

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
 Інститут геодезії
 Кафедра фотограмметрії та геоінформатики
 Спеціальність 193 “Геодезія та землеустрій»

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри ФГП Євгеній ШИЛО
 (ім'я та прізвище)

 (підпис)

« 22 » вересня 20 25 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студента групи ГДА3-21 **ОР магістр**
Сервер АКИМОВ
 (ім'я та прізвище)

1. Тема роботи Створення ортомозаїки для розвідки СОУ в умовах бойових дій
 (у разі виконання комплексної роботи в дужках вказується “комплексна робота (проект)”)

Затверджена наказом по університету від « 21 » жовтня 20 25 р. № 4122-4-06

2. Термін подання студентом закінченої роботи 3 грудня 2025 р.

3. Вхідні дані для роботи Матеріали польових вимірювань БПЛА

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які належить розробити)
 Розділ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ В УМОВАХ.

ОБМЕЖЕНОГО ГНСС-ПОКРИТТЯ

Розділ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ ЗА ДАНИМИ БПЛА
 "МАРА-2"

5. Перелік графічного матеріалу _____

6. Перелік програмних продуктів, які належить використати в процесі розроблення роботи
 Metashape

7. Консультування роботи, із зазначенням номерів розділів роботи

Розділ	Консультант	Завдання видав		Завдання прийняв	
		підпис	дата	підпис	дата

8. Дата, коли видано завдання 22 вересня 2025 р.Керівник _____ (Євгеній ШИЛО)
(підпис) (ім'я та прізвище)Завдання прийняв до виконання _____ (Сервер АКИМОВ)
(підпис) (ім'я та прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи		Примітка
		початок	кінець	
1	Отримання завдання. Призначення теми.	22.09.2025	22.09.2025	
2	Виконання фотограмметричних обчислень	22.09.2025	20.11.2025	
3	Підготовка і написання 1-го розділу	03.10.2025	17.10.2025	
4	Підготовка і написання 2-го розділу	19.10.2025	28.10.2025	
	Підготовка кінцевої редакції магістерської роботи	16.11.2025	29.11.2025	

Студент _____ (Сервер АКИМОВ)
(підпис) (ім'я та прізвище)Керівник _____ (Євгеній ШИЛО)
(підпис) (ім'я та прізвище)

Висновок

про рівень оригінальності магістерської кваліфікаційної роботи на тему
Створення ортомозаїки для розвідки СОУ в умовах бойових дій,

отриманими з БПЛА

студентки групи ГДА3-21

Сервер АКИМОВ

(ім'я та прізвище)

Інституту геодезії

Загальний обсяг кваліфікаційної роботи: _____ сторінок

Програмне забезпечення перевірки на оригінальність StrikePlagiarism (<https://strikerplagiarism.com>) – на безоплатній основі.

У результаті перевірки на оригінальність роботи встановлено показник
оригінальності роботи _____ %

Дата оформлення висновку _____ грудня 20 25 р.

Відповідальний від кафедри
за перевірку

_____ (Назар ГРИЦЬКІВ)
(підпис) (ім'я та прізвище)

Завідувач кафедри ФГІ

_____ (Євгеній ШИЛО)
(підпис) (ім'я та прізвище)

УДК 528.7:623.746.3

Акімов С. Ш., Шило Є. О. (керівник). Створення ортомозаїки для розвідки СОУ в умовах бойових дій. Магістерська кваліфікаційна робота. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2025.

Розширена анотація

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробці методики створення топографічних ортомозаїк за даними безпілотного аерознімання в умовах відсутності або спотворення навігаційних даних від бортових ГНСС-приймачів внаслідок дії засобів радіоелектронної боротьби.

Об'єкт дослідження – процес створення ортофотопланів місцевості за матеріалами безпілотного аерознімання в умовах бойових дій.

Предмет дослідження – методи фотограмметричної обробки аерознімків для створення ортомозаїки без достовірних навігаційних даних від бортових ГНСС-приймачів.

Мета дослідження – апробувати методику створення топографічних ортомозаїк за даними аерофотознімання з БПЛА "Мара-2" для забезпечення потреб військової розвідки в умовах радіоелектронної протидії.

У роботі виконано комплексний аналіз сучасних методів створення ортомозаїки з використанням технологій БПЛА-фотограмметрії [3]. Розглянуто фундаментальні фотограмметричні принципи та метод Structure from Motion для автоматизованої обробки неорієнтованих зображень [2, 3]. Досліджено перспективні технології Visual SLAM для автономної навігації без залежності від супутникових систем та застосування методів машинного навчання для виявлення спотворень навігаційних даних [2,3]. Наведено детальну технічну характеристику безпілотного розвідувального комплексу "Мара-2" [1] та фотограмметричної камери ADTi Surveyor Lite 26S v2, верифіковано критичні технічні параметри сенсора Sony IMX571BQR.

Виконано експериментальні дослідження на території бойових дій. Проведено обробку 3842 цифрових аерознімків, отриманих з висоти 400-500 м в умовах впливу засобів радіоелектронної боротьби. У програмному середовищі Agisoft Metashape виконано фотограмметричну обробку цифрових знімків з повним видаленням недостовірних ГНСС-координат, створено щільну точкову модель, що містить понад 382 млн точок. Побудовано цифрову модель рельєфу з просторовою розрізненістю 24,3 см та ортомозаїку з розрізненістю 6 см/піксель. Продемонстровано можливість створення якісних топографічних продуктів методами автоматизованої фотограмметрії навіть за умови повної відсутності достовірних навігаційних даних.

Ключові слова: ортомозаїка, БПЛА, аерофотознімання, фотограмметрія, Structure from Motion, радіоелектронна боротьба, ГНСС-denied, Agisoft Metashape, військова розвідка, цифрова модель рельєфу.

Перелік використаної літератури:

1. БПЛА комплексу "Мара". MARA-DRONE: офіційний сайт виробника. URL: <https://mara-drone.com/en/>
2. Jiang S., Jiang C., Jiang W. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 167. P. 230–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
3. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A review of UAV autonomous navigation in GNSS-denied environments. Robotics and Autonomous Systems. 2023. Vol. 170. Article 104533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>

UDC 528.7:623.746.3

Akimov S. Sh., Shilo Ye. O. (supervisor). Creation of an orthomosaic for reconnaissance purposes under combat conditions. Master's thesis. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

Extended abstract

The master's thesis is devoted to the development of a methodology for creating topographic orthomosaics based on unmanned aerial photography data in conditions of absence or distortion of navigation data from onboard GNSS receivers due to the effects of electronic warfare.

The object of the study is the process of creating orthophotomaps of the terrain based on unmanned aerial photography data in combat conditions.

The subject of the study is methods of photogrammetric processing of aerial photographs to create orthomosaics without reliable navigation data from onboard GNSS receivers.

The purpose of the study is to test a method for creating topographic orthomosaics based on aerial photography data from the Mara-2 UAV to meet the needs of military intelligence in conditions of electronic warfare.

The work provides a comprehensive analysis of modern methods for creating orthomosaics using UAV photogrammetry technologies [3]. Fundamental photogrammetric principles and the Structure from Motion method for automated processing of unoriented images are considered [2, 3]. Promising Visual SLAM technologies for autonomous navigation without dependence on satellite systems and the application of machine learning methods for detecting navigation data distortions are investigated [2, 3]. Detailed technical characteristics of the Mara-2 unmanned reconnaissance complex [1] and the ADTi Surveyor Lite 26S v2 photogrammetric camera are provided, and the critical technical parameters of the Sony IMX571BQR sensor are verified.

Experimental studies were conducted in the combat zone. A total of 3,842 digital aerial photographs taken from an altitude of 400-500 m under the influence of electronic warfare were processed. In the Agisoft Metashape software environment, photogrammetric processing of digital images was performed with complete removal of unreliable GNSS coordinates, and a dense point model containing over 382 million points was created. A digital terrain model with a spatial resolution of 24.3 cm and an orthomosaic with a resolution of 6 cm/pixel were constructed. The possibility of creating high-quality topographic products using automated photogrammetry methods was demonstrated, even in the complete absence of reliable navigation data.

Keywords: orthomosaic, UAV, aerial photography, photogrammetry, Structure from Motion, electronic warfare, GNSS-denied, Agisoft Metashape, military reconnaissance, digital terrain model.

List of references:

1. UAV of the Mara complex. MARA-DRONE: official website of the manufacturer. URL: <https://mara-drone.com/en/>
2. Jiang S., Jiang C., Jiang W. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 167. P. 230–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
3. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A review of UAV autonomous navigation in GNSS-denied environments. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 170. Article 104533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>

Зміст

Вступ	10
Розділ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ГНСС-ПОКРИТТЯ.....	12
1.1. Огляд сучасних методів створення ортомозаїки з БПЛА.....	12
1.2. Тенденції розвитку технологій створення ортомозаїки.....	18
1.3. Опис технічної реалізації та апаратно-програмної архітектури БПЛА МАРА.....	25
Розділ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ ЗА ДАНИМИ БПЛА "МАРА-2"	38
2.1. Планування та виконання аерофотознімання	38
2.2. Обробка аерознімків у Agisoft Metashape	44
Висновки	54
Література.....	55
ДОДАТОК 1.....	Помилка! Закладку не визначено.

Вступ

Актуальність теми дослідження

Сучасні збройні конфлікти характеризуються інтенсивним застосуванням засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), спрямованих на придушення сигналів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). В умовах війни в Україні засоби РЕБ противника систематично застосовуються на лінії бойового зіткнення, створюючи зони, де традиційні методи супутникової навігації стають ненадійними або неможливими.

Потреба у актуальній геопросторовій інформації для планування бойових операцій залишається критично важливою. Безпілотні літальні апарати стали основним засобом оперативного отримання такої інформації завдяки мобільності та можливості роботи в небезпечних зонах. Створення точних ортофотопланів є ключовим завданням військової розвідки для забезпечення командування об'єктивною картиною місцевості.

Традиційна цифрова фотограмметрична обробка даних БПЛА значною мірою покладається на координати від бортових ГНСС-приймачів. При втраті супутникового сигналу точність створення геоприв'язаних ортомозаїк суттєво погіршується. Сучасні методи комп'ютерного зору (Structure from Motion, dense matching) забезпечують теоретичну можливість обробки зображень без навігаційних даних, однак їх практична реалізація в бойових умовах вимагає детального дослідження.

Мета роботи – апробація методики створення ортомозаїк за даними аерофотознімання з БПЛА в умовах відсутності або спотворення ГНСС-сигналу внаслідок дії засобів РЕБ.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати сучасні методи створення ортомозаїки з використанням БПЛА-фотограмметрії та роль ГНСС-даних у процесі обробки.

4. Реалізувати фотограмметричну обробку реальних матеріалів аерознімання без достовірних навігаційних даних.

5. Створити ортомозаїку з просторовою розрізненістю, достатньою для потреб військової розвідки.

Об'єкт дослідження – процес створення ортофотопланів за матеріалами безпілотного аерознімання в умовах бойових дій.

Предмет дослідження – методи фотограмметричної обробки аерознімків без достовірних навігаційних даних від бортових ГНСС-приймачів.

Методи дослідження

У роботі використано: аналіз наукової літератури; методи цифрової фотограмметрії; методи комп'ютерного зору (Structure from Motion, dense matching); експериментальні методи апробації на реальних даних; статистичні методи аналізу точності.

Наукова новизна - Досліджено практичні особливості аерознімання в умовах активної радіоелектронної протидії.

Структура роботи

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку з 34 джерел та додатка. Обсяг – 66 сторінок, 7 рисунків, 7 таблиць.

Розділ 1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ГНСС-ПОКРИТТЯ

1.1. Огляд сучасних методів створення ортомозаїки з БПЛА

Огляд сучасних методів створення ортомозаїки з БПЛА

Безпілотні літальні апарати стали одним з провідних інструментів отримання просторових даних високої роздільності завдяки своїй мобільності, економічній ефективності та гнучкості збору даних [11]. На відміну від традиційних методів аерофотознімання, БПЛА забезпечують можливість оперативного картографування на висотах від декількох метрів до сотень метрів над поверхнею землі, що дозволяє досягати просторового розрізнення на рівні сантиметрів [25]. Це робить технологію БПЛА-фотограмметрії особливо привабливою для широкого спектру застосувань – від моніторингу сільськогосподарських культур та інспекції інфраструктури до картографування зон надзвичайних ситуацій та археологічних досліджень.

Створення ортомозаїки – геометрично коректного зображення земної поверхні, де усунуто спотворення, спричинені рельєфом місцевості та нахилом камери – є одним з ключових продуктів фотограмметричної обробки даних БПЛА. Процес генерації ортомозаїки включає кілька послідовних етапів: від збору аерознімків з необхідним перекриттям до побудови цифрової моделі рельєфу та ортотрансформування окремих знімків у єдину безшовну мозаїку [21, 15].

Фотограмметричні принципи побудови ортофотопланів

Фотограмметрія як наука про отримання метричної інформації про об'єкти за їхніми зображеннями базується на фундаментальних принципах проективної геометрії та колінеарності. Основою фотограмметричної обробки є математична

модель центральної проєкції, яка описує геометричний зв'язок між координатами точок об'єкта в просторі та їхніми відповідниками на площині зображення [30].

Умова колінеарності визначає, що центр проєкції (точка центру цифрового знімання), точка зображення на знімку та відповідна їй точка на об'єкті завжди розташовані на одній прямій лінії. Математично це виражається рівняннями колінеарності, які для точки з просторовими координатами (X, Y, Z) та її зображення (x, y) на знімку мають вигляд:

$$x - x^0 = -f \cdot \frac{[r^{11}(X - X_s) + r^{12}(Y - Y_s) + r^{13}(Z - Z_s)]}{[r^{31}(X - X_s) + r^{32}(Y - Y_s) + r^{33}(Z - Z_s)]} \quad (1.1)$$

$$y - y^0 = -f \cdot \frac{[r^{21}(X - X_s) + r^{22}(Y - Y_s) + r^{23}(Z - Z_s)]}{[r^{31}(X - X_s) + r^{32}(Y - Y_s) + r^{33}(Z - Z_s)]} \quad (1.2)$$

де f – фокусна відстань камери; (x^0, y^0) – координати головної точки знімка; (X_s, Y_s, Z_s) – координати центру проєкції; r_{ij} – елементи матриці обертання, що визначають просторову орієнтацію знімка.

Для визначення елементів зовнішнього орієнтування знімків (позиції та кутів нахилу камери в момент експозиції) використовується процедура аеротріангуляції (aerial triangulation, АТ), яка є основою фотограмметричної обробки даних БПЛА. Традиційний підхід вимагає наявності початкових наближень положень камер та тривимірних координат точок на об'єктах, що обмежує його застосування для необроблених знімків БПЛА [11].

Точність фотограмметричних вимірювань залежить від багатьох факторів: якості калібрування камери, характеристик сенсора, умов освітлення під час знімання, величини перекриття між суміжними знімками, а також від наявності та розподілу наземних опорних точок (ground control points, GCP) [25, 27]. Для досягнення субдециметрової точності горизонтального та вертикального позиціонування зазвичай необхідне використання щонайменше 5-10 рівномірно розподілених GCP на квадратний кілометр площі [22, 9, 18].

Створення ортомозаїки базується на процесі ортотрансформування, який усуває геометричні спотворення, притаманні центральній проекції. Для кожного пікселя ортомозаїки виконується зворотна трансформація – визначається відповідна точка на вихідному знімку з урахуванням цифрової моделі рельєфу (Digital Elevation Model, DEM) та елементів орієнтування знімка. Алгоритм ортотрансформування можна представити наступною послідовністю:

1. Для кожного пікселя (X, Y) у системі координат ортомозаїки визначається висота Z з DEM.
2. Тривимірні координати (X, Y, Z) проєктуються на площину знімка за допомогою рівнянь колінеарності, що дає координати (x, y) на знімку.
3. Яскравість пікселя ортомозаїки визначається шляхом інтерполяції значень сусідніх пікселів у точці (x, y) вихідного знімка.

Остаточна ортомозаїка формується шляхом мозаїкування окремих ортотрансформованих знімків з використанням алгоритмів блендингу для забезпечення безшовності переходів між суміжними зображеннями [17, 21].

Structure from Motion (SfM) та Dense Matching

Револьюційним досягненням у галузі автоматизованої фотограмметричної обробки стало впровадження методу Structure from Motion (SfM) – технології, запозиченої з комп'ютерного зору, яка дозволяє одночасно відновлювати параметри камер та тривимірну структуру сцени з набору неорієнтованих зображень [33, 30]. На відміну від класичної фотограмметрії, SfM не вимагає попереднього знання про положення та орієнтацію камер, а визначає їх автоматично на основі аналізу спільних особливостей (feature points) на знімках котрі перекриваються.

Типовий шлях обробки SfM складається з трьох основних етапів:

1. ВИДІЛЕННЯ ТА ОПИС ХАРАКТЕРНИХ ТОЧОК (feature extraction and description). На кожному зображенні детектуються ключові точки – пікселі з високою інформативністю, які можна однозначно ідентифікувати на інших

знімках. Найпоширенішим алгоритмом є SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), який забезпечує інваріантність до масштабування, обертання та певною мірою до змін освітлення. Кожна ключова точка описується дескриптором – числовим вектором, що характеризує локальну структуру зображення навколо неї.

2. ВСТАНОВЛЕННЯ ВІДПОВІДНОСТЕЙ МІЖ ЗНІМКАМИ (feature matching). На цьому етапі ідентифікуються спільні точки на різних зображеннях шляхом порівняння їхніх дескрипторів. Для великомасштабних наборів даних БПЛА, які можуть містити тисячі знімків, пошук усіх можливих пар є надзвичайно затратним з точки зору машинного обчислювального часу. Тому застосовують стратегії передвибору пар зображень на основі апріорної інформації про траєкторії польоту, географічних координат або методів пошуку візуально подібних зображень з використанням vocabulary trees [33].

3. РЕКОНСТРУКЦІЯ КАМЕР ТА РОЗРІДЖЕНОЇ ХМАРИ ТОЧОК (sparse reconstruction). Використовуючи встановлені відповідності, послідовно визначаються параметри камер та тривимірні координати точок через процедуру bundle adjustment – нелінійної оптимізації, яка мінімізує сумарну похибку репроекції усіх точок на всі знімки [33]. Цей етап є найбільш обчислювально складним, особливо для великих наборів даних БПЛА з високим ступенем перекриття (часто понад 80-90% в обох напрямках).

Результатом SfM є розріджена хмара точок, яка містить лише ті точки, що були виділені як ключові на етапі feature extraction. Для отримання щільної тривимірної моделі поверхні застосовують алгоритми dense matching або Multi-View Stereo (MVS). Ці методи аналізують не тільки ключові точки, а й усі пікселі зображень, встановлюючи фотометричну відповідність між ними [20, 30].

Сучасні реалізації MVS, такі як Semi-Global Matching (SGM) або patch-based MVS, здатні генерувати щільні хмари точок з густиною декілька точок на піксель зображення [21]. Це забезпечує детальність, достатню для створення

цифрових моделей місцевості з роздільністю, порівнянною або навіть кращою за дані повітряного лазерного сканування [20, 3].

Важливою особливістю SfM-підходу для даних БПЛА є його здатність обробляти зображення, отримані з різних кутів та висот, включаючи косокутні (oblique) знімки. Це робить технологію SfM універсальною для широкого спектру застосувань – від моніторингу сільського господарства до тривимірного моделювання міських територій [4,30].

Однак SfM має й певні обмеження. Метод чутливий до умов освітлення, наявності повторюваних текстур та малоконтрастних ділянок [3]. Крім того, відновлення абсолютного масштабу та географічної прив'язки моделі вимагає додаткової інформації – наземних опорних точок або даних бортових ГНСС/IMU сенсорів [27, 8].

Роль ГНСС-даних у фотограмметричній обробці

Глобальні навігаційні супутникові системи (Global Navigation Satellite Systems, ГНСС) відіграють критично важливу роль у фотограмметричній обробці даних БПЛА, забезпечуючи географічну прив'язку знімків та полегшуючи процес орієнтування [11, 27]. Дані про координати центру проекції кожного знімка, записані в момент експозиції, дозволяють суттєво скоротити обчислювальну складність аеротріангуляції та підвищити надійність результатів.

Існує три основні підходи до використання ГНСС-даних у фотограмметрії БПЛА:

1. НЕПРЯМА ГЕОПРИВ'ЯЗКА (indirect georeferencing). У цьому випадку координати знімків, отримані від споживчого ГНСС-приймача з точністю 2-5 метрів, використовуються лише для орієнтовного позиціонування та передвибору пар зображень під час етапу feature matching. Остаточне визначення точних координат об'єктів виконується через наземні опорні точки (GCP), виміряні з високою точністю методами RTK ГНСС або тахеометрії [25, 27].

2. ПРЯМА ГЕОПРИВ'ЯЗКА З RTK/PPK (direct georeferencing). Сучасні професійні БПЛА можуть бути обладнані приймачами Real-Time Kinematic

(RTK) або виконувати Post-Processing Kinematic (PPK) корекцію, що забезпечує точність визначення координат на рівні 2-5 см у горизонтальній площині та 5-10 см по вертикалі [27, 8, 24]. За таких умов стає можливим створення ортомозаїк без використання наземних опорних точок або з їх мінімальною кількістю (2-3 GCP для перевірки якості) [13, 9].

3. КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД. Найчастіше застосовується змішана стратегія, коли ГНСС-координати знімків використовуються як початкові наближення в bundle adjustment, а GCP слугують для калібрування систематичних похибок та визначення абсолютного масштабу моделі [27, 8, 24].

Дослідження показують, що при використанні RTK/PPK без наземних опорних точок можна досягти горизонтальної точності на рівні 1-2 GSD (Ground Sample Distance) та вертикальної точності 2-3 GSD [13, 28]. Однак навіть за наявності високоточних ГНСС-даних додавання невеликої кількості GCP (4-6 точок) може покращити точність на 20-40%, особливо в умовах складного рельєфу або при наявності систематичних похибок калібрування камери [27, 9].

Критично важливим аспектом є синхронізація моменту експозиції з ГНСС-вимірюваннями. Похибки синхронізації можуть призводити до систематичних зміщень, особливо при високих швидкостях польоту БПЛА [8]. Сучасні системи використовують високоточний таймінг на базі PPS (Pulse Per Second) сигналу від ГНСС-приймача для забезпечення субмілісекундної синхронізації.

Інтеграція даних ГНСС з інерційними вимірювальними модулями (Inertial Measurement Unit, IMU) дозволяє отримувати не тільки координати центру проекції, а й кути орієнтації камери в момент знімання [8]. Така інтеграція ГНСС/IMU особливо важлива для обробки косокутних знімків, де точне знання кутів нахилу критично впливає на якість ортотрансформування [24].

Однак залежність від ГНСС-даних створює вразливість у випадках їх недоступності або спотворення. У зонах з обмеженою видимістю супутників (густа міська забудова, ліси, каньйони) або під впливом радіоелектронної протидії точність координат може значно погіршуватись або ГНСС-сигнал може

бути повністю відсутній [10, 3, 7]. Це робить актуальним розвиток альтернативних методів локалізації та геоприв'язки, заснованих на візуальних або інерційних вимірюваннях [23, 26, 10].

Висновок

Сучасна методологія створення ортомозаїки з даних БПЛА базується на синтезі класичних фотограмметричних принципів та новітніх підходів комп'ютерного зору. Метод Structure from Motion забезпечує автоматизовану обробку великих масивів зображень без необхідності апріорного знання параметрів камери, тоді як алгоритми dense matching дозволяють генерувати щільні тривимірні моделі поверхні.

Роль ГНСС-даних у цьому процесі є двоякою: з одного боку, вони забезпечують географічну прив'язку та прискорюють обробку, з іншого – створюють залежність від доступності супутникового сигналу. Для забезпечення надійності картографування в умовах обмеженого або відсутнього ГНСС-покриття необхідне застосування альтернативних підходів до локалізації та геоприв'язки.

1.2. Тенденції розвитку технологій створення ортомозаїки

Сучасний розвиток технологій створення ортомозаїки характеризується трьома основними напрямками: впровадженням методів візуальної одночасної локалізації та картографування (Visual SLAM) для забезпечення автономної навігації БПЛА без залежності від супутникових систем позиціонування; застосуванням алгоритмів машинного навчання для автоматизації процесів геоприв'язки та виявлення спотворень навігаційних даних; а також розробкою нових методів валідації точності ортомозаїки, які не вимагають традиційних наземних опорних точок. Ці напрямки особливо актуальні в контексті військового застосування БПЛА, де доступність ГНСС-сигналу може бути обмеженою або повністю відсутньою через дію радіоелектронної боротьби.

Visual SLAM для навігації без ГНСС

Visual Simultaneous Localization and Mapping (Visual SLAM)

представляє собою технологію одночасного визначення положення камери та побудови тривимірної карти оточуючого середовища виключно на основі візуальної інформації [26, 10, 3]. На відміну від традиційного SfM, який виконує обробку ретроспективно після завершення збору даних, Visual SLAM працює в режимі реального часу, що робить його придатним для автономної навігації БПЛА в умовах відсутності ГНСС-сигналу.

Фундаментальна відмінність між Visual SLAM та класичною фотограмметрією полягає у підході до невизначеності. Якщо фотограмметрія намагається мінімізувати сумарну похибку після збору всіх даних через глобальну оптимізацію (bundle adjustment), то SLAM виконує послідовну оцінку стану системи, інкрементально оновлюючи положення камери та карту при надходженні кожного нового кадру [26, 10].

Сучасні реалізації Visual SLAM для БПЛА базуються на кількох ключових підходах:

МОНОКУЛЯРНИЙ VISUAL SLAM. Системи, що використовують одну камеру, такі як ORB-SLAM2 та ORB-SLAM3, досягли значних успіхів у точності та ефективності [26]. Монокулярний підхід привабливий для БПЛА через мінімальні вимоги до обладнання – потрібна лише звичайна камера. Однак ці системи не можуть визначити абсолютний масштаб сцени без додаткової інформації, що обмежує їхнє застосування у фотограмметрії [10].

СТЕРЕО ТА RGB-D VISUAL SLAM. Використання стереопари камер або RGB-D сенсорів (камера з вимірюванням глибини) усуває проблему невизначеності масштабу. Системи такого типу можуть безпосередньо визначати метричну відстань до об'єктів, що критично важливо для створення геометрично коректних ортомозаїк [26, 3].

ВІЗУАЛЬНО-ІНЕРЦІЙНА ОДОМЕТРІЯ (VIO). Інтеграція даних від інерційних вимірювальних модулів (IMU) з візуальною інформацією значно покращує надійність та точність Visual SLAM [3]. IMU забезпечує вимірювання прискорень та кутових швидкостей з високою частотою дискретизації (зазвичай 200-1000 Гц), що дозволяє компенсувати швидкі рухи БПЛА та заповнювати пропуски в візуальних вимірюваннях [26]. Сучасні VIO-системи, такі як VINS-Mono, демонструють точність локалізації на рівні 1-2% від пройденої відстані у GNSS-denied середовищах [26, 3].

Дослідження показують, що Visual SLAM може забезпечити позиційну точність порядку 1 метра в реальному часі для типових траєкторій польоту БПЛА [26, 10]. Однак досягнення такої точності вимагає виконання кількох умов: наявності достатньої кількості візуальних особливостей у сцені, стабільного освітлення, та відсутності швидких або різких рухів камери, які можуть призвести до втрати відстеження (tracking loss) [3].

Важливим обмеженням Visual SLAM є накопичення похибки (drift) при тривалих траєкторіях. Відносна похибка зростає приблизно пропорційно до квадратного кореня від пройденої відстані, що для польотів тривалістю кілька хвилин може призвести до зміщення на десятки метрів [10, 3]. Для мінімізації дрейфу застосовуються методи замикання циклів (loop closure), які розпізнають раніше відвідані локації та виконують глобальну корекцію траєкторії [26].

Практичне застосування Visual SLAM для створення ортомозаїки вимагає розв'язання проблеми географічної прив'язки. Оскільки Visual SLAM працює у відносній системі координат, для отримання географічно прив'язаної ортомозаїки необхідні принаймні кілька контрольних точок з відомими координатами або інтеграція з іншими джерелами позиційної інформації [23, 10].

Машинне навчання для геоприв'язки

Застосування методів машинного навчання, особливо глибоких нейронних мереж, відкриває нові можливості для вирішення традиційних задач фотограмметрії. Два основні напрямки використання машинного навчання у

контексті створення ортомозаїки включають: виявлення спотворення ГНСС-даних та автоматичну геоприв'язку через співставлення з референсними даними.

ВИЯВЛЕННЯ ГНСС-СПУФІНГУ ТА АНОМАЛІЙ НАВІГАЦІЙНИХ ДАНИХ. ГНСС-спуфінг – підміна справжнього супутникового сигналу хибним – представляє серйозну загрозу для безпеки БПЛА та достовірності створюваних картографічних продуктів [23, 10]. Традиційні методи виявлення спуфінгу базуються на аналізі консистентності прийнятих сигналів, але часто виявляються недостатньо чутливими або створюють велику кількість хибних спрацьовувань.

Сучасні підходи на основі глибокого навчання аналізують часові ряди навігаційних даних (координати, швидкості, прискорення) та візуальну інформацію для виявлення аномальних патернів [23, 3]. Нейронні мережі, навчені на великих датасетах нормальних та аномальних траєкторій, здатні виявляти спуфінг з точністю понад 95% та часом відгуку менше 100 мілісекунд [23]. Це дозволяє системі в реальному часі переключатися на альтернативні методи навігації при виявленні компрометації ГНСС-даних.

Особливо перспективним є підхід на основі адаптивних фільтрів Калмана (Adaptive Extended Kalman Filter, АЕКФ), де параметри фільтра динамічно коригуються на основі оцінки надійності навігаційних даних, виконаної нейронною мережею [3]. Дослідження демонструють, що такі системи можуть підтримувати точність локалізації на рівні 10-20 см навіть при наявності короткочасних спотворень ГНСС-сигналу [3].

ГЕОПРИВ'ЯЗКА ЧЕРЕЗ СПІВСТАВЛЕННЯ З СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ. Альтернативний підхід до визначення географічного положення БПЛА базується на порівнянні аерознімків з геоприв'язаними супутниковими зображеннями або попередньо створеними ортофотопланами [23, 19]. Ця задача, відома як cross-view geo-localization, є надзвичайно складною через значні відмінності в ракурсі, масштабі, освітленні та сезонних змінах між аерознімками та супутниковими даними.

Прорив у цій області відбувся завдяки застосуванню згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Networks, CNN), які навчаються вилучати інваріантні до умов зйомки візуальні дескриптори [19]. Сучасні архітектури, такі як NetVLAD та GeM (Generalized Mean Pooling), досягають точності локалізації 10-50 метрів на тестових датасетах з різноманітними умовами зйомки [23, 19].

Особливо важливим для військового застосування є здатність таких систем працювати з частково оклюдованими сценами (наприклад, через хмарність або дим) та в умовах сезонних змін ландшафту. Дослідження показують, що CNN-методи значно перевершують традиційні підходи на основі ручних дескрипторів (SIFT, SURF) у таких складних умовах, забезпечуючи точність локалізації достатню для створення ортомозаїки з похибкою геоприв'язки менше 20 метрів [23, 19].

АВТОМАТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ GCP. Традиційний процес встановлення наземних опорних точок є трудомістким та небезпечним в умовах бойових дій. Методи машинного навчання дозволяють автоматично ідентифікувати стабільні природні або штучні орієнтири на аерознімках та супутникових зображеннях, які можуть слугувати як віртуальні опорні точки [23, 6].

Такий підхід передбачає використання об'єктних детекторів (наприклад, на базі архітектур YOLO або Faster R-CNN) для виявлення характерних об'єктів – перехресть доріг, кутів будівель, мостів тощо. Після виявлення цих об'єктів на обох типах зображень застосовуються методи точного встановлення відповідності для визначення їхніх координат [23, 6]. Експериментальні дослідження показують, що автоматично визначені віртуальні GCP можуть забезпечити точність геоприв'язки порівнянну з ручним вимірюванням традиційних опорних точок [6].

Методи валідації точності ортомозаїки

Валідація точності ортомозаїки є критично важливою для підтвердження придатності картографічних продуктів для конкретних застосувань. Традиційний підхід базується на використанні незалежних контрольних точок (check points), координати яких визначені з високою точністю і не використовувалися в процесі геоприв'язки ортомозаїки [25, 27, 28].

МЕТОД КОНТРОЛЬНИХ ТОЧОК ТА RMSE. Найпоширенішим показником точності є середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error, RMSE), що обчислюється як корінь квадратний з середнього квадрату різниць між виміряними та еталонними координатами контрольних точок [25, 27, 9]:

$$RMSE_{xy} = \sqrt{\left[\frac{\Sigma(X_{\text{ортомозаїка}} - X_{\text{еталон}})^2 + \Sigma(Y_{\text{ортомозаїка}} - Y_{\text{еталон}})^2}{n} \right]} \quad (1.3)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\left[\frac{\Sigma(Z_{\text{ортомозаїка}} - Z_{\text{еталон}})^2}{n} \right]} \quad (1.4)$$

де n – кількість контрольних точок.

Дослідження вказують на необхідність мінімум 10-15 рівномірно розподілених контрольних точок для надійної оцінки точності ортомозаїки площею декілька квадратних кілометрів [27, 28, 9]. Розташування контрольних точок має критичне значення, концентрація точок в одній частині території може призвести до оптимістичних оцінок точності, що не відображають реальну ситуацію в інших частинах [9, 18].

ПОРІВНЯННЯ З СУПУТНИКОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ. В умовах, коли встановлення наземних контрольних точок неможливе або небезпечне, альтернативним підходом є порівняння ортомозаїки БПЛА з геоприв'язаними супутниковими зображеннями високої роздільності [17, 21, 14]. Цей метод передбачає візуальну ідентифікацію однакових об'єктів на обох типах зображень та вимірювання зміщення між ними.

Для кількісної оцінки зміщення використовують кореляційні методи або детектори особливих точок. Після встановлення відповідностей між

характерними об'єктами на ортомозаїці та супутниковому знімку обчислюють вектори зміщення та їхню статистику [17, 21]. Такий підхід дозволяє не тільки оцінити середню похибку геоприв'язки, але й виявити систематичні спотворення – зміщення, поворот, зміну масштабу [21, 14].

Точність цього методу залежить від розрізнення референсних супутникових зображень. Використання даних з роздільністю 0.3-0.5 метра (наприклад, від супутників WorldView або GeoEye) дозволяє оцінити точність геоприв'язки ортомозаїки БПЛА з похибкою близько 0.5-1 метра [17, 21]. Для військових застосувань доступні ще більш деталізовані супутникові знімки, що забезпечує можливість більш точної валідації [14].

МЕТОД ПОРІВНЯННЯ ХМАР ТОЧОК (МЗС2). Для оцінки вертикальної точності та виявлення локальних спотворень застосовується метод багатомасштабного порівняння хмар точок (Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison, МЗС2) [25, 34]. Цей підхід дозволяє виявити систематичні похибки у цифровій моделі рельєфу, які можуть бути не помітними при аналізі окремих контрольних точок.

МЗС2 обчислює відстані між відповідними точками двох хмар точок вздовж локальної нормалі до поверхні, що робить метод менш чутливим до шуму та дозволяє виявити реальні геометричні відмінності [25, 34]. Статистичний аналіз розподілу цих відстаней дає можливість оцінити точність та виявити зони з підвищеними похибками, що може вказувати на проблеми в процесі фотограмметричної обробки [34].

АНАЛІЗ ВНУТРІШНЬОЇ УЗГОДЖЕНОСТІ. Додатковим індикатором якості ортомозаїки є аналіз внутрішньої узгодженості перекриваються ділянок [15]. У зонах подвійного або потрійного перекриття знімків незалежні оцінки висоти поверхні мають бути узгодженими. Статистика розбіжностей у зонах перекриття характеризує стабільність фотограмметричного рішення та може виявити проблеми з калібруванням камери або недостатню кількість зв'язуючих точок [15].

Сучасні дослідження рекомендують комплексний підхід до валідації, що поєднує кілька незалежних методів. Це дозволяє отримати всебічну оцінку якості ортомозаїки та підвищити впевненість у придатності продукту для конкретних застосувань [25, 27, 28].

Висновки

Аналіз сучасних тенденцій розвитку технологій створення ортомозаїки виявляє чітку спрямованість на підвищення автономності та надійності фотограмметричних систем в умовах обмеженої або відсутньої ГНСС-навігації. Visual SLAM забезпечує можливість навігації в реальному часі з точністю порядку 1 метра, що достатньо для багатьох застосувань, хоча накопичення похибки залишається проблемою для тривалих місій.

Методи машинного навчання демонструють високу ефективність у виявленні спотворень навігаційних даних та автоматичній геоприв'язці через співставлення з референсними зображеннями, досягаючи точності 10-50 метрів без використання наземних опорних точок. Розвиток методів валідації точності, особливо на основі порівняння з супутниковими даними, робить можливою об'єктивну оцінку якості ортомозаїки навіть в умовах, де традиційні польові вимірювання неможливі.

1.3. Опис технічної реалізації та апаратно-програмної архітектури БПЛА MARA

Для виконання аерофотознімальних робіт у бойових умовах з впливом засобів радіоелектронної боротьби використовується безпілотний комплекс на базі розвідувального літального апарату "Мара-2" виробництва компанії MARA-DRONE (Україна) з обладнанням для геодезичного фотограмметричного знімання. Комплекс призначений для створення топографічних планів та ортофотопланів місцевості в умовах, де традиційні методи польових вимірювань утруднені або неможливі через бойові дії.

1.3.1. Характеристики безпілотного літального апарату "Мара-2"

Безпілотний літальний апарат "Мара-2" розроблений українською компанією MARA-DRONE (раніше ТОВ "Карболайн", м. Харків) спеціально для розвідувальних місій у складних умовах бойових дій [2]. БПЛА активно експлуатується силами оборони України з 2014 року, зарекомендувавши себе як надійний засіб для збору оперативної інформації про місцевість. За час бойового застосування комплекс "Мара" налічив понад 10 000 годин нальоту, що підтверджує його високу експлуатаційну надійність.

Конструкція та маса

БПЛА "Мара-2" (рис. 1.1) виконаний за аеродинамічною схемою "літакового типу" з електричним приводом. Злітна маса апарату становить 2,5 кг, що робить його легким та мобільним для розгортання в польових умовах. Розмах крила літального апарату становить 1,95 м, загальні габарити — приблизно 1,9 × 1,1 м [2]. Конструкція виконана з композитних матеріалів, що забезпечує необхідну міцність при мінімальній вазі.



Рисунок 1.1. Зовнішній вигляд БПЛА Мара-2

Повний комплекс "Мара-2" для розгортання у польових умовах включає два безпілотні літальні апарати (без корисного навантаження), два модулі

корисного навантаження (камера аерофотознімання та камера спостереження), наземну станцію керування "МАРА-НСУ22", чотири уніфіковані акумуляторні батареї, антенний термінал з триногою та 10-метровим кабелем, захищений ноутбук, зарядний пристрій для батарей, комплект запасних частин та транспортний рюкзак. Маса повного комплексу становить близько 20 кг, що дозволяє одному оператору самостійно транспортувати та розгортати систему [2]

Льотні характеристики

Тривалість польоту БПЛА "Мара-2" становить від 90 до 120 хвилин в залежності від режиму експлуатації та корисного навантаження [32]. Максимальна швидкість польоту досягає 90-100 км/год, що забезпечує оперативне прибуття у заданий район [32]. Крейсерська швидкість під час виконання фотограмметричних робіт становить 35-80 км/год. Дальність дії каналу зв'язку досягає 50 км, що дозволяє виконувати місії на значній відстані від наземної станції керування. Максимальна довжина маршруту може становити до 150 км.

Робоча висота польоту становить до 1000 м, що є оптимальною для виконання топографічних зйомок [2]. При цьому максимальна висота підйому може досягати 3000 м. Оператори БПЛА зазначають, що оптимальна висота для аерофотознімання у практичних умовах становить близько 400 м, що забезпечує необхідну просторову розрізненість при достатній продуктивності знімання. Літальний апарат здатний працювати в умовах вітрового навантаження до 20 м/с.

Система живлення

Силова установка БПЛА "Мара-2" представлена малошумним електричним двигуном, що забезпечує низьку акустичну помітність апарату [2, 32]. Живлення здійснюється від літій-полімерних акумуляторних батарей напругою 22,2 В ємністю 233 Вт·год. Акумулятори придатні як для живлення БПЛА, так і для роботи наземної станції керування. Час автономної роботи наземної станції керування від одного акумулятора становить до 6 годин [32].

Наземна станція також може живитися від джерела постійного струму напругою 10-30 В.

Корисне навантаження

БПЛА "Мара-2" має модульну архітектуру корисного навантаження, що дозволяє швидко змінювати обладнання залежно від характеру завдання. Базова конфігурація включає електро-оптичну/інфрачервону систему спостереження на стабілізованому підвісі для проведення розвідки у денний та нічний час. Доступні варіанти обладнання включають денну відеокамеру зі змінною фокусною відстанню, камеру з фіксованим фокусом, а також мультисенсорні модулі[32].

Для виконання геодезичних робіт використовується спеціалізований модуль корисного навантаження, що включає картографічну фотокамеру для аерофотознімання та відеокамеру спостереження, які працюють одночасно [2]. Просторова розрізненість знімків досягає 5 см/піксель, що відповідає вимогам для створення топографічних планів масштабу 1:500. Площа території, що може бути знята за один політ, становить до 400 гектарів. Всі знімки автоматично позначаються ГНСС-координатами центрів цифрового знімання.

Стійкість до радіоелектронної боротьби та автономність

Критично важливою особливістю БПЛА "Мара-2" є стійкість до засобів радіоелектронної боротьби, що підтверджується численними джерелами [2]. У разі втрати зв'язку з наземною станцією керування внаслідок впливу РЕБ або природних перешкод, літальний апарат автономно продовжує виконання запрограмованого маршруту та повертається у точку старту після завершення місії. Канали зв'язку захищені шифруванням, що унеможливорює перехоплення управління або отриманих даних противником.

Система навігації включає ГНСС-приймач для визначення координат, однак при його «придушенні» засобами РЕБ літальний апарат здатний продовжувати політ з використанням інерційної навігаційної системи. Літальний апарат має низьку радіолокаційну та теплову помітність завдяки композитній

конструкції та малошумному електричному двигуну, що ускладнює його виявлення засобами протиповітряної оборони.

Експлуатаційні характеристики

Запуск БПЛА "Мара-2" здійснюється вручну одним оператором без потреби у злітно-посадковій смузі. Час розгортання комплексу від транспортного положення до готовності до виконання місії становить близько 6 хвилин при роботі одного оператора. Основні технічні характеристики БПЛА "Мара-2" наведені у табл. 1.1

Таблиця 1.1.

Основні технічні характеристики БПЛА "Мара-2"

Параметр	Значення
Злітна маса	2,5 кг
Розмах крила	1,95 м
Габарити	~1,9 × 1,1 м
Тривалість польоту	90–120 хв
Максимальна швидкість	90–100 км/год
Крейсерська швидкість	35–80 км/год
Дальність зв'язку	до 50 км
Довжина маршруту	до 150 км
Робоча висота	до 1000 м
Максимальна висота	до 3000 м
Напруга батареї	22,2 В
Ємність батареї	233 Вт·год
Вітрове навантаження	до 20 м/с
Просторова роздільна здатність	від 5 см/пікс
Площа зйомки за політ	до 400 га
Час розгортання	~6 хв

Літальний апарат здатний виконувати місії у денний та нічний час доби при обладнанні відповідними сенсорами[2].

1.3.2. Характеристики цифрової камери ADTi Surveyor Lite 26S v2

Для виконання аерофотознімальних робіт на БПЛА "Мара-2" використовується спеціалізована камера ADTi Surveyor Lite 26S v2 виробництва компанії ADTi Camera (Польща) [2]. Камера розроблена спеціально для застосування на безпілотних літальних апаратах і оптимізована для створення ортофотопланів та тривимірних моделей місцевості методами фотограмметрії.

Сенсор зображення

В основі камери лежить матричний CMOS-сенсор Sony IMX571BQR формату APS-C з технологією зворотнього підсвічування (BSI – Back-Side Illuminated) [5, 31]. Ефективна розрізненість сенсора становить 26,11 мегапікселів з матрицею 6252×4176 пікселів. Фізичний розмір сенсора становить $23,5 \times 15,7$ мм.

Критично важливим параметром для фотограмметричних розрахунків є розмір пікселя, який становить $3,76 \times 3,76$ мкм. Цей параметр верифіковано двома незалежними методами: безпосередньо з офіційного технічного документа Sony IMX571BQR Flyer [31] та розрахунковим шляхом ($23,5$ мм / 6252 пікселів = $0,00376$ мм). Розмір пікселя є базовим параметром для розрахунку просторової розрізненості на місцевості (GSD) за формулою:

$$GSD = \frac{(H \times p)}{f} \quad (1.5)$$

де H – висота фотографування; p – розмір пікселя; f – фокусна відстань об'єктива.

Сенсор має глибину кольору 24 біт та вбудований 16-бітний аналого-цифровий перетворювач (ADC), що забезпечує високу точність передачі яскравості та кольору об'єктів. На матриці відсутній фільтр згладжування (anti-aliasing filter), що максимізує чіткість зображення, критичну для виявлення дрібних деталей місцевості [5].

Об'єктив

Камера комплектується фіксованим об'єктивом з фокусною відстанню 25 мм, що еквівалентно 37,5 мм для повнокадрового сенсора. Апертура об'єктива становить $f/5.6$ і є фіксованою, що спрощує калібрування камери та забезпечує стабільність оптичних параметрів. Фокусування виконане по типу "ortho" з фіксацією на нескінченність, що оптимально для аерофотознімання з висот понад 50 м[5].

Кут поля зору об'єктива становить $58,7^\circ$ по діагоналі, $50,0^\circ$ по горизонталі та $34,4^\circ$ по вертикалі. Дисторсія об'єктива не перевищує 0,5%. Маса об'єктива становить 25,8-34 г залежно від варіанту виконання[5].

Затвор та режими зйомки

Критично важливою особливістю камери ADTi Surveyor 26S v2 є застосування механічного глобального міжлінзового затвора, що повністю усуває ефект Rolling Shutter (спотворення рухомих об'єктів при послідовному зчитуванні рядків матриці)[5]. Це особливо важливо для аерофотознімання з рухомого носія, де будь-які спотворення геометрії призводять до похибок фотограмметричної обробки.

Діапазон витримки затвора становить від 1/100 до 1/10000 с, що дозволяє адаптувати експозицію до різних умов освітлення та швидкості польоту. Мінімальний інтервал між послідовними знімками становить 0,5 с, що забезпечує необхідне перекриття знімків при крейсерській швидкості польоту 35-80 км/год.

Файли зображень зберігаються у форматі JPEG, що є компромісом між якістю та об'ємом даних для передачі по радіоканалу з обмеженою пропускнуою здатністю. У базовій конфігурації підтримка формату RAW відсутня, однак для більшості топографічних застосувань формат JPEG забезпечує достатню якість.

Фізичні характеристики та інтерфейси

Загальна маса камери з об'єктивом становить 110 г. Корпус камери виготовлений з алюмінію, що забезпечує необхідну жорсткість конструкції при мінімальній вазі.

Обробка зображень виконується спеціалізованим процесором Socionext Milbeaut, оптимізованим для роботи з великими масивами даних від мегапіксельних сенсорів. Діапазон робочих температур камери становить від -10°C до $+40^\circ\text{C}$.

Живлення камери здійснюється від бортової мережі БПЛА напругою 12-28 В постійного струму. Для передачі відеосигналу у реальному часі камера обладнана виходами HDMI та Ethernet[5].

Інтеграція з системами керування

Камера ADTi Surveyor 26S v2 повністю інтегрована з протоколом обміну даними MAVlink та сумісна з автопілотами на базі ArduPilot та програмним забезпеченням планування польотів QGroundControl. Це дозволяє автоматизувати процес аерофотознімання з прив'язкою моментів експозиції до траєкторії польоту. Її основні камери наведені нижче.

Таблиця 1.2.

Технічні характеристики камери ADTi Surveyor Lite 26S v2

Параметр	Значення
Модель сенсора	Sony IMX571BQR
Тип сенсора	BSI CMOS APS-C
Роздільна здатність	26,11 МП (6252 × 4176 пікс)
Розмір сенсора	23,5 × 15,7 мм
Розмір пікселя	3,76 × 3,76 мкм
Глибина кольору	24 біт
АЦП (Аналого-цифровий перетворювач)	16-біт
Фокусна відстань	25 мм
Апертура (діафрагма)	f/5.6 (фіксована)
Кут поля зору (діагональний)	58,7°
Кут поля зору (горизонтальний)	50,0°
Кут поля зору (вертикальний)	34,4°
Дисторсія	<0,5%
Тип затвора	Механічний глобальний (Global Shutter)
Діапазон витримки	1/100 – 1/10000 с
Мінімальний інтервал зйомки	≥0,5 с
Формат файлів	JPEG
Маса (з об'єктивом)	110 г
Матеріал корпусу	Алюміній
Процесор обробки зображень	Socionext Milbeaut
Робочі температури	-10°C до +40°C
Живлення	12–28 В DC
Інтерфейси	HDMI, Ethernet
Протоколи керування	MAVlink, ArduPilot
Геотегування	Сумісність з PPK/RTK

Камера підтримує режими геотегування зображень з можливістю постобробки кінематики (PPK – Post-Processed Kinematic) та кінематики у реальному часі (RTK – Real-Time Kinematic)[5]. При використанні PPK/RTK координати центрів цифрового знімання визначаються з точністю 1-3 см у плані

та 2-6 см по висоті, що дозволяє значно зменшити кількість наземних опорних точок або повністю відмовитися від них при певних застосуваннях.

1.3.3. Системи навігації та визначення положення

Точність визначення координат центрів цифрового знімання є критично важливим фактором для створення ортофотопланів методом прямого геопросторового прив'язування без щільної мережі наземних опорних точок. Сучасні безпілотні системи використовують інтеграцію супутникових навігаційних систем (ГНСС) та інерціальних вимірювальних блоків (IMU) для забезпечення необхідної точності у складних умовах експлуатації.

Супутникові навігаційні приймачі

Для стандартної навігації безпілотних літальних апаратів широко застосовуються приймачі серії u-blox NEO-M8N, що забезпечують прийом сигналів від глобальних навігаційних супутникових систем ГНСС, GLONASS, Galileo та BeiDou. Характеристики приймача u-blox NEO-M8N наведені в таблиці 1.3

Таблиця 1.3.

Характеристики приймача u-blox NEO-M8N

Параметр	Значення
Точність позионування (автономний режим)	Горизонталь: ~2,5 м Висота: ~4,0 м
Максимальна частота оновлення	до 18 Гц
Кількість каналів відстеження	72
Чутливість	Відстеження: -167 дБм Холодний старт: -148 дБм
Час першої фіксації (TTFF)	Холодний старт: 26 с Теплий старт: 2 с Гарячий старт: 1 с
Енергоспоживання	23 мА (при напрузі 3,0 В)

Для геодезичних застосувань, що вимагають сантиметрової точності, використовуються приймачі геодезичного класу u-blox ZED-F9P з підтримкою режимів RTK та PPK (для цивільних мсій).

Таблиця 1.4.

Технічні характеристики ГНСС-приймача u-blox ZED-F9P (RTK/PPK)

Параметр	Значення
Точність RTK (Кінематика в реальному часі)	0,01 м + 1 ppm (1–3 см горизонталь, 2–6 см висота)
Час збіжності RTK	<10 секунд
Максимальна частота оновлення	до 20 Гц
Кількість каналів відстеження	184
Підтримка навігаційних систем	ГНСС, GLONASS, Galileo, BeiDou, NavIC
Протидія перешкодам	Вбудована система антиспуфінгу (OSNMA для Galileo)
Енергоспоживання	68 мА (при напрузі 3,0 В)

Це дозволяє скоротити кількість наземних опорних точок.

Інерційний вимірювальні блоки

Інерційні вимірювальні блоки (IMU) забезпечують вимірювання кутової швидкості та лінійного прискорення літального апарату, що необхідно для стабілізації польоту та визначення орієнтації камери у момент експозиції. Сучасні IMU для безпілотних систем базуються на мікроелектромеханічних системах (MEMS).

Широко застосовуваним 9-вісним IMU є TDK InvenSense ICM-20948, що прийшов на зміну застарілому MPU-9250 [2]

Параметр	Значення
Гіроскоп (3-вісний)	Діапазон вимірювань: $\pm 250^\circ/\text{с}$ до $\pm 2000^\circ/\text{с}$
Акселерометр (3-вісний)	Діапазон вимірювань: $\pm 2\text{g}$ до $\pm 16\text{g}$
Магнітометр (3-вісний)	Вбудований електронний компас
Роздільна здатність АЦП	16-біт
Енергоспоживання	На 1/3 менше, ніж у попередніх моделей

Інерційні дані використовуються для компенсації вібрацій та коливань літального апарату, а також для визначення кутів орієнтації (крен, тангаж, курс) камери у момент зйомки. Інтеграція ГНСС та IMU за допомогою фільтра Калмана дозволяє отримати оптимальну оцінку траєкторії польоту навіть при короткочасній втраті супутникового сигналу.

Автопілоти для безпілотних літальних апаратів

Інтеграцію сенсорів навігації та керування літальним апаратом виконує автопілот – бортовий обчислювальний модуль з вбудованими сенсорами та програмним забезпеченням для автоматичного керування [29]. Найбільш поширеним автопілотом для літаків типу "літаюче крило" є Pixhawk 4, що

працює під управлінням відкритого програмного забезпечення ArduPilot або PX4 [29].

Таблиця 1.5.

Технічні характеристики автопілота Pixhawk 4

Параметр	Значення
Головний процесор	STM32F765 ARM Cortex-M7 (216 МГц)
Система IMU	Подвійна: ICM-20689 + BMI055
Резервування IMU	Апаратне резервування (Dual IMU)
Барометричний висотомір	MS5611
Підтримка навігації	ГНСС, RTK, PPK
Інтерфейси зв'язку	MAVlink, UAVCAN
Вага модуля	~15 г

Автопілот виконує стабілізацію польоту, автоматичне проходження маршруту, керування моментами знімання камери відповідно до заданих параметрів перекриття знімків. При втраті зв'язку з наземною станцією автопілот переводить літальний апарат у режим автоматичного повернення на точку старту.

Особливості навігації у умовах радіоелектронної боротьби

Українські розробники безпілотних систем приділяють особливу увагу забезпеченню працездатності навігації в умовах придушення ГНСС-сигналу засобами радіоелектронної боротьби. Прикладом є система "Лелека-100" виробництва компанії DeViro [1]. При втраті ГНСС-сигналу внаслідок дії РЕБ система автоматично переходить на інерційну навігацію, що дозволяє продовжити виконання місії та повернутися на базу.

Накопичення похибки інерціальної навігаційної системи (ІНС) відбувається за законом:

$$\delta r(t) \approx 0,5 \times a_{bias} \times t^2 \quad (1.6)$$

де $\delta r(t)$ – похибка визначення положення; a_{bias} – систематична похибка акселерометра; t – час автономної навігації.

Таблиця 1.6.

Характеристики навігаційних систем

Параметр	u-blox NEO-M8N	u-blox ZED-F9P
Тип	Стандартний ГНСС	Геодезичний RTK/PPK

Точність (автономний)	~2,5 м (горизонталь)	~2,5 м (горизонталь)
Точність (RTK)	–	1–3 см (горизонталь), 2–6 см (висота)
Час збіжності RTK	–	<10 с
Частота оновлення	до 18 Гц	до 20 Гц
Кількість каналів	72	184
Підтримувані системи	GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou	GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/NavIC
Чутливість (відстеження)	-167 дБм	-167 дБм
Споживання енергії	23 мА @ 3,0 В	68 мА @ 3,0 В
Захист від спуфінгу	Ні	Так (OSNMA)

Для сучасних MEMS-акселерометрів з систематичною похибкою порядку $0,01 \text{ м/с}^2$ похибка за 5 хвилин автономного польоту становитиме близько 450 м, що є прийнятним для повернення у район точки старту з подальшим відновленням ГНСС-сигналу на висоті після виходу з зони дії РЕБ.

1.3.4. Системи радіозв'язку та протидії радіоелектронній боротьбі

Надійний канал зв'язку між безпілотним літальним апаратом та наземною станцією керування є критично важливим для виконання тривалих місій аерофотознімання. В умовах бойових дій особливого значення набуває стійкість каналу зв'язку до засобів радіоелектронної боротьби противника.

Частотні діапазони для керування БПЛА

Більшість українських безпілотних літальних апаратів розвідувального призначення традиційно працюють у діапазоні 850-930 МГц, який є основною ціллю для російських систем РЕБ. Типові частотні діапазони наведені у таблиці 1.7

Таблиця 1.7.

Типові частотні діапазони та їх характеристики:

Частотний діапазон	Призначення	Типова дальність	Ключова характеристика
433 МГц	Телеметрія та керування	5–10 км	Гарне проникнення крізь перешкоди (низька частота)
900 МГц (850–930 МГц)	Основний канал керування (C&C)	15–40+ км	Далекобійний, використовується в ISM-діапазоні (Індустріальний, науковий, медичний)
2,4 ГГц	Керування та відео	2–5 км	Універсальний, але схильний до перешкод через переважаність (Wi-Fi, Bluetooth)

5,8 ГГц	Передача HD-відео (FPV)	1–5 км	Висока пропускна здатність, менше перешкод, ніж на 2,4 ГГц
6,7–7,2 ГГц	Стійкий канал керування	Висока (з ретрансляторами)	Новітній діапазон, застосовується з 2024 р. для підвищення стійкості до РЕБ

Станом на грудень 2024 року українські сили почали впроваджувати FPV-дрони, що працюють у діапазоні 6,7-7,2 ГГц, який не покривається російськими детекторами та пригнічувачами, налаштованими на роботу до 6,0 ГГц [12].

Технології протидії перешкодам

Для забезпечення стійкості каналу зв'язку до перешкод застосовуються технології розширення спектру сигналу.

Псевдовипадкова зміна робочої частоти (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum) передбачає швидке переключення несучої частоти між багатьма каналами за заздалегідь визначеним алгоритмом [12]. Швидкість зміни може досягати 20 000 змін на секунду. Оператор РЕБ-перешкод повинен одночасно пригнічувати всі канали, що вимагає значно більшої потужності, ніж придушення одного фіксованого каналу. Ефективність FHSS підтверджена тестуванням БПЛА AtlasPRO з системою "smart-hopping" поблизу Бахмута [12].

Розширення спектру прямою послідовністю (DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum) полягає у множенні сигналу на псевдовипадкову послідовність, що розподіляє його по широкому спектру частот [12]. Для приймача, що знає послідовність, сигнал концентрується назад у вузьку смугу, тоді як для постановника перешкод сигнал виглядає як низькопотужний шум, розподілений по всьому спектру.

Розділ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ СТВОРЕННЯ ОРТОМОЗАЇКИ ЗА ДАНИМИ БПЛА "МАРА-2"

2.1. Планування та виконання аерофотознімання

Планування місії аерофотознімання у бойових умовах з впливом засобів радіоелектронної боротьби вимагає ретельного балансу між технічними вимогами до якості картографічних продуктів та обмеженнями, накладеними оперативною обстановкою. На відміну від цивільних застосувань, де можливе повторне виконання польотів для усунення недоліків, військове картографування часто передбачає лише одну можливість збору даних над конкретною територією.

2.1.1. Розрахунок параметрів польоту

Визначення оптимальних параметрів польоту базується на вимогах до просторової розрізненості ортомозаїки та технічних характеристиках обладнання, описаних у підрозділі 1.3.2. Ключовим параметром є висота фотографування, від якої безпосередньо залежить просторова розрізненість на місцевості (GSD). Просторова розрізненість визначається за формулою (1.5).

Вимоги до створення топографічних планів масштабу 1:500 для потреб Збройних Сил України передбачають просторову розрізненість не гіршу за 5-7 см/піксель. Розрахунок необхідної висоти фотографування:

$$H = \frac{(GSD \times f)}{p} = \frac{(0,06 \times 0,025)}{0,00000376} \approx 398 \text{ м}$$

З урахуванням експлуатаційних характеристик БПЛА "Мара-2", описаних у підрозділі 1.3.1, оптимальна висота фотографування становить 400 м, що забезпечує $GSD = 6,02$ см/піксель при залишенні запасу потужності для подолання вітрового навантаження та виконання маневрів ухилення.

Розмір земельної ділянки, що потрапляє в один знімок, визначається кутами поля зору камери. Для поперечного кута $50,0^\circ$ та поздовжнього $34,4^\circ$ площа покриття одним знімком на висоті 400 м становить:

$$L_{\text{гориз}} = 2 \times H \times \tan\left(\frac{\alpha_{\text{попер}}}{2}\right) = 2 \times 400 \times \tan(25^\circ) = 373 \text{ м} \quad (2.1)$$

$$L_{\text{верт}} = 2 \times H \times \tan\left(\frac{\alpha_{\text{позд}}}{2}\right) = 2 \times 400 \times \tan(17,2^\circ) = 248 \text{ м} \quad (2.2)$$

Площа одного знімка:

$$S = 373 \times 248 \approx 92\,500 \text{ м}^2 \approx 9,25 \text{ га.} \quad (2.3)$$

Швидкість польоту обмежується двома факторами – необхідністю забезпечення витримки затвора, достатньої для усунення смазування зображення, та мінімальним інтервалом між знімками. При крейсерській швидкості 60 км/год (16,7 м/с) та мінімальному інтервалі між знімками 0,5 с літальний апарат переміщується на 8,35 м між експозиціями. Для забезпечення поздовжнього перекриття 80% відстань між центрами суміжних знімків повинна становити:

$$D_{\text{позд}} = L_{\text{верт}} \times (1 - 0,80) = 248 \times 0,20 = 49,6 \text{ м} \quad (2.4)$$

Це дозволяє виконувати знімання з частотою приблизно одного кадру на 3 секунди при швидкості 60 км/год, що цілком відповідає технічним можливостям камери.

2.1.2. Побудова маршрутів знімання

Проектування маршрутів польоту виконується з урахуванням вимог до перекриття знімків, необхідного для застосування методу Structure from Motion, описаного у підрозділі 1.1. Поздовжнє перекриття встановлюється на рівні 80%, поперечне – 85%, що забезпечує надійну ідентифікацію спільних особливостей на знімках навіть при наявності локальних спотворень або втрати окремих кадрів.

Відстань між маршрутами визначається з умови забезпечення заданого поперечного перекриття:

$$D_{\text{попер}} = L_{\text{гориз}} \times (1 - 0,85) = 373 \times 0,15 = 56 \text{ м} \quad (2.5)$$

Маршрути орієнтуються перпендикулярно до панівного напрямку вітру для мінімізації бокового зносу літального апарату. У випадках, коли топографічні умови або зона дії засобів протиповітряної оборони противника обмежують вибір напрямку маршрутів, збільшується поперечне перекриття до 90% для компенсації можливих геометричних спотворень.

Площа території, що може бути знята за один політ тривалістю 90 хвилин при швидкості 60 км/год, визначається довжиною маршруту 90 км. При ширині смуги знімання з поперечним перекриттям 85% (56 м між маршрутами) кількість маршрутів довжиною 2 км становить:

$$N_{\text{маршрутів}} = \frac{90 \text{ км}}{2 \text{ км}} = 45 \text{ маршрутів}$$

$$\text{Площа покриття} = 2000 \text{ м} \times 56 \text{ м} \times 45 = 5\,040\,000 \text{ м}^2 \approx 504 \text{ га}$$

Планування маршрутів у бойових умовах додатково враховує:

- зони дії засобів протиповітряної оборони противника (виключення з маршруту або збільшення висоти польоту);
- ймовірні напрямки артилерійського вогню (орієнтація маршрутів паралельно лінії зіткнення для мінімізації часу перебування у найнебезпечніших зонах);
- наявність природних укриттів для зниження радіолокаційної помітності на окремих ділянках маршруту.

2.1.3. Умови та параметри аерознімання

Аерознімання виконувалось у жовтні 2024 року в другій половині дня на території, де здійснювались бойові дії. Специфічні умови проведення робіт

визначались як природними факторами, так і впливом активних засобів електронної боротьби.

Метеорологічні умови зйомки характеризувались сонячною погодою з вітром швидкістю 7–9 м/с та поривами до 13 м/с. Такі вітрові умови перебували на межі допустимих для польотів легкого розвідувального БПЛА "Мара-2" та впливали на стабільність платформи під час знімання. Підвищена швидкість вітру призводила до необхідності коригування параметрів польоту в реальному часі та ускладнювала утримання заданої траєкторії маршрутів. Проте сонячна погода забезпечувала сприятливі умови освітлення для якісного фотографування місцевості з достатнім контрастом та деталізацією об'єктів.

Найбільш критичним фактором виконання зйомки була дія засобів електронної боротьби, що періодично впливала на роботу системи ГНСС БПЛА на окремих ділянках маршрутів. Характерним проявом впливу РЕБ було спотворення або повна втрата супутникового сигналу, що унеможливило надійне визначення координат центрів фотографування та елементів зовнішнього орієнтування знімків. За оперативними даними, вплив РЕБ мав непостійний характер, з чергуванням періодів нормального прийому ГНСС-сигналу та інтервалів його придушення або спотворення. Точні параметри впливу РЕБ не документувались з міркувань безпеки, проте результати зйомки свідчать про значну кількість знімків, для яких координати та висота польоту не були записані або мають очевидно спотворені значення.

Аерознімання виконувалось ймовірно в комбінованому режимі керування БПЛА. Початок польотів міг здійснюватись в автоматичному режиму за запрограмованими маршрутами, проте за умов впливу РЕБ оператор змушений був переходити на ручне керування для забезпечення безпеки польоту та виконання завдання. Такий перехід між режимами керування призвів до нерегулярності траєкторії польоту та варіативності параметрів знімання порівняно з ідеальними умовами планового аерофотознімання.

Висота польоту становила від 400 до 500 метрів над поверхнею землі. Варіативність висоти пояснюється декількома факторами. По-перше, виконання зйомки здійснювалось протягом декількох стартів БПЛА (орієнтовно 2–3 старту), що могло передбачати дещо різні висоти для різних етапів роботи залежно від тактичної ситуації та умов спостереження. По-друге, за відсутності стабільного ГНСС-сигналу точне утримання заданої висоти ускладнювалось, що призводило до природних коливань висоти польоту під час виконання маршрутів.

За розрахунковим значенням GSD для висоти 400–500 м та характеристик камери ADTi Surveyor Lite 26S v2 (фокусна відстань 25 мм, розмір пікселя матриці 3.76 мкм) просторова роздільність знімків на місцевості мала становити від 6.02 до 7.52 см/піксель. Результиуюча ортомозаїка, створена в Agisoft Metashape, має просторову роздільність 6.07 см/піксель, що відповідає усередненим умовам зйомки та підтверджує коректність виконаних вимірювань висоти польоту.

Параметри перекриття знімків проектувались виходячи з вимог забезпечення надійної фотограмметричної обробки в програмному забезпеченні Agisoft Metashape методами Structure from Motion. Поздовжнє перекриття знімків становило приблизно 80%, що забезпечує достатню кількість спільних точок між послідовними знімками для автоматичного зіставлення та визначення елементів взаємного орієнтування. Поперечне перекриття між суміжними маршрутами становило близько 60.

Фактична кількість знімків та їх розподіл по маршрутах визначались оперативною ситуацією та не відповідали строгому плановому аерозніманню. Значна частина знімків не мала записаних координат центрів фотографування та висоти польоту через вплив РЕБ на роботу приймача ГНСС. Це створило основну технічну проблему, для вирішення якої застосовувались методи фотограмметричної обробки без використання зовнішніх навігаційних даних.

Описані умови зйомки є типовими для застосування безпілотних розвідувальних систем на лінії бойового зіткнення, де необхідність отримання актуальної геопросторової інформації поєднується з технічними обмеженнями, викликаними активною протидією засобами РЕБ.

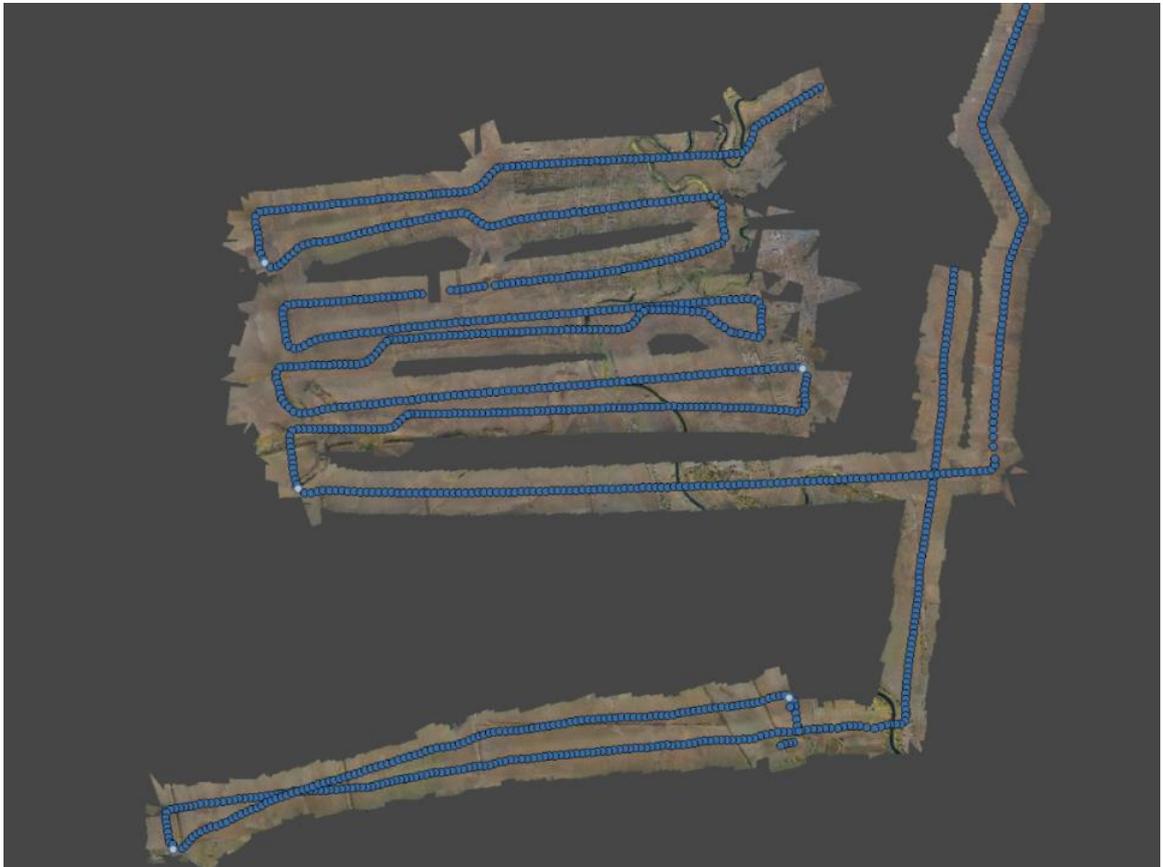


Рисунок 2.1. Схема траєкторії та охоплення аерознімання

Очевидно що в умовах РЕБ досить складно витримати класичну схему аерознімання. З рисунку бачимо що між маршрутне перекриття та прямолінійність маршрутів не є стабільними. Було виконано декілька місій, одна площинна та дві лінійні.

2.1.4. Аналіз отриманих даних

Первинний аналіз зібраних аерознімків виконується безпосередньо після завершення місії для оцінки повноти покриття території та придатності даних до фотограмметричної обробки. Перевірка включає:

1. Кількісна оцінка повноти покриття. Співставлення кількості отриманих знімків з розрахунковою кількістю для заданої площі та параметрів перекриття. Виявлення пропусків у покритті, які можуть бути спричинені технічними збоями камери або вимушеними маневрами ухилення.

2. Аналіз якості зображень. Візуальна інспекція випадкової вибірки знімків для виявлення змазування, недоекспонування, переекспонування або інших дефектів, що можуть перешкодити автоматичному виділенню характерних точок на етапі feature extraction.

3. Інспекція EXIF-метаданих. Перевірка наявності та коректності географічних координат, висоти, часу експозиції, параметрів камери. Виявлення аномалій у координатах (різкі стрибки положення, координати поза межами очікуваного району, однакові координати для серії знімків), які можуть свідчити про вплив спуфінгу або збої бортової навігаційної системи.

Для автоматизації аналізу метаданих використовуються скрипти на мові Python з бібліотекою exiftool або piexif, які дозволяють швидко обробити сотні знімків та виявити статистичні аномалії. Типовим індикатором проблем є:

- стандартне відхилення координат, що перевищує очікуване на основі швидкості польоту та інтервалу між знімками;
- наявність кластерів знімків з ідентичними координатами;
- від'ємні значення висоти або висота, що значно відрізняється від запланованої (400 м).

2.2. Обробка аерознімків у Agisoft Metashape

Фотограмметрична обробка зібраних аерознімків виконується у програмному забезпеченні Agisoft Metashape Professional версії 2.1, яке реалізує повний цикл створення ортомозаїки від вирівнювання знімків до генерації остаточного растрового продукту. Вибір Metashape обґрунтований його широким застосуванням у військових та цивільних геодезичних організаціях

України, наявністю валідованих алгоритмів Structure from Motion та можливістю обробки даних без ГНСС-координат або з недостовірними координатами.

2.2.1. Завантаження та інспекція знімків

Імпорт аерознімків у Metashape супроводжується автоматичним зчитуванням EXIF-метаданих, включаючи параметри камери (фокусна відстань, розмір сенсора, розрізненість зображення) та географічні координати центрів знімання. Програмне забезпечення автоматично визначає модель камери на основі унікальної комбінації параметрів сенсора.

Для камери ADTi Surveyor 26S v2 критично важливим є коректне визначення розміру пікселя 3,76 мкм, верифікованого у підрозділі 1.3.2. У випадку автоматичного визначення моделі як "ADTi2625" або створення нової моделі камери необхідна ручна перевірка та корекція параметрів:

- Focal Length: 25 mm
- Pixel Width: 0.00376 mm
- Pixel Height: 0.00376 mm
- Image Width: 6252 pixels
- Image Height: 4176 pixels

Некоректне визначення розміру пікселя призводить до систематичних похибок у розрахунку просторової розрізненості та геометричних спотворень ортомозаїки. Різниця навіть на 1% у розмірі пікселя (наприклад, використання 3,80 мкм замість 3,76 мкм) призводить до помилки масштабу близько 1%, що для ортомозаїки з просторовою розрізненістю 6 см/піксель становить 0,6 мм на місцевості на кожен метр лінійних вимірювань.

Візуальна інспекція завантажених знімків виконується у вікні Photos для виявлення потенційних проблем:

- пошкоджені файли (не завантажуються або відображаються з артефактами);
- дублікати знімків з ідентичним часом експозиції;

- знімки з аномальною експозицією (повністю білі або чорні).

Такі зображення вилучаються з обробки.

Приклад окремого знімка наведений нижче на рисунку



Рисунок 2.2. Окреме зображення отримане за результатами аерознімання

В даному випадку всі зображення чіткі та не мають затемнень чи засвітлень а параметр ISO в середньому становить 200, загальна кількість знімків становить 3842.

2.2.2. Аналіз EXIF-даних та виявлення проблем з координатами

Metashape автоматично імпортує географічні координати з EXIF-тегів GPSLatitude, GPSLongitude та GPSAltitude. Однак у випадку знімання в умовах впливу РЕБ ці дані можуть бути відсутніми, недостовірними або частково пошкодженими.

Діагностика проблем з координатами виконується через інструмент Reference:

1. Перегляд координат у табличному вигляді (Reference pane) з сортуванням за широтою/довготою для виявлення аномальних значень.

2. Візуалізація розташування центрів знімання на карті-підкладці. Відхилення положення центрів від очікуваного району на кілометри однозначно вказує на спуфінг або інші проблеми ГНСС.

3. Аналіз статистики координат (середнє, стандартне відхилення, діапазон). Для польоту над територією розміром 2×3 км на висоті 400 м очікуваний діапазон координат становить приблизно $0,027^\circ$ за широтою та $0,036^\circ$ за довготою (близько 3 км з урахуванням заходів/вильотів).

У випадку виявлення недостовірних координат застосовується один з трьох підходів:

Підхід 1: Видалення всіх ГНСС-координат. Якщо координати всіх або більшості знімків є недостовірними, найбільш коректним рішенням є повне видалення географічної прив'язки (Reference → Reset → Reset Coordinates). Обробка виконується у відносній системі координат з подальшою абсолютною геоприв'язкою через співставлення з референсними даними.

Підхід 2: Селективне видалення аномальних координат. Якщо лише частина знімків має аномальні координати (наприклад, знімки з певної ділянки маршруту, де було активне придушення ГНСС), ці координати видаляються вибірково, а решта використовується як початкові наближення для bundle adjustment.

Підхід 3: Зниження ваги ГНСС-координат. У Settings → Camera Accuracy встановлюються великі значення похибок (наприклад, 100 м для горизонталі, 200 м для висоти), що інформує алгоритм оптимізації про низьку достовірність координат. Це дозволяє використати їх для приблизної локалізації блоку знімків, але не обмежує оптимізацію жорсткими зв'язками до недостовірних значень.

Для даної роботи, виконаної в умовах впливу РЕБ з відсутністю або значним спотворенням ГНСС-сигналу, застосовано Підхід 1 – повне видалення координат з подальшою валідацією точності за супутниковими знімками.

2.2.3. Вирівнювання фотографій

Етап вирівнювання (Align Photos) є ключовим у процесі фотограмметричної обробки, оскільки саме тут виконується автоматична реконструкція положень камер та розрідженої хмари точок методом Structure from Motion, детально описаним у підрозділі 1.1. З детальним звітом якості опрацювання можна ознайомитися в додатку до роботи.

Параметри обробки встановлюються наступним чином:

Accuracy: High. Цей параметр визначає, з яким масштабуванням зображень виконується пошук характерних точок. Режим High використовує повнорозмірні зображення (6252×4176 пікселів), що максимізує кількість виявлених особливостей та точність їх локалізації. Альтернативні режими (Medium, Low) зменшують розрізненість зображень у 4 та 16 разів відповідно, що прискорює обробку, але знижує точність вирівнювання.

Generic preselection: Enabled. Оскільки координати центрів знімання відсутні або недостовірні, неможливо використати Reference preselection, який обмежує пошук відповідностей лише між знімками з близькими координатами. Generic preselection застосовує евристичні методи для передвибору пар зображень на основі аналізу візуальної подібності, що значно скорочує обчислювальну складність без втрати якості результату.

Key point limit: 40,000. Максимальна кількість характерних точок, що виділяються на кожному знімку. Для знімків з багатою текстурою (міська забудова, лісові масиви) це значення є оптимальним балансом між кількістю зв'язуючих точок та часом обробки.

Tie point limit: 4,000. Максимальна кількість зв'язуючих точок між кожною парою знімків. При високому перекритті (80-85%) кількість потенційних відповідностей може досягати десятків тисяч, але обмеження до 4,000 найбільш надійних точок забезпечує стабільність bundle adjustment.

Процес вирівнювання для набору з 450 знімків (покриття території 2×3 км) на робочій станції з процесором Intel Core i7-11800H та 32 ГБ оперативної пам'яті займає приблизно 45-60 хвилин. Результатом є:

- визначені параметри зовнішнього орієнтування для кожного знімка (6 ступенів свободи: 3 координати центру проекції + 3 кути повороту);
- розріджена хмара точок (sparse point cloud), що містить положення всіх зв'язуючих точок у тривимірному просторі;
- калібровані параметри внутрішнього орієнтування камери (фокусна відстань, положення головної точки, коефіцієнти радіальної та тангенціальної дисторсії об'єктива).

2.2.4. Побудова щільної хмари точок

Розріджена хмара точок, отримана на етапі вирівнювання, містить лише ті точки, що були виділені як характерні ознаки (features) алгоритмом SIFT або аналогічними. Для створення детальної цифрової моделі поверхні необхідна значно більша щільність точок, яка досягається методами dense matching (Multi-View Stereo), описаними у підрозділі 1.1.

Параметри побудови щільної хмари:

Quality: High. Визначає розрізненість depth maps, що обчислюються для кожного знімка. Режим High використовує повнорозмірні зображення, забезпечуючи максимальну деталізацію реконструйованої поверхні. Очікувана щільність точок становить 10-50 точок на квадратний дециметр для GSD 6 см/піксель.

Depth filtering: Aggressive. Цей параметр контролює баланс між повнотою реконструкції та надійністю точок. Режим Aggressive видаляє точки з низькою фотометричною узгодженістю між знімками, що зменшує кількість шумових точок у хмарі, особливо в зонах з малоконтрастною текстурою (водні поверхні, однорідні поля). Альтернативні режими (Mild, Moderate) зберігають більше точок, але підвищують ризик артефактів.

Calculate point colors: Enabled. Кожній точці призначається RGB-колір, інтерпольований з відповідних пікселів на вихідних знімках. Це забезпечує фотореалістичність візуалізації та є критичним для подальшого формування текстурованої ортомозаїки.

Calculate point confidence: Enabled. Для кожної точки обчислюється показник достовірності на основі кількості знімків, з яких вона спостерігається, та узгодженості фотометричних вимірювань. Це дозволяє на наступних етапах фільтрувати низькодостовірні точки.

2.2.5. Побудова цифрової моделі рельєфу

Цифрова модель рельєфу (Digital Elevation Model, DEM) представляє висоту земної поверхні у регулярній растровій сітці та є необхідною для виконання ортотрансформування знімків, яке усуває спотворення, спричинені рельєфом місцевості.

Параметри побудови DEM:

Source data: Dense cloud. Модель будується на основі щільної хмари точок, оскільки вона забезпечує максимальну деталізацію рельєфу порівняно з альтернативними джерелами (Sparse cloud, Depth maps).

Interpolation: Enabled. Для пікселів растру, що не мають відповідних точок у хмарі (наприклад, через тіні або недостатнє перекриття), висота інтерполюється від сусідніх пікселів. Це забезпечує безпропускову модель рельєфу, необхідну для коректного ортотрансформування всіх ділянок знімків.

Resolution: Автоматичне визначення на основі щільності точок у хмарі. Для даних з GSD 6 см/піксель та щільністю хмари 25 точок/м² оптимальна розрізненість DEM становить близько 12 см/піксель, що забезпечує баланс між детальністю моделі рельєфу та розміром файлу.

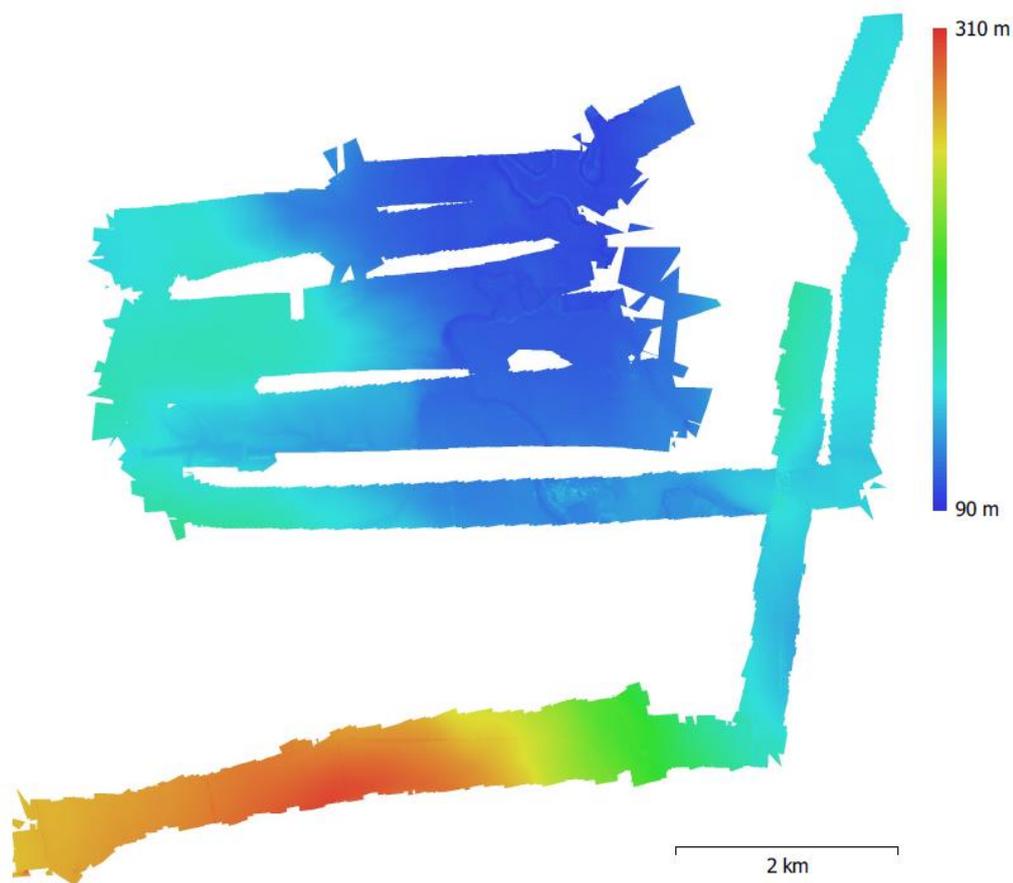


Рисунок 2.3. Цифрова модель рельєфу

На рисунку наведена отримана ЦМР за даними аерознімання.

2.2.5. Створення ортомозаїки

Побудова ортомозаїки є фінальним етапом фотограмметричної обробки, на якому окремі знімки трансформуються до ортогональної проєкції з усуненням спотворень від рельєфу та нахилу камери, після чого об'єднуються у єдине безшовне зображення.

Параметри побудови ортомозаїки:

Surface: DEM. Використовується цифрова модель рельєфу, побудована на попередньому етапі. Альтернативний варіант (Mesh) застосовується для об'єктів зі складною геометрією (будівлі з вертикальними стінами), але для топографічного картографування DEM є стандартним вибором.

Blending mode: Mosaic (default). Цей режим вибирає для кожного пікселя ортомозаїки значення з того знімка, де даний піксель розташований найближче

до центру кадру, що мінімізує спотворення від радіальної дисторсії об'єктива. Альтернативний режим *Average* виконує усереднення значень від усіх знімків, що покривають даний піксель, що може зменшити контрастність деталей, але згладити артефакти на межах знімків.

Enable hole filling: Enabled. Автоматичне заповнення невеликих пропусків у покритті шляхом інтерполяції від сусідніх пікселів. Критично важливо для отримання безпропускової ортомозаїки.

Pixel size: Визначається автоматично на основі розрахованого GSD з урахуванням висоти фотографування та параметрів камери. Для даних з середньою висотою 400 м та камерою ADTі 26S v2 розрізненість становить приблизно 0,06 м/піксель.

Projection: UTM Zone 36N (EPSG:32636). Для території України оптимальною картографічною проекцією є Універсальна Поперечна Меркатора у зоні 36N. Проекція встановлюється вручну через *Settings* → *Coordinate System*, оскільки при відсутності ГНСС-координат програмне забезпечення не може автоматично визначити географічне розташування.

Compression: JPEG quality 90. Для балансу між якістю зображення та розміром файлу застосовується JPEG-компресія зі збереженням 90% якості. Це зменшує розмір файлу у 5-10 разів порівняно з нестислим TIFF при мінімальних візуальних втратах.

Результатом є ортомозаїка у форматі GeoTIFF розміром 100,000 × 50,000 пікселів (5 гігапікселів) для території 6×3 км з розрізненістю 6 см/піксель. Розмір файлу з JPEG-компресією становить близько 1,2 ГБ.



Рисунок 2.4. Створена ортомозаїка

Експорт ортомозаїки виконується через File → Export → Export Orthomosaic з параметрами, що забезпечують сумісність з наступним програмним забезпеченням.

Висновки

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу створення топографічних ортомозаїк за даними безпілотного аерознімання в умовах відсутності навігаційних даних від бортових ГНСС-приймачів внаслідок дії засобів радіоелектронної боротьби.

1. Виконано комплексний аналіз сучасних методів створення ортомозаїки. Зокрема встановлено, що метод Structure from Motion забезпечує автоматизовану обробку неорієнтованих зображень без апіорного знання параметрів камери.

2. Проаналізовано роль ГНСС-даних у фотограмметрії. При використанні RTK/PPK досягається точність 1-3 см горизонтально та 2-6 см вертикально, однак залежність від ГНСС створює вразливість в умовах РЕБ, що актуалізує розвиток альтернативних методів локалізації.

3. Реалізовано обробку 3842 знімків у Agisoft Metashape з повним видаленням недостовірних ГНСС-координат. Отримано розріджену хмару 1,2 млн точок та щільну хмару 383 млн точок (густина 17 точок/м²).

4. Створено цифрову модель рельєфу (розрізненість 24,3 см/піксель) та ортомозаїку 132925×130163 пікселів з розрізненістю 6,07 см/піксель. Площа покриття 22 км². Деталізація достатня для виявлення об'єктів від 20-30 см, що відповідає вимогам військової розвідки.

Перспективи подальших досліджень: валідація точності через супутникові зображення, інтеграція Visual SLAM для навігації в реальному часі, застосування машинного навчання для автоматичної геоприв'язки через характерні об'єкти як віртуальні опорні точки.

Література

1. Безпілотний авіаційний комплекс "Лелека-100". DeViRo: офіційний сайт виробника. URL: <https://deviro.com.ua/leleka-100/>
2. БПЛА комплексу "Мара". MARA-DRONE: офіційний сайт виробника. URL: <https://mara-drone.com/en/>
3. Abdelkader M., Shamma M., Collier J., Ho K.-L., Li T. GHCC-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*. 2025. Vol. 6, Article 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43020-025-00162-z>
4. Abuhassan H., Habib A., Al-Ruzouq R. Accuracy assessment of low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60, No. 6. P. 5579–5590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.011>
5. ADTi 26MP 26S v2 Surveyor Drone Mapping Camera. UnmannedRC: authorized distributor. URL: <https://unmannedrc.com/products/copy-of-adi-26mp-26s-v2-surveyor-drone-mapping-cameras>
6. Agrafiotis P., Demir B. Deep learning-based bathymetry retrieval without in-situ depths using remote sensing imagery and SfM-MVS DSMs with data gaps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2025. Vol. 225. P. 341–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.04.020>
7. Ahmadi M., Lonbar A. G., Sharifi A., Beris A. T., Nouri M., Javidi A. Advanced UAV photogrammetry for precision 3D modeling in GHCC denied inaccessible tunnels. *Safety in Extreme Environments*. 2024. Vol. 6. P. 269–287. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42797-024-00119-0>
8. Altuğ K., Özdemir E., Fırat O. Comparative assessment of the effect of positioning techniques and ground control point distribution models on the accuracy of UAV-based photogrammetric production. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 1. Article 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9010015>

9. Chaiviriyawong P., Kasetkasem T., Chansamorn N., Rakwatin P., Kumazawa I., Panboonyuen T. Optimization of ground control point distribution for unmanned aerial vehicle photogrammetry for inaccessible fields. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 15. Article 9505. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159505>
10. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. A review of UAV autonomous navigation in GHCC-denied environments. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 170. Article 104533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>
11. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
12. Electronic Warfare in Ukraine: New frequency ranges for FPV drones. *Defense Express*. 2024. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/ukrajinski_fpv_droni_perejshli_na_novi_chastoti_67_72_ggts-12847.html
13. Esteban M., Becerra-Rozas M., Liu J. Optimization of UAV flight parameters for urban photogrammetric surveys: Balancing orthomosaic visual quality and operational efficiency. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 11. Article 753. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9110753>
14. Fey C., Schwalbe E., Wickert M. Accuracy of UAV photogrammetry in glacial and periglacial alpine terrain: A comparison with airborne and terrestrial datasets. *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. Vol. 3. Article 871994. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.871994>
15. Gaffuri J., Meyer T. Quality assessment of photogrammetric methods—A workflow for reproducible UAS orthomosaics. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 22. Article 3831. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12223831>
16. . Vol. 2016, No. 1. P. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284>

17. Gindraux S., Boesch R., Farinotti D. Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on glaciers. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 2. Article 186. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9020186>
18. Gond A. K., Ohri A., Gaur S., Rai P. Accuracy assessment and optimization of the photogrammetric process variables for 3D mapping using Unmanned Aerial Vehicle (Drones). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2025. Vol. 53. P. 3141–3164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02126-x>
19. Goforth H., Lucey S. GHCC-denied UAV localization using pre-existing satellite imagery. *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, Canada, 2019. P. 2974–2982. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793558>
20. Iglhaut J., Cabo C., Puliti S., Piermattei L., O'Connor J., Rosette J. Structure from motion photogrammetry in forestry: a review. *Current Forestry Reports*. 2019. Vol. 5. P. 155–168. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
21. Krüger L., da Cunha L. S. T., Gomes A., Mallmann D. H., Santos C. R., Hüller A. Enhancing georeferencing and mosaicking techniques over water surfaces with high-resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 2. Article 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16020290>
22. Kujawa P., Wajs J., Pleśniak K. The approach to UAV image acquisition and processing for very shallow water mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 141. Article 104604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104604>
23. Lateef F., Kas M., Ruichek Y. From GHCC to AI: A comprehensive review of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) localization solutions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2025. Vol. 230. Article 402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.09.014>
24. Liu X., Lian X., Yang W., Wang F., Han Y., Zhang Y. Evaluating the potentiality of using control-free images from a mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and

- Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry to measure paleoseismic offsets. *International Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 42, No. 8. P. 2624–2650. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1862434>
25. Martínez-Carricondo P., Carvajal-Ramírez F., Yero-Paneque L., Agüera-Vega F. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 15. Article 2447. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
 26. Munguía R., Bandera A., Urzua S., Grau A. A simultaneous control, localization, and mapping system for UAVs in GNSS-denied environments. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 1. Article 69. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9010069>
 27. Özcan A. H., Ünsalan C. Accuracy assessment of a UAV direct georeferencing method and impact of the configuration of ground control points. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 2. Article 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6020030>
 28. Park J.-H., Lee K.-W., Kwon Y.-J., Lee J.-O. Optimal ground control point layout for UAV photogrammetry in high precision 3D mapping. *Measurement*. 2025. Vol. 245. Article 116026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116026>
 29. Pixhawk 4 Technical Data Sheet. Holybro. 2019. URL: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixhawk4.html
 30. Smith M. W., Carrivick J. L., Quincey D. J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*. 2016. Vol. 40, No. 2. P. 247–275. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
 31. Sony IMX571BQR Product Flyer. Sony Semiconductor Solutions Corporation. 2019. URL: https://www.sony-semicon.com/files/62/pdf/p-13_IMX571BQR_Flyer.pdf
 32. Ukrainian reconnaissance drones Mara-2 technical data sheet specifications pictures video. *Army Recognition*. 2017. Vol. 5. URL: https://www.armyrecognition.com/ukraine_ukrainian_army_unmanned_ground_aerial_vehicle_uk/mara-

[2_mara_reconnaissance_mini_uav_drone_technical_data_sheet_specifications_pictures_video.html](#)

33. Wang M., Sun Y., McGlone J. C., Song W., Wang J. Structure from motion for ordered and unordered image sets based on random k-d forests and global pose estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. Vol. 150. P. 213–225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.009>
34. Zhang Z., Zhao R., Liu E., Yan K., Ma Y. Influence of ground control point reliability and distribution on UAV photogrammetric 3D mapping accuracy. *Geospatial Information Science*. 2025. Article 2451204. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2025.2451204>

Agisoft Metashape

01 December 2025



Survey Data

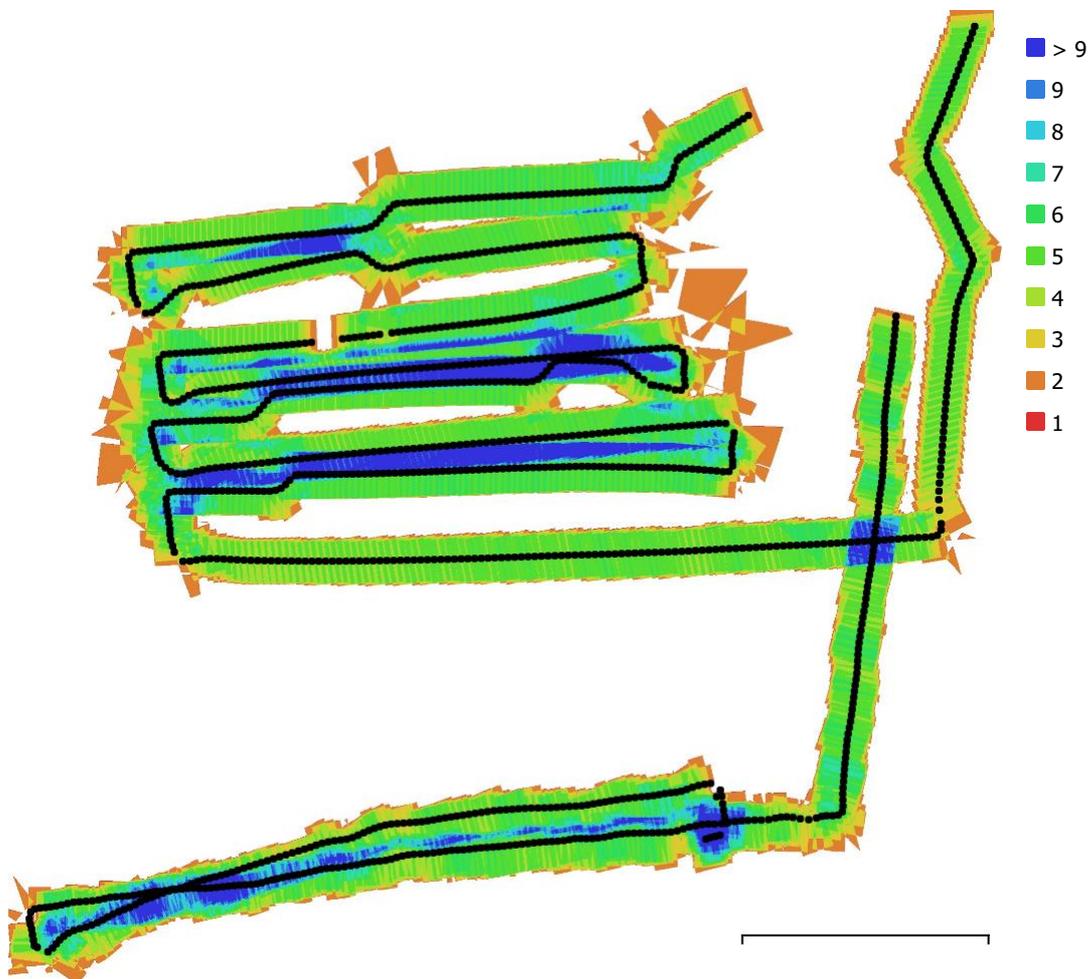


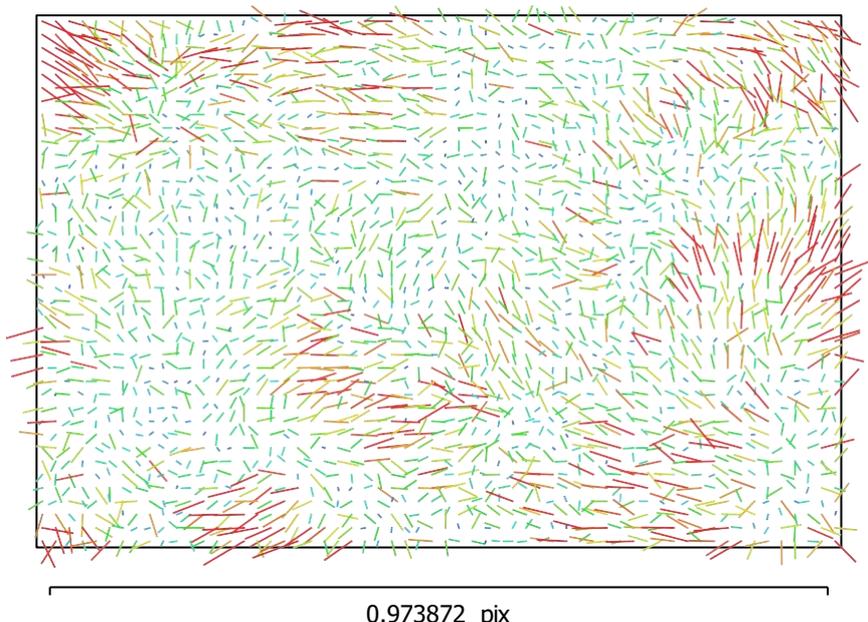
Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	3,842	Camera stations:	1,213
Flying altitude:	420 m	Tie points:	1,221,688
Ground resolution:	6.07 cm/pix	Projections:	4,671,023
Coverage area:	22 km ²	Reprojection error:	0.783 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ADTi2625 (25mm)	6252 x 4168	25 mm	unknown	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration



0.973872 pix
Fig. 2. Image residuals for ADTi2625 (25mm).

ADTi2625 (25mm)

3842 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	6252 x 4168	25 mm	unknown

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	6824.64	0.16	1.00	0.16	-0.29	-0.01	0.09	-0.08	0.01	-0.07
Cx	-28.2818	0.056		1.00	-0.07	-0.01	0.01	-0.01	0.54	-0.03
Cy	-34.8091	0.057			1.00	-0.03	-0.01	0.02	-0.05	0.60
K1	-0.0105251	2.9e-05				1.00	-0.94	0.88	-0.01	-0.06
K2	-0.000141311	0.00021					1.00	-0.98	0.02	-0.01
K3	0.0177558	0.00048						1.00	-0.02	0.01
P1	0.000319818	1.4e-06							1.00	-0.06
P2	-0.000277408	1.6e-06								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

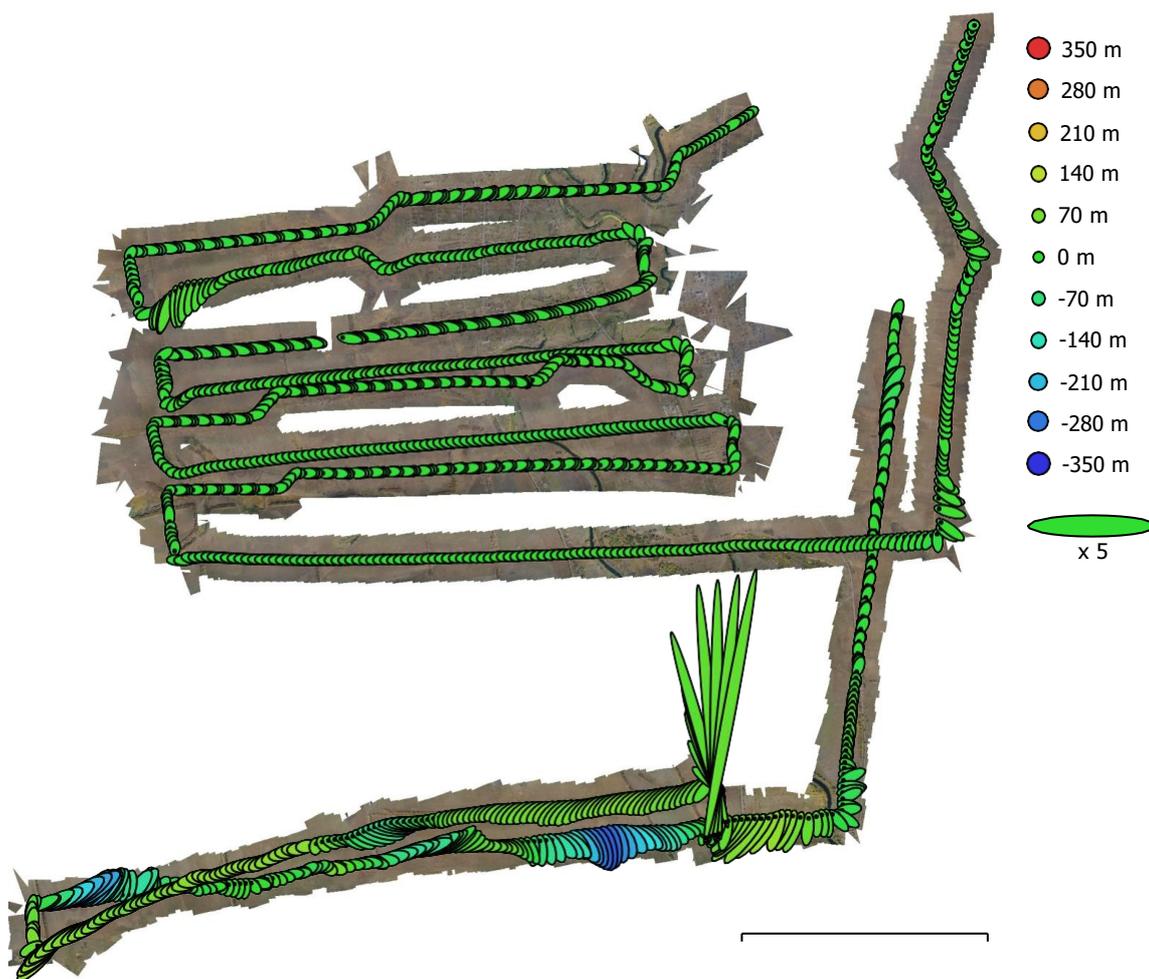


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
 Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
16.5442	30.1915	42.191	34.4273	54.4548

Table 3. Average camera location error.
 X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model



Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 24.3 cm/pix
Point density: 17 points/m²

Processing Parameters

Розділ 3. General

Cameras	3842
Aligned cameras	1213
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Розділ 4. Tie Points

Points	1,221,688 of 1,824,260
RMS reprojection error	0.102019 (0.783432 pix)
Max reprojection error	0.312649 (48.0634 pix)
Mean key point size	6.65478 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.07141

Розділ 5. Alignment parameters

Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	26 minutes 14 seconds
Matching memory usage	1.41 GB
Alignment time	8 minutes 22 seconds
Alignment memory usage	695.05 MB
Date created	2024:10:10 14:10:08
Software version	2.0.2.16102
File size	157.39 MB

Розділ 6. Depth Maps

Count	1212
-------	------

Розділ 7. Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Max neighbors	16
Processing time	43 minutes 25 seconds
Memory usage	1.49 GB
Date created	2024:10:10 17:18:55
Software version	2.0.2.16102
File size	2.81 GB

Розділ 8. Point Cloud

Points	382,933,242
--------	-------------

Розділ 9. Point attributes

Color	3 bands, uint8
Normal	
Confidence	- □

Розділ 10. Point classes

Created (never classified)	382,933,242
----------------------------	-------------

Розділ 11. Depth maps generation parameters

Quality	Medium
Filtering mode	Moderate
Max neighbors	16
Processing time	43 minutes 25 seconds
Memory usage	1.49 GB
Розділ 12. Point cloud generation parameters	
Processing time	16 minutes 45 seconds
Memory usage	6.09 GB
Date created	2024:10:10 17:35:41
Software version	2.0.2.16102
File size	5.44 GB
Розділ 13. DEM	
Size	33,236 x 32,539
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Розділ 14. Reconstruction parameters	
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 31 seconds
Memory usage	324.32 MB
Date created	2024:10:10 18:33:05
Software version	2.0.2.16102
File size	1.42 GB
Розділ 15. Orthomosaic	
Size	132,925 x 130,163
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	3 bands, uint8
Розділ 16. Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	27 minutes 54 seconds
Memory usage	1.98 GB
Date created	2024:10:10 18:43:43
Software version	2.0.2.16102
File size	47.17 GB
Розділ 17. System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2 0.2 build 16102
OS	Windows 64 bit
RAM	63.81 GB
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700KF
GPU(s)	NVIDIA T600