

В. О. ТИМОФЕЄВ, А. І. РОГОВИЙ

СЕНСОРНІ МОДАЛЬНОСТІ ДЛЯ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ КООПЕРАТИВНИХ РОЇВ БПЛА В СЕРЕДОВИЩАХ БЕЗ GNSS

Розгортання кооперативних роїв безпілотних літальних апаратів у середовищах без доступу до глобальної навігаційної супутникової системи є однією з ключових проблем сучасних автономних багатоагентних систем. В таких умовах відносна локалізація між агентами має забезпечувати достатню точність і узгодженість за наявності суворих обмежень щодо габаритів, ваги та енергоспоживання, характерних для мікроапаратів. У статті проведено систематичний огляд сенсорних модальностей, що застосовуються для відносної локалізації кооперативних роїв у середовищах без супутникової навігації, з акцентом на їх обчислювальні властивості, спостережуваність та стійкість до впливу факторів навколишнього середовища. У роботі проаналізовано та класифіковано три основні класи сенсорних модальностей: радіочастотні методи визначення відстані на основі надширокопasmового зв'язку, пасивні візуальні методи, включно з візуально-інерційною одометрією та підходами на основі глибокого навчання, а також системи активних оптичних маркерів. Показано, що радіочастотні методи забезпечують низьке обчислювальне навантаження, проте мають фундаментальні обмеження спостережуваності через відсутність кутової інформації. Пасивні візуальні підходи здатні забезпечувати високу точність і глобальну узгодженість, однак вимагають значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх практичне застосування на платформах з жорсткими апаратними обмеженнями. Критичний аналіз свідчить, що системи активних оптичних маркерів у поєднанні з розподіленими методами оптимізації графів стану є практично доцільним компромісом між точністю, обчислювальною ефективністю та стійкістю до деградованих умов. Особливу увагу приділено архітектурам розподіленого оцінювання, які забезпечують масштабованість та узгодженість без централізованої обробки. У висновках окреслено напрями подальших досліджень, спрямованих на створення гібридних фреймворків, здатних динамічно перемикатися між режимами повної оцінки відносної пози та відстеження лише за напрямком у складних середовищах.

Ключові слова: багатоагентні системи, відносна локалізація, комп'ютерний зір, візуально-інерційна одометрія, кооперативний SLAM, розподілена оптимізація, факторні графи, сенсорне злиття, активні оптичні маркери, середовища без GNSS, автономні БПЛА, обмеження SWaP.

V. TYMOFIEIEV, A. ROGOVYI

SENSOR MODALITIES FOR RELATIVE LOCALIZATION OF COOPERATIVE UAV SWARMS IN GNSS-DENIED ENVIRONMENTS

The deployment of cooperative swarms of unmanned aerial vehicles in environments without access to global satellite navigation systems represents one of the key challenges in modern autonomous multi-agent systems. Under such conditions, relative localization among agents must provide sufficient accuracy and consistency while operating under strict constraints on size, weight, and power consumption, which are characteristic of mass-produced micro-scale platforms. This paper presents a systematic review of sensor modalities used for relative localization of cooperative swarms in navigation-denied environments, with a particular focus on their computational properties, observability, and robustness to environmental factors. The study analyzes and classifies three principal classes of sensor modalities: radio-frequency distance measurement based on ultra-wideband communication, passive visual methods including visual-inertial odometry and deep learning-based approaches, and systems employing active optical markers. The analysis demonstrates that radio-frequency ranging methods offer low computational cost but suffer from fundamental observability limitations due to the lack of angular information. Passive visual approaches are capable of achieving high accuracy and global consistency; however, they require substantial computational resources, which restricts their practical applicability on platforms with severe hardware constraints. A critical evaluation indicates that active optical marker systems, when combined with distributed state graph optimization methods, constitute a practically viable compromise between localization accuracy, computational efficiency, and robustness under degraded environmental conditions. Particular attention is given to distributed estimation architectures that enable scalability and consistency without centralized processing. The paper concludes by outlining directions for future research aimed at developing hybrid frameworks capable of dynamically switching between full relative pose estimation and direction-only tracking in challenging operational environments.

Keywords: multi-agent systems, relative localization, computer vision, visual-inertial odometry, cooperative simultaneous localization and mapping, distributed optimization, factor graphs, sensor fusion, active optical markers, GNSS-denied environments, autonomous unmanned aerial vehicles, SWaP constraints.

1 Вступ. Операційна здатність роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в складних середовищах без доступу до глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) — таких як підземні тунелі або щільні міські каньйони — фундаментально залежить від здатності агентів локалізувати себе відносно один одного. Хоча навігація одного агента досягла значної зрілості завдяки візуально-інерційній одометрії, розширення цих пайплайнів на кооперативні рої зазвичай вимагає додаткових сенсорів, зв'язку між агентами та системної багатоагентної оптимізації. Ці вимоги перевищують обмеження щодо габаритів, ваги та енергоспоживання (SWaP - Size, Weight and Power) легких платформ мікро-БПЛА. Масові мікро-БПЛА часто мають обмежену бортову обчислювальну потужність (наприклад, мікроконтролери STM32) і не

можуть підтримувати великі обчислювальні навантаження, необхідні для традиційних централізованих архітектур SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

1.1 Поляризація сенсорних модальностей. Сучасні дослідження демонструють чітку поляризацію підходів до сенсорних модальностей, під якими розуміється тип фізичної величини та механізм її вимірювання, за допомогою яких агент отримує інформацію про навколишнє середовище або інших агентів (наприклад, радіочастотні сигнали, світло або інерційні дані). Вибір сенсорної модальності безпосередньо визначає характер доступних вимірювань, їхню спостережуваність, обчислювальну складність обробки та стійкість до зовнішніх впливів.

© В. О. Тимофеев, А. І. Роговий, 2025

З одного боку, радіочастотні (RF) модальності, зокрема надширококутовий зв'язок (UWB), забезпечують виняткову обчислювальну ефективність завдяки простоті обробки дальномірних вимірювань. Проте, як показано в роботах [1, 2], вимірювання лише відстані є теоретично неспостережуваними щодо повної відносної пози, що змушує агентів виконувати постійні енергонеефективні маневри збудження для усунення геометричних неоднозначностей. Додатковим обмеженням є те, що активні RF-випромінювання можуть порушувати вимоги електромагнітної тиші в чутливих або обмежених середовищах.

З іншого боку, пасивні візуальні модальності, які базуються на обробці зображень та ознаках глибокого навчання, наприклад у системах на кшталт SuperVINS [3], здатні забезпечувати високу надійність і робастність у складних умовах освітлення. Водночас ці підходи характеризуються високими обчислювальними вимогами, формуючи так звану «високу обчислювальну стелю»: для роботи в реальному часі вони часто потребують графічних процесорів настільного рівня, що робить їх непридатними для легких повітряних платформ із жорсткими обмеженнями SWaP.

1.2 Обґрунтування дослідницького питання.

Кооперативна відносна локалізація фундаментально залежить від типу вимірювань сенсорів, доступних між агентами. Різні сенсорні модальності – зір, Ultra-Wideband (UWB), активні маркери та їх гібридні комбінації – надають принципово різну інформацію про відносний стан агентів. Як продемонстрували автори [4], існують чіткі компроміси між UWB, який забезпечує точність вимірювання дальності, але не має пеленгових даних, та візуальними методами, які надають кутові або позиційні дані, але на які впливає навколишнє середовище (освітлення, візуальні перешкоди).

Сенсорна модальність визначає спостережуваність системи, тобто які компоненти відносного стану можуть бути відновлені одночасно. Таке обмеження проаналізовано в роботі [5], де авторами показано необхідні умови оцінки стану у кооперативних системах. Крім того, модальність визначає робастність алгоритмів до зовнішніх впливів, таких як зміна освітлення, зашумленість радіоканалу або вплив радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Мета статті – дослідити компроміси між різними сенсорними модальностями (візуальні методи, UWB, активні оптичні маркери) з точки зору точності локалізації, обчислювального навантаження та стійкості до факторів навколишнього середовища, зокрема змін освітлення та умов радіоелектронної боротьби.

2. Методологія огляду. В цьому огляді застосовано систематичну стратегію відбору, яка спрямована на виявлення архітектур відносної локалізації, придатних для масових мікро-БПЛА з

обмеженими ресурсами (габарити, вага, енергоспоживання – SWaP). На відміну від загальних оглядів SLAM, які часто ставлять пріоритетом максимальну точність незалежно від обчислювальної вартості, цей огляд фільтрує літературу за чотирма строгими критеріями доцільності:

- Децентралізація – не вимагає наземної станції управління або центрального сервера.

- Бортові обчислення – спеціально орієнтовані на класи мікроконтролерів (наприклад, STM32) або процесорів з низьким енергоспоживанням, а не на GPU настільного класу.

- Незалежність від GNSS – забезпечує роботу в заглушених, закритих або підземних середовищах.

- Відсутність важких сенсорів – зокрема LiDAR, непридатних для мікро-БПЛА.

Пошук літератури надавав пріоритет методам, здатним до «тихої» координації та стійкості до шуму навколишнього середовища. У цьому контексті активні оптичні маркери (зокрема системи на основі УФ/світлодіодів) мали пріоритет над пасивними візуальними методами. Цей вибір не є довільним, а безпосередньо впливає з аналізу компромісів, представленого в розділі 3.

Зокрема, у роботі [3] показано, що візуально-інерційна одометрія (VIO) – метод локалізації, який поєднує дані камери та інерційного вимірювального блока (IMU) для оцінювання власного руху БПЛА – у варіантах на основі глибокого навчання потребує значного GPU-прискорення (наприклад, NVIDIA RTX 2060) для роботи в реальному часі. Такі вимоги суперечать обмеженням SWaP, характерним для платформ мікро-БПЛА.

Водночас радіочастотна далекометрія на основі UWB, попри низьку обчислювальну складність і придатність для вбудованих систем, має фундаментальне обмеження: як математично доведено в роботах [1] та [2], вимірювання лише дальності не забезпечують повної спостережуваності відносного стану, що унеможливує однозначне визначення взаємного положення агентів без додаткових маневрів або допоміжних сенсорних модальностей.

3. Таксономія підходів до кооперативної локалізації. Кооперативна відносна локалізація для роїв БПЛА в середовищах без GNSS охоплює гетерогенний простір проектних рішень, що визначається поєднанням сенсорних модальностей, архітектур злиття даних та механізмів масштабованості. Існуючі роботи варіюються від ультралегких методів локалізації «тільки за дальністю», реалізованих на мікроконтролерах, до складних візуально-інерційних пайплайнів з використанням глибокого навчання та GPU-прискорення.

Уздовж осі сенсорної модальності розрізняємо такі категорії:

- (i) **Активні оптичні маркери.** До них відносяться сузір'я УФ-світлодіодів, що використовуються в системах типу UVDAR для взаємної локалізації, видимі/ІЧ світлодіодні цілі для позиціонування на

великих відстанях у стилі PnP, а також варіанти маркерів на основі подій.

(ii) Пасивні візуальні методи. Містять класичні підходи VIO на основі ознак, а також сучасні пайплайни, що інтегрують методи глибокого навчання для підвищення робастності сприйняття, зокрема такі системи, як SuperVINS.

(iii) Радіочастотна далекометрія. Ґрунтується переважно на вимірюванні відстані за допомогою надширокосмугового зв'язку (UWB) та включає гібридні конфігурації з VIO.

(iv) Гібридні сенсорні модальності. Передбачають комбінування активних маркерів, візуальних сенсорів та RF вимірювань для покращення спостережуваності та надійності локалізації в складних умовах.

Ця вісь відображає, як різні варіанти сенсорів знаходять компроміс між спостережуваністю, стійкістю до освітлення та перешкод, а також обмеженнями до апаратного забезпечення в умовах SWaP мікро-БПЛА. Рисунок 1 підсумовує таксономію.

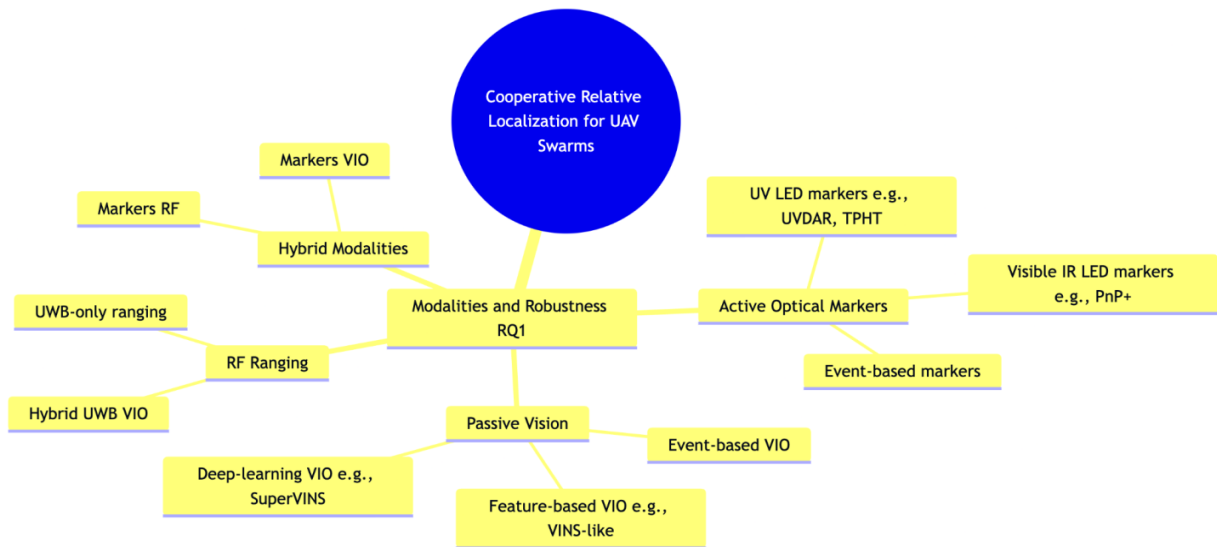


Рис. 1. Таксономія сенсорних модальностей та методів злиття дани у підходів до кооперативної локалізації кількох БПЛА

4. Сенсорні модальності для відносної локалізації

Щоб досягти децентралізованої координації в середовищах без GNSS, повітряні рої повинні покладатися на бортові екстероцептивні сенсори для оцінки відносних станів сусідніх агентів. Сучасні дослідження класифікують ці модальності на три різні класи: радіочастотна (RF) далекометрія, пасивні візуальні ознаки та активні оптичні маркери. Далі розглянемо компроміси цих модальностей щодо точності, обчислювального навантаження та стійкості в несприятливих умовах.

4.1. Радіочастотна далекометрія (UWB)

В теперішній час сенсори надширокосмугового зв'язку (UWB) стали стандартом для відносної локалізації в легкій робототехніці завдяки своїй здатності всеспрямованого зондування та малій вазі. Бортова система визначення дальності, яка представлена в [1], демонструє, що шляхом обміну пакетами агенти можуть оцінювати відстані один між одним за допомогою вимірювань часу прольоту (ToF).

Переваги. Системи UWB є обчислювально легкими і можуть функціонувати в повній темряві або при візуальних перешкодах (дим/туман), коли камери не справляються. Протокол, представлений в роботі [1], демонструє масштабованість для роїв до 13 агентів, які використовують мікроконтролери STM32 з частотою зв'язку 16 Гц.

Обмеження. Основним обмеженням UWB є те, що вона надає можливість вимірювати лише дальність. Аналіз спостережуваності, який представлено в роботі [2], підтверджує, що без інформації про пеленг (кут) відносний стан агентів є неспостережуваним, якщо вони не виконують специфічних маневрів для усунення обмеження неоднозначності своїх позицій. Теоретичний аналіз підтверджує, що оцінка тільки за дальністю страждає від неспостережуваних підпросторів, що вимагають від агентів постійного руху для підтримки локалізації, а це, в свою чергу, обмежує зависання або приховані статичні формації. Крім того, системи на основі RF порушують вимоги електромагнітної тиші, що робить їх вразливими до виявлення та глушіння засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ).

4.2. Пасивні візуальні ознаки та глибоке навчання

Пасивні візуальні підходи покладаються на стандартні камери для відстеження природних ознак навколишнього середовища (кути, краї) або дескрипторів ознак глибокого навчання. Такі методи, наприклад VINS-Fusion або ORB-SLAM, є фундаментальними для оцінки власного руху одного агента [6].

Переваги. Фреймворк SuperVINS, запропонований в роботі [3], демонструє чудову стійкість у середовищах без текстури або з низьким

освітленням завдяки вилученню високорівневих семантичних ознак, а не простих геометричних точок. Такі методи можуть досягати високої точності в замиканні циклів та глобальній узгодженості.

Обмеження. Візуальні підходи характеризуються значним обчислювальним навантаженням. Сучасні методи на основі глибокого навчання потребують виконання інференсу, тобто обчислення вихідних ознак або оцінок стану нейронною мережею для кожного вхідного зображення в режимі реального часу. Це часто вимагає використання потужних GPU (наприклад, NVIDIA RTX), що суперечить обмеженням SWaP малих БПЛА. Крім того, пасивний зір швидко деградує за умов змінного освітлення, низького контрасту або повторюваних візуальних структур [3].

4.3. Активні оптичні маркери (LEDs)

Системи активних маркерів використовують сузір'я світлодіодів (LED), які часто працюють в ультрафіолетовому (УФ) або інфрачервоному (ІЧ) спектрі, для забезпечення висококонтрастних візуальних реперних точок [7].

Переваги:

Надійність. Система UVDAR, представлена в [8], використовує смугові фільтри (наприклад, пропускання УФ). Такі системи можуть ефективно «вимикати» сонце та фоновий шум, забезпечуючи надійне виявлення навіть під прямими сонячними променями або у візуально шумних середовищах [7].

Спостережуваність. На відміну від UWB, оптичні маркери надають вимірювання тільки пеленгу (азимут/елевація). У поєднанні з відомою геометрією маркерів (PnP), вони дають повні 6-DoF відносні оцінки положення [9]. Навіть у режимах «тільки

пеленг», де відстань є неоднозначною, управління трикутною формацією залишається теоретично та практично вирішуваним питанням [10].

Ефективність ідентифікації. Для розрізнення агентів застосовується Перетворення Хафа часу-позиції (Time-Position Hough Transform, TPHT) — метод, що аналізує зміни положення світлових плям у часі для виявлення заданих патернів миготіння світлодіодів. Це дозволяє надійно ідентифікувати кожен БПЛА за його унікальним часовим кодом з мінімальними обчислювальними витратами та без використання радіозв'язку [11].

Обмеження:

Залежність від прямої видимості. На відміну від радіочастотних систем, активні маркери суворо вимагають прямої візуальної видимості; відстеження переривається, якщо ціль перекрита перешкодами або якщо сузір'я маркерів відвертається від камери.

Обмежена дальність. Ефективна дальність виявлення є помірною (близько 15 м для стандартної оптики), що значно менше, ніж дальність понад 100 м, яка досягається системами UWB.

Геометрична крихкість. Повна оцінка пози 6-DoF покладається на видимість повного сузір'я маркерів; часткова оклюзія змушує систему переходити в режим «тільки за пеленгом», який часто є крихким і вимагає специфічної геометрії формації для усунення неоднозначностей масштабу.

4.4. Кількісне порівняння модальностей

В таблиці 1 представлено синтез характеристик систем локалізації. Наведені дані підкреслюють конкретні компроміси між спостережуваністю, обчислювальною вагою та стійкістю до впливу чинників навколишнього середовища.

Таблиця 1 – Кількісне порівняння модальностей відносної локалізації

Характеристика	UWB	Пасивний зір (DL)	Активні маркери
Тип вимірювання	Дальність (1D)	Пеленг (2D) + Структура	Пеленг (2D) + ID
Спостережуваність	Слабка/Умовна	Висока	Висока
Макс. дальність	>100 м	Змінна	~15 м
Частота оновлення	16–100 Гц	10–30 Гц	>70 Гц
Клас обчислень	MCU (STM32)	GPU (RTX)	MCU/CPU
Точність	0.13–0.22 м	0.15–0.20 м	<0.05 м

Таблиця 2 підсумовує можливості наведених модальностей щодо ключових обмежень дослідження. Показник «Середовище» відображає інтегральну стійкість сенсорної модальності до деградацій навколишніх умов, таких як зміни освітлення,

перешкоди, зашумлення сигналу та зовнішні завади. Значення «високе» означає збереження працездатності у широкому діапазоні умов, тоді як «низьке» вказує на суттєве зниження ефективності за несприятливих впливів.

Таблиця 2 – Можливості модальностей щодо обмежень дослідження

Модальність	Тип	SWaP	Стійкість до РЕБ	Середовище
RF (UWB)	Дальність	Дуже низьке	Погана	Висока
Пасивний зір	Пеленг	Високе	Висока	Низька
Активні маркери	Пеленг+ID	Низьке	Висока	Висока

5. Архітектури оцінювання. Для перетворення сирих сенсорних вимірювань на глобально узгоджені відносні оцінки положення, сучасні системи кооперативної локалізації використовують ієрархічні

архітектури оцінювання. Зазвичай, типова архітектура складається з трьох шарів: локального шару візуально-інерційної одометрії (VIO) для забезпечення індивідуальної стабільності кожного агента,

геометричного шару відносних спостережень (PnP) для оцінювання відносних позицій між агентами, та розподіленого бекенду оцінювання, призначеного для злиття цих оцінок у всьому рої.

Основа VIO. Перш ніж дрон зможе оцінити положення сусіднього агента, він повинен спочатку надійно оцінити свій власний рух. Як детально узагальнено в огляді [6], візуально-інерційна одометрія (VIO) служить фундаментом для локалізації, поєднуючи високочастотні дані IMU з треками візуальних ознак для забезпечення плавної та короткостроково стабільної локальної системи відліку.

Розподілена оптимізація графа. Система D2SLAM [12] використовує архітектуру розділення «Ближнє-Далеке». Оцінювач «Ближнього поля» обробляє високочастотні, високоточні оновлення для близьких сусідів через розподілений факторний граф, тоді як оцінювач «Далекого поля» асинхронно оптимізує глобальний граф поз для корекції довгострокового дрейфу.

Узгодженість через перетин коваріацій. Критичною проблемою в розподілених графах є «подвійний підрахунок» інформації. Розподілений оцінювач [13] використовує перетин коваріацій (CI) в рамках розширеного фільтра Калмана (ЕКФ). Консервативно оцінюючи межі коваріації, кожен робот може оновлювати свій власний стан, використовуючи дані сусідів, без відстеження повної матриці крос-коваріації всього рою.

6. Висновки. У статті систематично оцінено сучасний стан сенсорних модальностей для відносної локалізації кооперативних роїв БПЛА з орієнтацією на платформи з обмеженими ресурсами, що працюють у середовищах без GNSS. Класифікуючи існуючі методології на радіочастотну далекометрію, пасивний зір та активні оптичні маркери, було виявлено фундаментальні компроміси між точністю, обчислювальними витратами (SWaP) та стійкістю до факторів навколишнього середовища.

Активні оптичні маркери як оптимальний компроміс SWaP. Хоча підходи на основі глибокого навчання забезпечують високу стійкість візуальних ознак, їхні обчислювальні вимоги роблять їх непридатними для масових мікро-БПЛА. Водночас, системи «тільки за дальністю» на основі UWB є обчислювально легкими, але страждають від проблем спостережуваності. Системи активних УФ-маркерів займають проміжне, практично доцільне положення, забезпечуючи високоточні вимірювання пеленгу та унікальну ідентифікацію агентів з мінімальними обчислювальними накладними витратами.

Відомості про авторів / About the Authors

Тимофєєв Віталій Олександрович (Tymofieiev Vitalii) – аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: vitalikplus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7978-3472>.

Роговий Антон Іванович (Rogovyi Anton) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Anton.Rogovyi@khi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8178-4585>.

Розподілена оптимізація як необхідна умова масштабованості. Централізовані архітектури створюють вузькі місця в комунікації. Розподілені факторні графи, доповнені перетином коваріацій, забезпечують математично узгоджену структуру для масштабованого злиття даних.

У підсумку, конвергенція активних оптичних маркерів із розподіленою оптимізацією графа представляє найбільш перспективний напрям для створення надійних, масштабованих та інформаційно «тихих» повітряних роїв. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку гібридних фреймворків, здатних динамічно перемикатися між режимами повної пози та «тільки за пеленгом» для підтримки узгодженості в деградованих середовищах.

References

- Li S., Shan F., Liu J. et al. Onboard Ranging-based Relative Localization and Stability for Lightweight Aerial Swarms. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2003.05853.
- Gong B., Wang S., Hao M. et al. Range-based collaborative relative navigation for multiple unmanned aerial vehicles using consensus extended Kalman filter. *Aerospace Science and Technology*. Vol. 112, 2021. P. 106647.
- Luo H., Liu Y., Guo C. et al. SuperVINS: A Real-Time Visual-Inertial SLAM Framework for Challenging Imaging Conditions. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.21348.
- Masiero A., Gurturk M., Toth C. et al. A Test on Collaborative Vision and UWB-based Positioning. *ISPRS Archives*. Vol. XLVIII-1/W2-2023. P. 1185–1190.
- Chakraborty A., Sharma R., Brink K. M. Cooperative Localization for Multirotor Unmanned Aerial Vehicles. *AIAA*, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-0684.
- Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. *arXiv*, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1906.02650.
- Walter V., Saska M., Franchi A. Fast Mutual Relative Localization of UAVs using Ultraviolet LED Markers. *Proc. of IEEE ICUAS*, 2018. P. 1217–1226.
- Walter V., Staub N., Franchi A. et al. UVDAR System for Visual Relative Localization With Application to Leader-Follower Formations of Multirotor UAVs. *IEEE RA-L*. Vol. 4, Issue 3. P. 2637–2644.
- Jospin L., Stoven-Dubois A., Cucci D. A. Photometric Long-Range Positioning of LED Targets for Cooperative Navigation in UAVs. *Drones*. Vol. 3, Issue 3. P. 69.
- Li S., Lei H., Zhu C. et al. Bearing-Only Passive Localization and Optimized Adjustment for UAV Formations Under Electromagnetic Silence. *Drones*. Vol. 9, Issue 11. P. 767.
- Walter V., Staub N., Saska M. et al. Mutual Localization of UAVs based on Blinking Ultraviolet Markers and 3D Time-Position Hough Transform. *IEEE CASE*, 2018. P. 298–303.
- Xu H., Liu P., Chen X. et al. D2SLAM: Decentralized and Distributed Collaborative Visual-inertial SLAM System for Aerial Swarm. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01538.
- Zhu P., Geneva P., Ren W. et al. Distributed Visual-Inertial Cooperative Localization. *Proc. of IEEE/RSJ IROS*, 2021. P. 8714–8721.

Надійшла (received) 28.11.2025