

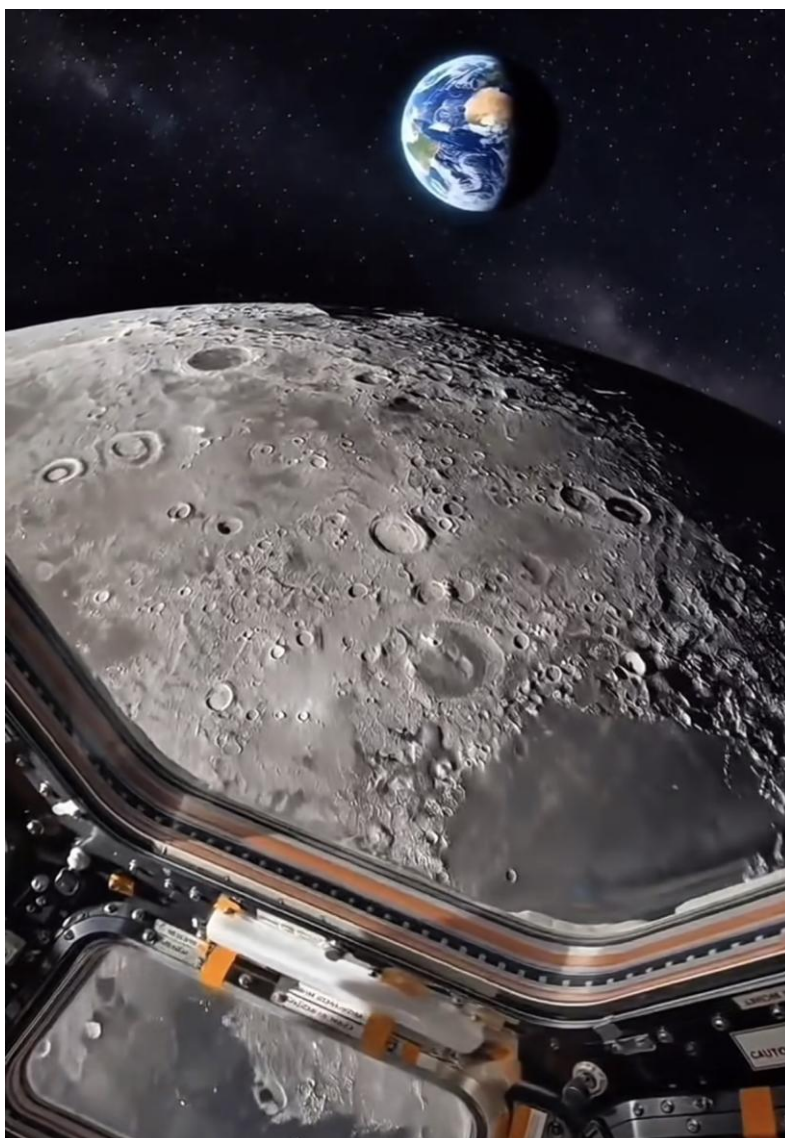


ПРИСВЯЧЕНО

75-річчю
Української
державної льотної
академії,
Міжнародному дню
авіації і
космонавтики та
Дню працівників
ракетно-космічної
галузі України
8 квітня 2026 року
Кропивницький

МАТЕРІАЛИ

XLIII Всеукраїнської науково-практичної
конференції молодих учених, здобувачів вищої освіти
«АВІАЦІЯ ТА КОСМОНАВТИКА: НАПРЯМИ
ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ»



DEDICATED TO
The 75th anniversary
of the Ukrainian
State Flight
Academy, the
International Day of
Aviation and
Cosmonautics, and
the Day of Rocket
and Space Industry
Workers of Ukraine
8 April 2026
Kropyvnytskyi

PROCEEDINGS

of the XLIII All-Ukrainian Scientific and
Practical Conference of Early-Career Researchers,
PhD and University Students
“AVIATION AND COSMONAUTICS:
DIRECTIONS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT”

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ**



МАТЕРІАЛИ

**XLIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих
учених, здобувачів вищої освіти**

**«АВІАЦІЯ ТА КОСМОНАВТИКА: НАПРЯМИ
ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ»**

*(присвяченої 75-річчю Української державної льотної академії, Міжнародному
дню авіації і космонавтики та Дню працівників ракетно-космічної галузі України)*

8 квітня 2026 року

Кропивницький

2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE FLIGHT ACADEMY



PROCEEDINGS

**of the XLIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of
Early-Career Researchers, PhD and University Students**

**“AVIATION AND COSMONAUTICS: DIRECTIONS OF
INNOVATIVE DEVELOPMENT”**

*(Dedicated to the 75th anniversary of the Ukrainian State Flight Academy, the
International Day of Aviation and Cosmonautics, and the Day of Rocket and Space
Industry Workers of Ukraine)*

8 April 2026

Kropyvnytskyi

2026

УДК: 656.7

A20

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19650422>

Рекомендовано до друку рішенням Методичної ради
Української державної льотної академії

(протокол № 8 від 15 квітня 2026 року)

A20 АВІАЦІЯ ТА КОСМОНАВТИКА: НАПРЯМИ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ: Збірник матеріалів XLIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та здобувачів вищої освіти (Кропивницький, 8 квітня 2026 р.), присвяченої 75-річчю Української державної льотної академії, Міжнародному дню авіації і космонавтики та Дню працівників ракетно-космічної галузі України. Кропивницький: УДЛА, 2026. 491 с.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ УДЛА

Голова редакційної колегії: Подопрігора Наталія Володимирівна – д.пед.н., проф., в.о. проректора з наукової роботи та міжнародної діяльності.

Члени редакційної колегії:

Невиніцин Андрій Миколайович – к.т.н., доц., в.о. декана факультету льотної експлуатації;

Неділько Сергій Миколайович – д.т.н., проф., в.о. завідувача кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів;

Пальоний Андрій Сергійович – к.т.н., доц., в.о. завідувача кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху;

Панченко Володимир Анатолійович – д.е.н., д.н. з держ.упр., проф., завідувач кафедри менеджменту авіаційної діяльності;

Письменна Марія Сергіївна – д.е.н., проф., в.о. декана факультету авіаційного менеджменту;

Півень Вікторія Василівна – к.пед.н., доц., завідувач кафедри професійної та авіаційної мовної підготовки;

Романько Ірина Іванівна – к.і.н., доц., доцент кафедри педагогіки вищої школи та соціально-гуманітарних дисциплін;

Сахненко Яна Сергіївна – к.пед.н., доц., завідувач кафедри пошуку, рятування та спеціальної фізичної підготовки;

Сікірда Юлія Володимирівна – к.т.н., проф., завідувач кафедри конструкції повітряних суден, авіаційних двигунів та підтримання льотної придатності;

Супрун Володимир Миколайович – к.ю.н., доц., в.о. завідувача кафедри права та правового забезпечення авіаційної діяльності;

Суркова Катерина Вікторівна – к.пед.н., доц., завідувач кафедри інформаційних технологій та авіаційних робототехнічних систем.

Відповідальний секретар: Черноглазова Ганна Віталіївна – к.пед.н., начальник відділу міжнародних зв'язків.

Збірник містить матеріали доповідей учасників XLIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та здобувачів вищої освіти (Кропивницький, 8 квітня 2026 р.), присвяченої 75-річчю від дня заснування Української державної льотної академії.

У матеріалах висвітлено результати сучасних наукових досліджень за напрямками інноваційного розвитку авіаційної галузі, безпеки польотів, експлуатації повітряних суден та аеронавігації. Значну увагу приділено актуальним питанням економіки, права, менеджменту та гуманітарним аспектам підготовки авіаційних фахівців у контексті євроінтеграційних процесів. Окремий акцент зроблено на впровадженні інтелектуальних систем, безпілотних авіаційних технологій та цифрових рішень у сучасному авіаційному просторі.

Видання зареєстроване у міжнародному реєстрі Zenodo із присвоєнням цифрового ідентифікатора DOI, що забезпечує відкритість матеріалів для світової наукової спільноти та їх індексацію у наукометричних базах.

Розраховано на науковців, викладачів, молодих учених, здобувачів вищої освіти, а також фахівців авіаційної галузі та всіх, хто цікавиться перспективними напрямками розвитку авіаційної науки і техніки.

Матеріали надруковані в авторській редакції. Відповідальність за зміст доповідей, точність наведених даних, цитат та посилань несуть автори.

© Українська державна льотна академія, 2026

© Автори тез, 2026

UDC: 656.7

A20

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19650422>

Recommended for publication by the
decision of the Methodological Council of
the Ukrainian State Flight Academy
(Minutes No. 8 dated April 15, 2026)

A20 AVIATION AND COSMONAUTICS: DIRECTIONS OF INNOVATIVE DEVELOPMENT:

Proceedings of the XLIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Early-Career Researchers, PhD and University Students (Kropyvnytskyi, April 8, 2026), dedicated to the 75th anniversary of the Ukrainian State Flight Academy, the International Day of Aviation and Cosmonautics, and the Day of Rocket and Space Industry Workers of Ukraine. Kropyvnytskyi: USFA, 2026. 491 p.

EDITORIAL BOARD OF USFA

Head of the Editorial Board: Podoprygora Nataliia Volodymyrivna – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Acting Vice-Rector for Scientific Work and International Activity.

Members of the Editorial Board:

Nevynysyn Andrii Mykolaiovych – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Acting Dean of the Flight Operation Faculty;

Nedilko Serhii Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Acting Head of the Flight Operation and Flight Safety Department;

Palionyi Andrii Serhiiovych – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Air Navigation, Meteorology and Air Traffic Management Department;

Panchenko Volodymyr Anatoliiovych – Doctor of Economic Sciences, Doctor of Public Administration, Professor, Head of the Aviation Management Department;

Pysmenna Mariia Serhiivna – Doctor of Economic Sciences, Professor, Acting Dean of the Aviation Management Faculty;

Piven Viktoriia Vasylivna – PhD in Education, Associate Professor, Head of the Professional and Aviation Language Training Department;

Romanko Iryna Ivanivna – PhD in Historical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Higher Education Pedagogy and Social-Humanitarian Disciplines Department;

Sakhnenko Yana Serhiivna – PhD in Education, Associate Professor, Head of the Search, Rescue and Special Physical Training Department;

Sikirda Yuliia Volodymyrivna – PhD in Technical Sciences, Professor, Head of the Aircraft Structures, Aviation Engines and Maintenance of Airworthiness Department;

Suprun Volodymyr Mykolaiovych – PhD in Law, Associate Professor, Acting Head of the Law and Legal Support of Aviation Activity Department;

Surkova Kateryna Viktorivna – PhD in Education, Associate Professor, Head of the Information Technologies and Aviation Robotic Systems Department.

Executive Secretary: Chornohlazova Hanna Vitaliivna – PhD in Education, Head of the International Relations Department.

The proceedings contain the materials of the reports of the participants of the XLIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Early-Career Researchers, PhD and University Students (Kropyvnytskyi, April 8, 2026), dedicated to the 75th anniversary of the founding of the Ukrainian State Flight Academy.

The materials highlight the results of modern scientific research in the areas of innovative development of the aviation industry, flight safety, aircraft operation, and air navigation. Considerable attention is paid to pressing issues of economics, law, management, and humanitarian aspects of aviation specialists' training in the context of European integration processes. A special emphasis is placed on the implementation of intellectual systems, unmanned aerial vehicles (UAV), and digital solutions in the modern aviation space.

The publication is registered in the international Zenodo registry with a digital object identifier (DOI), which ensures the openness of the materials to the global scientific community and their indexing in scientometric databases.

Designed for scientists, academic staff, early-career researchers, PhD and university students, as well as aviation industry professionals and anyone interested in promising directions of aviation science and technology development.

The materials are published in the author's original edition. The authors are responsible for the content of the reports, the accuracy of the given data, quotes, and references.

© Ukrainian State Flight Academy, 2026

© Authors of the papers, 2026

Зміст

ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ЛІНІЙ КЕРУВАННЯ ТА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ АКТИВНИХ КІБЕРЗАГРОЗ	260
Горбик Нікіта, Олексієнко Олександр	260
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ МЕТОДИ РЕЛОКАЛІЗАЦІЇ БПЛА: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	263
Дейнекін Павло Анатолійович.....	263
ОЦІНЮВАННЯ ВІДКРИТИХ ДАНИХ ТА ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ БПЛА.....	268
¹ Джума Амін Ахмадович, ² Джума Людмила Миколаївна.....	268
ЗАГРОЗИ РАДІОЛІНІЙ КЕРУВАННЯ БПЛА ПРИ ВИКОРИСТАННІ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ (STARLINK) В УМОВАХ РЕБ ТА КІБЕРПРОТИБОРСТВА	273
Кириєнко Максим	273
ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ РОЗВІДУВАЛЬНО-УДАРНИХ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ У БОЙОВИХ УМОВАХ.....	276
¹ Козак Сергій Володимирович, ² Кохан В'ячеслав Володимирович	276
ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ У ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ ПРОЄКТУВАЛЬНИКІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	279
Сардінська Альона Юрійвна	279
АВТОМАТИЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ METAR/TAF/SIGMET.....	282
Сидорова Аліна Олександрівна	282
МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ ДИСТАНЦІЙНИХ ПЛОТІВ БЕЗПЛОТНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН	287
Скороход Максим Юрійович.....	287
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ У КОНТЕКСТІ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ	292
Ткаченко Руслана Сергіївна	292
MISSION PLANNER ЯК ІНСТРУМЕНТ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЬОТІВ У СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ	295
¹ Черненко Андрій Миколайович, ² Карімов Салман.....	295
НАЗЕМНІ РОБОТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ: СТРАТЕГІЧНА ПЕРЕВАГА ДЛЯ УКРАЇНИ	298
Ярема Роман Ігорович	298
STRESS-STRAIN STATE OF AIRCRAFT LANDING GEAR ELEMENTS DURING LANDING	303
Kuzin Mykyta Viacheslavovych.....	303
СЕКЦІЯ 5. ЕКОНОМІКА, ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТА СТРАТЕГІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ	307
ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ТА ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ В АВІАЦІЙНІЙ ГАЛУЗІ.....	307
Алеян Варздат	307
ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ЗМІНАМИ В АВІАКОМПАНІЇ ПІД ВПЛИВОМ ГЛОБАЛЬНИХ ВИКЛИКІВ.....	311
Бун'ят Зада Шахла Вугар кизи	311

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ МЕТОДИ РЕЛОКАЛІЗАЦІЇ БПЛА: АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Дейнекін Павло Анатолійович

Українська державна льотна академія, м. Кропивницький, Україна

deinekin@sfa.org.ua

*Науковий керівник: Якуніна І. А., к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та
авіаційних робототехнічних систем УДЛА*

yakunina_irina@sfa.org.ua

Проблема точної релокалізації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах обмеженої видимості залишається однією з найактуальніших задач сучасної авіоніки та робототехніки. Традиційні методи візуальної одометрії та одночасної локалізації й картографування (Visual SLAM), що базуються виключно на RGB-сенсорах, демонструють суттєве зниження надійності при динамічній зміні освітлення, наявності аерозольних завад (туман, дим, пил) та в умовах нічного часу [1, 2]. За даними досліджень, точність позиціонування класичних візуальних систем може знижуватися на 40-60% при переході від ідеальних до реальних польових умов [3].

Мультиспектральний підхід, що поєднує дані оптичного (видимого) та інфрачервоного (термального) діапазонів, пропонує перспективний шлях до вирішення цієї проблеми. Злиття різнорідних сенсорних даних (Sensor Fusion) дозволяє компенсувати обмеження кожного окремого каналу та забезпечити стабільну роботу навігаційної системи в широкому спектрі умов експлуатації [4].

Метою даної роботи є систематизація існуючих підходів до мультиспектральної релокалізації БПЛА, порівняльний аналіз їх характеристик та визначення перспективних напрямків досліджень. Для досягнення поставленої мети було проаналізовано понад 50 наукових публікацій за період 2015-2024 років у базах даних IEEE Xplore, Scopus та Web of Science.

Теоретичні основи мультиспектрального підходу. Візуальний канал (RGB) функціонує у видимому діапазоні електромагнітного спектру (380-750 нм) і забезпечує високу деталізацію зображення за умов достатнього освітлення. Однак його ефективність критично залежить від зовнішніх факторів: інтенсивності та напрямку сонячного світла, наявності тіней та відблисків, прозорості атмосфери. Динамічні зміни цих параметрів призводять до модифікації дескрипторів ключових точок, що ускладнює процес їх ідентифікації та співставлення з еталонною картою [5].

Тепловізійний канал працює в діапазоні довгохвильового інфрачервоного випромінювання (8-14 мкм) і реєструє власне теплове випромінювання об'єктів. Термальні сигнатури характеризуються значно вищою стабільністю порівняно з візуальними ознаками, оскільки залежать від термодинамічних властивостей матеріалів, а не від зовнішнього освітлення. Крім того, інфрачервоне випромінювання з більшою довжиною хвилі краще проходить крізь дрібні аерозолі (туман, легкий дим), забезпечуючи видимість там, де оптичний канал стає неефективним [6].

Концепція Sensor Fusion передбачає інтеграцію даних з різних сенсорів для отримання більш повної та достовірної інформації про навколишнє середовище. У контексті мультиспектральної релокалізації це реалізується через просторову реєстрацію (alignment) кадрів з різних каналів, гібридне виділення ознак та крос-модальну верифікацію результатів [7].

Класифікація методів злиття даних. На основі проведеного аналізу літературних джерел виділено три основні підходи до мультиспектральної релокалізації, що відрізняються рівнем інтеграції даних та алгоритмічною складністю.

Раннє злиття (Early Fusion) передбачає об'єднання даних на рівні пікселів безпосередньо перед виділенням ознак. У роботі [8] запропоновано метод створення композитного зображення шляхом конкатенації RGB та термального каналів з подальшим застосуванням єдиної згорткової нейронної мережі для виділення дескрипторів. Перевагою підходу є максимальне збереження міжканальних кореляцій, що дозволяє виявляти приховані закономірності. Основним недоліком є висока обчислювальна складність – за даними авторів, час обробки зростає на 45-60% порівняно з моноспектральними методами.

Пізнє злиття (Late Fusion) реалізує незалежну обробку кожного каналу з інтеграцією результатів на рівні прийняття рішень. Vidas та співавтори [9] продемонстрували ефективність такого підходу для 3D-картографування інтер'єрів будівель, досягнувши точності суміщення RGB та ІЧ-кадрів до 2 пікселів. Модульна архітектура забезпечує стійкість до відмови одного з каналів – система продовжує функціонувати на основі даних іншого сенсора. Водночас, втрата кореляційної інформації на етапі роздільної обробки може знижувати загальну точність на 10-15% порівняно з методами раннього злиття [10].

Гібридне злиття (Hybrid Fusion) поєднує елементи обох попередніх підходів з адаптивним вибором стратегії залежно від поточних умов. У роботі [11] запропоновано архітектуру з циклічними блоками уточнення (Cyclic Fuse-and-Refine Blocks), що дозволяє динамічно змінювати вагу кожного каналу. Експериментальна оцінка на датасеті KAIST показала підвищення робастності детекції на 34% порівняно з моноспектральним підходом. Складність налаштування гіперпараметрів та потреба у репрезентативних навчальних даних залишаються основними викликами для практичного впровадження.

Порівняльний аналіз методів. Для об'єктивного порівняння розглянутих підходів було систематизовано дані з 15 ключових публікацій за критеріями точності позиціонування, обчислювальної складності, стійкості до зовнішніх факторів та придатності для вбудованих систем.

За критерієм точності позиціонування найкращі результати демонструють методи гібридного злиття – середня похибка становить 0.15-0.25 м для міських умов та 0.3-0.5 м для позаміських територій [12]. Методи раннього злиття показують порівнянні результати (0.2-0.3 м та 0.35-0.55 м відповідно), тоді як пізнє злиття поступається на 15-20%. Однак при погіршенні видимості (туман, сутінки) перевага гібридних методів зростає до 35-40%.

Обчислювальна складність суттєво впливає на можливість застосування методів у реальному часі на бортових обчислювачах БПЛА. Пізнє злиття характеризується найменшими вимогами – типова частота обробки становить 25-30 кадрів/с на вбудованих

GPU (NVIDIA Jetson TX2). Раннє злиття потребує на 45-60% більше обчислювальних ресурсів, а гібридні методи займають проміжне положення [13].

Стійкість до зовнішніх факторів є критичним параметром для практичного застосування. Експерименти Beauvisage та Aouf [14] на датасеті з реальними польотами показали, що мультиспектральна візуальна одометрія забезпечує безперервну роботу при переходах день-ніч, тоді як моноспектральні RGB-системи втрачали трекінг у 73% випадків. У задимлених умовах (моделювання техногенних аварій) мультиспектральні методи зберігали працездатність при оптичній щільності диму до 0.8 од/м, що на 60% перевищує можливості оптичних систем.

Невирішені проблеми та перспективи розвитку. Незважаючи на значний прогрес у галузі мультиспектральної релокалізації, низка проблем залишається відкритою та потребує подальших досліджень.

Проблема автоматичної калібрування мультиспектральних систем у польових умовах залишається актуальною. Існуючі методи калібрування потребують спеціальних шаблонів та контрольованого середовища, що ускладнює їх застосування під час експлуатації. Розробка методів онлайн-калібрування на основі природних сцен є перспективним напрямком досліджень [15].

Робота в умовах екстремальних температур створює додаткові виклики для термального каналу. При температурі навколишнього середовища, близькій до температури об'єктів інтересу, тепловий контраст суттєво знижується, що погіршує якість виділення ознак. Адаптивні методи підсилення контрасту та використання додаткових спектральних діапазонів (MWIR, SWIR) можуть частково вирішити цю проблему [16].

Оптимізація алгоритмів для вбудованих систем з обмеженими обчислювальними ресурсами є необхідною умовою практичного впровадження. Сучасні методи глибокого навчання демонструють високу точність, але потребують значних обчислювальних потужностей. Дослідження у напрямку компресії нейронних мереж, квантування та використання спеціалізованих прискорювачів (NPU, VPU) мають важливе прикладне значення [17].

Сезонна та добова варіабельність термальних сигнатур потребує розробки адаптивних алгоритмів, здатних враховувати зміни теплового фону. Хоча відносний контраст між різними матеріалами (асфальт, бетон, ґрунт, рослинність) зберігається, абсолютні значення температур та їх розподіл суттєво змінюються протягом доби та пори року. Методи нормалізації та інваріантного представлення термальних даних є перспективним напрямком досліджень [18].

Проведений аналіз показав, що мультиспектральний підхід до релокалізації БПЛА є перспективним напрямком, який дозволяє суттєво підвищити надійність навігації в складних умовах експлуатації. Проблема точної релокалізації безпілотних літальних апаратів в умовах деградованого візуального середовища вимагає переходу від класичних моноспектральних систем (Visual SLAM) до комплексного мультиспектрального навігаційного контуру. Встановлено, що злиття різнорідних сенсорних даних, зокрема глибока інтеграція оптичного (RGB) та термального інфрачервоного діапазонів, дозволяє ефективно нівелювати критичні зовнішні фактори: динамічну зміну освітлення, наявність

щільних аерозольних завад (туман, задимлення) та умови повної темряви. Порівняння сучасних архітектур обробки інформації доводить, що методи гібридного злиття (Hybrid Fusion) забезпечують найкращий баланс між точністю позиціонування та просторовою орієнтацією, перевершуючи класичні оптичні аналоги на 35–40% за умов суттєвого погіршення видимості.

Водночас, стратегічним вектором подальших наукових розвідок має стати оптимізація цих ресурсоемних алгоритмів для їхнього розгортання на бортових вбудованих платформах із жорсткими обчислювальними та енергетичними обмеженнями. Крім того, критично важливим є вирішення проблеми автоматичного безмаркерного онлайн-калібрування мультиспектральних сенсорів безпосередньо під час виконання місії, а також розробка адаптивних алгоритмів, здатних ефективно компенсувати сезонну та добову варіабельність теплових сигнатур. Подальше розв'язання цих інженерних та алгоритмічних завдань є умовою для забезпечення надійної автономності та безперебійної навігації безпілотних авіаційних систем у непередбачуваних та екстремальних сценаріях реальної експлуатації.

З-поміж розглянутих методів злиття даних гібридні підходи демонструють найкращий баланс між точністю та обчислювальною ефективністю, хоча їх практичне впровадження ускладнюється потребою у ретельному налаштуванні параметрів. Напями подальших досліджень є: розробка методів автоматичної онлайн-калібрування; створення адаптивних алгоритмів для роботи в умовах змінного теплового контрасту; оптимізація обчислювальної складності для вбудованих платформ; формування стандартизованих датасетів для об'єктивного порівняння методів. Вирішення цих задач дозволить реалізувати повний потенціал мультиспектральних систем для автономної навігації БПЛА у будь-яких умовах експлуатації.

Список використаних джерел:

1. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age / C. Cadena et al. *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32, No. 6. P. 1309–1332.
2. Mouats T., Aouf N. Multimodal stereo correspondence based on phase congruency and edge histogram descriptor. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*. 2013. P. 1981–1987.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry: Part I - The first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2011. Vol. 18, No. 4. P. 80–92.
4. Lahat D., Adali T., Jutten C. Multimodal data fusion: An overview of methods, challenges, and prospects. *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103, No. 9. P. 1449–1477.
5. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60, No. 2. P. 91–110.
6. Gade R., Moeslund T. B. Thermal cameras and applications: A survey. *Machine Vision and Applications*. 2014. Vol. 25, No. 1. P. 245–262.
7. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art / B. Khaleghi et al. *Information Fusion*. 2013. Vol. 14, No. 1. P. 28–44.
8. Multispectral fusion for object detection with cyclic fuse-and-refine blocks / H. Zhang et al. *IEEE International Conference on Image Processing*. 2020. P. 276–280.
9. Vidas S., Moghadam P., Bosse M. 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2013. P. 2311–2318.
10. Feature point descriptors: Infrared and visible spectra / P. Ricaurte et al. *Sensors*. 2014. Vol. 14, No. 2. P. 3690–3701.
11. Multispectral pedestrian detection: Benchmark dataset and baseline / S. Hwang et al.

Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2015. P. 1037–1045.

12. Zhou K., Chen L., Cao X. Improving multispectral pedestrian detection by addressing modality imbalance problems. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. 2020. P. 787–803.

13. Multispectral deep neural networks for pedestrian detection / J. Liu et al. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*. 2016. P. 73.1–73.13.

14. Beauvisage A., Aouf N. Multi-spectral visual odometry for unmanned air vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 45. P. 1007–1022.

15. CATS: A color and thermal stereo benchmark / W. Treible et al. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 2961–2969.

16. Berg A., Ahlberg J., Felsberg M. A thermal object tracking benchmark. *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*. 2015. P. 1–6.

17. Pruning convolutional neural networks for resource efficient inference / P. Molchanov et al. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*. 2017.

18. Multi-modal RGB-Depth-Thermal human body segmentation / C. Palmero et al. *International Journal of Computer Vision*. 2016. Vol. 118, No. 2. P. 217–239.

MULTISPECTRAL METHODS FOR UAV RELOCALIZATION: ANALYSIS OF CURRENT APPROACHES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Deinekin Pavlo Anatoliyovych

Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, Ukraine

Scientific supervisor: Yakunina I. L., PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Information Technologies and Aviation Robotic Systems, Ukrainian State Flight Academy

Abstract. This article provides a comprehensive systematic review of multispectral relocalization methodologies for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) operating in Degraded Visual Environments (DVE). Traditional Visual Simultaneous Localization and Mapping (V-SLAM) algorithms, which rely exclusively on the visible electromagnetic spectrum (RGB sensors), experience severe performance degradation – often losing tracking accuracy by 40–60%—under conditions of dynamic illumination, nighttime operations, and aerosol interference such as fog or smoke. To mitigate these critical vulnerabilities, the research explores the paradigm of cross-modal Sensor Fusion, specifically the integration of standard optical data with long-wave infrared (LWIR) thermal signatures (8–14 μm). Because thermal emissions depend on the thermodynamic properties of materials rather than external lighting, they offer superior penetration through obscurants and maintain highly stable descriptors across day-night transitions.

Based on a rigorous analysis of over 50 peer-reviewed publications from 2015 to 2024, the study categorizes current fusion architectures into three primary paradigms: Early Fusion (pixel-level concatenation utilizing Convolutional Neural Networks), Late Fusion (decision-level integration ensuring modular redundancy), and Hybrid Fusion (adaptive spatial alignment using Cyclic Fuse-and-Refine Blocks). The comparative quantitative analysis reveals that Hybrid Fusion achieves the most optimal balance, reducing positioning errors to 0.15–0.25 meters in urban environments and demonstrating a 35–40% performance advantage over monospectral systems under severe visibility constraints.

