

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та ДонНАБА

Кафедра геодезії та землеустрою

Туз Назарій
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
**« Порівняння точності LiDAR БПЛА та традиційних методів
тахеометричної зйомки для створення цифрової моделі поверхні »**
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Н. Туз, студент групи ГЗз-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: ***к.т.н. доцент Леся Перович***
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ***проф. Микола ПРИХОДЬКО***
(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

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**

Туз Назарій

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Порівняння точності LiDAR БПЛА та традиційних методів тахеометричної зйомки для створення цифрової моделі поверхні »

керівник роботи: к.т.н. доцент Леся Перович

(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. Огляд методів дослідження
2. Район дослідження
3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Огляд методів дослідження		
2	Район дослідження		
3	Результати дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент _____ ***Туз Н.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ ***Перович Л.***

Анотація

Метою нашої бакалаврської роботи є оцінка точності та ефективності використання лазерного сканера DJI Zenmuse L2, встановленого на безпілотнику DJI Matrice 350 RTK, при побудові цифрової моделі поверхні (ЦМП) в умовах щільної рослинності, з порівнянням результатів із даними, отриманими традиційними геодезичними методами — зокрема, тахеометричною зйомкою.

Актуальність теми

У геодезичній практиці точність вимірювань суттєво знижується через наявність щільної рослинності, складного рельєфу або обмеженого огляду.

Особливо це стосується лісових ділянок і прибережних зон, де традиційні методи збору просторових даних, зокрема аерофотозйомка або тахеометрія, є утрудненими або недостатньо ефективними.

У цьому контексті використання LiDAR-технологій, здатних "проникати" крізь рослинний покрив і надавати високоточну тривимірну модель місцевості, є надзвичайно перспективним.

Розвиток безпілотних систем у поєднанні з сучасними сенсорами відкриває нові горизонти для геодезії.

Завдання дослідження

- Провести лазерне сканування ділянки з щільною рослинністю за допомогою DJI Zenmuse L2.
- Зібрати дані тахеометричної зйомки та GNSS-спостережень для створення контрольних точок.
- Порівняти результати LiDAR-сканування з даними традиційних геодезичних методів.
- Оцінити точність отриманої цифрової моделі рельєфу.

- Проаналізувати можливості інтеграції LiDAR-даних з класичними геодезичними вимірюваннями.

Наукова новизна

Дослідження є актуальним з огляду на впровадження інноваційних технологій у класичну геодезичну практику.

Новизна полягає у поєднанні високоточних методів наземного позиціонування з повітряним лазерним скануванням, що дозволяє проводити просторові вимірювання навіть у недоступних або складних з точки зору зйомки зонах.

Вперше в умовах прибережної лісової місцевості було проведено порівняльний аналіз точності даних, отриманих за допомогою дронів і традиційної тахеометрії.

Практична цінність

Результати роботи демонструють ефективність використання дронів з LiDAR-сенсорами у важкодоступних районах.

Запропонований підхід може бути використаний при складанні топографічних карт, інженерно-геодезичних вишукуваннях, моніторингу берегових ліній, а також у лісовпорядкуванні.

Це дозволяє значно зменшити час і витрати на польові роботи без втрати якості даних.

Ключові слова: LiDAR, тахеометр, GNSS, наземне вирівнювання, цифрова модель поверхні Землі, геодезичні роботи, геопросторові технології, лазерне сканування, топографічна зйомка.

Abstract

The purpose of our bachelor's thesis is to assess the accuracy and efficiency of using the DJI Zenmuse L2 laser scanner, installed on the DJI Matrice 350 RTK drone, when constructing a digital surface model (DSM) in conditions of dense vegetation, with a comparison of the results with data obtained by traditional geodetic methods - in particular, total station surveying.

Relevance of the topic

In geodetic practice, the accuracy of measurements is significantly reduced due to the presence of dense vegetation, complex terrain or limited visibility.

This is especially true for forest areas and coastal zones, where traditional methods of collecting spatial data, in particular aerial photography or total station surveying, are difficult or insufficiently effective.

In this context, the use of LiDAR technologies, which are able to "penetrate" through vegetation and provide a high-precision three-dimensional model of the terrain, is extremely promising.

The development of unmanned systems in combination with modern sensors opens up new horizons for geodesy.

Research objectives

- To conduct laser scanning of an area with dense vegetation using the DJI Zenmuse L2.
- To collect data from total station surveying and GNSS observations to create control points.
- To compare the results of LiDAR scanning with data from traditional geodetic methods.
- To assess the accuracy of the resulting digital terrain model.
- To analyze the possibilities of integrating LiDAR data with classical geodetic measurements.

Scientific novelty

The study is relevant in view of the introduction of innovative technologies into classical geodetic practice.

The novelty lies in the combination of high-precision ground positioning methods with airborne laser scanning, which allows spatial measurements to be made even in inaccessible or difficult-to-take areas.

For the first time, a comparative analysis of the accuracy of data obtained using drones and traditional total station was conducted in a coastal forest area.

Practical value

The results of the work demonstrate the effectiveness of using drones with LiDAR sensors in hard-to-reach areas.

The proposed approach can be used in compiling topographic maps, engineering and geodetic surveys, monitoring coastlines, as well as in forest management.

This allows you to significantly reduce the time and costs of field work without losing data quality.

Keywords: LiDAR, total station, GNSS, ground leveling, digital model of the Earth's surface, geodetic work, geospatial technologies, laser scanning, topographic surveying.

Зміст

Вступ

1. Огляд методів дослідження

2. Район дослідження

2.1 Вивчіть об'єкту дослідження

2.2 Збір даних

2.2.1 БПЛА DJI M350 RTK

2.2.2 Наземне знімання

2.3 Опрацювання даних

2.3.1 Опрацювання LiDAR БПЛА в DJI Terra

2.3.2 Створення цифрової моделі рельєфу

3. Результати дослідження

3.1 Оцінка точності спостережень

3.3 Знімання в умовах лісу

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Впровадження геопросторових рішень здійснило справжню революцію в царині геодезії та картографії, піднявши планку вимог до точності та продуктивності.

Навіть незважаючи на високу точність, яку демонструють традиційні методи зйомок, їх застосування у важкодоступних місцях, скажімо, в густих лісових масивах чи на рельєфі зі складним перетином, може бути ускладнене через проблеми з доступом та потребу у значних трудовитратах.

Сучасні способи аерофотозйомки, включно з LiDAR, дають змогу отримувати докладні топографічні відомості, проходячи крізь рослинний покрив та демонструючи дійсну поверхню землі, що дозволяє геодезистам успішно вирішувати поставлені завдання.

Проблеми, які раніше могли бути розв'язані тільки за допомогою традиційних підходів, тепер стають доступними завдяки цим технологіям.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), обладнані LiDAR-сканерами, є ефективним рішенням для зйомки місцевостей із щільною рослинністю, адже дають змогу створювати високоточні тривимірні моделі місцевості.

Ці моделі відіграють значну роль у процесі створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Вони набувають особливої ваги у ситуаціях, коли стандартні підходи до зйомки виявляються малоефективними, або ж обмежені екологічними приписами; де отримання зв'язку із системами ГНСС проблематичне або взагалі неможливе, саме традиційні інструменти, скажімо, тахеометри, виходять на перший план.

Значення таких методів важко переоцінити там, де супутникові сигнали не здатні забезпечити необхідну високу точність визначення положення, або ж коли зібрані дані потребують підтвердження з альтернативних джерел інформації.

1. Огляд методів дослідження

Для забезпечення максимальної точності вимірювань, контрольні точки розташовують вільними від рослинності, застосовуючи GNSS-приймачі, а координати під кронами дерев визначаються за допомогою тахеометра.

Такий підхід гарантує отримання достовірної топографічної інформації навіть в умовах, що характеризуються складністю.

Дані вимірювань, зібрані за вказаною схемою, виконують роль еталонних точок, котрі використовуються для верифікації точності даних, отриманих шляхом LiDAR-сканування з БПЛА.

Зазначена процедура гарантує чітке позиціонування даних і забезпечує високу точність в рамках проєктів, спрямованих на детальне картографування твердих поверхонь.

Дослідження у сфері картування прибережжя свідчать, що використання LiDAR-технологій на безпілотних літальних апаратах дає середньоквадратичну похибку в 0,1 метра, одночасно забезпечуючи дані з високою деталізацією та точністю.[5]

Отримані показники підтверджують ефективність LiDAR для проведення поглибленого аналізу прибережних зон, наприклад, моніторингу змін рельєфу внаслідок ерозії та управління ресурсами природного походження.

Підсумки дослідження наголошують на тому, що LiDAR-системи, інтегровані з БПЛА, виступають продуктивною альтернативою традиційним методам аерозйомки, особливо у випадках обмеженого доступу до об'єктів дослідження або необхідності мінімізації впливу на навколишнє середовище.

До того ж, певні науковці проводили паралелі між точністю хмар точок, сформованих LiDAR, та інформацією, зібраною шляхом ретельного узгодження фотознімків з безпілотників.

Під час аналізу ці дані хмар точок зіставляли з еталонною інформацією, що була одержана завдяки традиційним наземним вимірюванням.

Результати показали, що дані LiDAR демонструють високу точність, із середньоквадратичною похибкою на рівні приблизно 0,05 метра.

Водночас метод зіставлення зображень високої щільності дає можливість досягти ще більш високої точності, аж до субсантиметрового рівня, якщо дозволяють умови.[4,5]

Але там, де рослинність дуже густа, цей метод часто показує меншу ефективність та точність, поступаючись LiDAR.

LiDAR, демонструючи стабільні показники в таких умовах, залишається найкращим вибором для отримання надзвичайно точних даних про місцевість.

Одержані дані засвідчують надзвичайну результативність застосування LiDAR на безпілотниках для розлогого картування місцевості.

У порівнянні з підходами, що спираються на аналіз фотографій, LiDAR показує помітні плюси, особливо стосовно точності цифрової моделі рельєфу (ЦМР).

Вивчення акцентує необхідність інтеграції БПЛА з LiDAR у процес збору геопросторових даних, передусім, коли визначальними є найвища точність та ефективність.

Окрім того, були здійснені дослідження з приводу використання БПЛА для картографування місцевості із сенсорами Velodyne LiDAR.

У межах даного дослідження, на безпілотних літальних апаратах було розміщено сенсори LiDAR з метою отримання інформації про особливості рельєфу для різних природних зон.[4]

Після завершення процесу збору даних, результати, здобуті з використанням LiDAR, було зіставлено з даними, зібраними шляхом традиційного наземного геодезичного обстеження.

Проведений аналіз виявив, що середня квадратична похибка вимірювань, здійснених сенсором Velodyne за оптимальних умов місцевості, була приблизно 0,05 метра, що підтверджує високу надійність цього способу для побудови детальних топографічних карт.

Стосовно датчика DJI Zenmuse L2, він є відносно свіжою розробкою, тому важливо зазначити, що його характеристики ще не стали об'єктом всебічних наукових досліджень.

У рамках одного з проведених досліджень було розглянуто використання безпілотних літальних апаратів для вивчення та моніторингу зсувних явищ, і в його ході вдалося оцінити потенціал сенсора L2 в цьому контексті.

Метою цього дослідження було визначення рівня точності та надійності L2 під час створення деталізованих топографічних карт з метою подальшого аналізу та прогнозування зсувів.

Результати вказали, що датчик має середнє квадратичне відхилення похибки близько 0,06 метра і відзначається високою ефективністю для спостереження за топографічними змінами з плином часу.

Огляд наявних досліджень підкреслює перспективи застосування безпілотних літальних апаратів, обладнаних L2 LiDAR сенсорами, задля тривалого, систематичного моніторингу схильних до зсувів територій. [4,6]

Це дозволить значно поліпшити прогнозування потенційно небезпечних явищ та сприяти ефективнішому управлінню ризиками в критичних зонах.

Наша бакалаврська праця ретельно розкриває етапи збирання та опрацювання даних, а також демонструє можливості зіставлення LiDAR-

сканів, що отримані з використанням L2, зі стандартними вимірами, здійсненими тахеометром.

Застосування LiDAR на безпілотних літальних апаратах відкриває можливість ефективно збирати величезні масиви просторової інформації, яку в подальшому можливо застосувати для зіставлення з тахеометричними вимірами.

Точність таких зіставлень підтверджується шляхом проведення детальних геодезичних вимірювань з використанням геодезичної станції.

Такий підхід має надзвичайне значення у міському плануванні, організації моніторингу довкілля, будівництві та обслуговуванні інфраструктури, а також під час ліквідації наслідків катастроф.

У цих сферах вкрай важлива висока точність та безумовна надійність геопросторової інформації.

Використовуючи поглиблений аналіз оцінювання точності аерофотозйомки, проведене нами дослідження демонструє як сильні сторони, так і потенційні недоліки комбінованого використання технологій LiDAR та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у порівнянні з традиційними способами зйомки.

Отримані дані дають змогу сформулювати конкретні рекомендації щодо покращення точності, збільшення ефективності та розширення сфери застосування геодезичних вимірювань у поточних проектах.

2. Район дослідження

2.1 Вивчіть об'єкту дослідження

Ділянка, на якій проводиться дослідження, знаходиться на просторій території, загальна площа якої становить приблизно 30 000 квадратних метрів, тобто 3 гектари.

Це прекрасне місце для оцінки достовірності картографічного методу в різних умовах місцевості.

Рельєф досліджуваної місцевості представлений кількома ключовими компонентами.

До них належить основна дорога, що виконує роль важливої транспортної магістралі, відкриті простори з пласким ландшафтом, а також щільні зелені насадження, які розкинулися аж до самого берега річки.

Кожен із зазначених факторів справляє вплив на процес отримання геопросторових даних.

Різноманітність топографії та щільності рослинного покриву ускладнює проведення вимірювань і позначається на точності кінцевого продукту.[5]

Щільне рослинне покриття, особливо вздовж річок, становить суттєву перешкоду для традиційних аерофотозйомок, що використовують прямий візуальний огляд земної поверхні.

Варто відзначити, що саме ця особливість робить наочною перевагу LiDAR-зйомки, що демонструє здатність проникати крізь рослинність та надавати детальну інформацію про рельєф, розташований під шаром насаджень.

Необхідно встановити ключові етапи і взяти до уваги коливання висоти місцевості, що впливають на процес внесення поправок у дані.

Район дослідження оптимальний для вивчення потенціалу сучасних геодезичних технологій, адже містить в собі як складний ландшафт, так і території з вільним доступом та важкодоступні місця.

На малюнку 1 представлено аерофотознімок даної місцевості, який ясно демонструє топографічні особливості та можливі складнощі під час здійснення топографічного знімання.[4]



Рисунок 1. Вид досліджуваної території.

На шляхах критично важливе надзвичайно прецизійне геодезичне знімання, з досягненням точності до одного сантиметра.

Це ключовий фактор для підтримки функціональності транспортної мережі, гарантування безпеки учасників дорожнього руху та для якісного планування ремонтних та будівельних робіт.

Похибки у визначенні координат місцевості та плануванні можуть зумовити проблеми при розробці проєктів та в процесі експлуатації дорожнього полотна, а також систем водовідведення.

Отже, для фіксації доріг, потрібні передові, високоточні та актуальні технології.

Натомість, рівень точності не такий критичний на відкритих просторах та в затінку дерев, де пролягають потоки.

В цих умовах більш виправданим є застосування методів збору даних, які не потребують надмірної деталізації, але швидко надають загальне уявлення про структуру поверхні.

Скажімо, технології з нижчою щільністю даних, але більшими можливостями збору, підходять для нанесення рослинного покриву, визначення загального ухилу місцевості та оцінки змін, які відбуваються в ландшафті.

Ця різниця в потрібній точності – ключовий аспект, коли ми оцінюємо результативність актуальних технік знімання.

Йдеться про синергію різних підходів до збирання географічних даних, серед яких: LiDAR, GNSS, аерозйомка та перевірене часом тахеометричне знімання.[5,6]

Комбінування цих методів сприяє раціональному використанню ресурсів та покращенню продуктивності знімальних робіт:

На дорогах – гарантування високоточних вимірювань, які конче потрібні для інженерних розрахунків та управління об'єктами інфраструктури.

У польових умовах – використання дієвих методів, що дозволяють швидко охоплювати великі території.

У лісах, лідар дає змогу бачити крізь дерева, будуючи цифрові моделі місцевості (ЦММ), які недоступні для традиційного підходу.

Цей бакалаврський проєкт прагне продемонструвати, як ефективно поєднуючи різні геодезичні техніки, можна збирати дані навіть у різноманітному ландшафті.

Отже, маємо шанс знайти оптимальний спосіб, щоб продуктивність, точність та економічна вигода гармонійно співіснували, адже це ключові фактори сучасної геодезії.

Отримані дані відкривають широкі перспективи для реалізації різноманітних проектів:

- Розробка стратегій міського та регіонального розвитку;
- Рациональне використання та управління природними багатствами;
- Проектування та зведення об'єктів інфраструктури;
- Оцінка та мінімізація ризиків, пов'язаних зі стихійними лихами;
- Проведення регулярного екологічного моніторингу.

Отже, проведена робота підкреслює не лише переваги комплексного використання різних сенсорів у геодезичних дослідженнях, але й підтверджує його практичну цінність для розв'язання прикладних задач, що вимагають високого ступеня точності та гнучкості у методах збору інформації.[4]

2.2 Збір даних

2.2.1 БПЛА DJI M350 RTK

В рамках даної роботи було задіяно безпілотний літальний апарат (БПЛА) DJI Matrice 350 (M350) RTK (див. рис. 2).

Особливість цього БПЛА полягає в наявності прогресивної системи кінематики реального часу (RTK), що гарантує високоточну навігацію та визначення позиції в просторі.

Ключовою перевагою M350 RTK є можливість його інтеграції з різноманітними сенсорами, як-от LiDAR, мультиспектральні камери, а також оптичні датчики високої роздільної здатності, що робить його багатофункціональним інструментом для збору геопросторової інформації.



Рисунок 2 DJI Matrice 350 (M350) RTK

Завдяки технології RTK, безпілотники здатні зменшити похибки у вимірюванні координат до сантиметрового рівня.

Це критично важливо у проектуванні, кадастрових роботах та при створенні карт.

Особливості DJI Matrice 350 RTK:

- Висока точність RTK-навігації.
- Гарантує стабільне позиціонування навіть в умовах з перешкодами: щільна міська забудова або лісові масиви.
- Сумісність з різноманітними рішеннями для корисного навантаження відкриває широкі можливості.
- Дрон може бути обладнаний LiDAR-системами, сенсорами різного типу, а також камерами високої роздільної здатності для отримання деталізованих даних про навколишнє середовище.
- Оптимально підходить для аерофотозйомки значних площ. Тривалість польоту до 55 хвилин, а також інтелектуальна система

управління M350 RTK забезпечують ефективне покриття великих територій за один виліт.

- Високий рівень надійності у різних умовах експлуатації. Дрон має захист від впливу навколишнього середовища IP55, що гарантує безперебійну роботу навіть за підвищеної вологості або сильного вітру.

Під час проведення аерозйомки застосовувався дрон M350 RTK у парі з сенсором DJI Zenmuse L2 LiDAR.

Така комбінація забезпечила можливість зібрати детальні дані про місцевість навіть крізь густі крони дерев, де традиційні візуальні методи є малоефективними або зовсім непридатними.

Відтак, комплексне застосування дрона DJI Matrice 350 RTK спільно з лідарною технологією дозволило продуктивно виконати дослідження заданої території.

В результаті отримано високоточну цифрову модель місцевості (ЦМР), а також оцінено перспективність інтеграції різноманітних сенсорів у систему аерозйомки DJI Zenmuse L2.[4]

DJI Matrice 350 (M350) RTK (мал. 3), обладнаний сенсором LiDAR, був конфігурований з метою максимального використання потенціалу цього високотехнологічного датчика, забезпечуючи отримання докладних відомостей про місцевість, навіть за складних обставин.

DJI Zenmuse L2 LiDAR Датчик Zenmuse L2 забезпечує лазерне сканування (LiDAR), яке полягає у випромінюванні лазерного імпульсу з подальшою фіксацією його віддзеркалення.

Відстань до об'єкта може бути обчислена за рахунок надсилання лазерних імпульсів та їх відслідковування після відбиття.

Висока швидкість фіксації даних (1,2 мільйона точок за секунду) та п'ятикратний оберт лазерного променя дають змогу формувати надзвичайно деталізовані тривимірні карти місцевості навіть у зонах із щільною

рослинністю. Звичайні методи повітряного фотографування не здатні гарантувати потрібну точність в подібних умовах.

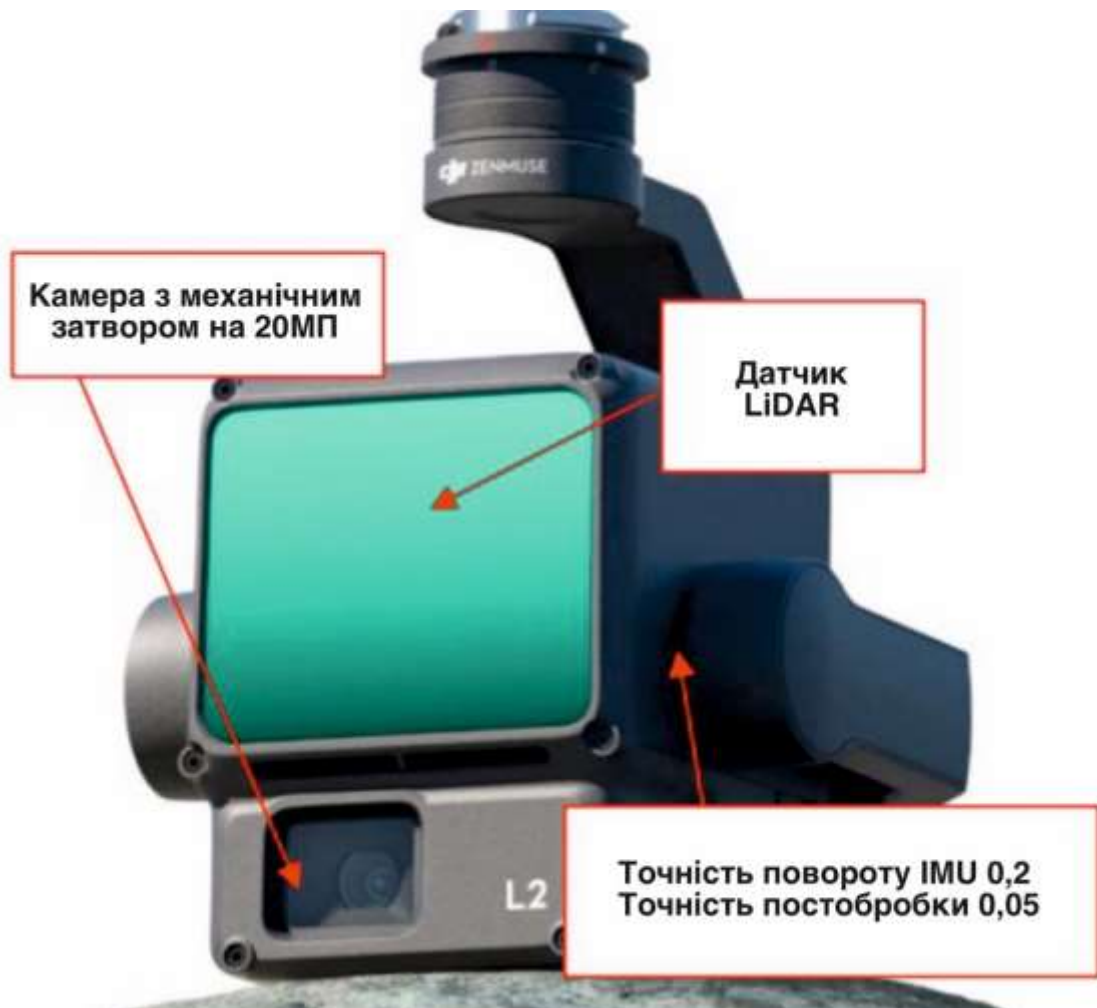


Рисунок 3. Датчик DJI Zenmuse L2 LiDAR

Характеристики DJI Zenmuse L2 LiDAR:

- Висока точність та чіткість даних. Цей прилад може вимірювати відстані з точністю до сантиметрів, що є критичним для проєктів, де потрібне картографування найвищого рівня.

- Здатність до глибокого сканування. Лазер здатен "проникати" крізь рослинний покрив, дозволяючи отримувати достовірні дані про рельєф навіть у складних умовах, як-от густі ліси чи обмежена видимість.

- Створення тривимірних карт. Пристрій дає змогу формувати детальні 3D-моделі місцевості, які знаходять застосування в аналізі, плануванні різноманітних завдань та відстеженні змін у ландшафті.

Інтегруючись з DJI Matrice 350 RTK, пристрій гарантує надзвичайно точне позиціонування та безперебійний зв'язок.

DJI Zenmuse L2 LiDAR постачає надзвичайно точні дані, що ідеально підходять для різноманітних геодезичних задач, зокрема для топографічної зйомки, створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР), а також моніторингу змін на місцевості.

Застосування цієї технології являє собою вирішальний прогрес у вирішенні складнощів, пов'язаних з доступністю даних та ефективністю їхнього збору в умовах щільної рослинності та складного рельєфу.

Отже, симбіоз DJI Matrice 350 RTK та DJI Zenmuse L2 LiDAR відкриває шлях до точного та продуктивного картографування, демонструючи значний потенціал об'єднання найновіших технологій у сфері геодезії.

Ця здатність особливо важлива для зйомки в умовах густої рослинності та отримання точного відображення нижніх шарів місцевості, адже LiDAR-система має змогу знаходити та наносити на карту деталі, які зазвичай лишаються прихованими під шаром дерев чи густою травою.

З метою удосконалення процесу картографування, місії було заплановано з використанням програмного забезпечення DJI Pilot 2.[4,6]

Це гарантує, що буде видно всю територію, навіть якщо є частини, куди важко добратися або які прикриті рослинністю.

Сенсор Zenmuse L2 автоматично виконує самокалібрування блоку IMU в процесі польоту.

Це калібрування вдосконалюється RTK-корекціями з GNSS дрона, що разом значно покращує точність визначення положення в режимі реального часу.

Це надзвичайно важливо під час створення високоякісних тривимірних карт, де навіть незначні неточності позиціонування здатні суттєво вплинути на кінцевий результат.

Безперервний цикл калібрування, що відбувається у реальному часі, слугує ключовим інструментом для виявлення та усунення неточностей і похибок, які можуть виникати у показаннях інерційного вимірювального приладу.

Корекції RTK є гарантом надзвичайно точного позиціонування дрона, підтримуючи високу стабільність і бездоганну точність траєкторії сенсора протягом усього етапу зйомки.

Ці процедури калібрування є критично важливими для синхронізації даних LiDAR із справжніми географічними координатами, забезпечуючи отримання надзвичайно точних і узгоджених результатів картографування.

Окрім того, інтегрована технологія одночасної локалізації та створення карти (SLAM) наділяє сенсор здатністю пристосовуватися до різних умов під час виконання польотів.[4]

SLAM дозволяє дрону постійно оновлювати створені ним мапи і коригувати його просторове сприйняття навколишнього середовища, тим самим забезпечуючи високу точність функціонування в різноманітних ситуаціях та сприяючи ефективному картографуванню.

Цей гнучкий підхід гарантує отримання достовірних результатів навіть за умов змін зовнішнього середовища в процесі польоту або виникнення перешкод на шляху дрона.

Об'єднання всіх цих технологій, зокрема калібрування IMU, коригування RTK та SLAM, є надзвичайно важливим для формування тривимірних моделей місцевості, що точно відтворюють справжній ландшафт.

Це гарантує максимальну точність картографічної інформації, яка критична для побудови 3D-моделей місцевості, що достовірно передають реальний рельєф.

Під час польотів DJI Matrice 350 RTK, було здійснено кілька перельотів над запланованим маршрутом, зібравши широкий спектр інформації для всеохоплюючого картування території.

Камера DJI Zenmuse L2 продемонструвала свою ефективність, захоплюючи деталі навколишнього середовища завдяки можливості багаторазового сканування, навіть там, де ландшафт був ускладнений щільною рослинністю.

Застосування технології RTK, яка безперервно коригує траєкторію дрона, дозволяє досягти точності позиціонування з похибкою всього в декілька сантиметрів.

Це суттєво підвищує точність визначення місця розташування та достовірність отриманих LiDAR даних.

2.2.2 Наземне знімання

Для досягнення максимальної точності географічного позиціонування та коректного зіставлення лідарних даних з реальними географічними параметрами, в даному дослідженні застосовується п'ять наземних контрольних точок.

Вони гарантують надійну та точну географічну прив'язку всього зібраного масиву даних.

Зазначені контрольні точки виступають ключовими орієнтирами для зіставлення даних, отриманих з БПЛА, з їхніми реальними координатами, зафіксованими безпосередньо на місцевості.

Визначення цих контрольних точок – ключовий етап, що гарантує акуратність аерофотозйомки й лазерного сканування.

Для цієї мети використовується приймач Leica GS18i (див. Рис. 4) – високоточний GNSS-прилад, здатний визначати геодезичні координати з сантиметровою точністю.



Рисунок 4 Приймач GNSS Leica GS18I

Приймач застосовує технологію RTK, що забезпечує високоточне позиціонування в режимі реального часу.

Це критично важливо, зокрема, коли стандартні навігаційні методи не здатні гарантувати потрібну точність, або ж необхідно здійснити точну кореляцію даних, зібраних з різних платформ.

Приймач Leica GS18i автоматично покращує точність вимірювань, використовуючи технологію корекції GNSS.

Це мінімізує похибки та відхилення, що виникають через обмеження супутникового сигналу та технічні неполадки

Завдяки своїй неймовірній швидкості обробки, цей пристрій чудово підходить як основа для виправлення та ретельного порівняння даних, отриманих з DJI Matrice 350 RTK і Zenmuse L2 LiDAR, гарантуючи безперешкодне поєднання інформації в процесі створення карт та надзвичайну точність географічного позиціонування.

GNSS-приймач Leica GS18і не лише визначає координати з високою точністю, але й славиться своїми винятковими можливостями збору інформації на різних частотах, що дає змогу йому функціонувати навіть у важких умовах, де звичні методи визначення місцезнаходження обмежені в роботі.

Як ілюстрацію можна навести лісисті території чи місцевості з великою щільністю забудови, де супутникові сигнали мають обмежений доступ.

Вмонтований модуль інерціальних вимірювань (IMU) дозволяє приймачу враховувати нахил і забезпечувати точність навіть за умов не ідеального вирівнювання пристрою.

Такий підхід суттєво покращує адаптивність збору інформації, знижує вимоги до ідеальної орієнтації обладнання та дає можливість проводити швидкі та більш точні вимірювання "в полі".

Інтеграція цього приймача з іншими приладами, на кшталт тахеометра, значно покращує збір даних, забезпечуючи високу точність там, де супутникові сигнали можуть бути слабкими чи відсутніми.

У випадках, коли вимірювання проводяться в лісистих місцевостях, де GNSS зазнає значних перешкод, додаткові функції керування Leica GS18і дозволяють без проблем налаштувати тахеометр та здійснювати вимірювання традиційними способами.

Для виконання таких задач було застосовано тахеометр Leica TS16 (див. рис. 5).



Рисунок 5 Тахеометр Leica TS16

Цей прилад здатний виміряти кути (як горизонтальні, так і вертикальні) та відстані з надзвичайною точністю, гарантуючи високу якість даних навіть там, де доступ обмежений або сигнал із супутників слабкий.

Об'єднання GNSS-приймача та тахеометра відкриває можливість отримання геопросторової інформації найвищої якості.

Це вкрай важливо для точного складання карт та планування робіт на місцевостях зі складним рельєфом.

Тахеометр Leica TS16 славиться своєю видатною точністю, що дозволяє здійснювати вимірювання з точністю до однієї кутової секунди. Завдяки цьому, досягається субсантиметрова точність вимірювань на дистанціях до одного кілометра.

Це гарантує можливість високоточного визначення координат контрольних пунктів навіть в умовах складної топографії, зокрема в лісових масивах, де густі насадження утруднюють безпосередній доступ до землі.

Зібрані контрольні пункти мають ключове значення для валідації коректності інформації, здобутої за допомогою LiDAR L2, особливо на ділянках річок, де треба визначити потенціал LiDAR проникати крізь зелені насадження.

Цифрові моделі місцевості (ЦММ), що отримані з LiDAR, підлягають зіставленню з вимірами, здійсненими на землі.

Точність та повнота даних підлягають оцінюванню шляхом порівняння даних LiDAR з даними тахеометра, аби виявити можливі розбіжності та провести ретельне вивчення продуктивності та надійності кожного із методів зйомки.

З цією метою, застосовуючи тахеометричне обладнання, було зафіксовано близько 400 контрольних координат у різноманітних областях досліджень.[4]

Уточнюючи, 350 точок було зібрано вздовж дорожнього покриття, де було здійснено детальну топографічну фіксацію, а решту 50 пунктів було відібрано в лісових місцевостях, де процес отримання даних ускладнювався наявністю дерев та інших природних перешкод.

Вивчення цих контрольних орієнтирів надає змогу глибше проаналізувати вірогідність даних LiDAR в різноманітних ландшафтних сценаріях, зокрема в місцях з відмінною щільністю відбитих сигналів LiDAR, що корелює з точністю картографії.

Класифікація точок за різними категоріями сприяє більш коректному співставленню та допомагає виявити ймовірні варіації у точності між інформацією, зібраною за різних умов середовища.[4]

На рисунку 6 продемонстровано розташування 400 вимірних точок, вимірних тахеометром Leica TS16 для оцінки точності даних LiDAR на окремих сегментах досліджуваної території.[4]

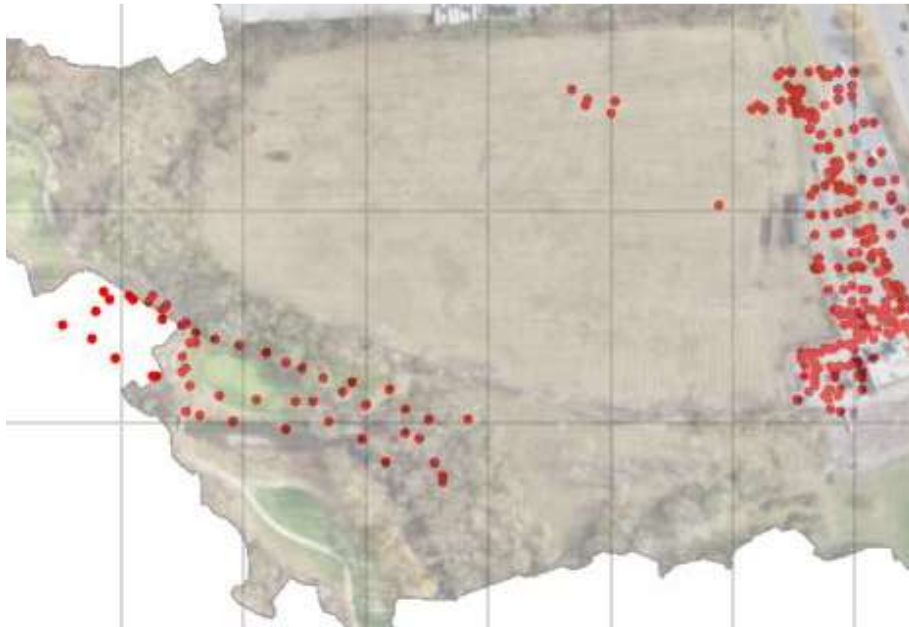


Рисунок 6. Контрольні точки, отримані тахеометром

2.3 Опрацювання даних

2.3.1 Опрацювання LiDAR БПЛА в DJI Terra

Дані лазерного сканування, здобуті з сенсора DJI Zenmuse L2, піддаються обробці у програмному забезпеченні DJI Terra, яке перетворює ці дані у систему координат УСК2000.

Система координат УСК2000 застосовується для забезпечення надзвичайно точного визначення положення, критичного для картографічних робіт та планування у сфері геодезії та землевпорядкування.

Приймач GNSS використовується для прив'язки вимірних референтних точок у програмне забезпечення DJI Terra.[4,5]

Інтегруйте ці дані з вертикальною базою даних, щоб здійснити верифікацію вертикальної точності даних LiDAR, використовуючи ортометричні висоти, які базуються на DJI Terra та вертикальній базі даних.

Цей процес є ключовим для гарантування високого рівня точності вимірювань і коректної обробки даних, зокрема в місцевостях зі складним рельєфом та густою рослинністю.

На етапі постобробки DJI Terra візуалізує всі точки, зафіксовані LiDAR-сенсором.

Це надає можливість оцінити ефективність LiDAR у проникненні крізь лісову рослинність вздовж річок та інші природні перепони, як-от чагарники чи будівлі, що зазнали руйнувань.

Це дає змогу досягти вищої точності у геопросторовому аналізі й відстеженні перетворень певної території.

На рисунку 7 продемонстровано візуальне представлення хмари точок відбиттів: одиночні відбиття позначено синім, натомість численні відбиття – іншими відтінками.[4]

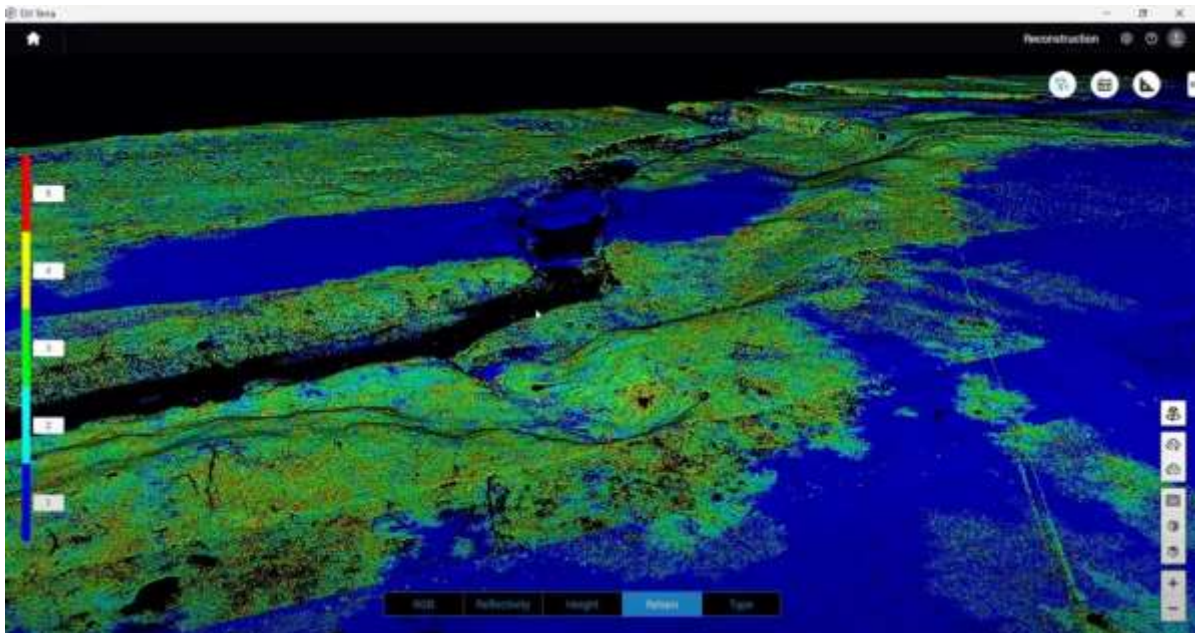


Рисунок 7. Візуалізація хмар точок: повернення в DJI Terra

Візуалізація значно полегшує розуміння особливостей об'єктів, розташованих на певній місцевості.

Це стосується визначення висоти рослинного покриву, особливостей структури ландшафту, та інших важливих параметрів.

Інструменти візуалізації програмного забезпечення дозволяють здійснити ретельний аналіз хмари точок.

Наприклад, стає можливим виділення успішних зображень певних ділянок, зокрема тих, що знаходяться під кронами дерев, куди може проникнути лазерний сигнал.

Крім того, виявляються аномалії та можливі помилки в обробці отриманих даних.

Після ретельної оцінки якості зібраних даних та застосування потрібних виправлень, оброблені дані LiDAR використовуються в Pix4Dsurvey для формування цифрової моделі рельєфу (ЦМР).[5]

Це дає можливість отримати деталізовану тривимірну модель місцевості, що надзвичайно корисна для подальшого планування, моделювання і дослідження різноманітних аспектів управління територією, як-от в архітектурному проєктуванні, ландшафтному дизайні чи екологічних дослідженнях.

2.3.2 Створення цифрової моделі рельєфу

Першим кроком у побудові цифрової моделі рельєфу є завантаження хмари точок, яка налічує близько 235 000 000 точок, що описують земну поверхню.

Цю хмару точок було імпортовано до програмного забезпечення Pix4Dsurvey та оброблено з розміром сітки 30 см.

Така густота даних гарантує високу точність моделі, що має ключове значення для наступного моделювання місцевості та інтеграції в геоінформаційні системи.

На рисунку 8 продемонстровано точкові дані, сформовані під деревами на поверхні землі після видалення з хмари точок, що знаходяться поза межами рельєфу.[4]



Рисунок 8. Точки цифрової моделі рельєфу на хмарі топографічно класифікованих точок (рожеве перехрестя).

Фільтрація суттєво підвищує якість моделі, ліквідовуючи небажані компоненти, на зразок дерев та кущів, котрі можуть негативно вплинути на точність цифрової моделі місцевості.

Це є ключовим для зйомок, коли необхідно з максимальною точністю окреслити рельєф поверхні та контурні лінії.

По завершенні обробки даних у Pix4Dsurvey, здійснюється статистичний аналіз цифрової моделі рельєфу за допомогою інструментарію Microsoft Excel.

Це дає змогу досліджувати різноманітні показники, зокрема середні значення висот точок, їхні стандартні відхилення та інші величини, аби виявити невідповідності та помилки в наборі даних. Такі помилки можуть виникати через некоректну класифікацію точок.

Для цього у програмі Excel використовуються різноманітні формули та функції, які надають детальну статистичну інформацію, необхідну для отримання максимально точних результатів аналізу.

На подальших етапах обробки передбачено можливість застосування додаткових методів фільтрації та корекції даних, що сприятиме покращенню загальної точності створеної моделі.

Одержана цифрова модель рельєфу відкриває можливості інтеграції з різноманітними джерелами інформації: аерофотознімками, результатами інших спостережень.

Такий підхід забезпечує проведення поглибленого аналізу, моніторинг змін на регіональному рівні, ефективне планування розвитку та здійснення екологічних досліджень.

За потреби, можна надати більш детальну інформацію стосовно практичного застосування конкретних програмних інструментів для здійснення подальшого аналізу та інших стадій цифрового моделювання рельєфу.

3. Результати дослідження

3.1 Оцінка точності спостережень

Найближча точка на цифровій моделі рельєфу для кожної точки на земній поверхні картографується, використовуючи найкоротшу горизонтальну відстань між точками в межах області, що охоплює цифрову модель.

Такий підхід дає змогу коректно зіставити висоту кожної точки та оцінити загальну точність цифрової моделі рельєфу, сформованої на основі зібраних даних LiDAR.

Проведення порівняльного аналізу між точками, отриманими за допомогою тахеометра, та відповідними точками з цифрової моделі рельєфу дозволяє провести більш поглиблений аналіз точності даних, зібраних за технологією LiDAR.[4]

Оцінка відповідності реальності є критично важливою, щоб забезпечити надійність отриманих даних та їх відповідність встановленим стандартам точності для певних сфер застосування, таких як геодезичні вимірювання, картографічне забезпечення та планування міського середовища.

З цією метою обчислюється вертикальна різниця, що надає можливість провести порівняльний аналіз відстані між точками, спроектованими у вертикальній площині.

Для кожної ідентифікованої пари точок розраховується абсолютна величина різниці у відповідності до їх висотних показників, що дозволяє виконати точну оцінку рівня вертикальної точності, властивого LiDAR-даним.

Цей метод дає змогу визначити можливі відхилення у вертикальному положенні точок та застосувати відповідні зміни для досягнення максимальної точності.

Формула, яка використовується для обчислення вертикальної різниці, виглядає так:

$$D_{ver} = | h_{LiDAR} - h_{Ground} | \quad (1)$$

де:

- D_{ver} — вертикальне віддалення між позицією з LiDAR та справжньою точкою на земній поверхні.
- h_{LiDAR} — висота, отримана для певного пункту на цифровій моделі рельєфу, що створена за допомогою LiDAR.
- h_{Ground} — висота реальної точки, визначена з застосуванням тахеометра або будь-якого іншого приладу високоточних вимірювань.[4,5]

Цей підрахунок слугує для визначення якості вимірювання по вертикалі, що є ключовим чинником для точного картування та геодезії.

Звичайно, застосовують модулі при визначенні вертикальних розбіжностей, забезпечуючи коректне усереднення показників.

Це необхідно, адже при сумуванні вертикальних відстаней, які містять як плюсові, так і мінусові величини, можуть виникнути проблеми з ухилом, що здатне призвести до неточних середніх результатів.

У результаті цей спосіб здатен генерувати ввідливу різницю середніх величин, хоча, значно важливіше, він спричинює вертикальне зміщення.

Це дає змогу встановити, чи дані тахеометра або LiDAR постійно фіксують вищі чи нижчі висоти, порівнюючи з використовуваним набором даних.

Такий підхід унеможлиблює ймовірні похибки в сукупних відстанях, що здатні викривляти результати.

Натомість, він надає більш зрозуміле уявлення про загальну точність даних, точно зображуючи коливання напрямків у вимірюваннях.

Цей підхід також дає змогу з'ясувати, чи є в даних систематичні помилки, котрі потребують коригування.

На завершення, для визначення загальної точності вимірювання у вертикальній площині застосовується середньоквадратична похибка (RMSE). RMSE надає більш детальне уявлення про загальну точність даних LiDAR, акцентуючи його здатність до точного фіксування висотних показників.

Метод дає змогу оцінити відповідність даних LiDAR фактичному вигляду місцевості та визначити необхідність додаткового виправлення для забезпечення вищої точності.

Такий підхід – важлива ланка в процесі контролю якості та покращення даних LiDAR.

Він особливо актуальний, коли ці дані застосовуються для картографічних робіт та зйомок, де точність вимірювань критична для прийняття коректних рішень.

Формула для обчислення середньоквадратичної похибки подана нижче:

$$\text{СКП} = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} \quad (2)$$

де v – вертикальна різниця, а n – кількість зіставлених точок.

3.2 Зйомка дорожнього покриття

Дорожнє полотно стало ідеальним майданчиком для лідарної системи, дозволивши їй розкрити весь потенціал.

Відсутність перешкод, на кшталт дерев чи споруд, створила бездоганні умови для роботи сенсорів, забезпечуючи їхню максимальну

ефективність у формуванні цифрових моделей місцевості з найвищою точністю.

Відсутність сторонніх об'єктів також позитивно вплинула на стабільність роботи датчиків, що допомогло уникнути можливих перешкод і помилок, спричинених зовнішніми чинниками, здатними негативно позначитись на якості зібраних даних.

Середньоквадратичне відхилення (RMSE) між інформацією з цифрової моделі місцевості, створеної з даних LiDAR, і вимірами наземного тахеометра виявилось рівним 0,07 м.[4]

Отримана величина вважається обґрунтованою та задовольняє критерії точності, що пред'являються до подібних досліджень.

З огляду на специфікацію сенсора Zenmuse L2 (4 см) та похибку географічної прив'язки, яка сягає приблизно 7 см, зафіксований результат у 7 см виглядає майже ідеальним.

Це слугує підтвердженням високої продуктивності та надійності LiDAR у проведенні вимірювань на таких об'єктах, як транспортні шляхи та інші відкриті ділянки місцевості.

Графічне зображення відмінностей між точками та вертикаллю демонструє рисунок 9, даючи можливість візуально сприйняти коректність і ступінь розподілу інформації.[4]

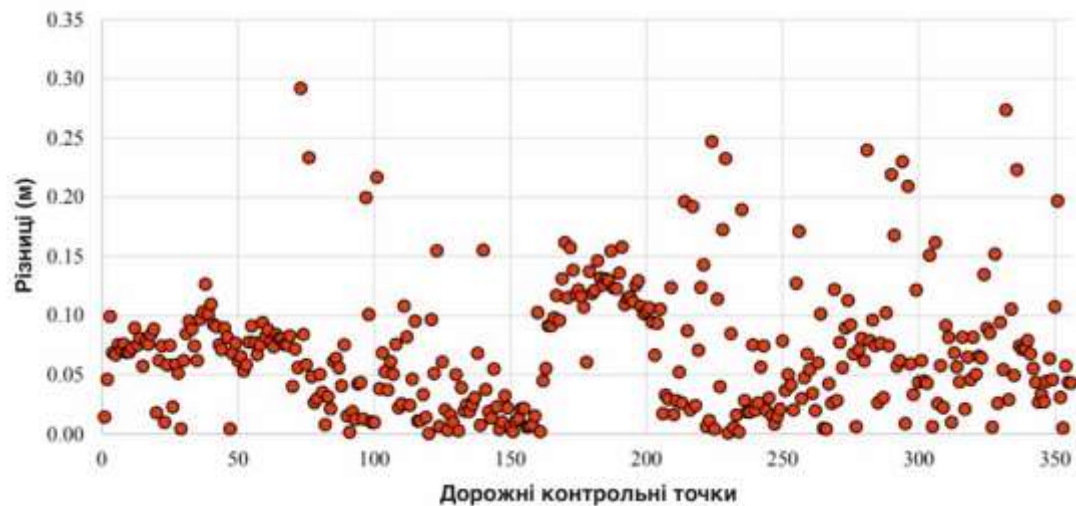


Рисунок 9. Вертикальні зміни висот точок цифрової моделі рельєфу на шляхах.

За допомогою цієї візуалізації зручно знаходити відхилення та недоліки, що можуть виникати під час збору даних, а також визначати зони з найбільшою та найменшою точністю.

Середньоквадратична похибка, обчислена для даних LiDAR, підтверджує надійність сенсора DJI Zenmuse L2 під час вимірювання відкритих просторів, таких як дороги.[4,5]

Використовуючи єдине повернення лазерного променя для визначення висоти, можливо досягти високої точності, мінімізуючи витрати часу та інших ресурсів.

Похибка до 7 см є цілком прийнятною для попереднього сканування, суттєво знижуючи необхідність у проведенні додаткових наземних вимірювань.

Це не тільки сприяє економії часу та ресурсів, але й прискорює процес опрацювання даних, зберігаючи при цьому високі вимоги до точності.

Отже, застосування LiDAR для збору відомостей про дорожнє полотно й відкриті простори суттєво покращує процес картографування та зйомки, досягаючи високої точності з мінімальними витратами.

Враховуючи ключову роль точності зйомки у забезпеченні успіху проєктів з планування та зведення інфраструктурних об'єктів, дані LiDAR знижують необхідність у масштабних польових дослідженнях, даючи змогу раціональніше використовувати наявні ресурси й прискорювати випуск кінцевої продукції на ринок.

3.3 Знімання в умовах лісу

Роботи з вимірюваннями у лісі ускладнюються перепонами, створеними щільними деревами, кронами та гіллям, що значно знижує ефективність LiDAR-сенсорів.

В таких обставинах, використання датчика, здатного передавати сигнал декілька разів, не завжди веде до гарантовано точних даних.

Не зважаючи на те, що перший сигнал, як правило, містить найкращі дані, другий, третій, четвертий та п'ятий сигнали стають менш надійними з огляду на затримки та зміни умов огляду, що ускладнює процес оцінки точності отриманих даних.

Середньоквадратичне відхилення в 0,21 метра було зареєстровано на пункті лісового контролю.

Це вказує на те, що більшість точок мали помилки менші за 0,1 метра, однак в окремих частинах зібраної інформації відмічалось відчутне зростання похибок, сягаючи 0,5-0,6 метра.[4]

Можливими причинами цього можуть бути різні обставини, зокрема проблеми у роботі сенсорів або неточності в обробці інформації, що виникають під час процесу збирання даних.

Найбільше похибок трапляється у лісах, що може бути наслідком фізичних факторів, які поглинають або відбивають лазерний промінь.

Це, зокрема, густа рослинність, як-от листя, або гілля дерев.

Слід звернути увагу, що LiDAR може демонструвати меншу точність за таких умов.

Це зумовлено обмеженою здатністю сенсора коректно розрізняти відбиття від різноманітних, накладених одне на одне об'єктів.

Навіть за наявності множинних зворотних сигналів це може викликати труднощі.

Незважаючи на згадані труднощі, середнє квадратичне відхилення, загалом, утримується в допустимих рамках для роботи в лісових масивах та прилеглих територіях.

Разом з тим, більш ретельний розгляд помилок, ілюстрованих на рисунку 10, вказує на наявність досить великих ділянок, де точність даних LiDAR може суттєво знижуватися.[4]

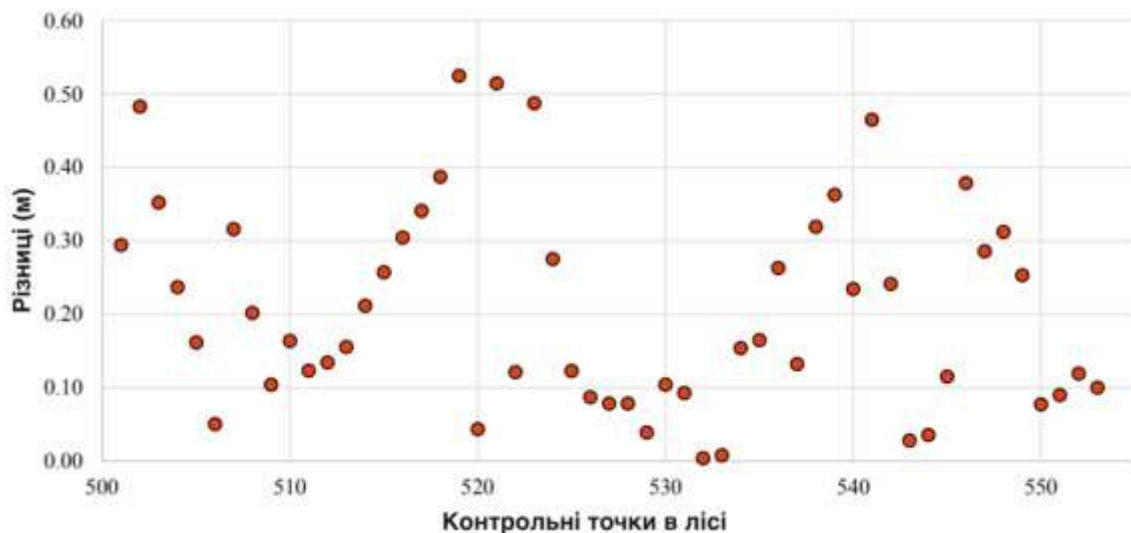


Рисунок 10. Вертикальні зміни координат ЦММ на ключових пунктах на території лісу.

Це свідчить про нагальну потребу створення та використання більш комплексних підходів для покращення стабільності датчика серед щільної лісової маси.

Це включає застосування специфічних методів аналізу даних, зменшення впливу перешкод та вдосконалення алгоритмів очищення сигналу.

Розробка подібних підходів відчутно знизить негативний вплив лісових масивів на точність LiDAR-сканування, розширюючи горизонти для дієвої зйомки та складання карт у важких умовах.

Це може бути корисним у широкому спектрі практичних сценаріїв, зокрема, при створенні деталізованих моделей рельєфу для спостереження за навколишнім середовищем, організації управління лісовими ресурсами та в інших інженерних або дослідницьких задачах.

Висновок

Результати досліджень, представлені у бакалаврській роботі, демонструють як можливості, так і недоліки технології LiDAR, що використовується з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в умовах різного середовища.

Зокрема, на відкритих територіях, наприклад, на дорогах, сенсори LiDAR продемонстрували вражаючу точність, досягнувши незначної середньоквадратичної похибки, приблизно 0,07 метра.

Це підкреслює значний потенціал технології, як дієвої заміни класичним підходам до зйомки під час інфраструктурних робіт.

Ключовим способом збору даних в даному випадку є застосування перших повернень сигналу, що дозволяє виконувати оперативні та високоточні вимірювання.

Проте, спостерігалось зростання середньоквадратичної похибки, досягнувши близько 0,21 метра, коли місцевість була вкрита щільним лісовим масивом.

Це демонструє проблему, коли точність зібраної інформації суттєво падає внаслідок незначного проходження лазерного променя крізь щільну зелень.

До того ж, в деяких даних зафіксовані збільшені похибки, що ймовірно пов'язано як з несправностями в роботі самого обладнання, так і з неточним опрацюванням інформації.

Отримані дані підкреслюють необхідність подальших досліджень, сфокусованих на оцінці рівня точності різноманітних результатів зйомки, зокрема, у лісових масивах.

Ці наукові розвідки будуть охоплювати аналіз різноманітних факторів, що здатні впливати на ефективність проникнення LiDAR-системи крізь земну поверхню.

Йдеться про густоту рослинного покриву, час доби, а також породи дерев, які зустрічаються на місцевості.

Один із потенційних методів поліпшення точності вимірювань в умовах лісу полягає у збільшенні числа контрольних точок.

Це посприє більш точній географічній прив'язці та покращить можливості спостережень за об'єктами.

Це здатне пом'якшити вплив перепон, на кшталт густих крон дерев та інших природних перешкод, на точність отриманих відомостей.

Підсумовуючи, можна зауважити, що не дивлячись на деякі застереження, технологія LiDAR, інтегрована у БПЛА з сенсором DJI Zenmuse L2, демонструє значні перспективи для збору даних про місцевість, як на відкритих просторах, так і на ділянках з рослинністю.

Список використаних джерел

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).

4. Tamimi, Rami, Toth, Charles Accuracy Assessment of UAV LiDAR Compared to Traditional Total Station for Geospatial Data Collection in Land Surveying Contexts, June 2024 The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-2-2024:421-426 DOI:10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-421-2024

5. Юнь, Тінг та ін. «Сегментація окремих крон дерев за даними лідарного сканування з повітря з використанням нового гауссового фільтра та підходу, що базується на мінімізації енергетичних функцій». Дистанційне зондування навколишнього середовища 256 (2021): 112-307.

6. Лін, І-Чун та ін. «Оцінка лідарного сканування БПЛА для картографування прибережних середовищ». Дистанційне зондування 11.24 (2019): 2893.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Порівняння точності LiDAR БПЛА та традиційних методів тахеометричної зйомки для створення цифрової моделі поверхні ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)