

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Юр Юля
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
«Порівняння точності визначення GNSS координат при
застосуванні різних супутникових конфігурацій»
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Ю. Юр, 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**

Юр Юля

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Порівняння точності визначення GNSS координат при застосуванні різних супутникових конфігурацій»

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 та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ ГЛОНАС

2. Тестування методів RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ГЛОНАС

3. Результати тестування

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 та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ ГЛОНАС		
2	Тестування методів RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ГЛОНАС		
3	Результати тестування		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ **Юр Ю.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ **Перович Л.**

Анотація

Метою даної роботи є порівняльний аналіз точності визначення координат за допомогою супутникових систем GPS та комбінованого використання GPS+ГЛОНАСС у режимі реального часу RTK та статичному режимі.

Дослідження спрямоване на виявлення переваг, відмінностей та ефективності цих підходів у геодезичних вимірюваннях високої точності.

Актуальність

У сучасних умовах стрімкого розвитку супутникових технологій та космічної геодезії питання точного просторово-часового позиціонування набуває особливої ваги.

Використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), зокрема в режимах RTK та статичних вимірюваннях, стало ключовим інструментом для геодезії, будівництва, інженерних вишукувань та картографії.

У цьому контексті актуальним є дослідження ефективності роботи різних супутникових комбінацій, таких як GPS та GPS+ГЛОНАСС, для підвищення точності та надійності результатів.

Наукова новизна

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному порівнянні результатів позиціонування при використанні лише GPS і комбінації GPS+ГЛОНАСС у різних режимах (RTK і швидкий статичний).

У роботі вперше на практиці реалізовано аналіз точності вимірювань на основі даних, отриманих у реальних польових умовах, що дозволяє обґрунтувати доцільність одночасного використання кількох супутникових систем.

Практична цінність

Практична цінність роботи полягає у наданні обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимальної конфігурації супутникових систем для проведення геодезичних вимірювань з високою точністю.

Отримані результати можуть бути використані практикуючими інженерами-геодезистами для покращення точності й ефективності вимірювань у сфері будівництва, землеустрою, кадастру та інфраструктурного моніторингу.

Ключові слова

ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, RTK, статичний метод, позиціонування, супутникові вимірювання, Leica Viva GS15, Leica Geo Office, точність координат.

Abstract

The purpose of this work is a comparative analysis of the accuracy of determining coordinates using GPS satellite systems and the combined use of GPS+GLONASS in real-time RTK and static modes.

The study is aimed at identifying the advantages, differences and effectiveness of these approaches in high-precision geodetic measurements.

Relevance

In modern conditions of the rapid development of satellite technologies and space geodesy, the issue of accurate spatio-temporal positioning is gaining particular importance.

The use of global navigation satellite systems (GNSS), in particular in RTK and static modes, has become a key tool for geodesy, construction, engineering surveys and cartography.

In this context, it is relevant to study the effectiveness of various satellite combinations, such as GPS and GPS+GLONASS, to increase the accuracy and reliability of results.

Scientific novelty

The scientific novelty of the study lies in the comprehensive comparison of positioning results using only GPS and the combination of GPS+GLONASS in different modes (RTK and fast static).

The work is the first to implement in practice an analysis of measurement accuracy based on data obtained in real field conditions, which allows us to substantiate the feasibility of using several satellite systems simultaneously.

Practical value

The practical value of the work lies in providing reasonable recommendations for choosing the optimal configuration of satellite systems for conducting geodetic measurements with high accuracy.

The results obtained can be used by practicing geodetic engineers to improve the accuracy and efficiency of measurements in the field of construction, land management, cadastre and infrastructure monitoring.

Keywords

GNSS, GPS, GLONASS, RTK, static method, positioning, satellite measurements, Leica Viva GS15, Leica Geo Office, coordinate accuracy.

Зміст

Вступ

1. Методи RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ ГЛОНАС

2 Тестування методів RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ГЛОНАС

2.1 Опис тесту

2.2 Результати тестування методу RTK

3 Результати тестування

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Упродовж минулих десятиріч, супутникові технології відчули неймовірний поступ, що докорінно розширило перспективи високоточних геодезичних вимірювань.

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), такі як GPS (США), ГЛОНАСС, Galileo (ЄС), BeiDou (Китай) та інші, стали незамінним інструментом у сучасному землевимірюванні, картографії, будівництві та суміжних галузях.

Однією з найважливіших переваг сучасних приймачів є здатність одночасного використання кількох супутникових систем, що дає змогу підвищити точність, надійність і стабільність визначення координат, навіть за важких умов спостереження.

Неабиякої популярності в професійній діяльності здобули диференційні методи позиціонування, зокрема технологія RTK (Real-Time Kinematic), яка забезпечує сантиметрову точність у реальному часі.

Водночас статичні методи залишаються незамінними для розв'язання задач, що вимагають найвищої точності під час побудови геодезичних мереж.

Проте ефективність цих методів значною мірою залежить від конфігурації супутникових систем, які використовуються під час спостережень.

В умовах, коли користувач має можливість працювати як із сигналами виключно GPS, так і з їх поєднанням із супутниками ГЛОНАСС, виникає логічне запитання: наскільки значним є вплив спільного використання кількох GNSS на кінцеву точність результатів?

Саме це питання є центральним у цьому дослідженні.

У роботі було проведено серію експериментальних вимірювань у режимах RTK та швидкого статичного позиціонування з використанням GPS окремо та у комбінації з ГЛОНАСС.

Отримані результати було проаналізовано з метою порівняння точності обчислених координат, виявлення сильних та слабких сторін обох підходів, а також формування практичних порад щодо їхнього застосування в щоденній геодезичній практиці.

На даний момент широке коло науковців і дослідницьких організацій провели порівняльні випробування ефективності спільного використання систем GPS та ГЛОНАСС у різноманітних аспектах супутникової навігації, включаючи точне позиціонування, методи кінематики в реальному часі, навігаційні завдання та інженерну геодезію.

Отримані дані свідчать про значне покращення точності, стабільності та надійності визначення просторових координат при застосуванні комбінованих сигналів від різних глобальних навігаційних супутникових систем.

В рамках нашої бакалаврської праці ключовим завданням є дослідження переваг інтегрування GPS та ГЛОНАСС при використанні методик RTK і статичного позиціонування для вирішення інженерних завдань практичного застосування.

Йдеться зокрема про застосування у землевпорядкуванні, під час картографування, збирання просторових даних безпосередньо на території, а також визначення геодезичних пунктів.

Мета дослідження полягає в проведенні ретельного аналізу точності та якості позиціонування, що забезпечується окремо GPS та в комбінації GPS + ГЛОНАСС, з використанням як кінематичного режиму реального часу (RTK), так і методів статичних вимірювань.

Особливу увагу зосередимо на випадках, коли сигнал з космічного апарата частково або цілковито перекривається перешкодами, наприклад, деревами або щільною забудовою.

Дослідження включає в себе вивчення базових принципів функціонування RTK-методів та статичних спостережень, плюс детальне дослідження застосування диференціальних методів корекції при роботі з мультисистемними приймачами.

Ми розглянемо два сценарії: використання лише GPS та комбіноване використання сигналів GPS та ГЛОНАСС.

1. Методи RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ ГЛОНАС

Наразі диференційні глобальні навігаційні супутникові системи (ДГНСС) стрімко інтегруються у різноманітні сфери практичного застосування, де надзвичайно критичною є висока точність вимірювання просторових і часових параметрів.

До цього переліку належать геодезія, землевпорядкування, зведення об'єктів, моніторинг сільськогосподарських ділянок, безпілотна навігація, проєктування інфраструктурних складових та багато інших сфер діяльності.

В умовах польових вимірювань найчастіше використовують два ключові методи: кінематичний у реальному часі (RTK) та статичний метод, кожний з яких має свої переваги та галузі використання.

Метод RTK визначається як технологія високоточного визначення координат у режимі реального часу.

Він функціонує, використовуючи двочастотні вимірювання фаз від базового приймача (референтної станції), котрі передаються до ровер-приймача (рухомого приймача) каналом зв'язку, здебільшого через радіомодем або мобільну мережу.[4]

Під час обміну інформацією базова станція надсилає відомості про псевдодальності, фази несучих частот та інші поправкові величини, які мобільний приймач застосовує для точного визначення власних координат в реальному часі.

Завдяки використанню диференційних поправок, технологія RTK дає змогу досягати точності позиціонування в межах кількох сантиметрів, що робить її найкращим вибором для задач, де важливими є висока швидкість та водночас точність.

Цей спосіб виявляється надзвичайно ефективним на відкритих ділянках, де гарантується ясний огляд супутників.

Утім, навіть за несприятливого впливу середовища, такого як міська забудова чи лісові масиви, можливо значно покращити ефективність, застосовуючи мультисистемні приймачі ГНСС.[4]

На рисунку 1 представлено базову схему роботи RTK: базова станція здійснює прийом сигналів від супутників і передає диференціальні поправки роверу.

Після отримання цієї інформації, ровер обчислює координати в реальному часі.

Завдяки високій точності та можливості швидкого опрацювання даних, RTK дає змогу економити час польових вимірювань.

У поєднанні зі зручністю експлуатації сучасного обладнання, метод є незамінним інструментом у багатьох виробничих та дослідницьких областях.[6]

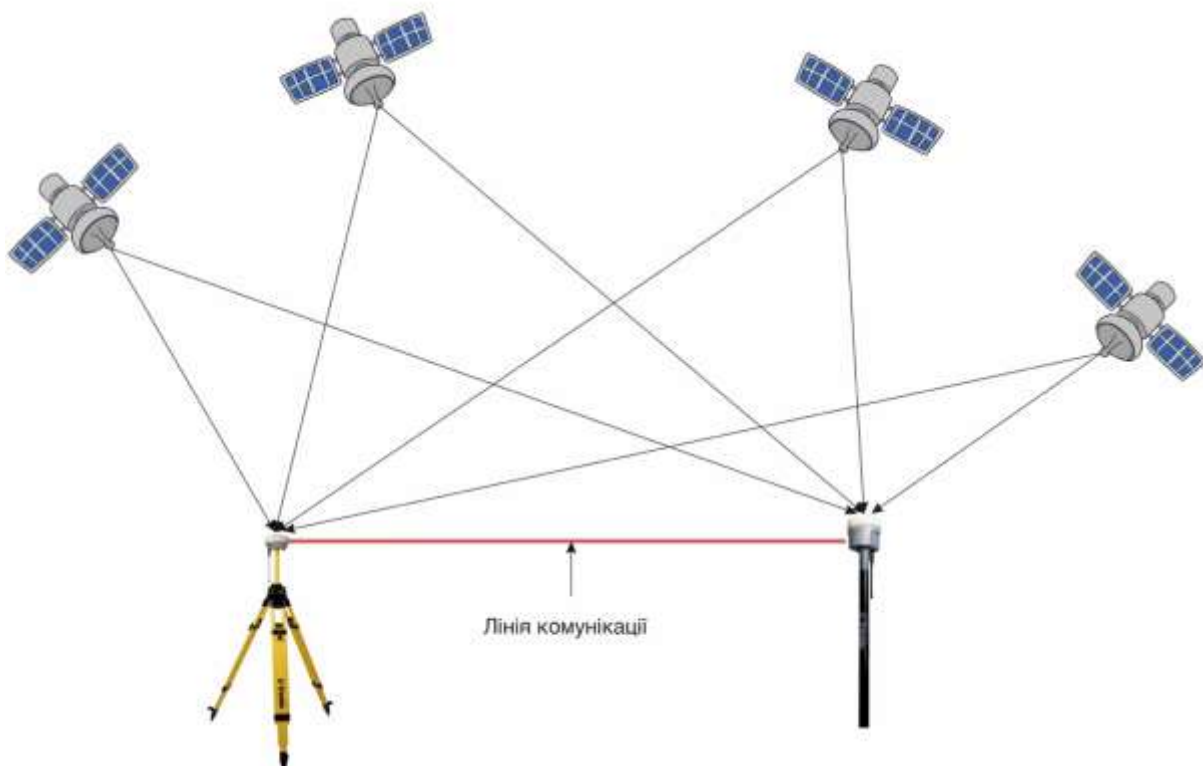


Рисунок 1. RTK-зв'язок

Ровер-приймач, застосовуючи RTK-підхід, постійно коригує власні координати в русі, якщо забезпечено стабільний прийом сигналів з супутників та надійне відстеження фазових вимірювань.

Використання двочастотних приймачів, які функціонують на частотах L1 та L2, є ключовим фактором для забезпечення високої точності під час проведення кінематичних спостережень в реальному часі.

З-поміж різних типів ГНСС-приймачів виділяють базовий, який розташовується над точкою з заздалегідь відомими координатами, залишаючись у фіксованому положенні.

Інші приймачі (ровери) можуть вільно змінювати своє розташування, переміщуючись від однієї цілі до іншої.

Для реалізації RTK-методу ключове значення має радіоканал. Саме через нього відбувається пересилка невидозмінених даних (вимірювання фази та коду) від базової станції до роверного приймача.[4]

Окрім того, необхідний спеціалізований обчислювальний блок або контролер збору даних, який в реальному часі проводить обчислення координат.

Точність, яка досягається методом RTK, здебільшого дорівнює 10 мм або краще, що дає змогу застосовувати його у високоточних інженерно-геодезичних роботах.

Водночас, таку точність можна забезпечити лише за умови відповідності ряду технічних вимог - зокрема, протяжність базової лінії між базовою станцією та роверним приймачем повинна бути якомога коротшою, оптимально - до 3 км.

Якщо дистанція перевищує 5 кілометрів, точність відчутно знижується через посилений вплив збурень в іоносфері та тропосфері, а також ослаблення кореляції похибок між приймачами.

Не менш критичною є вимога щодо правильної геометрії розташування супутників: для чіткого визначення позиції необхідна одночасна видимість щонайменше п'яти космічних апаратів, а краще – шести чи більше.

У цьому аспекті інтеграція GPS та ГЛОНАСС показує значно кращі результати, ніж використання лише GPS.

Спільна робота цих систем збільшує загальну кількість доступних супутників, зменшуючи ризик втрати позиціонування, покращує надійність вимірювань та точність визначення координат, особливо в умовах складного ландшафту чи обмеженого огляду неба.

Крім того, об'єднання GPS та ГЛОНАСС сприяє покращенню точності визначення місцезнаходження.

Це відбувається завдяки вдосконаленим алгоритмам, що враховують вплив тропосфери та іоносфери, зменшенню похибок у вимірюванні псевдовідстаней, а також надмірності даних, що робить систему більш стійкою.

Найважливішою та першочерговою перевагою такого підходу є значне збільшення кількості супутників, які можна спостерігати.

Об'єднуючи обидві системи, ми потенційно отримуємо доступ до 48 супутників. З них щонайменше 12 зазвичай доступні для одночасного спостереження будь-де і будь-коли.

Це забезпечує стабільне та якісне визначення координат навіть за наявності перешкод.

Статичні методи спостережень – це традиційний та поширений спосіб для високоточного визначення координат.

Особливо актуально це для завдань побудови геодезичних мереж, встановлення контрольних пунктів та проведення інженерно-геодезичних вишукувань.

Цей метод базується на визначенні координат початкових ліній, що з'єднують два фіксовані GNSS-приймачі.

Для цього необхідно постійно записувати дані протягом тривалого відрізка часу.

Під час збору інформації відбувається переміщення космічних апаратів, що входять до супутникового угруповання, що суттєво підвищує точність обчислень.

У традиційній статичній зйомці кожен приймач, розміщений у нерухомій точці, фіксує дані від супутників протягом заздалегідь визначеного періоду – від кількох десятків хвилин до кількох годин.

Тривалість залежить від відстані між станціями, необхідної точності вимірювань і якості сигналу.

Це дає змогу зібрати достатньо інформації, необхідної для подальшої обробки з високою вірогідністю.

Також існує ще один різновид методу, відомий як швидка статика.

Він ґрунтується на тих же принципах, але відрізняється скороченим часом спостереження, зазвичай від 15 до 30 хвилин.

Цей підхід забезпечує оптимальне поєднання між точністю отриманих даних та продуктивністю під час польових вимірювань на невеликих територіях або під час створення локальних мереж.

Під час статичних вимірювань одну з антен розташовують над точкою з відомими координатами, яку називають базовою, а іншу – над точкою, координати якої невідомі та підлягають визначенню.

У певних сценаріях точне місцезнаходження обох точок залишається невизначеним.

Але обробка такого роду даних стає складнішою і потребує інтеграції додаткових базових приймачів або використання даних з офіційних референтних мереж.

Незалежно від налаштувань, для успішної обробки сигналу, обидва приймачі повинні реєструвати сигнали щонайменше від чотирьох спільних супутників одночасно.

Рекомендується, щоб кількість супутників була більшою (6 або більше), що сприяє покращенню якості геометричних вимірювань та зниженню похибок.

Тривалість сесії спостережень визначається довжиною базової лінії, розташуванням супутників на орбіті, впливом багатопроменевості, атмосферними перешкодами та іншими чинниками, які впливають на кінцевий результат.

Зазвичай, оптимальним рішенням є застосування постійно діючих референтних станцій для базової станції, що забезпечують безперервний потік високоточних даних для роботи.

Проте, у випадках відсутності або недоступності референтних станцій, допускається використання тимчасової базової точки.

На цій точці розміщують стаціонарний приймач з відомими координатами.

Це дозволяє створити локальну систему координат для подальшої обробки даних (див. Рисунок 2).

З погляду на точність і швидкість вимірювань, короткі базові лінії, як-от 5 кілометрів, показують набагато кращі результати, ніж довші базові лінії, скажімо, 15 кілометрів.

Вимірювання на коротких базах забезпечують вищу точність, бо вплив похибок, що нарастають з тривалістю вимірювань, зведено до мінімуму.

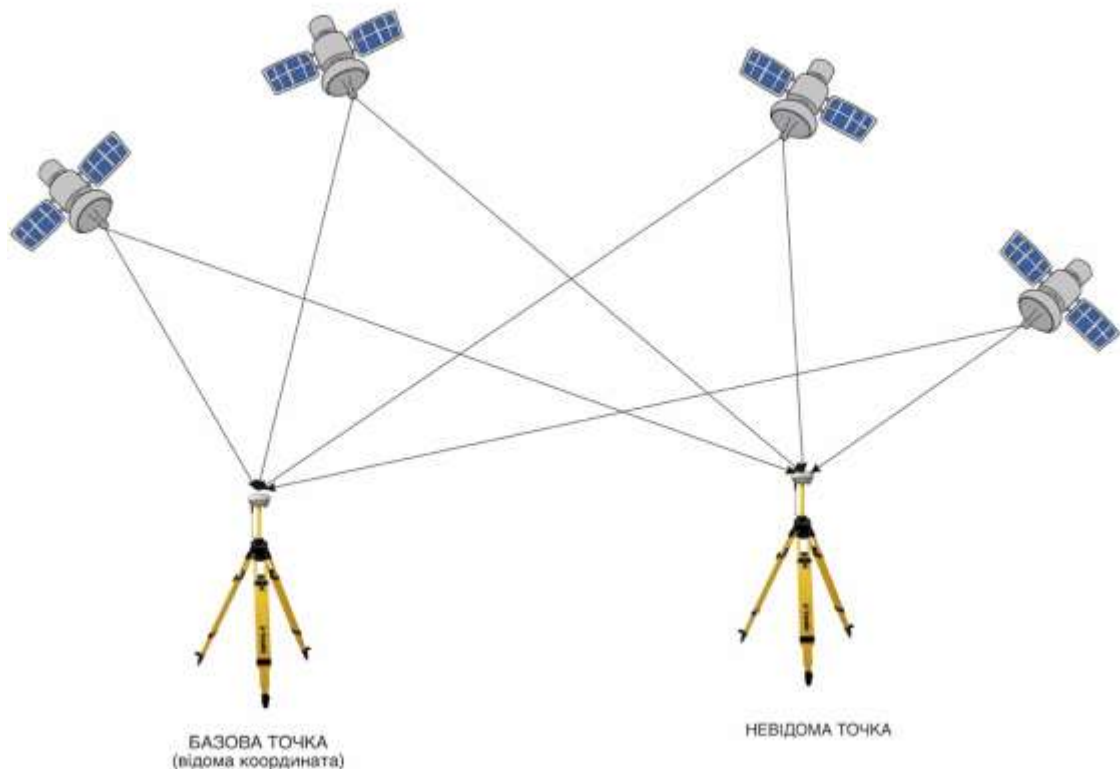


Рисунок 2. Статичний метод з використанням відомої точки як базової станції

Тривалість спостережень визначається кількома факторами:

- Кількістю супутників, доступних для спостереження.
- Іоносферними збуреннями, що впливають на точність вимірів.

Слід врахувати, що їхня інтенсивність може коливатися в залежності від пори доби, пори року та місця спостереження.

- Довжиною базової лінії, що безпосередньо впливає на тривалість досягнення необхідної точності.
- Геометрією розташування супутників, яка має бути оптимальною для зменшення похибок вимірювань.

Іоносферні коливання, звичайно, виявляють варіації в межах доби, плюс можуть зазнавати змін, враховуючи пору року та конкретний географічний пункт на планеті.

Вони здатні суттєво впливати на достовірність зібраної інформації, особливо, якщо йдеться про великі базисні лінії, зважаючи на це, є надзвичайно важливим враховувати ці аспекти при плануванні вимірювань.

З практичної точки зору, найдоцільнішою порадою досвідчених фахівців вважається виконувати спостереження протягом 5 хвилин на кожен кілометр відстані, що вимірюється, при цьому найменший час спостережень повинен бути не меншим за 15 хвилин.

Такий проміжок часу дозволяє зібрати дані з достатньою точністю для подальшого аналізу.

У таблиці 1 наведено орієнтовні значення часу спостережень, враховуючи протяжність вимірюваних ліній та інші чинники

Використання комплексів GPS та ГЛОНАСС в умовах відсутності активності значно покращує точність фіксації координат, адже зростає кількість наявних супутників і покращується конфігурація ліній від них. [8]

Завдяки цьому вдається мінімізувати похибки багатопроменевості та підвищити якість сигналу, крім того, зменшується ймовірність втрати зв'язку.

Таблиця 1 Зв'язок між довжиною базової лінії та орієнтовним періодом спостережень.

Довжина базової лінії	Час спостереження
1 км	15 хв
2 км	15 хв
3 км	15 хв
4 км	20 хв
5 км	25 хв
6 км	30 хв
7 км	35 хв
8 км	40 хв
9 км	45 хв
10 км	50 хв
> 10 км	> 60 хв

Статичні вимірювання, виконані з застосуванням GPS у парі з ГЛОНАСС, засвідчують вищу точність у порівнянні з використанням лише GPS, де різниця досягає кількох міліметрів, якщо спостереження відбуваються одночасно.

2 Тестування методів RTK та статичного GPS, RTK та статичного GPS+ГЛОНАС

2.1 Опис тесту

Для визначення функціональності методів RTK, статичного GPS та комбінації статичного GPS + ГЛОНАС, експеримент було проведено у травні 2024 року, у місті Івано-Франківську.

Місцевим орієнтиром було обрано зону поблизу торговельного центру «Арсен», що знаходиться в густо забудованому районі.

Вибір локації був зумовлений її відповідністю цілям дослідження, оскільки, поєднуючи відкриті ділянки з частковим оточенням деревами та будівлями, вона дозволила протестувати системи в умовах перешкод та обмежень (Див. Рис. 3 та Рис. 4).[6]

В ході цього дослідження здійснювався збір даних, спрямований на порівняльну оцінку ефективності різних методів визначення координат в умовах обмеженого огляду супутників.

Зокрема, було проаналізовано показники точності та стабільності систем GPS та GPS + ГЛОНАС, що сприяло виявленню їх сильних та слабких сторін в умовах міської забудови, де характерні багатопроменеві явища та перешкоди для сигналів.

Процедура вимірювань включала як статичне позиціонування, так і застосування технології RTK для визначення координат у реальному часі.

Проведені випробування дали змогу зібрати дані, що ілюструють вплив комбінованого використання сигналів різних супутникових систем на точність вимірювань, а також на стійкість систем до зовнішніх впливів.

Це дає можливість зробити висновки щодо того, яким чином поєднання GPS та ГЛОНАС може поліпшити результати геодезичних вимірювань в умовах щільної міської забудови, де доступність може бути ускладнена.

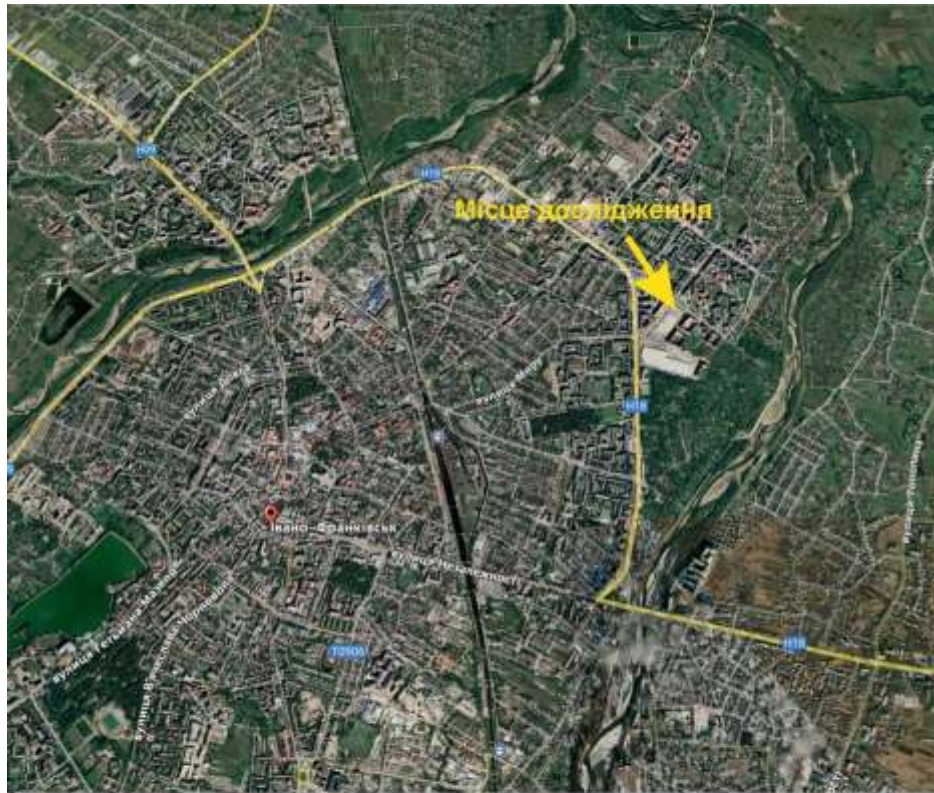


Рисунок 3. Супутникові знімки робочої зони



Рисунок 4. Робоча зона для відкритого неба та неба з перешкодами

Двочастотний GNSS-приймач Leica Viva GS15 застосовано для вимірювання 14 точок за методом RTK та 3 точок у статичному режимі.

Приймач має 120 каналів та здатний одночасно приймати сигнали GPS: L1, L2, L2C, L5, а також сигнали ГЛОНАСС: L1, L2.

Це забезпечує точне позиціонування з високою стабільністю та точністю навіть в умовах обмеженої видимості супутників.

Точність приймача Leica Viva GS15 визначено так: для RTK-вимірювань, поодинокі результати (RMS): по горизонталі 8 мм + 1 ppm (RMS), по вертикалі - 15 мм + 1 ppm (RMS).

Щодо швидкої статичної зйомки (фаза), точність становить: по горизонталі 3 мм + 0,5 ppm (RMS), по вертикалі 5 мм + 0,5 ppm (RMS).

Базова точка, яка використовувалася як станція для RTK та статичного методів, визначена у системі координат WGS84, відповідно до глобальних геопросторових стандартів.

Для RTK-вимірювань здійснено заміри на 14 точках в області дослідження (Рисунок 5).

Вибір цих точок обумовлено потребою оцінити точність роботи та ефективність GNSS системи в умовах міської забудови, де сигнал може послаблюватися або частково перекриватися перешкодами, такими як будівлі чи рослинність.

Час вимірювання на кожну точку становив 5 секунд, з епохою 1 секунда, а кут маскуваня – 15° для забезпечення належної роботи RTK.

Система координат, використана в роботі, - WGS84, з прийомом сигналів L1 та L2.

Кожну точку виміряно двічі: перший замір в режимі GPS + GLONASS, де приймач фіксував сигнали обох систем, а другий – в режимі GPS, де приймач приймав сигнали лише від супутників GPS.



Рисунок 5 Супутникове зображення робочої зони

Для порівняння точності в міській забудові було застосовано швидкі статичні вимірювання.

Задля виконання цього було обрано три контрольні пункти (С1, С2, С3), що знаходяться на відкритому просторі.

Тривалість спостережень на кожній точці становила 15 хвилин, зважаючи на незначну довжину базових ліній, близько 100 метрів.

Вимірювання на вказаних пунктах проводились з використанням GPS + GLONASS.

Після збору інформації було виконано їх обробку в програмному забезпеченні Leica Geo офісного типу для даних у форматі RINEX, які містять сигнали GPS + GLONASS.

З метою подальшого аналізу було експортовано інформацію з RINEX-файлу, обмежуючись сигналами GPS.

Створений RINEX-файл містив виключно дані GPS.

В результаті опрацювання даних з цього GPS-RINEX-файлу, було визначено координати пунктів та значення їх стандартних відхилень.

Зважаючи на невелику протяжність базової лінії, що використовувалась при швидкій статистиці, зйомки було проведено в подібних іоносферних умовах.

Усі отримані дані було трансформовано в систему координат UСК2000, застосовуючи WGS84 як основу для розрахунків.

Параметри післяобробки наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Застосовані параметри опрацювання для післяобробки

Параметри	Вибрані значення
Кут сигналу	15°
Тип ефемерид	Точний
Тип рішення	Автоматичний
Тип GNSS	GPS+ГЛОНАС
Частота	L1+L2
Виправлення неоднозначностей	80 км
Час для статичного рішення	5'
Частота дискретизації	Всі
Тропосферна модель	RF-5800M-НН
Модель іоносфери	Автоматична
Стохастичне моделювання	Так
Відстань	8 км
Іоносферна активність	Автоматичний

Полюві вимірювання не були використані для статичного визначення координат, адже статичний метод, разом з потрібними контрольними точками, вимагає найбільшої точності.

Для цього необхідно забезпечити найвищий рівень прийняття сигналів та бездоганну видимість супутників.

У замкнених зонах, де сигнали з супутників можуть блокуватися будівлями або насадженнями, точність значно падає.

Це робить такі вимірювання неефективними для отримання міліметрової точності, яка потрібна.

Тож, обираючи місце розташування для пунктів статичних вимірювань, пріоритетом повинні бути відкриті території, де супутники видно без перешкод.

Такий підхід забезпечить максимально точне визначення координат, знизить ймовірність втрати сигналу і поліпшить загальну якість отриманих даних.

Якщо вимірювання відбуваються в умовах обмеженого огляду, отримані результати, скоріш за все, виявляться малокорисними на практиці, оскільки не відповідатимуть реальним умовам, у яких оператори зазвичай проводять зйомку.

Отримавши координати точок, якість їх розташування оцінюють за складовими варіаційно-коваріаційної матриці горизонтальних координат, а також за стандартними відхиленнями для позицій X, Y та Z.

Матриця дисперсії-коваріації виглядає так:

$$c = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Стандартне відхилення X,

$$\sigma_X = M_0 \sqrt{Q_{11}} \quad (2)$$

Стандартне відхилення Y,

$$\sigma_Y = M_0 \sqrt{Q_{12}} \quad (3)$$

Стандартне відхилення Z,

$$\sigma_Z = M_0 \sqrt{Q_{33}} \quad (4)$$

Якість позиціонування координат,

$$\sigma_{\text{сер}} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2} \quad (5)$$

2.2 Результати тестування методу RTK

Результати досліджень засвідчили, що точність визначення координат методом RTK сягала близько 1 см, якщо застосовувалися GPS + ГЛОНАСС.

Це було майже на 1 см точніше, ніж при використанні виключно GPS на відкритому просторі, враховуючи точки 10 (Див. Рисунок 5).

В умовах, де огляд супутників був обмежений через перешкоди, точність позиціонування коливалася в межах 2–3 см при використанні GPS + ГЛОНАСС.

Це також на 3 см переважало результати, здобуті із застосуванням лише GPS.[4]

Наведений приклад наочно демонструє пункти 12–14, розташовані в зоні з перешкодами (Див. Рисунок 5).

Для глибшого аналізу розбіжностей у координатах, стандартних відхилень та особливостей позиціонування точок, варто дослідити Таблиці 3 і 4, а також рисунки 6, 7, 8 та 9, котрі графічно відображають результати вимірювань і порівняння різних конфігурацій (GPS + ГЛОНАСС та просто GPS).[4], [8]

Таблиця 3. Різниця координат між GPS + ГЛОНАСС і тільки GPS у методі RTK (м)

Точки спостереження	ΔX	ΔY	ΔZ
1	0.0097	0.006	-0.0134
2	0.0029	0.003	-0.014
3	0.0012	0.005	-0.0176
4	0.0042	0.005	0.0037
5	0.0041	-0.001	-0.007
6	0.0043	0.002	-0.0039
7	-0.0005	0.003	-0.0065
8	0.0008	0.004	-0.0048
9	0.0021	0.005	0.0298
10	-0.0029	0.006	0.0276
11	-0.015	0.03	0.014
12	-0.044	0.01	0.022
13	-0.139	0.109	0.075
14	-0.015	-0.022	0.004

Таблиця 4. Стандартні відхилення та характеристики положення точок у методі RTK (м)

Точки спостереження	GPS + ГЛОНАС				тільки GPS			
	σ_x	σ_y	σ_z	СКП	σ_x	σ_y	σ_z	СКП
1	0.00432	0.00478	0.00653	0.0105	0.00578	0.00586	0.00712	0.0132
2	0.00589	0.00569	0.00754	0.0104	0.00678	0.00712	0.0113	0.0154
3	0.00674	0.00734	0.00822	0.0104	0.00732	0.00765	0.0112	0.0157
4	0.00632	0.00711	0.00776	0.0123	0.00829	0.00845	0.00941	0.0145
5	0.00367	0.00378	0.00813	0.0105	0.00789	0.00805	0.0113	0.0154
6	0.00456	0.00473	0.00619	0.0103	0.00893	0.00874	0.0124	0.0158
7	0.00575	0.00587	0.00907	0.0128	0.00765	0.00809	0.0149	0.0169
8	0.00478	0.00487	0.00765	0.0119	0.00809	0.00834	0.0153	0.0181
9	0.00564	0.00579	0.00812	0.0113	0.00934	0.00965	0.0125	0.0176
10	0.00609	0.00632	0.00956	0.0132	0.00871	0.00897	0.0129	0.0165
11	0.01245	0.01267	0.01567	0.0234	0.02345	0.02137	0.02765	0.0335
12	0.01467	0.01509	0.01578	0.0291	0.02409	0.02703	0.2834	0.0491
13	0.01243	0.01256	0.01543	0.0245	0.03657	0.03390	0.0412	0.0699
14	0.01398	0.01347	0.01576	0.0207	0.03765	0.03734	0.03998	0.0587

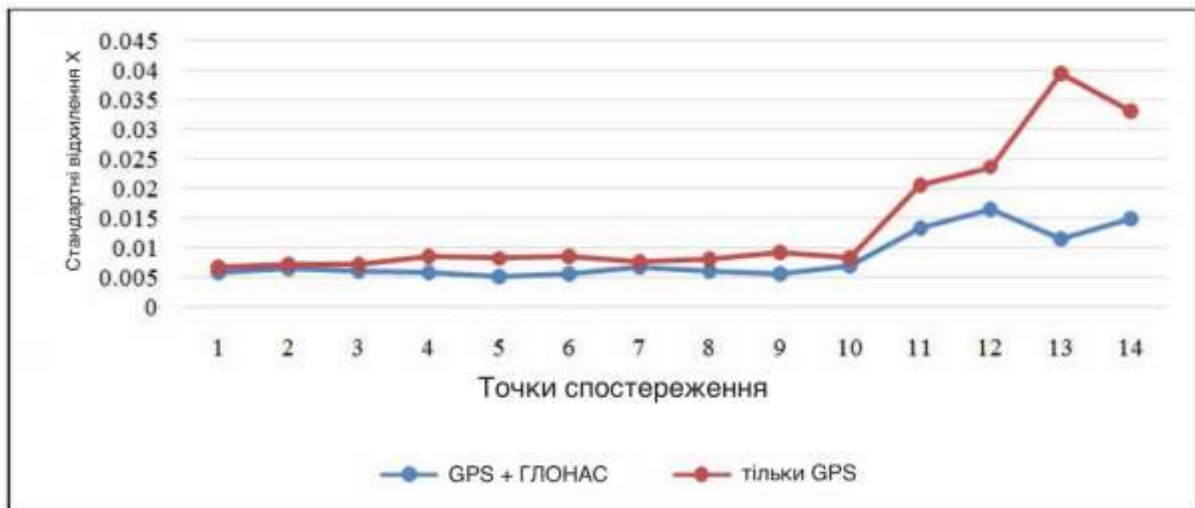


Рисунок 6. Стандартні відхилення X в методі RTK [м]

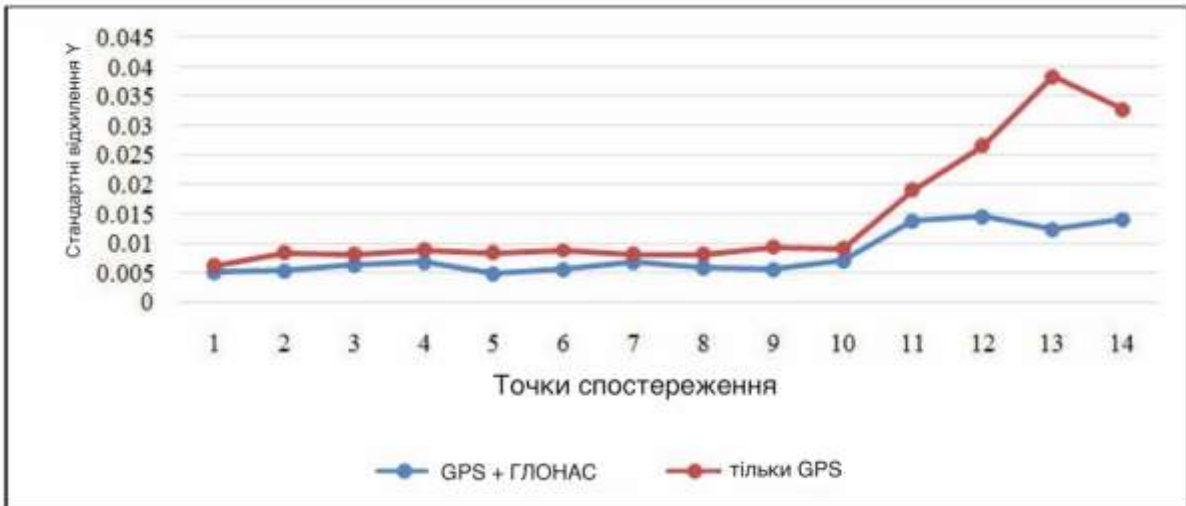


Рисунок 7. Стандартні відхилення Y в методі RTK [м]

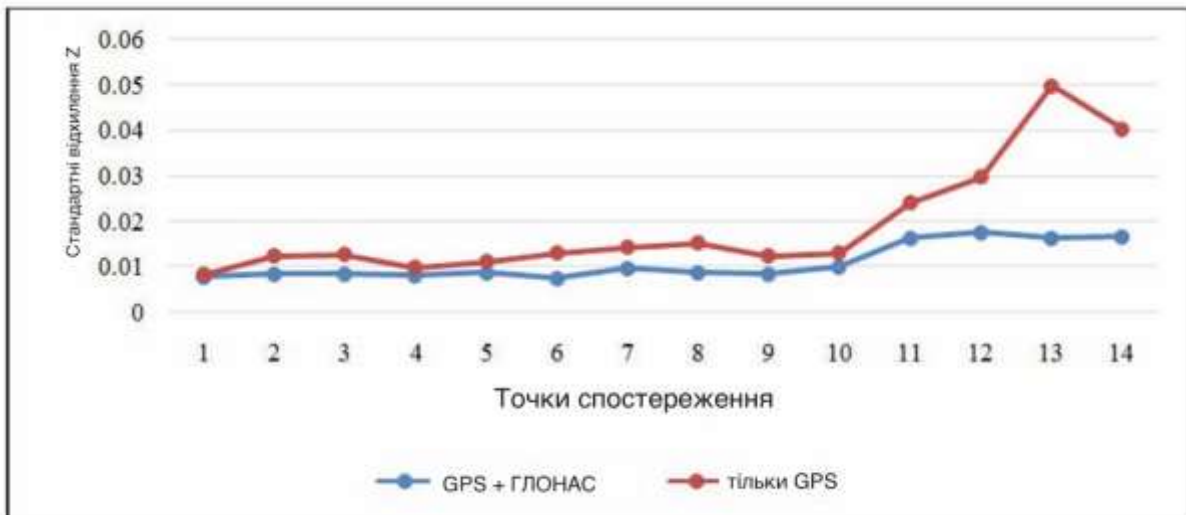


Рисунок 8. Стандартні відхилення Z в методі RTK [м]

Загалом, результати тестових вимірювань підтверджують, що інтегрування GPS та ГЛОНАС у RTK методі значно покращує точність та надійність визначення місцезнаходження, одночасно розширюючи доступність супутників.

У відкритому просторі, де кут відсікання становив 15° , максимальна кількість супутників, які було зафіксовано лише з використанням GPS, досягла 8.

Проте, у зонах з обмеженим оглядом кількість таких супутників зменшувалася до діапазону 4-5 [4].

На відкритих ділянках, за умови одночасної роботи GPS та ГЛОНАСС, число доступних супутників перевищувало 14, а в приміщеннях мінімальна кількість складала 8.

Спільне використання сигналів від GPS та ГЛОНАСС суттєво знижує ризик втрати сигналу, а також послаблює вплив багатопроменевості.

Крім того, таке поєднання дає змогу зменшити тривалість спостережень, завдяки покращеній конфігурації супутників, що робить вимірювання більш оперативними.

Це особливо помітно на прикладі даних з пунктів 11-14, де через наявність перешкод, спостерігалось помітне зменшення кількості доступних супутників (4-5 при використанні тільки GPS, в порівнянні з 8, коли залучено обидві системи).

Ці точки продемонстрували меншу точність в порівнянні з пунктами від першого до десятого, що розташовані у місцях з кращим сигнальним забезпеченням.

У відкритих областях, де забезпечувалася краща доступність супутників, знижувалась імовірність багатопроменевості та переривання сигналу, що, своєю чергою, позитивно впливало на покращення точності визначення координат.

В ситуаціях, коли було доступно багато супутників, точність вимірювань значно зростала при одночасному застосуванні GPS та ГЛОНАСС, порівняно з використанням тільки GPS.

Підсумовуючи, представлені результати демонструють, що інтегроване використання GPS та ГЛОНАСС є вирішальним фактором для забезпечення підвищеної точності визначення координат, зокрема в умовах обмеженого прийому сигналу.

Такий підхід зменшує похибки, пов'язані з багатопроменевістю та втратою сигналу, а також забезпечує оптимальнішу доступність супутникових даних.

3 Результати тестування

Після опрацювання здобудків вимірювань, виконаних методом швидкої статистики із застосуванням супутникового позиціювання, з'ясовано, що одночасне використання GPS та ГЛОНАСС дозволяє надзвичайно точно визначати координати точок С1, С2 і С3, досягаючи похибки приблизно 5 мм.

Цей показник перевершує точність, яка може бути досягнута при використанні лише GPS, в середньому на 1-2 мм.

Аналіз розбіжностей координат, стандартних відхилень та загальної якості просторового положення точок, отриманих в процесі вимірювань, наведено у таблицях 5 та 6.

Для полегшення візуального сприйняття результати додатково візуалізовано на графіках, представлених на рисунках 10, 11, 12 та 13, що дає можливість глибше оцінити переваги комплексного застосування GPS та ГЛОНАСС у геодезичних вимірюваннях.

Отримані результати свідчать про те, що спільне використання GPS та ГЛОНАСС суттєво підвищує точність вимірювань.

Це досягається завдяки покращеній доступності супутників та зменшенню вірогідності втрати сигналів, що особливо важливо в несприятливих умовах.

Такі позитивні зміни забезпечують оптимальну конфігурацію розташування супутників.

Це, в свою чергу, веде до точнішого визначення координат, що є ключовим для високоточних геодезичних робіт.

Таблиця 5. Різниця координат між GPS + ГЛОНАСС та лише GPS статичним методом (м)

Точки спостереження	ΔX	ΔY	ΔZ	СКП
C1	-0.00031	-0.00025	-0.0001	-0.00067
C2	0.00033	-0.00044	-0.00105	-0.00114
C3	0.0004	-0.00042	-0.00129	-0.00122

Таблиця 6. Стандартні відхилення та характеристики положення точок у статичному методі [м]

Точки спостереження	GPS + ГЛОНАСС				тільки GPS			
	σ_x	σ_y	σ_z	СКП	σ_x	σ_y	σ_z	СКП
C1	0.00134	0.00109	0.00470	0.00409	0.00156	0.0012	0.00543	0.00541
C2	0.00172	0.0017	0.00561	0.00432	0.0017	0.00312	0.00598	0.00678
C3	0.00151	0.00178	0.00456	0.00467	0.00187	0.00324	0.00556	0.00543

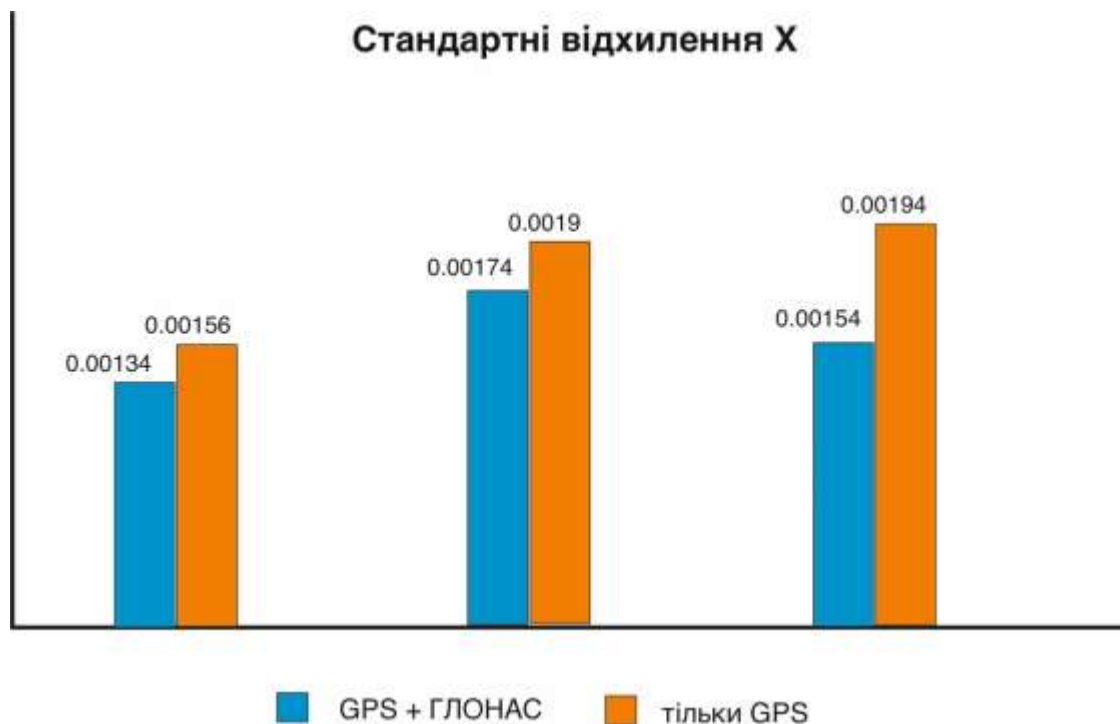


Рисунок 10. Стандартні відхилення X у статичному методі (м)

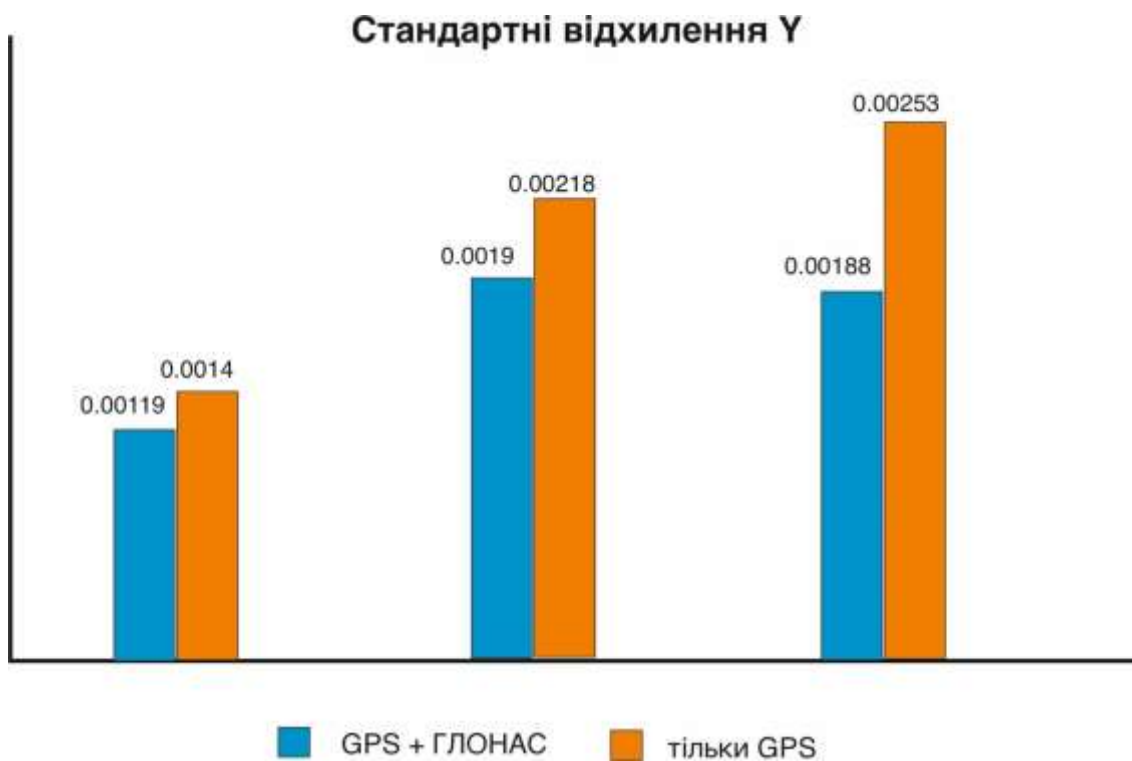


Рисунок 11. Стандартні відхилення Y у статичному методі (м)

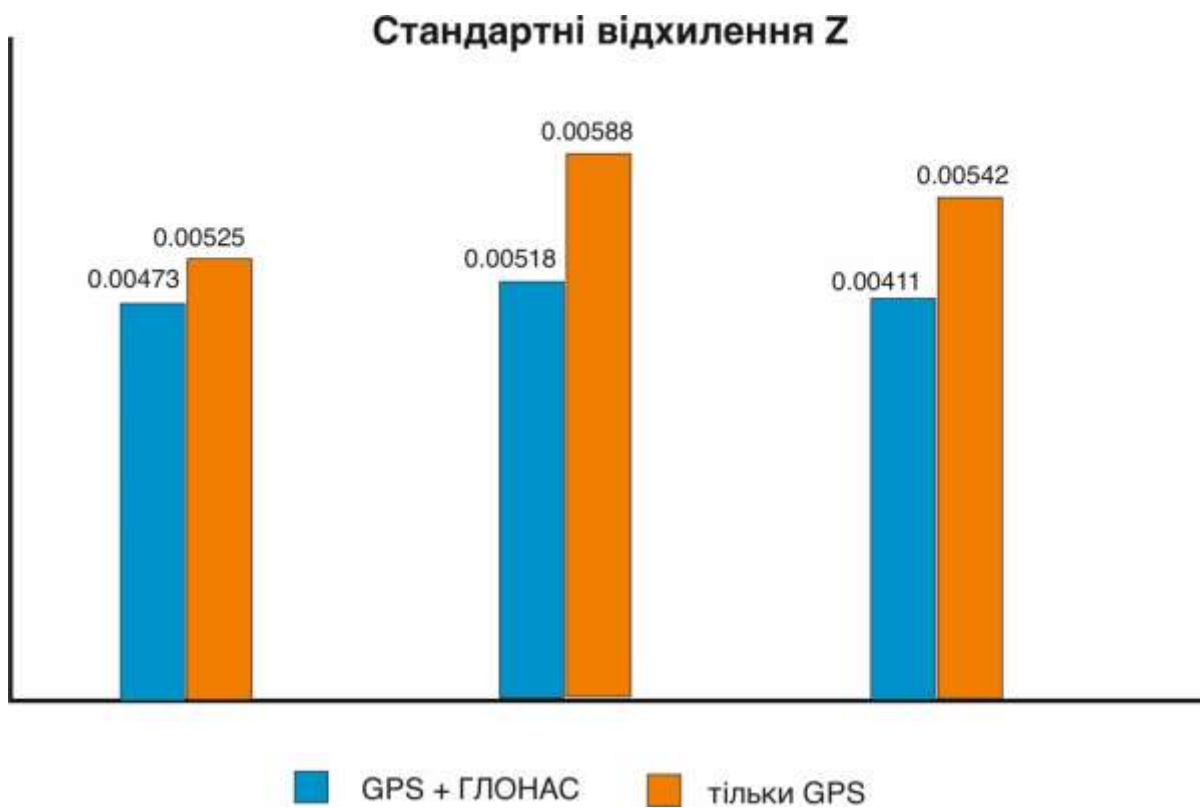


Рисунок 12. Стандартні відхилення Z за статичним методом (м)

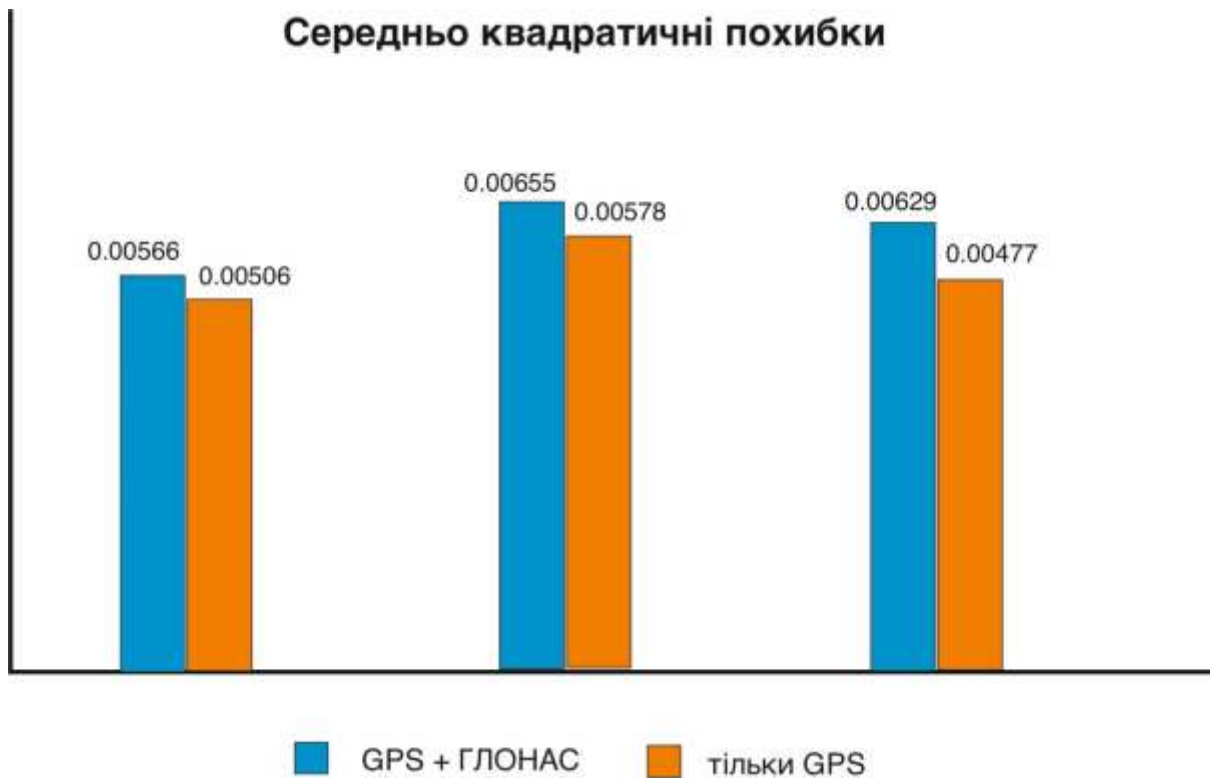


Рисунок 13. Середньо квадратичні похибки у статичному методі (м)

Отже, інтеграція двох систем навігації, GPS і ГЛОНАСС, значно покращує точність локалізації при статичних вимірюваннях, одночасно збільшуючи кількість доступних супутників і поліпшуючи їхню геометричну конфігурацію.

Це сприяє отриманню більш стабільних і коректних результатів, що критично важливо для геодезичних вимірювань, де висока точність визначає якість робіт.

Різниця у результатах, отриманих при використанні лише GPS та комбінації GPS + ГЛОНАСС у статичному режимі, зазвичай становить всього кілька міліметрів.

Це підкреслює, що навіть у статичному методі, який застосовується для визначення координат контрольних пунктів, включення ГЛОНАСС суттєво впливає на досягнення максимальної точності.[4]

В RTK-методі ця похибка може сягати близько сантиметра, демонструючи високу залежність RTK від видимості супутників і геометричного розташування сигналів.

У статичному позиціюванні ключовою є точність, адже ми працюємо з визначенням координат контрольних точок, які надалі використовуються в інших геодезичних дослідженнях або є вихідними даними.

Тому вкрай важливо забезпечити максимальну кількість видимих супутників і, як наслідок, найкращі умови для приймання сигналу.

Використання GPS разом з ГЛОНАСС помітно поліпшує згадані умови, що робить метод більш ефективним у складних умовах.

Висновок

Об'єднання різних систем глобальної супутникової навігації (GNSS) для вдосконалення функціональності, продуктивності, надійності й точності – дедалі поширене явище, оскільки дозволяє досягнути набагато кращих показників, аніж використання лише однієї GNSS.

В межах цього бакалаврського дослідження проведено два дослідження, які демонструють переваги одночасного використання GPS та ГЛОНАСС за різних умов.

Зокрема, для методу RTK, випробуваного в різних умовах – як з перешкодами, так і на відкритому просторі, було отримано такі результати: на відкритій місцевості, де немає перешкод, додавання ГЛОНАСС позитивно впливає на точність визначення координат, покращуючи її на 1 см, порівнюючи з випадком застосування лише GPS.

В умовах, де сигнал GPS може бути частково перекритий або послаблений через різні об'єкти, такі як будівлі або рослинність, використання комбінованої системи GPS + ГЛОНАСС забезпечує значно вищу точність та стабільність.

За результатами випробувань, точність позиціонування досягала 2-3 см, що на 3 см краще, ніж при застосуванні лише GPS.

Ці висновки підкреслюють: сумісне застосування двох глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) значно покращує якість геодезичних вимірювань, що особливо корисно там, де потрібна максимальна точність та мінімум витраченого часу.

Вказані переваги роблять комбіновані методики GPS + ГЛОНАСС ідеальним рішенням для застосування в інженерних задачах, де потрібне точне визначення розташування контрольних точок та збір даних.

Застосування комбінацій GPS та ГЛОНАСС на відкритих ділянках у статичному режимі демонструє дійсно збільшену точність визначення

координат, з результатами в межах 3-5 мм. Це на 1-2 мм точніше, аніж використання виключно GPS.

Це призводить до покращення показників як точності, так і надійності вимірювань.

Додавання ГЛОНАСС дозволяє збільшити загальну кількість доступних супутників, позитивно впливаючи на структуру супутникової мережі та знижуючи ймовірність помилок, спричинених втратою сигналу.

Польові випробування у реальних умовах показали, що комбінація GPS та ГЛОНАСС значно збільшує кількість доступних супутників та підвищує точність вимірювань, особливо в місцях з відкритим горизонтом.

У цих областях горизонтальна похибка може становити приблизно 1 см, що на 3 см менше, аніж при використанні лише GPS.

Це вказує на значну перевагу комбінованої системи, особливо для вимірювань, де важлива висока точність.

Окрім того, в умовах, де сигнал GPS може слабшати через обмежену видимість супутників, використання GPS + ГЛОНАСС є ключовим.

В таких випадках ця сукупність допомагає мінімізувати вплив багатопроменевості та втрат сигналу, що забезпечує отримання більш стабільних та точних даних навіть у складних умовах.

Підсумовуючи, отримані результати підтверджують, що використання GPS + ГЛОНАСС є суттєвим кроком для досягнення більшої ефективності та точності як в RTK, так і в статичних методиках, що робить цю пару особливо корисною для геодезичних вимірювань у різних середовищах.

Використання об'єднаної системи GPS + ГЛОНАСС ефективно знижує ризик втрати сигналу та вирішує проблеми багатопроменевості, особливо в місцях зі складним прийомом супутникового сигналу, наприклад, у місцях з обмеженим оглядом.

Завдяки збільшеній кількості доступних супутників та кращій геометрії визначення положення, GPS + ГЛОНАСС незмінно забезпечує точніші результати, ніж при використанні одного GPS.

Відповідно до наявних даних, використання декількох глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) демонструє значну корисність для мінімізації помилок, що можуть виникнути через багатопроменевість або втрату сигналу, особливо в умовах, де сигнал GPS може бути слабким або його прийом обмежений.

Це особливо актуально під час роботи в регіонах з ускладненим доступом до супутників або на місцевостях з високими будівлями, лісовими насадженнями чи іншими перешкодами.

Згідно з проведеним аналізом, у закритих зонах спостерігається суттєва різниця в точності між використанням лише GPS та комбінованим застосуванням GPS та ГЛОНАСС, оскільки в таких умовах кількість доступних супутників GPS помітно зменшується, що, в свою чергу, негативно впливає на геометричне розташування супутників.

Крім того, застосування GPS у поєднанні з ГЛОНАСС збільшує кількість космічних супутників, що позитивно впливає на геометричне розташування і, відповідно, покращує точність визначення координат.

Відкритий простір – це ідеальне середовище для GNSS-спостережень, оскільки тут забезпечується максимальний доступ до супутників, а потенційні перешкоди зведені до мінімуму.

Проте, за умов обмеженого доступу до супутників, сумісне використання кількох GNSS-систем (GPS + ГЛОНАСС) дає відчутну перевагу, покращуючи точність та надійність вимірювань.

Це особливо важливо для геодезичних вимірювань, де найважливішими є висока точність та достовірність отриманих даних.

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. Rozh ABDULMAJED, RamazanAlpay Accuracy comparison between gps only and gps plus glonass in rtk and static methods, Asian Journal of Science and Technology Vol. 08, Issue, 11, pp.6697-6703, November, 2017

5. Чой, С., Чжан, С., Лахай, Ф. та Еру, П., 2013. Порівняння між точним позиціонуванням лише з GPS та комбінованим GPS+GLONASS, Journal of spatial science, 58 (2), 169-190.

6. Джеффри, К., 2015. Вступ до GNSS: GPS, GLONASS, Galileo та інші глобальні навігаційні супутникові системи, Eng., Novatel Inc, с. 6-60.

7. Клеусберг, А., 1990. Порівняння GPS та GLONASS, GPS world, 1 (6), 52-54.

8. Лейк, А., Рапопорт, Л. та Татарніков, Д., 2015. Супутникова GPS-геодезія, John Wiley & Sons, с. 72-87.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

« Порівняння точності визначення GNSS координат при застосуванні різних супутникових конфігурацій ».

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)