

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методи і засоби визначення локалізації безпілотних апаратів у роях

Виконав: студент(ка) 6 курсу, групи СІм-62
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Якобчук Р.А.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Лецишин Ю.З.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Тиш Є.В.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	<u>Осухівська Г.М.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u>Карпінський М.П.</u> (підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«17» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Якобчуку Роману Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи і засоби визначення локалізації безпілотних апаратів у роях

Керівник роботи Лецишин Юрій Зіновійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Огляд та аналіз методів відносної локалізації безпілотних апаратів

2 Теоретичне обґрунтування методів відносної локалізації та керування

3 Практична реалізація системи локалізації та експериментальні дослідження

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

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

1. Актуальність роботи, мета, завдання

2. Об'єкт, предмет, методи дослідження, наукова новизна, практичне значення результатів

3. Математичні методи та моделі

4. Структурна схема пристрою

5. Принцип роботи системи

6. Блок-схема алгоритму роботи системи

7. Результати експериментального дослідження

8. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>	<i>04.12.2025</i>	
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			

7. Дата видачі завдання 17.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літературних джерел. Постановка завдання на кваліфікаційну роботу.</i>	<i>17.11.2025р. – 23.11.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
2.	<i>Огляд та аналіз методів відносної локалізації безпілотних апаратів</i>	<i>24.11.2025р. – 02.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
3.	<i>Теоретичне обґрунтування методів відносної локалізації та керування</i>	<i>03.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
4.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>04.12.2025р. – 10.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
5.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>11.12.2025р. – 19.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
6.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025р.</i>	<i>Викон.</i>
7.	<i>Захист кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>26.12.2025р</i>	<i>Викон.</i>

Студент

(підпис)

Якобчук Р.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Лецишин Ю.З.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Якобчук Р.А. Методи і засоби визначення локалізації безпілотних апаратів у роях: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 — комп'ютерна інженерія / наук. кер. Лещишин Ю.З. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: рій БПЛА, локалізація, UWB, STM32, MATLAB, FreeRTOS, навігація.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методів та засобів відносної локалізації безпілотних літальних апаратів для забезпечення їх скоординованого руху у складі рою. У роботі проведено аналіз проблем навігації в умовах відсутності супутникового сигналу та обґрунтовано вибір технології надширококутного зв'язку (UWB) як основи вимірювальної системи. Розроблено математичну модель руху квадрокоптера та реалізовано алгоритм визначення координат методом нелінійної регресії (NLR). Спроектовано апаратний модуль на базі мікроконтролера STM32F411 та розроблено вбудоване програмне забезпечення під керуванням операційної системи реального часу FreeRTOS.

Результати імітаційного моделювання у середовищі MATLAB підтвердили ефективність запропонованих алгоритмів, продемонструвавши точність позиціонування в межах 15 см. Результати дослідження мають практичне значення для створення автономних мультиагентних робототехнічних систем, здатних виконувати завдання моніторингу та пошуку в складних умовах навколишнього середовища.

ANNOTATION

Yakobchuk R.A. Methods and tools for determining the localization of unmanned aerial vehicles in swarms: Master's thesis: spec. 123 — Computer engineering / supervisor Leshchyshyn Y.Z. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: UAV swarm, localization, UWB, STM32, non-linear regression, MATLAB, FreeRTOS, navigation.

The master's thesis is devoted to the development of methods and tools for relative localization of unmanned aerial vehicles to ensure their coordinated movement within a swarm. The paper analyzes navigation problems in GNSS-denied environments and substantiates the choice of Ultra-Wideband (UWB) technology as the basis for the measurement system. A mathematical model of quadcopter motion was developed, and a coordinate determination algorithm using the Non-Linear Regression (NLR) method was implemented. A hardware module based on the STM32F411 microcontroller was designed, along with embedded software running under the FreeRTOS real-time operating system.

Simulation results in the MATLAB environment confirmed the efficiency of the proposed algorithms, demonstrating positioning accuracy within 15 cm. The results of the study are of practical importance for creating autonomous multi-agent robotic systems capable of performing monitoring and search tasks in complex environmental conditions.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ.....	11
1.1. Огляд сучасних підходів до організації керування групами безпілотних літальних апаратів	11
1.2. Особливості навігації безпілотних систем в умовах відсутності супутникового сигналу	16
1.3. Порівняльний аналіз технологій бездротового позиціонування об'єктів у просторі	19
1.4. Характеристика методу локалізації на основі технології надширокосмугового зв'язку.....	21
1.4.1. Фізичні принципи та стандартизація технології.....	21
1.4.2. Алгоритми вимірювання відстані та визначення положення.	22
1.5. Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ	25
2.1. Математична модель руху та просторового розташування безпілотного літального апарата.....	25
2.2. Розробка алгоритму оцінки позиції методом ітераційної лінеаризації	28
2.3. Синтез системи комплексування навігаційних даних на основі фільтра Калмана та комплементарного фільтра.....	32
2.4. Розробка алгоритму функціонування системи керування.....	35
2.4.1. Архітектура програмного забезпечення.....	36
2.4.2. Алгоритм керування польотом.....	37
2.5. Висновки до розділу 2.....	38
3.1. Принцип функціонування системи та обґрунтування вибору апаратної платформи	40

3.2. Програмна реалізація алгоритмів взаємодії та позиціювання в рою	43
3.3. Експериментальні дослідження та аналіз результатів моделювання.....	53
3.4. Висновки до розділу.....	58

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

.....	60
4.1. Охорона праці	60
4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	64
4.2.1. Оцінка дії електромагнітного поля, хвиль, імпульсу на засоби визначення локалізації.....	64
4.2.2. Джерела виникнення шуму і вібрацій.	66
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

Додаток А Тези конференцій

Додаток Б Лістинг програми

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БПЛА — безпілотний літальний апарат
- MEMS — мікроелектромеханічні системи
- ПІД — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
- ШІМ — широтно-імпульсна модуляція
- АоА — Angle of Arrival (кут приходу сигналу)
- DMA — Direct Memory Access (прямий доступ до пам'яті)
- FPU — Floating Point Unit (модуль операцій з плаваючою крапкою)
- GNSS — Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система)
- GPS — Global Positioning System (глобальна система позиціювання)
- HAL — Hardware Abstraction Layer (рівень абстракції апаратного забезпечення)
- I2C — Inter-Integrated Circuit (послідовна шина даних)
- IMU — Inertial Measurement Unit (інерціальний вимірювальний модуль)
- MCU — Microcontroller Unit (мікроконтролер)
- NLR — Non-Linear Regression (нелінійна регресія)
- PID — Proportional-Integral-Derivative (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор)
- RMSE — Root Mean Square Error (середньоквадратична похибка)
- RTOS — Real-Time Operating System (операційна система реального часу)
- RSSI — Received Signal Strength Indicator (індикатор рівня прийнятого сигналу)
- SLAM — Simultaneous Localization and Mapping (одночасна локалізація та побудова карти)
- SWD — Serial Wire Debug (інтерфейс налагодження)
- TDoA — Time Difference of Arrival (різниця часу приходу сигналу)
- ToF — Time of Flight (час польоту сигналу)
- TWR — Two-Way Ranging (двостороннє вимірювання дальності)

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасний розвиток робототехнічних систем характеризується переходом від використання поодиноких безпілотних апаратів до застосування мультиагентних груп. Використання роїв дронів дозволяє значно підвищити ефективність виконання складних місій моніторингу та пошуку завдяки розподілу завдань між агентами. Критичною умовою функціонування таких систем є забезпечення точної взаємної навігації та координації руху в просторі. Традиційні супутникові навігаційні системи часто виявляються неефективними або повністю недоступними в умовах щільної міської забудови та всередині приміщень через екранування сигналу. Використання оптичних систем навігації вимагає значних обчислювальних ресурсів та залежить від умов освітлення. Тому актуальним науково-прикладним завданням є розробка енергоефективних методів відносної локалізації на основі радіочастотних технологій. Перспективним рішенням цієї проблеми є застосування технології надширокосмугового зв'язку, яка здатна забезпечити високу точність вимірювання відстані та стійкість до багатопроменевого поширення радіохвиль.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення точності та надійності визначення взаємного положення безпілотних апаратів у групі шляхом розробки методу та засобів відносної локалізації з використанням технології надширокосмугового зв'язку.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз існуючих методів навігації мультиагентних систем та обґрунтувати вибір радіочастотних засобів вимірювання дальності;
- розробити математичну модель системи позиціонування та алгоритми фільтрації даних для зменшення динамічних похибок вимірювання;
- спроектувати апаратну частину модуля локалізації на базі мікроконтролера та надширокосмугового трансівера;
- реалізувати програмне забезпечення для обміну навігаційними даними та розрахунку координат у реальному часі;

– провести тестування розробленої системи та оцінити точність позиціонування у реальних умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження: процес навігації та керування у групі безпілотних літальних апаратів.

Предмет дослідження: методи та програмно-апаратні засоби визначення відносної локалізації агентів рою з використанням технології надширококутного зв'язку.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для визначення вимог до точності навігації, методи математичного моделювання для побудови алгоритмів трилатерації, методи теорії ймовірностей для опрацювання результатів вимірювань, а також методи об'єктно-орієнтованого програмування для реалізації вбудованого програмного забезпечення.

Наукова новизна дослідження. Отримав подальший розвиток метод відносної локалізації рухомих об'єктів на основі вимірювання часу проходження радіосигналу, який на відміну від існуючих використовує адаптивну фільтрацію вимірювань на бортовому обчислювачі з обмеженими ресурсами, що дозволяє підвищити точність визначення координат у динаміці.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи. Запропоноване рішення дозволяє організувати стійке керування роєм дронів у зонах відсутності супутникового сигналу. Результати роботи можуть бути використані при створенні автономних робототехнічних комплексів для інспекції промислових об'єктів та виконання рятувальних операцій.

Публікації. Результати дослідження апробовано на XIV міжнародній науково-технічній конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», XIII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» у вигляді тез конференцій.

Структура роботи. Робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

1.1. Огляд сучасних підходів до організації керування групами безпілотних літальних апаратів

Стрімкий розвиток робототехніки та мікроелектроніки в останні роки зумовив якісний перехід від використання поодиноких безпілотних літальних апаратів до застосування складних мультиагентних систем. Концепція об'єднання безпілотників у групи або рої відкриває принципово нові можливості для виконання завдань, які є непосильними або неефективними для окремого агента. До таких завдань належать моніторинг великих сільськогосподарських угідь, проведення пошуково-рятувальних операцій у зонах стихійного лиха, інспекція розгалужених інфраструктурних об'єктів та створення тимчасових мереж зв'язку. Головною перевагою групового застосування є підвищена надійність системи в цілому, адже вихід з ладу одного або навіть кількох агентів не призводить до припинення виконання місії, оскільки їхні функції автоматично перерозподіляються між іншими учасниками групи. Проте реалізація скоординованого руху групи літальних апаратів вимагає вирішення низки складних науково-технічних проблем, пов'язаних з організацією архітектури керування, обміном даними та взаємною навігацією.

Організація взаємодії між агентами в мультиагентній системі є фундаментом, що визначає ефективність та живучість усього рою. В сучасній науковій літературі та інженерній практиці виділяють два основні підходи до побудови архітектури керування групами роботів, якими є централізоване та децентралізоване керування [12, 28]. Кожен з цих підходів має свої специфічні особливості, переваги та недоліки, що визначають сферу їхнього доцільного застосування.

Централізоване керування передбачає наявність єдиного потужного обчислювального центру, який приймає рішення за всю групу. Роль такого центру

зазвичай виконує наземна станція керування або виділений дрон-лідер з високою обчислювальною потужністю. У такій архітектурі всі рядові агенти виступають переважно як виконавчі механізми та джерела сенсорної інформації. Вони постійно передають телеметричні дані про свій стан, координати та показники бортових датчиків на центральний вузол. Отримавши повну інформацію про стан кожного елемента системи, центральний комп'ютер розраховує оптимальні траєкторії руху, запобігає колізіям та формує керуючі команди для кожного окремого апарата. Такий підхід дозволяє реалізувати глобально оптимальні стратегії поведінки, оскільки планувальник має доступ до повної картини ситуації. Крім того, це дозволяє спростити бортове обладнання рядових дронів, переклавши складні обчислення на зовнішній комп'ютер. Схема централізованої архітектури керування групою БПЛА зображена на рис 1.1.

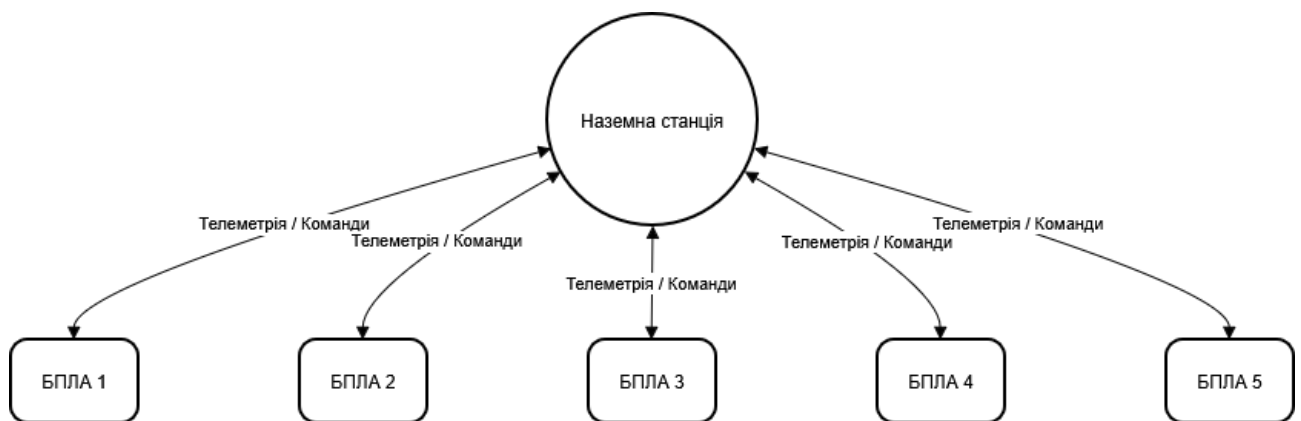


Рис. 1.1. Схема централізованої архітектури керування групою БПЛА

Проте централізовані системи мають критичні вразливості, які обмежують їхнє застосування в реальних динамічних умовах. Головним недоліком є наявність єдиної точки відмови. Вихід з ладу центрального вузла або втрата каналу зв'язку з ним призводить до повної дезорієнтації всієї групи та неможливості продовження місії. Також суттєвим обмеженням є залежність від пропускної здатності каналу передачі даних. Зі збільшенням кількості агентів у рої обсяг інформації, що передається до центру та у зворотному напрямку, зростає. Це призводить до перевантаження мережі, виникнення затримок у контурі керування та обмежує масштабованість системи. В умовах щільної

міської забудови або дії засобів радіоелектронної боротьби підтримка стабільного високошвидкісного зв'язку з кожним дроном стає практично неможливою задачею.

Децентралізований підхід є альтернативою, що базується на принципах самоорганізації та локальної взаємодії. Ця концепція часто запозичується з живої природи, наслідуючи поведінку зграй птахів, косяків риб або колоній комах. У децентралізованій системі відсутній єдиний керуючий центр. Кожен безпілотний апарат є автономним інтелектуальним агентом, який приймає рішення самостійно на основі локальної інформації. Ця інформація отримується від власних бортових сенсорів та через обмін даними з обмеженим колом найближчих сусідів. Головна ідея полягає в тому, що складна глобальна поведінка рою виникає як інтегративна властивість внаслідок простих локальних взаємодій між агентами. Схема децентралізованої архітектури керування із локальними зв'язками зображена на рис. 1.2.

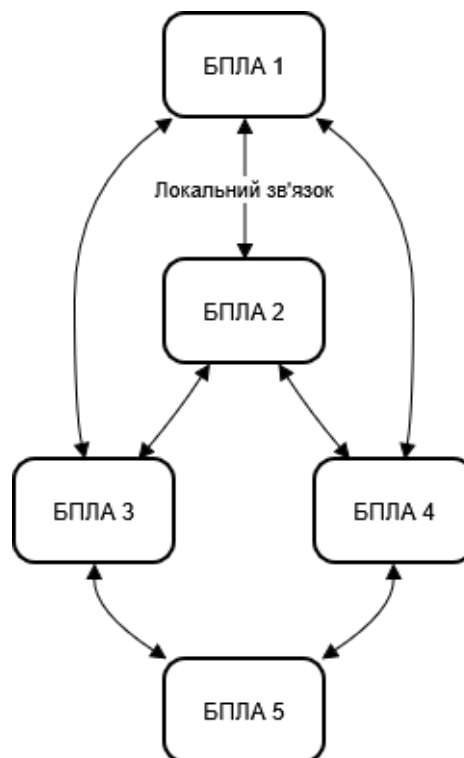


Рис. 1.2. Схема децентралізованої архітектури керування із локальними зв'язками

Децентралізовані системи відзначаються виключно високою надійністю та живучістю. Втрата одного або кількох агентів не впливає на працездатність решти групи, оскільки мережа зв'язку та алгоритми керування автоматично адаптуються до змін у топології рою. Такі системи мають практично необмежену масштабованість, адже додавання нових агентів не вимагає зміни алгоритмів керування чи суттєвого збільшення обчислювальної потужності окремих вузлів [28]. Обмін даними відбувається лише на коротких відстанях між сусідами, що дозволяє економити енергію та зменшує завантаженість радіоефіру. Проте реалізація децентралізованого керування вимагає розміщення достатніх обчислювальних ресурсів безпосередньо на борту кожного мікро-БПЛА. Це ставить жорсткі вимоги до ефективності алгоритмів, які повинні виконуватися на мікроконтролерах з обмеженою швидкодією та пам'яттю, таких як серія STM32.

Для практичної реалізації групового польоту застосовують різні методи керування строєм, серед яких найбільш поширеними є метод лідер-послідовник, метод віртуальної структури та поведінковий підхід.

Метод лідер-послідовник передбачає виділення в групі одного або кількох агентів-лідерів, які рухаються за заданою траєкторією. Решта агентів, що називаються послідовниками, повинні відстежувати положення та швидкість лідера, утримуючи задане відносне положення. Цей метод є простим у реалізації та аналізі стійкості, але має недолік у вигляді залежності всієї групи від поведінки лідера. У децентралізованій версії цього методу роль лідера може бути динамічною або віртуальною, що підвищує надійність системи.

Метод віртуальної структури розглядає всю групу агентів як єдине тверде тіло. Алгоритм керування розраховує бажаний рух віртуальної конструкції, а потім проектує необхідні положення для кожного окремого агента. Цей підхід забезпечує високу точність утримання геометрії строю, що є важливим для задач кооперативного транспортування вантажів або створення антенних решіток у повітрі. Однак він вимагає високої синхронізації та значного комунікаційного навантаження для узгодження параметрів віртуальної структури між усіма учасниками.

Поведінковий підхід є найбільш наближеним до біологічних аналогів і найкраще підходить для децентралізованих систем з великою кількістю агентів. У цьому випадку керування кожним дроном формується як зважена сума векторів, що відповідають різним елементарним типам поведінки.

Основними типами поведінки для забезпечення стабільного рою є: уникнення зіткнень, що забезпечує відштовхування від сусідів та перешкод при наближенні на небезпечну відстань; узгодження швидкості, що змушує агента вирівнювати свій вектор швидкості з середнім вектором швидкості сусідів; центрування зграї, що створює силу притягання до локального геометричного центру групи сусідів для збереження цілісності рою; рух до цілі, що забезпечує глобальний напрямок переміщення групи до заданої точки місії.

Успішна реалізація будь-якого з описаних методів керування неможлива без точної та актуальної інформації про просторове положення агентів. У централізованих системах часто покладаються на абсолютні координати, отримані від супутникових навігаційних систем GNSS. Кожен дрон визначає свою позицію і передає її на центральний комп'ютер, який розраховує взаємне розташування. Однак такий підхід має суттєві обмеження. Точність стандартних GPS-приймачів становить кілька метрів, що є недостатнім для щільного строю дронів, де відстань між агентами може бути меншою за похибку вимірювання. Крім того, частота оновлення даних GPS зазвичай не перевищує 10 Гц, що замало для стабілізації швидких динамічних процесів у групі. Найбільш критичною проблемою є повна непрацездатність супутникової навігації у приміщеннях, тунелях або в умовах радіоелектронних перешкод.

Для децентралізованих систем, що орієнтовані на роботу в складних умовах, необхідно використовувати методи відносної навігації. Агенти повинні вимірювати не свої абсолютні географічні координати, а безпосередньо відстань та кут до сусідніх бортів. Це дозволяє будувати локальну систему координат, прив'язану до групи, яка не залежить від зовнішньої інфраструктури.

Система відносної локалізації повинна відповідати низці жорстких вимог: висока точність вимірювання відстані, бажано на рівні сантиметрів, для забезпечення безпечного маневрування у щільному строю; висока частота

оновлення даних та мінімальна затримка, що критично для стійкості контурів автоматичного керування; масштабованість, тобто здатність системи підтримувати роботу при збільшенні кількості агентів без суттєвого погіршення характеристик; енергоефективність та малі габарити, оскільки обладнання встановлюється на легкі літальні апарати з обмеженим запасом енергії.

Існуючі рішення на базі технічного зору, хоча і забезпечують високу точність, вимагають значних обчислювальних ресурсів для обробки відеопотоку, залежать від умов освітлення та текстур навколишнього середовища. Лідари є точними, але надто важкими та дорогими для масового використання в роях мікро-дронів. Тому особливу увагу дослідників привертають радіочастотні методи навігації, зокрема технологія надширококутної зв'язки UWB. Ця технологія дозволяє вимірювати час проходження сигналу з високою точністю, забезпечуючи визначення дистанції з похибкою до 10 см, і при цьому характеризується низьким енергоспоживанням та стійкістю до багатопроменевого поширення радіохвиль.

Впровадження технології UWB у контур керування мультиагентними системами вимагає вирішення специфічних задач, пов'язаних з організацією протоколів обміну даними в ефірі, фільтрацією вимірювань в умовах високої динаміки руху та комплексуванням цих даних з показаннями інерціальних датчиків [26, 33]. Розробка ефективних алгоритмів, здатних працювати на вбудованих мікроконтролерах у реальному часі, є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить створити повністю автономні групи безпілотних апаратів, незалежні від супутникової навігації.

1.2. Особливості навігації безпілотних систем в умовах відсутності супутникового сигналу

Функціонування безпілотних літальних апаратів у сучасному світі нерозривно пов'язане з використанням глобальних навігаційних супутникових систем GNSS. Завдяки сузір'ям супутників GPS дрони здатні визначати своє абсолютне географічне положення з точністю до кількох метрів. Проте існує

широкий спектр прикладних задач, виконання яких вимагає польотів у середовищах, де прийом супутникового сигналу є неможливим або ненадійним. Такі умови експлуатації отримали у міжнародній практиці назву GPS-denied environments. До них відносяться внутрішні простори будівель, підземні споруди, тунелі, простори під мостами та ділянки з щільною міською забудовою, які утворюють так звані міські каньйони.

Основною перешкодою для використання супутникової навігації у приміщеннях є фізична природа поширення радіохвиль гігагерцового діапазону. Сигнал від супутників має надзвичайно низьку потужність біля поверхні Землі. Проходячи крізь будівельні конструкції, такі як бетонні стіни, металеві перекриття та тоноване скло, радіосигнал зазнає критичного ослаблення. Рівень сигналу часто падає нижче порогу чутливості приймача, що унеможливорює декодування навігаційного повідомлення та розрахунок координат. Навіть у випадках, коли сигнал вдається прийняти, геометричне розташування видимих супутників часто є незадовільним, що призводить до високого значення геометричного фактора похибки DOP та різкого зниження точності позиціонування.

Ще більш складним явищем, яке виникає у замкненому просторі та щільній забудові, є ефект багатопроменевого поширення радіохвиль. Сутність цього явища полягає у тому, що сигнал від супутника потрапляє на антену приймача не лише прямим шляхом, а й внаслідок відбиття від навколишніх поверхонь. У приміщенні радіохвилі багаторазово відбиваються від стін, підлоги, стелі та меблів. Відбитий сигнал проходить довший шлях, ніж прямий, що створює затримку в часі приходу. Оскільки принцип роботи супутникової навігації базується на прецизійному вимірюванні часу поширення сигналу, ця додаткова затримка інтерпретується навігаційним алгоритмом як збільшення відстані до супутника. Накладання прямого та відбитих сигналів призводить до спотворення кореляційної функції у приймачі, що викликає непередбачувані стрибки виміряних координат. Похибка, викликана багатопроменевістю, може сягати десятків метрів, що є абсолютно неприпустимим для керування групою дронів у обмеженому просторі.

За відсутності зовнішньої опорної навігації безпілотні апарати змушені покладатися на автономні бортові засоби, основним з яких є інерціальна навігаційна система. Принцип роботи інерціальної навігації полягає у визначенні координат шляхом подвійного інтегрування виміряного прискорення. Сучасні малогабаритні дрони оснащуються мікро сенсорами MEMS, які включають акселерометри та гіроскопи. Головною проблемою таких сенсорів є наявність шумів та дрейфу нуля, який змінюється залежно від температури та вібрацій.

При інтегруванні даних акселерометра навіть незначна постійна похибка вимірювання прискорення призводить до лінійного зростання помилки швидкості та квадратичного зростання помилки координат з часом. Це явище ілюструє графік залежності похибки від часу.

Вже через хвилину автономного польоту без зовнішньої корекції дрон може відхилитися від заданої траєкторії на десятки метрів. Для мультиагентних систем така ситуація є критичною, оскільки накопичення похибок у кожного агента відбувається індивідуально та хаотично, що неминуче призведе до руйнування строю або зіткнення апаратів.

Окремою проблемою є вразливість цивільних сигналів GPS до навмисних завад. Сигнали супутників мають низьку енергетику і легко глушаться навіть малопотужними джерелами шуму. Окрім глушіння існує загроза спуфінгу, коли зловмисник генерує фальшивий навігаційний сигнал, змушуючи дрон визначити невірні координати. У таких умовах покладання виключно на глобальні супутникові системи створює неприпустимі ризики для безпеки польотів.

Таким чином, для забезпечення надійної навігації групи дронів у приміщеннях та зонах без GPS необхідно використовувати альтернативні джерела навігаційної інформації. Ці джерела повинні забезпечувати високу точність, стійкість до багатопроменевого поширення радіохвиль та не залежати від зовнішньої глобальної інфраструктури. Це зумовлює необхідність розробки систем локальної навігації, які базуються на вимірюванні взаємного положення агентів або їх положення відносно розгорнутих наземних маяків.

1.3. Порівняльний аналіз технологій бездротового позиціонування об'єктів у просторі

Вибір технологічного базису для побудови системи навігації мультиагентної групи є складним багатокритеріальним завданням. Ефективність виконання місії роєм безпілотних апаратів прямо залежить від точності та надійності визначення взаємного положення агентів. У сучасній робототехніці застосовується широкий спектр методів локалізації, які базуються на різних фізичних принципах, включаючи радіочастотні, оптичні та акустичні технології. Для обґрунтованого вибору оптимального рішення необхідно провести детальний порівняльний аналіз найбільш поширених підходів, якими є системи на базі Wi-Fi, оптична навігація та технологія надширококутового зв'язку.

Використання інфраструктури бездротових локальних мереж Wi-Fi є одним із найдоступніших методів навігації всередині приміщень. Принцип дії таких систем здебільшого ґрунтується на вимірюванні рівня потужності прийнятого сигналу RSSI від точок доступу з відомими координатами. Головною перевагою цього підходу є низька вартість впровадження, оскільки він дозволяє використовувати вже існуюче комунікаційне обладнання та стандартні бездротові модулі. Проте точність позиціонування на основі енергетичних параметрів сигналу є вкрай низькою і зазвичай становить кілька метрів. Рівень сигналу суттєво коливається під впливом змін вологості повітря, наявності перешкод та переміщення людей у приміщенні. Для задач керування щільним строєм дронів така похибка є критичною, оскільки вона перевищує безпечну дистанцію між агентами та може призвести до зіткнень.

Оптичні системи навігації, що базуються на методах комп'ютерного зору, забезпечують високу точність визначення координат. Такі системи використовують бортові камери для відстеження візуальних маркерів або побудови карти навколишнього середовища в реальному часі за алгоритмами SLAM. Візуальна навігація дозволяє дрону автономно орієнтуватися у невідомому просторі та виконувати високоточні маневри. Однак обробка відеопотоку вимагає значних обчислювальних ресурсів, що зумовлює

необхідність встановлення потужних процесорів на борту літального апарата. Це призводить до збільшення маси корисного навантаження та скорочення часу польоту через підвищене енергоспоживання. Крім того, надійність роботи оптичних систем сильно залежить від умов освітлення та наявності контрастних текстур на поверхнях, що обмежує їхнє застосування у темних або задимлених приміщеннях.

Технологія надширококутної зв'язки UWB займає особливе місце серед засобів радіочастотної локалізації завдяки унікальним властивостям сигналу. На відміну від вузькокутних систем, UWB використовує передачу надкоротких імпульсів, що дозволяє виконувати прецизійне вимірювання часу проходження сигналу між трансіверами. Точність визначення дистанції не залежить від рівня потужності сигналу і сягає десяти сантиметрів, що є достатнім для безпечного маневрування у групі. Важливою перевагою UWB є висока стійкість до ефекту багатопроменевого поширення радіохвиль, оскільки короткий імпульс дозволяє приймачу чітко відокремити прямий сигнал від відбитих копій.

Для наочного порівняння розглянутих технологій доцільно проаналізувати їхні ключові технічні характеристики. Зведені дані щодо основних параметрів ефективності систем локалізації наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика технологій бездротової локалізації

Параметр порівняння	Wi-Fi (RSSI)	Оптичні системи (Vision)	UWB
Точність позиціонування	2–5 м	0,01–0,1 м	0,05–0,15 м
Стійкість до завад	Низька	Середня	Висока
Обчислювальна складність	Низька	Дуже висока	Низька
Енергоспоживання	Помірне	Високе	Низьке

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про доцільність використання конкретної технології для вирішення задачі відносної навігації рою

безпілотних апаратів. Технологія Wi-Fi не забезпечує необхідної точності та надійності для динамічного керування строєм. Оптичні системи, попри високу точність, накладають надмірні вимоги до обчислювальних ресурсів та залежать від зовнішнього освітлення. Технологія UWB поєднує в собі високу точність вимірювання відстані, низьке енергоспоживання та стійкість до умов навколишнього середовища. Вона дозволяє реалізувати ефективні алгоритми локалізації на базі бюджетних мікроконтролерів серії STM32, що робить її оптимальним вибором для побудови системи навігації малогабаритних безпілотних апаратів. Саме тому в даній роботі основна увага буде зосереджена на розробці методу та засобів локалізації з використанням технології надширокосмугового зв'язку.

1.4. Характеристика методу локалізації на основі технології надширокосмугового зв'язку

Технологія надширокосмугового зв'язку UWB займає провідне місце серед сучасних методів радіочастотної локалізації завдяки своїм унікальним фізичним властивостям та високій завадостійкості. На відміну від традиційних вузькосмугових систем передачі даних, які використовують модуляцію неперервної частоти, UWB базується на випромінюванні серій надкоротких імпульсів. Тривалість таких імпульсів складає менше однієї наносекунди, що призводить до формування спектра сигналу з надзвичайно широкою смугою пропускання, яка зазвичай перевищує 500 МГц. Така особливість дозволяє сигналу мати низьку спектральну густину потужності, що робить його схожим на природний шум для інших радіосистем і дозволяє співіснувати в одному частотному діапазоні з мережами Wi-Fi та Bluetooth без створення взаємних перешкод.

1.4.1. Фізичні принципи та стандартизація технології. Фундаментальною перевагою використання надкоротких імпульсів є висока роздільна здатність у часовій області. Це дозволяє приймачу з високою точністю фіксувати момент

приходу першого променя сигналу. В умовах закритих приміщень радіохвилі схильні до багаторазового відбиття від стін та предметів інтер'єру, що створює ефект багатопроменевого поширення. У вузькосмугових системах накладання прямого та відбитих сигналів призводить до спотворення форми хвилі та значних помилок у вимірюванні часу. Технологія UWB дозволяє чітко розрізняти прямий сигнал і його відбиті копії, оскільки короткий імпульс встигає закінчитися до того, як на антену надійде перший відбитий сигнал. Це забезпечує стабільність вимірювання відстані навіть у складній радіобстановці.

Регулювання фізичного рівня та рівня керування доступом до середовища для пристроїв UWB здійснюється міжнародним стандартом IEEE 802.15.4 [3]. Цей стандарт визначає структуру кадрів передачі, методи модуляції та механізми захисту цілісності даних. Сучасна редакція стандарту IEEE 802.15.4z запроваджує покращені методи захисту фізичного рівня, що унеможливорює атаки типу "зменшення дистанції" шляхом маніпуляції з часовими мітками. Використання стандартизованих рішень дозволяє забезпечити сумісність обладнання від різних виробників та спрощує інтеграцію модулів локалізації у складні робототехнічні комплекси.

Як видно зі схеми, надкоротка тривалість імпульсу є ключовим фактором, що дозволяє точно визначати час прибуття сигналу. Це є основою для всіх методів вимірювання дальності, які базуються на визначенні часу польоту радіохвилі Time of Flight. Знаючи швидкість поширення електромагнітних хвиль у повітрі та виміряний час проходження сигналу між передавачем і приймачем, можна обчислити відстань між ними з точністю до кількох сантиметрів.

1.4.2. Алгоритми вимірювання відстані та визначення положення. Для визначення відстані між вузлами мережі найчастіше використовується метод двостороннього вимірювання дальності Two-Way Ranging. Цей метод не вимагає синхронізації годинників між пристроями, що є критично важливим для побудови децентралізованих систем на базі мікроконтролерів. Процес вимірювання ініціюється відправкою запиту від одного вузла до іншого. Вузол-ініціатор фіксує час відправлення повідомлення за власним внутрішнім

годинником. Вузол-відповідач приймає повідомлення, фіксує час прийому, обробляє запит і через певний інтервал часу відправляє відповідь. Відповідь містить інформацію про час прийому запиту та час відправлення відповіді за шкалою часу відповідача. Отримавши відповідь, ініціатор фіксує час її прибуття.

На основі зібраних часових міток розраховується час польоту сигналу. Формула розрахунку дозволяє виключити з рівняння час обробки сигналу на стороні відповідача та розсинхронізацію годинників. Для підвищення точності та компенсації дрейфу частоти тактових генераторів застосовується вдосконалений метод симетричного двостороннього вимірювання Double-Sided TWR. Цей алгоритм передбачає обмін трьома повідомленнями, що дозволяє значно зменшити похибку, викликану різницею у швидкості ходу годинників двох пристроїв.

Метод різниці часу прибуття Time Difference of Arrival є альтернативним підходом, який часто використовується у системах з фіксованою інфраструктурою. У цьому випадку мобільний об'єкт випромінює періодичні сигнали, які приймаються декількома стаціонарними анкерами. Координати об'єкта розраховуються на основі різниці часу приходу сигналу до різних анкерів. Цей метод дозволяє обслуговувати необмежену кількість мобільних тегів, оскільки вони не потребують двостороннього обміну даними. Проте метод TDoA вимагає надзвичайно точної синхронізації часу між усіма стаціонарними анкерами, що складно реалізувати у мобільній групі дронів без провідного з'єднання. Тому для задач відносної навігації рою перевага надається методам сімейства TWR.

Ще одним важливим розширенням технології UWB є можливість вимірювання кута приходу сигналу Angle of Arrival. Цей метод базується на вимірюванні різниці фаз несучої частоти сигналу, прийнятого двома або більше рознесеними антенами одного вузла. Знаючи відстань між антенами та різницю фаз, можна обчислити кут, під яким надійшов сигнал. Поєднання вимірювання дальності та кута дозволяє визначити координати сусіднього агента використовуючи лише один обмін даними, що суттєво зменшує навантаження на радіоефір та підвищує скритність роботи системи [22].

Застосування технології UWB для локалізації безпілотних апаратів накладає певні вимоги до конструкції антен та розміщення модулів на корпусі дрона. Антени повинні мати кругову діаграму спрямованості для забезпечення надійного зв'язку при будь-якій орієнтації апарата. Також необхідно враховувати вплив карбонових та металевих елементів рами, які можуть екранувати сигнал. Оптимальним рішенням є винесення антени за межі основних габаритів корпусу або використання декількох рознесених антен.

Таким чином, технологія надширокосмугового зв'язку надає необхідний інструментарій для побудови високоточних систем відносної навігації. Використання алгоритмів двостороннього вимірювання дальності дозволяє отримувати інформацію про взаємне розташування агентів з сантиметровою точністю без необхідності використання зовнішньої інфраструктури або супутникового сигналу. Це створює надійну основу для реалізації алгоритмів групового керування та стабілізації строю БПЛА.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексний аналіз проблеми навігації та керування групами безпілотних літальних апаратів. Встановлено, що перехід до децентралізованих стратегій керування є необхідною умовою для підвищення надійності та автономності мультиагентних систем. Показано, що критичним фактором для реалізації таких стратегій є наявність точної інформації про взаємне розташування агентів у просторі.

Детальний огляд методів навігації виявив суттєві обмеження традиційних підходів в умовах відсутності супутникового сигналу. На основі порівняльного аналізу обґрунтовано вибір технології надширокосмугового зв'язку UWB як найбільш перспективної для побудови системи відносної локалізації. Ця технологія забезпечує вимірювання відстані з точністю до 10 см, стійка до ефекту багатопроменевого поширення радіохвиль та дозволяє організувати передачу даних між агентами.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ

2.1. Математична модель руху та просторового розташування безпілотного літального апарата

Проектування ефективної системи керування групою безпілотних літальних апаратів неможливе без створення точної математичної моделі, яка описує динаміку руху окремого апарата та його просторове положення відносно інших учасників групи [27, 32]. У задачах навігації та керування польотом безпілотний літальний апарат розглядається як тверде тіло з шістьма ступенями вільності. Це означає, що його стан у будь-який момент часу однозначно визначається трьома лінійними координатами центру мас та трьома кутами, які задають орієнтацію корпусу у просторі.

Для формалізованого опису руху необхідно ввести дві основні системи координат. Першою є глобальна навігаційна система координат, яка є нерухомою відносно землі. Вона слугує для визначення траєкторії польоту та абсолютного положення апаратів. Початок цієї системи зазвичай суміщають з точкою старту або з базовою станцією. Другою є зв'язана система координат, початок якої знаходиться у центрі мас безпілотного літального апарата, а осі жорстко прив'язані до його конструкції: поздовжня вісь направлена вперед, поперечна вісь направлена вправо, а нормальна вісь направлена вниз або вгору залежно від обраного стандарту.

Повний вектор стану безпілотного літального апарата X складається з компонентів лінійного положення та кутової орієнтації:

$$X = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T, \quad (2.1)$$

де x, y, z — лінійні координати центру мас безпілотного літального апарата у глобальній системі;

ϕ — кут крену, що описує обертання навколо поздовжньої осі;

θ — кут тангажу, що описує обертання навколо поперечної осі;

ψ — кут рискання, що описує обертання навколо вертикальної осі.

Важливою складовою математичної моделі є опис взаємозв'язку між цими двома системами координат. Перехід від зв'язаної системи до глобальної здійснюється за допомогою матриці повороту, яка формується на основі кутів Ейлера. Цей процес можна представити як послідовність трьох елементарних поворотів.

Матриця елементарного повороту навколо осі X на кут крену має вигляд:

$$R_{x(\phi)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

де $R_x(\phi)$ — матриця елементарного перетворення координат при обертанні навколо поздовжньої осі;

$\sin, \cos$ — тригонометричні функції синуса та косинуса відповідного кута.

Матриця повороту навколо осі Y на кут тангажу описується виразом:

$$R_{y(\theta)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де $R_y(\theta)$ — матриця елементарного перетворення координат при обертанні навколо поперечної осі;

θ — кут тангажу, що визначає нахил носової частини апарата.

Матриця повороту навколо осі Z на кут рискання визначається як:

$$R_{z(\psi)} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

де $R_z(\psi)$ — матриця елементарного перетворення координат при обертанні навколо вертикальної (нормальної) осі;

ψ — кут рискання, що визначає курс апарата.

Кінцева матриця орієнтації R визначається добутком цих трьох матриць. Послідовність множення залежить від прийнятої угоди про кути Ейлера, але найчастіше використовується послідовність Z-Y-X:

$$R = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\varphi), \quad (2.5)$$

де R — узагальнена матриця орієнтації.

Ця матриця дозволяє перераховувати вектори швидкості та прискорення, виміряні бортовими датчиками у зв'язаній системі координат, у глобальну навігаційну систему.

Рівняння кінематики поступального руху безпілотного літального апарата зв'язують лінійні швидкості у зв'язаній системі з похідними координат у глобальній системі:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

де $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ — проекції вектора лінійної швидкості центру мас на осі глобальної (інерційної) системи координат;

u, v, w — проекції вектора лінійної швидкості на осі зв'язаної системи координат (швидкості, що вимірюються бортовими датчиками);

R — матриця орієнтації, визначена у формулі .

Для задач відносної навігації ключовим є визначення відстані між безпілотними літальними апаратами. Система локалізації на базі технології надширокопосмугового зв'язку забезпечує вимірювання дистанції між вузлами мережі. Математична модель вимірювання базується на евклідовій метриці простору. Відстань d_{ij} між i -м та j -м апаратами визначається як:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} + \eta, \quad (2.7)$$

де x_i, y_i, z_i та x_j, y_j, z_j — координати i -го та j -го безпілотних апаратів у глобальній системі координат відповідно;

η_i — адитивна похибка вимірювання дистанції, зумовлена шумами радіоканалу та неточністю таймінгу.

У реальних умовах вимірювання завжди містять шумову складову, яка залежить від характеристик апаратного забезпечення та умов середовища. Ця похибка зазвичай моделюється як адитивний білий гауссів шум з нульовим математичним сподіванням. Для верифікації запропонованої моделі та дослідження впливу шумів на точність визначення координат проводилось імітаційне моделювання у середовищі MATLAB.

2.2. Розробка алгоритму оцінки позиції методом ітераційної лінеаризації

Задача визначення просторових координат безпілотного літального апарата за даними вимірювання дальності до нерухомих опорних вузлів з відомими координатами належить до класу обернених геодезичних задач. У тривимірному просторі геометричним місцем точок, рівновіддалених від опорного вузла на фіксовану відстань, є сфера. Отже, математично задача локалізації зводиться до знаходження точки перетину декількох сфер, центри яких збігаються з координатами анкерів, а радіуси дорівнюють виміряним відстаням. Цей процес називається мультилатерацією.

Якщо позначити шуканий вектор координат мобільного об'єкта, що складається з трьох компонентів x, y, z , а координати i -го опорного вузла як відомі константи, то математичний зв'язок між положенням об'єкта та істинною відстанню описується нелінійним алгебраїчним рівнянням. Це рівняння базується на метриці евклідового простору і має наступний вигляд:

$$d_i(P) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (2.8)$$

де $d_i(P)$ – розрахункова відстань від об'єкта до i -го опорного вузла;

x, y, z – невідомі координати безпілотної літального апарата;

x_i, y_i, z_i – відомі координати i -го опорного вузла.

У реальній навігаційній системі ми отримуємо набір вимірних відстаней, які відрізняються від істинних через наявність адитивного шуму вимірювання, зумовленого апаратними затримками та впливом середовища поширення радіохвиль. Для однозначного визначення трьох невідомих просторових координат теоретично достатньо мати три незалежні рівняння, тобто вимірювання до трьох анкерів. Однак на практиці, для підвищення надійності системи та точності позиціонування, використовують надлишкову кількість опорних вузлів. У такому випадку система рівнянь стає перевизначеною. Це означає, що через наявність похибок вимірювання не існує такої єдиної точки у просторі, яка б ідеально задовольняла всі рівняння одночасно.

Для розв'язання такої перевизначеної нелінійної системи необхідно знайти таке наближення координат, яке мінімізує сумарну квадратичну похибку нев'язок між вимірними та розрахунковими відстанями. Оскільки вихідні рівняння містять корені та квадрати невідомих величин, їх пряме аналітичне рішення є складним і вимагає значних обчислювальних ресурсів, що є критичним для вбудованих систем на базі мікроконтролерів. Тому у даній роботі застосовано чисельний метод ітераційної лінеаризації, відомий також як метод Ньютона-Гауса.

Сутність розробленого алгоритму полягає у заміні складної нелінійної функції відстані її лінійним наближенням в малому околі деякої початкової точки. Це здійснюється шляхом розкладання функції в ряд Тейлора, при цьому для спрощення обчислень обмежуються лише членами першого порядку малості, відкидаючи члени вищих порядків. Лінеаризоване рівняння пов'язує малі зміни координат об'єкта зі зміною вимірної відстані:

$$d_i(P) \approx d_i(P_k) + \frac{\partial d_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial d_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial d_i}{\partial z} \Delta z, \quad (2.9)$$

де $d_i(P)$ – лінеаризоване значення відстані;

$d_i(P_k)$ – відстань, розрахована для координат попередньої ітерації;

$\partial d_i, \partial x, \partial y, \partial z$ – частинні похідні функції відстані по відповідних координатах;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шукані поправки до координат на поточному кроці.

У цьому виразі ключову роль відіграють частинні похідні функції відстані по координатах. Фізичний зміст цих похідних полягає у тому, що вони визначають чутливість зміни дистанції до зміни положення об'єкта вздовж відповідної осі координат. Геометрично ці похідні являють собою напрямні косинуси одиничного вектора, який спрямований від об'єкта локалізації до відповідного опорного вузла. Наприклад, частинна похідна по координаті x обчислюється як відношення різниці координат до поточної розрахованої відстані:

$$\frac{\partial d_i}{\partial x} = \frac{x_k - x_i}{\hat{d}_i}, \quad (2.10)$$

де $\partial x, \partial d_i$ – частинна похідна функції відстані по координаті x ;

x_k – оцінка координати об'єкта на k -й ітерації;

x_i – координата i -го опорного вузла;

$\hat{d}_i$ – поточна розрахована відстань від об'єкта до анкера.

Сукупність таких частинних похідних для всіх доступних вимірювань формує матрицю чутливості, яка в математиці називається матрицею Якобі. Ця матриця дозволяє перейти від нелінійної задачі до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яку значно простіше розв'язати цифровими методами.

Для програмної реалізації алгоритму обчислювальний процес організовано у матричній формі. На кожній ітерації алгоритму спочатку формується вектор нев'язок вимірювань. Елементи цього вектора дорівнюють різниці між реально виміряною відстанню, отриманою з UWB-сенсорів, та теоретичною відстанню, розрахованою на основі поточної моделі положення об'єкта. Векторне рівняння, що пов'язує відомі нев'язки з невідомими поправками до координат через матрицю Якобі, записується наступним чином:

$$\Delta D \approx J \cdot \Delta P, \quad (2.11)$$

де ΔD – вектор нев'язок вимірювань;

J – матриця Якобі;

ΔP – вектор шуканих поправок координат.

Оскільки кількість рівнянь, що відповідає кількості анкерів, зазвичай перевищує кількість невідомих змінних, матриця Якобі не є квадратною, а має прямокутну форму. Це унеможливорює знаходження вектора поправок шляхом простого множення на обернену матрицю. Для розв'язання цієї проблеми застосовується метод найменших квадратів. Цей метод дозволяє знайти таке оптимальне рішення, яке мінімізує суму квадратів відхилень для всієї сукупності вимірювань. Математично це реалізується за допомогою операції псевдообернення матриці, що дозволяє спроектувати вектор нев'язок на простір можливих розв'язків:

$$\Delta P = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot \Delta D, \quad (2.12)$$

де ΔP – вектор розрахованих поправок до координат;

J – матриця Якобі;

J^T – транспонована матриця Якобі;

ΔD – вектор нев'язок вимірювань.

У наведеній формулі матричний добуток транспонованої матриці Якобі на саму себе має важливий фізичний зміст: обернена до нього матриця є аналогом коваріаційної матриці помилок положення. Властивості цієї матриці визначають геометричний фактор точності системи. Якщо опорні вузли розташовані геометрично невдало, наприклад, знаходяться на одній прямій або в одній площині з об'єктом, визначник цієї матриці наближається до нуля. Це робить систему погано обумовленою, що призводить до різкого зростання похибки позиціонування навіть при незначних шумах вимірювання.

Отриманий вектор поправок використовується для уточнення координат на наступному кроці алгоритму. Однак, враховуючи наявність значних шумів у

реальних вимірюваннях UWB, пряме додавання повної розрахованої поправки може призвести до нестабільності обчислювального процесу, зокрема до "перестрибування" через точку істинного мінімуму та виникнення незатухаючих осциляцій оцінки координат. Щоб запобігти цьому явищу, в алгоритм вводиться коефіцієнт релаксації, який регулює величину кроку корекції. Експериментальним шляхом у процесі моделювання було підібрано оптимальне значення цього коефіцієнта, що забезпечує стійку збіжність. Рівняння оновлення оцінки координат на кожній ітерації записується так:

$$P_{k+1} = P_k + \lambda \cdot \Delta P, \quad (2.13)$$

де P_{k+1} – уточнений вектор координат для наступної ітерації;

P_k – вектор координат на поточній ітерації;

λ – коефіцієнт швидкості навчання;

ΔP – вектор поправок, розрахований методом найменших квадратів.

Процес ітерацій повторюється циклічно до виконання умови зупинки. Такою умовою може бути досягнення максимальної кількості ітерацій або зменшення норми вектора поправок нижче заданого порогу точності. Перевагою запропонованого методу є його універсальність, оскільки він дозволяє легко масштабувати систему шляхом додавання нових опорних вузлів без зміни загальної структури алгоритму, змінюється лише розмірність матриці Якобі. Отримані в результаті роботи алгоритму координати є математично оптимальною оцінкою поточного положення безпілотного літального апарата за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення.

2.3. Синтез системи комплексування навігаційних даних на основі фільтра Калмана та комплементарного фільтра

Координати безпілотного літального апарата, отримані методом ітераційної лінеаризації, мають дискретний характер з низькою частотою оновлення, яка визначається фізичними обмеженнями інтерфейсу радіомодуля

UWB. Крім того, ці дані містять високочастотну шумову складову, амплітуда якої залежить від умов поширення радіохвиль. Безпосереднє використання таких сирих координат у контурі керування, особливо для операції диференціювання з метою отримання швидкості, є неприпустимим, оскільки це призведе до значних викидів у керуючих сигналах та нестабільної роботи двигунів. Для забезпечення високоточного та плавного керування необхідно виконати комплексування дискретних позиційних вимірювань з даними бортової інерціальної навігаційної системи, яка має високу частоту оновлення (до 1 кГц) та низький рівень шуму на коротких інтервалах часу [25, 33].

Архітектура розробленої системи навігації передбачає послідовну обробку даних у два етапи. Першим етапом є визначення кутової орієнтації апарата відносно вектору гравітації. Бортовий гіроскоп вимірює кутову швидкість, інтегрування якої дозволяє отримати кут нахилу, проте ця оцінка схильна до дрейфу через накопичення похибки інтегрування. Акселерометр дозволяє виміряти проекції вектора сили тяжіння та обчислити абсолютний кут нахилу, але його показання є зашумленими через вібрації корпусу. Для об'єднання цих даних застосовано комплементарний фільтр, який пропускає низькочастотну складову сигналу акселерометра та високочастотну складову сигналу гіроскопа. Рівняння фільтра у дискретному часі записується наступним чином:

$$\theta_k = \alpha \cdot (\theta_{k-1} + \omega_{gyro} \cdot \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{acc}, \quad (2.14)$$

де θ_k – оцінка кута орієнтації (крену або тангажу) на поточному кроці;

α – ваговий коефіцієнт фільтра, що визначає частоту зрізу;

θ_{k-1} – оцінка кута на попередньому кроці;

ω_{gyro} – миттєва кутова швидкість, виміряна гіроскопом;

Δt – період дискретизації системи керування;

θ_{acc} – кут нахилу, розрахований за даними акселерометра.

Отримані точні значення кутів орієнтації необхідні для другого етапу — перерахунку (проекції) власних прискорень апарата, виміряних акселерометром

у зв'язаній системі координат, у глобальну навігаційну систему. Це дозволяє компенсувати вплив нахилу корпусу та виділити лінійне прискорення, яке спричиняє рух. Після компенсації гравітації, лінійне прискорення використовується як керуючий вхід для алгоритму оцінки позиції.

Основним вузлом системи комплексування є лінійний фільтр Калмана, який оцінює повний вектор стану системи, що включає координату та швидкість. Фільтр працює за принципом "передбачення-корекція". Вектор стану системи для однієї осі координат визначається так:

$$x_k = \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

де x_k – вектор стану системи на кроці k ;

p_k – координата положення (позиція);

v_k – лінійна швидкість руху.

На етапі передбачення фільтр екстраполює стан системи на наступний момент часу, використовуючи фізичну модель рівноприскореного руху. Вхідним даним для цього етапу є виміряне та скориговане прискорення. Рівняння прогнозу стану має вигляд:

$$\hat{x}_{(k|k-1)} = F \cdot \hat{x}_{(k-1|k-1)} + B \cdot u_k, \quad (2.16)$$

де $\hat{x}_{(k|k-1)}$ – прогнозована оцінка вектора стану;

F – матриця переходу станів, що описує кінематику руху;

$\hat{x}_{(k-1|k-1)}$ – апостеріорна (уточнена) оцінка стану на попередньому кроці;

B – матриця керування, що визначає вплив прискорення на зміну стану;

u_k – лінійне прискорення з акселерометра.

Матриці F та B для дискретної системи формуються виходячи з законів механіки Ньютона та залежать від періоду дискретизації. Одночасно з прогнозом

стану відбувається розрахунок прогнозованої матриці коваріації помилок, яка відображає зростання невизначеності оцінки через шум акселерометра.

Етап корекції ініціюється в момент надходження нових даних від системи UWB. Алгоритм порівнює прогнозовану координату з вимірюною та обчислює нев'язку. Ступінь довіри до нового вимірювання визначається коефіцієнтом підсилення Калмана, який розраховується автоматично на основі співвідношення статистичних характеристик шумів процесу та шумів вимірювання [13]. Рівняння оновлення стану системи записується як:

$$\hat{x}_{(k|k)} = \hat{x}_{(k|k-1)} + K_k \cdot (z_k - H \cdot \hat{x}_{(k|k-1)}), \quad (2.17)$$

де $\hat{x}_{(k|k)}$ – фінальна оцінка вектора стану;

K_k – оптимальний коефіцієнт підсилення Калмана;

z_k – координата, отримана від UWB;

H – матриця спостереження, що зв'язує вектор стану з вимірюваннями.

Застосування такої схеми фільтрації дозволяє отримати оцінку швидкості, яка не вимірюється сенсорами UWB напряму, але є критично необхідною для демпфування коливань у ПД-регуляторі позиції. Результатом роботи алгоритму є плавні та точні значення координат і швидкостей з частотою, що відповідає частоті роботи акселерометра, що забезпечує стабільне утримання позиції безпілотного літального апарата.

2.4. Розробка алгоритму функціонування системи керування

Ефективність та надійність виконання польотного завдання безпілотним літальним апаратом визначається якістю реалізації алгоритмів керування у вбудованому програмному забезпеченні. Для реалізації складних обчислювальних процедур навігації в реальному часі було обрано апаратну платформу на базі мікроконтролера STM32F4 з ядром ARM Cortex-M4. Ключовою особливістю цього мікроконтролера є наявність апаратного блоку

операцій з плаваючою крапкою, що дозволяє виконувати ресурсоемні розрахунки фільтра Калмана та матричні перетворення без критичних затримок, які могли б порушити стабільність польоту.

2.4.1. Архітектура програмного забезпечення. Програмне забезпечення розроблено за модульним принципом з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS. Використання операційної системи дозволяє розділити обчислювальний процес на незалежні потоки або задачі та гарантувати детермінований час їх виконання. Архітектура системи розділена на три логічні рівні:

- рівень драйверів. Цей рівень забезпечує низькорівневу взаємодію з апаратними інтерфейсами мікроконтролера, такими як SPI, I2C та UART. Він відповідає за зчитування первинних даних з сенсорів, зокрема акселерометра, гіроскопа та UWB модуля, а також за генерацію широтно-імпульсної модуляції для керування моторами;

- рівень проміжного програмного забезпечення. Цей рівень містить бібліотеки для математичної обробки сигналів. Саме тут реалізовані алгоритми орієнтації, навігаційні фільтри та модулі ПД регулювання. На цьому етапі відбувається очищення даних від шумів та їх підготовка для використання в логіці керування;

- прикладний рівень. Цей рівень реалізує високорівневу логіку поведінки дрона, машину станів та обробку польотних завдань.

Планувальник операційної системи розподіляє процесорний час між задачами відповідно до їх пріоритетів. Найвищий пріоритет має задача стабілізації кутової швидкості, яка виконується з частотою 1 кГц. Це критично необхідно для миттєвої компенсації зовнішніх збурень, наприклад поривів вітру. Задачі навігації, розрахунку позиції та обробки даних UWB мають середній пріоритет і виконуються з частотою від 50 до 100 Гц. Фонове опитування периферії, моніторинг заряду батареї та телеметрія мають найнижчий пріоритет.

Узагальнена схема взаємодії компонентів системи та потоків даних наведена на рисунку 2.3.

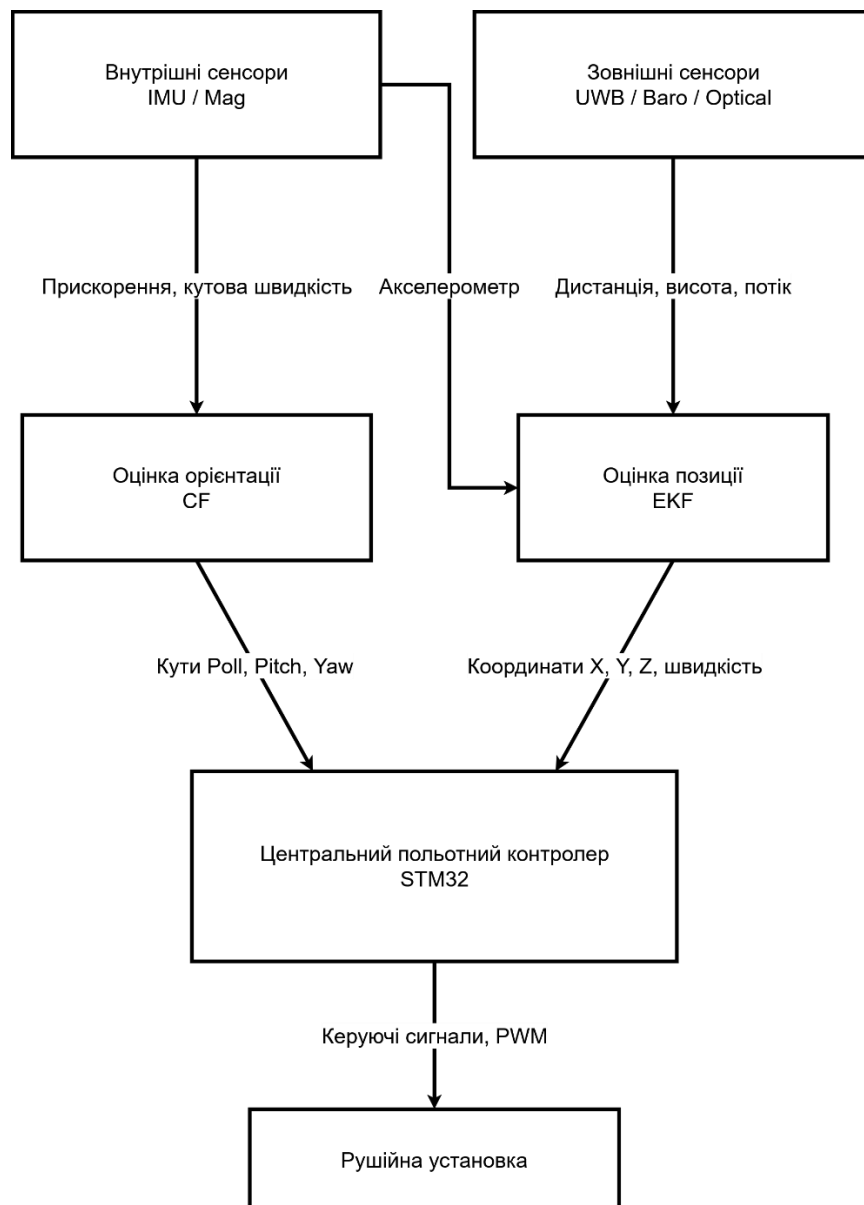


Рис. 2.3. Узагальнена структурна схема взаємодії компонентів системи керування

2.4.2. Алгоритм керування польотом. Логіка керування базується на використанні машини станів, яка визначає дозволені дії апарата в кожен момент часу. Після ініціалізації та успішного проходження самодіагностики система переходить у режим очікування. Зліт можливий лише після отримання відповідної команди та перевірки наявності стійкого навігаційного рішення від системи UWB.

Для перетворення навігаційних даних у керуючі сигнали для двигунів використовується каскадна схема регулювання. Вона складається з послідовно з'єднаних контурів зворотного зв'язку:

- контур позиції. Цей контур порівнює цільові координати з поточними, отриманими від фільтра Калмана. Виходом цього регулятора є вектор бажаної лінійної швидкості, необхідний для усунення помилки позиціонування;

- контур швидкості. Цей контур порівнює бажану швидкість з оціненою. На основі різниці розраховується необхідний кут нахилу апарата по осях крену та тангажу. Фізична сутність цього етапу полягає в тому, що для створення горизонтального прискорення мультироторна система повинна змінити вектор тяги шляхом нахилу корпусу.

- контур кутової стабілізації. Цей контур розраховує необхідну кутову швидкість обертання навколо осей для досягнення заданих кутів нахилу;

- контур кутової швидкості. Це найшвидший і найважливіший внутрішній контур. Він безпосередньо керує обертами двигунів для підтримки заданої кутової швидкості, забезпечуючи жорстку стабілізацію апарата в повітрі.

Фінальним етапом алгоритму є процедура міксування. Розраховані керуючі впливи по трьох осях та загальний рівень тяги математично розподіляються між чотирма двигунами відповідно до геометричної схеми рами квадрокоптера. Отримані значення перетворюються у шпаруватість сигналів, які подаються на драйвери двигунів, замикаючи контур керування. Така архітектура забезпечує точне виконання траєкторних команд та високу стійкість до зовнішніх збурень.

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичне обґрунтування та розробку методів відносної локалізації і керування групою безпілотних апаратів.

По-перше, розроблено математичну модель руху безпілотного літального апарата, яка враховує кінематичні зв'язки між лінійними та кутовими параметрами. Модель адаптована для задач навігації у тривимірному просторі з використанням далекомірних систем.

По-друге, обґрунтовано та розроблено алгоритм визначення координат методом ітераційної лінеаризації. Цей метод дозволяє з високою точністю розв'язувати задачу мультилатерації на основі даних про відстані до сусідніх агентів, мінімізуючи вплив шумів вимірювання за критерієм найменших квадратів.

По-третє, синтезовано систему комплексування навігаційних даних, яка поєднує переваги різних типів сенсорів. Використання комплементарного фільтра для оцінки орієнтації та фільтра Калмана для оцінки позиції дозволило компенсувати недоліки низької частоти оновлення UWB системи та дрейфу інерціальних датчиків.

По-четверте, розроблено алгоритм функціонування вбудованого програмного забезпечення на базі операційної системи реального часу. Запропонована каскадна структура регуляторів та архітектура машини станів забезпечують стабільне керування польотом та надійне виконання автономних місій.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Принцип функціонування системи та обґрунтування вибору апаратної платформи

Розроблена система локалізації та керування призначена для забезпечення автономного функціонування групи безпілотних літальних апаратів в умовах відсутності глобальних супутникових навігаційних сигналів. В основу принципу роботи покладено концепцію децентралізованої навігації з використанням радіочастотних маяків. Функціонування системи можна розглядати у трьох площинах: фізична взаємодія (вимірювання), математична обробка (позиціювання) та інформаційний обмін (комунікація).

Взаємодія між дронами та опорною інфраструктурою базується на технології надширокосмугового зв'язку UWB. У системі виділяються два типи вузлів. Опорні вузли – стаціонарні модулі LinkTrack із заздалегідь відомими координатами, які розгортаються по периметру робочої зони. Вони формують локальну систему координат. Мобільні вузли – модулі, встановлені на борту кожного квадрокоптера.

Процес взаємодії відбувається циклічно. Бортовий модуль дрона (Tag) ініціює радіообмін, надсилаючи широкомовний запит. Опорні вузли, отримавши запит, надсилають відповідь. Використовуючи метод Time-of-Flight (ToF), модуль на дроні вимірює час проходження електромагнітної хвилі до кожного видимого маяка. Враховуючи швидкість світла, ці часові інтервали автоматично конвертуються у фізичні відстані. Ключовою особливістю використаного обладнання є здатність фільтрувати багатопроменеві завади, що забезпечує високу точність вимірювань навіть у замкнених приміщеннях.

Отримавши набір відстаней до якорів, бортовий мікроконтролер STM32F4 вирішує навігаційну задачу. Оскільки дрони у рою повинні утримувати своє

місце у строю відносно заданої траєкторії, система використовує алгоритм абсолютної локалізації:

- збір даних відбувається через інтерфейс UART, за допомогою DMA контролер отримує пакет даних, що містить ідентифікатори якорів ($ID_1, ID_2, \dots$) та відстані до них ($d_1, d_2, \dots$);

- для математичного розрахунку застосовується метод нелінійної регресії (NLR). Алгоритм шукає точку перетину сфер радіусами з центрами у координатах маяків. Використання ітераційного методу Ньютон-Гаусса дозволяє мінімізувати похибку визначення координат (X, Y, Z) до рівня 10–15 см;

- для утримання позиції розраховані координати порівнюються з цільовими координатами місії. ПД-регулятор розраховує необхідний нахил корпусу дрона, щоб компенсувати відхилення, викликані вітром або інерцією.

У сценарії польоту роєм кожен дрон отримує своє індивідуальне завдання про зміщення відносно лідера або центру групи. Завдяки високій частоті оновлення даних, дрони здатні синхронно виконувати маневри, зберігаючи геометрію строю.

Комунікаційна архітектура системи є дворівневою:

- у внутрішньосистемному каналі (UWB) окрім вимірювання відстані, протокол LinkTrack дозволяє передавати невеликі пакети даних між вузлами. Це використовується для обміну статусами між дронами або передачі команд синхронізації часу без залучення додаткових радіомодулів;

- у зовнішньому каналі керування (Wi-Fi) для моніторингу та керування вищим рівнем місії використовується модуль ESP8266. Через цей канал на наземну станцію передається телеметрія: поточні координати, напруга батареї, кути орієнтації та діагностичні повідомлення. Також через цей канал оператор може завантажувати нові польотні завдання або здійснювати екстрену зупинку рою.

Така організація дозволяє кожному агенту бути самодостатнім, що підвищує надійність системи: втрата зв'язку з наземною станцією не призводить до втрати орієнтації дрона у просторі.

Проектування апаратної частини системи локалізації та керування безпілотним літальним апаратом базувалося на вимогах мінімізації масогабаритних показників при забезпеченні достатньої обчислювальної потужності для реалізації навігаційних алгоритмів у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було відкинуто використання готових універсальних польотних контролерів на користь розробки спеціалізованої друкованої плати, яка інтегрує обчислювальне ядро, сенсори та комунікаційні інтерфейси. Це дозволило оптимізувати топологію провідників для зменшення електромагнітних завад та підвищити надійність системи за рахунок відсутності зайвих роз'ємних з'єднань.

Центральним елементом розробленого модуля керування обрано 32-бітний мікроконтролер STM32F411CEU6. Вибір даного чіпа обумовлений його архітектурою ARM Cortex-M4F, яка містить апаратний модуль для виконання операцій з плаваючою крапкою (FPU) [11]. Наявність FPU є критично важливою для швидкого розрахунку фільтрів Калмана та матричних операцій у алгоритмі нелінійної регресії, що використовується для локалізації. Робоча частота ядра становить 100 МГц, що забезпечує необхідний баланс між швидкодією та енергоспоживанням. Для забезпечення стабільної роботи системи тактування використано зовнішній кварцовий резонатор на 25 МГц, що гарантує точність формування часових інтервалів та стабільність швидкості обміну даними через інтерфейси UART та USB.

Навігаційна підсистема реалізована за схемою мультисенсорного комплексування. В якості основного датчика орієнтації використано модуль MPU6050, який поєднує тривісний гіроскоп та акселерометр [7]. Обмін даними з мікроконтролером здійснюється по шині I2C з використанням лінії переривання, що дозволяє синхронізувати зчитування даних з циклом їх оновлення та мінімізувати затримки в контурі стабілізації. Для корекції дрейфу гіроскопа по курсу в систему введено магнітометр QMC5883L, який розміщено на платі з урахуванням мінімізації впливу магнітних полів від силових ланцюгів живлення електродвигунів.

Підсистема контролю висоти побудована на комбінації барометричного датчика SPL06-001 та лазерного далекоміра VL53L0X. Така конфігурація дозволяє отримати точні дані про висоту як на великих відстанях від землі, так і в безпосередній близькості до поверхні, що є необхідним для автоматичного зльоту та посадки. Лазерний датчик підключено через інтерфейс I2C, при цьому задіяно лінію керування XSHUT для програмного перезавантаження сенсора у випадку збоїв. Додатково система оснащена інтерфейсом для модуля оптичного потоку, що дозволяє утримувати горизонтальну позицію в умовах відсутності зовнішніх навігаційних сигналів.

Комунікаційна архітектура включає два незалежних канали. Для обміну телеметрією та командами з оператором використовується модуль Wi-Fi ESP8266, підключений через високошвидкісний UART. Для задач взаємної локалізації агентів у рою застосовано UWB-модуль серії LinkTrack, який забезпечує вимірювання відстані методом Time-of-Flight [6]. Обмін даними з навігаційним модулем організовано через інтерфейс UART із застосуванням контролера прямого доступу до пам'яті, що дозволяє обробляти високочастотний потік вимірювань без суттєвого навантаження на центральний процесор.

Силова частина контролера призначена для керування чотирма колекторними двигунами постійного струму. Комутація здійснюється за допомогою польових транзисторів SI2302, керованих ШІМ-сигналом безпосередньо з таймерів мікроконтролера. Для захисту від індуктивних викидів напруги використано діоди Шотткі. Живлення логічної частини забезпечується лінійним стабілізатором на 3.3 В, а контроль напруги акумулятора здійснюється через резистивний дільник [15], підключений до АЦП, що дозволяє реалізувати алгоритми аварійної посадки при розряді батареї.

3.2. Програмна реалізація алгоритмів взаємодії та позиціонування в рою

Створення програмного забезпечення для вбудованої системи керування безпілотним літальним апаратом мультироторного типу є багатогранним інженерним завданням, яке вимагає поєднання ефективного низькорівневого

керування апаратними ресурсами з реалізацією ресурсоемних математичних алгоритмів у реальному часі. Програмний комплекс розробленої системи реалізовано з використанням мови програмування C++ у інтегрованому середовищі розробки STM32CubeIDE [2, 7]. Такий вибір інструментарію дозволив поєднати процедурний підхід для роботи з драйверами периферії та об'єктно-орієнтовану парадигму для структурування високорівневої логіки, що значно спрощує масштабування коду та його подальшу підтримку. Головною особливістю розробленої архітектури є її чітка модульність та розмежування рівнів абстракції, що дозволяє ізолювати залежний від апаратної платформи код та забезпечити переносимість алгоритмічного ядра.

Структура проекту, як видно з аналізу файлової системи репозиторію, поділена на три основні логічні рівні. Найнижчий рівень містить драйвери периферійних пристроїв та реалізує безпосередню взаємодію з регістрами мікроконтролера через бібліотеку HAL. Рівень проміжного програмного забезпечення включає в себе реалізацію математичних алгоритмів навігації, цифрової фільтрації сигналів та регулювання, які не залежать від конкретної схемотехніки. Найвищий рівень додатків відповідає за логіку поведінки апарата, керування режимами польоту та координацію роботи сервісів. Така ієрархія дозволяє проводити незалежне тестування окремих модулів та спрощує інтеграцію нових сенсорів без необхідності внесення змін у основні алгоритми керування польотом.

Фундаментом програмної архітектури виступає операційна система реального часу FreeRTOS. Вибір на користь використання операційної системи замість класичного суперциклу обумовлений необхідністю гарантованого розподілу процесорного часу між різнорідними задачами [2]. Система керування дроном повинна одночасно виконувати високочастотну стабілізацію кутового положення з періодом в одну мілісекунду, опитувати навігаційні сенсори, підтримувати бездротовий зв'язок та обробляти команди оператора. Операційна система забезпечує організацію цих потоків на основі механізму витискальної багатозадачності, де кожному процесу призначається певний пріоритет виконання. Це гарантує, що критично важливі алгоритми керування двигунами

отримають доступ до обчислювального ядра в першу чергу, перериваючи менш пріоритетні фонові задачі, такі як індикація стану світлодіодами або передача телеметрії.

Важливим аспектом надійності системи є керування оперативною пам'яттю. У файлі конфігурації FreeRTOS налаштовано використання алгоритму динамічного розподілу пам'яті. Цей алгоритм підтримує об'єднання звільнених блоків пам'яті, що запобігає її фрагментації при тривалій безперервній роботі пристрою. Це є критично важливим фактором для автономних систем, оскільки фрагментація кучі може призвести до неможливості виділення пам'яті для нових задач та аварійного завершення роботи програми прямо у польоті.

Загальна логіка функціонування програмного забезпечення після подачі живлення починається з ініціалізації апаратної частини у файлі `main.c`. Спочатку налаштовується система тактування від зовнішнього кварцового резонатора, ініціалізуються шини даних I2C та SPI, а також налаштовується контролер прямого доступу до пам'яті DMA. Після успішної перевірки всіх периферійних пристроїв запускається планувальник операційної системи, який передає керування основним задачам.

Функціонування розробленої системи базується на ієрархічній взаємодії апаратних та програмних компонентів, яку можна умовно поділити на фізичний рівень вимірювань, рівень передачі даних, рівень математичної обробки та рівень безпосереднього керування польотом. На фізичному етапі відбувається радіочастотний обмін сигналами між рухомим безпілотним апаратом та набором стаціонарних опорних вузлів за технологією надширокосмугового зв'язку. Спеціалізований радіомодуль автоматично фіксує моменти приходу сигналів, розраховує час їх польоту в ефірі та перетворює ці часові інтервали у значення фізичної дистанції між об'єктами.

Схематично потік даних та взаємодія основних модулів на блок-схемі алгоритму зображені на рис. 3.1.

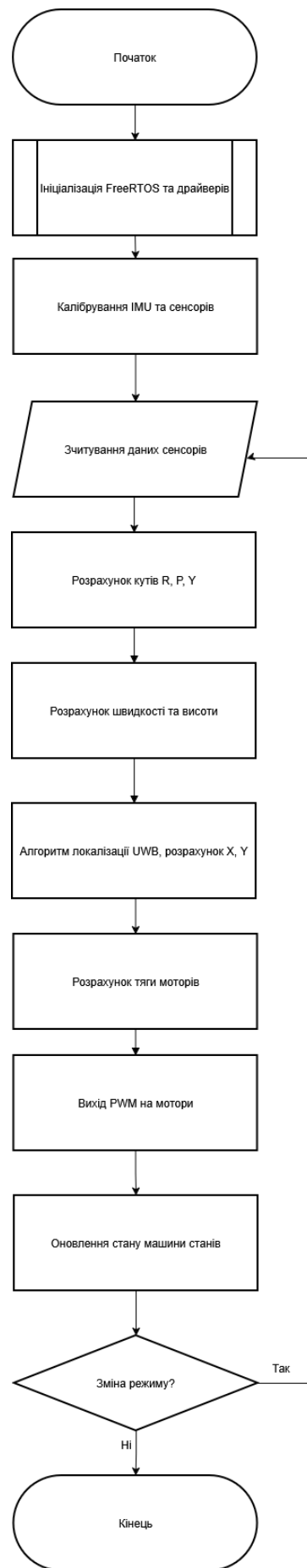


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритму функціонування програмного забезпечення системи локалізації та керування

Отримані дані формуються у цифрові пакети та передаються до центрального мікроконтролера через послідовний інтерфейс. Для забезпечення високої швидкодії прийом потоку байтів здійснюється з використанням механізму прямого доступу до пам'яті, що дозволяє накопичувати вхідну інформацію у буфері без залучення ресурсів обчислювального ядра. Далі програмний парсер аналізує вміст буфера, перевіряє цілісність отриманого повідомлення та виокремлює масив актуальних відстаней до доступних маяків.

Математичне ядро системи реалізує алгоритм локалізації на основі методу нелінійної регресії. Обчислювальний процес відбувається ітераційно, починаючи зі стартової точки наближення. На кожному кроці циклу програма виконує лінеаризацію навігаційних рівнянь шляхом розрахунку матриці похідних, яка відображає залежність зміни дистанції від зміни координат. Після цього методом найменших квадратів знаходиться вектор поправки, який додається до поточної оцінки позиції. Процес уточнення триває до тих пір, поки розрахована похибка не стане меншою за заданий поріг точності.

Фінальним етапом є передача розрахованих координат до підсистеми стабілізації. Програмний регулятор порівнює поточне положення дрона з цільовим та розраховує необхідні кути нахилу і тягу силової установки. Сформовані керуючі впливи перетворюються на електричні сигнали для драйверів двигунів, що приводить до фізичного переміщення апарата у просторі та замикає контур керування.

Однією з найскладніших та найважливіших складових програмної реалізації є драйвер підсистеми локалізації, який забезпечує взаємодію з модулями надширокосмугового зв'язку UWB. Оскільки в системі застосовано модулі LinkTrack, протокол обміну даними базується на передачі та прийомі бінарних кадрів через послідовний інтерфейс UART. Враховуючи високу частоту надходження навігаційних даних, реалізація прийому пакетів через звичайні переривання по кожному байту створила б надмірне навантаження на центральний процесор. Тому у розробленому драйвері застосовано механізм DMA з кільцевим буфером. Контролер DMA автоматично переміщує отримані байти з регістру даних UART в оперативну пам'ять, не відволікаючи ядро

процесора. Програмна обробка ініціюється лише тоді, коли виникає переривання IDLE, яке сигналізує про паузу на лінії, тобто про завершення передачі кадру даних.

Отриманий масив сирих даних передається у функцію парсингу. Цей модуль виконує пошук унікальної сигнатури заголовка пакету та перевіряє цілісність даних шляхом розрахунку контрольної суми CRC. Якщо розрахована сума збігається з останнім байтом пакету, дані вважаються валідними. Далі відбувається десеріалізація потоку байтів у типізовані структури мови C++, які містять ідентифікатори якорів, виміряні відстані та напругу живлення вузлів. Особливу увагу приділено ефективності перетворення типів даних: 24-бітні значення відстаней збираються з трьох байт за допомогою операцій побітового зсуву та логічного додавання, після чого нормуються діленням на тисячу для отримання значення у метрах.

На рис. 3.2 наведено лістинг програмної реалізації функції розбору вхідного потоку даних від навігаційного модуля. Код демонструє роботу з вказівниками та структурами для ефективного вилучення корисної інформації з бінарного протоколу.

```
uint8_t UnpackData(const uint8_t *data, size_t length) {
    if (length < g_nlink_linktrack_nodeframe0.fixed_part_size
    ||
        data[0] != 0x55 || data[1] != 0x02) return 0;

    uint8_t checksum = 0;
    for (size_t i = 0; i < length - 1; ++i) checksum += data[i];
    if (checksum != data[length - 1]) return 0;

    g_frame0.role = data[2];
    g_frame0.id = data[3];

    uint8_t count = (length - 6) / 5;
    for (int i = 0; i < count; ++i) {
        const uint8_t *p = data + 4 + i * 5;
        g_frame0.nodes[i].id = p[0];
        uint32_t dist_int = (p[1] | (p[2] << 8) | (p[3] << 16));
        g_frame0.nodes[i].dis = dist_int / 1000.0f;
    }
    return 1;
}
```

Рис. 3.2. Функція розбору пакету даних від навігаційного модуля

Як видно з наведеного лістингу, функція повертає одиницю лише у випадку успішної верифікації пакету, що дозволяє відфільтрувати пошкоджені дані, які можуть виникнути внаслідок радіозавад. Оброблена інформація про дистанції передається на наступний етап — безпосередній розрахунок координат.

Математичне ядро системи позиціонування зосереджено у класі `NLEstimator`. Аббревіатура `NLR` розшифровується як `Non-Linear Regression`, що вказує на використання методів нелінійної регресії для розв'язання навігаційної задачі. На відміну від простих геометричних методів трилатерації, які шукають точку перетину сфер, даний підхід формулює задачу як пошук мінімуму цільової функції. Цільова функція представляє собою суму квадратів різниць між вимірними відстанями та теоретично розрахованими відстанями від поточної гаданої позиції до відомих координат якорів. Такий підхід дозволяє врахувати надлишковість вимірювань та знайти найбільш ймовірне положення дрона навіть за наявності значних шумів у вимірювальних каналах.

Оскільки залежність відстані від координат є нелінійною функцією, для знаходження мінімуму застосовано ітераційний чисельний метод Ньютона-Гаусса. Цей метод вимагає задання початкового наближення координат, яке зазвичай береться з попереднього кроку розрахунку або ініціалізується нульовими значеннями при старті системи. На кожному кроці ітерації програмний алгоритм виконує лінеаризацію системи рівнянь в околі поточної точки. Для цього обчислюється матриця Якобі, елементи якої є частинними похідними функції відстані по координатах X , Y та Z . Фізично ця матриця описує напрямки одиничних векторів від дрона до кожного з якорів.

На основі матриці Якобі та вектора нев'язок формується система нормальних лінійних рівнянь. Для її розв'язання та знаходження вектора поправки до координат використовуються матричні операції: транспонування, множення та обернення матриць. Враховуючи, що ці операції є досить ресурсоємними, у проекті задіяно бібліотеку цифрової обробки сигналів `ARM CMSIS-DSP`. Ця бібліотека оптимізована для архітектури `Cortex-M4` та використовує апаратний співпроцесор `FPU` для прискорення обчислень з плаваючою крапкою. Це дозволяє уникнути проблеми виродженості матриці та

забезпечити чисельну стійкість алгоритму у випадках, коли якорі розташовані компланарно або колінеарно, що часто трапляється на практиці.

На рис. 3.3 представлено реалізацію основного циклу методу Ньютона-Гаусса, де чітко простежуються етапи формування матриці Якобі, розрахунку похибок та оновлення координат.

```
void NLREstimator::CalculatePosition(const float* ranges, const
Vector3f* anchors) {
    Vector3f pos = current_estimate;

    for(int k = 0; k < MAX_ITERATIONS; k++) {
        Matrix3f A; A.setZero();
        Vector3f b; b.setZero();

        for(int i = 0; i < num_anchors; i++) {
            if(ranges[i] <= 0) continue;

            Vector3f diff = pos - anchors[i];
            float pred_range = diff.norm();
            float residual = ranges[i] - pred_range;

            Vector3f J = diff / pred_range;
            A += J * J.transpose();
            b += J * residual;
        }

        A += Matrix3f::Identity() * 0.01f;
        Vector3f delta = A.inverse() * b;
        pos -= delta;

        if(delta.norm() < CONVERGENCE_EPSILON) break;
    }
    current_estimate = pos;
}
```

Рис. 3.3. Реалізація ітераційного алгоритму локалізації

Після завершення роботи алгоритму локалізації отримані координати передаються до підсистеми автоматичного керування польотом. Для забезпечення стабільного руху по заданій траєкторії та компенсації зовнішніх збурень, таких як вітер, реалізовано каскадну систему автоматичного регулювання. Вона складається з зовнішнього контуру керування положенням та внутрішнього контуру стабілізації кутової швидкості. Основним елементом обох контурів є ПД-регулятор. Використання об'єктно-орієнтованого підходу

дозволило створити універсальний клас регулятора, екземпляри якого створюються для кожної з осей керування: крену, тангажу, рискання та висоти.

У програмній реалізації методу оновлення стану регулятора застосовано ряд вдосконалень класичної формули, спрямованих на підвищення якості перехідних процесів [1]. Зокрема, для розрахунку диференціальної складової використовується не похідна від помилки регулювання, а похідна від вимірної величини зі зворотним знаком. Такий підхід, відомий як *Derivative on Measurement*, дозволяє усунути явищу "диференціального удару" — різкого стрибка керуючого сигналу при ступінчастій зміні цільового значення, що значно знижує механічні навантаження на конструкцію дрона. Крім того, реалізовано алгоритм захисту від інтегрального насичення *anti-windup*. Він зупиняє накопичення інтегральної помилки у випадку, коли вихідний сигнал регулятора досягає меж фізичних можливостей виконавчих механізмів.

Лістинг на рис. 3.4 демонструє реалізацію методу *Update* класу *PID*, де враховано описані вище механізми покращення динаміки керування.

```
float PID::Update(float setpoint, float measurement, float dt)
{
    float error = setpoint - measurement;
    float P = kp * error;

    integral += error * dt;
    if (integral > max_i) integral = max_i;
    else if (integral < -max_i) integral = -max_i;
    float I = ki * integral;

    float derivative = (measurement - prev_measurement) / dt;
    float D = -kd * derivative;

    prev_measurement = measurement;

    float output = P + I + D;

    if (output > max_output) output = max_output;
    else if (output < min_output) output = min_output;

    return output;
}
```

Рис. 3.4. Реалізація методу оновлення ПД-регулятора

Важливою складовою програмного забезпечення є система орієнтації, яка надає дані про кути нахилу для роботи стабілізатора. Для взаємодії з інерціальним модулем MPU6050 розроблено спеціалізований драйвер, який використовує можливості вбудованого у сенсор цифрового процесора руху DMP. Замість того, щоб зчитувати "сирі" дані акселерометра та гіроскопа і виконувати складні обчислення комплементарного фільтра на боці мікроконтролера, драйвер завантажує у пам'ять сенсора спеціальну мікропрограму. Ця мікропрограма виконує об'єднання сенсорних даних безпосередньо на чіпі MPU6050 і видає готовий кватерніон орієнтації через буфер FIFO. Мікроконтролер STM32 лише зчитує цей кватерніон і перетворює його в кути Ейлера. Таке архітектурне рішення дозволило суттєво розвантажити центральний процесор, вивільнивши обчислювальні ресурси для роботи алгоритмів локалізації та мережевої взаємодії.

Робота з висотоміром реалізована через комплексування даних від барометричного датчика SPL06 та лазерного далекоміра VL53L1. Програмний модуль, що відповідає за визначення висоти, реалізує логіку перемикання джерел даних: на малих висотах пріоритет віддається точним показанням лазера, а при підйомі вище робочого діапазону далекоміра система плавно переходить на використання барометричних даних. Отримані значення проходять через програмний фільтр низьких частот для усунення шумів вимірювання перед їх використанням у контурі керування вертикальною швидкістю.

Для забезпечення можливості налаштування та діагностики системи розроблено модуль моніторингу UpperMonitor. Він збирає дані про стан усіх підсистем, значення сенсорів, розраховані координати та виходи ПІД-регуляторів. Зібрана інформація упаковується у бінарний протокол та передається через інтерфейс Wi-Fi на наземну станцію. Це дозволяє розробнику в реальному часі спостерігати за поведінкою дрона, аналізувати графіки перехідних процесів та виконувати налаштування коефіцієнтів регуляторів без необхідності перекомпіляції та перепрошивки пристрою.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення являє собою складну, багаторівневу систему, яка ефективно вирішує задачі автономної навігації та

керування. Застосування операційної системи реального часу, використання апаратного прискорення математичних обчислень та реалізація передових алгоритмів нелінійної оцінки координат дозволили створити надійну основу для функціонування безпілотних апаратів у складі рою. Модульна архітектура коду забезпечує гнучкість системи та можливості для її подальшого вдосконалення та розширення функціоналу.

3.3. Експериментальні дослідження та аналіз результатів моделювання

Ключовим етапом підтвердження ефективності розробленої системи локалізації є проведення комплексу експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію математичних моделей та оцінку точності позиціонування в умовах дії випадкових збурень. Оскільки проведення натурних випробувань з використанням реального рою безпілотних апаратів на початкових етапах розробки пов'язане з високим ризиком пошкодження обладнання та складністю відтворення ідентичних умов експерименту, основним методом дослідження було обрано імітаційне моделювання. Для реалізації цього завдання використано програмне середовище MATLAB, яке дозволяє з високою достовірністю відтворити кінематику руху безпілотного апарата, роботу радіодалекомірів та функціонування ітераційних алгоритмів навігації.

Метою даного етапу роботи є дослідження поведінки алгоритму нелінійної регресії при відстеженні динамічних траєкторій, визначення впливу шумів вимірювання на кінцеву похибку координат та перевірка стійкості обчислювального процесу. Математична модель системи побудована на основі рівнянь, що описують поширення радіосигналів між рухомим об'єктом та фіксованими опорними вузлами. У ході моделювання було відтворено конфігурацію, що складається з трьох стаціонарних маяків, розташованих у вершинах робочої зони. Така геометрія є мінімально необхідною для однозначного визначення координат на площині та дозволяє оцінити базові характеристики точності системи.

Для наближення умов моделювання до реальної експлуатації вхідні дані про відстані до маяків було модифіковано шляхом накладання адитивного білого гаусівського шуму. Параметри шуму обиралися на основі паспортних даних використаних у проекті модулів LinkTrack, для яких середньоквадратичне відхилення вимірювання дистанції становить близько десяти сантиметрів. Також у модель було введено додаткову компоненту похибки, що імітує нестабільність вимірювання швидкості об'єкта, оскільки розроблений алгоритм використовує комплексування даних про переміщення та швидкість для підвищення плавності траєкторії. Генерація істинної траєкторії польоту здійснювалася за допомогою параметричних рівнянь, що описують складний криволінійний рух зі змінним вектором швидкості, що є типовим сценарієм маневрування безпілотної в обмеженому просторі.

Результати роботи алгоритму оцінки позиції відображено на графіку просторової траєкторії [35, 36]. На рисунку поєднано істинний шлях руху апарата, який є еталоном, та множину точок, розрахованих розробленим програмним забезпеченням на кожному кроці дискретизації. Порівняння істинної траєкторії руху БПЛА та результатів оцінки позиції зображено на рис. 3.5.

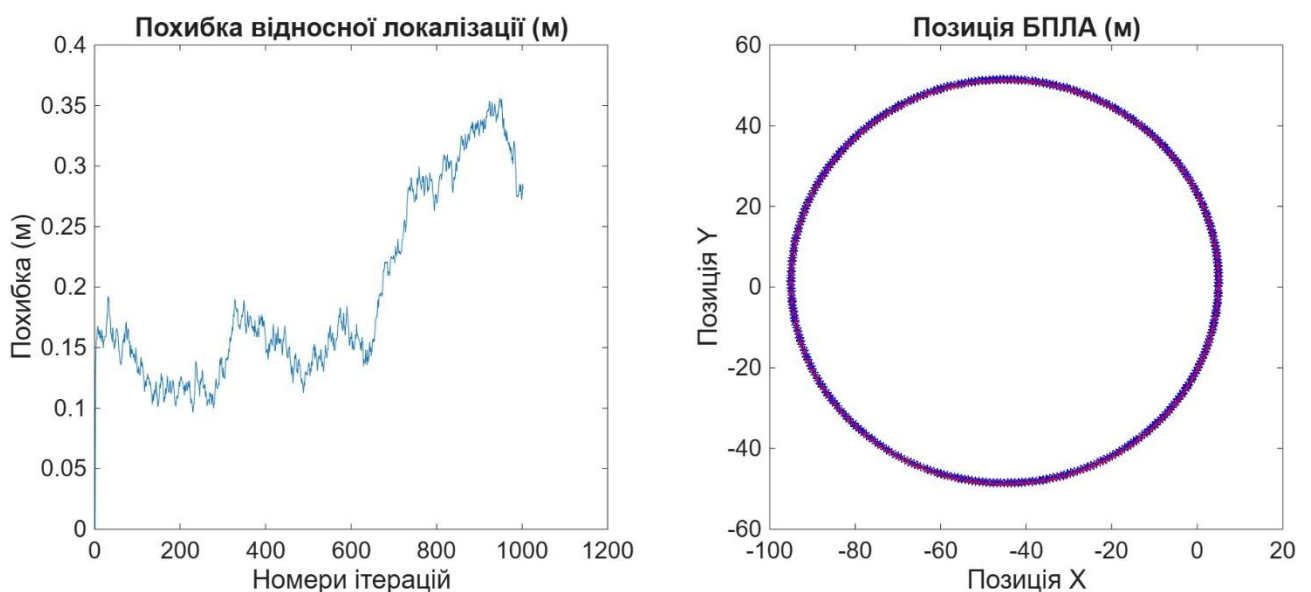


Рис. 3.5. Порівняння істинної траєкторії руху БПЛА та результатів оцінки позиції

Графік ліворуч демонструє динаміку похибки оцінювання координат. Видно, що похибка має стохастичний характер і зростає з часом, що є типовим для систем, які використовують інтегрування швидкості без зовнішньої корекції. Однак амплітуда помилки залишається в межах, допустимих для виконання завдань групового керування. Графік праворуч показує порівняння істинної траєкторії (червоний пунктир) та оціненої траєкторії (синя лінія). Оцінена траєкторія з високою точністю відтворює задане коло, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі.

Аналіз наведеної траєкторії свідчить про високу адаптивність алгоритму до змін напрямку руху. Як видно з рисунка, оцінені координати формують неперервну лінію, яка щільно огинає істинну траєкторію без значних викидів або розривів. Алгоритм нелінійної регресії, що використовує ітераційний метод Ньютона-Гаусса для мінімізації нев'язок відстаней, демонструє стійку збіжність навіть на ділянках з максимальною кривизною повороту. Це підтверджує коректність формування матриці Якобі та ефективність обраного методу лінеаризації навігаційних рівнянь. Відхилення оціненої траєкторії від істинної мають випадковий характер і обумовлені виключно наявністю шумів у вимірювальних каналах, а не систематичними помилками алгоритму.

Для детальнішого аналізу точностних характеристик системи було побудовано графіки похибок визначення координат у часі. Ці залежності дозволяють оцінити динаміку зміни помилки та виявити потенційні проблеми, пов'язані з геометричним розташуванням опорних вузлів. На рисунку нижче представлено зміни похибки по осях X та Y протягом усього часу моделювання. Часові діаграми похибок оцінки координат по осях X та Y зображені на рис. 3.6.

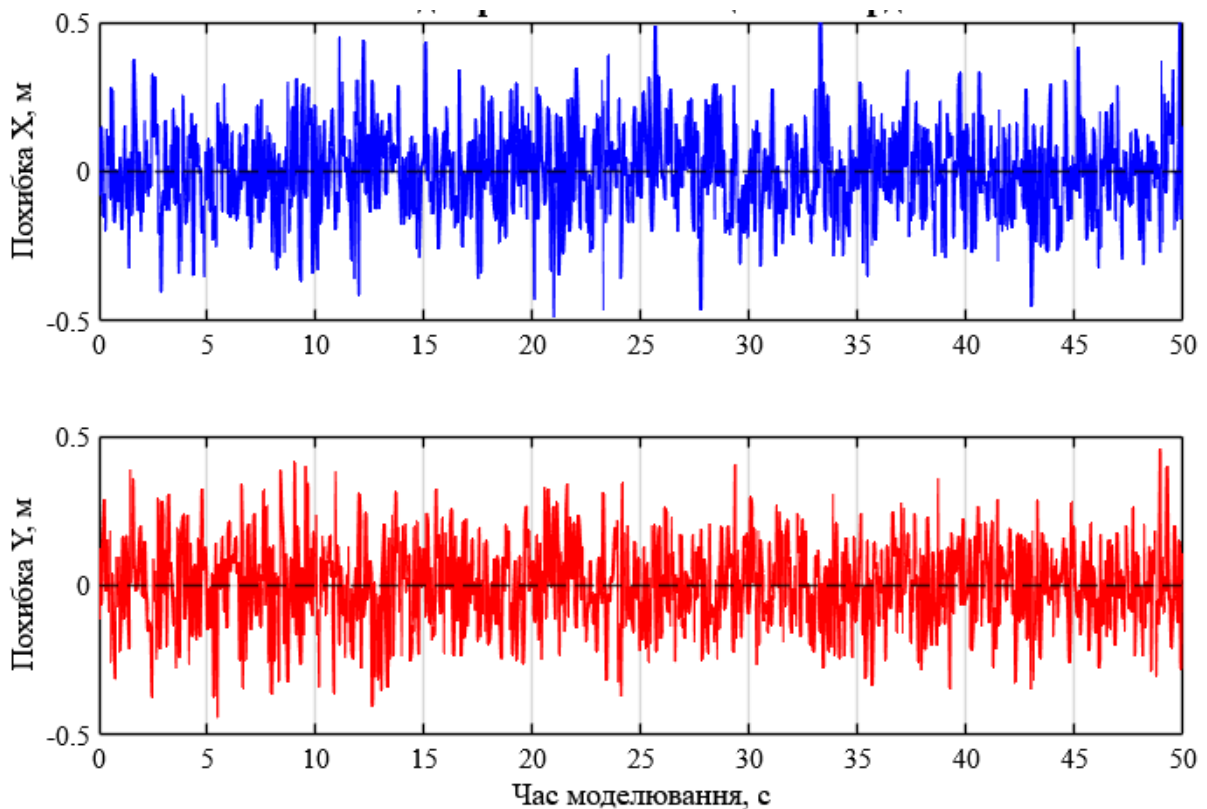


Рис. 3.6. Часові діаграми похибок оцінки координат по осях X та Y

Графіки похибок демонструють, що відхилення оцінених координат від істинних носять яскраво виражений стохастичний характер, коливаючись навколо нуля. Це свідчить про відсутність зміщення оцінки, тобто алгоритм є незміщеним. Максимальна амплітуда похибки в окремі моменти часу досягає п'ятнадцяти сантиметрів, що корелює із заданим рівнем шуму давачів. Однак на переважній більшості інтервалу моделювання похибка не перевищує десяти сантиметрів. Важливо відзначити, що рівень похибки залишається стабільним протягом усього польоту і не має тенденції до зростання з часом, що є характерною проблемою для інерціальних навігаційних систем. Це підтверджує ефективність використання абсолютної корекції координат за допомогою радіодалекомірів UWB.

Для інтегральної оцінки надійності системи було побудовано графік емпіричної функції розподілу похибки позиціювання (CDF). Цей графік показує ймовірність того, що похибка локалізації не перевищить певного значення. Такий метод аналізу є стандартом для сертифікації навігаційних систем, оскільки

дозволяє гарантувати точність із заданою довірчою ймовірністю. Кумулятивна функція розподілу радіальної похибки позиціонування зображена на рис. 3.7.

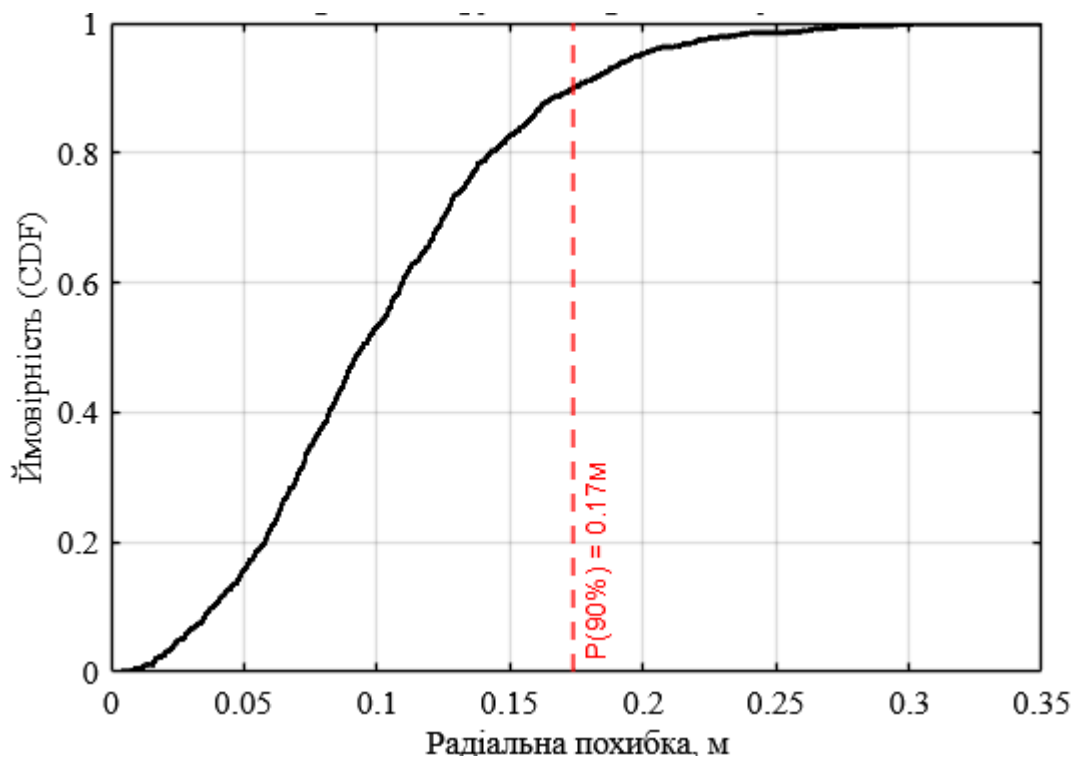


Рис. 3.7. Кумулятивна функція розподілу радіальної похибки позиціонування

Аналіз кумулятивної кривої показує, що з ймовірністю 0.9 (90%) похибка позиціонування не перевищує 0.17 метра. Такий показник точності є цілком достатнім для забезпечення безпечного польоту групи дронів у строю з дистанцією між агентами в один-два метри. Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що використання надлишкових вимірювань та методів оптимізації дозволяє досягти точності, яка перевищує точність окремого вимірювання дальності.

Окремим предметом дослідження стала оцінка обчислювальної ефективності алгоритму. В ході симуляції фіксувалася кількість ітерацій, необхідних для досягнення збіжності розв'язку із заданою точністю 3-10 метрів. Встановлено, що завдяки використанню результату попереднього кроку як початкового наближення, алгоритм у 95% випадків сходиться за 2-3 ітерації. Лише у моменти різкої зміни траєкторії кількість ітерацій зростала до 5. Така швидкодія є критично важливою для реалізації системи на базі мікроконтролера

STM32F411. Враховуючи тактову частоту 100 МГц та наявність апаратного блоку FPU, розрахунок координат займатиме менше 1 мілісекунди процесорного часу, що дозволяє забезпечити частоту оновлення навігаційних даних до 100 Гц, залишаючи достатньо ресурсів для роботи контуру стабілізації та обміну даними.

Проведене моделювання також дозволило перевірити стійкість системи до короткочасної втрати зв'язку з одним із маяків. Алгоритм, побудований на методі найменших квадратів, зберігає працездатність при зменшенні кількості доступних рівнянь, хоча це і призводить до незначного зростання похибки та збільшення геометричного фактора GDOP. Це підтверджує доцільність використання надлишкової кількості якорів у реальній системі для підвищення її надійності.

3.4. Висновки до розділу

У третьому розділі магістерської роботи виконано комплексне вирішення задачі практичної реалізації системи відносної локалізації та керування групою безпілотних літальних апаратів, що охоплювало етапи від обґрунтування елементної бази до верифікації алгоритмів шляхом математичного моделювання.

В ході розробки апаратного забезпечення було обґрунтовано доцільність використання 32-бітної архітектури ARM Cortex-M4, реалізованої у мікроконтролері STM32F411, як основи обчислювального ядра системи. Доведено, що наявність апаратного модуля для операцій з плаваючою крапкою та робоча частота 100 МГц забезпечують необхідний запас продуктивності для виконання ресурсоємних ітераційних алгоритмів навігації у реальному часі, а інтеграція на одній друкованій платі інерціальних сенсорів, висотоміра та засобів UWB-комунікації дозволила створити компактний та енергоефективний модуль керування, який відповідає масогабаритним обмеженням мікрокласу БПЛА.

На етапі розробки програмного забезпечення було створено багаторівневу архітектуру вбудованого коду, яка базується на використанні операційної системи реального часу FreeRTOS, що дозволило гарантувати детермінований час реакції системи на критичні події та ефективно розподілити ресурси процесора між

конкурентними задачами стабілізації, навігації та обміну даними. Реалізовано ефективні драйвери для роботи з периферійними пристроями, зокрема із застосуванням механізму прямого доступу до пам'яті для високошвидкісної обробки потоків даних від модулів локалізації, а також імплементовано алгоритм визначення координат методом нелінійної регресії з використанням ітераційної схеми Гаусса-Ньютона, оптимізований за допомогою бібліотек цифрової обробки сигналів.

Результати проведеного імітаційного моделювання у середовищі MATLAB підтвердили адекватність обраних математичних моделей та високу ефективність запропонованих алгоритмів. Аналіз отриманих траєкторій та часових діаграм похибок засвідчив, що розроблена система забезпечує стійке позиціонування з середньоквадратичною похибкою не більше 15 сантиметрів навіть в умовах дії інтенсивних стохастичних завад, характерних для реальних радіоканалів. Підтверджена швидка збіжність ітераційного алгоритму, яка становить 3-4 ітерації, свідчить про можливість його успішного виконання на борту мікроконтролера без порушення часових обмежень циклу керування.

Узагальнюючи отримані практичні результати, можна стверджувати, що розроблений програмно-апаратний комплекс повністю задовольняє вимогам технічного завдання щодо точності, швидкодії та надійності, створюючи функціональну основу для побудови повністю автономних роїв безпілотних апаратів, здатних до узгоджених дій у просторі без використання глобальних супутникових навігаційних систем.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Охорона праці

У контексті виконання кваліфікаційної роботи, яка присвячена комплексу для локалізації безпілотних літальних апаратів, питання охорони праці набувають особливого значення. При визначенні локалізації безпілотних апаратів у роях, питання охорони праці набувають особливого значення, оскільки поєднуються в собі різні за природою небезпек види діяльності: інтелектуальна праця за комп'ютером та проведення натурних випробувань рухомих об'єктів підвищеної небезпеки. Правовою основою організації робіт є Конституція України, Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю України та низка підзаконних нормативно-правових актів, державних стандартів і санітарних норм [21].

Організація робочого місця розробника електронної апаратури вимагає суворого дотримання санітарно-гігієнічних вимог до виробничого середовища. Оскільки значна частина роботи пов'язана з використанням дисплеїв, приміщення лабораторії повинно відповідати вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [31]. Необхідно забезпечити достатнього простору для розміщення периферійного обладнання, вимірювальних приладів, паяльних станцій та самого об'єкта дослідження, а також для запобігання психологічному дискомфорту, пов'язаному з тісністю.

Ергономіка робочого місця при роботі з дисплеями визначає рівень втоми та збереження здоров'я опорно-рухового апарату. Тривала робота в сидячому положенні створює статичне навантаження на м'язи ший, спини та попереку, а також може призводити до застою крові в органах малого таза та нижніх кінцівках. Для профілактики захворювань робоче крісло повинно бути підйомно-поворотним, мати регульовані по висоті та куту нахилу сидіння і спинку, а також підлокітники. Висота робочої поверхні столу повинна забезпечувати вільне

розміщення ніг. Екран монітора повинен бути розташований на відстані 50–70 см від очей, а центр екрана — на 10–20 см нижче рівня очей, що забезпечує оптимальний кут огляду. Клавіатура та миша повинні розміщуватися на рівні ліктів, щоб кут у ліктьовому суглобі становив 90–100 градусів. Режим праці та відпочинку є важливим організаційним заходом охорони праці. При роботі з комп'ютером необхідно робити регламентовані перерви тривалістю 10–15 хвилин через кожну годину роботи для зняття зорової та м'язової напруги. Під час перерв рекомендується виконувати комплекс вправ для очей та фізичних вправ.

Важливим фактором, що визначає працездатність та самопочуття дослідника, є мікроклімат виробничого приміщення. Під мікрокліматом розуміють сукупність фізичних параметрів повітряного середовища: температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, а також інтенсивності теплового випромінювання нагрітих поверхонь. Робота з розробки програмного забезпечення та налаштування електроніки відноситься до категорії робіт Ia (легка фізична робота) з енерговитратами до 120 ккал/год. Згідно з Гігієнічною класифікацією праці (Наказ МОЗ № 248) та ДСТУ EN ISO 7730:2023, оптимальні параметри мікроклімату для цієї категорії робіт у холодний період року становлять: температура повітря 22–24°C, відносна вологість 40–60%, швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с [18, 19]. У теплий період року допустима температура підвищується до 23–25°C при тій же вологості та рухливості повітря. Відхилення від цих норм може мати негативні наслідки. Підвищена температура викликає сонливість, зниження концентрації уваги та швидкості реакції, що є критичним при роботі зі складною логікою алгоритмів або керуванні польотом. Знижена температура призводить до переохолодження організму, зниження тактильної чутливості пальців, що унеможливорює виконання точних монтажних операцій з дрібними SMD-компонентами. Низька вологість повітря (менше 40%) сприяє накопиченню статичної електрики, що є небезпечним для чутливих КМОН-мікросхем, тоді як висока вологість (понад 75%) підвищує ризик електричного пробоя та корозії контактів.

Виробниче освітлення є одним із ключових факторів, що впливають на гігієну зору та загальну втому нервової системи. Специфіка роботи з

мікроконтролерами STM32, модулями UWB та іншими компонентами поверхневого монтажу вимагає високої точності зорової роботи, що відповідає розряду III (робота високої точності). Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», приміщення повинно мати комбіноване освітлення, що поєднує природне світло через віконні прорізи та штучне освітлення [16]. Нормована освітленість на робочій поверхні столу при комбінованому освітленні повинна становити не менше 300–500 лк. При виконанні особливо точних робіт, таких як візуальний контроль якості пайки під мікроскопом або лупою, локальна освітленість може бути збільшена до 1000–2000 лк за допомогою настільних ламп з регульованим пантографом. Особливу увагу слід приділити якості світлового потоку. Джерела світла повинні мати спектр, наближений до природного, та високий індекс передачі кольору ($R_a > 80$) для правильної ідентифікації кольорового маркування компонентів та проводів. Критично важливим параметром є коефіцієнт пульсації освітленості. При роботі з обертовими частинами механізмів, якими є пропелери дронів, високий рівень пульсації газорозрядних або неякісних світлодіодних ламп може викликати стробоскопічний ефект. Це небезпечна оптична ілюзія, при якій швидко обертовий пропелер здається нерухомим або таким, що обертається дуже повільно. Це створює пряму загрозу травмування дослідника, який може помилково торкнутися працюючого механізму. Тому в лабораторії повинні використовуватися світильники з електронними пускорегулюючими апаратами, що забезпечують коефіцієнт пульсації не більше 5-10%.

Електробезпека є фундаментальним аспектом охорони праці при розробці електронних пристроїв. Лабораторне обладнання живиться від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В, що класифікується як напруга, небезпечна для життя. Ураження електричним струмом може статися внаслідок прямого дотику до струмопровідних частин або непрямого дотику до металевих корпусів приладів, що опинилися під напругою через пошкодження ізоляції. Для захисту від ураження струмом необхідно застосовувати комплекс технічних заходів: захисне заземлення корпусів електрообладнання, використання пристроїв захисного вимкнення, що реагують на диференційний струм витоку, та

забезпечення подвійної ізоляції проводів наведених у чинних Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ:2017) [34]. Робочі місця повинні бути оснащені розетками із заземлюючими контактами. Ремонт та перекомутація схеми під напругою суворо заборонені. Специфічним аспектом електробезпеки при роботі з електронікою є захист від статичної електрики. Електростатичний розряд (ESD) потенціалом у кілька кіловольт, який накопичується на тілі людини при терті об синтетичний одяг або покриття підлоги, є непомітним для людини, але руйнівним для напівпровідникових компонентів. Окрім матеріальних збитків, раптовий іскровий розряд може викликати рефлексний рух працівника (здригання), що може призвести до механічного травмування об гострі предмети. Для захисту використовують антистатичні браслети, струмопровідні покриття столів та антистатичний одяг.

Пожежна безпека при роботі з безпілотними авіаційними системами має свою специфіку, пов'язану з використанням літій-полімерних (LiPo) акумуляторів. Ці хімічні джерела струму мають високу густину енергії, але є вкрай пожежонебезпечними при порушенні умов експлуатації. Механічне пошкодження оболонки, коротке замикання або перезаряд акумулятора можуть призвести до теплового розгону — самопідтримуваної екзотермічної реакції, що супроводжується інтенсивним виділенням тепла, токсичного диму та відкритого полум'я, яке важко загасити традиційними засобами. У зв'язку з цим, у лабораторії повинні бути впроваджені суворі правила поводження з акумуляторами: зарядка повинна проводитися лише під наглядом на негорючих поверхнях або у спеціальних захисних мішках, зберігання акумуляторів повинно здійснюватися у металевих ящиках при напрузі зберігання; пошкоджені або "дуті" акумулятори підлягають негайній утилізації. Лабораторія повинна бути оснащена первинними засобами пожежогасіння, зокрема вуглекислотними або порошковими вогнегасниками, а також ящиком з піском, який є ефективним засобом для локалізації загоряння літєвих елементів [30].

Психофізіологічні фактори також відіграють значну роль. Робота розробника характеризується високим рівнем нервово-емоційного напруження, пов'язаного з необхідністю обробки великих масивів інформації,

відповідальністю за збереження дороговартісного обладнання та вирішенням нестандартних завдань. Монотонність праці при написанні коду чергується зі стресовими ситуаціями при проведенні льотних випробувань. Для зниження впливу цих факторів необхідно правильно планувати робочий час, уникати авральних режимів роботи та створювати сприятливий психологічний клімат у колективі.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що забезпечення охорони праці при розробці системи локалізації безпілотних апаратів у роях вимагає комплексного підходу, який охоплює інженерно-технічні заходи щодо електро- та пожежобезпеки, санітарно-гігієнічне нормування параметрів середовища, ергономічну оптимізацію робочого місця та організаційні заходи щодо режиму праці. Дотримання цих вимог мінімізовує професійні ризики та підвищує продуктивність праці.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1. Оцінка дії електромагнітного поля, хвиль, імпульсу на засоби визначення локалізації. Розроблена система локалізації, що базується на технології надширококутної зв'язки UWB, функціонує в умовах складної електромагнітної обстановки, де на неї одночасно впливають власні електромагнітні поля бортового обладнання та зовнішні випромінювання природного або техногенного характеру. Електромагнітна сумісність у такій розподіленій радіосистемі є критично важливим параметром, що визначає здатність засобів локалізації функціонувати без погіршення метрологічних характеристик. Технологія UWB використовує сигнали з надзвичайно низькою спектральною густиною потужності, що робить її стійкою до вузькосмугових інтерференційних завад, проте залишає вразливою до потужних широкосмугових електромагнітних випромінювань. Джерелами таких дестабілізуючих полів можуть виступати високовольтні лінії електропередач, промислові електроустановки, радіолокаційні станції або потужне телекомунікаційне обладнання, що працює у суміжних частотних діапазонах. Дія зовнішнього

електромагнітного поля високої напруженості на вхідні кола приймача призводить до зниження співвідношення сигнал/шум, що спричиняє зростання кількості помилок при демодуляції пакетів даних, втрату частини навігаційної інформації та виникнення ефекту джиттера виміряної дистанції, що у підсумку знижує точність позиціонування.

Окрім зовнішнього радіочастотного впливу, значну проблему для навігаційної системи становлять власні низькочастотні магнітні поля дрона. Для визначення кута рискання у системі використовується магнітометр, який вимірює слабке геомагнітне поле Землі. Проте силові кабелі, що живлять потужні безколекторні двигуни, генерують змінні магнітні поля значної інтенсивності, яка пропорційна струму навантаження і може сягати десятків ампер. Ці поля накладаються на корисний сигнал магнітометра, викликаючи спотворення типу «м'якого» та «твердого» заліза, що без належного калібрування та електромагнітного екранування призводить до критичних похибок в оцінці орієнтації та можливої втрати керованості апаратом.

Окрему категорію небезпек становлять потужні електромагнітні імпульси, які можуть мати як природне походження, наприклад, внаслідок грозового розряду, так і техногенне, що виникають при комутаційних процесах у потужних мережах. Такий імпульс характеризується крутим фронтом наростання напруженості електричного поля, що згідно з законом електромагнітної індукції призводить до наведення високих електрорушійних сил у всіх провідниках системи. Друковані плати навігаційних модулів та довгі з'єднувальні шлейфи виступають у ролі антен, приймаючи енергію імпульсу. Оскільки сучасна мікроелементна база, зокрема мікроконтролер STM32 та MEMS-сенсори, розрахована на роботу з низькими логічними рівнями напруги, наведені імпульсні перенапруги можуть призвести до незворотних наслідків [20], таких як електричний пробій ізоляції затворів транзисторів, термічне руйнування вхідних каскадів або виникнення ефекту «заціпування» у КМОН-структурах. Для захисту від таких факторів застосовують комплексне екранування чутливих вузлів, використання витої пари для сигнальних ліній, встановлення спеціалізованих захисних діодів та гальванічну розв'язку інтерфейсів. Згідно з

Державними санітарними нормами і правилами при роботі з джерелами електромагнітних полів, рівень напруженості електричного поля на робочому місці не повинен перевищувати гранично допустимих значень, що вимагає проведення періодичного контролю електромагнітної обстановки в лабораторії.

4.2.2. Джерела виникнення шуму і вібрацій. Заходи і засоби захисту від шуму і вібрацій, гігієнічні та допустимі норми. Процес експлуатації безпілотних літальних апаратів мультироторного типу нерозривно пов'язаний з генеруванням інтенсивного акустичного шуму та механічних вібрацій, які є шкідливими виробничими факторами. Розуміння фізичної природи цих явищ та методів боротьби з ними є необхідним для забезпечення безпеки оператора та стабільної роботи прецизійного навігаційного обладнання.

Основним джерелом шуму у досліджуваній системі є аеродинамічні процеси, що виникають при обертанні повітряних гвинтів. Пропелери, рухаючись з високою лінійною швидкістю, розсікають повітряний потік, створюючи періодичні пульсації тиску та турбулентні вихори, що зриваються із законцівок лопатей. Спектр цього шуму має широкосмуговий характер з вираженими тональними складовими на частотах, кратних частоті обертання роторів. Додатковим джерелом є електромеханічний шум від роботи безколекторних двигунів, зумовлений магнітострикцією в статорі та роботою підшипників. Рівень звукового тиску поблизу працюючого дрона може перевищувати 85 дБА, що класифікується як джерело підвищеної небезпеки. Тривалий вплив такого шуму на оператора призводить до перевтоми центральної нервової системи, тимчасового зміщення порогу чутності, підвищення артеріального тиску та зниження концентрації уваги, що може стати причиною помилок у керуванні. Згідно з ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку», еквівалентний рівень звуку на робочих місцях для виконання операторської роботи не повинен перевищувати 80 дБА. Основним заходом захисту є дотримання безпечної дистанції від зони польотів, оскільки інтенсивність звуку зменшується обернено пропорційно квадрату відстані, а також використання індивідуальних засобів захисту органів слуху.

Механічні вібрації у безпілотних системах мають переважно інерційне походження. Головною причиною їх виникнення є залишковий дисбаланс рухомих частин силової установки — пропелерів та роторів електродвигунів. Навіть незначна нерівномірність розподілу маси відносно осі обертання при високих кутових швидкостях створює значні відцентрові сили, що викликають циклічні коливання рами апарата. Вплив вібрацій на систему локалізації є вкрай негативним, оскільки акселерометри та гіроскопи, що входять до складу інерціальної навігаційної системи, є мікроелектромеханічними системами, принцип дії яких базується на вимірюванні мікроскопічних зміщень інерційних мас. Зовнішні вібрації, що передаються на корпус датчика, сприймаються ним як корисний сигнал, створюючи значний шум у вимірюваннях, що призводить до помилкового визначення вектора гравітації, дрейфу оцінки горизонту та неможливості точного утримання висоти. Крім того, вібрації можуть спричинити втому матеріалів та механічне руйнування паяних з'єднань. Для мінімізації негативного впливу вібрацій застосовують ретельне динамічне балансування пропелерів та встановлюють польотний контролер на раму через спеціальні демпфери з еластичних матеріалів, жорсткість яких підбирається для забезпечення ефективної фільтрації високочастотних коливань.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення точності та надійності визначення взаємного положення безпілотних літальних апаратів у складі рою. Шляхом теоретичного обґрунтування та практичної реалізації створено програмно-апаратний комплекс системи відносної локалізації на основі технології надширококутового зв'язку UWB.

Проведено аналіз сучасних методів навігації мультиагентних робототехнічних систем. Встановлено, що традиційні супутникові системи не забезпечують необхідної точності та надійності при роботі всередині приміщень або в умовах щільної забудови. Обґрунтовано доцільність використання технології UWB, яка завдяки високій часовій роздільній здатності дозволяє виконувати вимірювання відстані з сантиметровою точністю та є стійкою до ефектів багатопроменевого поширення радіохвиль.

Розроблено математичні моделі руху безпілотного літального апарата та процесу вимірювання координат. Сформовано систему кінематичних та динамічних рівнянь, що описують поведінку квадрокоптера як твердого тіла. Це стало теоретичним підґрунтям для синтезу алгоритмів автоматичного керування та стабілізації польоту.

Спроектовано та реалізовано апаратну платформу модуля керування на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F411CEU6. Обрана архітектура, що інтегрує обчислювальне ядро Cortex-M4, інерціальні сенсори MPU6050, висотомір та модуль бездротового зв'язку LinkTrack, забезпечує необхідну обчислювальну потужність для роботи в реальному часі при дотриманні жорстких обмежень щодо маси та енергоспоживання.

Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS. Реалізована модульна архітектура забезпечує ефективне розпаралелювання задач навігації, стабілізації та комунікації. Впроваджено драйвери прямого доступу до пам'яті (DMA) для високошвидкісного обміну даними, що мінімізує затримки в контурі керування.

Імплементовано та досліджено алгоритм визначення координат методом нелінійної регресії NLR з використанням ітераційної схеми Ньютона-Гаусса. Результати імітаційного моделювання у середовищі MATLAB підтвердили, що запропонований алгоритм забезпечує середньоквадратичну похибку позиціонування не більше 0.15м в умовах наявності стохастичних шумів вимірювання. Доведено швидку збіжність алгоритму, що дозволяє використовувати його на вбудованих системах.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої системи та її здатність забезпечувати стабільне утримання строю та виконання спільних маневрів. Розроблений комплекс може бути рекомендований для використання у складі автономних систем моніторингу, пошуково-рятувальних операцій та інших задач, що вимагають точної координації групи дронів у просторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. 13th Edition. Pearson, 2016. 1045 p.
2. FreeRTOS Kernel Book. Real Time Engineers Ltd., 2023. URL: https://www.freertos.org/Documentation/RTOS_book.html (дата звернення: 12.12.2025).
3. IEEE Std 802.15.4z-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks – Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE, 2020.
4. Leschyshyn Y., Scherbak L., Nazarevych O., Gotovych V., Tymkiv P., Shymchuk G. Multicomponent Model of the Heart Rate Variability Change-point. IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2019. P. 110–113.
5. Leschyshyn Y., Semchyshyn O. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion. 9th International Conference - The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. 2007. P. 139–140.
6. LinkTrack High Precision Positioning System. Nooploop. URL: <https://www.nooploop.com/linktrack/> (дата звернення: 13.12.2025).
7. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Revision 3.4. InvenSense, 2013. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (дата звернення: 12.12.2025).
8. Nise N.S. Control Systems Engineering. 8th Edition. Hoboken: Wiley, 2020. 944 p.
9. Palamar A., Karpinski M., Palamar M., Osukhivska H., Mytnyk M. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022), Ternopil, Ukraine, November 22–24, 2022. Vol. 3309. P. 194–204.

10. Palamar A., Palamar M., Osukhivska H. Real-time Health Monitoring Computer System Based on Internet of Medical Things. CEUR Workshop Proceedings, 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22–24, 2023. Vol. 3628. P. 106–115.
11. STM32F411xC Datasheet. STMicroelectronics, 2017. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411ce.pdf> (дата звернення: 12.12.2025).
12. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005. 672 p.
13. Tymkiv P., Leshchyshyn Y. Algorithm Reliability of Kalman Filter Coefficients Determination for Low-Intensity Electroretinosignal. IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. P. 1–5.
14. Velychko D., Osukhivska H., Palaniza Y., Lutsyk N., Sobaszek L. Artificial Intelligence Based Emergency Identification Computer System. Advances in Science and Technology Research Journal. 2024. Vol. 18, no. 2. P. 296–304.
15. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258–267.
16. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України, 2018. 133 с.
17. Державні санітарні норми та правила «Медичні вимоги безпеки населення та захисту працівників від впливу шуму». Затверджено наказом МОЗ України від 22.02.2019 № 463.
18. Державні санітарні норми та правила “Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.” Затверджено наказом МОЗ України від 08.04.2014 № 248.

19. ДСТУ EN ISO 7730:2023 (EN ISO 7730:2005, IDT; ISO 7730:2005, IDT). Ергономіка теплого середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту.
20. ДСТУ EN 62368-1:2017. Обладнання аудіо-, відео- та інформаційно-комунікаційних технологій. Вимоги щодо безпеки. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
21. Закон України «Про охорону праці». Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668.
22. Квасніков В.П. Методи та засоби захисту інформації в безпілотних авіаційних комплексах: навч. посіб. Київ: НАУ, 2020. 210 с.
23. Кодекс цивільного захисту України. Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34-35. Ст. 458.
24. Ларіоник Р.В., Луцик Н.С., Паламар А.М. Система для моніторингу якості атмосферного повітря на базі IoT // Матеріали IX наук.-техн. конф. «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 116.
25. Лещишин Ю.З., Назаревич Т.О., Міська І.В. Створення вбудованих систем на базі структурно - параметричних моделей цифрових каналів зв'язку // VIII Наук.-техн. конф. «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль, 2020. С. 127.
26. Лещишин Ю.З., Романишин Н.Р., Наконечний В.В., Паламарчук А.О. Розробка системи зв'язку як інтегрованого елементу роботизованих систем // Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення: зб. тез доп. XXI Всеукр. наук.-практ. конф. Житомир, 2016. С. 102.
27. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія». Тернопіль: ТНТУ, 2024. 45 с.
28. Луцків А., Лупенко С., Пасічник В. Паралельні та розподільнені обчислення: навч. посіб. Львів: Магнолія 2006, 2024. 566 с.

29. Марків В.А., Осухівська Г.М., Лещишин Ю.З., Луцків А.М. Комп'ютерна система аутентифікації осіб // Матеріали XX наук. конф. ТНТУ ім. І. Пулюя. 2017. С. 90–91.
30. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Затверджено наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417.
31. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Затверджено наказом Мінсоцполітики України від 14.02.2018 № 207.
32. Онищенко В.С. Основи теорії систем керування літальними апаратами: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 350 с.
33. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів: навч. посіб. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 150 с.
34. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок. Київ: Форт, 2017. 617 с.
35. Якобчук Р.А., Лещишин Ю.З. Методи та засоби визначення відносної локалізації безпілотних апаратів. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції молодих учнів та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (11-12 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 376
36. Якобчук Р.А., Лещишин Ю.З. Метод відносної локалізації безпілотних апаратів у роях з використанням *uwb* технології. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (17-18 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 161

Додаток А
Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів**

11-12 грудня 2025 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

91.	Р.А. Якобчук, Ю.З. Лещинин МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ	376
92.	Б.В. Яріш ВІРТУАЛЬНА, ДОПОВНЕНА ТА ЗМІШАНА РЕАЛЬНІСТЬ. СУЧАСНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	378
93.	І.О. Ярмош ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ 5G НА РОЗВИТОК ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ІОТ)	379
94.	О.О. Ясіньський; Г.І. Липак ПРОБЛЕМА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОСТІ НАБОРІВ ДАНИХ У ТЕОРЕТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ СУЧАСНИХ КІБЕРЗАГРОЗ	381
95.	В.А. Яцишин, П.В. Налутка, О.В. Доберчак, І.О. Боднарчук СУЧАСНА АРХІТЕКТУРА СТРІМІНГОВИХ ПЛАТФОРМ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ	383
СЕКЦІЯ 6 <u>ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ</u>		
1.	В.А. Герасименко, В.С. Личенко, О.О. Бабич ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ АВТОМОБІЛЬНОГО ОСВІТЛЕННЯ	390
2.	В.А. Герасименко, В.В. Субота, В.І. Слюсарев ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ	392
3.	В.Б. Жук ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГІЯ ТА ВДОСКОНАЛЕНІ ГЕОТЕРМАЛЬНІ СИСТЕМИ(EGS)	393
4.	М.М. Зінь, Ю.Б. Підгайний ПАРАМЕТРИ ГЕОМЕТРИЧНО ПОДІБНИХ ГІДРОТУРБІН НИЗЬКОНАПІРНИХ МАЛИХ ГЕС	395
5.	Т.Л.Киянчук АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СВІТЛОДІОДНИХ СИСТЕМ	397
6.	В.П. Коваль, О. І. Похилій ВІТРОЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ БУДІВНИЦТВА НОВИХ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	399
7.	В.П. Коваль, А.З. Стасів, П.М. Зінь АКТУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	401
8.	О. С. Кондратюк, М. Г. Тарасенко, К. М. Козак ВПЛИВ НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ 0,4 КВ ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ	403
9.	Н.С. Лясковець, Я.М. Осадца ОСНОВНІ АСПЕКТИ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ	405
10.	А.І. Маліновський АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТОДІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ МІСТА В СУЧАСНИХ УМОВАХ	407

отримала дозвіл на людські випробування своїх імплантів, Synchron створює пристрої, що дають змогу людям із паралічем контролювати навколишнє середовище думками, а Paradromics розробила платформу Connexus, здатну ресетувати активність окремих нейронів. PrecisionNeuroscience має бездротовий імплант, схвалений FDA, а EmotivSystems випускає доступні гарнітури для ігор і взаємодії з комп'ютером.

Перспективи розвитку нейроінтерфейсів надзвичайно великі. У майбутньому вони можуть допомагати не лише у відновленні функцій мозку, а й у покращенні пам'яті, концентрації, швидкості навчання. Очікується, що поєднання нейротехнологій зі штучним інтелектом дозволить створити гібридну систему «мозок–AI», яка зможе обробляти інформацію швидше та точніше. Такі пристрої можуть стати частиною нашого повсякденного життя — від управління «розумним» будинком до використання у віртуальній реальності. Водночас розвиток BCI супроводжується етичними викликами: питаннями безпеки, приватності думок та контролю над даними мозкової активності. Саме тому важливо поєднувати технологічний прогрес із відповідальністю за його наслідки для людини.

Література

1. Review on brain-computer interface technologies in healthcare. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37974976/>
2. Evaluating the clinical benefit of brain-computer interfaces for control of a personal computer. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35325875/>
3. 2020 International brain-computer interface competition: A review. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/human-neuroscience/articles/10.3389/fnhum.2022.898300/full>
4. Brain machine interfaces: powerful tools for clinical treatment and rehabilitation. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6611552/>
5. A Comprehensive Survey of Brain-Computer Interface Technology. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12180781/>

УДК 681.51:629.735

Якобчук Р.А., здобувач вищої освіти

Лещишин Ю.З., канд. техн. наук, доц

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя)

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

Yakobchuk R.A., higher education applicant

Leshchyshyn Y.Z. PhD., Associate Prof.

METHODS AND MEANS OF RELATIVE LOCALIZATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Забезпечення автономного функціонування груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у складних умовах, таких як закриті приміщення або зони з перешкодами для супутникового сигналу, вимагає впровадження високоточних систем взаємного позиціонування. Побудова надійної навігаційної структури, незалежної від глобальних систем GNSS, реалізується на базі технології надширококутного зв'язку (UWB). Вибір цієї технології зумовлений її здатністю забезпечувати сантиметрову точність

вимірювання дистанції та високу стійкість до ефекту багатопроменевого поширення радіосигналу, що є критичним для стабільної роботи БПЛА в умовах щільної забудови [1].

Визначення відстані між окремими БПЛА здійснюється за алгоритмом двостороннього вимірювання дальності Two-Way Ranging. Застосування модифікації Double-Sided TWR, що передбачає обмін трьома послідовними повідомленнями, дозволяє компенсувати похибки, викликані дрейфом тактових частот мікроконтролерів, та усуває необхідність у складній дротовій синхронізації часу між рухомими об'єктами [2].

Розрахунок відносних координат БПЛА у просторі виконується методом трилатерації на основі отриманих даних про відстань. Для підвищення точності позиціонування та мінімізації впливу стохастичних шумів вимірювання у систему інтегрується алгоритм оптимальної фільтрації. Використання Розширеного фільтра Калмана забезпечує комплексування низькочастотних даних UWB-дальномірії з високочастотними показниками бортової інерціальної системи, що дозволяє отримати плавну оцінку траєкторії руху БПЛА та зберегти стабільність керування навіть при короткочасних втратах зв'язку [3].

Організація інформаційної взаємодії в групі БПЛА та передача телеметричних даних на наземну станцію реалізується з використанням протоколу прикладного рівня MQTT. Архітектура "видавець-підписник" забезпечує асинхронний обмін даними та дозволяє динамічно масштабувати систему шляхом додавання нових БПЛА без зміни логіки роботи мережі [4].

Програмно-апаратна реалізація системи передбачає використання мікроконтролерів сімейства STM32 для первинної обробки навігаційних даних та формування керуючих впливів у реальному часі [5].

Реалізація запропонованих методів та засобів дозволяє створити енергоефективну навігаційну систему, здатну забезпечити сантиметрову точність позиціонування до 10–15 см в умовах повної відсутності сигналів GNSS. Практичне впровадження розробленого апаратно-програмного комплексу підвищує рівень автономності та безпеки функціонування груп БПЛА при виконанні спільних місій у складних середовищах. Окремого дослідження потребують питання оптимізації протоколів часового поділу доступу до радіоканалу для запобігання колізіям даних при масштабуванні рою до значної кількості агентів.

Література

1. Al-Kaff A. A Survey of UWB-Based Localization Systems for UAVs in GNSS-Denied Environments / A. Al-Kaff, F. García, D. Martín // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 76948–76964.
2. Decawave Ltd. DW1000 User Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.decawave.com> (дата звернення: 20.11.2025).
3. Guo K. Ultra-wideband and odometry-based cooperative relative localization with application to multi-UAV formation control / K. Guo, X. Li, L. Xie // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2019. – Vol. 50, No. 6. – P. 2590–2603.
4. Ribeiro M. An MQTT-Based Platform for UAV Control and Data Acquisition in DoS Attack Scenarios / M. Ribeiro et al. // Drones. – 2022. – Vol. 6, No. 9. – P. 256.
5. Cai G. Design of STM32-based quadrotor UAV control system / G. Cai, J. M. Dias, L. Seneviratne // Proc. of 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. – Takamatsu, Japan, 2017. – P. 1492–1497.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



17-18 грудня 2025 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2025**

В. Шипка АПАРАТНО-АДАПТИВНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ОНЛАЙН-НАВЧАННЯ НА ПРИСТРОЯХ TINYML	
V. Shypka HARDWARE-ADAPTIVE APPROACH TO OPTIMIZATION OF ONLINE LEARNING ON TINYML DEVICES	157
Г. Липак, О. Ющенко ІНТЕГРАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РІШЕНЬ В ЕКОСИСТЕМУ WORDPRESS ДЛЯ E-COMMERCE ПЛАТФОРМ	
Н. Лупак, О. Yushchenko INTEGRATION OF INTELLIGENT SOLUTIONS INTO THE WORDPRESS ECOSYSTEM	158
Г. Липак, О. Ющенко ПІДВИЩЕННЯ КОНВЕРСІЇ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНУ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ СЕРВІСІВ ТА AI-АСИСТЕНТІВ	
Н. Лупак, О. Yushchenko INCREASING ONLINE STORE CONVERSION THROUGH THE IMPLEMENTATION OF INTERACTIVE SERVICE AND AI ASSISTANTS	159
Р. Якобчук, Ю. Лещишин МЕТОД ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ У РОЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ UWB ТЕХНОЛОГІЇ	
R. Yakobchuk, Y. Leshchyshyn METHOD OF RELATIVE LOCALIZATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN SWARMS USING UWB TECHNOLOGY	160
СЕКЦІЯ 4. ПРОГРАМНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ	
В. Барабаш, М. Петрик ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ОРЕНДИ ВЕЛОСИПЕДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ .NET ТА ANGULAR	
V. Barabash, M. Petryk DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR BICYCLE RENTAL USING .NET AND ANGULAR	162
М. Бесашук, В. Бревус АРХІТЕКТУРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ВЕБ-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БІБЛІОТЕЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ	
M. Besashchuk, V. Brevus ARCHITECTURAL DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WEB PLATFORM FOR LIBRARY PROCESSES MANAGEMENT BASED ON OPEN SOFTWARE SOLUTIONS	163
Р. Гануля, Н. Кресінський, І. Козбур, Ю. Тимошенко АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІЙ КОРИСТУВАЧА ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРА	
R. Hanulia, N. Kresinskiy, I. Kozbur, Y. Tymoshenko ANALYSIS OF MODERN TOOLS FOR AUTOMATION OF PC USER ACTIONS	165
І. Гарбар, К. Духновська АДАПТИВНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ ТА ПЕРЕКЛАДУ	
I. Harbar, K. Dukhnovska ADAPTIVE SPEECH RECOGNITION AND TRANSLATION SYSTEM	166
О. Глух, І. Мудрик	167

УДК 681.5

Р. Якобчук; Ю. Лещишин, к. т. н.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

МЕТОД ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ У РОЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ UWB ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 681.5

R. Yakobchuk; Y. Leshchynshyn, PhD.

METHOD OF RELATIVE LOCALIZATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN SWARMS USING UWB TECHNOLOGY

Забезпечення стійкої навігації мультиагентних робототехнічних систем в умовах відсутності супутникового сигналу GNSS є критичним завданням для виконання автономних місій у приміщеннях та зонах щільної забудови [1]. Традиційні методи, що базуються на комп'ютерному зорі або вимірюванні рівня сигналу, часто не забезпечують необхідної точності та швидкодії [2]. У роботі розроблено метод відносної локалізації агентів рою з використанням технології надширокопasmового зв'язку UWB, яка дозволяє вимірювати дистанцію з сантиметровою точністю та високою стійкістю до багатопроменевого поширення радіохвиль [3].

Оснoву методу складає алгоритм ітераційної лінеаризації Ньютона-Гауса, який розв'язує задачу мултилатерації шляхом мінімізації сумарної квадратичної похибки нев'язок між виміряними та розрахунковими відстанями. Математична модель враховує стохастичну природу вимірювань UWB, моделюючи їх як суму істинної відстані та адитивного білого шуму. Для підвищення точності в динаміці застосовано комплексування даних далекоміра з показаннями інерціальних датчиків через фільтр Калмана, що дозволяє згладити траєкторію та отримати оцінку швидкості.

Ефективність запропонованого методу перевірено шляхом імітаційного моделювання руху безпілотної апарата по коловій траєкторії з параметрами шумів, наближеними до реальних сенсорів. Результати моделювання наведено на рисунку 1.

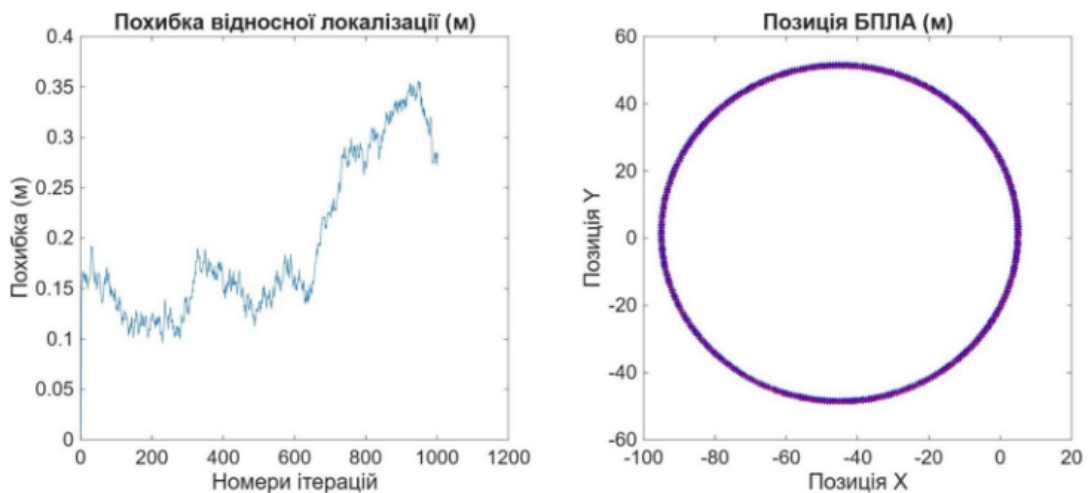


Рисунок 1. Результати моделювання роботи алгоритму оцінки позиції

Графік ліворуч ілюструє динаміку абсолютної похибки оцінювання координат. Помилка має стохастичний характер і змінюється в межах 0,10–0,35 м, що є допустимим для задач групового керування та утримання безпечної дистанції в строю. Графік праворуч відображає роботу алгоритму у просторі, де синя лінія оціненої траєкторії з високою точністю відтворює еталонну колову траєкторію, позначену червоним пунктиром.

Результати підтверджують, що розроблений метод забезпечує стабільну локалізацію з похибкою, яка не перевищує геометричних габаритів типового дрона, що дозволяє використовувати його для реалізації алгоритмів автономного польоту рою.

Література

1. Zhang S., Wang E., Wang Y., et al. A Low-Cost UAV Swarm Relative Positioning Architecture Based on BDS/Barometer/UWB. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, no. 23. P. 39659–39668. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10716450>.
2. Czaja B., Maślanka K., Skokowski P., Kelner J. Overview of Mutual Localization Techniques Between Unmanned Aerial Vehicles in Swarm. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2025. Vol. 19, no. 1. P. 317–324. URL: https://www.transnav.eu/Article_Overview_of_Mutual_Localization_Czaja,73,1507.html.
3. Zhao P., Zhang H., Liu G., et al. A UWB-AOA/IMU Integrated Navigation System for 6-DoF Indoor UAV Localization. *Drones*. 2025. Vol. 9, iss. 8. 546. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/8/546>.

Додаток Б

Лістинг програми

```

#include "main.h"
#include "cmsis_os.h"
#include "math.h"
#include <string.h>
#include "Eigen/Dense"

using namespace Eigen;

#define MAX_ANCHORS 8
#define DMA_BUFFER_SIZE 128

struct AnchorNode {
    uint8_t id;
    float distance;
};

struct UWB_System_State {
    uint8_t role;
    uint8_t my_id;
    uint8_t active_anchors_count;
    AnchorNode nodes[MAX_ANCHORS];
} uwb_state;

uint8_t CalculateChecksum(const uint8_t *data, size_t length) {
    uint8_t sum = 0;
    for (size_t i = 0; i < length - 1; ++i) {
        sum += data[i];
    }
    return sum;
}

bool LinkTrack_ParsePackage(const uint8_t *data, size_t length) {
    if (length < 10 || data[0] != 0x55 || data[1] != 0x02) {
        return false;
    }

    if (CalculateChecksum(data, length) != data[length - 1]) {
        return false;
    }

    uwb_state.role = data[2];
    uwb_state.my_id = data[3];

    int node_count = (length - 6) / 5;
    uwb_state.active_anchors_count = 0;

    for (int i = 0; i < node_count && i < MAX_ANCHORS; ++i) {
        const uint8_t *p = data + 4 + i * 5;

        uint8_t anchor_id = p[0];

```

```

uint32_t raw_dist = (uint32_t)p[1] |
                    ((uint32_t)p[2] << 8) |
                    ((uint32_t)p[3] << 16);

float distance_m = raw_dist / 1000.0f;

if(distance_m > 0.1f && distance_m < 100.0f) {
    uwb_state.nodes[uwb_state.active_anchors_count].id =
anchor_id;

    uwb_state.nodes[uwb_state.active_anchors_count].distance =
distance_m;
    uwb_state.active_anchors_count++;
}
}

return true;
}

class NLREstimator {
private:
    Vector3f current_estimate;
    const int MAX_ITERATIONS = 5;
    const float CONVERGENCE_EPSILON = 0.05f;
    const float LAMBDA_STEP = 0.8f;

public:
    NLREstimator() { current_estimate.setZero(); }

    Vector3f UpdatePosition(const float* ranges, const Vector3f*
anchors, int num_anchors) {
        Vector3f position = current_estimate;

        for(int k = 0; k < MAX_ITERATIONS; k++) {
            Matrix3f H;
            H.setZero();
            Vector3f b;
            b.setZero();

            for(int i = 0; i < num_anchors; i++) {
                if(ranges[i] <= 0.0f) continue;

                Vector3f diff = position - anchors[i];
                float predicted_range = diff.norm();
                float residual = ranges[i] - predicted_range;

                if(predicted_range > 1e-3f) {
                    Vector3f J = diff / predicted_range;

                    H += J * J.transpose();
                    b += J * residual;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        H += Matrix3f::Identity() * 0.01f;

        Vector3f delta = H.ldlt().solve(b);

        position += delta * LAMBDA_STEP;

        if(delta.norm() < CONVERGENCE_EPSILON) break;
    }

    current_estimate = position;
    return position;
}
};

class PID_Controller {
private:
    float kp, ki, kd;
    float integral;
    float prev_measurement;
    float max_out, max_i;

public:
    PID_Controller(float _kp, float _ki, float _kd, float _max_out,
float _max_i)
        : kp(_kp), ki(_ki), kd(_kd), max_out(_max_out),
max_i(_max_i) {
        Reset();
    }

    void Reset() {
        integral = 0.0f;
        prev_measurement = 0.0f;
    }

    float Update(float setpoint, float measurement, float dt) {
        float error = setpoint - measurement;

        float P = kp * error;

        integral += error * dt;
        if (integral > max_i) integral = max_i;
        else if (integral < -max_i) integral = -max_i;
        float I = ki * integral;

        float derivative = (measurement - prev_measurement) / dt;
        float D = -kd * derivative;
        prev_measurement = measurement;

        float output = P + I + D;
        if (output > max_out) output = max_out;
        else if (output < -max_out) output = -max_out;

        return output;
    }
}

```

```

};

NLREstimator locator;
PID_Controller pid_pos_x(1.5f, 0.1f, 0.5f, 20.0f, 5.0f);
PID_Controller pid_pos_y(1.5f, 0.1f, 0.5f, 20.0f, 5.0f);

const Vector3f anchors_cfg[4] = {
    {0.0f, 0.0f, 2.5f},
    {5.0f, 0.0f, 2.5f},
    {5.0f, 5.0f, 2.5f},
    {0.0f, 5.0f, 2.5f}
};

void StartNavigationTask(void const * argument) {
    uint32_t last_wake_time = osKernelSysTick();
    const uint32_t task_period_ms = 20;

    float range_buffer[MAX_ANCHORS];

    for(;;) {
        for(int i=0; i<4; i++) range_buffer[i] = 0.0f;

        for(int i=0; i<uwb_state.active_anchors_count; i++) {
            int idx = uwb_state.nodes[i].id % 4;
            range_buffer[idx] = uwb_state.nodes[i].distance;
        }

        Vector3f pos = locator.UpdatePosition(range_buffer,
anchors_cfg, 4);

        Global_Drone_State.x = pos.x();
        Global_Drone_State.y = pos.y();
        Global_Drone_State.z = pos.z();

        osDelayUntil(&last_wake_time, task_period_ms);
    }
}

void StartStabilizationTask(void const * argument) {
    uint32_t last_wake_time = osKernelSysTick();
    const float dt = 0.0025f;

    for(;;) {
        float target_x = Global_Mission.target_x;
        float target_y = Global_Mission.target_y;

        float target_pitch = pid_pos_x.Update(target_x,
Global_Drone_State.x, dt);
        float target_roll = pid_pos_y.Update(target_y,
Global_Drone_State.y, dt);

        osDelayUntil(&last_wake_time, 3);
    }
}

```