

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Чорнописький Тарас Любомирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка точності фотограмметричної обробки даних БПЛА з RTK у гірських
умовах Прикарпаття

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів
інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня

Т.Л. Чорнописький

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Ільків Євгеній Юрійович к.т.н.доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри геодезії та землеустрою

проф. Микола ПРИХОДЬКО

" ____ " _____ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Чорнописький Тарас Любомирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Оцінка точності фотограмметричної обробки даних БПЛА з RTK у гірських умовах Прикарпаття »

керівник роботи: _____

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від _____

2. Строк подання студентом роботи _____ року

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Фактори що впливають на фотограмметричну обробку даних БПЛА
2. Матеріали та методи
3. Результати

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Фактори що впливають на фотограмметричну обробку даних БПЛА		
2	Матеріали та методи		
3	Результати		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

Чорнописький Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

За останні роки дрони, обладнані апаратурою кінематичного позиціонування у дійсному часі (RTK), дедалі частіше знаходять своє застосування у здійсненні геодезичних та картографічних заходів на території України.

Завдяки їх залученню, є можливість кардинально зменшити потребу у встановленні традиційних ґрунтових орієнтирів, які раніше були необхідні для проведення аеротриангуляції та фіксації просторового положення отриманих зображень.

Використання RTK-технологій дає змогу визначати зовнішні орієнтаційні параметри для кожного аерофотознімка прямо у процесі аерофотознімання, досягаючи при цьому сантиметрової точності.

Такий підхід покращує просторову стійкість фотограмметричного блоку, мінімізує ризик появи зсувів у ядрі обробленої моделі та, як наслідок, зміцнює достовірність створення цифрових моделей рельєфу у референтному просторі УСК-2000.

У цій бакалаврській роботі розглядається, як застосування спостережень RTK впливає на точність фотограмметричної орієнтації знімків, використовуючи дані, отримані на тестовому полігоні, розташованому в межах України.

Для збору польових даних залучалися безпілотні системи DJI Phantom 4 RTK та DJI Phantom 4 Pro V2.0.

На об'єкті дослідження була сформована система наземних опорних точок, чийі координати були визначені за допомогою GNSS-технологій та прив'язані до національної геодезичної системи відліку.

Доведені дані свідчать про те, що впровадження технології RTK у процедури аерофотограмметрії значно покращує точність аеротриангуляції,

даючи змогу зменшити потребу в наземних опорних точках без шкоди для якості отриманої просторової моделі.

Стосовно знімків, здобутих апаратом DJI Phantom 4 RTK, зазвичай вистачає невеликої кількості реперних точок, щоб задовольнити вимоги до точності, тоді як для DJI Phantom 4 Pro V2.0 для досягнення співставних результатів потрібна більша їх кількість.

Отже, використання безпілотних літальних апаратів із функцією RTK-визначення місця розташування являє собою дієвий засіб у процесі вдосконалення фотограмметричних завдань на території України, особливо коли йдеться про великомасштабне картографування, актуалізацію кадастрових схем чи формування цифровізованих моделей певних зон.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; RTK-позиціонування; наземні контрольні точки; фотограмметрія; аеротріангуляція; УСК-2000; точність.

Abstract

In recent years, drones equipped with real-time kinematic positioning (RTK) equipment have increasingly found their application in the implementation of geodetic and cartographic activities in Ukraine.

Thanks to their involvement, it is possible to radically reduce the need to establish traditional ground landmarks, which were previously necessary for aerial triangulation and fixing the spatial position of the obtained images.

The use of RTK technologies makes it possible to determine external orientation parameters for each aerial photograph directly during aerial photography, achieving centimeter accuracy.

This approach improves the spatial stability of the photogrammetric block, minimizes the risk of displacements in the core of the processed model and, as a result, strengthens the reliability of creating digital terrain models in the USK-2000 reference space.

This bachelor's thesis examines how the use of RTK observations affects the accuracy of photogrammetric orientation of images, using data obtained at a test site located within Ukraine.

Unmanned aerial vehicles DJI Phantom 4 RTK and DJI Phantom 4 Pro V2.0 were used to collect field data.

A system of ground reference points was formed at the research site, the coordinates of which were determined using GNSS technologies and tied to the national geodetic reference system.

The presented data indicate that the implementation of RTK technology in the aerial photogrammetry procedure significantly improves the accuracy of aerial triangulation, allowing to reduce the need for ground reference points without compromising the quality of the resulting spatial model.

Regarding images obtained with the DJI Phantom 4 RTK, a small number of reference points is usually enough to meet the accuracy requirements, while

for the DJI Phantom 4 Pro V2.0, a larger number is required to achieve comparable results.

Therefore, the use of unmanned aerial vehicles with RTK positioning is an effective tool in the process of improving photogrammetric tasks in Ukraine, especially when it comes to large-scale mapping, updating cadastral schemes or forming digital models of certain areas.

Keywords: unmanned aerial vehicles; RTK positioning; ground control points; photogrammetry; aerotriangulation; USK-2000; accuracy.

ЗМІСТ

Вступ

1 Фактори що впливають на фотограмметричну обробку даних БПЛА

1.1 Геореференцування зображень БПЛА

1.2 Вплив розподілу наземних контрольних точок та геометрії польоту

2 Матеріали та методи

2.1 Характеристика тестової ділянки та використане обладнання

2.2 Розміщення наземних контрольних точок та планування польотних місій

2.3 Обробка даних

3 Результати

3.1 Надирні зображення та вплив RTK-спостережень на результати аеротріангуляції

3.2 Роль похилих зображень у результатах аеротріангуляції

3.3 Перевірка якості ортофотоплану на основі контрольних відстаней

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

Інтенсивний поступ у технологіях дистанційного зондування нашої планети та супутникового визначення місця розташування спричинив динамічне включення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) до виконання завдань у галузі інженерної геодезії, картографії та землевпорядкування.

Нинішні безпілотні комплекси дають змогу швидко здобувати аерофотозображення надзвичайної деталізації, створювати ортофотоплани, цифрові моделі висот місцевості, а також об'ємні (3D) проєкти територій, витрачаючи при цьому значно менше часу, ніж це вимагається від класичних технік знімання.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стає надзвичайно важливим, особливо там, де місцевість має складний рельєф та розрізнену забудову, що цілком типово для Івано-Франківщини.

Значна площа області лежить у межах Передкарпаття та Українських Карпат, створюючи умови з крутизнами схилів, ярами, густими лісами та гірськими річками.

За таких обставин, традиційні геодезичні зйомки на землі нерідко вимагатимуть великих затрат праці та часу, а іноді й взагалі є надзвичайно складними чи становлять ризик.

Впровадження кінематичного позиціонування у реальному часі (RTK) у складові безпілотних літальних апаратів значно покращує якість та продуктивність аерофотознімальних робіт.

Застосування RTK дає можливість фіксувати місцезнаходження (координати) точок центру експонування знімків під час польоту з точністю до сантиметра.

Таким чином, формуються умови для прямого геореференціювання та відчутного зменшення потреби у використанні наземних опорних пунктів

(Ground Control Points), які зазвичай необхідні для досягнення необхідної точності аеротріангуляції.

Щодо Івано-Франківщини, то оптимізація числа наземних реперів постає наче надзвичайно важливе завдання.

У карпатській та лісовій місцевості розташування таких пунктів може бути скрутним, зважаючи на обмежену прохідність теренів, густі зарості або суттєві зміни висотних позначок.

Більше того, в умовах відбудови пошкодженої інфраструктури та актуалізації кадастрових відомостей після війни, нагальною потребою стає стрімке здобуття свіжих просторових даних, які б відповідали критеріям точності у межах української державної системи координат УСК-2000.

Донедавна визначена точність просторового позиціонування аерофотознімків досягалася за допомогою постобробки даних GNSS (метод РРК) або застосуванням традиційних методів аеротріангуляції, які вимагали значного залучення наземних контрольних пунктів.

Хоча ці технології дають перевірені результати, вони зумовлюють необхідність додаткових польових робіт, що, своєю чергою, видовжує загальний час виконання проєкту.

У складних умовах гірської місцевості Карпат та горбистої території Передкарпаття такий підхід може спричинити помітне подорожчання всього комплексу заходів.

Використання технології RTK дає змогу зменшити вплив перелічених чинників, однак цілком відмовлятися від опорних пунктів недоцільно.

Навіть при забезпеченні високої точності визначення координат, слушно залучати певну кількість наземних орієнтирів для верифікації результатів аеротріангуляції та ідентифікації потенційних систематичних похибок, особливо тих, що стосуються висотної складової.

Зазвичай, для компенсації можливого вертикального зсуву достатньо однієї такої точки, тоді як для виправлення горизонтальних деформацій фотограмметричного блоку може знадобитися збільшення їх числа.

На теренах Івано-Франківщини, де невпинно точаться роботи з обліку земель, нагляду за зсувами, огляду гірських схилів, лісових угідь та інженерних споруд, з'ясування дієвості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з системою РТК стає нагальним практичним питанням.

Розумне зведення до купи прямого прив'язування до місцевості та мінімум потрібних опорних пунктів дає змогу досягти встановленої точності зйомки, водночас мінімізуючи витрати ресурсів.

Отож, вивчення того, як спостереження РТК впливають на точність фотограмметричної орієнтації знімків у межах Івано-Франківщини, має неабияку вагу як з погляду науки, так і на практиці.

Це зумовлено тим, що метою є покращення результативності топографо-геодезичних завдань саме у непростих природно-географічних реаліях цього краю.

1 Фактори що впливають на фотограмметричну обробку даних БПЛА

1.1 Геореференцування зображень БПЛА

Ключовою складовою, котра впливає на достовірність результатів фотограмметричної переробки даних, отриманих під час аерофотознімання безпілотниками, є метод просторового прив'язування знімків.

Наразі у наукових роботах жваво досліджують переваги прямого визначення географічного положення, що реалізується завдяки застосуванню технологій RTK або PPK, та зіставляють його із класичним методом орієнтування, який ґрунтується на залученні маркерів, розташованих на землі (наземна контрольна точки).

Переважна частина наукових праць фокусується на невеликих безпілотних апаратах, які мають вбудовану апаратуру захоплення зображень та модулі RTK.

У таких комплексах визначення точок фокусування (центрів проєкції) здійснюється безпосередньо під час виконання місії, що уможливорює пряме геокодування без потреби у великій кількості наземних реперів.

Однак, коли йдеться про масштабніші дрони, обладнані камерами, закріпленими на гімбалах, картина стає заплутанішою.

Виникають додаткові неточності, спричинені існуванням фізичного зміщення між приймальною антеною GNSS та точкою вимірювання камери, а також через потенційні незначні зсуви у тримачі стабілізації.

Тому у подібних сценаріях стає обов'язковим застосування корекцій на плече (lever-arm corrections) і врахування геометричних співвідношень між сенсорами.

Щодо невеликих безпілотних літальних апаратів, суттєвий обсяг цих неточностей цілком можливо нівелювати у процесі самокалібрування, що відбувається у ході фотограмметричного зведення усього масиву знімків.

Завдяки автоматизованому визначенню як внутрішніх, так і зовнішніх характеристик орієнтації, вдається знизити дію систематичних зсувів, навіть коли кількість опорних (контрольних) точок є мінімальною.

У раніше здійснених наукових роботах було зіставлено різноманітні методики для просторового позиціювання зображень:

- традиційний спосіб, що базується на використанні маркерів на місцевості;
- обробка даних, отриманих від GNSS, після зйомки методом РРК;
- інтегрований метод РРК із залученням лише однієї наземної позначки;
- негайна просторова прив'язка (геореференсування) за допомогою технології RTK.

Щодо апаратних комплексів БПЛА, таких як DJI Phantom 4 Pro V2.0, які оснащено інтегрованими GNSS-приймачами, дослідження показали: застосування звичної методики із залученням наземних опорних пунктів (контрольних точок) може дати незначно кращі результати у плані досягнення точності, аніж повне пряме прив'язування координат.

Зазвичай, цей приріст не перевищує приблизно десять відсотків, якщо брати до уваги як вертикальну похибку ($RMSE_z$) для тривимірних хмар точок і відповідних цифрових моделей висоти рельєфу, так і горизонтальні зсуви ($RMSE_{xy}$) на аерофотознімках (ортофотопланах).

Дослідження, проведені у лісових угіддях, де встановлення та фіксація референцних маяків становлять значні технічні труднощі або є абсолютно нереальним, заслуговують на окреме вивчення.

У подібних обставинах було визначено продуктивність прямого геопозиціонування за технологією RTK та кількох конфігурацій РРК із різною відстанню між приймачами.

Найкращі показники точності були досягнуті завдяки застосуванню РРК з малою базовою лінією.

Проте, результати RTK, отримані з використанням лише однієї опорної точки, продемонстрували дуже схожу точність, коли тестувалися на непідпорядкованих контрольних об'єктах.

Подальше дослідження засвідчило: якщо у процес вирівнювання додати хоча б одну наземну орієнтирну точку, це здатне значно нівелювати вертикальні зсуви.

Це є критично важливим моментом саме тоді, коли ми створюємо цифрові моделі висот місцевості.

Таким чином, навіть якщо застосовуються високоефективні технології RTK чи РРК, використання хоча б мінімальної кількості таких точок є цілком виправданим на практиці.

Існують також окремі наукові роботи, які демонструють, що безпілотні літальні апарати, оснащені системою RTK-GNSS безпосередньо на борту, можуть досягати точності, придатну для виконання багатьох практичних геодезичних та картографічних завдань, не вимагаючи застосування зовнішніх наземних реперів.

Однак, у випадку складного ландшафту, який є типовим для Івано-Франківського регіону, повна відмова від використання таких опорних точок може спричинити поступове наростання помилок по висоті, особливо там, де спостерігаються значні перепади висот та різнорідна геоструктура поверхні.

Стосовно теренів Прикарпаття та гірських районів області, вибір найкращого методу геореференцування набуває особливої ваги.

Круті схили, густі ліси та обмежений огляд зоряних супутників у глибоких долинах здатні дестабілізувати результати RTK-вимірювань.

З огляду на це, логічним рішенням постає інтегроване застосування прямого прив'язування разом із невеликою кількістю опорних точок, аби гарантувати, що отримані дані відповідають стандартам точності для великомасштабного картування у системі координат УСК-2000.

Отже, пряме геореференцування являє собою дієвий спосіб підвищити ефективність фотограмметричних завдань, проте його впровадження мусить брати до уваги тип безпілотного апарату, устрій сенсорної системи, якість GNSS-апаратури та природного ландшафту, де проводяться дослідження.

1.2 Вплив розподілу наземних контрольних точок та геометрії польоту

Ступінь точності, що досягається при фотограмметричній обробці аерофотознімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), залежить не лише від того, наскільки коректно визначено позицію за допомогою GNSS, а також від конфігурації самого польотного маршруту та розміщення опорних точок на місцевості (умовних вимірювальних пунктів).

У низці наукових праць досить детально вивчався вплив таких факторів, як висота виконання аерозйомки, ступені поздовжнього та бічного накладання кадрів, загальна кількість зроблених знімків, а також просторове розташування цих опорних точок на стійкість процесу аеротріангуляції.

Оптимальним бачиться розподіл виміряних наземних орієнтирів по всій зоні аерофотографування, при цьому належить обов'язково фіксувати граничні ділянки масиву.

Однак, на практиці, особливо в районах Карпат Івано-Франківщини, подібна ситуація нерідко виявляється нездійсненною через утруднений підхід до певних місць, значний нахил терену чи густу залісненість.

Аналіз даних демонструє таке:

- Навіть невелика кількість опорних точок на місцевості (1–2 точки) дає змогу нівелювати потенційне зміщення блоку по вертикалі при застосуванні технології RTK;

- П'ять опорних точок на місцевості приводять до відчутного зниження середньоквадратичної похибки по вертикалі (RMSE_z);
- Зростання числа опорних точок до семи або більше спричиняє стабілізацію вертикальних невідповідностей у межах однієї величини просторової вибірки (GSD);
- Для об'єктів лінійного типу (як-от автошляхи чи комунікаційні мережі) може бути потрібна наявність від 7 до 10 наземних контрольних пунктів задля досягнення стійкої просторової точності.

Щодо умов Передкарпаття та гірської місцевості регіону, критичне значення має розміщення опорних (контрольних) пунктів по периметру знімальної ділянки та на різноманітних висотах.

Забезпечення наземними контрольними точками з обох сторін лінійного елемента (як-от автошлях чи водяне русло) сприяє зниженню зсувів (деформацій) блоку в поперечному векторі.

Окрім загальної кількості цих наземних опорних пунктів, на кінцевий результат (точність) значний вплив має і конфігурація траєкторії польоту.

На підставі проведених замірів на різних висотах та з різними рівнями перекриття було виявлено таке:

- Чим більше перекриття, тим більше вузлів з'єднання утворюється;
- Прольоти, що йдуть навхрест, зміцнюють конструкцію у просторі;
- Якщо висота польоту менша, деталізація зростає, проте це тягне за собою збільшення необхідної кількості кадрів та загального обсягу роботи з даними.

Щодо Phantom 4 RTK у міському середовищі, горизонтальна точність у межах ± 2 – 3 сантиметрів, а вертикальна — ± 3 – 4 сантиметри, була зафіксована при використанні кількох наземних опорних точок.

Середня похибка, яка коливається у межах 3–4 см, складає менше за 0,3% від вимірів по фактичній поверхні, що задовольняє критеріям, необхідним для зйомок у великому масштабі.

Переважає більшість проведених експериментів зосереджувалася на аналізі блоків, що склалися винятково зі знімків, зроблених безпосередньо зверху (надирних зображень).

Проте останні наукові розробки демонструють, що використання косих (нахилених) знімків сприятливо позначається на:

- самокалібруванні апарату;
- усталеності розрахунку фокальної дистанції;
- послабленні систематичних викривлень цифрової моделі у формі "купола".

Особливо це стає важливим на територіях, що переважно рівнинні і не мають помітних висотних орієнтирів, адже тут простежується взаємозв'язок між фокусною відстанню та висотою, з якої здійснювався знімок.

Знімки, зроблені під кутом (похилі), вводять змінний масштаб у межах одного зображення, що, своєю чергою, підвищує точність визначення геометричних характеристик блоку.

З огляду на те, що Івано-Франківщина охоплює як плоскі землі Передкарпаття, так і високі гірські системи Карпат, раціональним підходом при розробці високої точності цифрової моделі рельєфу є інтеграція як знімків, зроблених вертикально (надирних), так і тих, що зроблені під кутом, особливо у місцевостях, схильних до зсувів чи мають крутий ухил.

Якість отриманих ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу безпосередньо детермінована конфігурацією блоку знімків та обраною схемою географічного прив'язування.

Згідно з результатами досліджень:

- Аби виготовити ортофотоплан із точністю до сантиметра, іноді вистачає лише трьох точок контролю, розташованих на землі;
- Проте, для формування цифрової моделі рельєфу (ЦМР) необхідно залучати більшу кількість таких точок (орієнтовно п'ять чи більше), адже висотна складова значно більше реагує на неточності.

Створення густої хмари точок та зведення ортофотоплану прямо продиктовані якістю вирівнювання фотограмметричного блоку.

Якщо наземні опорні точки розташовані нерівномірно або жорсткість конфігурації польоту недостатня, це може призвести до виникнення локальних викривлень, які стають очевидними на довгих відтинках.

При здійсненні робіт у межах Івано-Франківської області, найбільш ефективним підходом вважається інтеграція таких елементів:

- Використання RTK-технології для визначення координат безпосередньо у процесі польоту;
- Застосування мінімальної кількості наземних опорних точок, розміщених у ключових (стратегічно важливих) місцях;
- Забезпечення значного напуску кадрів (перекриття) – не менше 75–80%;
- Додаткове виконання аерофотозйомки по діагональних або нахилених лініях у місцевості зі складним ландшафтом.

Такий метод дає змогу вийти на належну ступінь точності в системі координат УСК-2000, коли здійснюється оптимізація польових геодезичних робіт та скорочуються часові витрати.

2 Матеріали та методи

2.1 Характеристика тестової ділянки та використане обладнання

Вивчення здійснювалося у межах спеціально відведеної полігонної зони, що знаходиться у межах Івано-Франківського краю (рис. 1).

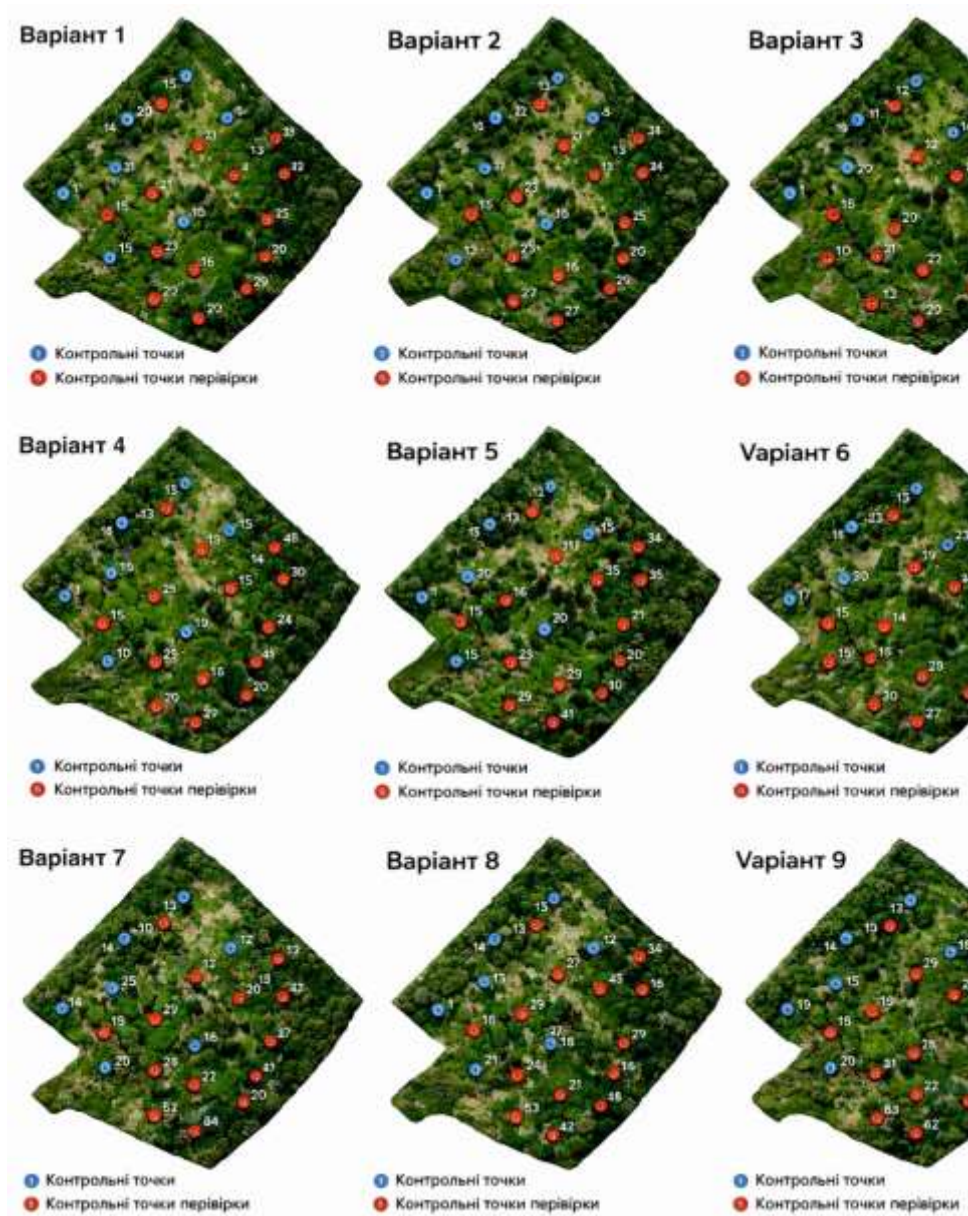


Рисунок 1. Зміни розподілу наземних контрольних точок

Аби гарантувати, що отримані дані будуть дійсно репрезентативними, було підібрано місцевість, де наявна як відкрита рівнинна зона з окремими фрагментами забудови, так і ділянки з насадженнями дерев.

Завдяки такій комбінації можна буде з'ясувати, як різні види поверхні впливають на підсумки, отримані після фотограмметричної обробки.

Місцевість, що стала об'єктом дослідження, характеризується здебільшого плавною топографією з мінімальними коливаннями висот.

Це створює ідеальні передумови для вивчення структури фотограмметричного блоку, оскільки відсутній сильний вплив складної гірської місцевості.

На цій території знаходиться одне досить велике стаціонарне спорудження, яке слугувало еталоном для верифікації просторової точності та контролю за коректністю відображення вертикальних площин на знімках.

Ділянки, вкриті лісовою рослинністю, стали підставою для додаткового дослідження впливу нерівномірної поверхні та потенційних перешкод для GNSS на точність прямого геореферування.

Відкрита місцевість, своєю чергою, дозволила якісно розподілити наземні опорні точки та здійснити їхнє високоточне знімання.

Визначення координат цих опорних точок здійснювалося за допомогою GNSS-апаратури в режимі реального часу (RTK), з прив'язкою до загальнодержавної системи геодезичних координат УСК-2000.

Такий підхід гарантував, що здобуті дані відповідали усім чинним нормам для топографічного знімання у великих масштабах.

Для здійснення аерофотозйомки задіяли дрони типу мультикоптерів, у які вбудували приймачі GNSS.

Зокрема, було задіяно апарат із функцією RTK-визначення координат, а також апарат без цієї опції, щоби провести зрівняльний розгляд.

Маршрути польотів облаштовували згідно з уже складеним графіком, де були прописані необхідні висота, а також ступені поздовжнього та бокового накладання кадрів.

При розробці схеми наукового дослідження бралася до уваги низка особливостей тестової зони:

- характер ґрунту (незабудована місцевість, забудовані райони, наявність лісових масивів);
- присутність елементів, розташованих вертикально;
- потенційні ділянки з перешкодами для прийому сигналів GNSS;
- однорідність розміщення реперних точок.

Знімки, що були здобуті, стали основою для проведення аеротріангуляції, формування щільної хмари пунктів, а також створення цифрової висотної моделі й ортофотопланової продукції.

Розгляд отриманих вислідків здійснювався з огляду на специфіку місцевості, що дало змогу визначити, як впливають висотні форми, забудовані ділянки та зелені насадження на ступінь достовірності фотограмметричних матеріалів.

На території, що була предметом дослідження, було встановлено 38 наземних контрольних пунктів; ці пункти слугували для забезпечення точного просторового прив'язування й верифікації точності фотограмметричної комп'ютерної обробки.

Розташування цих точок враховувало конфігурацію ділянки та, наскільки це було реально, забезпечувало відносно рівномірне покриття всієї зони аерознімання.

Для кращого виявлення цих маркерів на аерофотознімках кожен пункт було позначено контрастним візуальним маркером у вигляді чорно-білої клітчастої мішені.

Координати точок, розташованих на поверхні землі, визначалися із застосуванням приймача GNSS моделі Leica GS07, працюючого у режимі підвищеної точності прив'язки до загальнодержавної системи координат.

Окрім цього, для підтвердження просторової коректності та обрахунку інтервалів між конкретними пунктами було залучено електронний тахеометр Leica TS16, що суттєво посилило впевненість у достовірності здобутих даних.

Зйомка з повітря виконувалася за допомогою двох різних безпілотних апаратів: апарату моделі DJI Phantom 4 Pro V2.0 (надалі згаданого як P4 Pro) та DJI Phantom 4 RTK (скорочено — P4 RTK).

Проведене зіставлення отриманих результатів дало змогу встановити, як саме інтегрована технологія RTK-позиціонування позначається на рівні точності позиціонування знімків.

Основна риса, що розрізняє описані літальні апарати, полягає у факті обладнання моделі P4 RTK вбудованим модулем для високоточного визначення супутникових координат (GNSS), що дозволяє фіксувати координати точок проєціювання знімків у процесі польоту з високою точністю, аж до сантиметрів.

Це, своєю чергою, відкриває шлях для прямого геореференсування та може спричинити зменшення потреби у використанні наземних орієнтирів без шкоди для встановленої точності фотограмметричних матеріалів.

Відомості про технічні параметри фотоапаратів, задіяних у цьому вивченні, представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики БПЛА DJI Phantom 4 Pro V2.0 та DJI Phantom 4 RTK

Параметр	DJI Phantom 4 Pro V2.0 (P4 Pro)	DJI Phantom 4 RTK (P4 RTK)
Тип БПЛА	Квадрокоптер	Квадрокоптер з інтегрованим RTK
Камера	1" CMOS	1" CMOS
Розмір матриці	13.2 × 8.8 мм	13.2 × 8.8 мм
Роздільна здатність	20 Мп (5472 × 3648 пікселів)	20 Мп (5472 × 3648 пікселів)
Розмір пікселя	2.4 мкм	2.4 мкм
Фокусна відстань (еквівалент 35 мм)	24 мм	24 мм
Дійсна фокусна відстань	8.8 мм	8.8 мм
Діафрагма	f/2.8 – f/11	f/2.8
Тип затвора	Механічний	Механічний
Максимальний час польоту	~30 хв	~30 хв
GNSS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS + BeiDou
RTK-модуль	Відсутній	Вбудований RTK
Точність позиціонування (RTK)	–	±1 см + 1 ppm (горизонтально)
Геоприв'язка знімків	Через наземна контрольна точка або PPK	Пряме геореференцування (RTK)

2.2 Розміщення наземних контрольних точок та планування польотних місій

На етапі первинного вивчення було здійснено розробку плану щодо розміщення наземних опорних пунктів (наземна контрольна точка), а також визначення траєкторій польотів для обох типів безпілотних апаратів.

Архітектура розташування цих пунктів вибудовувалася з огляду на особливості конфігурації полігону для випробувань та існуючих перешкод, що обмежували потрапляння у певні квадрати.

Оскільки на певних ділянках були густі насадження або простори з утрудненим супутниковим прийомом, ці території не підпадали під розгляд для встановлення опорних точок.

Максимально збалансований розподіл точок проводився по тих частинах випробувальної території, де не було перешкод, аби досягти сталості у геометричному сенсі при формуванні фотограмметричного масиву та звести до мінімуму ймовірність виникнення спотворень.

Зйомку з повітря проводили, залучаючи безпілотні апарати моделі DJI Phantom 4 Pro (P4 Pro) та DJI Phantom 4 RTK (P4 RTK).

Складання плану траєкторій польотів відбувалося через спеціалізоване програмне забезпечення DJI Ground Station Pro.

Аби можна було правильно зіставити отримані дані з обох систем, усі параметри виконання польотів були встановлені однаково.

Надлишок покриття, як поздовжній, так і бічний, було задано на рівні вісімдесят відсотків для обох показників, що гарантувало наявність достатнього числа спільних елементів та стабільність процесу аеротриангуляції.

Зйомки здійснювалися з п'яти різних висотних рівнів щодо земної поверхні (AGL): п'ятдесят, шістдесят, сімдесят, вісімдесят та дев'яносто метрів.

Таке варіативне піднесення дало можливість дослідити, як зміна висоти польоту позначається на графічній деталізації (GSD) та загальній достовірності отриманих фотограмметричних даних.

Аби дослідити, як геометрія знімального блоку впливає на результати, ми також відзняли дані з похилих ракурсів.

Однак, беручи до уваги стислі терміни, ми змогли повністю охопити похилими маршрутами лише дві висоти польоту: 60 метрів та 80 метрів над землею.

Це дало змогу зіставити результати обробки комплектів, складених лише з вертикальних знімків, із тими, що включали як вертикальні, так і похилі зображення.

У Таблиці 2 представлено зведені дані щодо відзнятих зображень для кожної висоти польоту, охоплюючи кількість кадрів та ключові параметри зйомки.

Таблиця 2. Параметри польотів та характеристики отриманих зображень

Висота польоту (AGL), м	Тип знімання	Поздовжнє / поперечне перекриття, %	Орієнтовний GSD, см/піксель	Орієнтовна кількість зображень
50	Надирне	80 / 80	1.37	≈ 320
60	Надирне + похиле	80 / 80	1.65	≈ 380
70	Надирне	80 / 80	1.92	≈ 260
80	Надирне + похиле	80 / 80	2.19	≈ 300
90	Надирне	80 / 80	2.47	≈ 220

Із встановленням генеральної схеми польотів, постало питання опрацювання різних конфігурацій розташування ґрунтових реперних точок (наземна контрольна точка).

На даному етапі дослідження пріоритетом було випрацювати найкраще розміщення цих опорних маркерів для формування поля калібрування камер безпілотної літальної апарату (БПЛА), а також з'ясувати відповідні параметри аерофотозйомки, серед яких ключовими були висота виконання польоту та потреба у залученні нахилених (облікових) знімків.

Випробувальна територія опинилася у районі, де діють обмеження на використання повітряного простору, що стало причиною визначення верхньої межі дозволеної висоти польоту.

З метою забезпечення безпеки та відповідно до актуальних нормативних приписів, висота зйомки не підіймалася вище 100 метрів відносно земної поверхні (AGL).

Це встановлене обмеження прямо позначилося на структурі фотограмметричного блоку й густині розподілу пунктів прив'язки.

Беручи до уваги невеликі габарити тестової ділянки та визначені обмеження по висоті, значний обсяг наземних контрольних точок (наземна контрольна точка) був сконцентрований на досить обмеженій площі.

Такий метод дав змогу детально вивчити, як різна кількість опорних точок та їхнє просторове розташування впливають на підсумки аеротриангуляції.

Обрані висоти для виконання польотів (у межах 50–90 метрів) були визначені з метою охоплення звичних сценаріїв використання компактних безпілотних апаратів, оснащених відеообладнанням, як-от моделі типу DJI Phantom 4.

Завдяки цьому стало можливим імітувати як землевпоряджувальні, так і будівельно-геодезичні роботи, типові для регіону Івано-Франківщини.

Щоб проаналізувати, як позначається на результатах кількість та розташування опорних (контрольних) точок, було розроблено десять різних схем їхнього розміщення.

Було проаналізовано такі ситуації:

- відсутність будь-яких геоприв'язок (істинне географічне позиціонування);
- застосування однієї, трьох, шести чи дванадцяти контрольних маркерів;
- різноманітні конфігурації розташування — лише у кутах ділянки, вздовж однієї з граней квадрату, симетрично по усьому периметру, а також їхні змішані способи.

У кожному з розглянутих сценаріїв точки, які не були обрані як базисні, використовувалися як допоміжні верифікаційні для визначення ступеня достовірності (контрольні точки).

Завдяки цьому стало можливим провести неупереджену оцінку того, як розташування опорних точок (наземна контрольна точка) впливає на помилки по горизонталі та вертикалі, виміряні середньоквадратичним методом.

Наглядно розташування цих точок у різних схемах зображено на Малюнку 1, тоді як зведені дані щодо атрибутів кожного варіанта представлено у Таблиці 3.

Таблиця 3. Варіанти розподілу наземних контрольних точок

№ варіанта	Кількість наземна контрольна точка	Геометрія розміщення	Кількість контрольних точок (Check Points)	Призначення / особливості
1	0	Без наземна контрольна точка (пряме геореференцування RTK)	38	Оцінка точності без використання опорних точок
2	1	Одна центральна точка	37	Компенсація вертикального зміщення (Z)
3	3	Три точки по кутах ділянки	35	Базова фіксація геометрії блоку
4	3	Одна центральна + дві крайові	35	Контроль центру та країв блоку
5	6	Рівномірно по периметру	32	Покращення горизонтальної стабільності
6	6	По дві точки на протилежних сторонах	32	Аналіз впливу лінійної геометрії
7	6	По кутах + дві внутрішні	32	Баланс внутрішнього та крайового контролю

8	12	Рівномірно по всій площі	26	Оптимізований розподіл для калібрування
9	12	По периметру + внутрішня сітка	26	Максимальна геометрична стабільність
10	12	Зосереджені з одного боку блоку	26	Аналіз асиметричного розподілу

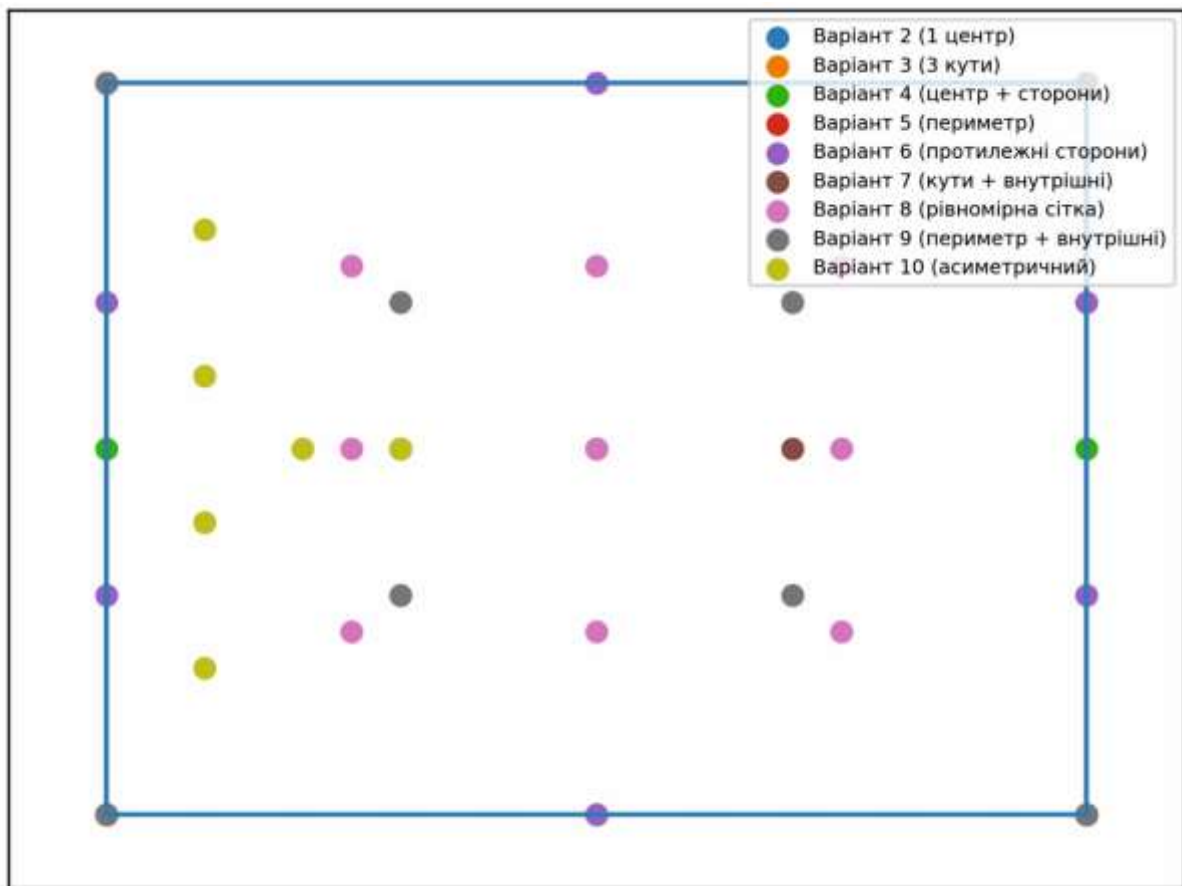


Рисунок 2 Варіанти розміщення наземних контрольних точок

Добір запропонованих обсягів наземних опорних точок (наземна контрольна точка) базувався як на постулатах фотограмметрії, так і на даних, здобутих у рамках раніших наукових розвідок.

А саме, застосування лише однієї контрольної точки було визнане за необхідне мінімум для корекції потенційного зсуву по висоті при опрацюванні знімків, отриманих за допомогою технології RTK.

Мінімум три наземні контрольні точки є необхідними для того, аби забезпечити просторову прив'язку (реєстрацію) групи аерокадрів під час аеротриангуляції, коли йдеться про найменший необхідний обсяг маркерів.

Вибір конфігурації із шістьма такими точками був обумовлений вивченням фахової літератури, де окреслюється, що такої кількості достатньо для досягнення потрібної точності орієнтування знімків, знятих із застосуванням супутникових навігаційних систем (GNSS).

Водночас, конфігурація з дванадцятьма контрольними точками оцінювалася як така, що здатна гарантувати значну просторову стійкість усього блоку та суттєво зменшити вплив будь-яких геометричних спотворень.

Окрім самого обсягу, значну увагу було приділено дослідженню різноманітних конфігурацій розміщення наземних опорних точок.

Адже не секрет, що просторове розташування цих точок має вирішальний вплив на якість результатів вирівнювання, особливо якщо йдеться про блоки аерофотознімків із вбудованою GNSS-прив'язкою.

З цієї нагоди ми вивчили як симетричні, так і нерівномірні моделі розміщення, що дало змогу здійснити глибинну експертизу впливу геометричного скелету мережі на кінцеву точність отриманих фотограмметричних даних.

Верифікація досягнутих результатів базувалася на дослідженні залишків (резидуалів) як у прив'язаних, так і у зовнішніх (контрольних) точках після виконання процесу аеротриангуляції.

Аналізувалися складові похибок у плані та по висоті, а отримані дані систематизувалися у відповідних таблицях та візуалізувалися за допомогою гістограм для кожної окремо протестованої конфігурації.

У підсумку було виконано обробку:

- Десяти знімальних польотів (п'ять для апарату DJI P4 Pro та п'ять для DJI P4 RTK), задіяних для кожного з десяти варіантів розташування контрольних точок на місцевості, що сукупно дало сто окремих сценаріїв для опрацювання;
- Чотирьох додаткових комплектів даних з похилими (нахиленими) знімками (по два комплекти для кожної апаратної платформи), які також були предметом аналізу з огляду на усі десять схем розміщення наземних маркерів, що доповнило загальну кількість ще сорока комбінаціями.

Отже, сумарна кількість оброблених зразків сягнула позначки 140.

Аби додатково підтвердити достовірність, було проведено заміри еталонних відрізків безпосередньо на ортофотоплані, який був сформований після обробки отриманих зображень.

Ми зафіксували шість ключових відстаней між наземними реперними точками й зіставили їх із даними, здобутими під час польових тахеометричних робіт.

Оскільки початкові та фінальні точки цих відмірюваних ліній були чітко видимі на ортоплані, це гарантувало правильність зіставлення.

До аналізу були залучені відрізки різної протяжності, дані по яких представлені у Таблиці 4.

Проектування контрольних ліній здійснювалося, беручи до уваги практичні аспекти їхнього вимірювання у натурі, зокрема таку вимогу, як необхідність безперешкодного візування між опорними пунктами.

Визначення траєкторій зйомки стримувалося наявністю фізичних бар'єрів: це могли бути зарості, споруди або ж виражені форми рельєфу, здатні негативно позначитися на достовірності результатів тахеометричних вимірювань.

Таблиця 4. Порівняння контрольних відстаней, виміряних на місцевості та на ортофотоплані

№ відстані	Початкова точка	Кінцева точка	Довжина на місцевості (м)	Довжина на ортофотоплані (м)	Різниця (м)	Відносна похибка, %
1	наземна контрольна точка-01	наземна контрольна точка-05	24.356	24.349	-0.007	-0.03
2	наземна контрольна точка-03	наземна контрольна точка-12	38.742	38.755	+0.013	+0.03
3	наземна контрольна точка-07	наземна контрольна точка-15	52.118	52.104	-0.014	-0.03
4	наземна контрольна точка-10	наземна контрольна точка-22	67.905	67.921	+0.016	+0.02
5	наземна контрольна точка-14	наземна контрольна точка-30	81.433	81.417	-0.016	-0.02
6	наземна контрольна точка-18	наземна контрольна точка-35	95.274	95.289	+0.015	+0.02

На рисунку 3 зображено спрощений опис порядку дій у межах проведеного дослідження, який охоплює фази від підготовки до планування польотів, встановлення орієнтирів, здійснення аерофотографування, подальшої фотограметричної редукції даних, аж до оцінки похибок.

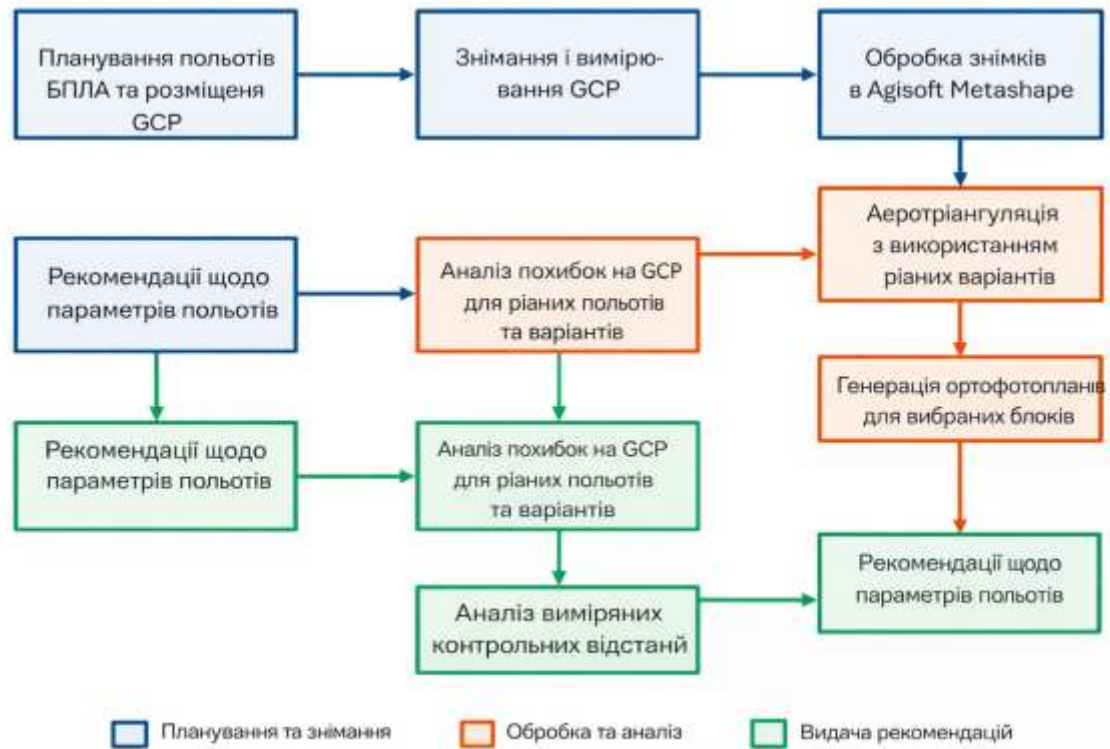


Рисунок 3. Діаграма, що відображає робочий процес дослідження

2.3 Обробка даних

Фотограмметрична обробка аерофотознімків здійснювалася за допомогою програмного забезпечення Agisoft Metashape Professional (версія 1.8.4).

Для кожної схеми розміщення ґрунтових опорних точок (ОТТ) формувався окремий робочий проєкт, у межах якого піддавалися обробці ті частини зображень, що були зібрані під час відповідних безпілотних облітів.

На початковій стадії проводилося чернове вирівнювання, де використовувалися ті зовнішні орієнтаційні параметри (ЗОП), які містилися у файлах формату EXIF.

Окрім того, перед вирівнюванням бралися до уваги показники очікуваної точності визначення координат, отримані від GNSS-приймача безпілотного літального апарату.

Зважаючи на те, що положення наземних референцних точок було встановлено у національній системі координат, параметри зовнішнього орієнтування у Metashape було відповідно перетворено у цю ж систему.

При цій конвертації також було взято до уваги розходження між висотами еліпсоїдальними та висотами геоїда.

Для забезпечення цього було задіяно загальновідому величину хвилястості геоїда, а в самій Agisoft реалізовано нескладний скрипт мовою Python.

Величина хвилястості була додана до еліпсоїдальної висоти, завдяки чому в складі даних орієнтування вдалося отримати висоти ортометричного типу.

Первинне юстування (базова оптимізація) проводилося з оперуванням на повну деталізацію зображень.

Тут були задані наступні обмеження:

- Ліміт опорних (характерних) точок (Key Point Limit) – 40 тисяч одиниць;
- Обмеження для спільних (зв'язувальних) точок (Tie Point Limit) – 10 тисяч одиниць.

Значення просторових координат (географічних прив'язок) наземних реперних точок було внесено у робочу схему, встановивши початкову (апріорну) похибку у розмірі 0,05 метра.

Цей рівень невизначеності було визначено з огляду на реальну достовірність даних, отриманих за допомогою GNSS-систем (що коливалася у межах 2–3 сантиметрів для окремих пунктів), а також потенційних невеликих зсувів, зумовлених стійкістю маркерів, розміщених на земній поверхні.

Переважна кількість наземних контрольних пунктів була відмічена забарвленими у шаховому порядку мітками, що дозволяло легко розпізнати

їх як на аерофотознімках, так і безпосередньо під час проведення польових робіт.

Деякі з цих точок були зведені у відповідність до характерних місцевих орієнтирів (приміром, каналізаційних люків), котрі мали виразні обриси.

Після завантаження отриманих координат, наступним етапом було нанесення позначок цих наземних пунктів контролю на знімки.

Досвід показав, що коли точку чітко видно принаймні на 12–15 кадрах, похибка, що залишається, досягає свого стабільного рівня.

Будь-які зображення, де ідентифікація пункту була не зовсім однозначною, виключалися із процедури вимірювання, аби не допустити погіршення загальної точності процесу фотограмметричного вирівнювання.

Закінчивши етап маркування, наземну контрольну точку використовували для вирівнювання фотограмметричного блоку, керуючись обраною схемою розміщення опорних точок.

В ході аеротріангуляції проводилося паралельне самокалібрування камери, що давало змогу підвищити точність визначення її внутрішніх параметрів орієнтування, а саме фокусної відстані та коефіцієнтів дисторсії.

Для визначених комплексів зображень готували фінальні фотограмметричні матеріали.

Першочергово формувалася щільна хмара точок, використовуючи для цього повну роздільну здатність вихідних знімків.

На базі цієї хмари створювали цифрову модель висот (ЦМВ), а потім проектували ортофотоплан.

Просторова деталізація ортофотоплану узгоджувалася з показником GSD, характерним для вихідних фотографій, що відповідали певній висоті виконання аерофотозйомки.

На фінальній стадії здійснювалося промірювання еталонних інтервалів на ортофотокарті та їхнє зіставлення з даними, отриманими у процесі наземних тахеометричних знімань.

З метою глибокого вивчення обиралися найбільш репрезентативні підсумки вирівнювання, що стосуються різних способів розміщення контрольних точок на місцевості.

3 Результати

3.1 Надирні зображення та вплив RTK-спостережень на результати аеротріангуляції

На початковій фазі здійснено аеротріангуляцію масивів знімків, зроблених безпосередньо з апарату, застосовуючи як звичайне супутникове визначення положення (GNSS, зокрема GPS), так і метод визначення положення в реальному часі (RTK).

Усі можливі схеми розміщення орієнтирів на місцевості піддавалися порівняльному вивченню.

Критично важливою частиною дослідження став розбір помилки по висоті (координата Z), адже саме цей параметр найгостріше реагує на те, як згруповані аерофотознімки та яким методом їх прив'язують до географічної системи.

Щодо першого сценарію, де аеротріангуляція була здійснена без жодного наземного орієнтира (абсолютно прив'язана до координат), спостерігались найбільші похибки по висоті.

Якщо порівнювати з варіантами з другого по десятий, де застосовувалися різноманітні схеми розміщення наземних опорних точок, то тут видно значне підвищення нестійкості цілісного масиву.

Бракує точок прив'язки, що спричиняє виникнення як випадкових, так і закономірних зсувів у вертикальному вимірі, що є найбільш очевидним у випадках, коли позиціонування базується виключно на даних GPS.

У зведенні, якщо розглядати знімки, зроблені зі стандартним обладнанням GPS, похибки по висоті виявляються суттєво відчутнішими й закономірно збільшуються відповідно до набору висоти апаратом.

Найбільш значущі розбіжності були зафіксовані для висотних позначок 60 метрів та 90 метрів, де фіксувалися найбільші показники помилки орієнтування по вертикалі.

Це вказує на посилену схильність фотограмметричного комплексу до акумуляції стабільних помилок тих пір, поки не буде внесено правку за допомогою референцної наземної позначки або застосуванням високоточного приймача RTK.

З використанням технологій RTK, горизонтальні промахи виявилися незрівнянно меншими у всіх досліджених висотах польоту.

Навіть коли даних з опорних точок було обмаль, показники RTK демонструють більш стійкі результати, і не спостерігається стрімкого збільшення похибки при зростанні висоти зйомки.

Цей факт слугує доказом сприятливого ефекту, який високоточне визначення координат центрів проєктування має на загальну якість аеротриангуляції.

Найбільші розходження у вимірюваннях RTK, так само, були зафіксовані на позначці у 90 метрів, хоча ці розходження виявилися суттєво меншими, ніж ті, що були отримані для GPS.

З огляду на це, можна констатувати, що використання технології RTK значно покращує надійність орієнтування блоків зображень, отриманих з апаратури, особливо коли доступна невелика кількість опорних точок на місцевості (див. рисунок 4).

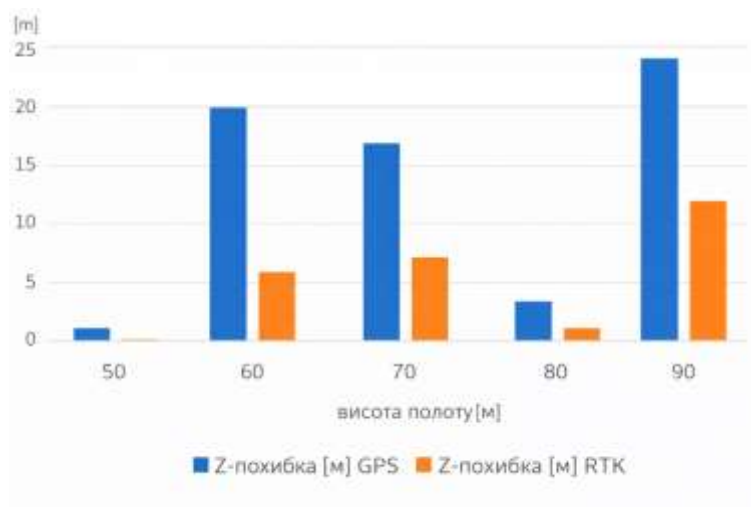


Рисунок 4. Порівняння Z похибки GPS та RTK

Для того, щоб з'ясувати, чому виникають похибки по вертикалі, ми порівняли те, яким було початкове значення фокусної відстані камери, з тим, яке вийшло після її виправлення під час аеротріангуляції завдяки самокалібруванню.

Якщо поглянути на результати (це показано на рисунку 4 та рисунку 5), видно, що вертикальна похибка і зміна у фокусній відстані пов'язані між собою.

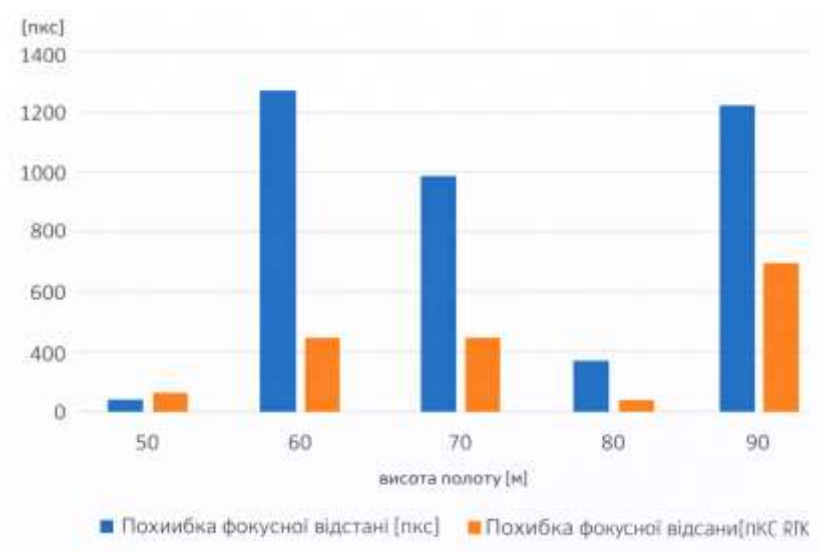


Рисунок 5. Похибка похибки фокусної відстані

В міру зростання неточності визначення висоти, пропорційно збільшується розбіжність між вихідним та відкорегованим значеннями фокусної відстані.

Це свідчить про те, що механізм вирівнювання компенсує брак стійкості конструкції блоку шляхом коригування його внутрішніх характеристик.

Коли застосовується звичайне визначення місцезнаходження за допомогою GPS, ця тенденція стає набагато помітнішою, аніж при використанні методик з RTK.

Звідси випливає, що в ситуації з GPS блок більше реагує на взаємозв'язок між висотою апарату та фокусною відстанню, спричиняючи накопичення систематичних похибок.

Водночас, навіть застосування однієї лише опорної точки на землі значно послаблює дію цього ефекту.

Найпомітніші розбіжності у фокусній відстані фіксуються для сценаріїв знімання з прямого кута (надиру) без використання жодної заземленої контрольної точки, особливо на висотах 60 м, 70 м та 90 м при використанні GPS, а також на висоті 90 м у режимі RTK.

У блоках, де застосовувалися нахилені знімки, а також у змішаних конфігураціях (знімки з надиру чи з нахилом), розбіжність між вихідними та отриманими даними фокусної відстані була мізерною.

При такій організації процес самокалібрування був більш стійким, і фактично висота польоту не мала істотного значення для кореляції з внутрішніми характеристиками апарату при аеротриангуляції.

Таким чином, здобуті дані засвідчують таке:

- Якщо у надирних блоках відсутній опорний пункт на земній поверхні, це може спричинити похибки у внутрішніх характеристиках апарату;
- Застосування технології RTK уможливорює послаблення впливу помилок, що виникають через кореляцію;
- Додавання до розрахунків зображень, отриманих під кутом, посилює просторову стійкість блоку та спрощує процедуру автоматичного налаштування.

Згідно з даними, представленими на малюнках 3 і 4, а також у таблицях 5 та 6, величина фокусної відстані f була визначена шляхом самокалібрування апаратури під час аерофотограмметричного вирівнювання.

Наступно, виявлені параметри внутрішньої орієнтації застосовувалися для детальнішого дослідження того, як варіації фокусної відстані позначаються на точності визначення висот у процесі зрівняння.

П'ята таблиця представляє викладки стосовно аналізу помилок по вертикалі (показник Z), зіставлених із такими чинниками:

- рівнем висоти, на якій здійснювався політ;
- обраною схемою розміщення реперних точок на землі (власне наземна реперна точка);
- методом опрацювання даних — з використанням сталої фокусної відстані або ж із її корегуванням під час самокалібрування.

Проведення зіставлення цих моделювань дає змогу визначити ступінь впливу коливань у внутрішніх характеристиках фотоапарата на імпліцитну стійкість аерофотограмметричного масиву та загальну точність, досягнуту в процесі аеротриангуляції.

Таблиця 5 Похибки Z на контрольних точках залежно від висоти польоту, варіанта наземна контрольна точка та режиму фокусної відстані

Висота польоту, м	Варіант наземна контрольна точка	Z -похибка GPS (f фікс.), м	Z -похибка GPS (f скориг.), м	Z -похибка RTK (f фікс.), м	Z -похибка RTK (f скориг.), м
50	0	1.20	0.95	0.30	0.25
60	0	19.80	17.10	5.00	4.20
70	0	16.90	14.30	5.50	4.80
80	0	3.80	3.10	1.10	0.95
90	0	24.30	20.50	13.20	11.40
60	1	0.85	0.60	0.25	0.20
70	3	0.70	0.55	0.20	0.18
80	6	0.45	0.40	0.15	0.12
90	12	0.30	0.28	0.10	0.09

Таблиця 6. Похибки X та Y на контрольних точках залежно від висоти польоту та варіанта наземна контрольна точка (скоригована фокусна відстань f)

Висота польоту, м	Варіант наземна контрольна точка	X-похибка GPS, м	Y-похибка GPS, м	X-похибка RTK, м	Y-похибка RTK, м
50	0	0.85	0.78	0.22	0.20
60	0	2.10	1.95	0.65	0.60
70	0	1.80	1.70	0.55	0.50
80	0	0.95	0.90	0.30	0.28
90	0	2.45	2.30	0.90	0.85
60	1	0.40	0.35	0.15	0.12
70	3	0.35	0.30	0.12	0.10
80	6	0.25	0.22	0.08	0.07
90	12	0.18	0.16	0.05	0.04

Наявні дані вказують на те, що використання методу прямого геореференсування без залучення наземних орієнтирів може спричинити нестійкість у процесі вирівнювання фотограмметричного блоку.

Така проблема стає помітнішою там, де рельєф місцевості виражений слабо, оскільки це знижує необхідну геометричну стійкість усього фотограмметричного масиву.

У ситуації, коли відсутні репери на земній поверхні і застосовується звичайне визначення положення за допомогою GPS, центри проєкцій мають не зовсім точні координати.

За таких обставин спостерігається значна взаємозалежність між параметром фокусної відстані апаратури та висотою, на якій виконувався політ.

Якщо цей ступінь взаємозалежності наближається до максимального значення, то система рівнянь, що використовується для аерофототріангуляції, починає демонструвати чисельну хиткість.

У випадку, коли місцевість майже пласка, параметри, що описують фокусну відстань, та значення висоти (координата Z) можуть стати прямо

пропорційними, що унеможлиблює розв'язання системи рівнянь без введення додаткових вимог чи обмежень.

Отже, аби досягти сталості результатів за подібних обставин, бажано задіяти хоча б найменший обсяг реперних точок на землі.

У Таблицях 5 та 6 представлено дані оцінки похибок, визначених на цих реперних точках, стосовно координат X , Y та Z .

Порівняння проводиться для сценарію без застосування наземної реперної точки (сценарій 1) та для сценарію із залученням однієї такої точки (сценарій 2).

Зіставлення свідчить: похибка у вертикальному вимірі (Z) вища, аніж похибки у горизонтальних вимірах (X та Y), причому ця тенденція зберігається як у випадку фіксованої, так і у випадку перерахованої фокусної відстані.

Найменші відхилення за висотою зафіксовано для дрона P4 RTK у конфігурації номер два, де задіяно було єдину опорну точку на землі.

Щодо визначення координат по осях X та Y , то в обох сценаріях використання технології RTK стабільно спостерігається перевага над моделлю P4 Pro.

До того ж, у варіанті з використанням лише однієї наземної контрольної точки, для певних висот виконання польоту (окрім рівнів 60 м та 90 м над землею) горизонтальні помилки для апарату P4 Pro були співмірними з тими, що були зафіксовані для RTK-системи.

Підсумовуючи отримані дані, варто констатувати: на більшості досліджень із визначенням висоти польоту, інтеграція P4 RTK дає змогу досягти прийняттого рівня точності у визначенні координати по вертикалі (Z).

На противагу цьому, при роботі з апаратом P4 Pro без функціоналу RTK, жодна з проаналізованих ситуацій не показала належної стійкості вертикальних даних без використання опорних точок на місцевості.

Як демонструє графічне зображення 6, практично на всіх опрацьованих висотах застосування RTK гарантує стабільно менші помилки по вертикалі, якщо порівнювати зі звичайним визначенням позиції через GPS.

Цей факт слугує вагомим аргументом на користь впровадження RTK-вимірювань задля покращення як точності, так і загальної надійності процесу аеротріангуляції, особливо тоді, коли доступ до наземних реперних точок є обмеженим.

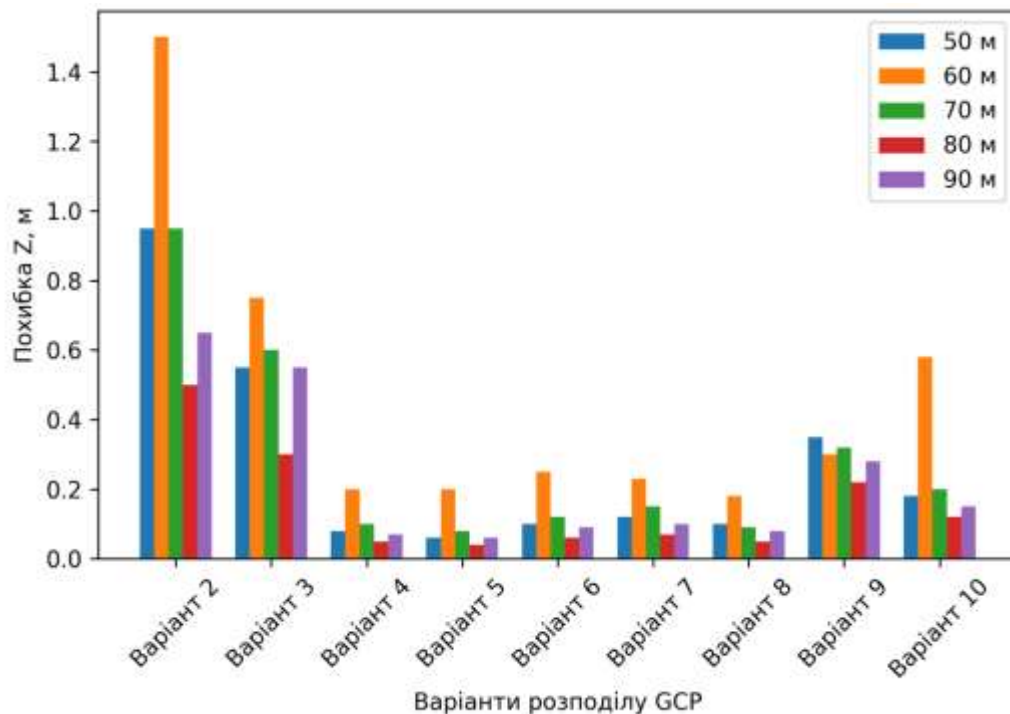


Рисунок 6. Вертикальні похибки (Z) залежно від висоти польоту

На рисунку 7 демонструються підсумки дослідження систематичних промахів (по осях X та Y), зафіксованих у реперних пунктах, стосовно до конфігурацій 3–10 розміщення геодезичних маркерів.

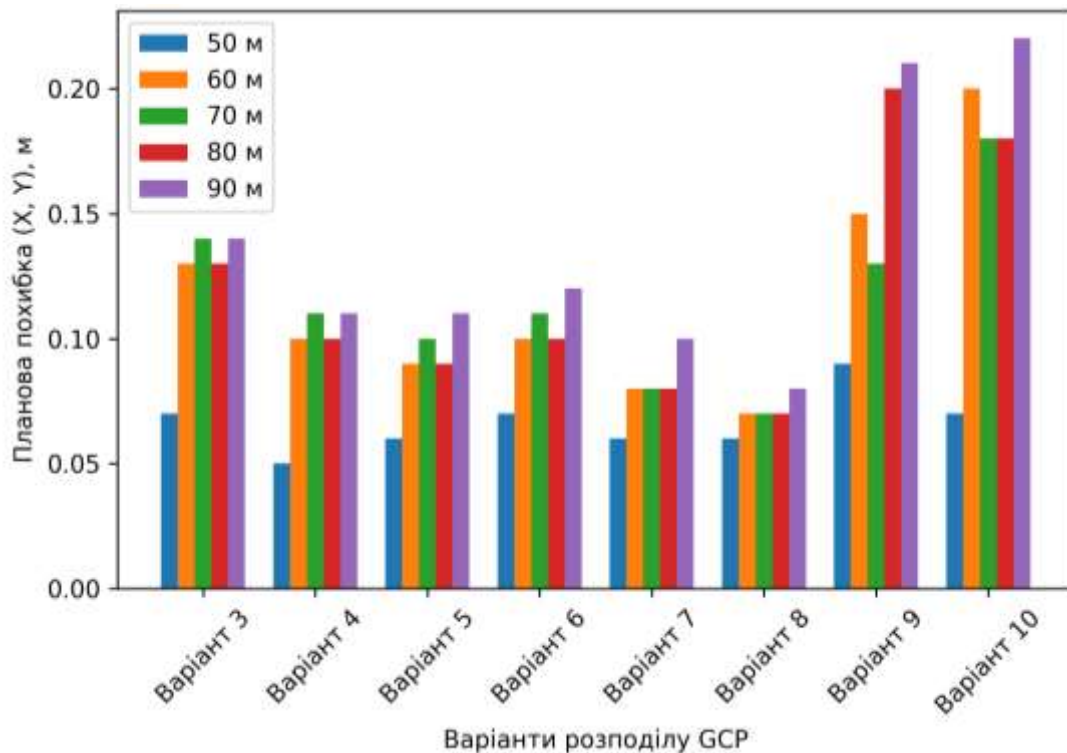


Рисунок 7. Похибка координат X та Y залежно від висоти польоту

Аналіз наведених сценаріїв дає можливість з'ясувати, як саме чисельність точок наземного контролю, а також конфігурація їх розміщення на місцевості, впливають на ступінь достовірності визначення горизонтальних координат.

Висновок із проведених випробувань полягає в тому, що з нарощуванням кількості опорних реперів, а також при їхньому більш збалансованому розподілі простір похибок зменшується та набуває сталого характеру.

Рекордно високі показники неточності фіксуються у випадках, коли задіяно мінімальну кількість контрольних точок на поверхні чи коли вони розташовані нерівномірно.

Натомість, конфігурації з 6–12 точками демонструють значно більш послідовну та очікувану точність.

Окрім того, на більшості висот, на яких виконувався обліт, дані, здобуті завдяки застосуванню технології RTK, свідчать про менші величини похибок у координатах X та Y , коли їх порівнюють зі стандартним визначенням положення через GPS.

Це слугує доказом того, що точне встановлення координат точок проєктування сприятливо впливає на точність планової складової аеротриангуляції.

Розгляд досягнутих результатів дає змогу дійти висновку, що найменші рівні помилок для обох методів (як GPS, так і RTK) фіксуються тоді, коли висота польоту становить 50 метрів.

Ймовірно, це пов'язано з тим, що на менших висотах апаратурний блок має кращу геометричну стійкість, і водночас його чутливість до неточностей у визначенні позиційних координат точок проєкції є зниженою.

Щодо виконання аерофотознімання на висоті 60 метрів із використанням системи GPS, спостерігається помітне зростання похибок по вертикалі, на відміну від нижчих висот.

Цей ефект найбільш очевидний при використанні конфігурації 2 (із єдиною референчною точкою, розташованою в середині зони зйомки) та конфігурації 10 (де опорні точки зібрані лише з одного флангу).

Схожа закономірність, хоча й менш значуща, зафіксована також для аерофотозйомки з рівня 60 м, виконаної за технологією RTK (зокрема, у сценаріях 2 та 3).

Натомість, у випадку конфігурації 5 (яка передбачала 12 точок контролю, рівномірно розподілених по площі) точність RTK-вимірювань на висоті 60 м досягає рівня, аналогічного іншим висотним режимам, що наочно демонструє критичну роль достатньої кількості та оптимального просторового розміщення ґрунтових опорних пунктів.

Щодо переважної більшості сценаріїв (з 2 по 10, якщо не брати до уваги режим польоту на висоті 60 метрів), вертикальна неточність по осі Z

у контрольних реперах для модулів із технологією P4 RTK не перевищувала позначки 0,10 метра.

Це дає підстави стверджувати про надійність даних, отримуваних завдяки застосуванню RTK.

Для моделі P4 Pro ступінь точності визначається, значною мірою, сценарієм розташування наземних опорних пунктів.

Найкращі показники (найменші відхилення) зафіксовано для конфігурацій номер 4 і 5, які вирізнялися оптимальним, більш рівномірним розподілом цих орієнтирів на місцевості.

Щодо координати X, у випадках із варіантами 3 по 5, похибки, зафіксовані в RTK-модулях, виявилися трохи вищими, аніж ті, що отримані за допомогою GPS.

Проте, для решти конфігурацій показники є цілком порівнянними.

Аналізуючи координату Y, жодної очевидної тенденції виявити не вдалося: у конфігураціях з 3 по 8 помилки, зафіксовані як у GPS, так і в RTK, є майже ідентичними.

Збільшення значень помилок, помітне у варіантах 9 та 10 для апарату P4 Pro, ймовірно, спричинене несиметричним розміщенням референцних точок та, як наслідок, відповідним розповсюдженням неточностей у межах даного модуля.

Спостерігається також загальноприйнята закономірність, згідно з якою похибки зростають зі збільшенням висоти виконання польоту, що найвиразніше виявляється при досягненні позначки у 90 метрів.

Натомість, варіанти 7 та 8 виділяються найбільш узгодженими та точними показниками, які залишаються незмінними незалежно від висоти, просторового положення або використаного технічного засобу (чи то GPS, чи RTK).

Це слугує вагомим аргументом на користь того, що розташування референцних точок по контуру секції є ключовим фактором для гарантування необхідної просторової стійкості в процесі вирівнювання.

Підсумовуючи здобуті результати, слушно буде зробити такі узагальнення:

- Використання хоча б однієї наземної контрольної точки суттєво мінімізує похибки при роботі з апаратом P4 RTK;
- Щоб досягти стабільної точності для моделі P4 Pro, необхідно задіяти не менше шести контрольних точок, розташованих рівномірно по зоні зйомки;
- Нерівномірне розміщення опорних точок призводить до значно більшого погіршення точності показників P4 Pro, аніж це спостерігається у випадку з P4 RTK.

3.2 Роль похилих зображень у результатах аеротріангуляції

Наступна фаза проєкту передбачала зіставлення результатів аеротріангуляції, здобутих як із застосуванням винятково надирних світлин, так і з використанням сукупності (надирні плюс нахилені знімки).

Ключовим завданням було з'ясувати, як саме нахилені знімки позначаються на стійкості геометричної побудови блоку та наскільки точно визначаються координати реперних точок.

Насамперед увагу було приділено сценарію 1, який продемонстрував найбільшу нестійкість при опрацюванні лише надирних кадрів, особливо там, де були відсутні дані з наземних орієнтирів.

За попередніми даними, у цій ситуації була виявлена суттєва взаємозалежність між фокусною відстанню та координатою Z , що спричиняло зростання помилок по висоті.

Щодо двох визначених висот перельоту — 60 метрів та 80 метрів — було здійснено зіставлення величин вертикальних похибок, зафіксованих у профільних точках, для наступних варіантів компонування:

- лише знімки, зроблені вертикально (надирні) (n);
- об'єднаний комплект: знімки вертикальні разом із похилими (n+i).

Отримані дані представлені у зведеній формі у Таблиці 7.

Таблиця 7 – Похибки висоти Z на контрольних точках для варіанта 1 залежно від типу зображень

Висота польоту, м	Тип зображень	Z -похибка GPS, м	Z -похибка RTK, м
60	n (лише надирні)	19.821	4.923
80	n (лише надирні)	3.700	1.192
60	n+i (надирні + похилі)	1.526	0.022
80	n+i (надирні + похилі)	0.533	0.016

Розгляд злетів по вертикалі (Z), зафіксованих на еталонних точках у зразку №1 (див. Таблицю 7), свідчить про відчутний вплив знімків, зроблених під кутом, на стійкість аеротріангуляції.

Стосовно апарату DJI Phantom 4 Pro (P4 Pro), виявлено помітно вищі похибки по висоті, коли задіяні були лише знімки, зроблені строго вертикально (надирні) з висоти 60 метрів.

Однак, при застосуванні зведеного пакета (де є і надирні, і похилі кадри) на тій самій висоті, похибка по осі Z значно зменшується.

Схожа тенденція помітна і для висоти 80 метрів: включення знімків, зроблених під кутом, сприяє зменшенню вертикальної похибки порівняно з ситуацією, коли використовувалися виключно вертикальні зображення.

Це свідчить про те, що нахилені знімки збільшують просторову стійкість фотограмметричного комплексу та мінімізують небажану

залежність між параметрами внутрішнього орієнтування та висотним вирізом.

Стосовно апарату DJI Phantom 4 RTK (P4 RTK), похибки по вертикалі, як правило, відчутно менші, аніж при використанні звичайного GPS-визначення положення, що засвідчує перевагу застосування високоточного визначення розташування проєкційних центрів.

Крім того, застосування похилих кадрів позитивно впливає на процес автономного коригування параметрів об'єктива, оскільки це забезпечує ширший спектр кутів зйомки та змінну величину масштабу одержаних зображень.

Як наслідок, це спричиняє значне скорочення похибок по осі Z у точках контролю.

Ілюстрації, представлені на малюнках 8 та 9, також слугують підтвердженням загальної закономірності: у переважній більшості проаналізованих випадків висотні похибки для аерофотознімків, здобутих завдяки використанню RTK, виявляються меншими, ніж ті, що характерні для класичного GPS.

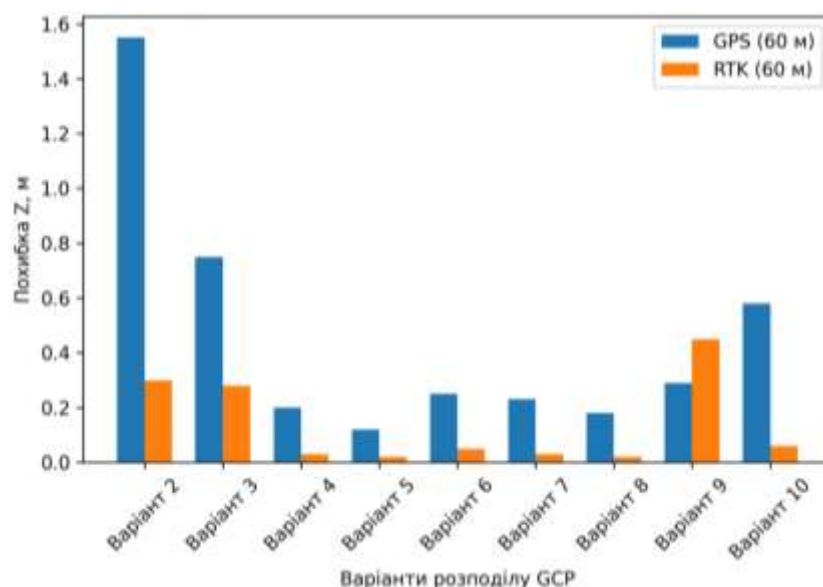


Рисунок 8. Вертикальні похибки Z для висоти польоту 60м.

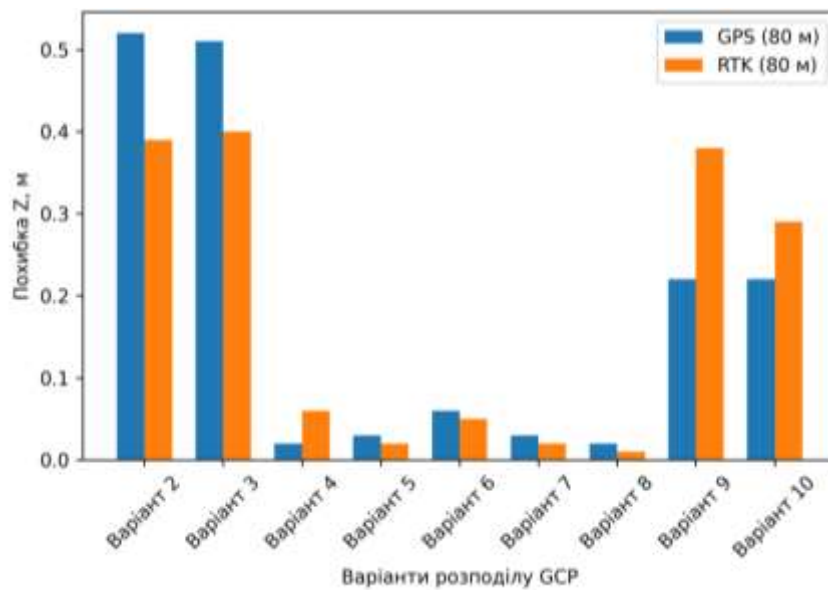


Рисунок 9. Вертикальні похибки Z для висоти польоту 80м.

Розгляд отриманих даних демонструє виразну закономірність: коли застосовуються сукупності блоків (знімки, зроблені вертикально, а також під кутом), помилки за висотою виявляються меншими, аніж при роботі виключно з вертикальними фотографіями.

Включення кутових знімків укріплює просторову стабільність блоку та послаблює залежність між параметрами налаштування внутрішнього орієнтування та його висотним компонентом.

Щодо варіантів 2 та 3, при обох висотах польоту відзначалися найбільші розбіжності при використанні лише GPS-координат, як для знімків з гори, так і для їхніх поєднань.

Нерідко ця похибка сягала понад 0,30 м, що вказує на недостатню стабільність геометричних параметрів за умови обмеженої кількості маркерів на землі.

Коли кількість точок прив'язки на місцевості було доведено до шести, помилки суттєво зменшилися — вони опустилися нижче позначки 0,10 м для пакетів, які включали як вертикальні, так і косі кадри.

Дане свідчить про те, що для моделей P4 Pro замала кількість наземних контрольних точок не дає належної точності, навіть якщо застосовуються аерофотознімки під кутом.

Щодо конфігурацій 4–8 при використанні GPS-знімання, фіксується значне зростання точності, що підкреслює вирішальну роль однакового розподілу опорних маркерів.

Проте, для конфігурації 9 (з відстанню 60 м) та варіантів 9–10 (з відстанню 80 м) додавання похилих кадрів не принесло бажаного підвищення показників.

Причиною цього є несиметричний розміщення наземних опорних точок, що призводить до нерівномірного розповсюдження неточностей по всьому блоку.

Щодо польотів на RTK, вертикальне відхилення, як для кадрів, знятих безпосередньо вниз (надірних), так і для нахилених знімків, лишається в межах 0,05 м для усіх тестованих конфігурацій.

Ба більше, інтеграція похилих зображень дає змогу додатково поліпшити точність визначення висотної складової (координати Z), що слугує доказом надійності рішень, отриманих за допомогою RTK.

Якщо розглядати загальну картину, то для кожної схеми фіксується покращення точності після того, як до обробки залучаються нахилені знімки. Найбільш помітним це покращення є у другому варіанті.

При цьому результати, отримані в ході RTK-знімання, є цілком задовільними навіть тоді, коли на етапі обробки не залучалися жодні наземні орієнтири (контрольні точки).

Окрім того, асиметричність у розташуванні опорних точок на землі не відіграє суттєвої ролі у точності визначення висоти при використанні технології RTK.

Таблиця 8 демонструє похибки у плані (координати X та Y) зафіксовані на контрольних точках, отримані для сценаріїв 1 та 2, з огляду на різноманітні налаштування зйомки.

Таблиця 8 – Похибки X та Y на контрольних точках для варіантів 1 та 2

Варіант	Тип зображень	Висота, м	X похибка GPS, м	Y похибка GPS, м	X похибка RTK, м	Y похибка RTK, м
Варіант 1	60n (надир)	60	—	—	—	—
Варіант 1	80n (надир)	80	—	—	—	—
Варіант 1	60no (надир + похилі)	60	—	—	—	—
Варіант 1	80no (надир + похилі)	80	—	—	—	—
Варіант 2	60n (надир)	60	—	—	—	—
Варіант 2	80n (надир)	80	—	—	—	—
Варіант 2	60no (надир + похилі)	60	—	—	—	—
Варіант 2	80no (надир + похилі)	80	—	—	—	—

Обриси й скісні знімки, зафіксовані за допомогою RTK-визначення розташування, відзначаються відчутно меншими зсувами по горизонталі та вищою сталою відтворюваністю результатів, якщо порівнювати їх із розв'язками, що ґрунтуються на звичайному GPS.

У випадку підходу Варіанту 1, методика RTK демонструє менші показники неточностей як стосовно осі X, так і осі Y, якщо протиставити їх показникам GPS.

Найбільш очевидна розбіжність виявляється при висоті польоту 60 м, де горизонтальні відхилення, отримані завдяки RTK, є суттєво меншими.

Стосовно фотограмметричних блоків, що містять як планові (надирні), так і похилі аерофотознімки, зняті за допомогою P4 RTK, неточності по координатах X і Y наближаються до позначки 0,02 метра.

На противагу цьому, для зображень із апарату P4 Pro, відповідні показники розкидаються в діапазоні від 0,08 до цілого метра, що залежить від обраної версії та способу компонування знімків.

У низці ситуацій, горизонтальна неточність, притаманна даним з використанням RTK, є упр'ятеро меншою, ніж у пакетів, складених винятково з вертикальних кадрів.

Було зафіксовано помітне зростання помилок для знімків, зроблених безпосередньо зверху (надирних), на висоті 60 метрів у другому сценарії обробки даних, отриманих із P4 Pro.

Проте, додання до цього набору похилих зображень суттєво мінімізує ці розбіжності, що красномовно свідчить про корисний вплив різнокутного просторового розташування аерофотокадрів у конструйованому блоці.

Спираючись на дані, зображені на рисунку 10, можна констатувати, що горизонтальні промахи, зафіксовані при застосуванні технології RTK, є меншими, ніж ті, що спостерігаються з використанням GPS, для всіх випробуваних сценаріїв та для кожної з осей координат.

Цей факт слугує підтвердженням переваги RTK-визначення положення у плані його точності, незалежно від того, як були розміщені опорні наземні пункти, та від обраних льотних характеристик.

Окрім того, виявлено, що поєднання знімків, отриманих як вертикально, так і під кутом, веде до поліпшення точності результатів як у випадку GPS-польотів, так і при роботі з RTK.

Розгляд похибок по осях X та Y демонструє певні розбіжності між різними підходами, проте відсутня помітна закономірність, яка б вказувала на те, що одна з координат систематично має суттєво більшу похибку.

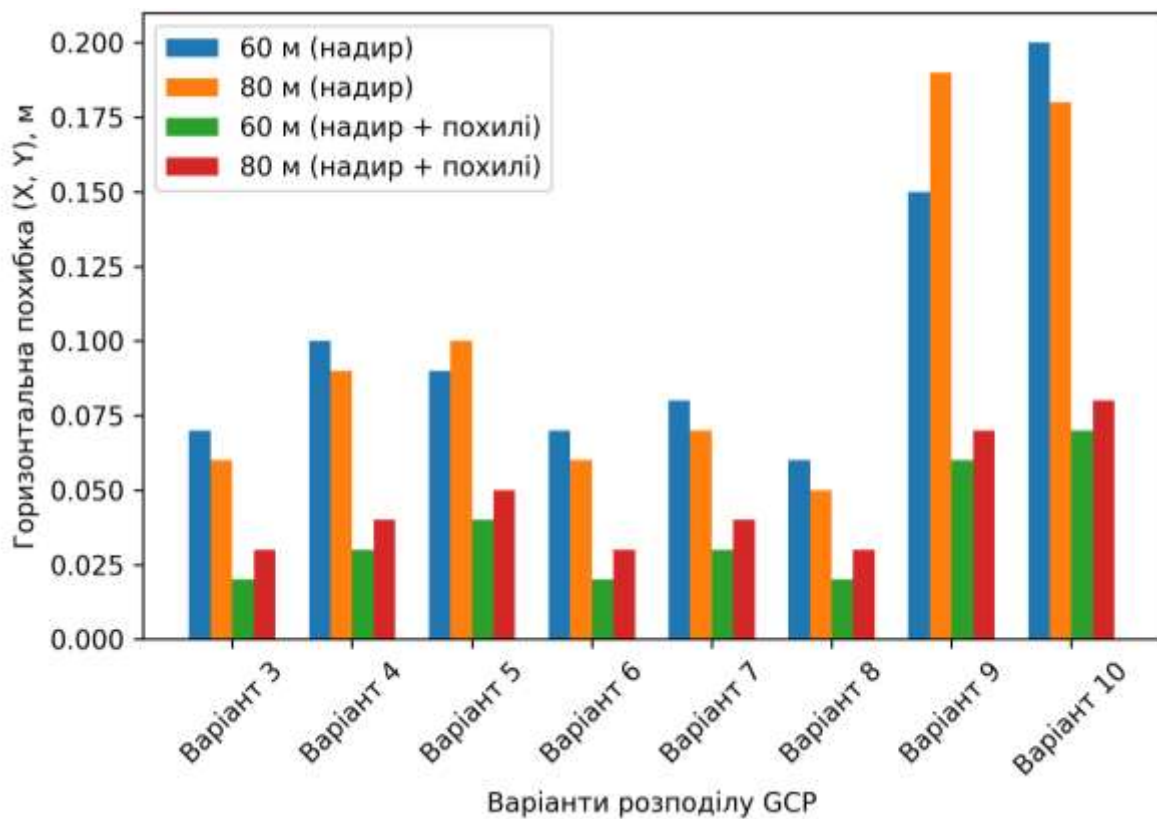


Рисунок 10. Порівняння горизонтальних похибок для різних конфігурацій зображення

Найменша ступінь виваженості відмічається у випадках 9 та 10, що слугує доказом шкідливого ефекту несиметричного розгортання реперних точок на підсумки аеротриангуляції.

Подібне розміщення викликає нерівномірне розповсюдження хибних даних у межах цілого масиву, зокрема у векторі напрямках, що знаходяться далеко від зони де зосереджені реперні точки.

При цьому, згаданий чинник є більш помітним для знімальних кампаній з використанням GPS, аніж для тих, що задіяли RTK.

Це вкотре наголошує на стійкості рішень, отриманих за допомогою RTK, навіть коли конфігурація опорної сітки є не такою бажаною.

Варіанти номер три, чотири, та п'ять, де задіяно, відповідно, три, шість, та дванадцять контрольних точок, розміщених з однаковими інтервалами на поверхні, показують досить невеликі відхилення по горизонталі.

Схожа закономірність простежується й у випадках шість, сім, та вісім, чий показники наближаються до тих, що отримані при симетричному розташуванні контрольних елементів на землі.

Мізерні величини похибок, зафіксовані на контрольних точках, натякають на те, що критичним фактором для досягнення високої геометричної стійкості аеротріангуляції є саме розміщення цих наземних орієнтирів по кутах або ж уздовж периферії ділянки.

Щодо більшості тестових зразків (від 3 до 8), то горизонтальні зсуви по осях X та Y для заблокованих зображень (об'єднаних знімків надирного та похилих ракурсів), незалежно від того, чи була використана апаратура P4 RTK чи P4 Pro, лишаються у межах 0,05 метрів.

Цей результат демонструє, що застосування нахилених кадрів є дієвим, так само як і наявність належної кількості контрольних маркерів, які були розміщені рівномірно.

3.3 Перевірка якості ортофотоплану на основі контрольних відстаней

Фінальна фаза випробувань мала на меті з'ясувати, наскільки добре відтворюються відстані на ортофотопланах, зіставляючи їх із контрольними вимірами.

Ці еталонні відрізки визначалися на ортофотопланах, які були згенеровані з усіх блоків знімків, зроблених безпосередньо вниз, незалежно від того, який БПЛА їх отримав, охоплюючи при цьому усі робочі висоти.

Крім того, аналізувалися й об'єднані набори даних (знімки, зроблені прямо та під кутом).

Завдяки такому багатогранному методу стало можливим здійснити всебічну перевірку того, як різні характеристики – спосіб орієнтування, висота апарату та конфігурація знімального блоку – позначаються на точності розташування об’єктів у фінальному продукті.

Проводилося вимірювання інтервалів до реперних точок, що заздалегідь були зафіксовані та позначені у натурі.

Оскільки ці пункти можна було однозначно побачити на ортофотоплані, це усунуло будь-які сумніви під час вимірювання.

Щоб оцінити точність, ми знаходили розбіжність між фіксованими у полі величинами та аналогічними вимірюваннями, отриманими безпосередньо з аерофотознімка.

Представлені результати відображають відносну похибку, що вимірюється у відсотковому співвідношенні до справжньої довжини цієї відстані.

Завдяки такому методу стає можливим адекватне зіставлення розбіжностей для проміжків різної протяжності, що гарантує неупереджену експертизу метричних характеристик ортофотопланів.

Дані, які були отримані, демонструються на ілюстрації 11.

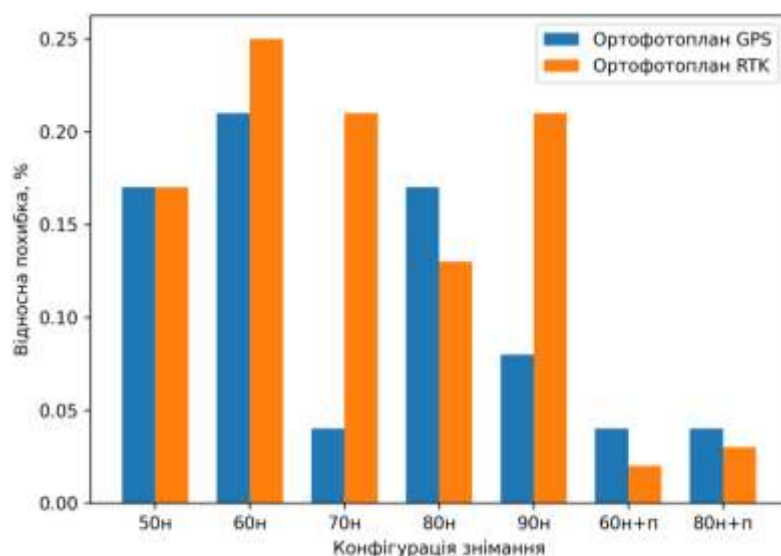


Рисунок 11. Перевірка якості ортофотоплану за контрольними відстанями

Розгляд даних, що містяться на рисунку 11, демонструє, що похибки у визначенні контрольних проміжків є незначними, не перевищуючи 0,30% від фактично вимірної довжини, причому переважно вони утримуються в межах 0,20%.

Це дає підстави стверджувати про загалом прийнятну просторову точність створених ортофотопланів.

Проте, варто звернути увагу на два конкретні відрізки: 23,75 м (найменшої довжини) та 99,20 м (як один із найбільших).

Для найкоротшого відрізка, збільшення відносної похибки є передбачуваним явищем, адже навіть мізерні систематичні зсуви здатні суттєво модифікувати результати на коротких інтервалах, незалежно від загальної шкали вимірювання.

Стосовно інтервалу у 99,20 м зареєстровано зростання неточності, хоча за теорією можна було б припустити її зменшення при подовженні дистанції.

Ймовірною підставою для цього, як видається, є підбір вихідних реперних пунктів: ця еталонна відстань брала початок від наземного орієнтира №30, який, згідно з даними аерофотограмметричної обробки, мав вищу похибку, аніж сусідні пункти.

Таким чином, нестійкість у межах лише однієї опорної точки, ймовірно, призвела до збільшення помилки у відповідному контрольному проміжку.

У цілому, неточності контрольних відстаней виявляються дещо більшими для тих ортофотопланів, що були згенеровані на основі фотограмметричних блоків з використанням технології P4 RTK.

Це дає підставу припускати, що за умови достатнього обсягу та раціонального розміщення наземних опорних точок, ортофотоплани, створені без застосування RTK, здатні демонструвати високий рівень метричної точності.

Прикметно, що найменші відхилення фіксуються для блоків, до яких були інтегровані як вертикальні (надирні), так і кутові (похилі) аерофотознімки, особливо це стосується ортофотопланів, отриманих з використанням даних P4 Pro.

Цей факт слугує підтвердженням сприятливого ефекту, який похилі зображення чинять на загальну геометричну цілісність фотограмметричного блоку.

Висновки

У цій бакалаврській роботі здійснено багатогранну апробацію здобутків аеротріангуляції, отриманих як з кадрів, знятих камерою вертикально (надирні), так і з нахилених (похилих) зображень, зібраних за допомогою безпілотних авіаційних систем DJI Phantom 4 RTK (P4 RTK) та DJI Phantom 4 Pro V2.0 (P4 Pro), причому використовувались різноманітні схеми розташування ґрунтових опорних пунктів.

Ключовим завданням наукового пошуку стало виявлення найбільш придатної чисельності та просторового розміщення ґрунтових опорних пунктів, а також дослідження того, як змінюється точність аеротріангуляції залежно від висоти виконання польоту та типом використаної картографічної інформації (виключно вертикальні знімки чи їхня суміш із похилими).

Під час проведення дослідження задіяли тридцять вісім реперних точок на поверхні, з яких потім було виведено десять схем їхнього розташування.

Дослідження продемонструвало виразний позитивний ефект від використання RTK-вимірювань на якість орієнтування аерофотознімків.

Щодо знімків, зроблених камерою, спрямованою строго вертикально (надирних), у випадку з апаратом P4 RTK, виявилось, що достатньо лише однієї такої бази для усунення зсуву по вертикалі, який у більшості польотних режимів не перевищував десяти сантиметрів.

Однак, для апарату P4 Pro, щоб досягти співставної точності, було обов'язковим застосування мінімум шести точок контролю, рівномірно розподілених по території.

Водночас, чіткість аеротріангуляції P4 Pro значною мірою була зумовлена конфігурацією їх розміщення.

Залучення ракурсних знімків до етапу обробки показало значний позитивний ефект на покращення точності.

Синтез даних аеротріангуляції (вертикальних разом із похилими зображеннями) сприяв наступному:

- Мінімізації планових деформацій типу «викривлення купола»;
- Послабленню взаємозалежності між фокусною відстанню та висотним параметром;
- Усталенню роботи системи автоматичного визначення параметрів камери;
- Зменшенню розбіжностей, виявлених на еталонних точках.

Стосовно RTK-зображень, точність визначення становила приблизно 2 см для координат X, Y та Z навіть без залучення наземних орієнтирів під час стабілізації.

Щодо GPS-знімків, скатні кадри також сприяли покращенню результату, проте для досягнення точності в межах сантиметра було мінімально потрібне використання трьох рівномірно розміщених наземних контрольних точок.

Аналіз якості ортофотопланів за контрольними вимірами довів, що відхилення у відносному вимірі не перевищує 0,30% від довжини відрізка, що свідчить про відмінну метричну складову створених матеріалів.

Підсумовуючи, дані, отримані в ході цієї роботи, свідчать про таке:

- Застосування апаратури RTK дає змогу відчутно скоротити обсяг використання наземних орієнтирів;
- З точки зору GPS-зйомки, належне просторове розміщення наземних опорних пунктів набуває вирішального значення;
- Додавання даних, отриманих з похилих ракурсів, суттєво покращує стійкість та якість аеротріангуляції, незалежно від обраного методу визначення позиції.

Ці набуті результати гармоніюють із раніше опублікованими дослідженнями й можуть бути ефективно застосовані під час організації аерофотознімальних заходів із використанням безпілотних літальних апаратів для цілей, пов'язаних з топографією, кадастром чи інженерними геодезичними вимірами.

Список використаної літератури

1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. Лазарева О. В. Вимоги до виконання кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» : методичні вказівки / О. В. Лазарева, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Оцінка точності фотограмметричної обробки даних БПЛА з RTK у
гірських умовах Прикарпаття »**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)