

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Рубчак Софія
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Дослідження точності кінематичних GNSS-вимірювань у
міському середовищі »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

С. Рубчак, студентка групи ГЗ-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**

Рубчак Софія

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Дослідження точності кінематичних GNSS-вимірювань у міському середовищі »

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. Методи RTK GPS та RTK GPS-Galileo
2. Тестування методик RTK GPS та RTK GPS-Galileo
3. Узгодженість результатів RTK GPS та RTK GPS-Galileo

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методи RTK GPS та RTK GPS-Galileo		
2	Тестування методик RTK GPS та RTK GPS-Galileo		
3	Узгодженість результатів RTK GPS та RTK GPS-Galileo		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Бойко Ж.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Перович Л.***

Анотація

Метою бакалаврської роботи є визначення точності та надійності координатного позиціонування при використанні технології GNSS RTK за участі супутникових систем GPS та Galileo, з урахуванням впливу різних типів місцевості — від відкритих територій до зон із наявними природними перешкодами.

Актуальність теми

У сучасній геодезичній практиці висока точність визначення координат є ключовим фактором для успішного виконання топографічних, будівельних, кадастрових та моніторингових завдань.

Зростаюча кількість супутникових навігаційних систем створює нові можливості для підвищення точності та стабільності RTK-позиціонування, особливо в складних умовах — у зонах зі щільною рослинністю або урбанізованих районах.

Дослідження ефективності комбінованого використання систем GPS і Galileo є надзвичайно актуальним для подальшого вдосконалення геодезичних вимірювань.

Наукова новизна

Наукова новизна дослідження полягає у проведенні комплексного аналізу точності RTK-позиціонування на основі використання лише GPS та комбінованого підходу GPS + Galileo в умовах реальної місцевості з різними характеристиками.

У роботі також застосовано Autodesk Civil 3D для просторової візуалізації впливу природних перешкод на результати GNSS-спостережень, що дозволило отримати глибше розуміння просторової структури похибок.

Практична цінність

Практична цінність роботи полягає у формулюванні обґрунтованих рекомендацій щодо доцільності комбінованого використання супутникових систем GPS і Galileo у форматі RTK.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності геодезичних вимірювань у складних умовах, оптимізації польових робіт та вибору відповідної конфігурації обладнання залежно від середовища спостережень.

Запропоновані підходи можуть знайти застосування у сфері землевпорядкування, будівництва, інженерної геодезії та моніторингу деформацій.

Ключові слова: GPS, координати, точність, карти, Galileo, RTK

Abstract

The purpose of the bachelor's thesis is to determine the accuracy and reliability of coordinate positioning when using GNSS RTK technology with the participation of GPS and Galileo satellite systems, taking into account the influence of different types of terrain - from open areas to areas with existing natural obstacles.

Topic relevance

In modern geodetic practice, high accuracy of coordinate determination is a key factor for the successful performance of topographic, construction, cadastral and monitoring tasks.

The growing number of satellite navigation systems creates new opportunities for increasing the accuracy and stability of RTK positioning, especially in difficult conditions - in areas with dense vegetation or urbanized areas.

Research into the effectiveness of the combined use of GPS and Galileo systems is extremely relevant for the further improvement of geodetic measurements.

Scientific novelty

The scientific novelty of the study lies in conducting a comprehensive analysis of the accuracy of RTK positioning based on the use of only GPS and the combined approach of GPS + Galileo in real terrain conditions with different characteristics.

The work also used Autodesk Civil 3D for spatial visualization of the impact of natural obstacles on the results of GNSS observations, which allowed to obtain a deeper understanding of the spatial structure of errors.

Practical value

The practical value of the work lies in the formulation of substantiated recommendations on the feasibility of combined use of GPS and Galileo satellite systems in RTK format.

The results obtained can be used to improve the accuracy of geodetic measurements in difficult conditions, optimize field work and select the appropriate equipment configuration depending on the observation environment.

The proposed approaches can be used in the field of land management, construction, engineering geodesy and deformation monitoring.

Keywords: GPS, coordinates, accuracy, maps, Galileo, RTK

Зміст

Вступ

1 Методи RTK GPS та RTK GPS-Galileo

2 Тестування методик RTK GPS та RTK GPS-Galileo

2.1 Опис тесту

2.2 Результати тестування

2.2.1 Горизонтальна та вертикальна повторюваність RTK GPS

2.2.2 Горизонтальна та вертикальна повторюваність RTK GPS-Galileo

2.2.3 Порівняння вимірювань RTK GPS та GPS-Galileo

3 Узгодженість результатів RTK GPS та RTK GPS-Galileo

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Кінематичне позиціонування в реальному часі (RTK) — це передова технологія, яка дає змогу з надзвичайною точністю визначати просторове положення точок безпосередньо в процесі виконання вимірювань.

Як випливає з назви, RTK гарантує майже миттєве отримання координат у обраній системі координат, наприклад, УСК-2000, у той час, коли роверний (рухомий) приймач поступово фіксує необхідні точки на місцевості.

Принцип роботи RTK-технології ґрунтується на синхронному функціонуванні щонайменше двох GNSS-приймачів: один приймач, який виконує роль базової (референтної) станції, розміщується на точці з заздалегідь відомими координатами, а другий, роверний приймач, переміщується контрольними точками.

Базова станція відправляє "сирі" дані спостережень на ровер, де вбудований комп'ютер миттєво, в реальному часі, опрацьовує сигнали GPS та Galileo (при їх взаємодії) і з високою точністю обчислює координати.

Передача даних у режимі RTK найчастіше відбувається через радіозв'язок, що створює певні ліміти щодо максимальної відстані між базовою та рухомою станціями.

Як правило, стабільне з'єднання досягне на дистанціях до 10 кілометрів.

Польові випробування технології RTK показали, що точність визначення координат в реальному часі практично відповідає результатам постобробки кінематичних вимірювань (PPK).

Завдяки миттєвому отриманню координат точок із високою точністю, цей метод знаходить широке застосування на практиці — зокрема, під час розбивочних робіт на будмайданчиках, швидкого збору просторових

даних для топографічних зйомок, оновлення картографічної інформації та вирішення інших завдань.

Зважаючи на це, сучасні виробники GNSS-обладнання активно впроваджують підтримку декількох супутникових систем.

Зокрема, чимало сучасних приймачів підтримують одночасну роботу з GPS та Galileo.

Без сумніву, основною перевагою такого підходу є збільшення кількості супутників, доступних для використання, що позитивно відбивається на точності, швидкості визначення координат та надійності RTK-рішення.

Це неймовірно важливо в умовах обмеженого огляду неба – у лісах, глибоких кар'єрах, вузьких міських вулицях, каньйонах, де повноцінна робота з обмеженою кількістю супутників часто стає неможливою.

Основною задачею цього дослідження стало порівняння результатів визначення координат методом RTK з використанням лише GPS та у комбінації GPS-Galileo.

Було визначено мету дослідити точність позиціонування. Завдання полягало в перевірці, наскільки повторюваними є результати при різноманітних налаштуваннях супутників.

Оцінювався вплив локальних особливостей довкілля на кінцеву якість визначення координат.

Додатково було проведено тестування працездатності програмного забезпечення, застосовуваного у RTK-приймачах.

Випробування проводилися в умовах обмеженого прийому сигналу, де перешкодами виступали дерева та інші об'єкти, здатні впливати на якість отримання супутникових даних.

Для експериментів було обрано паркову зону з різними типами покриття. Це дозволило змодельовати реальні умови використання

обладнання, враховуючи складну геопросторову структуру навколишнього простору.

1 Методи RTK GPS та RTK GPS-Galileo

Кінематичне позиціювання в реальному часі (RTK) – це метод диференціальної GNSS, який базується на використанні заздалегідь відомих координат базової (референтної) станції для надзвичайно точного визначення координат точок за допомогою мобільного приймача, тобто ровера.

Цей метод передбачає застосування фазових вимірювань несучих частот сигналів від супутників, які обробляються практично миттєво, дозволяючи обчислювати координати з точністю до сантиметрів.

Досягнення такої високої точності можливе лише за умови успішної ініціалізації, коли забезпечено стійкий та безперебійний зв'язок із супутниками.

Вдала ініціалізація починається з вибору місця, котре задовольняє певні критерії.

Важливо, аби на обраному майданчику були відсутні перешкоди та об'єкти, що можуть спричинити небажаний багатопроменевий ефект (multipath).

Ініціалізація відбувається автоматично, якщо є коригуючі дані від базової станції та видно щонайменше чотири стабільні супутники.

Оптимальними вважаються умови, коли доступні п'ять і більше супутників, які функціонують у діапазонах L1/L2.[4]

Надійність RTK-позиціювання гарантується безперервним спостереженням за щонайменше чотирма супутниками впродовж усього циклу зйомки.

У разі втрати ініціалізації, її необхідно відновити перед продовженням польових робіт.

Варто наголосити, що якість геометрії розміщення супутників, які беруть участь у визначенні координат, впливає на точність позиціонування.

Цей вплив описується за допомогою коефіцієнта DOP (Dilution of Precision).

Більші значення цього коефіцієнта свідчать про невикладне розташування супутників у просторі та, відповідно, про меншу точність кінцевого результату.

Під час RTK-зйомки координати базової станції та дані супутникових вимірювань передаються на роверний приймач за допомогою каналу зв'язку.

Зазвичай для цього використовують радіомодем, стільникову мережу або інтернет.

Завдяки такій корекції ровер реагує миттєво, отже результати відразу відображаються на дисплеї польового контролера.

Новітні приймачі сумісні з кількома глобальними навігаційними системами, зокрема GPS та Galileo, що дає змогу збільшити кількість видимих супутників та гарантує вищу стабільність і надійність під час роботи.[4], [6]

Це надзвичайно важливо в зонах з частковим перекриттям небосхилу, наприклад, у міських вулицях, лісах або місцевостях зі складним рельєфом.

Потреби щодо каналу передавання коригувальної інформації в RTK-системах визначаються низкою технічних та експлуатаційних чинників.

Серед ключових аспектів слід виділити об'єм переданої інформації, котрий залежить від кількості задіяних супутників та виду застосованих вимірювань.

Суттєвими чинниками є також формат і структура повідомлень, стійкість та надійність з'єднання, особливості ландшафту та, безумовно, просторове положення між базовою (референтною) станцією й ровером.

В сучасній практиці задля передачі диференційних поправок активно застосовуються референтні станції, обладнані широкосмуговими каналами комунікації.

Такі системи гарантують надійне передавання інформації на відстанях від 1,5 кілометра до 30 кілометрів.

Це робить їх доречними як для локальних потреб, так і для GNSS-проектів регіонального значення.

Коли пряме з'єднання з базовою станцією неможливе, можна застосовувати стільниковий зв'язок.

Для цього використовуються модеми, сумісні зі стандартами мобільної передачі даних, такі як GPRS, 3G або LTE.[4]

Це відкриває можливості для RTK-зйомки навіть у важкодоступних місцевостях, якщо там є покриття мобільної мережі.

До початку двотисячних правок було прийнято пересилати через формат RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) SC-104, наприклад версій 2.1 та 2.2.

В переважній більшості випадків передавалися повідомлення типу 18 (необроблені фазові дані) та типу 19 (кодові дані), які використовувалися у звичній схемі диференціального оброблення даних.

Саме ці формати стали підґрунтям для взаємодії різних приладів від різних виробників, реалізуючи основи GNSS-навігації з надзвичайно високою точністю.

На сьогоднішній час, редакції стандарту RTCM новітніх версій (зокрема 3.x) зберігають свою значущість, оскільки забезпечують підвищену ефективність при передаванні даних, вдосконалене стиснення, більш широку підтримку різноманітних GNSS-систем (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou), а також здатність передавати відомості про характеристики сигналів та параметри іоносферних поправок.[4]

Отже, вибраний метод комунікації та формат даних значною мірою визначають якість, стабільність та точність обчислення координат у режимі RTK.

Окрім ключових повідомлень RTCM типів 18 та 19, в диференційному позиціонуванні також залучено інші типи, зокрема, повідомлення 20 та 21.

Ці повідомлення надають корекції для фазових та кодових вимірювань.

За своєю суттю, вони аналогічні до типів 1 та 9, які історично застосовувались в DGPS системах для трансляції кодових поправок.

У реалізації RTK, можна натрапити на одночастотні приймачі, що функціонують лише з сигналом L1, а також двочастотні, котрі отримують як L1, так і L2.[6]

Хоча одночастотні системи можуть бути прийнятними для зйомок на коротких дистанціях, в реальності саме двочастотні приймачі демонструють значну перевагу зі збільшенням відстані до базової станції.

Це пояснюється тим, що двочастотне спостереження забезпечує вищу надійність і швидкість розв'язання цілочисельних неоднозначностей фазових вимірювань, що є ключовим для досягнення сантиметрового рівня точності.

Для одночастотних систем розв'язання неоднозначностей часто стає складним і часто призводить до отримання так званого «плаваючого» рішення (float), яке, хоча й забезпечує дециметрову точність, є менш стабільним і надійним.

Натомість, двочастотні приймачі спроможні знаходити фіксовані рішення з похибкою в кілька сантиметрів.

Це особливо помітно на коротких та середніх базових лініях, чия протяжність досягає 15 кілометрів.[4]

Вагомий внесок у підвищення точності методу RTK вносить інтеграція супутників системи Galileo разом з GPS.

Завдяки такому інтегрованому підходу зростає кількість доступних супутників.

Це відчутно покращує геометрію супутникового сузір'я, зменшує значення DOP та пришвидшує процес ініціалізації.

У багатьох ситуаціях, системи RTK, котрі працюють на одній частоті та використовують одночасно GPS та Galileo, демонструють продуктивність, аналогічну двочастотній навігації GPS, якщо забезпечено достатню кількість видимих супутників Galileo.

Однак, зі збільшенням дистанції між базовою станцією та приймачем, двочастотні рішення виявляються більш доцільними, адже вони ефективніше компенсують вплив іоносфери.

У складних умовах, таких як міські території з висотними будівлями, лісові масиви або гірські ущелини, де кількість супутників обмежена через перешкоди для сигналу, застосування Galileo набуває вирішального значення.

В умовах, які відповідають дійсності, експерименти засвідчили, що кількість супутників, помічених в межах досліджуваної ділянки, часом спадала до чотирьох, що потенційно руйнувало стійкість і коректність визначення координат.

Використання додаткових сигналів Galileo дає користувачам переваги не тільки в точності одержаної інформації, але й у підвищеній стабільності роботи системи.[4]

Це стає особливо критичним у місцях, де відбувається часткове або повне перекриття сигналу від супутників.

Отже, об'єднане застосування GPS і Galileo у RTK-навігації дозволяє якнайкраще задіяти можливості глобальних навігаційних супутникових систем.

Вирішальним чинником високоточного визначення координат в режимі RTK із застосуванням комбінованих приймачів GPS–Galileo є стабільне та миттєве розв'язання фазових неоднозначностей.[5]

Якість та вірогідність визначення координат критично залежать від здатності приймача коректно розпізнавати цілочисельні значення неоднозначностей, особливо в умовах, коли прийом сигналів ускладнений або зв'язок з опорною станцією є нестійким.

Інтегроване використання супутникових систем GPS та Galileo забезпечує підвищену надійність та стабільність позиціонування.

Основні переваги подібних систем включають наступне:

- **Зростання кількості задіяних супутників.**

Якщо традиційні GPS-прилади здебільшого оперують 7-8 супутниками, то комбіновані GPS–Galileo можуть одночасно відстежувати до 10–11. Це суттєво оптимізує конфігурацію супутникового угруповання, зменшуючи величину DOP (помилка позиціонування) і, відповідно, підвищуючи точність координатних даних.

- **Прискорене розв'язання неоднозначностей "на льоту" (OTF).**

За рахунок збільшення обсягу спостережень і кращої геометрії, процес ініціалізації відбувається значно швидше, навіть за умов слабого або ускладненого сигналу.

- **Збільшена вірогідність визначення місця розташування.**

Застосування одночасно двох систем допомагає уникнути випадків, коли кількості супутників лише однієї системи стає замало для безперебійного обчислення координат, що є надзвичайно важливим у міських умовах, під густим лісом або на місцевостях зі складним рельєфом.

- **Покращена здатність виявляти хибні дані.**

Об'єднані приймачі мають кращу властивість визначати та відслідковувати спостереження з помилками, які виникають через багатопроменеве розповсюдження сигналу або вплив атмосфери.

- **Покращена якість спостережень.**

Завдяки збільшенню кількості сигналів, які надходять на різних частотах, та удосконаленій обробці, приймачі забезпечують більш точні вимірювання фаз та кодів.

- **Більш точне оцінювання тропосферних та іоносферних впливів.**

Використання додаткових частот Galileo дозволяє ефективніше моделювати атмосферні затримки, що сприяє зменшенню загальних похибок визначення положення.

- **Скорочення часу на зйомку.**

За умови високої точності вимірювань, час, необхідний для збирання статичних чи кінематичних даних, значно скорочується, що суттєво підвищує ефективність польових робіт.

До того ж, конструктивні особливості супутникового угруповання Galileo додають низку значних переваг.

Зокрема, більш крутий кут нахилу орбіт – $64,8^\circ$ проти 55° у GPS – покращує видимість супутників у північних широтах, що надзвичайно важливо для фахівців, задіяних у північних проєктах.

Система додатково відзначається підвищеним рівнем захисту від умисних чи випадкових перешкод, через застосування ширшого діапазону частот.

Необхідно наголосити, що, попри узгодженість між супутниками обох систем, шкали часу GPS та Galileo не є синхронізованими.

Це означає, що приймач мусить обчислити п'ять невідомих змінних замість чотирьох: широту, довготу, висоту, похибку годинника GPS та похибку годинника Galileo.[4]

Відтак, щоб отримати дані, йому потрібно одночасно "бачити" принаймні п'ять супутників.

У найближчому майбутньому планується запускити нові супутники Galileo, які будуть оснащені вдосконаленими функціями, зокрема: вищою точністю годинників, кращими сигналами передачі та розширеною сумісністю з іншими глобальними системами навігації.

Завдяки такому потенціалу, Galileo може перетворитися на одну з ключових GNSS-систем, пропонуючи точне визначення місцезнаходження, як незалежно, так і у взаємодії з GPS.

2 Тестування методик RTK GPS та RTK GPS-Galileo

Для визначення ефективності застосування RTK в різних умовах було проведено дослід, який дав змогу зіставити точність і стійкість отриманих даних про положення.

У ході роботи здійснювалося вимірювання координат визначених контрольних точок, використовуючи RTK в наступних модифікаціях:

- звичайний RTK GPS, що використовує тільки супутники системи GPS;
- комбінований RTK GPS–Galileo, який одночасно застосовує супутники двох систем.

Кожну позицію реєстрували по декілька разів у різних, незалежних сесіях RTK.

Координати, одержані за допомогою RTK GPS, були порівняні з координатами, що були визначені за допомогою RTK GPS-Galileo.

Останні в цьому дослідженні використовувалися як еталонні, враховуючи їхню більшу точність та надійність, що притаманні комбінованим приймачам.[4]

В аналітичному процесі було оцінено наступні параметри:

- середньоквадратична похибка координат (RMSE),
- максимальні відхилення в розташуванні точок,
- стабільність повторних вимірювань (відмінності між сеансами),
- час, необхідний для фіксації вирішення неоднозначностей.

Результати проведеного дослідження дозволили виділити переваги використання комплексного підходу у випадках з нестандартними умовами моніторингу та обґрунтувати доцільність інтеграції технології RTK GPS–Galileo в практику високоточного визначення координат.

2.1 Опис тесту

Дослідження відбувалося в парку імені Тараса Шевченка, розташованому в Івано-Франківську.

Вибір місця проведення експериментів зумовлений повною відповідністю території всім умовам, що вимагалися (див. Рис. 1).

Парк характеризується різноманітним ландшафтом, що дозволяє випробовувати методи позиціонування за різних умов: від відкритих ділянок до лісових масивів та тінистих зон.

Це дає змогу створити максимально наближені до реальності умови для оцінки ефективності систем GPS та Galileo.[4]



Рисунок 1 Зона проекту та опорні точки

Для реалізації дослідження були застосовані два методи збору даних:

- 1. Метод з використанням польового устаткування Topcon HiPer Pro RTK та базової станції.**

Цей метод забезпечує високу точність визначення координат, що досягається завдяки двочастотному приймачу та радіомодему з потужністю 1 Вт.

Це дозволяє охопити зону до 6 км та підтримує європейські частоти. Технічні характеристики приладу становлять 10 мм + 1,0 ppm для горизонтального положення та 15 мм + 1,0 ppm для вертикального (URL1).

Водночас, за умов інтенсивного багатопроменевого ефекту або високих значень PDOP (розрідження точності положення), можливе погіршення точності.

Також негативно впливає висока іоносферна активність.

З огляду на це, під час проведення вимірювань у місцях з надмірним багатопроменевим відображенням або під щільною лісовою масою, радимо додатково перевіряти отримані дані.

2. Метод з використанням GPS-приймачів Ashtech Promark 220.

Ці приймачі, обладнані двочастотною системою, підтримують роботу з 12 каналами.

Це забезпечує високу точність визначення положення, дозволяючи отримувати надійні дані навіть при складних погодних умовах чи інших перешкодах.

У межах даного дослідження було обрано три контрольні точки (Точка 1, Точка 2 і Точка 3), на яких проводились статичні GPS-спостереження з метою визначення їх координат.[4]

Вимірювання тривали не менше ніж 4 години, з мінімальним кутом відсікання висоти в 10 градусів та частотою запису даних кожні 10 секунд.

Для виконання цієї задачі використовували GPS-приймачі Ashtech Promark 220, а подальша обробка здобутих даних та коригування мережі виконувались за допомогою програмного забезпечення Ashtech Solution.[4]

Під час корегування інформації координати Точки 1 та Точки 2 залишалися незмінними, що було визначальним фактором для забезпечення високої точності корегування мережі (детальніше див. у Таблиці 1).

Таблиця 1 Координати та відповідні стандартні відхилення для трьох опорних точок, подані у системі координат УСК2000.

Номер точок	Y(м)	Відхилення (мм)	X(м)	Відхилення (мм)	H(м)	Відхилення (мм)
Точка 1	310134.321	1	3520786.123	1	3.567	1
Точка 2	310175.987	1	3520754.765	1	3.432	1
Точка 3	310265.872	1	3520543.324	1	2.987	2

*через воєнний стан координати в роботі змінені

Завданням даного дослідження було визначення координат, отриманих з застосуванням технологій RTK GPS та GPS-Galileo, а також аналіз стійкості отриманих результатів при різних конфігураціях супутникових систем, спираючись на три окремі опорні пункти.

Точність і повторюваність були оцінені шляхом зіставлення координат, визначених для набору з 292 точок, зібраних в процесі RTK-зйомки.

Для опрацювання даних було застосовано програмні комплекси Ashtech Fast Survey RTK Software та Topcon TopSurvey RTK Software, що забезпечило ефективне виконання зйомки для геодезичних потреб в різноманітних умовах, беручи до уваги можливі ускладнення, викликані перешкодами для сигналів.

Швидкість фіксації й обробки даних визначено як 1 секунда, з кутом маскування місцеположення 10 градусів.

Оцінювання повторюваності RTK-зйомки було виконано за допомогою двох незалежних випробувань, що включали в себе усі тестові точки.

Ці випробування відбувалися у різні дні й в різний час, що спричинило значні зміни в конфігурації супутників та сприяло зростанню незалежності здобутих результатів.

Оцінка точності й повторюваності RTK-зйомки виконувалась шляхом зіставлення координат певної групи точок.

Як було згадано, для узгодження роботи групи з 292 точок, які були позначені на місцевості, були використані два різних методи зйомки.[6]

Розподіл точок, які були піддані тестуванню, представлений на Рис. 2.

Найбільша відстань між точками становила приблизно 400 метрів, а найменша – приблизно 50 метрів.



Рисунок 2 Розподіл тестових точок у зоні проекту.

2.2 Результати тестування

Оцінювання повторюваності методів RTK GPS та GPS-Galileo проводили за допомогою трьох окремих RTK-зйомок, де кожна з них використовувала іншу опорну точку.

Кожного разу обробляли усі тестові точки.

Це дозволило порівняти результати та проконтролювати стабільність процесу зйомки за різних умов.

Приймачі, що одночасно отримують сигнали від GPS та Galileo, значно зменшують час, необхідний для RTK-зйомки.

Це стає реальністю через зростаючу кількість космічних апаратів, котрі ми можемо спостерігати, що сприятливо впливає на геометрію вимірювань.

Спільна робота GPS та Galileo гарантує точність вимірювань до сантиметрів, а також скорочує час, потрібний для отримання цих результатів.

Велика кількість супутників сприяє якнайшвидшому та якнайточнішому визначенню координат.[4]

2.2.1 Горизонтальна та вертикальна повторюваність RTK GPS

Дослідження з оцінювання точності RTK GPS проводилися впродовж кількох днів, з часовими розрізами у різний період доби.

Це дозволило врахувати різноманітні умови вимірювань: для пункту 1 — 25 вересня 2021 року, з 15:00 до 17:30; для пункту 2 — 26 вересня 2021 року, з 12:00 до 14:40; а для пункту 3 — 27 вересня 2021 року, з 08:00 до 11:00.

Різне розташування супутників під час кожної перевірки гарантувало незалежність здобутих даних.

Опорні станції, за допомогою яких визначались координати пунктів 1 та 2, були розміщені на досліджуваній ділянці, тоді як точка 3 знаходилась на відстані близько 0,5 км від основного полігону (див. Рис. 1 для подробиць).

Кількість видимих супутників коливалася від 6 до 8 в областях з відкритим горизонтом, а середні значення PDOP знаходилися в діапазоні від 1,5 до 2,8 протягом усіх трьох днів вимірювань.

Усього було зібрано 876 точкових спостережень, що стосувалися 292 контрольних точок.

На етапі аналізу виконано обчислення відмінностей координат між точками, отриманими згідно з інформацією пунктів 1, 2 та 3.

Розрахунок відмінностей координат здійснено для пар: точка 1 — точка 2, точка 1 — точка 3 і точка 2 — точка 3.

Отримані результати, у тому числі середні показники та величини стандартного відхилення для кожної з 292 точок, наведено на Рисунку 3.[4]

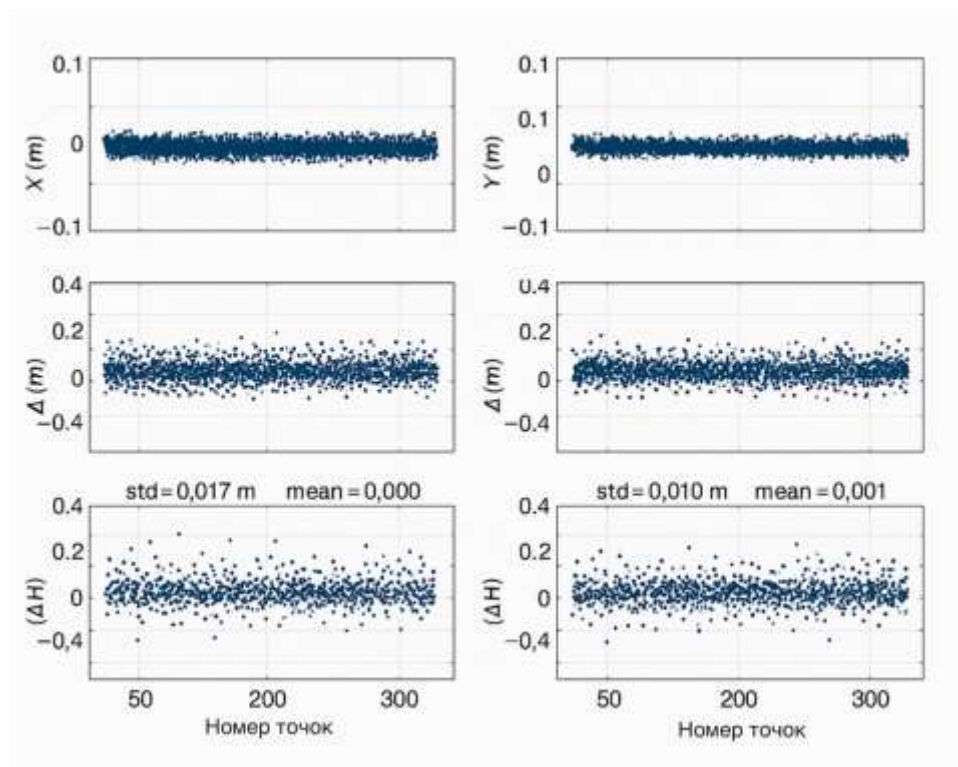


Рисунок 3: Використання RTK GPS для зіставлення координат контрольних пунктів, спираючись на опорні точки точка 1, 2 та 3.

Аналіз зібраних даних з трьох експериментів RTK GPS виявив, що горизонтальні координатні розбіжності варіюються від кількох міліметрів до 3 сантиметрів.

Водночас, різниця у висотних координатах зафіксована в межах від кількох сантиметрів до приблизно 10 сантиметрів.

На досліджуваній території дев'ять контрольних точок (119, 135, 136, 137, 246, 247, 252, 253 та 254) показали незадовільну видимість супутників.

Причиною цього було розташування у густому лісовому масиві, що перешкоджало стабільній роботі RTK GPS.[4]

Згаданий негативний фактор знижував точність визначення координат, оскільки крони дерев систематично блокували проходження сигналів від супутників, особливо тих, які знаходилися на невеликих та середніх кутах на горизонті.

До того ж, дерева та чагарники суттєво закривали огляд небосхилу над пунктами, де велися спостереження.

Попри ці труднощі, система все ж могла знаходити розташування супутників, навіть коли сигнал був заблокований.

Відкриті місцевості дозволяли фіксувати від п'яти до шести супутників за добу, з показниками PDOP від 3,4 до 4,8 під час трьох тестових періодів.

Через ці обмеження, вимірювання на дев'яти точках вимагали набагато більше часу, ніж на інших.

Часовий проміжок, виділений для з'ясування спірних питань на кожній з них, становив від 90 хвилин до двох годин.

Разом з тим, різниця в горизонтальному розташуванні цих пунктів перевищувала 1-2 сантиметри впродовж триденного циклу вимірювань.[6]

Найбільш суттєва розбіжність в координатах була зафіксована в результатах першого дня досліджень, де в якості базової точки використовувалась точка 3.

Частково це можна пояснити ранковим часом проведення вимірювань, коли розташування супутників було менш оптимальним.

Це негативно позначилось на точності вимірювань для дев'яти точок, що знаходились в зоні обмеженої видимості.

Для максимально точного застосування RTK-методики при геодезичних вимірюваннях, ключовим є досягнення високої точності у горизонтальних координатах (1-2 см).

Кожна з 292 точок, задіяних у дослідженні, відіграє важливу роль для вирішення поставлених технічних завдань, що часто вимагають значної точності висот (H).[4]

Після аналізу результатів вимірювань, зібраних протягом першого, другого та третього днів, виявлено, що для дев'яти точок розбіжність у показниках вертикальних координат досягла близько 10 см.

Щодо інших точок, різниця у висотах не перевищувала кількох сантиметрів.

Вимірювання, проведені у третій день, показали найбільші відхилення у координатах порівняно з результатами, отриманими в перші два дні.

2.2.2 Горизонтальна та вертикальна повторюваність RTK GPS-Galileo

Торсон Hiper Pro RTK дає змогу здійснювати збір даних GNSS-спостережень, використовуючи сигнали різних навігаційних супутникових систем, зокрема GPS і Galileo.

Galileo – європейська супутникова навігаційна система, яка має менше супутників, ніж GPS, але всі супутники Galileo працюють на різних частотах, що підвищує надійність сигналу.

Завдяки використанню кількох частот, на відміну від лише двох частот, які застосовуються в GPS, фіксація RTK може відбуватися значно швидше, а після фіксації точність стає більш стабільною та надійною.

У звичних системах для уточнення координат застосовувалась друга частота GPS (L2).[4], [6]

Однак, вона була військовим зашифрованим сигналом, тож її надійність для точного визначення місця була під сумнівом.

Це ставало особливо відчутно, якщо на шляху сигналу з'являлися перепони: дерева, будівлі, металеві конструкції та мости.

На відміну від цього, сигнал Galileo демонстрував більшу стійкість до таких перешкод.

Його супутники повністю відстежувалися, гарантуючи стабільну роботу системи навіть за складних умов.

RTK-системи, що використовують тільки GPS, найкраще працюють на відкритих місцевостях.

Адже вони не найкращим чином адаптовані до перешкод, які створюють дерева та інші об'єкти.

Натомість, система GPS-Galileo RTK демонструє значно кращі результати за таких умов, оскільки вона швидко відновлює зв'язок із супутниками після будь-яких перебоїв.

Якщо використовуються обидві системи - GPS та Galileo, приймач використовує додатковий супутник для вирішення неоднозначностей, беручи до уваги різні опорні відліки часу, що застосовуються кожною системою (час Galileo).[4]

Таким чином, сумісна система GPS-Galileo RTK виявляється надзвичайно ефективною для усунення проблем, спричинених

перешкодами, та забезпечує більш стабільне і швидке позиціонування в аналогічних умовах.

В межах нашого дослідницького проєкту щодо RTK GPS-Galileo, вимірювання було проведено в різний час та дні: пункт 1 (28 вересня 2021 року, від 9:00 до 11:00 за місцевим часом), пункт 2 (29 вересня 2021 року, від 12:00 до 14:05), і пункт 3 (30 вересня 2021 року, від 14:30 до 16:50), з варіюванням конфігурації космічних апаратів, що мало гарантувати незалежність отриманої інформації.

На відкритій території зафіксовано видимість супутників у межах 8-11, а середні значення PDOP коливалися від 1,2 до 2,4.

Протягом трьох днів було зібрано 876 спостережень для 292 контрольних пунктів.[4]

Під час аналізу виконано розрахунок розбіжностей між координатами 292 тестових пунктів, отриманих на основі даних з пунктів 1, 2 та 3.

Це стосується відмінностей, що виникають між точкою 1 та точкою 2, між точкою 1 та точкою 3, а також між точкою 2 та точкою 3.

На рисунку 4 представлені відмінності, їхні середні значення та стандартні відхилення для 292 точок.

Аналіз даних трьох тестів RTK показує, що розбіжності горизонтальних координат коливаються від декількох міліметрів до 1 сантиметра.[5]

Відхилення координат висоти знаходилися в діапазоні від кількох міліметрів до приблизно 1-2 сантиметрів (див. рисунок 4).[4]

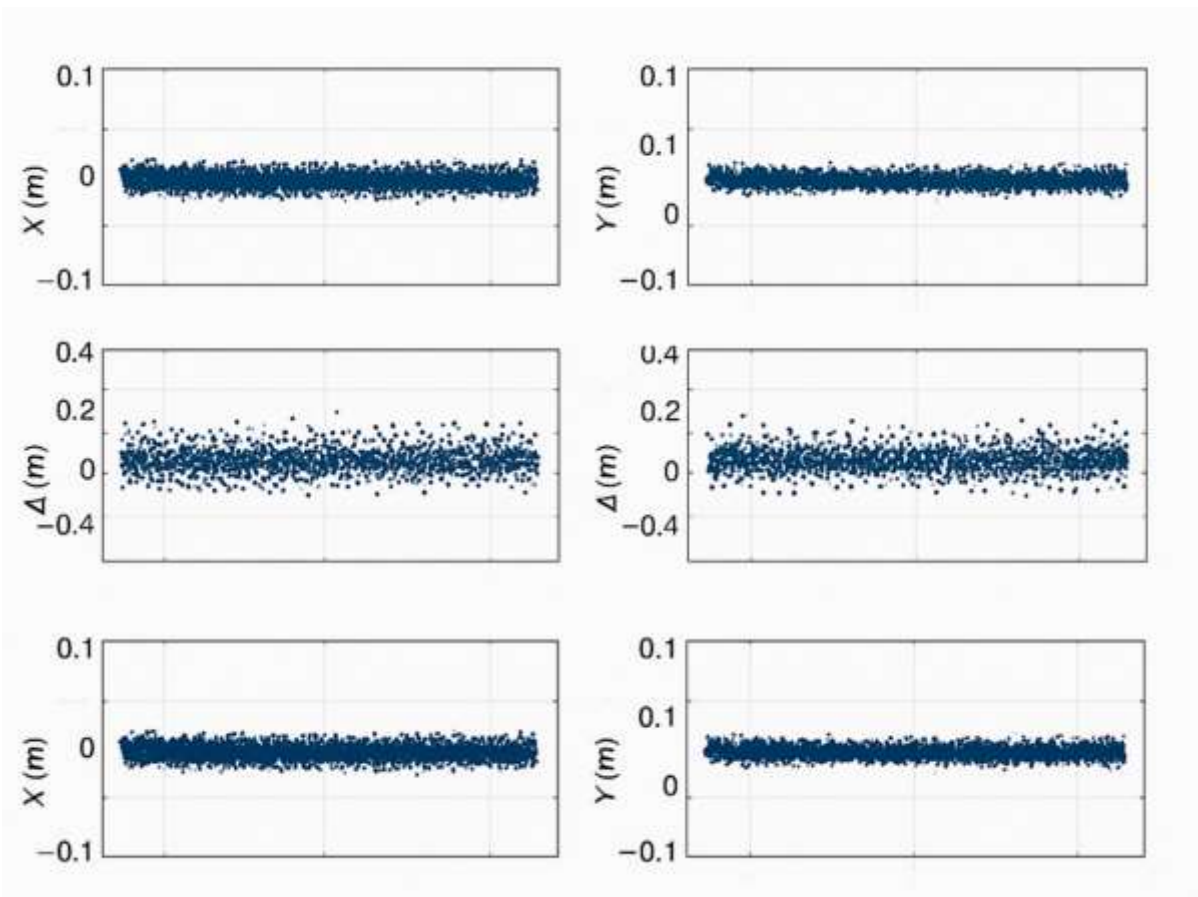


Рисунок 4: Порівняння координат тестових точок, використовуючи точки 1, 2 та 3 як базові, за допомогою RTK GPS-Galileo.

Як уже згадувалося, дев'ять пунктів в межах досліджуваної території зазнавали обмеження у видимості супутників GPS, що було зумовлено густотою дерев, показаних на рисунку 2.

Однак результати, здобуті з використанням RTK GPS/Galileo для цих пунктів, не продемонстрували значного погіршення якості через вплив крон дерев.

Протягом трьох днів спостережень виявлено, що ці пункти мали доступ до семи-восьми супутників (GPS-Galileo), а значення PDOP коливалися в межах від 2,8 до 3,6 впродовж усіх трьох тестів.[4]

Завдяки цьому, час, витрачений на заміри дев'яти точок, виявився відносно невеликим, займаючи всього 30-40 хвилин для усунення невизначеностей.

Аналіз результатів вимірювань, проведених протягом першого, другого та третього днів, виявив суттєвіші відмінності (близько 2-3 см) у вертикальних координатах зазначених дев'яти точок, тоді як для решти точок різниця у висотах була в межах кількох сантиметрів.

Усі 292 точки, використані для вимірювань, є критичними і для технічних потреб, що часто вимагають високої точності ортометричних висот (H).

Відхилення вертикальних координат для зазначених точок у рамках проекту коливалися в межах орієнтовно $\pm 1-3$ см за триденний період.

2.2.3 Порівняння вимірювань RTK GPS та GPS-Galileo

У цьому дослідженні ми здійснили порівняльний аналіз результатів вимірювань, одержаних від систем Topcon, що використовують GPS-Galileo, та Ashtech, яка функціонує виключно з GPS, з метою визначення точності та повторюваності RTK-зйомки.

В процесі вимірювань враховувалися різноманітні особливості місцевості, а також різні варіанти розташування супутників.

На рисунку 5 показано розбіжності координат, їх середні значення та стандартні відхилення для загалом 292 тестових точок, виміряних з використанням трьох опорних пунктів у різні дні та різний час доби.[4]

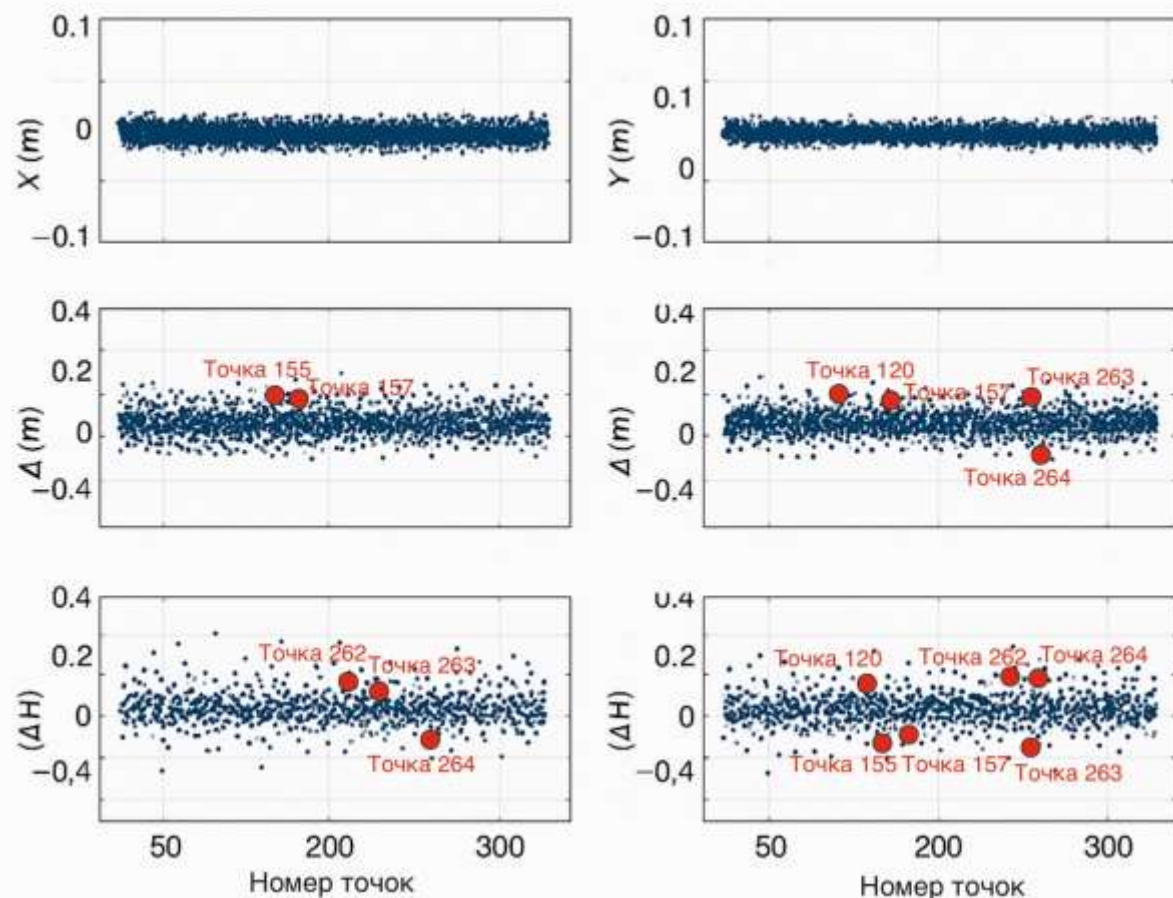


Рисунок 5: Порівняння координат точок тестування, використовуючи точки 1, 2 і 3 як базові, застосовуючи RTK GPS і RTK GPS-Galileo.

Результати експериментів продемонстрували, що застосування системи GPS-Galileo (Topcon) забезпечує вищу точність вимірювань та скорочує часовий проміжок, потрібний для стабільного визначення координат, якщо порівнювати з традиційним використанням виключно GPS (Ashtech).

Цей ефект особливо відчутний в умовах обмеженої видимості космічних апаратів, де система GPS-Galileo проявляє підвищену стійкість до різного роду перешкод та оперативніше відновлює з'єднання із супутниками після виникнення перерв.

Для отримання детальніших даних, було проведено велику кількість вимірювань за різних обставин.

Це дало можливість оцінити не тільки рівень точності визначення координат, але й стійкість та вірогідність отримання сигналу при зміні зовнішніх факторів.

Аналіз стандартних відхилень свідчить, що система GPS-Galileo демонструє менші коливання в показниках вимірювань.

Завдяки цьому, вона виявляється більш продуктивною у геодезичних роботах, особливо коли йдеться про важкі умови.[5]

Отримані результати можуть виявитися цінними для оптимізації процесів геодезичної зйомки, де гранична точність є ключовим аспектом.

Також вони можуть сприяти подальшим дослідженням та удосконаленню методів RTK-позиціювання із застосуванням сукупних супутникових систем.

Результати аналізу дев'яти точок, зображених на рисунку 5, свідчать про таке: застосування RTK GPS показувало гірші результати в місцях, де були дерева.

Дерева часто блокували сигнали від супутників низьких та середніх частот, що призводило до зниження точності вимірювань.

Розбіжності в горизонтальних та вертикальних координатах цих точок для RTK GPS (впродовж першого, другого та третього днів) були значнішими, ніж аналогічні відмінності для RTK GPS-Galileo.[4]

Останні продемонстрували більш стабільні показники, що обґрунтовується використанням додаткових супутників Galileo, які збільшували стійкість до перешкод.

Різниця в точності вимірювань між RTK GPS та GPS-Galileo наголошує на необхідності комплексного використання супутникових систем.

Такий підхід дає змогу досягти кращої точності в умовах, коли проведення вимірювань ускладнено.

Це додатково підтверджує, що коректність результатів RTK-вимірювань напряду залежить від якості обстеження супутників, забезпечуючи надійніші дані в умовах підвищеної складності.

Середні типові похибки для кожної з трьох перевірок в орієнтаціях: схід (Y), північ (X) та ортометрична висота (H) показано на рисунку 4.

В більшості точок вимірювання отримані результати демонструють високу точність, зі стандартними відхиленнями, що не перевищують 1 см в горизонтальних осях, що розцінюється як дуже позитивний результат для задач геодезії.

Як і передбачалося, точність ортометричних висот була трохи меншою, з середньоквадратичним відхиленням у 2 см.[4]

Втім, для геодезичних потреб, включаючи проєктні розробки та створення карт, це значення вважається повністю задовільним для досягнення високої точності.

Компонент висоти в системі RTK GPS виявив менш стабільні результати, з коливаннями до 10 см в одній і тій самій точці між різними випробуваннями, що були проведені з використанням референціальних пунктів 1, 2 та 3.

Це, вірогідно, частково пояснюється специфікою супутникових систем та змінами ракурсів розташування супутників щодо дерев, що могло впливати на точність визначення.

Втім, загалом, RTK GPS залишається надійною системою, що традиційно забезпечує високу точність, до сантиметрів, за сприятливих умов, якщо не брати до уваги ситуації з перешкодами, наприклад, поблизу дерев.

У порівнянні з даними RTK GPS, випробування GPS-Galileo продемонструвало вищу стабільність, зокрема, у отриманні послідовних результатів для горизонтальних координат, навіть поблизу лісових масивів.

Відхили координат точок поблизу дерев були в межах кількох міліметрів - 1 см, що вказує на більшу стабільність комбінації GPS-Galileo за таких умов.

Це чітко проілюстровано на графіку 4, де показано середні відхилення для усіх досліджених точок.[4]

Щодо висотних координат, висотна складова у системі GPS-Galileo також засвідчила меншу надійність, якщо порівнювати з горизонтальними координатами, із розбіжностями до 3 см в однакових точках при різних вимірюваннях.

Стосовно інших точок, різниця у висотах була несуттєвою - від кількох міліметрів до сантиметра.

Для оцінки точності RTK в цьому дослідженні використано аерознімок високої роздільної здатності (30 см), цифрову модель місцевості (ЦММ) у 3D форматі (5 м) та результати вимірювань RTK, оброблені в Autodesk Civil 3D (Рисунок 6).[4]

Такий підхід дав змогу всебічно оцінити точність і забезпечити більшу надійність отриманих результатів вимірювань.

Аерофотознімок, що був застосований під час дослідження, чудово узгоджувався з картою, створеною на основі вимірювань RTK.

Це підкреслює високу точність системи RTK, зокрема, у середовищах, де використовувалися методи GPS-Galileo.

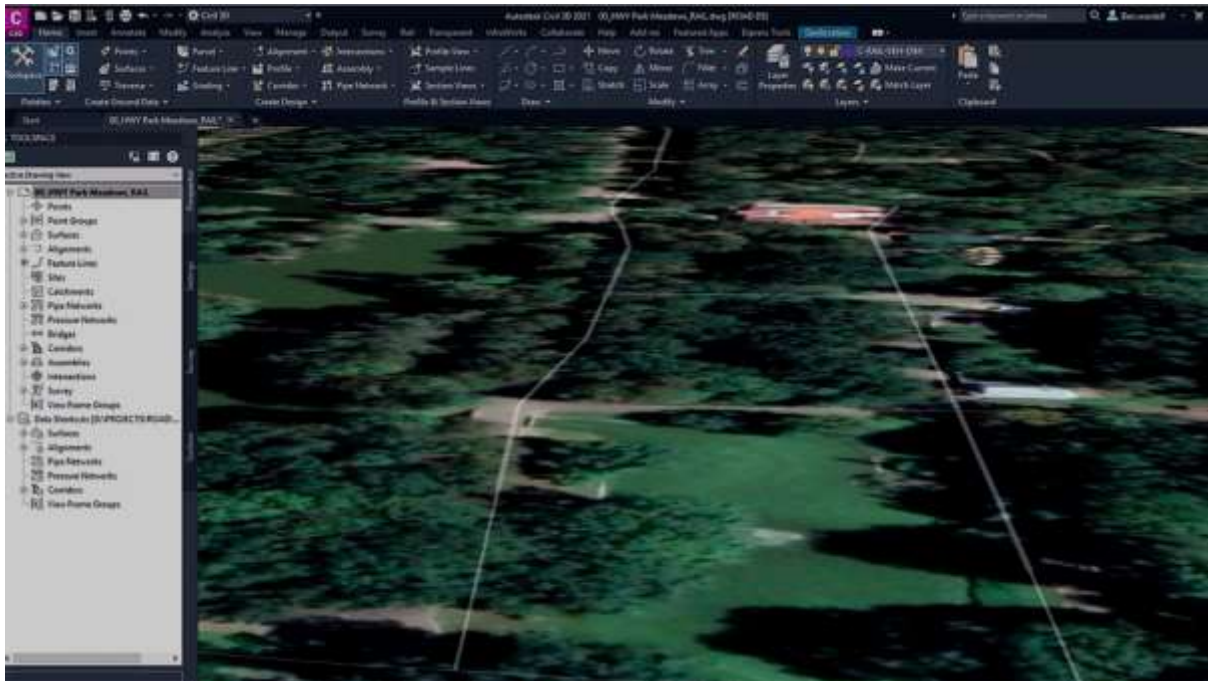


Рисунок 6: Об'єднання аерофотознімків та вимірювань RTK GPS-Galileo

Тривимірна цифрова модель місцевості додатково поліпшила візуальне представлення даних, забезпечуючи користувачів чітким розумінням ландшафту та характерних рис зони вимірювань.

Зазначена модель зокрема акцентує ті зони, де точність вимірювань знижувалася через перешкоджання від дерев, що блокували супутникові сигнали.

Для отримання максимальної точності, вимірювання слід виконувати на відкритих ділянках, подалі від великих дерев, оскільки вони суттєво спотворюють результати.

Представлені дослідження наочно підкреслюють переваги використання системи RTK GPS-Galileo, зокрема, її ефективність в умовах з обмеженою видимістю супутників, як наприклад, у густозасаджених лісах або забудованих територіях.

Методи RTK GPS-Galileo продемонстрували свою практичність, багатофункціональність та здатність забезпечувати високу горизонтальну точність (до сантиметрів) навіть в умовах з численними перешкодами.

Це є вкрай важливим для тих ситуацій, коли необхідна точність на рівні кількох сантиметрів, і система GPS-Galileo показала дивовижну ефективність у таких умовах.

Аналізуючи отримані результати, стає зрозуміло, що метод RTK GPS-Galileo має потенціал замінити усталені методи у геодезичних дослідженнях, особливо коли потрібна висока точність, а також у місцевостях з інтенсивними перешкодами.

Представлене дослідження доводить, що RTK GPS-Galileo є потужним інструментом для геодезії, де потрібні висока точність та стабільність, незважаючи на складні умови.

3 Узгодженість результатів RTK GPS та RTK GPS-Galileo

Для визначення відповідності між RTK GPS та RTK GPS-Galileo було обчислено тривимірні (3D) вектори розбіжностей.

Це дозволило встановити розбіжності у визначенні координат цими двома методами.

Процес обчислення відбувався так:

1. Визначення розташування:

Кожну контрольну точку було точно визначено у двох системах: GPS та GPS-Galileo.

Зазначено як горизонтальні координати (X, Y), так і висоту (H).

2. Підрахунок різниці координат:

Для кожної точки обчислено розбіжності між значеннями, отриманими за допомогою GPS та GPS-Galileo.

Цей аналіз дає змогу оцінити ступінь відмінності результатів, отриманих з використанням обох методів.

$$\Delta X = X_{GPS} - X_{GPS-Galileo}$$

$$\Delta Y = Y_{GPS} - Y_{GPS-Galileo}$$

$$\Delta H = H_{GPS} - H_{GPS-Galileo}$$

3. Обчислення вектору розбіжності в 3D:

Для кожної точки було визначено тривимірний вектор розбіжності, який включає в себе всі три виміри (X, Y, Z).

Це дозволяє наочно показати сукупну різницю між результатами, отриманими двома різними методами, у тривимірному просторі.

$$D_{3D} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta H^2}$$

4. Аналіз здобутків:

Обчислені вектори розбіжностей були досліджені окремо для кожної тестової точки.

Для проведення детальнішої оцінки було обчислено середні значення та стандартні відхилення для векторів тривимірних розбіжностей, враховуючи всі проаналізовані точки.

Цей підхід дозволяє здійснити детальне оцінювання надійності та відповідності двох RTK систем (GPS та GPS-Galileo), а також зіставити їхню ефективність за різноманітних обставин.

Ортометричні висоти було розраховано з точністю ± 12 см, використовуючи модель референц-еліпсоїда Красовського.

Бралися до уваги еліпсоїдальні висоти, визначені шляхом обробки інформації GNSS-спостережень.[4]

Це допомогло здобути більш коректні показники висот для кожної тестової точки.

Адже еліпсоїдальні висоти беруть до уваги геометричні особливості Землі, в той час як ортометричні відображають реальну висоту над рівнем моря.

На рисунку 7 візуалізовано тривимірні вектори невідповідності для двох тестових випробувань, здійснених з використанням методів RTK GPS та GPS-Galileo.

Ці вектори ілюструють різницю між одержаними результатами для кожної точки тестування, включаючи всі три координати (X, Y, Z).

Вектори розбіжностей дозволяють наочно оцінити точність кожного з методів та виявити наявність значних відхилень, які можуть бути спричинені умовами виконання вимірювань (наприклад, перешкоди, такі як дерева або будівлі).[4]

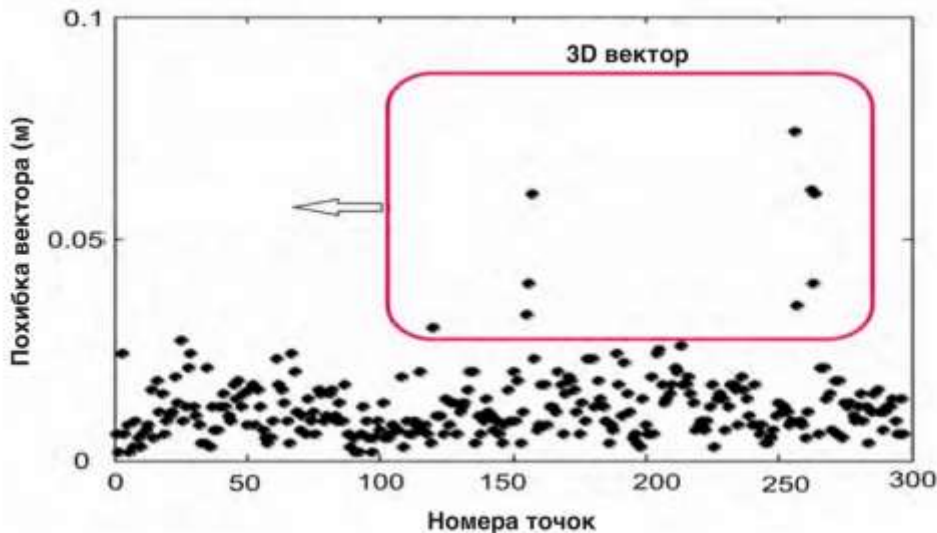


Рисунок 7: Тривимірні вектори, що розкривають інформацію, для кожної з 292 точок в межах проектної зони.

Координати площини загалом відповідали середньому стандартному відхиленню менше 1 см, що свідчить про високу точність вимірювань.

3D-відмінності між даними з RTK GNSS та RTK GPS вимірювань коливаються в діапазоні від 2 мм до 80 мм.

У середньому невідповідність становить 12 мм, а стандартне відхилення – 9 мм.[4]

Це вказує на те, що, використовуючи різні методи геодезичних вимірювань, точність переважно зберігається на прийнятному рівні для широкого спектру практичних задач.

Хоча, певні розбіжності, спричинені специфічними умовами, можуть бути наявні.

Крім того, експерименти продемонстрували значний негативний вплив крон дерев на процес позиціонування за допомогою RTK GPS, що виражається в перешкоджанні прийому сигналів з супутників.

Це означає, що навіть коли супутники GNSS добре видимі, перешкоди з блокуванням сигналів, що їх створюють дерева, лишаються

основною проблемою, яка впливає на точність GPS у лісових масивах або місцевостях з багатою рослинністю.

Проте, з додаванням до системи супутників Galileo ситуація значно покращується: PDOP зменшується, що позитивно впливає на відновлення точності визначення координат.

Покращення точності можливо пояснити збільшенням загальної кількості видимих супутників.

У разі застосування комбінованої системи GPS-Galileo, зазвичай наявна змога вловити необхідну кількість супутників у зоні видимості, що дозволяє здійснювати високоточні вимірювання, навіть якщо GPS окремо може не давати позитивного результату.

Ці переваги стали реальністю завдяки GPS-Galileo приймачам, що працюють на частотах L1-L2, що суттєво покращує практичне використання у геодезії, особливо в умовах обмеженої видимості.

Висновки

Полеві дослідження, проведені безпосередньо в робочих умовах, дають однозначне підтвердження: інтеграція супутників Galileo в систему RTK значно покращує як точність, так і доступність даних, необхідних для геодезичних вимірювань.

На відкритих просторах, де відсутні перешкоди, сукупність GPS-Galileo забезпечує дивовижну горизонтальну точність, що може досягати 1 см. Відповідно до результатів здійснених випробувань, це на 3 см краще, ніж точність, здобута при використанні лише двочастотної системи GPS.

Наші твердження корелюють з результатами численних досліджень інших науковців, котрі теж вдавалися до аналогічних експериментів, демонструючи подібні покращення в точності при одночасному використанні GPS-Galileo, в порівнянні з системами, що опираються виключно на GPS.

Найбільші проблеми для RTK GPS спостерігалися в зонах обмеженої видимості супутників, наприклад, у місцевостях з щільною рослинністю, де блокування сигналу ускладнювало або робило неможливим вирішення неоднозначностей під час визначення координат.

У порівнянні зі стандартними методами, використання GPS спільно з Galileo демонструє значущу перевагу під час виконання вимірювань в умовах обмеженого огляду неба – гілки дерев, будівлі чи інші об'єкти.

Сучасні приймачі, здатні працювати з GPS та Galileo, можуть стабільно підтримувати RTK-розв'язки навіть тоді, коли GPS окремо не здатна надійного визначення координат.

Це призводить до швидшого вирішення невизначеностей та досягнення точних результатів вимірювань.

Galileo, як глобальний навігаційний супутниковий продукт, на сьогоднішній день підтвердив свою репутацію, забезпечуючи відмінну функціональність з мінімальною кількістю недоліків, де його використання було б недоречним.

Серед ключових плюсів сучасної комбінації GPS-Galileo виділяється розширена космічна інфраструктура: високоякісні сигнали та поліпшена геометрія супутників, що сприяють помітному зниженню показника погіршення точності визначення координат (PDOP) і, як наслідок, дають змогу впроваджувати додаткові перевірки для гарантування надійності даних.

Ще одним вагомим плюсом є поліпшення здатності розрізняти цілочисельні неоднозначності, що з'являються під час відстеження фази несучої хвилі, коли приймач намагається встановити кількість цілих циклів між прийнятою хвилею та тією, що згенерована на місці.

Це значно підвищує точність вимірювань у критичних умовах, де звичайний GPS, без Galileo, не зміг би надати потрібну точність.

Застосування RTK GPS-Galileo в геодезичних роботах також відчутно перевершує традиційні методи, гарантуючи швидке виконання, високу точність та можливість функціонування незалежно від обставин – як в світлий, так і в темний час доби, за будь-якої погоди.

Це робить RTK GPS-Galileo оптимальним рішенням для широкого спектру задач геодезії та картографії найближчим часом.

Galileo значно стійкіший до перешкод і заглушень сигналу, ніж інші системи.

Це досягається завдяки спеціально розробленому сигналу та продуманій взаємодії з іншими навігаційними системами.

Зважаючи на ці переваги, Galileo є надійною системою для використання в режимі RTK, особливо там, де видимість супутників обмежена, як, наприклад, в містах, лісах, або поблизу дерев та будівель.

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. Atunç Pirtti, Mehmet Ali Yucel, Kutalmis Gumus (2013). Testing real time kinematic gnss (gps and gps/glonass) methods in obstructed and unobstructed sites. | Preskušanje metod kinematične izmere gnss v realnem času (gps in gps/glonass) na zastrtih in nezastrih lokacijah. Geodetski vestnik, 57 (3), 498-512. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2013.03.498-512

5. Al-Shaery, A., Lim S., Rizos C. (2011). Оцінка ефективності мережевого позиціонування з використанням лише GPS у порівнянні з GPS та GLONASS разом, 24-та Міжнародна технічна зустріч Відділу супутникового зв'язку Інституту навігації, Портленд, Орегон, США, 19-23 вересня, 2341-2349.

6. El-Mowafy, A. (2000). Аналіз ефективності методу RTK у міському середовищі. Австралійський геодезист, 45 (1), 47-54.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Оцінка якості створення 3D моделей міст на основі
відкритих геопросторових даних ».**

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)