

**-Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"**

Кафедра геодезії та землеустрою

Мовчанюк Сергій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Порівняння точності застосування різних видів знімання при виконанні
геодезичних та землевпорядних робіт

(назва роботи)

Землеустрій та кадастр

(назва освітньої програми)

193 – Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

д.г.н., проф. Приходько Микола Миколайович

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ

2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ____ » _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Мовчанюк Сергій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Порівняння точності застосування різних видів знімання при виконанні геодезичних та землепорядних робіт

Керівник роботи д.г.н., проф. Приходько Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " __ " _____ 2025 року № __

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

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

Огляд методів геодезичного дослідження

Методології спостереження

Результати та дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Приходько М.М.		

7.Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд методів геодезичного дослідження		
2	Методології спостереження		
3	Результати та дослідження		

С. _____
 ініціали) (підпис)

Мовчанюк
 (прізвище та

М.М. Керівник роботи _____
 (підпис)

Приходько
 (прізвище та ініціали)

Анотація

Метою цієї магістерської праці є зіставлення точнісних показників різних підходів до геодезичної зйомки: звичайної тахеометричної, актуальної GNSS (Глобальної навігаційної супутникової системи) та технології наземного лазерного сканування.

Головне завдання полягає не тільки у виявленні найбільш оптимальних методів зйомки, а й у розробці конкретних критеріїв їхнього практичного застосування з урахуванням норм точності та специфіки сучасного українського земельного кадастру.

Значний вплив мають як природні фактори, так і результати людської діяльності в регіоні, зокрема, нерівний рельєф, густі насадження та розмаїття забудови.

Наукова новизна цього дослідження полягає у всеохопному аналізі того, як особливості Західної України впливають на точність і ефективність різних методів геодезичного знімання.

Планується провести докладний кількісний порівняльний аналіз похибок, властивих усім методам, враховуючи не лише стадію польових вимірювань, але й етап створення кінцевої землевпорядної документації.

Окрему увагу приділено вивченню технологічних обмежень та переваг кожного методу: залежність GNSS від доступності супутників, вплив рельєфу місцевості на аерознімання, а також значна трудомісткість тахеометрії на великих площах.

Це дасть змогу визначити, як кожен метод впливає на геометричну точність кадастрових даних та картографічних матеріалів.

Практична цінність проведеної роботи полягає у тому, що її здобутки закладуть підвалини для покращення стандартів та впровадження інноваційних методів нормування точності землепорядних заходів.

Сформульовані рекомендації знайдуть застосування для організацій, що займаються кадастром, державних установ та незалежних інженерів-землепорядників, які ведуть діяльність не лише на теренах Івано-Франківської області, а й у місцевостях зі співставними кліматичними особливостями.

Реалізація отриманих результатів буде каталізатором для оптимізації виробничих процесів, мінімізації ймовірності похибок, покращення якості землепорядної документації та забезпечення більшої відкритості земельних взаємин.

Окрім зазначеного, зроблені висновки здатні служити методичною основою для розробки освітніх програм у вищих навчальних закладах, а також на курсах удосконалення навичок для фахівців у галузі геодезії та землепорядкування.

Abstract

The purpose of this master's thesis is to compare the accuracy indicators of different approaches to geodetic surveying: conventional total station, current GNSS (Global Navigation Satellite System) and ground laser scanning technology.

The main task is not only to identify the most optimal surveying methods, but also to develop specific criteria for their practical application, taking into account the accuracy standards and specifics of the modern Ukrainian land cadastre.

Both natural factors and the results of human activity in the region have a significant impact, in particular, uneven terrain, dense vegetation and a variety of buildings.

The scientific novelty of this study lies in a comprehensive analysis of how the features of Western Ukraine affect the accuracy and efficiency of various geodetic surveying methods.

It is planned to conduct a detailed quantitative comparative analysis of the errors inherent in all methods, taking into account not only the stage of field measurements, but also the stage of creating the final land management documentation.

Particular attention is paid to the study of technological limitations and advantages of each method: the dependence of GNSS on the availability of satellites, the influence of terrain relief on aerial photography, as well as the significant laboriousness of total stationing over large areas.

This will make it possible to determine how each method affects the geometric accuracy of cadastral data and cartographic materials.

The practical value of the work carried out is that its achievements will lay the foundation for improving standards and introducing innovative methods for normalizing the accuracy of land management measures.

The formulated recommendations will be applicable to organizations involved in cadastre, state institutions and independent land surveying engineers who operate not only in the Ivano-Frankivsk region, but also in areas with comparable climatic features.

The implementation of the obtained results will be a catalyst for optimizing production processes, minimizing the likelihood of errors, improving the quality of land management documentation and ensuring greater openness of land relations.

In addition, the conclusions drawn can serve as a methodological basis for the development of educational programs in higher educational institutions, as well as in skills improvement courses for specialists in the field of geodesy and land management.

Зміст

Вступ

1 Огляд методів геодезичного дослідження

1.1 Огляд лазерного сканування

1.1.1 Реєстрація та геоприв'язка

1.2 Огляд тахеометра

1.2.1 Точність вимірювання

1.2.2 Похибки вимірювання

1.2.3 Режим вимірювання відстані

1.3 Огляд GPS

1.3.1 Кінематика в реальному часі (RTK)

1.3.2 Порівняння тахеометра та GPS

1.3.3 Порівняння тахеометра та лазерного сканера

1.4 Аналіз похибок

1.4.1 Похибки вимірювання

1.4.2 Точність

1.4.3 Перевірка точності

1.4.4 Контроль якості

2 Методології спостереження

2.1 Створення опорної мережі

2.2 Оцінка точності та прецизійності

2.2.1 Вибір відповідних контрольних точок для мережі та детального дослідження

2.2.3 Детальне вимірювання

2.3 Зона дослідження проекту

2.4 Обробка даних

3 Результати та дослідження

3.1 Обробка базової лінії GPS

3.2 Коригування

3.2.1 Етапи вимірювання

3.2.2 Априорне стандартне відхилення

3.2.3 Горизонтальне вирівнювання мережі

3.2.4 Скориговані координати та їх стандартні відхилення

3.2.5 Вертикальне вирівнювання мережі

3.3 Визначення точності та достовірності RTK

3.4 Реєстрація та геоприв'язка

3.5 Порівняння результатів лазерного сканера та тахеометра

3.6 Порівняння витрат часу

3.6.1 Тахеометр і GPS

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Геодезичні та землепорядні роботи в Україні, як і в багатьох інших країнах світу, – це багатогранний та надзвичайно важливий набір дій, який поєднує в собі юридичні, фінансові, технологічні та екологічні складові землекористування.

Ці роботи слугують фундаментом для нормальної роботи ринку землі, захисту майнових прав, організації збору податків і забезпечення ефективного керівництва регіонами.

Ключовим компонентом у цьому процесі є чітке визначення положення об'єктів землеустрою у просторі, яке безпосередньо пов'язане з якістю геодезичної зйомки.

Споконвіку визначальну роль у геодезичному супроводі робіт із землеустрою відігравала тахеометрична зйомка.

В основі її лежать наземні вимірювання кутів і відстаней, що здійснюються за допомогою оптичних, а з часом електронних тахеометрів.

Такий метод вирізняється високою локальною точністю та стабільністю здобутих даних, навіть за умов негоди.

Він і донині лишається доцільним для невеликих земельних ділянок та територій з обмеженим оглядом.

Разом з тим, основні недоліки тахеометрії – значні витрати часу, трудомісткість і залежність від погодних умов – спонукали до пошуку більш прогресивних технологічних рішень.

Наприкінці ХХ століття стали надзвичайно популярними супутникові методи геодезичної зйомки, основою яких є GNSS-технології.

Системи GPS, ГЛОНАСС, а згодом і Galileo та BeiDou, суттєво підвищили ефективність польових робіт, надаючи можливість швидко та точно визначати координати на відкритих просторах.

Застосування режимів RTK і PPK дало змогу досягти сантиметрової точності як у реальному часі, так і після опрацювання зібраних даних.

Проте, GNSS має певні обмеження, зокрема необхідність прямої видимості супутників, що звужує можливості використання методу в умовах густої забудови, гірських місцевостей або лісових масивів.

Останні кілька років відзначились стрімким розвитком аерофотознімання, використовуючи безпілотні літальні апарати (БПЛА), котрі увійшли в активне використання.

Сьогоднішні дрони, оснащені найновішими камерами та лідарними сканерами, дозволяють за мінімальний термін отримувати великі обсяги просторової інформації.

Це стосується як ортофотопланів надзвичайно високої якості, так і цифрових моделей рельєфу місцевості.

Серед ключових переваг БПЛА варто відзначити швидкість виконання робіт на великих площах, можливість обстежувати важкодоступні місця та детальність отриманих даних.

Разом з цим, існують певні труднощі, які потребують вирішення.

Мова йде про точність планово-висотної прив'язки, залежність від погодних умов, а також складність обробки зібраної інформації.

Дане дослідження має особливе значення, беручи до уваги специфіку географічних особливостей Івано-Франківської області.

Цей край – мозаїка: тут розкинулися сільськогосподарські ниви, густо забудовані міста, широколистяні ліси й високі Карпати.

Кожен з цих ландшафтних типів ставить свої завдання для геодезії: у горах – перешкоди для супутників, у лісі – складнощі з аерофотозйомкою, а для роботи з землею потрібні значні витрати.

Отже, необхідно детально дослідити точність, економічність та практичність тахеометричної, GNSS- та БПЛА-зйомки, враховуючи українське законодавство та особливості Івано-Франківської області.

Мета цього дослідження полягає не в простому виборі «найкращого» підходу, а в розробці корисних порад і сценаріїв використання кожного з них в реальних умовах.

Результати цієї роботи допоможуть поліпшити геодезичні роботи, збільшити точність просторових даних, зменшити кількість суперечок щодо земельних питань та сприяти стійкому розвитку земельних відносин в Україні.

1 Огляд методів геодезичного дослідження

1.1 Огляд лазерного сканування

Лазерне сканування замислювалося як спосіб оперативного та надзвичайно точного збору просторової інформації про поверхні різних об'єктів.

В основі методу лежить вимірювання геометрії об'єкта лазерним променем, завдяки чому стає можливим зафіксувати його форму та загальний вигляд.

На основі зібраних даних формуються цифрові креслення у двох вимірах або тривимірні моделі, що знайшли широке застосування у багатьох сферах діяльності.

Найбільша перевага лазерного сканування полягає в здатності швидко зібрати великий обсяг даних, які відрізняються високою точністю.

Разом з цим, слід розуміти, що лазерні сканери використовують принцип прямої видимості, тому для повного охоплення об'єкта необхідно проводити серію сканувань з різних точок.



Рисунок 1 Лазерний сканер Leica RTC360

Під час дослідження застосували лазерний сканер Leica RTC360 (див. рис. 1), максимальний кут огляду якого становить $40^\circ \times 40^\circ$.

Цей прилад забезпечує похибку вимірювань не більше ± 4 мм на кожну точку, кутову точність приблизно ± 60 мікрорадіан та діаметр лазерного променя всього 6 мм на відстанях від 0 до 50 м.

Зазначені параметри дають змогу отримувати геодезичну точність, не обмежуючи універсальність і гнучкість інструмента для збору інформації.

Панорамне кріплення з обертанням $360^\circ \times 195^\circ$ та подвійні внутрішні дзеркала дозволяють сканеру ефективно функціонувати майже в будь-якому положенні, значно розширюючи сферу його застосування.

Класифікація лазерних сканерів, беручи до уваги технічні параметри та механізми роботи, зазвичай здійснюється за наведеними нижче критеріями (таблиця 1):

- Швидкість проведення сканування, разом з частотою дискретизації вимірювальної системи.

- Поле огляду (кути огляду камери, способи отримання профілів та зображень).
- Просторова роздільна здатність, або ж кількість зафіксованих точок в межах зони огляду.
- Точність вимірювання відстаней та функціонування системи відхилення лазерного променя.

Таблиця 1: Класифікація та точність лазерних сканерів на основі принципу вимірювання

Технологія вимірювання	Дальність (м)	Точність (мм)	Виробник
Час польоту	<100	<10	Leica, Riegl, Faro
	<1000	<20	Trimble, Leica
Фазове випромінювання	<100	<10	Leica, Faro, Trimble
Оптична триангуляція	<5	<1	Mensi

1.1.1 Реєстрація та геоприв'язка

Реєстрація полягає у поєднанні окремих відсканованих кадрів (ScanWorlds) в єдину узгоджену систему координат.

У програмному забезпеченні Cyclone термін ScanWorld визначає результат сканування, отриманий з однієї точки сканування.

Цей кадр містить набір тривимірних точок, відомих як хмара точок.

Об'єднання даних здійснюється шляхом накладання обмежень, тобто визначення пар еквівалентних або перекриваючихся об'єктів, наявних у різних ScanWorlds.

Виходячи з заданих умов, програмний засіб виконує обчислення оптимальних трансформацій вирівнювання, оперуючи з трьома компонентами: схід, північ та висота.

Цей процес спрямований на мінімізацію розбіжностей між кореспондуючими точками даних.

В результаті, формується єдина, взаємоузгоджена модель, що об'єднує в собі кілька різних наборів інформації.

Головна ідея реєстрації полягає у виявленні відповідних точок між різними сканами та знаходженні перетворення, яке забезпечує мінімальну дистанцію між ними.

Цей етап є критичним для процесу обробки даних, здобутих за допомогою наземного лазерного сканування.

Для коректного проведення процедури зшивання між сканами потрібно гарантувати перекриття не менше 30%.

Коли буде створено цілісний масив інформації, виникає потреба прив'язати його до загальноприйнятої світової системи координат.

Цей процес отримав назву геореференсування, яке можна визначити як надання об'єктам сканування координат конкретної абсолютної системи (скажімо, геодезичної).

Найчастіше координатна система ScanWorld відповідає координатній системі сканувального пристрою.

Утім, коли пристрій монтується над задалегідь відомими контрольними точками, їхні координати можна застосувати для безпосереднього прив'язування до географічної системи.

Географічне прив'язування сканів потребує перетворення координат, які надходять з системи сканера (S-кадр), на координати цільової картографічної системи (m-кадр).

Це може бути, наприклад, переведення в геодезичні координати (широта, довгота, висота), систему UTM або національну систему координат УСК2000.

Для виконання поставленої мети потрібно виконати наступні кроки:

- Спершу, потрібно встановити контрольні точки.
- Далі, важливо внести відомі координати цих точок (наприклад, отримані з тахеометричних вимірювань).
- Необхідно обрати систему координат та визначити параметри проєкції.
- На завершальному етапі, слід здійснити оптимізацію, спрямовану на мінімізацію залишкових величин.

Залишки представляють собою різницю між дійсними координатами контрольних точок та обчисленими значеннями, які генерує математична модель геореференції.

Вони відіграють роль індикатора точності виконаної прив'язки, надаючи можливість оцінити якість інтегрування даних у глобальну систему координат.

1.2 Огляд тахеометра

В даній роботі був використаний тахеометр Leica 1201 (дивіться рисунок 2).

Тахеометр - це сучасний геодезичний інструмент, який об'єднує в собі можливості теодоліта, що вимірює горизонтальні та вертикальні кути, і електронного далекоміра (EDM), який визначає похилу відстань до конкретної точки.

Така комбінація дозволяє виконувати комплексну просторову орієнтацію та обчислювати координати точок з високою точністю.

Важливою особливістю тахеометра Leica 1201 є автоматичне збереження вимірювальних даних у цифровому форматі, що значно полегшує подальшу обробку результатів з використанням спеціалізованих програм.

Ці пристрої широко використовуються у землевпорядкуванні, кадастрі, будівництві та топографо-геодезичних вимірюваннях, зокрема, у випадках, коли використання GNSS-систем є утрудненим через перешкоди для прямого сигналу від супутників (скажімо, у густо забудованих місцевостях або лісових зонах).

Відтак, тахеометрична зйомка й надалі зберігає свою важливу роль як один з основних методів гарантування високої точності геодезичних робіт.



Рисунок 2: Тахеометр Leica 1201

Координати невідомої точки, розміщеної відносно відомої, можливо визначити, застосовуючи тахеометр, за умови наявності прямої візурної лінії між ними.

В процесі зйомки прилад реєструє горизонтальні й вертикальні кути, а також похилі відстані до об'єктів.

Далі координати точок (X , Y , Z), або, інакше кажучи, північ, схід та висота, розраховуються, опираючись на тригонометричні та геометричні співвідношення.

Щоб визначити точні координати, тахеометр слід встановити безпосередньо над пунктом з відомими координатами, або ж використовувати спостереження за двома чи більше опорними точками, чії координати вже відомі.

Сьогоднішні високотехнологічні тахеометри мають змогу працювати дистанційно та пропонують різні опції автоматизації.

Це значно покращує продуктивність вимірювань на практиці.

Відповідно до порад Leica Geosystems, для досягнення найвищої точності приладу у повсякденній роботі важливо:

- Систематично перевіряти та калібрувати інструмент;
- Під час цих процесів застосовувати вимірювання з високою точністю;
- Розрахунки здійснювати з використанням обох положень вертикального кола, оскільки усереднення даних дозволяє мінімізувати вплив певних інструментальних похибок.

Варто враховувати, що під час використання лазерного далекоміра, дані можуть бути спотворені, якщо на траєкторії променя між пристроєм та об'єктом розташовані перешкоди.

Наприклад, коли ви вимірюєте відстань до дорожнього покриття, але між тахеометром та дорогою знаходиться машина, прилад зафіксує відстань до автомобіля, а не до поверхні дороги.

Особливої уваги потребують тахеометри, обладнані системою ATR (Automatic Target Recognition) – автоматичним розпізнаванням цілі та наведенням.

У такій ситуації вимірювання кутів та відстаней до відбивної призми відбувається без участі людини.

Оптичний візир використовується для попереднього наведення призми, після чого прилад самостійно виконує усі необхідні дії: точне наведення, центрування та розрахунок координат.

Отже, оператору не потрібно вручну співставляти перехрестя сітки приладу з відбивачем.

Це значно прискорює процес вимірювання і підвищує його точність.

У контексті моторизованих тахеометрів Leica серії 1200, помітним плюсом є швидке та надійне наведення на ціль.

Це надзвичайно корисно під час виконання масштабних польових робіт або проведення моніторингу деформацій.

Таким чином, сучасні тахеометри органічно об'єднують традиційні геодезичні принципи з передовими технологіями автоматизації, забезпечуючи високу ефективність та безперебійність польових вимірювань, незалежно від складності умов.

1.2.1 Точність вимірювання

У контексті моторизованих тахеометрів Leica серії 1200, визначальною перевагою стає оперативне та точне наведення на ціль.

Це особливо цінно під час виконання великих обсягів польових робіт, а також при моніторингу деформацій.

Отже, сучасні тахеометри вдало поєднують у собі традиційні геодезичні основи та передові автоматизовані технології.

Завдяки цьому забезпечується максимальна продуктивність і безперебійність польових вимірювань, незважаючи на будь-які складні умови.

Всі ці фактори можуть впливати на відхилення отриманих даних від гарантованої виробником точності, тому перш ніж розпочати вимірювання, критично важливо провести перевірку та калібрування приладу.

Найбільш важливою є точність, з якою призма позиціонується системою ATR (автоматичного розпізнавання цілі).

На значення цього показника мають вплив такі фактори:

- Внутрішня точність алгоритмів автоматичного наведення (ATR).
- Точність вимірювання кутів самого геодезичного приладу.
- Вид та якість призми, що застосовується.
- Вибрана програма електронного далекоміра (EDM).
- Зовнішні умови, за яких проводяться спостереження.

Відповідно до даних виробника, для ATR характерне стандартне відхилення в межах ± 1 мм.

Зі збільшенням відстані до об'єкта, похибка в кутових вимірах приладу стає більш відчутною, потенційно перевищуючи допустимі межі, вказані в технічній документації.

Наприклад, тахеометри Leica 1201 показують середню квадратичну похибку у 0,3 мілігони як по горизонталі, так і по вертикалі, що безпосередньо впливає на достовірність даних.

Виробник серії Leica 1200 надає типові показники точності вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів, які узагальнено представлені в таблиці 2.

Отже, під час роботи з тахеометром ключовим є не лише знання технічних аспектів приладу, а й розуміння зовнішніх умов, які здатні впливати на точність вимірювань.

Регулярні перевірки й калібрування є запорукою підтримки заявленої виробником точності та дозволяють визначати вірні координати навіть в умовах складної місцевості.

Таблиця 2: Точність вимірювання кута

Тип приладу	Стандартне відхилення (горизонтальні та вертикальні кути)	
	Кутова точність	mgon
1201+	1	0.3
1202+	2	0.6
1203+	3	1.0
1205+	4	1.5

Використання призми, що відрізняється від тієї, яку рекомендує виробник, здатне спричинити появу додаткових похибок у вимірах.

З огляду на це, для гарантії найвищої точності та правильності отриманих результатів, варто застосовувати круглу призму Leica, спеціально розроблену як цільовий маркер.

1.2.2 Похибки вимірювання

Похибки, зумовлені специфікою функціонування вимірювального пристрою, піддаються мінімізації або повному усуненню шляхом здійснення вимірів з двох протилежних позицій.

В таблиці 3 наведено перелік інструментальних похибок, що спотворюють показники горизонтальних та вертикальних кутів, а також запропоновані методи їхньої корекції.

Таблиця 3: Кутові похибки та їх коригування

Похибка приладу	Впливає на горизонтальний кут	Впливає на вертикальний кут	Виключається двостороннім вимірюванням	Коригується калібруванням приладу
Похибка лінії візування	Так	Ні	Так	Так
Похибка осі нахилу	Так	Так	Так	Так
Похибка компенсатора	Так	Так	Ні	Так

Похибка колімації осі, або, інакше кажучи, невідповідність лінії візування, значно впливає на вірність вимірювання горизонтальних кутів, зменшуючи загальну точність робіт.

Вона стає помітною, коли візуальна лінія (зображена на малюнку 3) не ідеально перпендикулярна до осі нахилу приладу, що є недоліком конструкції.

В результаті – з'являються похибки в показниках горизонтального кола, і це особливо відчутно під час роботи з великими кутами нахилу візуальної осі.

Для компенсації цієї похибки, застосовують метод усереднення результатів двох вимірювань, які виконані на різних позиціях приладу, що нівелює систематичну помилку.

Окрім того, вбудовані функції калібрування приладу дозволяють визначити відхилення реальної лінії візування від тієї, що перпендикулярна до осі нахилу, і відповідно внести поправки.

Похибка вертикальної осі, або відхилення осі нахилу, виникає, коли вісь обертання тахеометра не збігається з ідеально вертикальною лінією.

Це не впливає на вимірювання, що здійснюються при горизонтальному положенні зорової труби, але призводить до помилок при визначенні горизонтальних кутів, особливо при великих кутах нахилу.

Подібно до похибки колімації, її можна звести до мінімуму, виконавши два вимірювання на різних створах.



Рисунок 3: Похибки колімації

Похибка індексу компенсатора виникає через неточне центрування теодоліта або тахеометра, й її неможливо усунути стандартним подвійним вимірюванням на площині.

Якщо прилад має компенсатор, він самостійно виявляє небажані нахили та вносить поправки до значень горизонтальних і вертикальних кутів.

Похибка вертикального наведення (вертикальний індекс) виникає, коли візир по лінії 0° – 180° на вертикальному колі не відповідає справжній вертикалі.

Ця похибка нульової точки присутня у всіх вимірах по вертикальному колу та, подібно до горизонтальної колімаційної похибки, може бути усунена шляхом виконання двох вимірювань на заданому об'єкті.

1.2.3 Режим вимірювання відстані

Вимірювання з використанням відбивача (у режимі ІЧ) базується на тому, що прилад, такий як тахеометр, випускає світловий імпульс у бік відбивача, а далі, аналізуючи зсув фаз між вихідним та отриманим сигналом, визначає відстань до об'єкта.

Що стосується тахеометра Leica 1201, то найкоротша можлива відстань для вимірювання дорівнює 1,5 метри; вимірювання на менші відстані є неможливим.

Діапазони ефективної дії різних типів призми показані в таблиці 4.

Таблиця 4: Обмеження діапазону залежно від атмосферних умов

Відбивач	Діапазон А(м)	Діапазон В(м)	Діапазон С(м)
Стандартна призма	1800	3000	3500
Призма 360°	800	1500	2000
Міні призма 360°	450	800	1000

Міні призма	800	2600	3300
-------------	-----	------	------

Ось три різновиди станів атмосфери:

- Діапазон А: видимість сягає приблизно 5 кілометрів; або ж яскраве сонячне освітлення й відчутне теплове мерехтіння.
- Діапазон В: видимість становить близько 20 кілометрів; або помірне освітлення та ледве помітне теплове миготіння.
- Діапазон С: похмура погода, видимість дорівнює приблизно 40 кілометрам; повна відсутність теплового миготіння.

Точність оцінки відстані за допомогою стандартної призми залежить від обраного типу відбивача та режиму вимірювання, що подано у таблиці 5.

Таблиця 5: Точність вимірювань відносно стандартної призми

Режим вимірювання	Стандартне відхилення. Стандартна призма	Час вимірювання
Стандартний	1мм + 1.5ppm	2.4
Швидкий	3 мм + 1.5ppm	0.8

Вимірювання відстані без відбивача (режим RL) застосовують, коли закріплення призми є складним, наприклад, у внутрішніх кутах будівель, вздовж доріг, на верхівках ліхтарів та в інших важкодоступних місцях.

Точність вимірювання відстаней в цьому режимі вказана в таблиці 6.

Слід враховувати, що точність вимірювання без відбивача залежить від відстані між тахеометром та ціллю: чим ближче ціль, тим точнішим буде вимірювання.

Таблиця 6: Точність вимірювання відстані в режимі RL

Відстань	Стандартне відхилення	Час вимірювання (с)
<500м	2мм + 2ppm	3-6
>500м	4мм + 2ppm	3-6

Як вимірювання з використанням відбивача (IR), так і вимірювання без нього (RL) мають як сильні, так і слабкі сторони.

1.3 Огляд GPS

GPS-приймач (дивись рисунок 4) дозволяє вимірювати фазу сигналів від супутників з точністю до міліметрів.

Проте, на шляху сигналу від супутника до приймача відбувається його взаємодія з шарами атмосфери, що впливає на точність визначення координат.

Основними складовими атмосфери, які впливають на сигнал, є іоносфера та тропосфера.

Атмосферні явища можуть зменшувати точність вимірювань GPS.

Для підвищення точності застосовують диференційний метод GPS, котрий ґрунтується на вимірюванні базової лінії між двома GPS-приймачами.

Коли обидва приймачі синхронно фіксують один і той же набір супутників, більшість атмосферних впливів взаємно нівелюються.

Чим коротша відстань між приймачами (базова лінія), тим краще згладжуються атмосферні похибки, оскільки сигнал проходить крізь аналогічні умови атмосфери.



Рис.3: GPS-приймач

Точність визначення базису – критично важлива та залежить від низки факторів.

Перш за все, слід зазначити вплив кількості супутників, які одночасно відстежуються приймачем, та їх розташування відносно нього (так звана геометрія).

Також істотним є час вимірювань, точність ефемерид, вплив іоносферних перешкод, ефект багатопроменевості сигналу і, звичайно ж, коректність розв'язання фазових неоднозначностей.

1.3.1 Кінематика в реальному часі (RTK)

Збір даних у кінематичному режимі, у режимі реального часу, відбувається завдяки диференційним GPS-корекціям.

Ці корекції передаються з базової станції на роверний приймач, що дає можливість визначити координати безпосередньо в процесі спостереження.

Існує декілька способів передачі цих корекцій.

Найбільш популярним є радіозв'язок, що забезпечує швидке транспортування даних.

Точність вимірювання координат напрямку визначається багатьма факторами: кількістю супутників, доступних для спостереження, коректністю вирішення фазових неоднозначностей, конфігурацією супутників на орбіті та рядом інших обставин.

Режим RTK (кінематика в реальному часі) забезпечує можливість швидкого виконання геодезичних вимірювань.

Результати стають доступними практично одразу, без потреби додаткової обробки даних.

Цей метод працює завдяки застосуванню поправок від базової станції в режимі реального часу.

1.3.2 Порівняння тахеометра та GPS

Не дивлячись на численні переваги, застосування тахеометрів та GPS у геодезичних роботах не позбавлене певних мінусів.

Використання тахеометрів дозволяє здійснювати вимірювання незалежно від супутникових перешкод, проте обмежене необхідністю прямої видимості між точками.

Часто, необхідні опорні пункти знаходяться на значній відстані один від одного, що ускладнює їх використання без переміщення самого приладу, вимагаючи додаткових фізичних зусиль.

Саме в таких випадках GPS виступає ефективним рішенням, надаючи змогу оперативно визначити координати контрольних точок до початку тахеометричної зйомки, особливо коли видимість обмежена природними перепонами.

Переваги та недоліки кожної технології вміщено в таблиці 7.

Визначення позицій точок за допомогою GPS не потребує прямого візуального контакту, що робить його кращим для формування контрольних мереж.

Водночас, тахеометри потребують безпосередньої видимості до призми, що обмежує їхнє застосування в зонах із щільним житловим фондом або великою кількістю рослинності.

Проте, у місцях, де багато дерев або високих будівель, сигнал від супутників може спотворюватися, що знижує ефективність GPS.

Таблиця 7: Порівняння GPS та тахеометра

Тахеометр	GPS
Непряме отримання 3D координат	Пряме отримання 3D координат
Однакова точність як вертикальних так горизонтальних координат	Горизонтальна точність краща за вертикальну

Точність залежить від відстані, кута та використаної призми	Точність залежить від доступності супутників, багатопрореневості
Точніше ніж GNSS	Менш точний ніж тахеометр
Незалежний від супутників	Залежний від супутників
Необхідна пряма видимість між приладом та призмою	Видимість не потрібна
Збір даних у денний час	Збір даних у денний або нічний час

1.3.3 Порівняння тахеометра та лазерного сканера

Лазерний сканер – це геодезичний інструмент, що дозволяє визначати тривимірні координати об'єкта чи місцевості та відображати їх як хмару точок.

Ці хмари візуалізують просторове розташування об'єкта в 3D-просторі.

Окремі точки хмари можуть бути зіставлені з координатами, отриманими з використанням тахеометра.

Переваги та недоліки застосування лазерного сканера представлені у таблиці 8.

Таблиця 8: Порівняння лазерного сканера та тахеометра

Лазерний сканер	Тахеометр
Щільна інформація вздовж однорідної поверхні	Одноразове вимірювання точки (кут та відстань)
Збір даних вдень та вночі	Збір даних вдень
Пряме отримання 3D координат	Непряме отримання 3D координат
Вертикальна точність краща за горизонтальну	Обидва кути мають порівняну точність
Точність залежить від кута та відстані	Точність залежить від відстані

Короткий огляд трьох підходів, представлених у таблиці 9, для порівняльного аналізу їхніх сильних та слабких сторін.

Таблиця 9: Висновки щодо переваг і недоліків тахеометра GPS та лазерного сканера

Тахеометр	GPS	Лазерний сканер
Висока точність (1-2мм)	GNSS в реальному часі по горизонталі (1-2см) по вертикалі (2-3см)	Висока локальна точність: +/- 4мм для вимірювання відстані та +/-60 мікрорадіан для вимірювання кутів
Використовує точні далекоміри для вимірювання положення до найближчого відбивача	GNSS передає дані із супутників, що заходяться на відстані 20000 км для обчислення положення ровера	Має максимальне поле зору 40 ⁰ x40 ⁰ кут нахилу 360 ⁰ x195 ⁰ та подвійні внутрішні обертові дзеркала що дозволяє використовувати його в будь-якій орієнтації
Забезпечує локальні координати	Забезпечує глобальні координати	Надає локальні координати
Використовується в приміщенні та на вулиці. Його точність не знижується через блокування деревами або іоносферних факторів	Використовується на відкритому просторі. GNSS не обмежене лінією візування, не залежить від погодних умов	Використовується в приміщенні та на вулиці. Точність не залежить від розташування чи погоди
Збір даних у денний час	Збір даних у денний або нічний час	Збір даних у денний або нічний час
Непряме отримання координат	Прямий збір координат	Прямий збір координат

1.4 Аналіз похибок

Похибка - це відхилення між значенням, що було отримано (виміряно або обчислено), та еталонним значенням певної величини.

У контексті нашого дослідження, за еталон береться значення, визначене опорною мережею, яка застосовується для контролю та перевірки точності виконаних вимірювань.

1.4.1 Похибки вимірювання

Існують три основні різновиди помилок у вимірюваннях: систематичні, грубі та випадкові.

Систематичні помилки виникають згідно певних фізичних або математичних законів.

Прикладами можуть бути помилки калібрування вимірювальних приладів, вплив температури навколишнього середовища або напруга у аналогових системах.

Ці помилки можна усунути або звести до мінімуму, використовуючи поправкові коефіцієнти, калібруючи обладнання або віддаючи перевагу відповіднішим приладам.

Показові огріхи найчастіше трапляються з вини людини, зокрема через неуважність того, хто працює з обладнанням.

Навіть коли апарат справний, результати вимірювань можуть виявитися хибними через помилки того, хто їх робить, наприклад: неправильний запис показників, помилкове зчитування кутів чи недоречне регулювання висоти приладу.

Грубі помилки не піддаються фізичним чи статистичним закономірностям і можуть бути розпізнані завдяки пильності, повторним вимірюванням або спостереженням з двох позицій.

Випадкові похибки проявляються у невідповідності між результатами кількох вимірювань однієї й тієї самої величини.

Вони виникають непередбачувано, через вплив вимірювальних інструментів, людський фактор або фізичне середовище, яке впливає на процес.

Щоб зменшити їхній вплив, рекомендується збільшити кількість повторних спостережень.

Джерела похибок поділяються на три основні типи:

- Особисті похибки – ці помилки пов'язані з індивідуальними особливостями сприйняття людини. Вони можуть проявлятися як систематичні (стала тенденція в певних умовах), випадкові, або грубі (наприклад, неправильно записане значення).
- Інструментальні похибки – виникають через недосконалість приладів, якими вимірюють. Значну частину цих помилок можна виправити, калібруючи обладнання.
- Природні похибки – зумовлені зовнішніми факторами навколишнього середовища. Це включає атмосферні явища: температуру, тиск, вологість, вітер, а також вплив гравітації та рефракції.

1.4.2 Точність

Жодне спостереження в полі не здатне гарантувати абсолютну точність.

Кожне вимірювання ризикує містити вади різного гатунку, деякі з яких піддаються мінімізації або навіть ліквідації шляхом коригувань.

Але, навіть після врахування відомих помилок, результат залишається в зоні невизначеності.

Точність визначає, наскільки виміряне чи розраховане значення співпадає з загальноприйнятим стандартом або еталонним показником.

Стандарти можуть охоплювати різні аспекти:

- Чіткі визначення кількісних параметрів (наприклад, градусна міра внутрішніх кутів плаского трикутника завжди дорівнює 180°).
- Одиниці фізичних вимірювань, що мають чітко визначені еталони (метр, кілограм та інші).
- Результати, які було отримано з максимально можливою точністю, застосовуючи існуючі методики.

Вони сприймаються як достатньо близькі до істини, щоб використовувати їх як еталонні значення.

Точність польових даних напряму залежить від ретельності проведених вимірювань.

Отже, кожен отриманий результат мусить бути представлений з врахуванням можливих похибок, а всі етапи робіт - виконуватися з орієнтиром на необхідний рівень точності.

Контрольні точки, як правило, мають достатню точність, що дозволяє ефективно їх використовувати для контролю за деталізованими вимірюваннями.

1.4.3 Перевірка точності

Значні помилки здатні суттєво спотворити фінальний результат, отже контроль точності – справа першорядної важливості.

З цією метою використовують різноманітні підходи, на кшталт перехресних вимірювань чи внесення поправок до даних.

Систематичні перевірки дозволяють не лише виявляти грубі огріхи, але й оцінювати, як невеликі неточності впливають на загальну якість отриманого результату.

1.4.4 Контроль якості

Контроль якості – це цілісна система заходів та операцій, що спрямована на забезпечення достовірності та правильності одержаної інформації.

Він передбачає порівняльний аналіз результатів, отриманих із застосуванням різних методик.

Наприклад, координати об'єктів, визначені за допомогою лазерного сканування, підлягають зіставленню з даними тахеометричних вимірювань, що дозволяє обчислити середньоквадратичні похибки.

Отримане значення стає індикатором зовнішньої точності та загальної якості відсканованої поверхні.

2 Методології спостереження

2.1 Створення опорної мережі

Для гарантування відповідної оцінки точнісних властивостей і, власне, точності здобутих відомостей, спочатку було сформовано мережу контрольних пунктів.

Ця мережа стала фундаментом для порівняння вимірювальних даних, отриманих із застосуванням RTK і наземного лазерного сканування.

Базова мережа включала чотирнадцять контрольних пунктів, координати яких було визначено за допомогою тахеометра Leica 1201.

Для збільшення точності вимірювань, кожну контрольну точку вимірювали в двох площинах, використовуючи дві серії спостережень.

Крім цього, застосували додаткові вимірювання чотирьох точок мережі, використовуючи статичну GPS-систему.

Такий підхід дозволив перевести координати з локальної системи в УСК2000.

У результаті сформована мережа виступала як базова, до якої прикріплювалися всі подальші вимірювання.

З метою оцінювання точності даних, отриманих RTK та наземним лазерним сканером, координати цих систем підлягали порівнянню з опорними точками.

Польові вишукування було проведено з використанням трьох видів геодезичного устаткування:

- глобальної системи позиціонування (GNSS);
- наземного лазерного сканера;
- електронного тахеометра.

Для мінімізації інструментальних похибок (наприклад, помилок візирної лінії, відхилення осі та вертикальної колімації), для кожної точки проводили два окремі виміри.

Оскільки координати, зчитані з тахеометра, були визначені в локальній системі координат, для переведення їх у систему УСК2000 було використано статичні GPS-дані.

Точність створеної мережі оцінювалася через її вирівнювання та виявлення грубих похибок.

Для забезпечення більшої надійності, результати детальних вимірювань було отримано п'ять разів.

Фінальна оцінка точності здійснювалася на основі аналізу середньоквадратичної похибки та стандартного відхилення.

2.2 Оцінка точності та прецизійності

Для оцінки вірності й точності вимірювань, були обчислені середньоквадратична похибка та стандартне відхилення окремих замірів.

Середньоквадратична похибка (СКП) використовується як мірило вірності конкретного заміру та розраховується на основі відхилень між отриманими й справжніми величинами.

Справжньою величиною у даному разі слугували координати опорної сітки, що були визначені з максимальною точністю (до 1 мм).

Стандартне відхилення для кожної точки обчислюється за формулою:

$$СКВ(l) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(l - l_i)^2}{n}} \quad (1)$$

де: \bar{l} – встановлене значення, l_i – окреме вимірювання, а n – кількість вимірювань.

Стандартне відхилення дає уявлення про те, наскільки дані розкидані, тобто показує ступінь відхилення результатів від середнього значення, вказуючи на точність кожного вимірювання.

Воно обчислюється з урахуванням середнього арифметичного всіх виконаних вимірювань та кожного окремого значення.

Математична формула для визначення стандартного відхилення виглядає так:

$$CB(l) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(l - l_i)^2}{n-1}}, \quad \bar{l} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \quad (2)$$

де: \bar{l} – істинне або встановлене значення, l_i – окреме вимірювання, а n – кількість вимірювань.

2.2.1 Вибір відповідних контрольних точок для мережі та детального дослідження

Першочерговим етапом у створенні контрольної мережі було скрупольозне вивчення місцевості, де проводитимуться роботи.

Наступним кроком стало визначення дислокації та облаштування чотирнадцяти контрольних пунктів, котрі повинні бути взаємно видимі між собою.

Окрім того, вказані точки були оптимізовані для спостережень за допомогою супутників, з огляду на застосування методу RTK для зіставлення результатів тахеометричної зйомки.

Для забезпечення тривалої фіксації та стабільності контрольні пункти були позначені кілками.

Схему розташування території проекту можна побачити на рисунку 4.



2.2.2 Встановлення цілей для лазерного сканування

Для співставлення даних з тахеометричного знімання та лазерного сканування, на площині фасаду визначено 21 точку-мішень.

В якості контрольних точок, необхідних для реєстрації ScanWorlds, було застосовано шість чорно-білих мішеней-листів.

По тих же самих точках були здійснені вимірювання за допомогою тахеометра.

При виборі цілей для роботи, було враховано такі критерії:

- Рівномірне розміщення цілей по фасаду;

- Різне розташування цілей по висоті;
- Мінімізація кількості цілей, розташованих на одній лінії.

2.2.3 Детальне вимірювання

Після формування основоположної мережі та важливих реперів, було здійснено скрупульозні виміри.

RTK-виміри на базі базової мережі дозволили порівняти точність з показниками тахеометра.

До того ж, були проведені вимірювання фасаду будівлі, використовуючи лазерний сканер і тахеометр.

Кожну контрольну точку та репер було виміряно п'ять разів, щоб оцінити надійність та стабільність отриманих даних.

Також було зафіксовано час, витрачений на польові роботи та обробку даних.

Тахеометр:

Фасад будівлі, оздоблений чорно-білими мітками та кутами вікон, досліджувався за допомогою тахеометра п'ять разів.

Зібрані дані було оброблено у Leica GeoOffice, а координати фасадних цілей, що були отримані, використали як обмеження для реєстрації та географічної прив'язки.

Окрім того, було зафіксовано час, який пішов на вимірювання та обробку інформації.

Лазерне сканування:

Північно-східну частину фасаду споруди відсканували п'ять разів, вибираючи для цього п'ять різних позицій, перебуваючи на відстані 6–9 м.

Зібрані масиви точок було систематизовано та прив'язано до географічного розташування, спираючись на детальні дані з тахеометра.

Тривалість сканування й обробки піддалась аналізу, результати якого представлено у таблиці 13.

GPS RTK (кінематика в реальному часі):

Метод RTK було використано для порівняння точності мережових вимірювань та тих, що виконані тахеометром.

За відому координатну точку з опорної мережі, котра слугувала базовою станцією, було визначено координати решти 13 точок п'ять разів, досягнувши точності до 9 мм.

На точність впливали показники видимості супутників, їх позиція (геометрія) та інші обставини, що впливають на GPS-вимірювання: у випадку сприятливих умов точність була високою, в іншому разі – знижувалась.

Точність $Q_{x,y,z}$ можна обчислити за формулою:

$$Q_{x,y,z} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (3)$$

Де: σ_i — стандартне відхилення координат X , Y та Z

Результати, отримані внаслідок використання кожного з методів, були ретельно проаналізовані та зіставлені.

Метою було визначення їхньої відповідності критеріям точності, чіткості та тривалості виконання.

2.3 Зона дослідження проекту

Об'єктом аналізу став паркувальний простір біля багатопверхового будинку в Івано-Франківську.

Спочатку було проведено візуальний огляд території, а потім розгорнуто мережу з 14 точок спостереження, які стали основою для подальших, докладних вимірювань.

Для створення мережі використовували тахеометр Leica 1201.

На рисунку 4 показано розташування проектної зони та найважливіших контрольних пунктів.

Координати точок dub1, N1, C1 і H1 було визначено також за допомогою статичного GPS для забезпечення геодезичного прив'язування та правильної трансформації координат у необхідну систему.

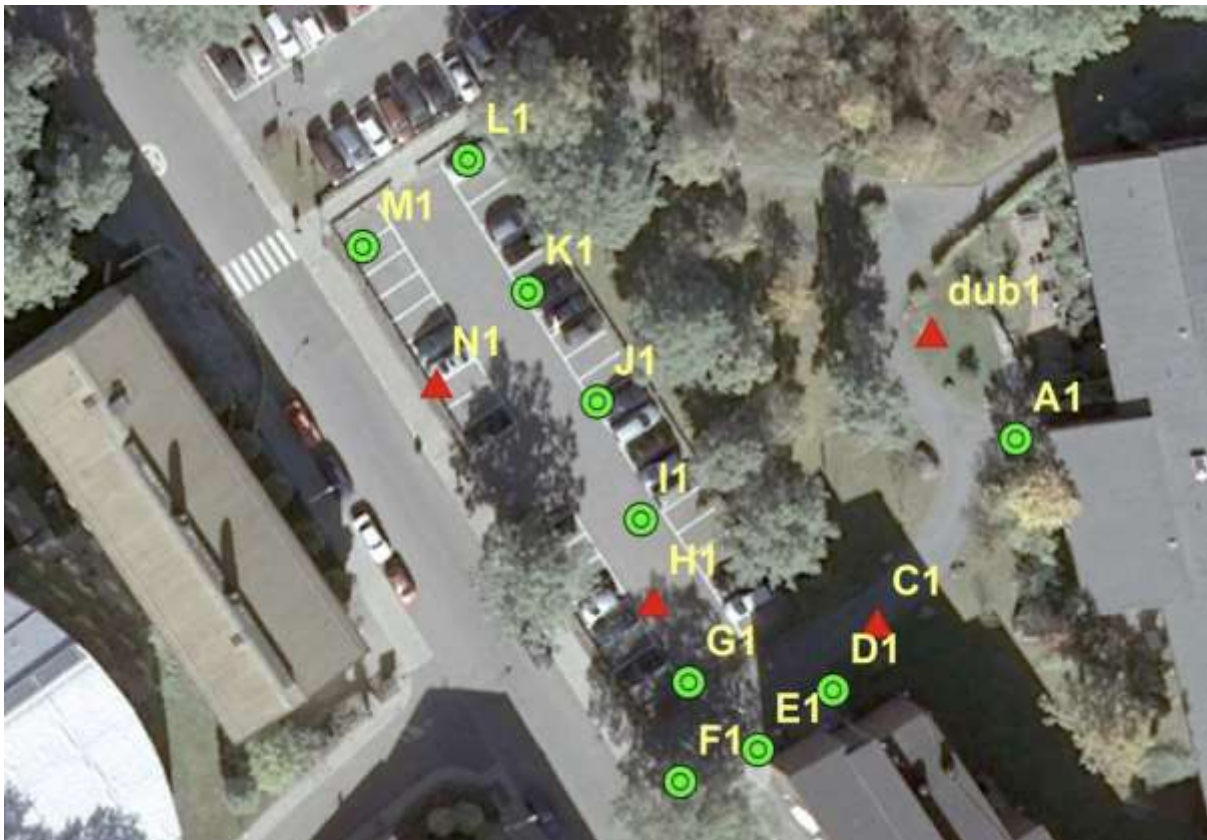


Рисунок 4 Опорні контрольні точки

2.4 Обробка даних

Дані опрацьовувалися в середовищах програм, спеціалізованих під конкретний тип обладнання.

Дані сканування наземним лазером обробляли в Cyclone, вимірювання тахеометром опрацьовували в Leica Geo Office, аналогічний підхід використовувався і для обробки GPS-спостережень в Leica Geo Office.

З метою інтеграції ScanWorlds в єдину систему координат сканера, проводилася реєстрація та прив'язка хмар точок до географічних координат. По завершенню, кінцеві результати перетворювались у систему координат УСК2000.

Враховуючи вплив людського чинника, недосконалість технічного обладнання, вплив зовнішніх фізичних факторів та потенційні помилки у вимірювальному процесі, отримані результати, швидше за все, матимуть певні похибки.

Для їх мінімізації та підвищення точності було застосовано метод найменших квадратів.

Налаштування і оптимізація мережі виконувалися у програмному забезпеченні Leica Geo Office, яке, власне, використовує метод найменших квадратів.

Цей загальноприйнятий метод дає змогу розрахувати невідомі величини, базуючись на серії вимірювань, шляхом мінімізації суми квадратів відмінностей між фактичними даними та розрахованими значеннями.

Відповідно, застосування цього методу забезпечує оптимальну оцінку невідомих координат, зводячи до мінімуму зважені залишки спостережень.

3 Результати та дослідження

3.1 Обробка базової лінії GPS

Чотири пункти керування, що входять до складу опорної мережі, досліджувалися шляхом статичних вимірювань протягом трьох годин.

Перерахунок координат з WGS 84 в UСК2000 здійснювався шляхом обробки базової лінії, сформованої на основі цих чотирьох контрольних пунктів, з використанням станції FRKV, що представляє собою безперервно функціонуючу GNSS-станцію з опорної мережі SystemSolution.

Використані вхідні дані включали вимірювання фази несучої та кодової дальності, забезпечуючи точне тривимірне визначення положення.

Отримані координати були використані як відомі значення для вирівнювання опорної мережі.

Результати обчислень координат контрольних пунктів та відповідні значення середньоквадратичного відхилення наведено в Таблиці 5.

Таблиця 5: Обчислені координати (м)

Point	N	E	H	σN	σE	σH
C	6581703.78	153915.061	58.067	0.001	0.000	0.001
H	6581705.635	153894.633	57.700	0.001	0.000	0.001
N	6581725.636	153874.812	57.523	0.001	0.001	0.000
DUB	6581730.261	153920.049	57.029	0.001	0.000	0.001

у зв'язку з воєнним станом координати у роботі змінені

3.2 Коригування

Корекція – це процес виправлення результатів вимірювань, враховуючи, що кожне спостереження супроводжується певними похибками.

Щоб підвищити точність спостережень і обчислити координати нових точок, використовують різні показники якості, зокрема,

стандартизовані залишки, середнє квадратичне відхилення, надлишкові вимірювання, еліпси похибок та інші статистичні параметри.

На початковому етапі виконано вільне зрівнювання опорної мережі, щоб уникнути ймовірних невідповідностей між закріпленими точками та гарантувати узгодженість всієї мережі.

3.2.1 Етапи вимірювання

Щоб усунути або послабити дію інструментальних погрішностей, як-от похибка осі колімації, похибки вертикальної осі, недоліків компенсатора (подовжнього та поперечного) та похибки вертикального індексу, було виконано два серії вимірювань у два підходи.

Для контролю точності проводилося порівняння результатів двох вимірів: середні значення визнавались задовільними, якщо різниця між ними не перебільшувала 2 мм для віддалей та 6 мілірадіан для кутів.

Перед коригуванням було також застосовано атмосферні поправки, для врахування впливу температури, тиску й вологості на отримані результати вимірювань.

3.2.2 Априорне стандартне відхилення

Априорні стандартні відхилення слід враховувати, коли беруться початкові дані спостережень.

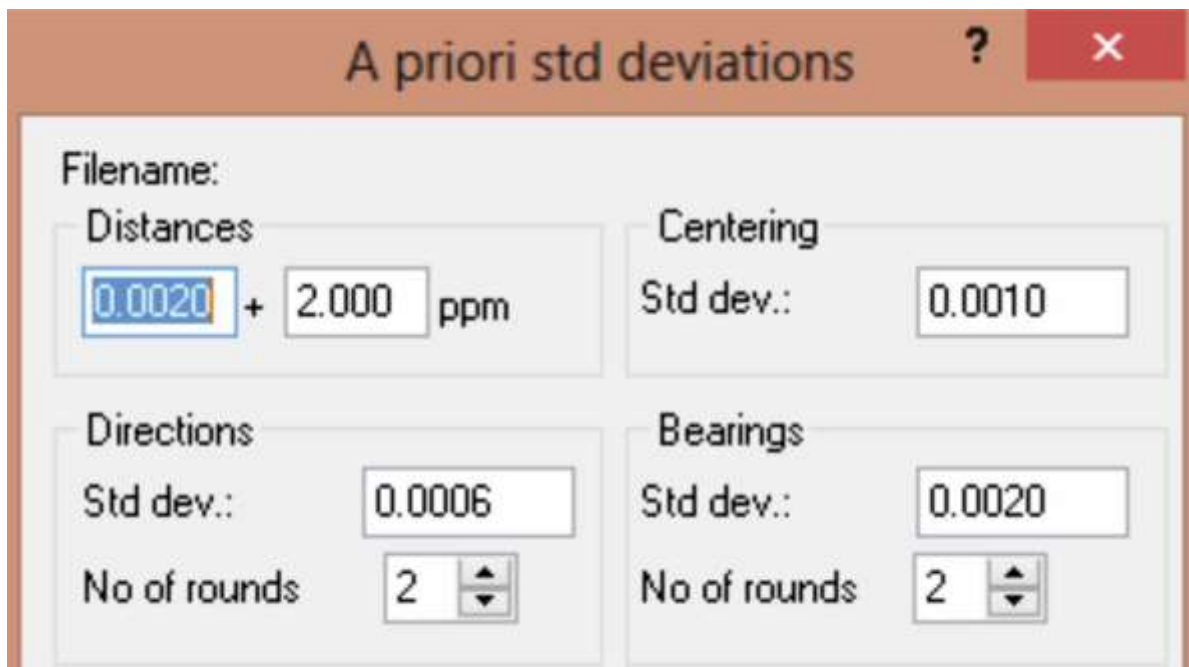
Оскільки вимірювання включали відстані й кути, то для здійснення правильного коригування використовувалися різні вагові коефіцієнти, які залежали від типу вимірювання.

Значення априорних стандартних відхилень зазвичай надаються виробниками вимірювальних приладів.

Для встановлення базової мережі, попередня стандартна похибка (див. рис. 5) встановлена наступним чином:

- для відстаней – 2 мм + 2 ppm;
- для горизонтальних кутів – 0,6 мілірадіана;
- для помилки центрування – 1 мм;
- для висоти приладу – 3 мм.

Ці значення забезпечують відповідне зважування різних типів вимірювань під час обробки мережі та допомагають зменшити вплив систематичних і випадкових помилок.



The image shows a software dialog box titled "A priori std deviations". It contains the following settings:

Category	Parameter	Value
Distances	Std dev.	0.0020
	ppm	2.000
Centering	Std dev.:	0.0010
Directions	Std dev.:	0.0006
	No of rounds	2
Bearings	Std dev.:	0.0020
	No of rounds	2

Рисунок 5 Априорне стандартне відхилення

3.2.3 Горизонтальне вирівнювання мережі

Для планових координат (Північ та Схід) було застосовано метод вільного вирівнювання, який включає в себе зсув та обертання.

Суть цього підходу полягає в попередньому розрахунку мережі у повністю вільній формі, а потім її трансформації з врахуванням координат контрольних пунктів.

Узгодження координат реалізується через зсув за осями Північ та Схід, з подальшим виконанням обертання.

У таблиці 6 наведені числові показники до та після вирівнювання.

Відхилення відображають розбіжності між скоригованими результатами та отриманими вимірами.

Розмір розбіжностей зумовлює їх візуальне зображення:

- зелений – якщо відхилення не більше одного вихідного стандартного відхилення;
- чорний – у випадку, якщо розбіжність менше двох;
- червоний – коли відхилення перевищує два вихідні стандартні відхилення, що може вказувати на наявність суттєвих помилок у вимірюваннях.

Відхилення, чиє значення перевищувало два вихідні стандартні відхилення, вимагали додаткового дослідження для виявлення грубих помилок.

Таблиця 6: Деякі скориговані значення та їх стандартні відхилення

Тип спостереження	Станція	Об'єкт	Значення	Стандартне відхилення	Помилка	Залишок	Налаштоване значення	Стандартне відхилення	Стандартний залишок
Напрямок	H1	E1	210.57	0	0.004	-0.006	210.566	0.004	-1.222
Довжина	H1	E1	16.579	0.005	0.005	-0.005	16.574	0.001	-0.614
Напрямок	H1	G1	223.51	0	0.008	-0.016	223.497	0.009	-1.461
Довжина	H1	G1	8.08	0.005	0.005	-0.002	8.078	0.001	-0.195
Напрямок	H1	F1	240.23	0	0.004	-0.005	240.227	0.005	-1.192
Довжина	H1	F1	16.672	0.005	0.005	-0.004	16.669	0.002	-0.408
Напрямок	M1	C1	83.857	0	0.001	-0	83.857	0.001	-0.064
Довжина	M1	C1	58.17	0.005	0.005	0.007	58.177	0.002	0.831
Напрямок	M1	dub1	53.223	0	0.001	-0.001	53.222	0.001	-0.803
Довжина	M1	dub1	52.586	0.005	0.005	0.002	52.589	0.002	0.239
Напрямок	M1	H1	100.01	0	0.002	0.001	100.015	0.001	0.188
Довжина	M1	H1	41.903	0.005	0.005	0.002	41.906	0.002	0.267
Напрямок	M1	N1	111.94	0	0.004	0.008	111.949	0.005	1.359
Довжина	M1	N1	14.123	0.005	0.005	-0.004	14.119	0.002	-0.449
Напрямок	M1	L1	0	0	0.005	-0.007	399.993	0.007	-1.488
Довжина	M1	L1	12.486	0.005	0.005	-0.002	12.484	0.001	-0.183
Напрямок	M1	K1	60.647	0	0.004	-0.008	60.639	0.003	-1.278
Довжина	M1	K1	15.649	0.005	0.005	0.002	15.651	0.001	0.181
Напрямок	M1	A1	61.966	0	0.001	0.003	61.97	0.001	2.241
Довжина	M1	A1	62.24	0.005	0.005	0.008	62.248	0.002	0.933

Відповідно до даних, наведених у таблиці 5, найбільша розбіжність серед індивідуальних вимірів у мережі дорівнювала 9 мм по напрямку, тоді як мінімальна зареєстрована становила 1 мм по дистанції.

Ці результати підкреслюють високу точність вимірювань, проведених у роботі, та свідчать про відсутність суттєвих помилок.

Для виявлення потенційних грубих помилок застосовується аналіз стандартизованих залишків.

Колір позначення залишків визначається їхньою величиною:

зелений – якщо залишок менше 1;

чорний – коли значення в діапазоні до 2;

червоний – у випадках, коли залишок перевищує 2, що може вказувати на потребу у додатковій перевірці, зумовленій ймовірними неточностями.

3.2.4 Скориговані координати та їх стандартні відхилення

У таблиці 7 наведено відомості про координати пунктів опорної мережі.

Їх розраховали, застосувавши метод вільного зрівнювання.

Після цього було враховано зсув та поворот.

Насамперед координати обчислювалися у вільній конфігурації.

Пізніше їх перетворено до єдиної системи координат.

Це було зроблено за допомогою трансформації відносно осей X та Y.

Узгодження мережі з контрольними пунктами здійснили, застосовуючи зсув по осях координат та поворот.

Зазначені похибки координат показали значення менші за 1 мм.

Найбільші середньоквадратичні відхилення були 0,9 мм у горизонтальній площині та 0,7 мм по висоті.

Це свідчить про високу точність збудованої мережі, що слугувала надійною основою для подальших, більш детальних вимірювань.

Наступний етап аналізу передбачав опрацювання даних, зібраних за допомогою GPS-RTK, лазерного сканування та тахеометричних спостережень, які були зорієнтовані відносно заздалегідь визначених координат.

Таблиця 7: Скориговані координати опорної мережі

ТОЧКИ	N	E	H	σN	σE	σH
A	6581720.4857	153927.7596	57.6203	0.0008	0.0006	0.0004
C	6581703.7786	153915.0632	58.2209	0.0007	0.0007	0.0004
D	6581697.5697	153911.0546	58.4491	0.0006	0.0007	0.0004
E	6581692.1084	153904.1971	58.5289	0.0010	0.0008	0.0007
F	6581689.1587	153897.1126	58.6269	0.0012	0.0009	0.0007
G	6581698.2412	153897.8686	57.9827	0.0009	0.0009	0.0007
H	6581705.6416	153894.6336	57.7450	0.0006	0.0006	0.0005
I	6581713.1413	153893.4920	57.5835	0.0009	0.0009	0.0007
J	6581723.8830	153889.5021	57.2779	0.0011	0.0010	0.0007
K	6581733.9285	153883.1438	56.9147	0.0006	0.0007	0.0004
L	6581745.9489	153877.6836	56.5120	0.0010	0.0009	0.0007
M	6581738.0219	153868.0418	56.7599	0.0007	0.0007	0.0004
N	6581725.6336	153874.8107	57.2913	0.0009	0.0010	0.0007
DUB	6581730.2577	153920.0470	57.0608	0.0007	0.0006	0.0004

Як було сказано насамперед, мережа складалася з чотирнадцяти контрольних станцій.

На рисунку 6 показано розподіл показників стандартного відхилення (δ), при цьому колір позначки залежить від величини сигми.

Рівень сигми для кожного вимірювання напряму пов'язаний з модулем стандартизованої похибки.

За наявності залишків у діапазоні від 0 до 1 створюється відповідний сигма-рівень, що характеризує ступінь точності отриманих даних.

Менше значення сигми прямо пропорційне до точності результатів.

У випадку, коли рівень сигми високий, це може вказувати на присутність значних похибок, що потребують подальшої перевірки з можливим відхиленням, якщо це буде потрібно.

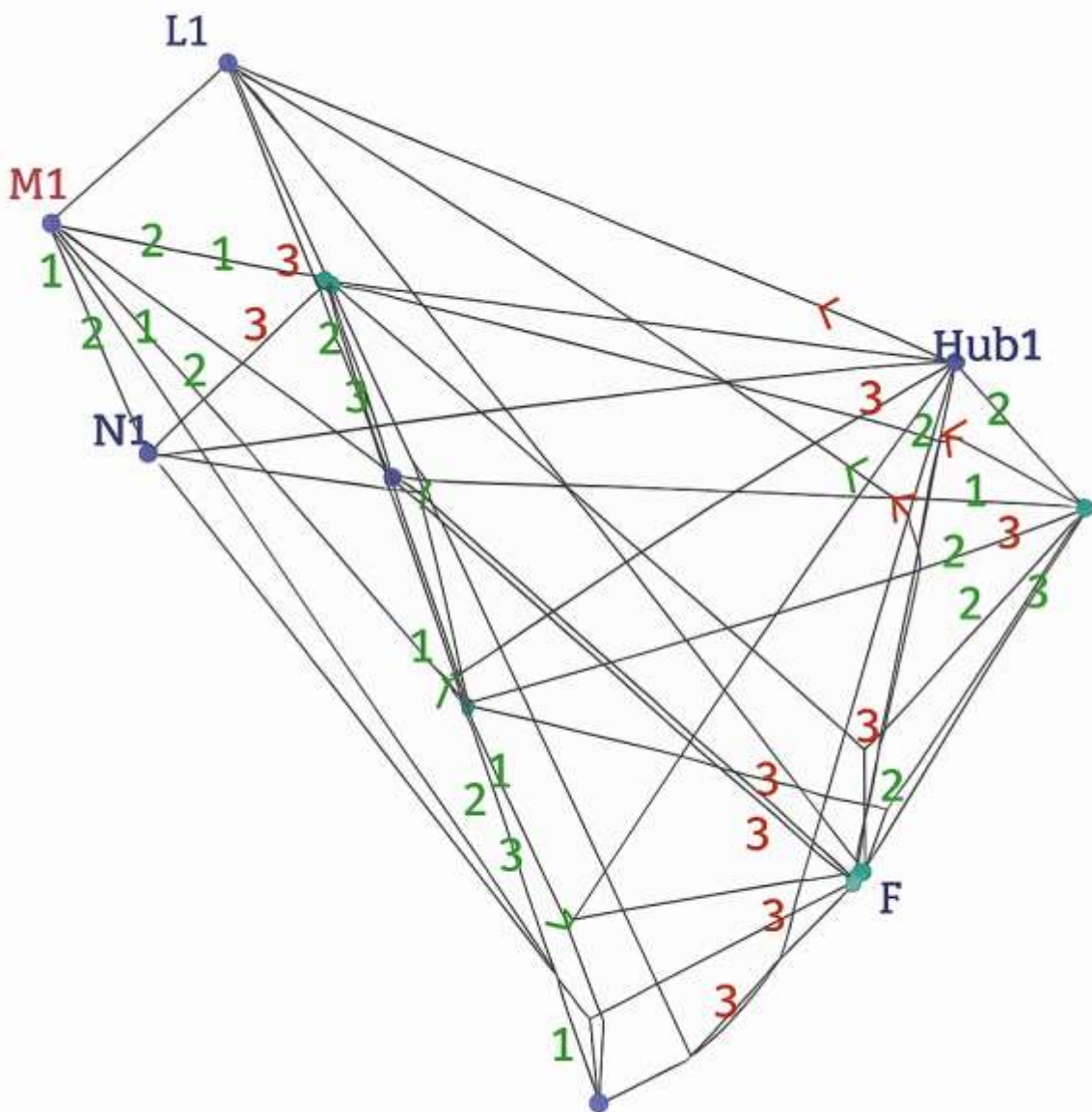


Рисунок 6 Графічне зображення опорної мережі

3.2.5 Вертикальне вирівнювання мережі

Для згладжування висотної мережі було використано дані вимірювань вертикальних кутів та похилих відстаней.

Спочатку було виконано вирівнювання, що не мало обмежень, а потім координати були приведені до потрібної системи координат шляхом відповідного перетворення.

Прив'язка до пунктів з відомими координатами здійснювалась за допомогою зсуву по осі Z.

Отримана точність у вертикальному напрямку була надзвичайно високою: максимальне стандартне відхилення становило 0,7 мм, мінімальне – 0,4 мм, обидва значення – менше 1 мм.

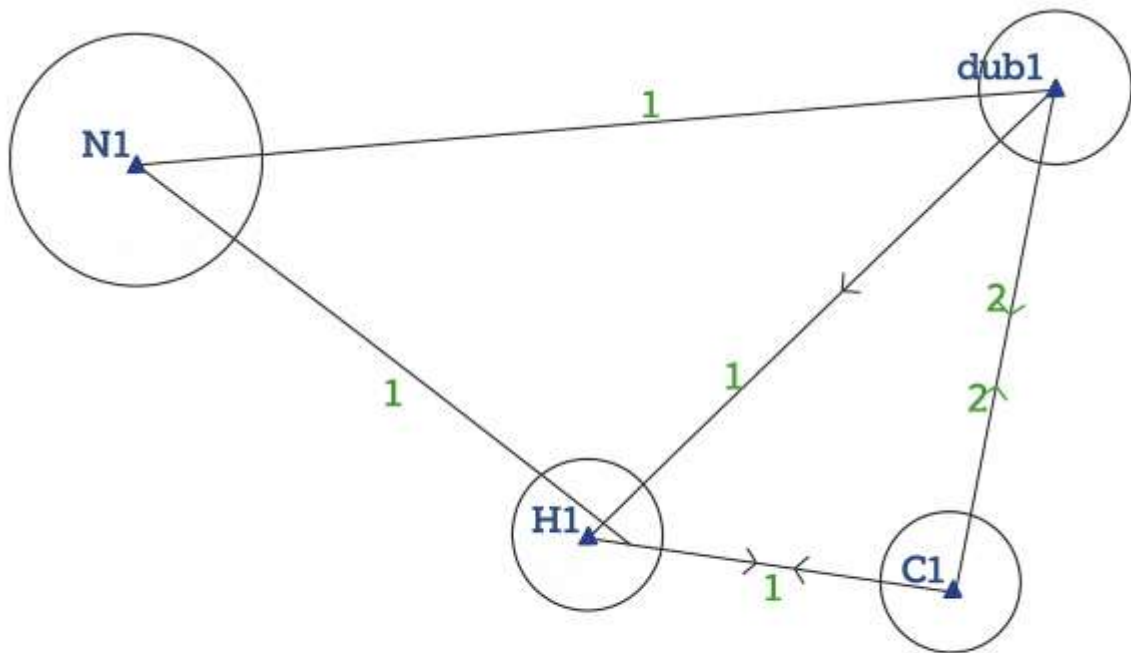


Рисунок 7 Графічне зображення регулювання висоти

3.3 Визначення точності та достовірності RTK

На основі базової референтної сітки було здійснено серію вимірювань, використовуючи режим RTK, для проведення порівняльного аналізу з даними, отриманими за допомогою тахеометра.

Кожну контрольну точку піддали п'ятиразовому вимірюванню.

Цей підхід дозволив визначити показники повторюваності та точності, що характеризують застосований метод вимірювання.

Для оцінювання точності, з якою повторювалися вимірювання, було застосовано формулу для розрахунку стандартного відхилення.

Додатково, було проведено обчислення середньоквадратичного відхилення результатів, отриманих з використанням RTK, з метою визначення ступеня наближення отриманих координат до заздалегідь встановлених референцних значень.

Згідно з інформацією у таблиці 7, розкид даних, тобто стандартне відхилення, не перевищував 8 мм у горизонтальній площині, а у вертикальній склав приблизно 1,5 см.

Це вказує на високу узгодженість отриманих результатів.

Середні показники стандартного відхилення координат виявили значення 9 мм по горизонталі та 2 см по вертикалі.

Таблиця 7 містить дані вимірювань RTK, відображаючи середньоквадратичну похибку та розкид даних, що представлений стандартним відхиленням.

Таблиця 7 Виміри RTK, і їх середньоквадратична похибка

Точки	X	Y	Z	X	Y	Z	σX	σY	σZ
	Середнє значення RTK			СКП			Похибки координат		
A	6581720.487	153927.762	57.616	0.003	0.009	0.012	0.003	0.006	0.015
C	6581703.78	153915.066	58.228	0.007	0.008	0.017	0.007	0.006	0.008
D	6581697.574	153911.055	58.441	0.009	0.005	0.017	0.003	0.004	0.006
E	6581692.109	153904.196	58.521	0.005	0.002	0.015	0.004	0.001	0.005
F	6581689.157	153897.11	58.621	0.004	0.006	0.015	0.003	0.001	0.004
G	6581698.243	153897.867	57.977	0.003	0.004	0.012	0.001	0.003	0.006
H	6581705.645	153894.637	57.738	0.007	0.008	0.015	0.004	0.004	0.007
I	6581713.144	153893.493	57.579	0.007	0.008	0.011	0.005	0.008	0.005
J	6581723.884	153889.504	57.271	0.005	0.007	0.013	0.005	0.005	0.003
K	6581733.927	153883.147	56.907	0.003	0.006	0.015	0.001	0.001	0.002
L	6581745.959	153877.687	56.506	0.008	0.007	0.013	0.007	0.002	0.004
M	6581738.026	153868.045	56.749	0.008	0.007	0.022	0.002	0.003	0.001
N	6581725.636	153874.814	57.285	0.005	0.006	0.012	0.003	0.003	0.006

Для з'ясування можливих розбіжностей між результатами вимірювань, отриманих з тахеометра та режиму RTK, було проведено порівняння середніх значень координат.

Аналіз відмінностей між зібраними даними не виявив статистично значущих розбіжностей.

Відповідно до даних таблиці 8, найбільша різниця становила 1 см по горизонталі та 1,1 см по висоті, водночас решта показників були нижчими.

Отже, порівняння середніх значень координат, обчислених двома методами, показало чудову якість проведених вимірювань.

Встановлено, що результати виконаних спостережень характеризуються високою точністю та надійністю.

Це додатково підтверджується величинами середніх квадратичних відхилень різниць між вимірюваннями, зробленими тахеометром і RTK.

Таблиця 8 Різниця між середнім значенням TS та RTK

Точки	Тахеометр			RTK			Тахеометр - RTK		
	N	E	H	N	E	H	ΔN	ΔE	ΔH
A	6581720.486	153927.76	57.6203	6581720.487	153927.762	57.616	-0.001	-0.002	0.004
C	6581703.779	153915.063	58.2209	6581703.78	153915.066	58.228	-0.001	-0.003	-0.007
D	6581697.57	153911.055	58.4491	6581697.574	153911.055	58.441	-0.004	0.000	0.008
E	6581692.108	153904.197	58.5289	6581692.109	153904.196	58.521	-0.001	0.001	0.008
F	6581689.159	153897.113	58.6269	6581689.157	153897.11	58.621	0.002	0.003	0.006
G	6581698.241	153897.869	57.9827	6581698.243	153897.867	57.977	-0.002	0.002	0.006
H	6581705.642	153894.634	57.745	6581705.645	153894.637	57.738	-0.003	-0.003	0.007
I	6581713.141	153893.492	57.5835	6581713.144	153893.493	57.579	-0.003	-0.001	0.005
J	6581723.883	153889.502	57.2779	6581723.884	153889.504	57.271	-0.001	-0.002	0.007
K	6581733.929	153883.144	56.9147	6581733.927	153883.147	56.907	0.002	-0.003	0.008
L	6581745.949	153877.684	56.512	6581745.959	153877.687	56.506	-0.010	-0.003	0.006
M	6581738.022	153868.042	56.7599	6581738.026	153868.045	56.749	-0.004	-0.003	0.011
N	6581725.634	153874.811	57.2913	6581725.636	153874.814	57.285	-0.002	-0.003	0.006
DUB	6581730.258	153920.047	57.0608	6581730.258	153920.047	57.061	0.000	0.000	0.000

Додатково, було підраховано середньоквадратичне відхилення різниць між показниками, отриманими тахеометром та методом RTK, а потім проведено порівняння з розбіжностями в координатах.

У таблиці 9 представлено величини середньоквадратичного відхилення для вимірювань, які підлягали зіставленню.

Відповідно до отриманих даних, найбільше зміщення зафіксовано на рівні 9 мм по горизонталі, а по вертикалі – 1,7 см.

Середньоквадратичну похибку для тахеометра не обчислювали, оскільки відсутнє контрольне значення, необхідне для здійснення відповідних обчислень.

Таблиця 9 Порівняння стандартних відхилень між тахеометром та RTK

Тахеометр			RTK			Різниця			
Точки	σ_N	σ_E	σ_H	σ_N	σ_E	σ_H	σ_dN	σ_dE	σ_dH
A1	0.001	0.001	0.000	0.007	0.006	0.012	0.007	0.006	0.012
C1	0.001	0.001	0.000	0.009	0.005	0.014	0.009	0.005	0.014
D1	0.001	0.001	0.000	0.007	0.008	0.006	0.007	0.008	0.006
E1	0.001	0.001	0.001	0.008	0.006	0.014	0.008	0.006	0.014
F1	0.001	0.001	0.001	0.007	0.008	0.012	0.007	0.008	0.012
G1	0.001	0.001	0.001	0.005	0.008	0.011	0.005	0.008	0.011
H1	0.001	0.001	0.001	0.005	0.009	0.017	0.005	0.009	0.017
I1	0.001	0.001	0.001	0.009	0.001	0.013	0.009	0.001	0.013
J1	0.001	0.001	0.001	0.009	0.007	0.014	0.009	0.007	0.014
K1	0.001	0.001	0.000	0.005	0.008	0.013	0.005	0.008	0.013
L1	0.001	0.001	0.001	0.005	0.006	0.014	0.005	0.006	0.014
M1	0.001	0.001	0.000	0.007	0.007	0.012	0.007	0.007	0.012
N1	0.001	0.001	0.001	0.004	0.006	0.013	0.004	0.006	0.013

Надійність здобутих даних було проаналізовано за допомогою довірчого інтервалу.

Оскільки кількість здійснених вимірювань була невеликою ($n = 5$), для розрахунків було використано t-розподіл.

Цей розподіл ймовірностей є близьким за формою до нормального, але його застосовують, коли розмір вибірки є незначним.

Він характеризується симетричною кривою у формі дзвону та передбачає збільшену ймовірність появи значень, що відхиляються від середнього.

При застосуванні довірчого інтервалу на рівні 95% перевірили стабільність отриманих показників.

Суть завдання зводилась до встановлення діапазону, в якому з певною вірогідністю має міститися реальна величина.

Цей діапазон назвали довірчим інтервалом, а його границі - довірчими межами.

Вони розраховуються на основі стандартного відхилення вибірки даних, використовуючи відповідні статистичні таблиці.

Зазвичай усталений рівень 95% свідчить, що в 19 з 20 спроб дійсне значення перебуває всередині розрахованого інтервалу.

Наявність великої похибки у даних, що розподілені нормально, вказує на ймовірність помилки.

Це спостереження можна відхилити, якщо залишкова похибка перевищує трикратну величину стандартного відхилення.

В таблиці 10 подано результати обчислення довірчого інтервалу для різниці координат, визначених методами RTK та TPS.

Таблиця 10 Межі довірчого інтервалу та різниця координат між TPS та RTK

Межа довірчого інтервалу та різниця похибок між наземним лазерним скануванням і RTK						
Точки	$k\sigma_{d_i}$			Abs[$d_{(RTK-TPS)_i}$]		
	N	E	H	N	E	H
A1	0.0196	0.0178	0.0339	0.001	0.006	0.012
C1	0.0251	0.0146	0.0394	0.006	0.010	0.016
D1	0.0195	0.0212	0.0175	0.012	0.000	0.015
E1	0.0218	0.0163	0.0378	0.008	0.001	0.012
F1	0.0197	0.0229	0.0339	0.015	0.005	0.011
G1	0.0147	0.0212	0.0312	0.005	0.001	0.005
H1	0.0129	0.0245	0.0467	0.013	0.003	0.004
I1	0.0240	0.0039	0.0367	0.018	0.007	0.005
J1	0.0241	0.0191	0.0384	0.011	0.002	0.011
K1	0.0140	0.0217	0.0356	0.026	0.023	0.018
L1	0.0142	0.0168	0.0400	0.010	0.003	0.016
M1	0.0195	0.0201	0.0339	0.014	0.006	0.003
N1	0.0119	0.0180	0.0361	0.002	0.003	0.005

Оскільки теоретично різниця у координатах обох методів дорівнює нулю, інтервал надійності визначається як $[-k\sigma_i, +k\sigma_i]$.

Тут k – значення з t-критерію.

Це число обчислюється для рівня довіри 95%, беручи до уваги відповідну кількість ступенів свободи ($k = 2,776$).

Відповідно до цього підходу, 95% усіх даних мали б бути в межах визначеного інтервалу.

Згідно з отриманими результатами, лише одна точка, позначена як K, вийшла за межі, як нижню, так і верхню.

Тому її необхідно виключити з подальших розрахунків.

Всі інші дані знаходяться у встановлених межах, що становить 92% від загальної кількості зроблених спостережень.

3.4 Реєстрація та геоприв'язка

Для успішної реєстрації скан-даних ScanWorlds на будівлі, було розміщено п'ять мішеней, виготовлених з чорно-білого паперу, з метою їхнього використання.

За допомогою сканера HDS2500 було виконано сканування п'яти ScanWorlds з перекриттям більше 80% поверхні.

Реєстрація, як вже було зазначено, полягає в об'єднанні кількох окремих сканів у єдину, узгоджену 3D-геометрію в рамках однієї спільної системи координат.

Для забезпечення точного позиціонування, ці загальні цільові точки також були виміряні п'ять разів тахеометром, використовуючи два напрямки вимірювань, а потім координати трансформовані до системи УСК2000 шляхом процедури геоприв'язки.

Визначені розрахунки показали, що координати кожної точки мають середню абсолютну похибку, яка не перевищує 9 міліметрів.

Для оцінки точності, яку демонструє лазерне сканування, були обчислені середні значення координат для п'яти ScanWorlds.

Наступним етапом було визначення різниці між результатами вимірювань, отриманих лазерним сканером, та результатами, отриманими тахеометром.

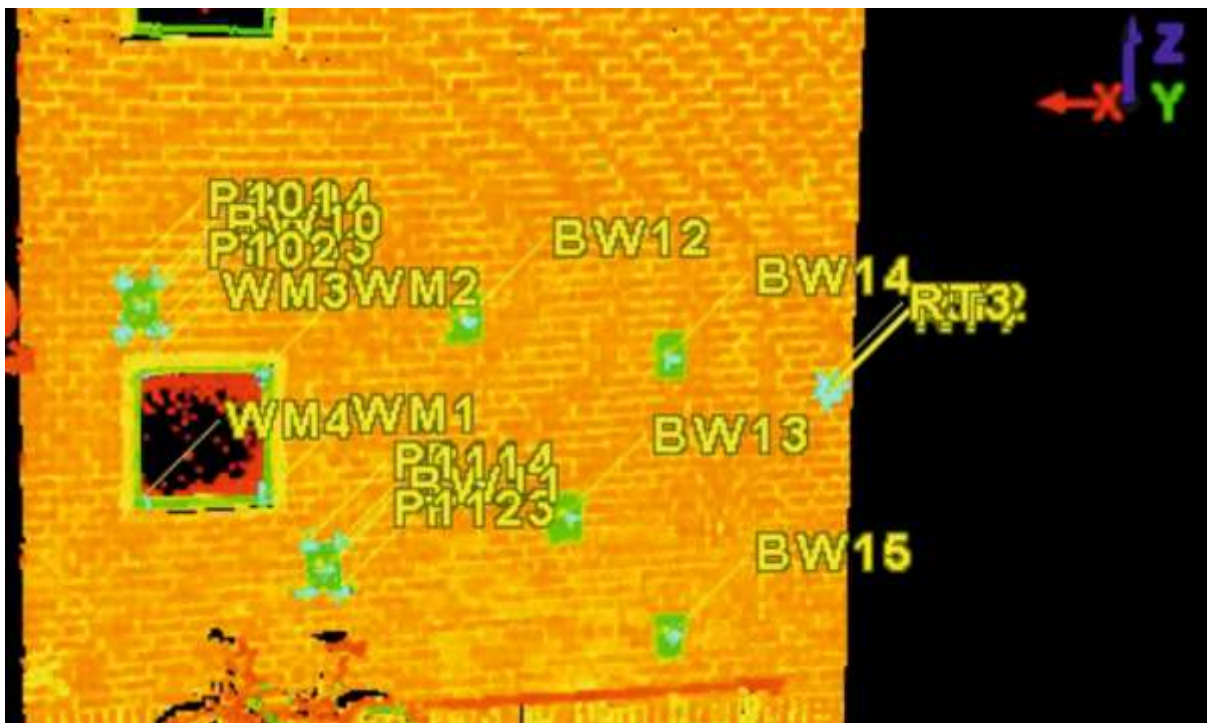
Такий процес аналізу був реалізований із застосуванням тієї ж самої методології, що використовувалася для порівняння RTK з тахеометром.

Після успішного завершення процедури реєстрації даних в ScanWorlds, імпортовано координати, виміряні за допомогою тахеометра. Метою цього кроку було перетворення просторової системи сканера до прийнятної системи координат УСК2000.

На рисунку 8 можна побачити наочне представлення усіх геопросторових точок, що були використані для опису фасадної частини будівлі.

З метою покращення та спрощення процесу візуального аналізу, були залучені чорно-білі цілі, кути вікон з дзеркальним шаром, а також чіткі краї цих цілей.

Визначення просторових координат було виконано з урахуванням середньої абсолютної похибки, яка не перевищувала значення 9 міліметрів.



Рисунку 8 Геоприв'язані точки

Для уникнення великих похибок у вимірюваннях, було відкинуто два виміри, чиї похибки перевищували 1 см.

На рисунку 9 зображена точність отриманих даних ScanWorlds.

Додатково, у випадках виявлення значних похибок, здійснювалася окрема перевірка векторів похибок для кожної точки цілі.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector	Group
BW12	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.002, -0.001) m	Ungrouped
BW10	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, -0.002, 0.001) m	Ungrouped
BW11	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, 0.002, 0.000) m	Ungrouped
BW15	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.001, -0.003, 0.001) m	Ungrouped
BW14	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	0.029 m	(0.027, 0.006, -0.001) m	Ungrouped
BW13	ScanWorld 6	ScanWorld 7	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.000) m	Ungrouped
BW10	ScanWorld 6	TPS Scanned 3rd (Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.010 m	(0.008, 0.004, 0.003) m	Ungrouped

Рисунок 9 Зареєстровані та геоприв'язані ScanWorlds

3.5 Порівняння результатів лазерного сканера та тахеометра

Вимірювання, виконані лазерним сканером та тахеометром, показали майже ідентичні показники як по горизонталі, так і по вертикалі.

Для оцінки точності вимірювань було проведено п'ять сканувань ScanWorlds.

Щоб об'єднати дані в єдину систему координат, необхідно одночасно зареєструвати щонайменше два ScanWorlds.

З огляду на це, з п'яти отриманих вимірювань було сформовано п'ять пар ScanWorlds.

Для кожної пари була здійснена реєстрація, застосовуючи п'ять чорно-білих цільових мішеней як обмеження.

По завершенню п'яти реєстрацій було розраховано стандартні відхилення координат.

Отримані дані наведено в таблиці 11.

Аналіз результатів наочно демонструє, що точність вимірювань досягла міліметрового діапазону для всіх вимірних координат.

Схожі показники точності, на рівні міліметрів, також було отримано під час вимірювань за допомогою тахеометра.

Разом з досягненням міліметрової точності, тахеометр забезпечує потенціал для незначно вищої точності, ніж лазерний сканер.

Таблиця 11 Стандартні відхилення зареєстрованого лазерного сканування

Точки	Точки отримані з наземного лазерного сканування					
	N	E	H	σN	σE	σH
BW10	6581693.863	153909.234	61.651	0.002	0.005	0.001
BW11	6581693.247	153908.272	60.000	0.005	0.004	0.012
BW12	6581692.756	153907.503	61.529	0.005	0.005	0.002
BW13	6581692.385	153906.925	60.245	0.003	0.006	0.006
BW15	6581691.992	153906.315	59.442	0.002	0.003	0.003
P101	6581693.915	153909.322	61.803	0.004	0.007	0.004
P102	6581693.938	153909.322	61.505	0.009	0.007	0.006
P103	6581693.808	153909.146	61.508	0.006	0.003	0.009
P104	6581693.806	153909.147	61.803	0.006	0.013	0.006
P111	6581693.296	153908.357	60.143	0.006	0.008	0.004
P112	6581693.296	153908.363	59.852	0.006	0.010	0.003
P113	6581693.186	153908.188	59.845	0.004	0.003	0.008
P114	6581693.186	153908.187	60.143	0.006	0.004	0.003
RT1	6581691.413	153905.406	60.974	0.003	0.006	0.005
RT2	6581691.386	153905.364	61.049	0.006	0.007	0.003
RT3	6581691.435	153905.447	61.048	0.006	0.003	0.003
RT4	6581691.415	153905.406	61.005	0.006	0.006	0.011
WM1	6581693.392	153908.594	60.445	0.007	0.008	0.006
WM2	6581693.386	153908.608	61.236	0.004	0.006	0.004
WM3	6581693.794	153909.284	61.225	0.008	0.016	0.006
WM4	6581693.804	153909.266	60.454	0.005	0.004	0.005

Для зіставлення даних лазерного сканування з вимірами тахеометра на фасаді споруди, було виконано п'ять вимірювань тахеометром.

Зафіксовано координати міток, що були оформлені у вигляді чорно-білих мішеней, а також положення кутів та контурів віконних прорізів.

Після цього, було здійснено обчислення середніх значень цих вимірювань для оцінки точності.

У таблиці 12 наведено середні результати п'яти вимірювань та показники відповідних стандартних відхилень.

Отримані значення стандартних відхилень продемонстрували невеликі розбіжності, порівнюючи з інформацією, здобутою лазерним скануванням.

Таблиця 12 Стандартні відхилення вимірювань тахеометром

Тахеометр						
Точки	N	E	H	σN	σE	σH
BW10	6581693.861	153909.232	61.652	0.002	0.008	0.001
BW11	6581693.246	153908.270	59.993	0.001	0.001	0.001
BW12	6581692.755	153907.501	61.528	0.004	0.002	0.001
BW13	6581692.387	153906.927	60.246	0.001	0.002	0.001
BW15	6581691.991	153906.316	59.443	0.001	0.003	0.001
P101	6581693.916	153909.320	61.802	0.002	0.001	0.002
P102	6581693.926	153909.320	61.507	0.006	0.001	0.002
P103	6581693.806	153909.146	61.505	0.002	0.003	0.001
P104	6581693.805	153909.144	61.801	0.002	0.002	0.001
P111	6581693.299	153908.359	60.144	0.001	0.001	0.001
P112	6581693.298	153908.365	59.851	0.001	0.002	0.002
P113	6581693.187	153908.188	59.844	0.001	0.003	0.001
P114	6581693.187	153908.186	60.142	0.001	0.003	0.001
RT1	6581691.413	153905.408	60.972	0.003	0.002	0.001
RT2	6581691.387	153905.367	61.049	0.002	0.001	0.001
RT3	6581691.439	153905.447	61.049	0.001	0.003	0.001
RT4	6581691.414	153905.407	61.003	0.006	0.001	0.001
WM1	6581693.394	153908.596	60.448	0.003	0.003	0.003
WM2	6581693.385	153908.606	61.234	0.003	0.003	0.003
WM3	6581693.796	153909.288	61.228	0.003	0.002	0.004
WM4	6581693.805	153909.265	60.453	0.004	0.003	0.003

Таблиця 5.10: Стандартне відхилення та середньоквадратичне значення вимірювання лазерним сканером

Точки	Середнє значення сканування			СКП			Різниця		
	N	E	H	N	E	H	σN	σE	σH
BW10	6581693.863	153909.234	61.651	0.002	0.002	0.001	0.002	0.005	0.001
BW11	6581693.247	153908.272	60	0.001	0.002	0.007	0.005	0.004	0.012
BW12	6581692.756	153907.503	61.529	0.001	0.002	0.001	0.005	0.005	0.002
BW13	6581692.385	153906.925	60.245	0.002	0.002	0.001	0.003	0.006	0.006
BW15	6581691.992	153906.315	59.442	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003
P101	6581693.915	153909.322	61.803	0.001	0.002	0.001	0.004	0.007	0.004
P102	6581693.938	153909.322	61.505	0.012	0.002	0.002	0.009	0.007	0.006
P103	6581693.808	153909.146	61.508	0.002	0	0.003	0.006	0.003	0.009
P104	6581693.806	153909.147	61.803	0.001	0.003	0.002	0.006	0.013	0.006
P111	6581693.296	153908.357	60.143	0.003	0.002	0.001	0.006	0.008	0.004
P112	6581693.296	153908.363	59.852	0.002	0.002	0.001	0.006	0.01	0.003
P113	6581693.186	153908.188	59.845	0.001	0	0.001	0.004	0.003	0.008
P114	6581693.186	153908.187	60.143	0.001	0.001	0.001	0.006	0.004	0.003
RT1	6581691.413	153905.406	60.974	0.000	0.002	0.002	0.003	0.006	0.005
RT2	6581691.386	153905.364	61.049	0.001	0.003	0	0.006	0.007	0.003
RT3	6581691.435	153905.447	61.048	0.004	0	0.001	0.006	0.003	0.003
RT4	6581691.415	153905.406	61.005	0.001	0.001	0.002	0.006	0.006	0.011
WM1	6581693.392	153908.594	60.445	0.002	0.002	0.003	0.007	0.008	0.006
WM2	6581693.386	153908.608	61.236	0.001	0.002	0.002	0.004	0.006	0.004
WM3	6581693.794	153909.284	61.225	0.002	0.004	0.003	0.008	0.016	0.006
WM4	6581693.804	153909.266	60.454	0.001	0.001	0.001	0.005	0.004	0.005

У таблиці висвітлено результати оцінювання якості наземного лазерного сканування, де враховано показники точності та надійності.

Точність вимірювань визначено похибкою у 2 мм, яку використано як для горизонтальних, так і для вертикальних координат.

Відповідно до теоретичних обґрунтувань, різниця між заявленими та отриманими величинами має дорівнювати нулю, що відповідає центральній точці розподілу t-критерію.

Для обчислення верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу застосовують коефіцієнт k , що залежить від рівня впевненості та кількості ступенів вільності.

Враховуючи, що кількість вимірювань становить $n=5$, число ступенів свободи розраховується як $n-1=4$.

Значення коефіцієнта k було визначено у програмі Excel за допомогою функції $[tinv(0,05;4)]$, беручи до уваги ймовірність довіри у 95%. В результаті було отримано $k=2.776$.

Таблиця 11: Межа довірчого інтервалу для різниці між тахеометрією та лазерним скануванням

Межа довірчого інтервалу та похибки, отримані з різниці тахеометрії і лазерного сканування						
Точки	$\sigma_{d(TLS-TPS)_i}$			Abs[$d_{(TLS-TPS)_i}$]		
	N	E	Z	N	E	H
BW10	0.034	0.027	0.028	0.002	0.001	0.001
BW11	0.015	0.012	0.034	0.002	0.001	0.007
BW12	0.017	0.015	0.005	0.002	0.002	0.001
BW13	0.009	0.017	0.017	0.001	0.002	0.001
BW15	0.007	0.012	0.010	0.001	0.001	0.001
P101	0.012	0.019	0.014	0.001	0.002	0.002
P102	0.131	0.019	0.017	0.012	0.002	0.001
P103	0.017	0.011	0.025	0.002	0.001	0.003
P104	0.017	0.037	0.016	0.001	0.004	0.002
P111	0.017	0.021	0.011	0.002	0.002	0.001
P112	0.016	0.029	0.010	0.002	0.002	0.001
P113	0.012	0.010	0.022	0.001	0.001	0.001
P114	0.016	0.014	0.010	0.001	0.001	0.001
RT1	0.010	0.017	0.015	0.001	0.001	0.001
RT2	0.018	0.019	0.009	0.001	0.003	0.000
RT3	0.016	0.011	0.009	0.003	0.001	0.001
RT4	0.024	0.018	0.032	0.001	0.001	0.002
WM1	0.020	0.024	0.018	0.002	0.002	0.003
WM2	0.013	0.019	0.012	0.001	0.002	0.002
WM3	0.024	0.044	0.019	0.001	0.003	0.003
WM4	0.017	0.013	0.015	0.001	0.001	0.001

Згідно з даними, представленими в Таблиці 11, всі результати, одержані шляхом обчислення розбіжностей у координатах між тахеометром та лазерним сканером, збереглися в межах прийнятного довірчого інтервалу.

3.6 Порівняння витрат часу

Для визначення трудомісткості у часовому еквіваленті, характерному для обох методик, було зареєстровано фактичний час, затрачений на здійснення вимірювань.

Ефективним часом вважається тривалість, що використовується безпосередньо для отримання даних, виключаючи можливі простої, викликані технічними проблемами або організаційними паузами.

Варто зазначити, що представлені відомості є специфічними для кожної окремої роботи, оскільки вони залежать від кваліфікаційного рівня та практичного досвіду особи, що виконує вимірювання.

Для зручності аналізу витрат часу, їх розподілили на два основні етапи: зіставлення даних, отриманих з тахеометричних вимірювань та GPS, та порівняння роботи тахеометра з лазерним сканером.

Слід підкреслити, що до розгляду не включали часові витрати на транспортування обладнання до місця проведення вимірювань та назад, а також затримки, що виникли через технічні проблеми, наприклад, розрядження акумуляторів або неточності в роботі приладів.

3.6.1 Тахеометр і GPS

Як було зазначено в першому розділі, вихідна мережа складалася з 14 контрольних пунктів, вимірювання яких виконувалися з 7 станцій, спрямованих на кожен.

Вимірювання здійснювалися у два кола спостережень на обох гранях.

Загальний обсяг робіт було умовно розділено на польовий та камеральний етапи.

У цьому розділі зосереджено увагу виключно на витратах часу, пов'язаних з польовими спостереженнями, де порівнювалися результати, отримані за допомогою тахеометра та докладних RTK-вимірювань на базовій мережі.

Тривалість кожного етапу вимірювань представлена у таблиці 12.

Таблиця 12: Витрати часу на вимірювання тахеометрії та RTK для опорної мережі

Тахеометрія			RTK	
Витрати часу (хв)				
Кроки вимірювання	Інструмент	Призма	Опорна точка	Ровер
Налаштування приладу	4	4	5	----
Центрування	5	3	3	2
Наведення	3	----	----	----
Запис	2	----	----	2
Зміна станції	----	4	----	2
Сума	14	11-14	8	6-13
	168		86	

Час, що витрачався на встановлення тахеометричного штатива на одній станції, спершу був задокументований.

Після цього його множили на загальну кількість станцій, щоб отримати загальний час, витрачений на розташування всіх приладів.

У даному проекті базова мережа налічувала сім пунктів.

Аналогічно, час, необхідний для наведення штатива на один об'єкт, множили на чотирнадцять, оскільки базова мережа містила 14 контрольних точок.

Згідно з цим самим методом було розраховано час для інших етапів вимірювань, що дало змогу визначити загальну тривалість робіт з тахеометром.

Загалом, витрачено було 168 хвилин, або, інакше кажучи, 2 години і 28 хвилин.

Стосовно GPS RTK, тривалість сесії зафіксовано окремо для базової станції та ровера.

Для базової станції загальний час становить 8 хвилин, враховуючи час на встановлення штативу і точне його центрування.

Для ровера час включав етап вирівнювання, запису даних та переміщення до наступної точки.

Це число помножили на загальну кількість точок контролю (13), що зрештою дало результат у 86 хвилин, або 1 годину та 26 хвилин.

В остаточному підсумку виявилось, що вимірювання опорної мережі тахеометром потребувало 2 години 28 хвилин, тоді як GPS RTK система впоралася за 1 годину 26 хвилин.

Отже, зіставлення результатів чітко показало, що використання тахеометра є більш трудомістким з точки зору часу, порівняно з RTK-методом.

Висновок

На сьогоднішній день тахеометри, GPS-технології та наземні лазерні сканери активно задіяні в багатьох галузях: геодезичні вишукування, інженерні обчислення, архітектура, дослідження надр та збереження культурних пам'яток.

Точність кінцевого результату безпосередньо залежить від специфіки поставленої задачі та вимог до неї.

Метою даного магістерського дослідження було проведення оцінки та зіставлення показників точності, прецизійності та часу виконання робіт з використанням трьох основних методів геодезичних вимірювань: тахеометрії, GPS та лазерного сканування.

Дослідження було спрямоване на порівняння результатів тахеометричних вимірювань з даними GPS RTK, що використовували референсну мережу, а також на зіставлення тахеометрії з лазерним скануванням фасаду будівлі.

Для реалізації цієї мети було передбачено три ключові етапи:

1. Побудова мережі з 14 контрольних точок за допомогою високоточного тахеометра (1 мм), що слугувала основою для порівняння.

2. Виконання GPS-вимірювань за технологією RTK на тій же мережі для подальшого аналізу та порівняння з результатами тахеометричних вимірювань.

3. Зіставлення координат, отриманих в результаті лазерного сканування фасаду будівлі, з координатами тих самих реперів, визначених за допомогою тахеометра.

На кожному з етапів реєстрували час виконання робіт, далі зіставляли результати: спочатку тахеометрію і GPS, потім тахеометрію і TLS.

Для контролю точності та достовірності вимірювань, отриманих RTK на мережі, а також TLS та TS на фасаді, процедуру повторили п'ять разів.

Підсумувавши дані, виявили: в першому випадку тахеометричні виміри зайняли на 82 хв більше часу, ніж RTK. В другому випадку різниця в часі була незначною: 38 хвилин для тахеометра проти 32 хвилин для лазерного сканера.

Щоб оцінити якість вимірювань, було визначено, що абсолютна різниця в координатах, отриманих різними методами, не має перевищувати встановлену межу.

Ця границя визначалася як результат перемноження сигма-відхилень та коефіцієнта k (2,776).

Відповідно до такої методології, понад 95% усіх отриманих результатів задовольняли вимоги до точності, тобто знаходились у визначеному довірчому інтервалі.

Разом з тим, ті значення, які виходили за межі вказаного інтервалу, розглядалися як потенційно хибні.

У фіналі лише один з показників вийшов за межі прийнятного діапазону, і його було вилучено з подальшого аналізу.

Таким чином, можна констатувати відсутність грубих помилок у процесі вимірювань, а отримані дані характеризуються високою точністю та надійністю.

Стандартне відхилення, отримане в результаті побудови мережі з використанням тахеометра, становило 1 мм як по горизонталі, так і по вертикалі.

Якщо порівнювати з тією ж мережею, виміряною з використанням RTK, середнє відхилення координат було в межах 8 мм (горизонталь) та до 1,5 см (вертикаль).

Це вказує на відмінну ступінь збіжності результатів після кількох вимірювань.

Середня квадратична похибка, характерна для RTK в опорній мережі, не перевищувала 9 мм по горизонталі, та сягала максимум 2,2 см по вертикалі.

Список використаної літератури

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. “Геодезія” (частина перша). Чернігів 2002р.
8. Chekole, Solomon Dargie. (2014). Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner: a comparative study School of Architecture and the Built Environment. 10.13140/RG.2.2.23262.92488.
9. Ахмед, Е.М. (2012). Аналіз ефективності методу RTK у міському середовищі, *Australian Surveyor*, 45:1, 47-54.
10. Анджело, Дж.Б. (2004), Інтеграція лазерного сканування та фотограмметрії близької відстані за останнє десятиліття та пізніше, Оттава, Канада.
11. Боргельт С. К., Харрісон Дж. Д., Харрісон, К. А. Суддут та С. Дж. Біррелл (1996). Оцінка GPS для застосування в точному землеробстві; *Appl. Eng. Agric.* 12(6) 633–638.
12. Кларк Р.Л. та Лі Р. (1998). Розробка топографічних карт для точного землеробства з кінематичним GPS; *Trans. ASAE*. Том 41(4) 909–916.

13. Csanyi, N. та Toth, C. (2007). Підвищення точності даних LiDAR з використанням специфічних для LiDAR наземних цілей. Університет штату Огайо, кафедра цивільного та екологічного будівництва та геодезичних наук, Колумбус, США.

14. Ehsani, M. R., Upadhyaya, S. K. та Mattson, M. L. (2004). Картування місцезнаходження насіння з використанням RTK GPS; Trans. ASAE. Том 47(3): 909-914.

15. El-Nakim, S.F. та Beraldin, J.A. (2003). Критичні фактори та конфігурації для практичного 3D-моделювання на основі зображень. У: 6-та конференція з 3D-методів вимірювання. Цюрих, Швейцарія. 22-25 вересня, том II, с. 159-167.

16. Фан, Х. (1997). Теорія помилок та коригування методом найменших квадратів, КТН, Стокгольм, Швеція.

17. Фазлей, Ф.С. (2003). Обробка зображень LIDAR створює корисні зображення, журнал ArcUser, Університет Міссісіпі.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи:

**«Порівняння точності застосування різних видів
знімання при виконанні геодезичних та
землевпорядних робіт»**

Обсяг пояснювальної записки: 64 аркушів.

24.12.25 рік

(дата)

(підпис студента)