (Ed.), ISBN: 978-953-307-082-7, InTech, // <http://www.intechopen.com/books/emerging-communications-for-wireless-sensornetworks/indoor-location-tracking-using-received-signal-strength-indicator>.

69. R.-H. Wu, Y.-H. Lee, H.-W. Tseng, Y.-G. Jan, and M.-H. Chuang, "Study of characteristics of rssi signal, " in Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on, April 2008, pp. 1-3.

70. Wang Jian-guo, Wang Zhong-sheng, Zhang Ling, and Shi Fei. An improved range-based localization algorithm in wireless sensor network. In Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), // 2011 4th International Conference on, volume 4, pages 2157-2161, oct. 2011..

71. K. Heurtefeux and F. Valois, "Is rssi a good choice for localization in wireless sensor network?" in Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2012 IEEE 26th International Conference on, march 2012, pp. 732-739..

72. Zhang Zhenghua ; Dai Lei ; Li Jiawen ; Tang Xu, "Research of optimizing weighted centroid distance correction localization algorithm based on RSSI". // Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2013 IEEE 11th International Conference on, volume 2, pp.552 – 556, 2013..

73. R.-H. Wu, Y.-H. Lee, H.-W. Tseng, Y.-G. Jan, and M.-H. Chuang, "Study of characteristics of rssi signal, " in Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on, April 2008, pp. 1-3.

74. Michael Tsai: Path-loss and Shadowing (Large-scale Fading) 2017/10/23.

75. Mehra, R., Singh, A.: Real Time RSSI Error Reduction in Distance Estimation Using RLS Algorithm. In: Proceedings of the IEEE 3rd International

Advance Computing Conference, IACC 2013, Ghaziabad, India, February 22-23,
pp. 661–665 (2013).

ДОДАТОК А

АЛГОРИТМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БАГАТЬОХ БПЛА НА ОСНОВІ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

*Гайдай А. В., Чмир Р. В., Голодяєва П.В., Ходаницький О.О.
(Науковий керівник Товкач І.О.)*

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

В сучасному світі актуальність безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зростає з кожним роком через їх великий потенціал у різних галузях. Разом з цим збільшуються вимоги до контролю руху БПЛА. Робота БПЛА безпосередньо пов'язана з обміном інформацією з пультом оператора і в переважній більшості для цих цілей використовується технологія WI-FI з несучою частотою 2,4-5 GHz. Тому локалізація БПЛА так чи інакше пов'язана з обробкою і класифікацією декількох прийнятих сигналів для того, щоб визначити, приналежність кожного отриманого сигналу до відповідного БПЛА.

Зазвичай сигнали класифікуються за трьома складовими: амплітуда прийнятого сигналу, частота прийнятого сигналу, фаза прийнятого сигналу. Визначення відстані до джерела сигналу на основі амплітуди сигналу, є найдешевшим та найбільш доступним методом для визначення місцезнаходження БПЛА, оскільки для методу за частотою потрібно локатори або ж радари, що є досить складним та дорогим обладнанням. А метод на основі частоти потребує синхронізації між приймачем та передавачем, чого досягти для даної задачі складно, хоча в своїй основі і є найбільш точним.

При визначенні положення об'єкту за допомогою сенсорної мережі використовуються виміряні значення потужності прийнятих сигналів (RSS -receive signal strength). Потужність визначається за моделлю поширення, має вигляд[1]:

$$P_{ik} = P_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left(\frac{R_{ik}}{R_0} \right) + v_{ik}, \quad (1)$$

де P_{ik} — виміряна потужність k -го БПЛА, отримана i -тим сенсором, який знаходиться на відстані R_{ik} , $i = \overline{1, S}$, S — кількість сенсорів, $k = \overline{1, U}$, U — кількість БПЛА; P_0 — потужність сигналу на відомій відстані R_0 ; a — коефіцієнт загасання в середовищі; v_{ik} — помилка вимірювання потужності сигналу.

Оскільки кожен сенсор приймає U сигналів від БПЛА, то кількість варіантів співставлень сигналу до БПЛА визначається за формулою

$$L = U + US(U - 1). \quad (2)$$

Таким чином проводиться розрахунок L місцеположень об'єктів за допомогою розв'язки системи рівнянь методом найменших квадратів (МНК) в векторному виді:

$$\omega_l = 0.5(A^T A)^{-1} A^T B, \quad (3)$$

де $\omega_l^T = (x_l, y_l, R_l)$ — вектор, що включає оцінки координат БПЛА;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_i & y_i & -0.5 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 - 10^{\frac{P_0 - P_1}{5 \cdot a}} \\ x_2^2 + y_2^2 - 10^{\frac{P_0 - P_2}{5 \cdot a}} \\ \dots \\ x_i^2 + y_i^2 - 10^{\frac{P_0 - P_{ik}}{5 \cdot a}} \end{bmatrix}.$$

x_i, y_i — положення i -того сенсора в заданій сітці координат; x_l, y_l — координати що визначаються.

Отримані L місцеположень БПЛА, з яких U місцеположень БПЛА дійсні. Для визначення необхідних U місцеположень БПЛА порівнюються вимірні потужності та отримані L місцеположень БПЛА, які перераховані в дальність від сенсора до БПЛА - R_{ik} та R_{il} , відповідно.

$$R_{ik} = R_0 \cdot 10^{\frac{P_0 - P_{ik} + v_{ik}}{10 \cdot a}}; \quad (4)$$

$$R_{il} = \sqrt{(x_l - x_i)^2 + (y_l - y_i)^2}. \quad (5)$$

Ймовірність того, що випадкова величина відхилиться від свого математичного очікування більш ніж на три середньоквадратичні відхилення, не перевищує 0,28%. Тому дисперсія вимірювання дальності i -тим сенсором обчислюється за допомогою виразів

$$\sigma_{r_{ik}}^2 = \frac{(r_{ik \max} - r_{ik \min})^2}{12}; \quad r_{ik \max} = R_{ik} \cdot 10^{\frac{3 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}}; \quad r_{ik \min} = R_{ik} \cdot 10^{\frac{-3 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}}.$$

Нерівність, яка повинна виконуватись для знаходження дійсних U положень БПЛА має вид

$$R_{ik} - 3\sigma_{r_{ik}} \leq R_{il} \leq R_{ik} + 3\sigma_{r_{ik}}. \quad (6)$$

Моделювання алгоритму (2)-(6) проведено для конфігурації сенсорної мережі (рис. 2.1, а), яка складається з трьох датчиків з координатами [2]: $D_1 (100; 0)$, $D_2 (75; -75)$, $D_3 (-75; -75)$. СКВ помилки вимірювання $\sigma_p = 1$ дБ.

На рис. 1 показані координати БПЛА в результаті розрахунку системи рівнянь (2). Оскільки невідомо відповідність сигналів до БПЛА, то на першому етапі алгоритму отримуємо 8 фактичних координат. Другий етап алгоритму дозволить відкинути помилкові координати та виявити дійсні, як показано на рис. 2.

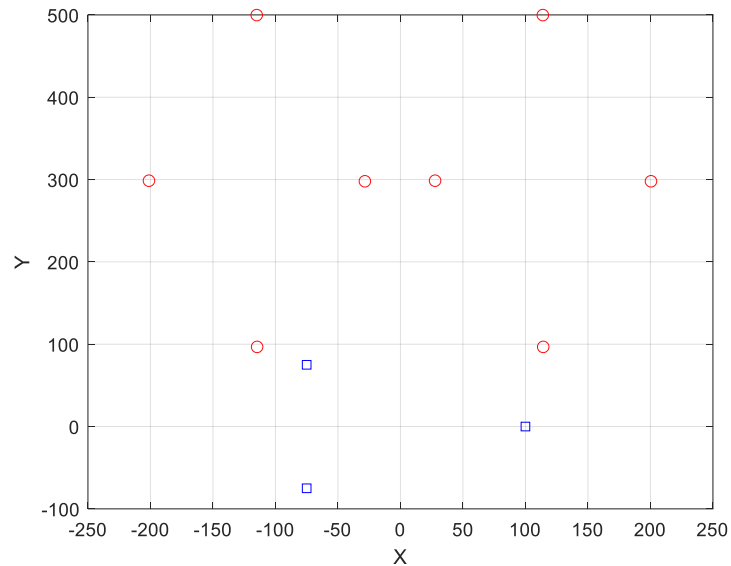


Рисунок 1. — L положень БПЛА

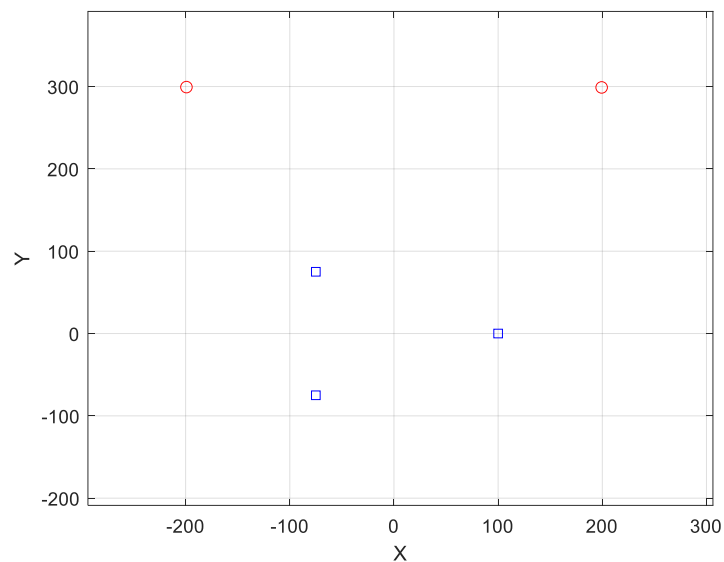


Рисунок 2. — U положень БПЛА, які відповідають дійсним.

Подальшим напрямком роботи стає застосування алгоритмів траєкторної фільтрації для зменшення обчислюваних витрат, які виникають при розрахунку L місцеположень БПЛА.

Література

1. C. Liu *et al.*, "RSS Distribution-Based Passive Localization and Its Application in Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2883-2895, April 2016, doi: 10.1109/TWC.2015.2512861.
2. I. O. Tovkach, S. Y. Zhuk, O. S. Neumin and V. O. Chmelov, "Analysis of Influence of Number of Sensors on Accuracy of Radio Source Position Determination Based on TDOA-, RSS-

and AOA- Measurements," *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 217-220, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575365.