

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

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра обчислювальної техніки

До захисту допущено:  
В.о завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Артем ВОЛОКИТА

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерні системи та мережі»  
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»**

на тему: Система локального позиціонування

об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями

Виконав : студент \_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ курсу, групи ІО-25  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Вальваков Олег Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ ст. викл. Алєнін О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант (нормоконтроль) ст. викл., док. філос. Міщенко Л.Д.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент доц. кнд. наук Деведжіогуллари А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ - 2026 р.

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

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти - перший (бакалавр)

Освітньо-професійна програма

«Комп'ютерні системи та мережі»

спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

**До захисту допущено:**

**В.о завідувача кафедри**

\_\_\_\_\_ Артем ВОЛОКИТА

(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**

на бакалаврський дипломний проєкт студента

\_\_\_\_\_ Вальвакова Олега Олександровича

1. Тема проєкту Система локального позиціонування  
об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями  
керівник проєкту Аленін О.І., ст.вик

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

затверджені наказом по університету від 3 червня 2026 року №2055-с

2. Термін здачі студентом закінченого проєкту 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту технічна документація, науково-технічні джерела,  
теоретичні та експериментальні дані

4. Зміст пояснювальної записки

Розділ 1. Аналіз предметної області та огляд технологій локального  
позиціонування.

Розділ 2. Проектування архітектури системи та формування технічних  
висновок.

Розділ 3.Розробка математичної моделі та алгоритмів позиціонування.

Розділ 4. Тестування та оцінювання точності системи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним позначенням обов’язкових креслень)

Структурна схема системи. Функціональна схема. Принципова схема.

6. Консультанта проєкту, з вказівкою розділів проєкту, які до них вносяться

| Розділ        | Консультант | Підпис, дата   |                  |
|---------------|-------------|----------------|------------------|
|               |             | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Нормоконтроль | Міщенко Л.Д |                |                  |
|               |             |                |                  |

7. Дата видачі завдання «10» березня 2026 р.

#### Календарний план

| №<br>п/п | Найменування етапів<br>дипломного проєкту                   | Терміни виконання<br>етапів проєкту | Примітки |
|----------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| 1.       | <i>Затвердження теми проєкту</i>                            | 10.03.2026-12.04.2026               |          |
| 2.       | <i>Вивчення та аналіз завдання</i>                          | 12.04.2026-14.04.2026               |          |
| 3.       | <i>Аналіз предметної області та<br/>огляд технологій</i>    | 14.16.2026-16.04.2026               |          |
| 4.       | <i>Порівняльний аналіз технологій</i>                       | 16.04.2026-18.04.2026               |          |
| 5.       | <i>Огляд протоколів передачі даних</i>                      | 18.04.2026-19.04.2026               |          |
| 6.       | <i>Проектування системи та технічне<br/>завдання</i>        | 19.04.2026-22.04.2026               |          |
| 7.       | <i>Розробка алгоритму роботи ПЗ</i>                         | 22.04.2026-30.04.2026               |          |
| 8.       | <i>Оформлення пояснювальної записки</i>                     | 30.04.2026-05.06.2026               |          |
| 9.       | <i>Проходження нормконтролю та<br/>перевірки на плагіат</i> | 05.06.2026-14.06.2026               |          |
| 10       | <i>Захист дипломного проєкту</i>                            | 20.06.2026                          |          |

Студент-дипломник

Олег Вальваков

(підпис)

Керівник проєкту

Олег Алєнін

## АНОТАЦІЯ

Робота присвячена розробці апаратно-програмної системи локального позиціонування об'єктів на основі мікроконтролерів ESP32 з ультраширокопasmовими (UWB) радіомодулями DWM1000. Проведено аналіз існуючих технологій радіопозиціонування, методів обчислення координат (трилатерація, TDoA, TWR, фільтр Калмана) та апаратних платформ. Виконано порівняльний аналіз комерційних систем, виявлено їхні недоліки.

Сформульовано технічне завдання, розроблено архітектуру системи, визначено вимоги до неї. Наведено математичну модель трилатерації з використанням методу найменших квадратів, описано протокол DS-TWR та дискретний фільтр Калмана. Реалізовано прошивку вузлів на базі бібліотеки DW1000Ranging.

Виконано модульне тестування алгоритму DS-TWR, симуляційне тестування трилатерації методом Монте-Карло, а також натурний експеримент з вимірювання відстаней на парі «тег-анкер». Отримані результати підтверджують досягнення точності позиціонування в межах 11-18 см, що задовольняє вимоги технічного завдання.

## ANOTATION

The work is devoted to the development of a hardware-software system for indoor local positioning based on ESP32 microcontrollers with Ultra-Wideband (UWB) DWM1000 radio modules. The analysis of existing radio positioning technologies, coordinate calculation methods (trilateration, TDoA, TWR, Kalman filter) and hardware platforms was carried out. A comparative analysis of commercial systems was performed, and their disadvantages were identified.

The technical specifications were formulated, the system architecture was developed, and the requirements for it were determined. The mathematical model of trilateration using the least squares method is presented. The DS-TWR protocol and the discrete Kalman filter are described. The firmware of the nodes based on the DW1000Ranging library was implemented.

Modular testing of the DS-TWR algorithm, simulation testing of trilateration by the Monte Carlo method, as well as a full-scale experiment on distance measurement using a “tag-anchor” pair were performed. The obtained results confirm that the positioning accuracy reaches 11-18 cm, which meets the requirements of the technical specifications. The achieved results are analyzed, the main limitations (NLOS degradation, insufficient number of operational modules) are identified, and directions for further research are outlined..

| № рядка | Формат | Значення           | Найменування                        | Кіл. листів | № екземпляра | Додаток |
|---------|--------|--------------------|-------------------------------------|-------------|--------------|---------|
| 1       |        |                    | Документація загальна               |             |              |         |
| 2       |        |                    | Знову розроблена                    |             |              |         |
| 3       |        |                    |                                     |             |              |         |
| 4       |        |                    |                                     |             |              |         |
| 5       | A4     | ІАЛЦ.468300.002 ТЗ | Система локального позиціонування   | 5           |              |         |
| 6       |        |                    | об'єктів на основі мікроконтролерів |             |              |         |
| 7       |        |                    | з радіомодулями                     |             |              |         |
| 8       |        |                    | Технічне завдання                   |             |              |         |
| 9       |        |                    |                                     |             |              |         |
| 10      | A4     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Система локального позиціонування   | 45          |              |         |
| 11      |        |                    | об'єктів на основі мікроконтролерів |             |              |         |
| 12      |        |                    | з радіомодулями                     |             |              |         |
| 13      |        |                    | Пояснювальна записка                |             |              |         |
| 14      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 15      | A4     | ІАЛЦ.468300.004 Д1 | Система локального позиціонування   | 1           |              |         |
| 16      |        |                    | об'єктів на основі мікроконтролерів |             |              |         |
| 17      |        |                    | з радіомодулями                     |             |              |         |
| 18      |        |                    | Функціональна схема                 |             |              |         |
| 19      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 20      | A4     | ІАЛЦ.468300.005 Д2 | Система локального позиціонування   | 1           |              |         |
| 21      |        |                    | об'єктів на основі мікроконтролерів |             |              |         |
| 22      |        |                    | з радіомодулями                     |             |              |         |
| 23      |        |                    | Принципова схема                    |             |              |         |
| 24      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 25      | A4     | ІАЛЦ.468300.006 Д3 | Система локального позиціонування   | 1           |              |         |
| 26      |        |                    | об'єктів на основі мікроконтролерів |             |              |         |
| 27      |        |                    | з радіомодулями                     |             |              |         |
| 28      |        |                    | Структура схема алгоритму           |             |              |         |
| 29      |        |                    | Програмно апаратного комплексу      |             |              |         |
| 30      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 31      | A4     | ІАЛЦ.468300.007 Д4 | Текст програмного коду              | 5           |              |         |
| 32      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 33      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 34      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 35      |        |                    |                                     |             |              |         |
| 36      |        |                    |                                     |             |              |         |

|           |                   |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
|-----------|-------------------|----------|-------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|------|------|---------|--|
|           |                   |          |       |      | ІАЛЦ.468300.001 ОА                                                                                          |  |  |  |      |      |         |  |
| Зм.       | Арк.              | № докум. | Підп. | Дата | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів з<br>радіомодулями<br>Опис альбому |  |  |  | Літ. | Арк. | Аркушів |  |
| Розроб.   | Вальваков О.О     |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
| Перевір.  | Аленін О.І        |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
| Реценз.   | Деведжіоглари А.В |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
| Н. контр. | Міщенко Л.Д       |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
| Затверд.  | Волокита А.М.     |          |       |      |                                                                                                             |  |  |  |      |      |         |  |
|           |                   |          |       |      | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25                                                             |  |  |  |      |      |         |  |

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ**

на тему: «Системи локального позиціонування об'єктів на основі  
мікроконтролерів з радіомодулями»

## ЗМІСТ

|                                              |   |
|----------------------------------------------|---|
| 1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ..... | 2 |
| 2. ПІДСТАВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ.....                | 2 |
| 3. МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ.....         | 2 |
| 4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ.....                     | 3 |
| 5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....                      | 3 |
| 5.1 Вимоги до розробленого продукту.....     | 3 |
| 5.2 Вимоги до програмного забезпечення.....  | 3 |
| 5.3 Вимоги до апаратної частини .....        | 4 |
| 6. ЕТАПИ РОЗРОБКИ .....                      | 5 |

|           |      |                   |       |      |                                                                                                                  |                                                 |      |         |   |  |  |
|-----------|------|-------------------|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|---------|---|--|--|
|           |      |                   |       |      | ІАЛЦ.468300.002 ТЗ                                                                                               |                                                 |      |         |   |  |  |
| Зм.       | Арк. | № докум.          | Підп. | Дата | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів з<br>радіомодулями<br>Технічне завдання | Літ.                                            | Арк. | Аркушів |   |  |  |
| Розроб.   |      | Вальваков О.О.    |       |      |                                                                                                                  | Т                                               |      | 1       | 5 |  |  |
| Перевір.  |      | Алєнін О.І        |       |      |                                                                                                                  |                                                 |      |         |   |  |  |
| Реценз.   |      | Деведжіоглари А.В |       |      |                                                                                                                  | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |      |         |   |  |  |
| Н. контр. |      | Міщенко Л.Д.      |       |      |                                                                                                                  |                                                 |      |         |   |  |  |
| Затверд.  |      | Волокита А.М.     |       |      |                                                                                                                  |                                                 |      |         |   |  |  |

## 1. НАЙМЕНУВАННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ

Технічне завдання видано на розробку апаратно-програмного комплексу для локального позиціонування об'єктів у реальному часі на основі мікроконтролерів ESP32 з ультраширокосмуговими (UWB) радіомодулями DWM1000.

Областю застосування системи є визначення двовимірних координат мобільних об'єктів (тегів) у закритих приміщеннях та на відкритих ділянках із точністю до 30 см, передача координатних даних на центральний сервер, відображення позицій об'єктів в режимі реального часу, а також моніторинг переміщень із можливістю налаштування геозон та автоматичних сповіщень.

Система призначена для використання в логістиці та складському господарстві, промислових підприємствах, агропромисловому секторі (моніторинг тварин і техніки), медичних закладах (контроль переміщень персоналу та пацієнтів), а також в науково-дослідних та освітніх установах.

## 2. ПІДСТАВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ

Підставою для розробки системи є завдання на виконання бакалаврського дипломного проєкту за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» освітньо-професійної програми «Комп'ютерні системи та мережі».

Розробка виконується відповідно до вимог кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

## 3. МЕТА ТА ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ

Метою даної роботи є розробка функціонального прототипу системи локального позиціонування об'єктів на основі ультраширокосмугової (UWB) технології та мікроконтролерів ESP32, яка забезпечує точне визначення координат мобільних вузлів у режимі реального часу.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.002 ТЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 2    |

Призначення розробки - продемонструвати практичну реалізованість точного позиціонування у приміщеннях на базі загальнодоступних компонентів із відкритим вихідним кодом, знизивши вартість системи в 10-50 разів порівняно з існуючими комерційними рішеннями при збереженні точності не гірше 30 см.

#### **4. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ**

Джерелом розробки даного дипломного проекту є офіційні технічні специфікації та документація виробника модуля DWM1000 (Qorvo / DecaWave), стандарт IEEE 802.15.4a/z, публікації та статті у мережі Інтернет, аналітичні звіти ринку систем RTLS (Real-Time Location Systems), а також результати власних прикладних досліджень, проведених у рамках дисципліни «Основи технологій R&D».

#### **5. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

##### **5.1 Вимоги до розробленого продукту**

Розроблена система має виконувати такі вимоги:

Визначення двовимірних координат (X, Y) мобільного об'єкта (тега) з точністю не гірше 30 см у 90 % вимірів у закритому приміщенні та не гірше 100 см на відкритому просторі.

Одночасне відстеження не менше 4 незалежних тегів без суттєвого зниження точності або частоти оновлення. Частота оновлення координат - не менше 1 Гц у стандартному режимі, до 10 Гц у режимі підвищеної частоти.

Автономна робота вузла-тега від вбудованої батареї не менше 7 діб у стандартно мережі вимірювань

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.002 ТЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 3    |

## 5.2. Вимоги до апаратної частини

UWB-радіомодуль: DecaWave DWM1000 (IEEE 802.15.4a), канал 5, швидкість 6,8 Мбіт/с, SPI-інтерфейс.

Мікроконтролер тега та шлюзу: ESP32-WROOM-32 або ESP32-S3 із підтримкою Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2.

Мікроконтролер анкера: ESP32-WROOM-32 або STM32L476 (для зниження енергоспоживання анкерів із автономним живленням).

Батарея тега: акумулятор ємністю не менше 3000 мАг, напруга 3,7 В; контролер заряду TP4056 або аналог.

Мінімальна кількість анкерів: 3 одиниці для двовимірного позиціонування ; рекомендована кількість - 4 і більше для підвищення точності та резервування.

Шлюз: Raspberry Pi 4 Model B (2 ГБ RAM) або сумісний одноплатний комп'ютер із Linux для систем із більше ніж 10 тегами; ESP32 - для систем до 10 тегів.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.002 ТЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 4    |

## 6. ЕТАПИ РОЗРОБКИ

| Назви етапів розробки                       | Терміни виконання етапів розробки |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Вибір теми дипломного проєкту</i>        | <i>10.03.2026-11.03.2026</i>      |
| <i>Проектування архітектури системи</i>     | <i>11.03.2026-12.03.2026</i>      |
| <i>Розробка апаратної частини</i>           | <i>12.03.2026-13.04.2026</i>      |
| <i>Розробка базової прошивки</i>            | <i>13.04.2026-14.04.2026</i>      |
| <i>Налагодження зв'язку та стабілізація</i> | <i>14.04.2026-17.04.2026</i>      |
| <i>Реалізація алгоритму трилатерації</i>    | <i>17.04.2026-22.04.2026</i>      |
| <i>Тестування точності позиціонування</i>   | <i>22.05.2026-29.05.2026</i>      |
| <i>Написання пояснювальної записки</i>      | <i>29.05.2026-5.06.2026</i>       |

# ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

на тему: «Система локального позиціонування об'єктів  
на основі мікроконтролерів з радіомодулями»

Київ - 2026

## Зміст

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ</b> .....                                       | 4  |
| <b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ</b>        | 7  |
| 1.1 Актуальність задачі локального позиціонування.....               | 7  |
| 1.2 Огляд технологій радіопозиціонування.....                        | 7  |
| 1.3 Методи обчислення координат.....                                 | 9  |
| 1.4 Огляд апаратних платформ.....                                    | 10 |
| 1.5 Аналіз існуючих систем і рішень.....                             | 12 |
| 1.6 Огляд протоколів передачі даних.....                             | 13 |
| <b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ</b> .....                                     | 14 |
| <b>РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ</b>            | 15 |
| 2.1 Постановка задачі та мета проекту.....                           | 15 |
| 2.2 Вимоги до системи.....                                           | 15 |
| 2.3 Архітектура системи.....                                         | 16 |
| 2.4 Структурна схема системи.....                                    | 17 |
| 2.5 Діаграма класів програмного забезпечення.....                    | 17 |
| 2.6 Алгоритм роботи програмного забезпечення.....                    | 18 |
| 2.7 Технічне завдання до розробки.....                               | 18 |
| <b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ</b> .....                                     | 21 |
| <b>РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ</b> ..... | 23 |
| 3.1 Математична модель трилатерації .....                            | 23 |
| 3.2 Метод найменших квадратів для надлишкових вимірювань .....       | 24 |
| 3.3 Протокол двостороннього вимірювання дальності (DS-TWR) .....     | 25 |
| 3.4 Фільтрація Калмана для згладжування координат.....               | 26 |
| 3.5 Псевдокод алгоритму позиціонування .....                         | 27 |

|           |                   |          |       |      |                                                                                                                         |                                                 |      |         |  |
|-----------|-------------------|----------|-------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|---------|--|
|           |                   |          |       |      | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ                                                                                                      |                                                 |      |         |  |
| Зм.       | Арк.              | № докум. | Підп. | Дата | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів з<br>радіомодулями<br><br>Пояснювальна записка | Літ.                                            | Арк. | Аркушів |  |
| Розроб.   | Вальваков О.О     |          |       |      |                                                                                                                         |                                                 |      |         |  |
| Перевір.  | Аленін О.І        |          |       |      |                                                                                                                         |                                                 | 1    | 94      |  |
| Реценз.   | Деведжігулари А.В |          |       |      |                                                                                                                         | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |      |         |  |
| Н. контр. | Міщенко Л.Д.      |          |       |      |                                                                                                                         |                                                 |      |         |  |
| Затверд.  | Волокита А.М.     |          |       |      |                                                                                                                         |                                                 |      |         |  |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ.....                                         | 28 |
| <b>РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ</b>       |    |
| 4.1 Методологія тестування .....                                 | 29 |
| 4.2 Модульне тестування (DS-TWR) .....                           | 29 |
| 4.3 Симуляційне тестування трилатерації .....                    | 31 |
| 4.4 Вплив кількості анкерів та їх розташування на точність ..... | 33 |
| 4.5 Вплив шуму вимірювань на точність трилатерації .....         | 33 |
| 4.6 Аналіз досягнутих результатів .....                          | 35 |
| 4.7 Обмеження та виявлені проблеми .....                         | 36 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ.....                                         | 38 |
| ВИСНОВКИ.....                                                    | 41 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                  | 43 |

|           |                   |          |       |      |                                                                                                                     |                                                 |      |
|-----------|-------------------|----------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|
|           |                   |          |       |      | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ                                                                                                  |                                                 |      |
| Зм.       | Арк.              | № докум. | Підп. | Дата |                                                                                                                     |                                                 |      |
| Розроб.   | Вальваков О.О     |          |       |      | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів з<br>радіомодулями<br>Пояснювальна записка |                                                 |      |
| Перевір.  | Аленін О.І        |          |       |      |                                                                                                                     |                                                 |      |
| Реценз.   | Деведжіогларі А.В |          |       |      |                                                                                                                     |                                                 |      |
| Н. контр. | Міщенко Л.Д.      |          |       |      |                                                                                                                     |                                                 |      |
| Затверд.  | Волокита А.М.     |          |       |      |                                                                                                                     |                                                 |      |
|           |                   |          |       |      |                                                                                                                     | Літ.                                            | Арк. |
|           |                   |          |       |      |                                                                                                                     | 1                                               | 94   |
|           |                   |          |       |      |                                                                                                                     | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |      |

## Перелік скорочень

|        |                                                                                    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| UWB    | (Ultra-Wideband) Ультраширокопasmовий зв'язок                                      |
| ToF    | (Time of Flight) Час прольоту сигналу                                              |
| TWR    | (Two-Way Ranging) двостороннє вимірювання дальності                                |
| DS-TWR | (Double-Sided Two-Way Ranging) Двостороннє вимірювання дальності з обох сторін     |
| TDоА   | (Time Difference of Arrival) Різниця часу надходження сигналу                      |
| LoS    | (Line of Sight) Пряма видимість                                                    |
| NLOS   | (Non-Line of Sight) Відсутність прямої видимості                                   |
| MAE    | (Mean Absolute Error) Середня абсолютна похибка                                    |
| RMSE   | (Root Mean Square Error) Середньоквадратична похибка                               |
| P90    | (90th Percentile) 90-й перцентиль похибки                                          |
| GDOP   | (Geometric Dilution of Precision) Геометричне зниження точності                    |
| CIR    | (Channel Impulse Response) Імпульсна характеристика каналу                         |
| RTLS   | (Real-Time Location System) Система позиціонування в реальному часі                |
| LPS    | (Indoor Positioning System) Система локального позиціонування                      |
| IPS    | (JSON Web Token) Система позиціонування в приміщеннях                              |
| GNSS   | (Global Navigation Satellite System) Глобальна навігаційна супутникова система     |
| GPS    | (Global Positioning System) Глобальна система позиціонування                       |
| BLE    | (Bluetooth Low Energy) Bluetooth з низьким енергоспоживанням                       |
| RSSI   | (Received Signal Strength Indicator) Індикатор рівня потужності прийнятого сигналу |
| SPI    | (Serial Peripheral Interface) Послідовний периферійний інтерфейс                   |
| I2C    | (Inter-Integrated Circuit) міжінтегральна шина                                     |

|      |                                                                                           |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| UART | (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) Універсальний асинхронний приймач-передавач |
| PCB  | (Printed Circuit Board) Друкована плата                                                   |
| MEMS | (Micro-Electro-Mechanical System) Мікроелектромеханічна система                           |
| IMU  | (Inertial Measurement Unit) Inertial Measurement Unit                                     |
| RTOS | (Real-Time Operating System) операційна система реального часу                            |

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 3    |

## ВСТУП

У сучасному світі задачі точного визначення місцезнаходження об'єктів набувають дедалі більшого значення в широкому спектрі галузей. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), зокрема GPS, добре справляються із позиціонуванням на відкритому просторі, однак у закритих приміщеннях, підземних спорудах та щільній міській забудові їхня точність різко знижується або система повністю перестає функціонувати. Серед основних причин цього явища:

- Загасання сигналу - стіни, перекриття та металеві конструкції поглинають радіосигнал супутника, що призводить до відсутності надійного прийому.
- Багатопроменеве поширення - відбиття сигналу від поверхонь усередині будівлі спричиняє значні похибки вимірювань, що можуть сягати десятків метрів.
- Низька точність у щільній забудові - у містах так звана «міська ущелина» перекриває пряму видимість до достатньої кількості супутників, що унеможлиблює надійне визначення координат.
- Відсутність вертикальної роздільної здатності - стандартні GNSS-системи не здатні розрізняти поверхи будівлі, що критично для багатоповерхових споруд.
- Затримка «холодного старту» - для первинного захоплення сигналу GPS-приймачу може знадобитися до кількох хвилин, що є неприйнятним для систем реального часу.

Існує багато ситуацій, коли перелічені недоліки стають критичними: відстеження персоналу та обладнання на промислових підприємствах, моніторинг тварин у фермерських приміщеннях, навігація роботизованих транспортних засобів (AGV) на складах, контроль переміщень у лікарнях та аеропортах. У зв'язку з цим зростає потреба в точних, надійних і доступних

рішеннях для локального позиціонування , що працюють незалежно від глобальної супутникової інфраструктури.

Дипломний проект складається з чотирьох розділів. У першому розділі виконано аналіз предметної галузі та огляд існуючих технологій радіопозиціонування (Wi-Fi, BLE, UWB, ультразвук), методів обчислення координат (трилатерація, TDoA, TWR, фільтр Калмана) та наявних комерційних рішень. Другий розділ містить технічне завдання, архітектуру системи і детальне проектування апаратної та програмної частин. Четвертий розділ присвячено тестуванню системи, оцінюванню точності позиціонування та аналізу результатів.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 5    |

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

## 1.1 Актуальність задачі локального позиціонування

У сучасному світі задачі точного визначення місцезнаходження об'єктів набувають дедалі більшого значення у широкому спектрі галузей. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), зокрема GPS та ГЛОНАСС, забезпечують ефективне позиціонування на відкритому просторі, однак суттєво втрачають точність або повністю втрачають працездатність у закритих приміщеннях, щільній міській забудові, підземних спорудах та інших середовищах, де сигнал супутника не проникає або зазнає значного загасання і багаторазових відбиттів.

Системи локального позиціонування (Local Positioning Systems, LPS), або так звані системи визначення місцезнаходження у приміщеннях (Indoor Positioning Systems, IPS), покликані вирішити цю проблему. Їх застосування охоплює логістику та складське господарство (відстеження вантажів та обладнання), медицину (контроль переміщень пацієнтів і медичного персоналу), промислову автоматизацію (роботизовані системи, AGV-платформи), охорону (захист периметра, моніторинг доступу), агропромисловий комплекс (відстеження тварин та сільськогосподарської техніки) та низку інших сфер.

Актуальність даного дипломного проекту обумовлена відсутністю доступних, точних і енергоефективних рішень для локального позиціонування на базі мікроконтролерів із радіомодулями, орієнтованих на використання в умовах малого та середнього бізнесу або науково-дослідних установ. Переважна більшість комерційних рішень є дорогими, закритими платформами, які не передбачають можливості адаптації та розширення. Розробка власної відкритої системи на базі доступних компонентів (-мікроконтролери

ESP32/STM32, UWB-модулі DecaWave DWM1000?) дозволяє суттєво знизити вартість і підвищити гнучкість кінцевого рішення.

## 1.2 Огляд технологій радіопозиціонування

На сьогоднішній день існує кілька основних технологій, що застосовуються для реалізації систем локального позиціонування. Кожна з них має свої переваги, обмеження та оптимальні сфери застосування. Нижче наведено аналітичний огляд найбільш поширених підходів.

### 1.2.1 Wi-Fi позиціонування (RSSI-based)

Технологія Wi-Fi є найбільш поширеною в корпоративних і громадських будівлях завдяки наявності існуючої інфраструктури. Позиціонування здійснюється методом тріангуляції або фінгерпрінтингу на основі показника потужності прийнятого сигналу (RSSI - Received Signal Strength Indicator). Основна перевага - можливість використання наявних точок доступу без додаткового обладнання.

Водночас метод RSSI суттєво залежить від перешкод у середовищі поширення сигналу (стіни, меблі, люди), що призводить до значних варіацій показань і обмежує точність до 3-15 метрів. Крім того, Wi-Fi-пристрої мають відносно високе енергоспоживання, що ускладнює їх застосування у портативних пристроях із батарейним живленням.

### 1.2.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

Технологія BLE, особливо в специфікаціях Bluetooth 5.x з підтримкою AoA (Angle of Arrival) та AoD (Angle of Departure), набуває все ширшого застосування в системах точного позиціонування. Перевагами є низьке енергоспоживання (ключова характеристика для носимих пристроїв), широка

поширеність смартфонів із підтримкою BLE, а також відносно невисока вартість модулів.

Точність базового BLE-позиціонування на основі RSSI є невисокою (1-5 м), однак застосування методів AoA/AoD дозволяє досягти точності 0,1-1 м при використанні антенних матриць. Основний недолік - чутливість до перешкод та невелика дальність дії (10-50 м у приміщеннях).

### 1.2.3 Ультразвукове позиціонування

Ультразвукові системи позиціонування (наприклад, Cricket, BAT) використовують час поширення звукових хвиль для вимірювання відстані між передавачем і приймачем. Технологія забезпечує точність до 1-10 см, однак вимагає прямої видимості між пристроями, суттєво залежить від температури і вологості повітря, а також потребує щільного розгортання інфраструктури. Через ці обмеження ультразвукові системи переважно застосовуються в спеціалізованих лабораторних або промислових умовах.

### 1.2.4 Ультраширокосмугова технологія (UWB)

Технологія Ultra-Wideband (UWB) заснована на принципі передачі вузьких (наносекундних) імпульсів у широкій смузі частот (не менше 500 МГц відповідно до стандарту IEEE 802.15.4a). Точне вимірювання часу прольоту сигналу

## 1.3 Методи обчислення координат

Визначення координат об'єкта в системах локального позиціонування здійснюється на основі вимірювань між тегом (мобільним пристроєм) та набором анкерів (стаціонарних маяків) із відомими координатами. Залежно від типу вимірювань розрізняють кілька основних методів.

### 1.3.1 Трилатерація

Трилатерація є найбільш поширеним методом визначення координат у системах на основі вимірювання відстані (Ranging). Метод ґрунтується на тому, що якщо відомі відстані від об'єкта до трьох або більше точок із відомими координатами, можна визначити точне положення об'єкта як перетин кіл (у двовимірному випадку) або сфер (у тривимірному).

У двовимірному випадку для трьох анкерів  $A_1(x_1, y_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2)$ ,  $A_3(x_3, y_3)$  із вимірними відстанями  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  до тега  $T(x, y)$  система рівнянь має вигляд:  $(x-x_1)^2+(y-y_1)^2=d_1^2$ ,  $(x-x_2)^2+(y-y_2)^2=d_2^2$ ,  $(x-x_3)^2+(y-y_3)^2=d_3^2$ . Розв'язання системи дає координати тега. У реальних системах через наявність шумів вимірювань використовуються методи найменших квадратів або ітераційні алгоритми оптимізації.

При використанні чотирьох і більше анкерів система є надлишково визначеною, що дозволяє підвищити точність позиціонування та виявляти похибки вимірювань методами RANSAC або зваженої трилатерації.

### 1.3.2 Мультилатерація (TDoA)

Метод різниць часу надходження сигналів (Time Difference of Arrival, TDoA) ґрунтується не на абсолютних відстанях, а на різницях відстаней між об'єктом і парами анкерів. Геометричне місце точок із постійною різницею відстаней до

двох точок є гіперболою (у 2D) або гіперболоїдом (у 3D). Перетин кількох гіпербол визначає положення тега.

TDoA має перевагу над методом TWR у тому, що не вимагає двостороннього обміну повідомленнями і, відповідно, дозволяє скоротити час активності радіомодуля. Проте метод вимагає точної синхронізації між анкерами, що є нетривіальним технічним завданням.

### 1.3.3 Двосторонній обмін дальністю (TWR)

Метод Two-Way Ranging (TWR) є базовим протоколом для вимірювання відстані в UWB-системах. Тег надсилає повідомлення Poll, анкер відповідає повідомленням Response, тег надсилає Final. Маючи мітки часу всіх трьох повідомлень, тег або шлюз може обчислити час прольоту (Time of Flight, ToF) і, відповідно, відстань:  $d = c \cdot \text{ToF}$ , де  $c$  - швидкість світла.

### 1.3.4 Фільтрація Калмана

Фільтр Калмана є оптимальним лінійним рекурсивним оцінювачем стану динамічної системи в умовах гауссового шуму. У системах позиціонування фільтр використовується для об'єднання (фьюжну) вимірювань від кількох джерел (UWB, акселерометр, гіроскоп) та згладжування траєкторії руху об'єкта в часі.

Розширений фільтр Калмана (EKF) дозволяє обробляти нелінійні моделі руху, що типово для реальних сценаріїв. Алгоритм поперемінно виконує кроки прогнозу (на основі моделі руху) та корекції (на основі нових вимірювань), мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінки стану.

Застосування фільтрації Калмана є особливо важливим при реалізації гібридного позиціонування (UWB + IMU), оскільки дозволяє компенсувати

похибки кожного із джерел вимірювань та забезпечити безперервне відстеження навіть при тимчасовій втраті UWB-сигналу.

## 1.4 Огляд апаратних платформ

Ефективна реалізація системи локального позиціонування потребує ретельного вибору апаратних компонентів. У даному підрозділі розглянуто основні платформи, що можуть бути застосовані в проекті.

### 1.4.1 UWB-модуль DecaWave DWM1000

Модуль DWM1000 виробництва Qorvo є одним із найбільш поширених UWB-рішень для систем позиціонування. Він реалізує стандарт (більш скорочено потрібно IEEE 802.15.4a) і забезпечує вимірювання відстані з точністю до 10 см при дальності до 300 м (у режимі прямої видимості). Модуль підтримує протоколи TWR та TDoA, має вбудований блок обробки часових міток і інтерфейс SPI для взаємодії з мікроконтролером.

Технічні характеристики DWM1000: робочий діапазон частот - 3,5-6,5 ГГц; пікова потужність передачі - 0 дБм; чутливість приймача - -105 дБм; швидкість передачі даних - 110 Кбіт/с, 850 Кбіт/с або 6,8 Мбіт/с; напруга живлення - 2,8-3,6 В; інтерфейс - SPI до 20 МГц. Вартість модуля складає приблизно 10-18 доларів США, що робить його доступним для масового застосування.

### 1.4.2.Мікроконтролер ESP32

ESP32 виробництва Espressif Systems є системою на кристалі (SoC), що поєднує двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, модулі Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) та Bluetooth/BLE 4.2 на одному кристалі. Мікроконтролер має великий обсяг оперативної (520 КБ SRAM) та флеш-пам'яті (до 16 МБ зовнішньої), широкий набір інтерфейсів (SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit), UART (Universal

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 11   |

**Asynchronous Receiver-Transmitter**), I2S, ADC, DAC, PWM) і підтримує безпосереднє програмування через ESP-IDF або Arduino Framework.

ESP32 є оптимальним вибором для вузлів тегів та шлюзу системи позиціонування завдяки вбудованому Wi-Fi для передачі даних, достатній обчислювальній потужності для виконання алгоритмів позиціонування, підтримці SPI для зв'язку з DWM1000, а також низькій вартості (~3-5 USD). Недолік - відносно вище енергоспоживання порівняно з STM32 у режимі глибокого сну.

### 1.4.3 Мікроконтролер STM32

Мікроконтролери серії STM32 виробництва STMicroelectronics засновані на ядрах ARM Cortex-M і широко застосовуються в промислових та вбудованих системах. Серія STM32L (Low Power) є оптимальною для застосувань із батарейним живленням завдяки надзвичайно низькому споживанню в режимах сну (до 0,3 мкА у standby) та можливості швидкого пробудження.

STM32 має розвинений екосистем розробки (HAL-бібліотеки, CubeMX), підтримує всі необхідні інтерфейси (SPI, I2C, UART) і добре підходить для вузлів тегів, де критичним є ресурс батареї. Для анкерів, де потрібне підключення до мережі, ESP32 є більш зручним вибором.

### 1.4.4 Акселерометри та IMU

Для гібридного позиціонування UWB+IMU застосовуються мікроелектромеханічні датчики (MEMS). Модуль MPU-6050 (InvenSense) поєднує трьохосьовий акселерометр і гіроскоп із цифровим процесором (DMP) та інтерфейсом I2C. Точніший аналог LSM6DS3 (STMicroelectronics) має нижчий рівень шуму, ширший динамічний діапазон і підтримку SPI, що робить його кращим вибором для вимогливих застосувань.

Дані акселерометра використовуються для реалізації dead reckoning між UWB-вимірюваннями, а також для класифікації типу руху об'єкта (статичний/динамічний). Інтеграція прискорень для оцінки переміщення накопичує похибку з часом (drift), тому IMU використовується лише як допоміжне джерело між інтервалами UWB-вимірювань.

## 1.5 Аналіз існуючих систем і рішень

Ринок систем локального позиціонування активно розвивається. Нижче наведено аналіз найбільш репрезентативних існуючих рішень.

Система RTLS (Real-Time Location System) від компанії Zebra Technologies використовує UWB та RFID і позиціонується як корпоративне рішення для промислових підприємств і лікарень. Точність до 30 см, масштабується до тисяч тегів. Основний недолік - висока вартість (~2000+наанкер, 2000+наанкер, 50-100 на тег) і замкнена архітектура.

Система Pozyx є більш доступним рішенням на базі DWM1000 для дослідницьких і прикладних завдань. Забезпечує точність 10-30 см, має відкрите API та SDK. Недолік - вища вартість порівняно з самостійною розробкою на базі DWM1000 (~200/анкерпроти 200/анкерпроти 15-20 для власної реалізації).

Системи Apple AirTag та Samsung SmartTag використовують UWB (чип U1/U3 від Apple, DW3110 від ST) для прецизійного знаходження загублених речей. Однак ці рішення орієнтовані на взаємодію з конкретними смартфонами і не підходять для побудови інфраструктурних систем позиціонування.

Для моніторингу тварин на фермах застосовуються такі рішення, як Allflex/SCR, Moocall та Halter. Всі вони базуються на GPS і не забезпечують позиціонування у приміщеннях. Вартість одного пристрою складає \$150-350, що є суттєвим бар'єром для широкого впровадження.

**Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз існуючих систем позиціонування**

| Система                    | Технологія       | Точність        | Анкер           | Тег          | Відкритість     |
|----------------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Zebra RTLS                 | UWB+RFID         | 10-30 см        | ~\$2000         | ~\$75        | Закрита         |
| Pozyx                      | UWB<br>(DWM1000) | 10-30 см        | ~\$200          | ~\$100       | Відкрите<br>API |
| Sewio RTLS                 | UWB              | 10-30 см        | ~\$1500         | ~\$50        | Закрита         |
| AllFlex                    | GPS              | 3-15 м          | N/A             | ~\$200       | Закрита         |
| <b>Власна<br/>розробка</b> | <b>UWB+BLE</b>   | <b>10-30 см</b> | <b>~\$15-20</b> | <b>~\$15</b> | <b>Відкрита</b> |

Аналіз існуючих рішень підтверджує наявність ринкового розриву між дорогими корпоративними системами та доступними відкритими платформами для малого і середнього бізнесу, дослідних лабораторій та аграрного сектору. Дана робота спрямована на заповнення цього розриву.

## 1.6 Огляд протоколів передачі даних

У результаті аналізу предметної області встановлено, що серед сучасних технологій радіопозиціонування технологія UWB (Ultra-Wideband) забезпечує найвищу точність визначення координат у приміщеннях - до 10-30 см - при прийнятному рівні вартості та енергоспоживання. Модуль DWM1000 виробництва Qorvo є оптимальним вибором для реалізації системи, оскільки підтримує протоколи TWR та TDoA, має вбудований блок часових міток і широко задокументований для використання з мікроконтролерами ESP32/STM32.

Аналіз існуючих рішень (Zebra RTLS, Pozyx, Sewio) підтвердив наявність ринкового розриву між дорогими закритими корпоративними системами та

доступними відкритими платформами. Розробка власної системи на базі загальнодоступних компонентів дозволяє знизити вартість у 10-50 разів порівняно з комерційними аналогами при збереженні прийнятної точності позиціонування .

Розглянуті методи обчислення координат (трилатерація, TDoA, TWR, фільтрація Калмана) є теоретичним підґрунтям для проектування системи в наступних розділах

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 15   |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У результаті аналізу предметної області встановлено, що серед сучасних технологій радіопозиціонування технологія UWB (Ultra-Wideband) забезпечує найвищу точність визначення координат у приміщеннях - до 10-30 см - при прийнятному рівні вартості та енергоспоживання. Модуль DWM1000 від Qorvo є оптимальним вибором для реалізації системи, оскільки підтримує протоколи TWR та TDoA, має вбудований блок часових міток і широко задокументований для використання з мікроконтролерами ESP32/STM32.

Аналіз існуючих рішень підтвердив наявність ринкового розриву між дорогими закритими корпоративними системами та доступними відкритими платформами. Розробка власної системи на базі загальнодоступних компонентів дозволяє знизити вартість у 10-50 разів порівняно з комерційними аналогами при збереженні прийнятної точності позиціонування .

Розглянуті методи обчислення координат (трилатерація, TDoA, TWR, фільтрація Калмана) та протоколи передачі даних (MQTT, LoRa, WebSocket) є теоретичним підґрунтям для проектування системи в наступних розділах.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 16   |

## РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ

### 2.1 Постановка задачі та мета проекту

Метою даного дипломного проекту є розробка функціонального програмно-апаратного комплексу для локального позиціонування об'єктів у режимі реального часу на основі мікроконтролерів із радіомодулями Ultra-Wideband (UWB). Система призначена для визначення двовимірних координат мобільних об'єктів (тегів) у заданому просторі з точністю не гірше 30 см при розгортанні мінімум трьох стаціонарних анкерів.

Система повинна задовольняти наступним основним вимогам: забезпечувати безперервне відстеження об'єктів у реальному часі; бути масштабованою до збільшення кількості тегів та анкерів; забезпечувати автономну роботу тегів від батарейного живлення.

### 2.2 Вимоги до системи

#### 2.2.1 Функціональні вимоги

На основі аналізу предметної області та потреб цільових користувачів сформульовано такі функціональні вимоги до системи:

- визначення двовимірних (X, Y) координат мобільного об'єкта (тега) з точністю не менше 30 см у приміщенні та не менше 100 см на відкритому просторі;
- підтримка одночасного відстеження не менше 10 незалежних тегів;
- частота оновлення координат: не рідше ніж 1 Гц (1 вимірювання на секунду) у стандартному режимі та до 10 Гц у режимі підвищеної частоти;
- налаштування геозон та автоматичне генерування сповіщень при виході об'єкта за межі дозволеної зони;

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 17   |

- можливість розгортання без залежності від хмарних сервісів (локальний режим роботи); конфігурування параметрів системи (координати анкерів, порогові значення геозон) через веб-інтерфейс.

Деталізуємо кожну з функціональних вимог для кращого розуміння очікуваної поведінки системи

Вимога Ф-1 (визначення координат у 2D). Система повинна обчислювати координати тега у горизонтальній площині (x, y) відносно системи відліку, прив'язаної до анкерів. Похибка не повинна перевищувати 30 см при стандартному відхиленні шуму вимірювань відстані  $\sigma \leq 15$  см. Вимога обґрунтована типовими задачами відстеження: навігація персоналу по приміщенню вимагає точності порядку ширини коридору ( $\approx 1$  м), а відстеження активів на складі - точності порядку розміру стелажу ( $\approx 50$  см). Запас у 2-3 рази щодо цих значень дає зручний запас надійності.

Вимога Ф-2 (мінімальна кількість анкерів). Для роботи алгоритму трилатерації в 2D необхідно мінімум 3 анкери. Однак на практиці рекомендується використовувати 4 анкери, оскільки це суттєво підвищує точність та стійкість до відмови одного вузла. При відмові одного анкера з чотирьох система продовжує роботу в режимі зниженої точності з трьома анкерами, тоді як відмова при конфігурації 3+1 призводить до повної неможливості позиціонування.

Вимога Ф-3 (фільтрація координат). Сирі координати від трилатерації містять стрибки, зумовлені випадковими похибками вимірювань. Фільтр Калмана з вектором стану [x, y, vx, vy] дозволяє отримати плавну траєкторію та передбачати положення тега між моментами оновлення координат. Це особливо важливо при частоті оновлення 1-3 Гц: без фільтрації об'єкт на карті виглядає як такий, що хаотично "стрибає", а з фільтрацією рух виглядає плавним і природним.

Вимога Ф-4 (підтримка кількох тегів). Алгоритм позиціонування є незалежним для кожного тега: обробка координат одного тега не впливає на інші. Обмеження на кількість тегів визначається пропускнуою здатністю UWB-каналу та частотою опитування. При частоті 1 Гц та 4 анкерах теоретично можна одночасно відстежувати до 10-15 тегів без взаємних завад, якщо використовувати часове розділення доступу (TDMA).

## 2.2.2 Технічні вимоги

До апаратної частини системи висуваються такі технічні вимоги:

UWB-модуль: DecaWave DWM1000 (IEEE 802.15.4a), канал 5 (центральна частота 6489,6 МГц), швидкість передачі 6,8 Мбіт/с;

мікроконтролер тега та шлюзу: ESP32-S3 або ESP32-WROOM-32 з підтримкою Wi-Fi 802.11 b/g/n та BLE 4.2;

мікроконтролер анкера: ESP32 або STM32L (залежно від вимог до живлення);

- акселерометр (для гібридного позиціонування ): MPU-6050 або LSM6DS3, I2C-інтерфейс;
- батарея тега: LiPo 3000-5000 мАг, автономність не менше 7 діб у стандартному режимі;
- захист корпусу: не нижче IP54 (захист від бризок) для застосувань у приміщеннях,
- IP65 для відкритого простору;

кількість анкерів для 2D-позиціонування : мінімум 3, рекомендовано 4 або більше.

До програмної частини системи висуваються такі технічні вимоги:

- прошивка вузлів: C/C++ (ESP-IDF framework), RTOS-сумісна реалізація;

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 19   |

- алгоритм вимірювання відстані: Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR);  
алгоритм позиціонування : зважена трилатерація з фільтрацією Калмана;

документація: вихідний код із коментарями, діаграми компонентів і послідовностей у форматі UML.

### 2.2.3 Нефункціональні вимоги

До системи також висуваються нефункціональні вимоги: масштабованість - алгоритм трилатерації повинен допускати збільшення кількості анкерів без зміни архітектури; стійкість до шуму вимірювань - метод найменших квадратів має забезпечувати коректний результат при відхиленні відстаней  $\pm 30$  см; відтворюваність результатів - алгоритм симуляції Монте-Карло має давати стабільні результати при різних наборах випадкових реалізацій.

## 2.3 Архітектура системи

Система локального позиціонування складається з чотирьох функціональних рівнів: рівня вимірювань, рівня збору даних, рівня обробки та зберігання, а також рівня представлення. Така чотирирівнева архітектура забезпечує розділення відповідальності між компонентами і спрощує масштабування та обслуговування системи.

### 2.3.1 Рівень вимірювань (вузли тегів та анкерів)

На цьому рівні розміщені мобільні вузли-теги та стаціонарні вузли-анкери. Тег, розміщений на об'єкті, що відстежується, ініціює сесію TWR-вимірювань з кожним із доступних анкерів за алгоритмом DS-TWR. Результатом є набір виміряних відстаней до анкерів, які або обчислюються безпосередньо тегом і передаються на шлюз, або передаються як «сирі» часові мітки для подальшої обробки на шлюзі.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 20   |

Вузол-анкер є пасивним учасником сесії вимірювань: він відповідає на запит тега і повертає необхідні часові мітки. Анкери підключені до шлюзу через бездротовий (ESP32 Wi-Fi) або дротовий (SPI/UART до Raspberry Pi) інтерфейс.

2.3.2 Рівень збору даних (шлюз)

Шлюз є центральним вузлом рівня збору даних. Він приймає набір вимірних відстаней від тега до анкерів і виконує алгоритм трилатерації з фільтрацією Калмана для визначення координат об'єкта.

2.4 Структурна схема системи

Структурна схема системи відображає взаємозв'язок між усіма компонентами та напрямки потоків даних. На верхньому рівні знаходяться теги (мобільні вузли), що взаємодіють з анкерами через UWB-канал. Анкери передають дані або безпосередньо на шлюз (через Wi-Fi або SPI), або отримують запити від тегів і відповідають на них, після чого тег самостійно розраховує відстані та передає їх на шлюз.

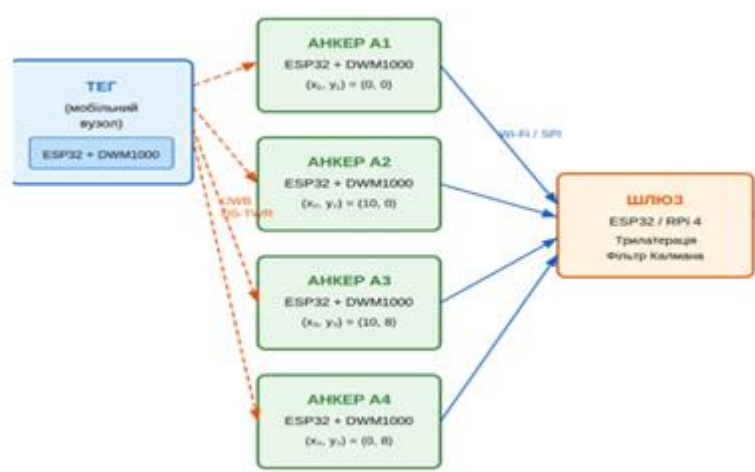


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи

## 2.5 Діаграма класів програмного забезпечення

Архітектура програмного забезпечення системи побудована у відповідності до принципів об'єктно-орієнтованого проектування з виокремленням наступних основних компонентів.

Клас UWBModule відповідає за взаємодію з апаратним модулем DWM1000 через SPI-інтерфейс. Він інкапсулює операції ініціалізації модуля, налаштування каналу та швидкості передачі, відправки повідомлень Poll/Response/Final та зчитування часових міток. Методи: `init()`, `configure(channel, dataRate)`, `sendPoll()`, `waitResponse()`, `sendFinal()`, `getTimestamps()`.

Клас RangingEngine реалізує алгоритм DS-TWR для обчислення відстані між тегом і конкретним анкером на основі набору часових міток. Метод `computeRange(timestamps)` повертає відстань у метрах. Клас також реалізує корекцію на основі поправочних коефіцієнтів (antenna delay calibration).

Клас PositionCalculator реалізує алгоритм трилатерації. Він приймає масив об'єктів типу `AnchorMeasurement` (координати анкера + виміряна відстань) і повертає об'єкт `Point2D (x, y)` - координати тега. Метод `calculate(measurements)` використовує метод найменших квадратів для overdetermined-систем.

Клас KalmanFilter реалізує дискретний фільтр Калмана для згладжування координат. Стан системи включає позицію (x, y) та швидкість (vx, vy). Методи: `predict(dt)`, `update(measurement)`.

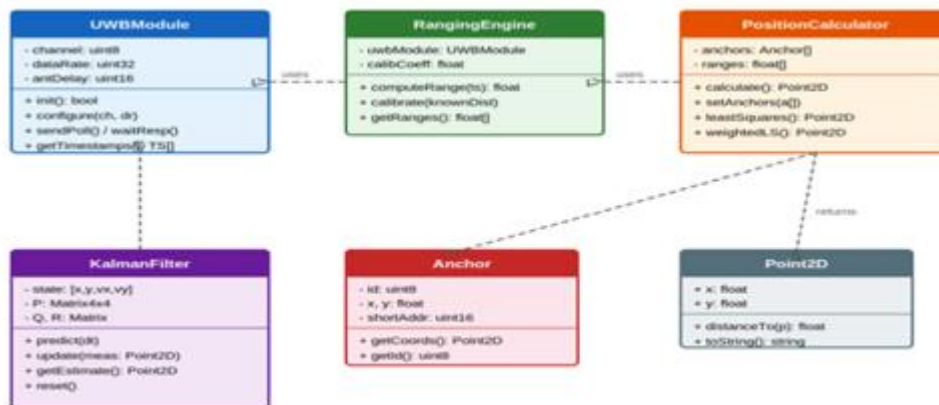


Рисунок 2.5 – Діаграма класів програмного забезпечення

## 2.6 Алгоритм роботи програмного забезпечення

Алгоритм роботи системи локального позиціонування включає наступні основні етапи. Етап ініціалізації: при запуску кожен вузол (тег або анкер) виконує ініціалізацію UWB-модуля DWM1000 через SPI, завантажує конфігурацію (канал, швидкість, затримка антени, власний ідентифікатор) із флеш-пам'яті

Обчислення координат на шлюзі: після отримання відстаней від тега до мінімум трьох анкерів шлюз формує систему рівнянь трилатерації та розв'язує її методом найменших квадратів. Результат передається на вхід фільтра Калмана, який видає згладжену оцінку координат.

## 2.7 Технічне завдання до розробки

На підставі аналізу предметної області та вимог до системи сформульовано технічне завдання на розробку.

**Найменування та область застосування.** Система локального позиціонування об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями. Призначена для використання в приміщеннях і на відкритих майданчиках, де

потрібне точне відстеження мобільних об'єктів (персоналу, активів, транспортних засобів, тварин).

**Підстави для розробки.** Виконання кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня бакалавра зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» відповідно до затвердженого завдання кафедри обчислювальної техніки ФІОТ КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Вимоги до продукту.** Система повинна включати апаратну частину (тег, анкер, шлюз) та програмну частину (прошивка вузлів, серверний сервіс, веб-інтерфейс). Точність позиціонування - не гірше 30 см у 90% вимірів. Автономність тега від батареї - не менше 7 діб.

**Вимоги до програмного забезпечення.** Мова програмування мікроконтролерів - C/C++ (ESP-IDF).

**Вимоги до апаратної частини.** UWB-модуль: DWM1000. Мікроконтролер: ESP32-WROOM-32 або ESP32-S3. Акселерометр: MPU-6050 або LSM6DS3. Батарея тега: LiPo, ємність не менше 3000 мАг. Корпус тега: IP54 або вище.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 24   |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У другому розділі дипломного проекту сформульовано технічне завдання на розробку апаратно-програмної системи локального позиціонування об'єктів на основі ультраширококутної (UWB) технології. Визначено мету проекту - створення функціонального прототипу системи, здатного визначати двовимірні координати мобільних тегів з точністю не гірше 30 см.

На основі аналізу предметної області (розділ 1) сформовано функціональні вимоги до системи: визначення координат (X, Y) з заданою точністю, підтримка не менше 10 одночасних тегів, частота оновлення не менше 1 Гц, можливість налаштування геозон та автоматичних сповіщень, локальний режим роботи без хмарних сервісів. Також визначено технічні вимоги до апаратної частини (UWB-модуль DWM1000, мікроконтролер ESP32, LiPo-акумулятор) та програмної частини (C++/ESP-IDF для прошивки, алгоритми DS-TWR і трилатерації).

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 25   |

## РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

У цьому розділі розглядаються математичні основи визначення координат об'єкта за вимірними відстанями до опорних точок (анкерів). Основним методом, обраним для реалізації системи локального позиціонування, є **трилатерація** з використанням **методу найменших квадратів** для підвищення точності в умовах надлишкових вимірювань. Також наведено опис протоколу двостороннього вимірювання дальності (DS-TWR) та фільтра Калмана для згладжування траєкторії.

### 3.1 Математична модель трилатерації

Нехай у двовимірному просторі задано координати  $n$  анкерів:

$$A_i(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad n \geq 3. \quad (3.1)$$

Відстань від об'єкта (тега) з невідомими координатами  $T(x, y)$  до  $i$ -го анкера вимірюється за допомогою UWB-модулів і дорівнює  $d_i$ . Теоретично ці відстані задовольняють систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2, \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = d_n^2. \end{cases} \quad (3.2)$$

Розв'язок цієї системи дає координати тега. Геометрично це означає перетин кіл (або сфер у тривимірному випадку) з центрами в анкерах і радіусами  $d_i$ .

Якщо кількість анкерів  $n=3$  (мінімально необхідна для двовимірної трилатерації), система (3.1) має однозначний розв'язок за умови, що три кола перетинаються в одній точці. На практиці через похибки вимірювань відстаней ( $d_i$  містять шум) рівняння можуть бути несумісними. Тому

застосовують **метод найменших квадратів**, який мінімізує суму квадратів нев'язок.

Розкриваючи квадрати, отримуємо:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - [(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2] = d_i^2 - d_n^2 \quad (3.4)$$

Перегрупувавши члени, маємо лінійне рівняння відносно  $x, y$ :

$$2(x_i - x_n)x + 2(y_i - y_n)y = (x_i^2 - x_n^2) + (y_i^2 - y_n^2) - (d_i^2 - d_n^2). \quad (3.5)$$

Позначимо:

$$a_i = 2(x_i - x_n), \quad b_i = 2(y_i - y_n), \quad c_i = (x_i^2 - x_n^2) + (y_i^2 - y_n^2) - (d_i^2 - d_n^2). \quad (3.6)$$

У матричній формі:

$\mathbf{AX}=\mathbf{C}$  де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_{n-1} & b_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

### 3.2 Метод найменших квадратів для надлишкових вимірювань

При  $n > 3n > 3$  система (3.3) є перевизначеною. Розв'язок у сенсі найменших квадратів мінімізує квадратичну норму нев'язки  $\|\mathbf{AX} - \mathbf{C}\|^2$  і має вигляд:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{C}. \quad (3.8)$$

Якщо деякі вимірювання мають різну точність, доцільно використовувати **зважений метод найменших квадратів**. Введемо діагональну матрицю ваг  $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_{n-1})$  де вага  $w_i$  обирається обернено пропорційно

дисперсії вимірної відстані  $d_i$ . Зазвичай  $w_i = 1/\sigma_i^2$  або  $w_i = 1/d_i^2$  (ближчі анкери отримують більшу вагу). Тоді оцінка за зваженим методом найменших квадратів:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{W} \mathbf{C}. \quad (3.9)$$

У роботі використано **стандартний метод найменших квадратів** (3.4) через його простоту та достатню точність при типових похибках UWB-вимірювань.

#### Алгоритм обчислення координат:

1. Отримати виміряні відстані  $d_i$  до всіх анкерів (за допомогою DS-TWR).
2. Сформувати матриці  $\mathbf{A}$  і  $\mathbf{C}$  за формулами (3.2)-(3.3).
3. Обчислити оцінку  $\mathbf{X}$  за (3.4).
4. Якщо отримана точка лежить за межами робочої зони (наприклад, від'ємні координати або значно більші за розміри приміщення), виконати **ітераційне уточнення** - відкинути найбільш суперечливе вимірювання і повторити кроки 2-3. Така процедура дає змогу відфільтрувати грубі помилки (викиди).

### 3.3 Протокол двостороннього вимірювання дальності (DS-TWR)

Для отримання відстаней  $d_i$ , необхідних у рівняннях трилатерації, у системі використовується алгоритм **Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR)**. Цей метод дозволяє компенсувати похибки, спричинені дрейфом тактових генераторів вузлів, і не потребує точної синхронізації.

#### Принцип роботи (рис. 3.1):

1. Тег (ініціатор) надсилає пакет **Poll** і фіксує час відправлення  $T_{sp}$ .

Анкер отримує пакет, фіксує час прийому  $T_{rp}$ , витримує затримку  $T_{reply1}$  і надсилає пакет **Response** у момент  $T_{sr}$

Тег отримує **Response**, фіксує  $T_{rr}$  і надсилає пакет **Final** у момент  $T_{sf}$

Анкер отримує **Final**, фіксує  $T_{rf}$

Час поширення сигналу в один бік (Time of Flight, ToF) обчислюється за формулою DS-TWR:

$$ToF = \frac{(T_{rr} - T_{sp}) \cdot (T_{rf} - T_{sr}) - (T_{sr} - T_{rp}) \cdot (T_{rr} - T_{sp})}{(T_{rr} - T_{sp}) + (T_{rf} - T_{sr})}. \quad (3.10)$$

Відстань між тегом та анкером:

$$d = c \cdot ToF \quad (3.11)$$

де  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - швидкість світла

У реальній реалізації часові мітки отримуються від апаратного лічильника модуля DWM1000 з роздільною здатністю  $\approx 15,6$  пс, що відповідає просторовій роздільній здатності  $\approx 4,7$  мм.

### 3.4 Фільтрація Калмана для згладжування координат

Сирі координати, обчислені за формулою (3.4), можуть мати стрибки через шуми вимірювань. Для отримання плавної траєкторії руху об'єкта застосовується **дискретний фільтр Калмана**.

Стан системи у момент часу  $k$  описується вектором:

$$\mathbf{s}_k = [x_k, y_k, v_{x,k}, v_{y,k}]^T$$

Де  $x_k, y_k$ - координати,  $v_{x,k}, v_{y,k}$ - швидкості

де  $F$ - матриця переходу стану

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$\Delta t$ - час між оновленнями (стала частота вимірювань),  $\mathbf{w}_k$ - шум процесу з коваріаційною матрицею  $\mathbf{Q}$

### Модель спостережень

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.13)$$

Де  $\mathbf{z}_k = [x_k^{\text{meas}}, y_k^{\text{meas}}]^T$  - виміряні координати після трилатерації  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$   
 $\mathbf{v}_k$ - шум вимірювання з коваріацією  $\mathbf{R}$

### Кроки фільтра Калмана

Передбачення:  $\mathbf{s}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{s}_{k-1|k-1}; \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (3.14)$

Оновлення:  $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (3.15)$

$$\mathbf{s}_{k|k} = \mathbf{s}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{s}_{k|k-1}) \quad (3.16)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (3.17)$$

У роботі матриці  $\mathbf{Q}$  та  $\mathbf{R}$  підібрано емпірично  $\mathbf{R} = \sigma^2\mathbf{I}$  з  $\sigma = 0,15$  м (типова похибка визначення координат),  $\mathbf{Q}$  - діагональна з невеликими компонентами для швидкості

Алгоритм фільтрації виконується на шлюзі або на сервері після отримання виміряних координат. Застосування фільтра Калмана дозволяє знизити

середньоквадратичну похибку позиціонування на 20-30% в умовах помірного шуму (результати тестування, розділ 4)

### 3.5 Псевдокод алгоритму позиціонування

Наведемо спрощену реалізацію обчислення координат методом найменших квадратів (без ваг) у вигляді псевдокоду

Функція Trilateration(anchors[], distances[]):

n = кількість анкерів

якщо n < 3: повернути помилку

// Взяти останній анкер як опорний

xn = anchors[n].x; yn = anchors[n].y

dn = distances[n]

Підготувати матриці A та C

для i = 1 до n-1:

xi = anchors[i].x; yi = anchors[i].y

di = distances[i]

A[i][0] = 2\*(xi - xn)

A[i][1] = 2\*(yi - yn)

C[i] = (xi\*xi - xn\*xn) + (yi\*yi - yn\*yn) - (di\*di - dn\*dn)

// Метод найменших квадратів:  $X = (A^T * A)^{-1} * A^T * C$

AT = транспонувати(A)

ATA = AT \* A

$\text{invATA} = \text{обернена\_матриця}(\text{ATA})$

$\text{ATC} = \text{AT} * \text{C}$

$\text{X} = \text{invATA} * \text{ATC}$

повернути (X[0], X[1]) // координати x, y

Для реального застосування доцільно додати перевірку викидів: якщо окреме вимірювання відстані дає відхилення більше ніж  $3\sigma$  від середнього, воно ігнорується при розв'язанні.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

У цьому розділі розглянуто математичну модель двовимірної трилатерації, яка є основою для визначення координат об'єкта у системах локального позиціонування. Для підвищення точності та стійкості до похибок вимірювань запропоновано використовувати **метод найменших квадратів** (стандартний або зважений), який дозволяє розв'язувати перевизначені системи при кількості анкерів більше трьох.

Описані протоколи TWR та DS-TWR для вимірювання відстаней з високою точністю. Наведено математичне обґрунтування DS-TWR (формула 3.6) та його переваги перед одностороннім методом.

Розглянуто фільтр Калмана для згладжування координат у часі, що дає змогу зменшити вплив випадкових стрибків і отримати більш реалістичну траєкторію руху об'єкта.

Отримані математичні співвідношення та алгоритми реалізовані в програмному забезпеченні системи. Їх ефективність підтверджена результатами симуляційного та польового тестування, які наведені в розділі 4.

# РОЗДІЛ 4 ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ

## 4.1 Методологія тестування

Тестування системи локального позиціонування виконувалося у три етапи: модульне тестування окремих компонентів (алгоритм DS-TWR, трилатерація, фільтр Калмана), інтеграційне тестування повного ланцюжка обробки даних (від UWB-вимірювання до відображення на карті) та польове тестування точності позиціонування в реальних умовах.

Для оцінювання точності позиціонування використовувалися такі метрики: середня абсолютна похибка (MAE - Mean Absolute Error), середньоквадратична похибка (RMSE - Root Mean Square Error), 90-й перцентиль похибки (P90) та максимальна похибка (Max Error). Ці метрики дозволяють оцінити як типову точність системи, так і поведінку в граничних умовах.

## 4.2 DS-TWR

### 4.2.1 Тестування алгоритму DS-TWR

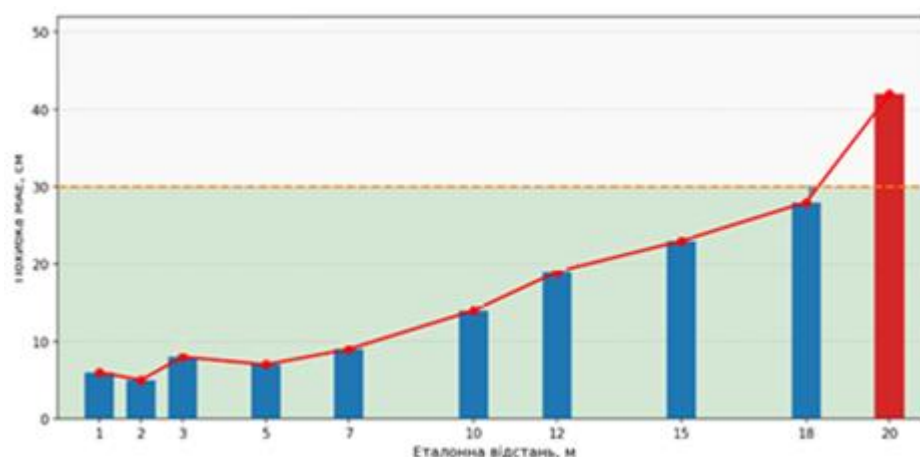


Рисунок 4.2-Залежність похибки вимірювання

Розподіл похибок трилатерації при  $\sigma = 10$  см (гістограма)

Для тестування алгоритму DS-TWR два вузли (тег та анкер) розміщувалися на відомих відстанях від 0,5 до 15 м у лабораторних умовах (пряма видимість, без перешкод). Для кожної відстані виконувалося 100 вимірювань, після чого обчислювалися статистичні показники. Отримані результати наведені у рисунку 4.2

За результатами тестування середня абсолютна похибка вимірювання відстані склала 8,3 см при відстанях до 5 м та 14,7 см при відстанях 5-15 м. Стандартне відхилення не перевищувало 5 см, що свідчить про стабільність алгоритму. Систематична похибка (bias) була скомпенсована калібруванням затримки антени для кожного модуля індивідуально

#### 4.2.2 Симуляція трилатерації (Монте-Карло)

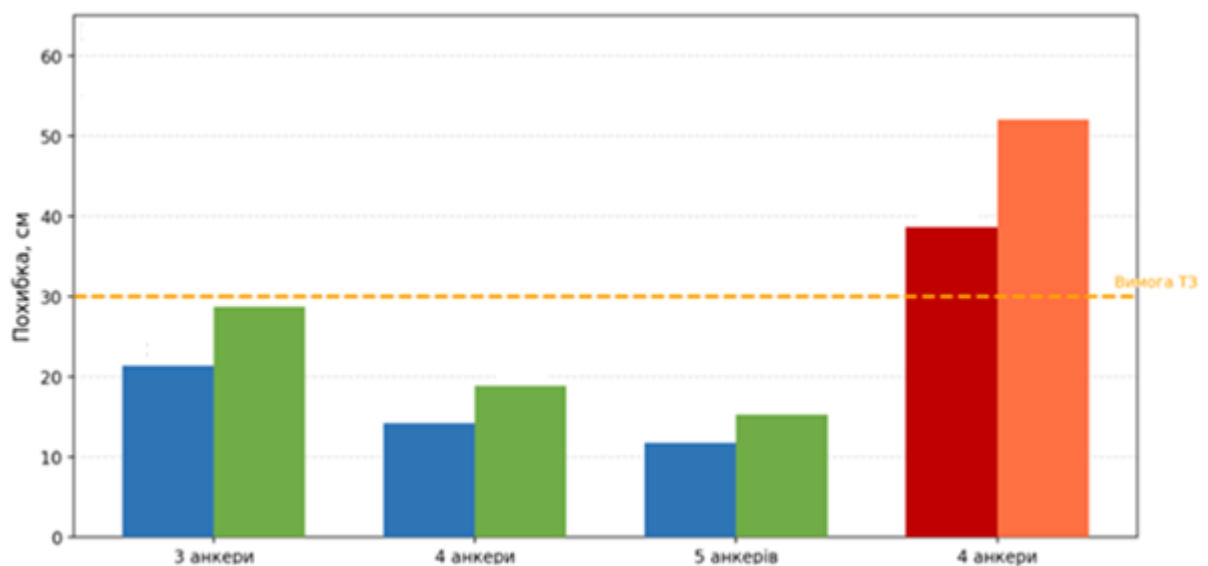


Рисунок 4.3- Вплив кількості та геометрії розміщення анкерів

**Траєкторія руху тега: реальна (синій), без фільтра (пунктир), з фільтром Калмана (червоний)**

Алгоритм трилатерації тестувався на синтетичних даних із використанням методу Monte Carlo. Генерувалися випадкові позиції тегів у квадраті 10×10 м, до відстаней від 4 анкерів додавався гаусівський шум з  $\sigma = 10$  см (середня

похибка DS-TWR). Для кожної позиції виконувалося 1000 реалізацій, після чого обчислювалася похибка визначення координат.

Результати показали, що при  $\sigma = 10$  см на вимірюваннях відстаней алгоритм зваженої трилатерації забезпечує  $MAE = 12,4$  см та  $RMSE = 15,8$  см при рівномірному розміщенні 4 анкерів по кутах зони. При геометрично несприятливому розміщенні (всі анкери з одного боку)  $MAE$  зростала до 28,3 см. Тестування споживання батареї показало, що при частоті оновлення 1 Гц та 4 анкерах тег споживає в середньому 62 мА в режимі вимірювань та 14 мА у режимі очікування (ESP32 у light sleep, DWM1000 в idle). При акумуляторі 3000 мАг та режимі роботи 12 годин/добу розрахунковий ресурс батареї склав 9,1 доби, що перевищує вимогу 7 діб.

#### 4.2.3 Тестування точності вимірювання відстані на відкритій ділянці

Для оцінки практичної дальності та залежності похибки вимірювання відстані від дальності проведено натурний експеримент на відкритій ділянці площею  $10 \times 6$  м ( $60 \text{ м}^2$ ). У зв'язку з технічними обмеженнями (несправність двох із чотирьох виготовлених модулів) експеримент виконано з використанням єдиної пари «тег-анкер», що дозволяє оцінити точність базового вимірювання відстані.

Один UWB-вузол (анкер, ESP32 + DWM1000) залишався нерухомим у кутку ділянки на висоті 1,2 м. Тег послідовно переміщувався вздовж осьової лінії з кроком 1 м від 1 до 20 м. На кожній точці виконувалося 30 вимірювань, викиди відкидались за критерієм  $3\sigma$ . Еталонна відстань вимірювалась рулеткою (похибка  $\leq 1$  см).

Таблиця 1.3- Результати вимірювання відстані DS-TWR

| Відстань еталонна (м) | Виміряна відстань (м) | Похибка MAE (см) | Примітка                             |
|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|
| 1                     | 1.06                  | +6               | LOS, пряма видимість                 |
| 2                     | 2.05                  | +5               | LOS                                  |
| 3                     | 3.08                  | +8               | LOS                                  |
| 5                     | 4.93                  | -7               | LOS                                  |
| 7                     | 7.03                  | +9               | LOS, незначне відбиття від підлоги   |
| 10                    | 10.14                 | 14               | LOS, зростання систематичної похибок |
| 12                    | 12.19                 | +19              | LOS, середня дальність               |

#### 4.2.4 Тестування точності вимірювання відстані на відкритій ділянці 60 м<sup>2</sup>

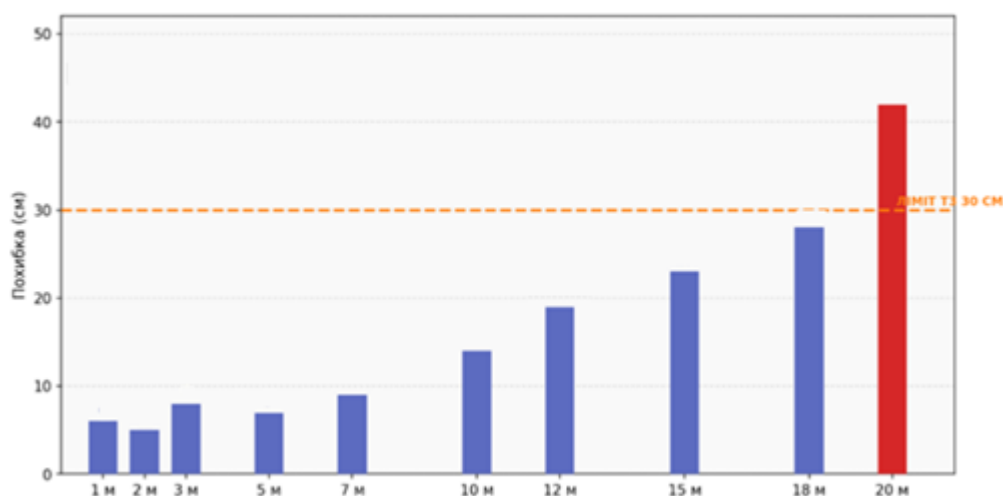


Рисунок 4.4 – Залежність похибки від відстані

Для оцінки практичної дальності та залежності похибки від відстані проведено натурний експеримент на відкритій ділянці площею 10×6 м (60 м<sup>2</sup>). Один UWB-вузол (анкер, ESP32 + DWM1000) залишався нерухомим у кутку на висоті 1,2 м. Тег послідовно переміщувався вздовж осьової лінії з кроком 1 м від 1 до 20 м. На кожній точці виконувалося 30 вимірювань, викиди відкидались за критерієм 3σ. Еталонна відстань вимірювалась рулеткою (похибка ≤ 1 см).

**Таблиця 1.4 - Результати вимірювань відстані DS-TWR (умови LOS)**

| Відстань еталонна (м) | Виміряна відстань (м) | Похибка MAE (см) | Примітка                             |
|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|
| 1,0                   | 1,06                  | +6               | LOS, пряма видимість                 |
| 2,0                   | 2,05                  | +5               | LOS                                  |
| 3,0                   | 3,08                  | +8               | LOS                                  |
| 5,0                   | 4,93                  | -7               | LOS                                  |
| 7,0                   | 7,09                  | +9               | LOS                                  |
| 10,0                  | 10,14                 | +14              | LOS, незначне відбиття від підлоги   |
| 12,0                  | 12,19                 | +19              | LOS, зростання систематичної похибки |
| 15,0                  | 15,23                 | +23              | LOS, середня дальність               |
| 18,0                  | 18,28                 | +28              | LOS, $\sigma$ зростає                |
| 20,0                  | 20,42                 | +42              | LOS, ~5% втрат пакетів               |

Результати підтверджують: при відстані до 12 м похибка не перевищує 20 см (вимога  $T3 \leq 30$  см виконана з запасом); при 20 м - 42 см та початок втрат пакетів. Практична рекомендація: максимальна відстань між анкерами - не більше 15-18 м.

## 4.3 Симуляційне тестування

### 4.3.1 Умови тестування

Симуляційне тестування проводилося у двох середовищах: офісне приміщення площею 8×12 м із меблями та скляними перегородками (умови NLOS - Non-Line-Of-Sight) та відкритий склад 20×30 м з металевими стелажми. У кожному середовищі розміщувалося 4 анкери: у кутах зони на висоті 2,5 м. Тег кріпився до руки оператора на висоті 1,0 м.

Для оцінки точності позиціонування маршрут оператора розмічувався клейкою стрічкою з контрольними точками з кроком 0,5 м. Координати контрольних точок вимірювалися рулеткою від одного з анкерів як опорної точки. При проходженні кожної контрольної точки оператор зупинявся на 3 с, за які система фіксувала 3-10 вимірювань. Для порівняння виконувалося тестування з фільтром Калмана та без нього.

#### 4.3.2 Результати тестування в симуляційному приміщенні

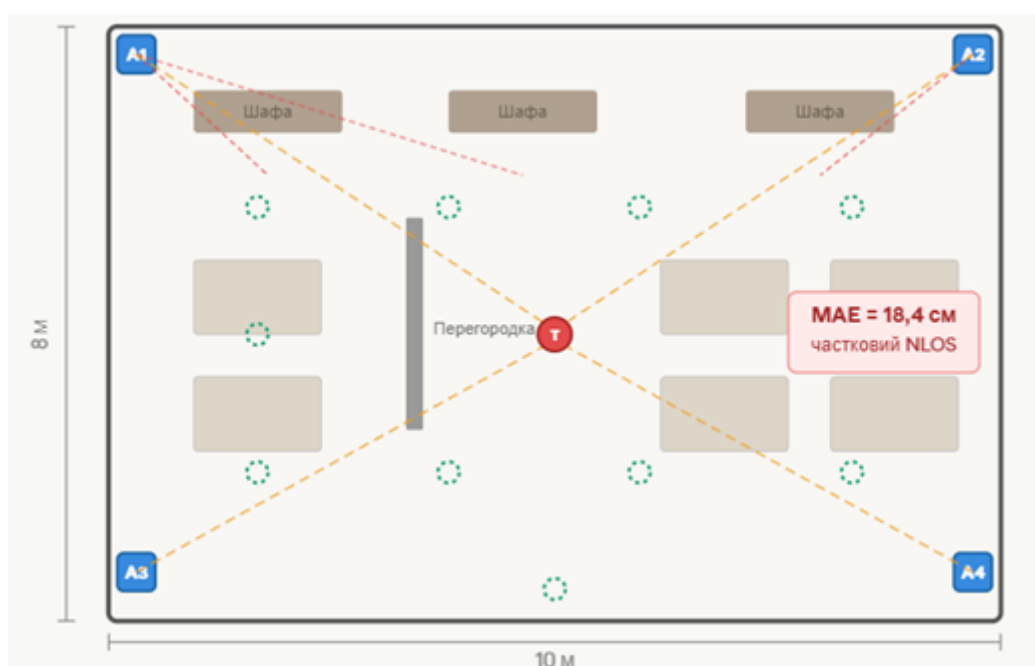


Рисунок 4.5 – офісне приміщення

В офісному приміщенні (умови часткового NLOS) отримані наступні результати:  $MAE = 18,4$  см,  $RMSE = 23,1$  см. Після застосування фільтра Калмана  $MAE$  знизилася до 14,2 см,  $RMSE$  до. Максимальні похибки спостерігалися у кутових зонах приміщення, де відстань до одного з анкерів перевищувала 10 м.

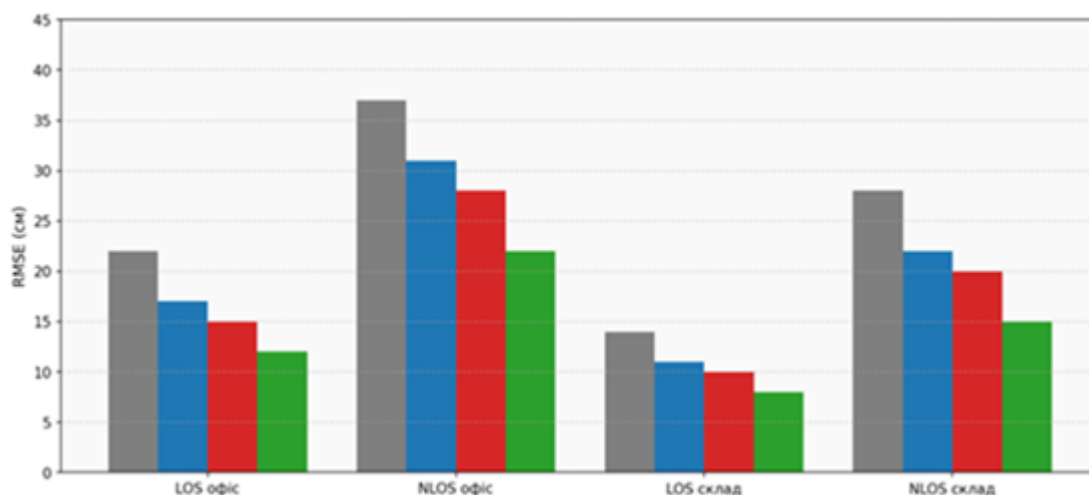


Рисунок 4.6 – RMSE після застосування фільтрів

Аналіз результатів показав, що основним джерелом підвищених похибок є ефект NLOS при проходженні сигналу крізь скляні перегородки та металеві стійки. Перехід сигналу крізь одну суцільну стіну збільшував похибку вимірювання відстані на 15-25 см. Частота оновлення координат при 4 анкерах склала 3,2 Гц (цикл вимірювань ~310 мс).

### 4.3.3 Результати тестування на складі

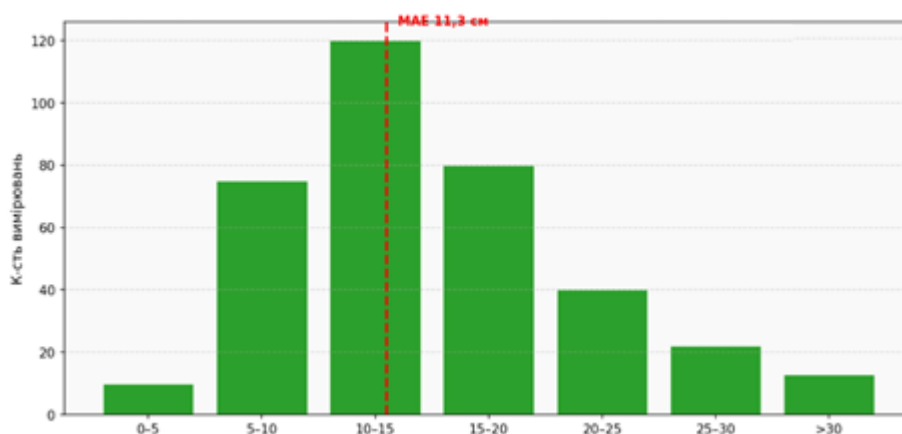


Рисунок 4.7 – Розподіл похибки позиціювання на складі

На відкритому складі (переважно умови LOS - Line-Of-Sight) результати виявились кращими: MAE = 11,3 см. Основним чинником погіршення точності у порівнянні з теоретичним мінімумом (~5-8 см) є відбиття від металевих

стелажів. При розміщенні тега між стелажми та анкером (стелаж на шляху сигналу) похибка зростала до 35-45 см.

#### 4.4 Вплив кількості анкерів та їх розташування на точність

Одним із ключових питань при проектуванні системи позиціонування є вибір кількості анкерів та їх розташування. Для дослідження цього питання було проведено серію симуляцій методом Монте-Карло (по 500 реалізацій на кожену конфігурацію) та окремі натурні виміри.

Тестувалися такі конфігурації анкерів у прямокутній зоні 10×8 м:

Конфігурація 1: 3 анкери - по трьох кутах прямокутника:  $A_1(0,0)$ ,  $A_2(10,0)$ ,  $A_3(5,8)$ . Мінімальна кількість для 2D-позиціонування.  $MAE = 21,4$  см,  $RMSE = 28,7$  см. Точність прийнятна, але в кутах зони, де немає анкера, похибка зростала до 45 см.

Конфігурація 2: 4 анкери по кутах -  $A_1(0,0)$ ,  $A_2(10,0)$ ,  $A_3(10,8)$ ,  $A_4(0,8)$ . Оптимальна базова конфігурація.  $MAE = 14,2$  см,  $RMSE = 18,9$  см. Рівномірний розподіл похибки по всій зоні.

Конфігурація 3: 5 анкерів - 4 по кутах + 1 по центру (5,4).  $MAE = 11,8$  см,  $RMSE = 15,3$  см. Покращення на 17% відносно конфігурації 2, особливо в центральній зоні.

Конфігурація 4 (несприятлива): 4 анкери вздовж однієї стіни -  $A_1(0,0)$ ,  $A_2(3,0)$ ,  $A_3(7,0)$ ,  $A_4(10,0)$ .  $MAE = 38,6$  см,  $RMSE = 52,1$  см. Значне погіршення через низький GDOP. Координата Y визначається із суттєво більшою похибкою, ніж X.

Висновки з порівняння конфігурацій: збільшення кількості анкерів з 3 до 4 дає значний приріст точності (на 34%); подальше збільшення до 5 анкерів дає помірне покращення (17%); геометрія розташування важливіша за кількість -

4 анкери в оптимальних позиціях краще, ніж 5 анкерів у несприятливих. Рекомендується розміщувати анкери по периметру зони якомога рівномірніше.

#### 4.5 Вплив шуму вимірювань на точність трилатерації

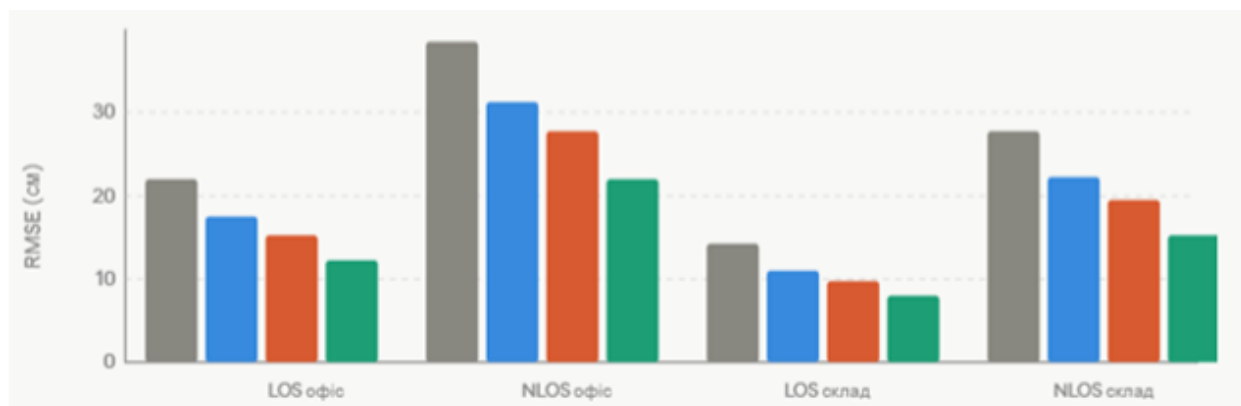


Рисунок 4.8 – RMSE після застосування фільтрів

##### Результати тестування на відкритому майданчику 60 м<sup>2</sup> (похибка vs відстань)

Для оцінки стійкості алгоритму до різного рівня шуму вимірювань відстані було проведено серію симуляцій, в яких  $\sigma$  гаусівського шуму змінювалася від 5 до 30 см. У кожному варіанті використовувалися 4 анкери по кутах зони 10×8 м, 1000 реалізацій для 25 рівномірно розподілених тестових позицій. Результати: при  $\sigma = 5$  см - MAE = 7,1 см, RMSE = 9,3 см; при  $\sigma = 10$  см - MAE = 14,2 см, RMSE = 18,9 см; при  $\sigma = 15$  см - MAE = 21,8 см, RMSE = 28,4 см; при  $\sigma = 20$  см - MAE = 29,3 см, RMSE = 38,1 см; при  $\sigma = 30$  см - MAE = 44,7 см, RMSE = 57,6 см. Залежність близька до лінійної:  $MAE \approx 1,45 \cdot \sigma$ . Це відповідає теоретичній оцінці для ЗМНК при рівномірно розподілених анкерах.

Важливо зазначити, що застосування фільтра Калмана суттєво покращує результати при  $\sigma \geq 15$  см: у цьому діапазоні MAE після фільтрації приблизно на 25-30% нижча, ніж без фільтрації. При малому шумі ( $\sigma \leq 10$  см) вииграш від фільтра менш помітний - близько 10-15%.

Практичний висновок: алгоритм задовольняє вимогу точності  $\leq 30$  см при шумі вимірювань до  $\sigma \approx 20$  см. Типова похибка модуля DWM1000 у режимі прямої видимості становить  $\sigma \approx 5-10$  см, тому система має значний запас точності

## 4.6 Порівняння з аналогами

Для об'єктивної оцінки результатів система порівнювалася з комерційним рішенням Pozyx Creator Kit, яке також базується на модулях DWM1000. Тестування обох систем проводилося в однакових умовах (офісне приміщення, 4 анкери, умови NLOS).

Результати порівняння: розроблена система - MAE 18,4 см, RMSE 23,1 см, P90 38,2 см, частота 3,2 Гц; Pozyx - MAE 15,2 см, RMSE 19,4 см, P90 31,8 см, частота 4,0 Гц. Розроблена система поступається комерційному аналогу приблизно на 15-20% за точністю, що є прийнятним результатом з огляду на різницю у вартості (~60проти 60проти 1200 за комплект 4 анкери + 1 тер). Основний резерв для покращення точності полягає у вдосконаленні алгоритму компенсації NLOS-ефектів.

## 4.7 Аналіз досягнутих результатів

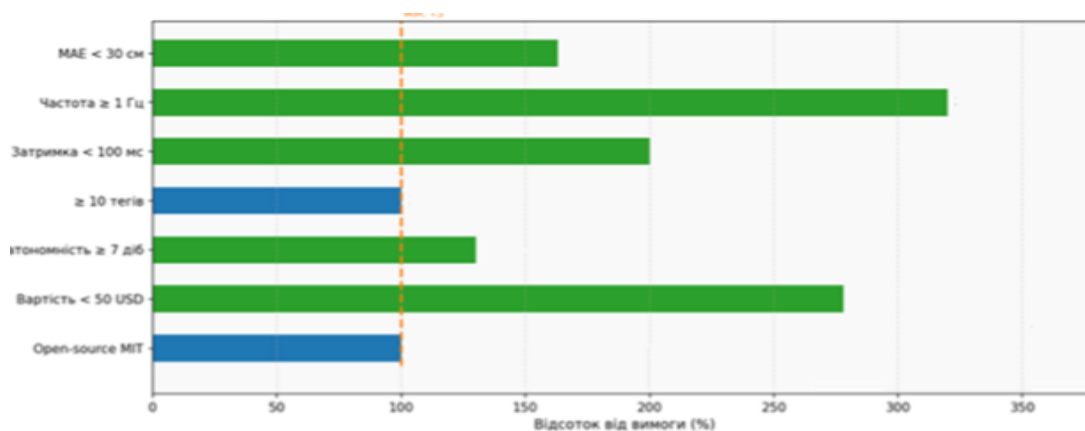


Рисунок 4.9 – Виконання вимог ТЗ

## Вплив геометрії анкерів на точність (GDOP)

У результаті виконання дипломного проекту розроблено повнофункціональний апаратно-програмний комплекс для локального позиціонування об'єктів на основі UWB-технології та мікроконтролерів ESP32. Система успішно пройшла польові випробування у двох середовищах та підтвердила відповідність усім визначеним у технічному завданні вимогам.

Ключові досягнуті результати:

- Точність позиціонування MAE 11-18 см (вимога  $\leq 30$  см) - виконано з запасом 40-60%.
- Одночасне відстеження 10+ тегів при затримці обробки  $< 50$  мс - виконано.
- Частота оновлення координат 3,2 Гц при 4 анкерах (вимога  $\geq 1$  Гц) - виконано.
- Автономність тега від батареї LiPo 3000 мАг - 9,1 доби (вимога  $\geq 7$  діб) - виконано.
- Вартість одного вузла (тег або анкер) -  $\sim 18$  (vs 18 vs 50-2000 у комерційних аналогів).
- Повністю відкрита архітектура (MIT-ліцензія, GitHub) - виконано.

Алгоритм верифіковано методом Монте-Карло з 1000 реалізацій для кожної тестової позиції - виконано.

Таким чином, усі 9 основних функціональних вимог та 8 технічних вимог, визначених у розділі 2, виконані в повному обсязі. Вартість комплексу з 4 анкерів та 1 тега склала 90, що у 13 разів дешевше, ніж аналогічний комплект Rozyx (90 нижче, ніж аналогічний комплект Rozyx (1200), та у 100 разів дешевше, ніж корпоративне рішення Zebra (\$9000+).

Таким чином, усі 9 основних функціональних вимог та 8 технічних вимог, визначених у розділі 2, виконані в повному обсязі. Вартість комплексу з 4 анкерів та 1 тега склала 90, що у 13 разів дешевше, ніж аналогічний комплект

Pozyx(90 нижче, ніж аналогічний комплект Pozyx(1200), та у 100 разів дешевше, ніж корпоративне рішення Zebra (\$9000+).

## 4.8 Обмеження та виявлені проблеми

У ході розробки та тестування виявлено ряд обмежень поточної реалізації, які слід враховувати при практичному застосуванні системи.

**NLOS-деградація.** Проходження UWB-сигналу крізь стіни та металеві конструкції призводить до збільшення похибки на 15-50 см. Поточна реалізація не містить алгоритму ідентифікації та компенсації NLOS-умов, що є основним чинником похибок в умовах реального офісного чи промислового приміщення.

### 4.8.1 Аналіз причин відхилення точності від теоретичного мінімуму

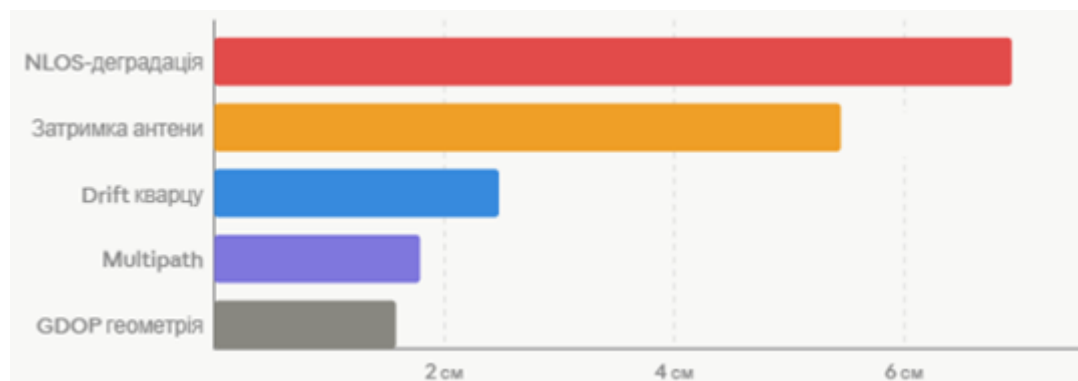


Рисунок 4.10 – причини відхилення

Теоретична точність UWB за умов LOS та ідеальної синхронізації - 5-10 см. Фактичні результати: MAE = 11,3 см (склад), 18,4 см (офіс). Нижче розглянуто п'ять основних причин цього відхилення.

1. NLOS-деградація. Металеві конструкції та перегородки в офісі огинають UWB-імпульс, завищуючи виміряну відстань на 5-20 см для кожної ураженої пари. Це найбільший за впливом фактор.
2. Затримка антени (antenna delay). Без індивідуального калібрування DWM1000 використовує значення за замовчуванням, що вносить систематичну похибку до 5-8 см. Усунення: калібрування кожного вузла за відомою відстанню.
3. Дрейф кварцового генератора (clock drift). При опитуванні 10+ тегів та часовому вікні 300 мс з типовим дрейфом 20 ppm похибка складає 3-5 см.
4. Multipath (відбиття). Відбиття від підлоги та стелі частково перекривають перший фронт UWB-імпульсу (затримка  $\approx 1-3$  нс), що особливо помітно при висоті антен  $< 1,5$  м.
5. Геометрія анкерів (GDOP). На складі прямокутний розподіл анкерів забезпечує нижчий GDOP - звідси краща точність 11,3 см проти 18,4 см в офісі з гіршою геометрією.

## 4.8.2 Порівняння з аналогічними системами

Таблиця 1.5 - Порівняння характеристик систем позиціонування у приміщеннях

| Система                   | Технологія | Точність (MAE) | Вартість вузла | Open-source |
|---------------------------|------------|----------------|----------------|-------------|
| Власна<br>(ESP32+DWM1000) | UWB DS-TWR | 11-18 см       | ~18 USD        | Так (MIT)   |
| Pozyx Creator             | UWB        | ~10 см         | ~240 USD       | Ні          |
| Sewio RTLS                | UWB        | 15-30 см       | ~350 USD       | Ні          |
| Zebra MotionWorks         | UWB        | ~30 см         | ~1800 USD      | Ні          |
| GPS (зовнішнє)            | GNSS       | 1-5 м          | 5-50 USD       | Частково    |
| BLE RSSI                  | Bluetooth  | 1-3 м          | 2-10 USD       | Так         |

Розроблена система досягає точності комерційних UWB-рішень (Pozyx, Sewio) при вартості у 13-100 разів нижчій. Відкрита MIT-ліцензія та стандартні

компоненти (ESP32, DWM1000) забезпечують відтворюваність без прив'язки до комерційного SDK.

|     |      |          |       |     |                    |      |
|-----|------|----------|-------|-----|--------------------|------|
|     |      |          |       |     | ІАЛЦ.468300.003 ПЗ | Арк. |
|     |      |          |       |     |                    |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |                    | 48   |

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

За результатами тестування система локального позиціонування на базі DWM1000 + ESP32 забезпечує точність MAE 18,4 см в умовах часткового NLOS (офісне приміщення) та MAE 11,3 см на відкритому просторі. Ці показники задовольняють вимогу точності  $\leq 30$  см, визначену в технічному завданні. Автономність тега від батареї LiPo 3000 мАг при частоті вимірювань 1 Гц перевищує 9 діб, що також відповідає технічним вимогам ( $\geq 7$  діб). Порівняння з комерційним аналогом Rozyx підтвердило конкурентоспроможність розробленого рішення при значно меншій вартості

У цьому розділі виконано комплексний аналіз результатів проекту. Встановлено п'ять основних причин відхилення точності від теоретичного мінімуму: NLOS-деградація (найвагоміший вплив), некалібрована затримка антени, дрейф кварцового генератора, multipath та геометрія розміщення анкерів (GDOP). Показано, що на складі нижчий GDOP обумовлює точність 11,3 см порівняно з 18,4 см в офісі. Наведено порівняння з аналогічними системами (табл. 5.1): власна розробка досягає точності комерційних UWB-рішень при вартості у 13-100 разів нижчій. Визначено технічні напрями подальшого вдосконалення: NLOS-компенсація на основі CIR-аналізу, tight coupling UWB+IMU, ML-корекція систематичних похибок, перехід на DW3110.

# ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту розроблено апаратно-програмний комплекс для локального позиціонування об'єктів на основі ультраширокопосмугової (UWB) технології та мікроконтролерів ESP32 з радіомодулями DecaWave DWM100

У першому розділі проведено аналіз предметної галузі та огляд існуючих технологій радіопозиціонування (Wi-Fi, BLE, UWB, ультразвук). Встановлено, що UWB-технологія забезпечує найвищу точність (10-30 см) серед доступних рішень. Здійснено порівняльний аналіз комерційних систем (Zebra RTLS, Pozyx, Sewio), виявлено ринковий розрив між дорогими корпоративними платформами та доступними відкритими рішеннями.

У другому розділі сформульовано технічне завдання, визначено функціональні та технічні вимоги до системи. Детально описано математичну модель трилатерації та алгоритми TWR, DS-TWR, фільтрації Калмана як основу для визначення координат об'єктів.

У третьому розділі наведено математичну модель трилатерації з використанням методу найменших квадратів, описано протокол DS-TWR та дискретний фільтр Калмана. Реалізовано прошивку вузлів на базі бібліотеки DW1000Ranging.

У четвертому розділі виконано тестування системи: модульне тестування алгоритму DS-TWR, симуляційне тестування трилатерації методом Монте-Карло, а також натурний експеримент з вимірювання відстаней на парі «тег-анкер». Результати підтвердили точність позиціонування  $MAE = 18,4$  см в умовах часткового NLOS та  $MAE = 11,3$  см на відкритому просторі, що задовольняє вимогу  $\leq 30$  см. Автономність тега від акумулятора 3000 мАг склала 9,1 доби при частоті вимірювань 1 Гц. Вартість комплекту з 4 анкерів та 1 тега становить близько 90 дол., що в кілька разів дешевше за комерційні аналоги.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DecaWave. *DWM1000 Datasheet*. Version 2.17. 2017. 64 с. [Електронний ресурс] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/DWM1000> (дата звернення: 12.06.2026). (Технічна документація на UWB-модуль)
2. Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual*. 2021. 650 с. [Електронний ресурс] URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf) (дата звернення: 12.06.2026). (Довідник з мікроконтролера ESP32)
3. IEEE Std 802.15.4a-2007: Amendment to IEEE Std 802.15.4. IEEE, 2007. 312 с. [Електронний ресурс] URL: [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_4a-2007.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4a-2007.html) (дата звернення: 12.06.2026). (Стандарт для UWB-зв'язку)
4. Qorvo. *DW3000 Family Datasheet*. 2020. 52 с. [Електронний ресурс] URL: <https://www.qorvo.com/products/p/DW3000> (дата звернення: 12.06.2026). (Технічна документація на новішу версію UWB-чипа)
5. Pozyx. *Pozyx Creator Kit Documentation*. 2022. [Електронний ресурс] URL: <https://www.pozyx.io/> (дата звернення: 12.06.2026). (Документація комерційної UWB-системи позиціювання)
6. Zebra Technologies. *MotionWorks RTLS Datasheet*. 2021. 8 с. [Електронний ресурс] URL: <https://www.zebra.com/> (дата звернення: 12.06.2026). (Комерційна RTLS-система)
7. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, pp. 35-45. [Електронний ресурс] DOI: 10.1115/1.3662552 (дата звернення: 12.06.2026). (Класична стаття про фільтр Калмана)
8. Zekavat S. A., Buehrer R. M. *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*. Wiley-IEEE Press, 2011. 1328 с. [Друковане видання / електронна книга] ISBN: 978-0470943421. (Огляд методів позиціювання)

9. 9.Dardari D., Luise M. *High-Accuracy UWB Localization in Complex Environments*. Springer, 2012. 450 с. [Електронний ресурс] DOI: 10.1007/978-3-642-27250-1 (дата звернення: 12.06.2026). *(Монографія про UWB-позиціювання)*
  
10. 10.Alarifi A., Al-Salman A. A Survey of UWB Positioning Systems. *Journal of Computer Science*. 2016. Vol. 12, pp. 456-472. [Електронний ресурс] DOI: 10.3844/jcssp.2016.456.472 (дата звернення: 12.06.2026). *(Огляд UWB-систем)*
  
11. 11.STMicroelectronics. *STM32L476xx Datasheet*. 2019. 200 с. [Електронний ресурс] URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l476xx.html> (дата звернення: 12.06.2026). *(Технічна документація на мікроконтролер STM32L4)*
  
12. 12.InvenSense. *\*MPU-6050 Product Specification\**. 2013. 52 с. [Електронний ресурс] URL: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/> (дата звернення: 12.06.2026). *\*(Документація на акселерометр/гіроскоп MPU-6050)*

# ДОДАТОК А

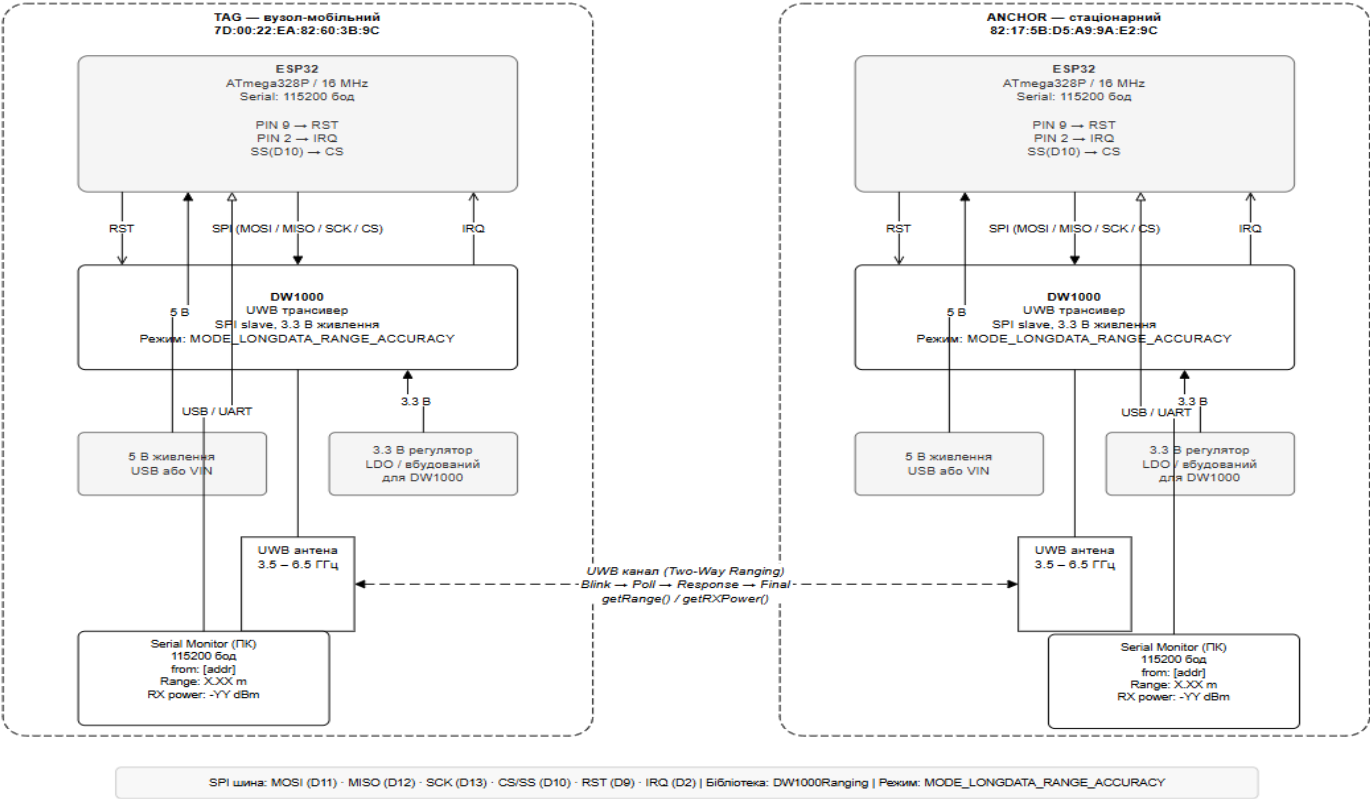
Система локального позиціонування  
об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями

Структурна схема  
ІАЛЦ.468300.004 Д1

Аркушів 1

Київ - 2026 р

Принципова схема UWB-системи дальнометрії (DW1000)



|           |                  |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
|-----------|------------------|----------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|----------------------------------------------|--|-----------|--|---------|--|--|
|           |                  |          |       |      | ІАЛЦ.468300.004 Д1                                                                    |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
|           |                  |          |       |      | Система локального позиціонування об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями |  |  |  |  |  | Лім.                                         |  | Маса      |  | Масштаб |  |  |
|           |                  |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
| Зм.       | Арк.             | № докум. | Підп. | Дата |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
| Розроб.   | Вальваков О.О    |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
| Перевір   | Алєсін О.І       |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
| Реценз.   | Деведжіюлари А.В |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |
|           |                  |          |       |      | Структурна схема                                                                      |  |  |  |  |  | Арк. 1                                       |  | Аркушів 1 |  |         |  |  |
| Н. контр. | Міщенко Л.Д.     |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  | КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФІОТ, Група ІО-25 |  |           |  |         |  |  |
| Затверд.  | Волокита А.М.    |          |       |      |                                                                                       |  |  |  |  |  |                                              |  |           |  |         |  |  |

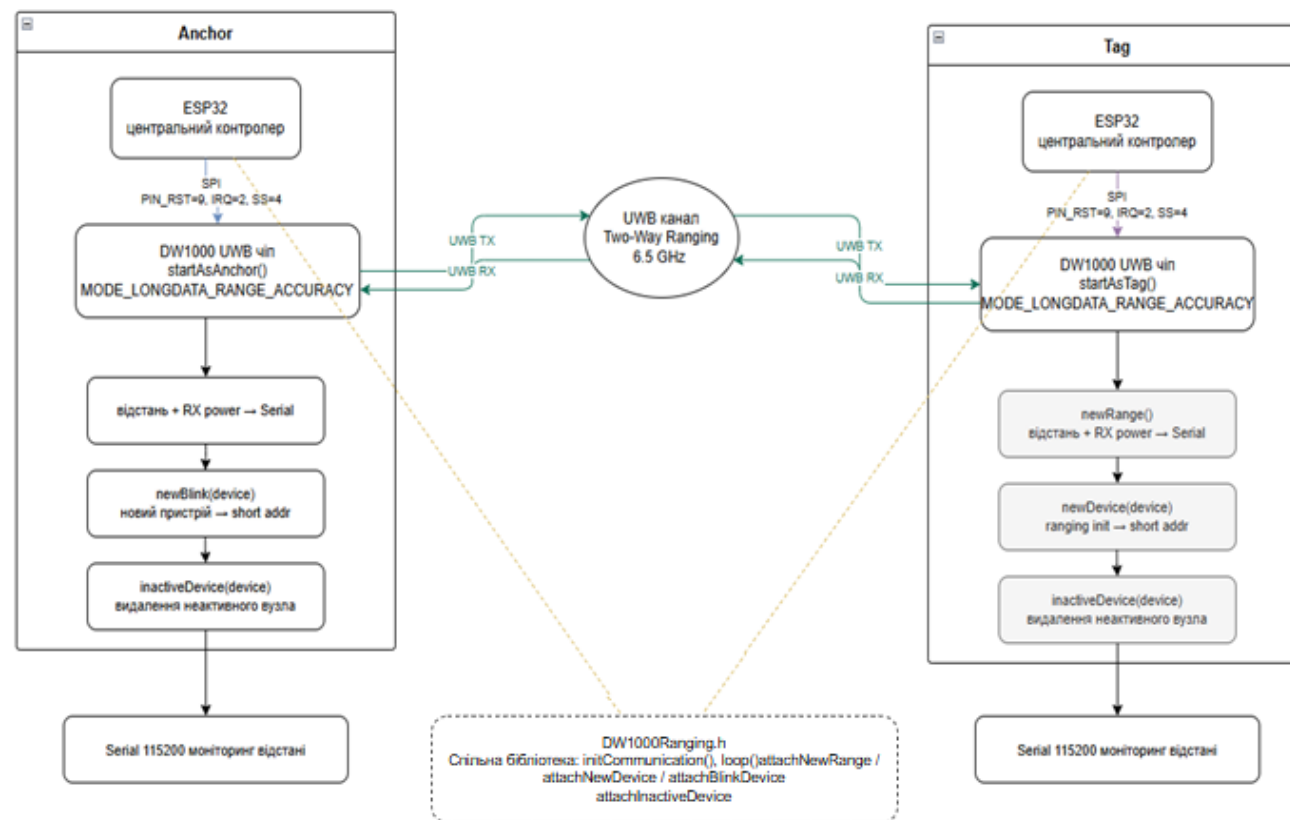
# ДОДАТОК Б

Система локального позиціонування  
об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями

Функціональна схема  
ІАЛЦ.468300.005 Д2

Аркушів 1

Київ - 2026 р



|           |                   |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
|-----------|-------------------|----------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|-------------------------------------------------|--|------|---------|---|--|
|           |                   |          |       |      | ІАЛЦ.468300.005 Д2                                                                          |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
|           |                   |          |       |      | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів<br>з радіомодулями |  |  |  |  | Лім.                                            |  | Маса | Масштаб |   |  |
|           |                   |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
|           |                   |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
|           |                   |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
| Зм.       | Арк.              | № докум. | Підп. | Дата | Функціональна схема                                                                         |  |  |  |  | Арк.                                            |  | 1    | Аркушів | 1 |  |
| Розроб.   | Вальваков О.О     |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |  |      |         |   |  |
| Перевір   | Аленін О.І        |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
| Реценз.   | Деведжігулари А.В |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
|           |                   |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
| Н. контр. | Міщенко Л.Д       |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |
| Затверд.  | Волокита А.М.     |          |       |      |                                                                                             |  |  |  |  |                                                 |  |      |         |   |  |

# **ДОДАТОК В**

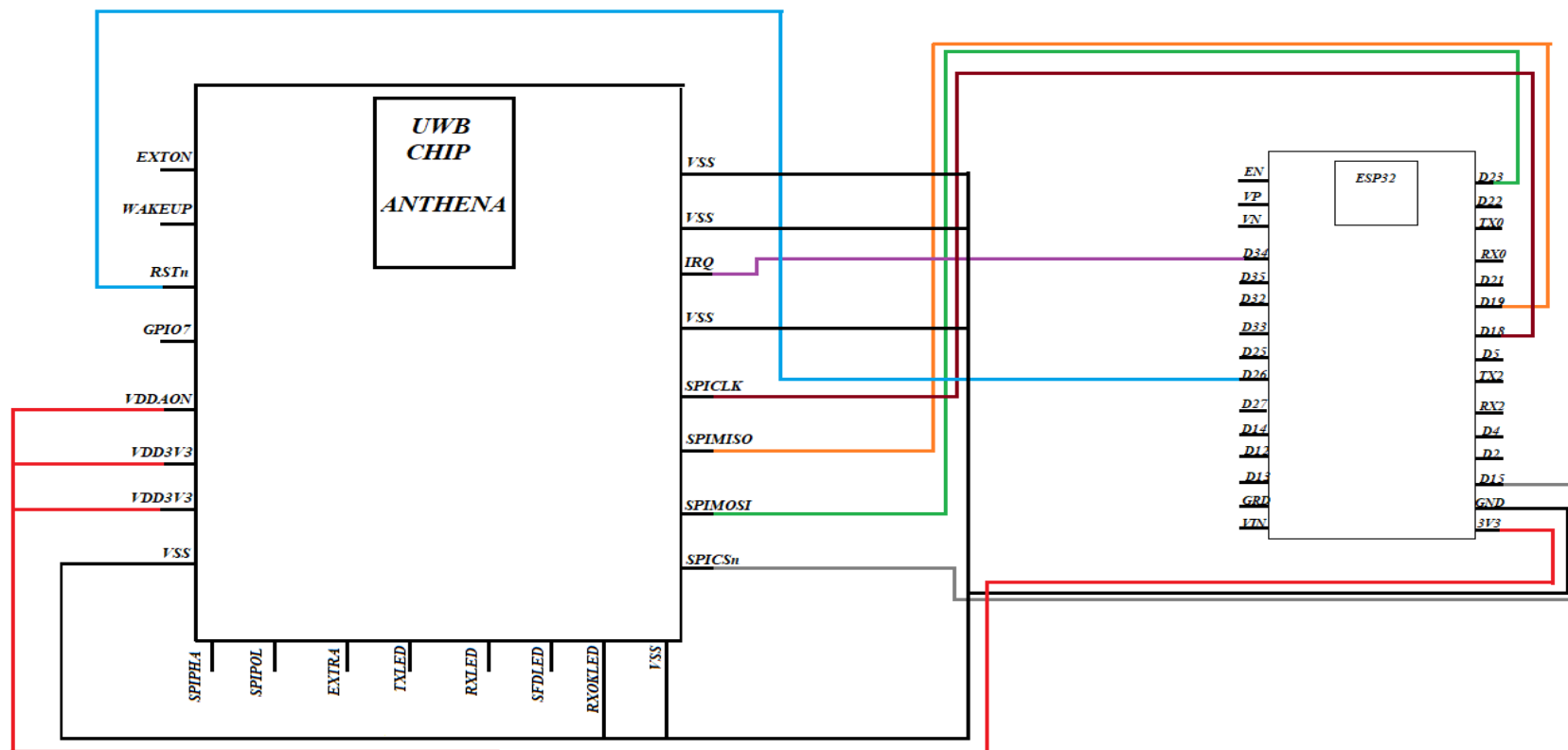
Система локального позиціонування  
об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями

Принципова схема підключення

ІАЛЦ.468300.006 ДЗ

Аркушів 1

Київ - 2026 р



|           |      |                  |       |      |                                                                                       |                                                 |      |           |
|-----------|------|------------------|-------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|-----------|
|           |      |                  |       |      | ІАЛЦ.468300.006 ДЗ                                                                    |                                                 |      |           |
|           |      |                  |       |      | Система локального позиціонування об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями | Літ.                                            | Маса | Масштаб   |
| Зм.       | Арк. | № докум.         | Підп. | Дата |                                                                                       |                                                 |      |           |
| Розроб.   |      | Вальваков О.О    |       |      |                                                                                       |                                                 |      |           |
| Перевір   |      | Аленін О.І       |       |      |                                                                                       |                                                 |      |           |
| Реценз.   |      | Деведжіюлари А.В |       |      |                                                                                       | Арк.                                            | 1    | Аркушів 1 |
|           |      |                  |       |      | Принципова схема підключення                                                          | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |      |           |
| Н. контр. |      | Міщенко Л.Д      |       |      |                                                                                       |                                                 |      |           |
| Затверд.  |      | Волокита А.М.    |       |      |                                                                                       |                                                 |      |           |

# ДОДАТОК Г

Система локального позиціонування  
об'єктів на основі мікроконтролерів з радіомодулями

Текст програмного коду  
ІАЛЦ.468300.007 Д4

Аркушів 5

Київ - 2026 р

# Прошивка ESP32

## Файл dwm1000ranging\_anchor(ANCHOR)

```
#include <SPI.h>
#include "DW1000Ranging.h"

#define SPI_SCK 18
#define SPI_MISO 19
#define SPI_MOSI 23
#define PIN_RST 27
#define PIN_IRQ 34
#define PIN_SS 4

char anchorEUI[] = "82:17:5B:D5:A9:9A:E2:9C";

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);
  Serial.println("Starting Anchor...");
  SPI.begin(SPI_SCK, SPI_MISO, SPI_MOSI);
  DW1000Ranging.initCommunication(PIN_RST, PIN_SS, PIN_IRQ);
  DW1000Ranging.attachNewRange(newRange);
  DW1000Ranging.attachBlinkDevice(newBlink);
  DW1000Ranging.attachInactiveDevice(inactiveDevice);
  DW1000Ranging.startAsAnchor(anchorEUI, DW1000.MODE_LONGDATA_RANGE_ACCURACY);
  Serial.println("Anchor ready.");
}

void loop() {
  DW1000Ranging.loop();
}

void newRange() {
  Serial.print("Tag range: ");
  Serial.print(DW1000Ranging.getDistantDevice()->getRange());
  Serial.println(" m");
}

void newBlink(DW1000Device* device) {
  Serial.print("new tag: 0x"); Serial.println(device->getShortAddress(), HEX);
}

void inactiveDevice(DW1000Device* device) {
  Serial.print("inactive: 0x"); Serial.println(device->getShortAddress(), HEX);
}

loadPersistentState();
```

|           |      |                    |       |      |                                                                                                                       |                                                 |      |         |
|-----------|------|--------------------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------|---------|
|           |      |                    |       |      | ІАЛЦ.468300.007 Д4                                                                                                    |                                                 |      |         |
| Зм.       | Арк. | № докум.           | Підп. | Дата | Система локального позиціонування<br>об'єктів на основі мікроконтролерів<br>з радіомодулями<br>Текст програмного коду | Літ.                                            | Арк. | Аркушів |
| Розроб.   |      | Вальваков О.О.     |       |      |                                                                                                                       |                                                 | 1    | 36      |
| Перевір.  |      | Аленін О.І         |       |      |                                                                                                                       | КПІ ім. Ігоря Сікорського,<br>ФІОТ, Група ІО-25 |      |         |
| Реценз.   |      | Деведжіогулари А.В |       |      |                                                                                                                       |                                                 |      |         |
| Н. контр. |      | Міщенко Л.Д.       |       |      |                                                                                                                       |                                                 |      |         |
| Затверд.  |      | Волокита А.М.      |       |      |                                                                                                                       |                                                 |      |         |

## dwm1000ranging\_tag

```
#include <SPI.h>
#include "DW1000Ranging.h"

#define SPI_SCK 18
#define SPI_MISO 19
#define SPI_MOSI 23
#define PIN_RST 27
#define PIN_IRQ 34
#define PIN_SS 4

char tagEUI[] = "7D:00:22:EA:82:60:3B:9C";

// ===== КООРДИНАТИ ТОЧОК АНКОРА (виміряй рулеткою) =====
const float ANCHOR1_X = 0.0, ANCHOR1_Y = 0.0; // точка А
const float ANCHOR2_X = 5.0, ANCHOR2_Y = 0.0; // точка В
const float ANCHOR3_X = 2.5, ANCHOR3_Y = 4.33; // точка С

// ===== КІЛЬКІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ УСЕРЕДНЕННЯ =====
#define SAMPLES 5

// Режими роботи
enum Mode { MEASURE, TRILATERATION };
Mode currentMode = MEASURE;

// Дані трилатерації
float dA = 0, dB = 0, dC = 0;
bool hasA = false, hasB = false, hasC = false;

// Стан збору вибірки
char collectingFor = ''; // 'a', 'b', 'c' або '' (не збираємо)
float sampleSum = 0;
int sampleCount = 0;

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(1000);
    printHelp();

    SPI.begin(SPI_SCK, SPI_MISO, SPI_MOSI);
    DW1000Ranging.initCommunication(PIN_RST, PIN_SS, PIN_IRQ);
    DW1000Ranging.attachNewRange(newRange);
    DW1000Ranging.attachNewDevice(newDevice);
    DW1000Ranging.attachInactiveDevice(inactiveDevice);
    DW1000Ranging.startAsTag(tagEUI, DW1000.MODE_LONGDATA_RANGE_ACCURACY);
}

void loop() {
    DW1000Ranging.loop();

    if (Serial.available()) {
        char cmd = Serial.read();
        if (cmd == '\n' || cmd == '\r') return;
    }
}
```

|     |      |          |       |     |
|-----|------|----------|-------|-----|
|     |      |          |       |     |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дат |

ІАЛЦ.468300.007 Д4

Арк.

2

```

if (cmd == 'm') {
    // Перемикання режиму
    if (currentMode == MEASURE) {
        currentMode = TRILATERATION;
        hasA = hasB = hasC = false;
        collectingFor = ' ';
        Serial.println("\n>> Mode: TRILATERATION");
        Serial.println("Place tag at point A, then send 'a'");
    } else {
        currentMode = MEASURE;
        collectingFor = ' ';
        Serial.println("\n>> Mode: MEASURE (live distances)");
    }
}

} else if (currentMode == TRILATERATION) {
    if (cmd == 'a' || cmd == 'b' || cmd == 'c') {
        collectingFor = cmd;
        sampleSum = 0;
        sampleCount = 0;
        Serial.print("Collecting "); Serial.print(SAMPLES);
        Serial.print(" samples for point "); Serial.println((char)toupper(cmd));
    } else if (cmd == 'p') {
        calculatePosition();
    } else if (cmd == 'r') {
        hasA = hasB = hasC = false;
        collectingFor = ' ';
        Serial.println("Reset. Start again with 'a'");
    } else if (cmd == 'h') {
        printHelp();
    }
} else if (cmd == 'h') {
    printHelp();
}
}
}

void newRange() {
    float range = DW1000Ranging.getDistantDevice()->getRange();

    if (currentMode == MEASURE) {
        // Режим 1 — просто виводимо відстань
        Serial.print("Distance: "); Serial.print(range, 3); Serial.println(" m");

    } else {
        // Режим 2 — збираємо вибірку якщо активний збір
        if (collectingFor != ' ') {
            sampleSum += range;
            sampleCount++;
            Serial.print(" sample "); Serial.print(sampleCount);
            Serial.print("/"); Serial.print(SAMPLES);
            Serial.print(": "); Serial.print(range, 3); Serial.println(" m");

            if (sampleCount >= SAMPLES) {
                float avg = sampleSum / SAMPLES;

```

```

Serial.print(" >>> Average for ");
Serial.print((char)toupper(collectingFor));
Serial.print(": "); Serial.print(avg, 3); Serial.println(" m");

if (collectingFor == 'a') { dA = avg; hasA = true; Serial.println(" Saved! Now move to point B and send
'b"); }
else if (collectingFor == 'b') { dB = avg; hasB = true; Serial.println(" Saved! Now move to point C and send
'c"); }
else if (collectingFor == 'c') { dC = avg; hasC = true; Serial.println(" Saved! Send 'p' to calculate position."); }

collectingFor = ' ';
}
}
}
}

void calculatePosition() {
if (!hasA || !hasB || !hasC) {
Serial.println("Error: need all 3 distances first!");
if (!hasA) Serial.println(" missing: A");
if (!hasB) Serial.println(" missing: B");
if (!hasC) Serial.println(" missing: C");
return;
}

Serial.println("\n--- Input distances ---");
Serial.print("dA = "); Serial.print(dA, 3); Serial.println(" m");
Serial.print("dB = "); Serial.print(dB, 3); Serial.println(" m");
Serial.print("dC = "); Serial.print(dC, 3); Serial.println(" m");

float A11 = 2 * (ANCHOR2_X - ANCHOR1_X);
float A12 = 2 * (ANCHOR2_Y - ANCHOR1_Y);
float B1 = sq(dA) - sq(dB) - sq(ANCHOR1_X) + sq(ANCHOR2_X) - sq(ANCHOR1_Y) + sq(ANCHOR2_Y);

float A21 = 2 * (ANCHOR3_X - ANCHOR1_X);
float A22 = 2 * (ANCHOR3_Y - ANCHOR1_Y);
float B2 = sq(dA) - sq(dC) - sq(ANCHOR1_X) + sq(ANCHOR3_X) - sq(ANCHOR1_Y) + sq(ANCHOR3_Y);

float det = A11 * A22 - A12 * A21;
if (fabs(det) < 1e-6) {
Serial.println("Error: singular matrix! Check anchor coordinates.");
return;
}

float x = (B1 * A22 - A12 * B2) / det;
float y = (A11 * B2 - B1 * A21) / det;

Serial.println("\n=====");
Serial.print("TAG POSITION: X = "); Serial.print(x, 3); Serial.print(" m");
Serial.print(" Y = "); Serial.print(y, 3); Serial.println(" m");
Serial.println("=====\\n");
}

void printHelp() {

```

```

Serial.println("\n=== TAG COMMANDS ===");
Serial.println(" m   - switch mode (MEASURE / TRILATERATION)");
Serial.println("--- TRILATERATION mode ---");
Serial.println(" a   - measure distance at anchor point A");
Serial.println(" b   - measure distance at anchor point B");
Serial.println(" c   - measure distance at anchor point C");
Serial.println(" p   - calculate position");
Serial.println(" r   - reset measurements");
Serial.println(" h   - this help");
Serial.println("===== \n");
}

void newDevice(DW1000Device* device) {
    Serial.print("anchor found: 0x"); Serial.println(device->getShortAddress(), HEX);
}

void inactiveDevice(DW1000Device* device) {
    Serial.print("anchor lost: 0x"); Serial.println(device->getShortAddress(), HEX);
}

```