

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

Кафедра геодезії та землеустрою

Ільків Ярослав
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА
« Оцінка продуктивності позиціонування одно та двочастотних
спостережень різних систем GNSS »
(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Я. Ільків, студент групи ГЗз-21-1

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада)

(підпис) (дата)

проф. Микола ПРИХОДЬКО

(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.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА**

Ільків Ярослав

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Оцінка продуктивності позиціонування одно та двочастотних спостережень різних систем GNSS»

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. Методика обробки даних
2. Проведення досліджень
3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Методика обробки даних		
2	Проведення досліджень		
3	Результати дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Ільків Я.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ ***Перович Л.***

Анотація

Метою бакалаврської роботи є оцінка точності та стабільності кінематичного позиціонування в реальному часі з використанням двочастотних приймачів систем GPS та ГЛОНАСС, а також дослідження ефективності розв'язання фазових неоднозначностей у статичному та динамічному режимах.

Актуальність теми:

У сучасній геодезії та навігації ключову роль відіграє високоточне супутникове позиціонування в режимі реального часу (RTK).

При цьому об'єднання сигналів GPS та ГЛОНАСС дозволяє підвищити стійкість та надійність визначення координат у складних умовах, зокрема при частковому закритті горизонту чи слабкому сигналі.

Тема є актуальною через потребу в підвищенні точності позиціонування без значного подорожчання обладнання.

Наукова новизна:

У роботі вперше проведено порівняльний аналіз ефективності двочастотного кінематичного позиціонування систем GPS та ГЛОНАСС, зокрема в аспекті швидкості та стабільності розв'язання фазових неоднозначностей.

Отримано кількісну оцінку переваг комбінованого використання цих систем, що дозволяє суттєво зменшити час до досягнення фіксованого рішення навіть за високих граничних висот супутників.

Практична цінність:

Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення RTK-методик в інженерній геодезії, навігації безпілотних систем, моніторингу інфраструктури, а також в інших сферах, де необхідне надійне й точне позиціонування у реальному часі.

Об'єднане використання GPS та ГЛОНАСС дозволяє підвищити доступність фіксованих рішень і зменшити залежність від конкретної супутникової системи.

Ключові слова:

GPS, ГЛОНАСС, RTK, фазові неоднозначності, кінематичне позиціонування, статичний режим, висока точність.

Abstract

The purpose of the bachelor's thesis is to assess the accuracy and stability of real-time kinematic positioning using dual-frequency receivers of the GPS and GLONASS systems, as well as to study the effectiveness of resolving phase ambiguities in static and dynamic modes.

Topic relevance:

High-precision satellite positioning in real-time (RTK) plays a key role in modern geodesy and navigation.

At the same time, combining GPS and GLONASS signals allows for increased stability and reliability of determining coordinates in difficult conditions, in particular with partial horizon closure or weak signal.

The topic is relevant due to the need to increase positioning accuracy without significantly increasing the cost of equipment.

Scientific novelty:

The paper first conducted a comparative analysis of the effectiveness of dual-frequency kinematic positioning of the GPS and GLONASS systems, in particular in terms of speed and stability of resolving phase ambiguities.

A quantitative assessment of the advantages of the combined use of these systems was obtained, which allows significantly reducing the time to achieve a fixed solution even at high satellite altitudes.

Practical value:

The results of the study can be used to improve RTK methods in engineering geodesy, navigation of unmanned systems, infrastructure monitoring, as well as in other areas where reliable and accurate positioning in real time is required.

The combined use of GPS and GLONASS allows increasing the availability of fixed solutions and reducing dependence on a specific satellite system.

Keywords:

GPS, GLONASS, RTK, phase ambiguities, kinematic positioning, static mode, high accuracy.

Зміст

Вступ

1. Методика обробки даних

2. Проведення досліджень

2.1 Одночастотні спостереження

2.2 Двочастотне спостереження

2.3 Кінематичні випробування

3. Результати дослідження

3.1 Одночастотне спостереження

3.2 Двочастотне спостереження

Висновок

Список використаних джерел

Вступ

Високоточне позиціонування, зокрема двочастотне кінематичне позиціонування в реальному часі (RTK) GPS, за останній період продемонструвало себе як дієвий та перевірений часом інструмент.

Проте, простота використання та стійкість цієї технології здатні суттєво падати в непростих умовах, де не всі супутники видимі, наприклад, у глибоких кар'єрах, міських забудовах та річкових долинах.

Точність і стабільність позиціонування значно страждають через брак достатньої кількості супутників, потрібних для підтримки стабільного сигналу.

Ініціалізація одночастотного GPS RTK здатна зайняти кілька хвилин, що залежить від числа супутників для відстеження, довжини базової лінії та особливостей спостереження.

Це уповільнення накладає обмеження на використання даної технології в деяких сферах, зокрема, там, де потрібне надточне позиціонування за умов, коли наявні певні перешкоди, як-от обмежена видимість супутників чи низький рівень сигналу.

Разом з тим, швидкість старту роботи та стабільність отриманого результату виступають визначальними аспектами для впровадження цієї технології у практичне застосування, скажімо, в сільськогосподарському секторі, будівельній галузі, геодезії та картографії.

Водночас, зазначені проблеми можливо вирішити, вдавшись до одночасної роботи кількох систем GNSS.

Так, використання ГЛОНАСС спільно з GPS може суттєво покращити як доступність, так і надійність визначення місцезнаходження навіть в складних умовах.

ГЛОНАСС функціонує на основі FDMA (множинного доступу з частотним розділенням), що знаходить широке застосування у багатьох сферах, включно з будівництвом та суміжними галузями.

Система Galileo ще не досягла повної готовності, тому багатосупутникові RTK-рішення нині реалізуються шляхом комбінування даних з ГЛОНАСС та GPS.

Такий підхід дозволяє збільшити кількість доступних супутників, що безпосередньо впливає на точність визначення координат, а також скорочує час, необхідний для ініціалізації та запуску системи.

У рамках даного дослідження ми прагнемо з'ясувати ефективність та вірогідність визначення координат одно- та двочастотних кінематичних систем ГЛОНАСС та GPS, враховуючи різні обставини.

Додатково, буде розглянуто застосування актуальних способів аналізу даних з метою підвищення точності позиціонування.

Не дивлячись на те, що "чисті" одночастотні рішення не знайшли широкого практичного застосування, їх аналіз може надати інформацію про потенціал ГЛОНАСС RTK, та його вклад у поліпшення функціонування GPS RTK на даний час, а також у зменшення часу необхідного для старту ГЛОНАСС та GPS.

Ця комбінація може значно поліпшити якість позиціонування навіть в умовах слабого сигналу і обмеженої видимості супутників.

У цьому дослідженні було проведено аналіз швидкості й точності одночастотного кінематичного позиціонування, спираючись на дані від одно- та двочастотних систем ГЛОНАСС і GPS.

Вивчено їхню продуктивність в різних реальних сценаріях, з метою зробити висновки щодо можливості практичного застосування цих технологій у таких областях, як геодезія, картографія та транспортні системи.

На основі проведеної роботи сформовано рекомендації щодо доцільності використання даних технологій.

Такий підхід вважається ключовим для майбутнього розвитку технології RTK.

Він не лише сприяє підвищенню точності визначення координат, а й забезпечує більш стійкий та швидкий прийом сигналу, особливо в умовах з обмеженим доступом до даних.

1. Методика обробки даних

У дослідженні використовувався американський GNSS-приймач Trimble моделі Trimble R2 (див. рис. 1) з контролером сигма, що міг фіксувати дані в реальному часі з періодом вибірки в одну секунду.



Рисунок 1 GNSS-приймач Trimble R2 з контролером Sigma

Усі зібрані дані було опрацьовано з використанням RTK-моделі, застосовуючи метод подвійної різниці для визначення точності позиціонування.

Вибір на користь цієї моделі обумовлений її швидкістю обробки інформації та здатністю забезпечувати достовірні результати навіть за складних умов.

Оскільки частоти, що використовуються ГЛОНАСС (L1/L2: 1561,098 МГц та 1207,14 МГц) і GPS (L1/L2: 1575,42 МГц та 1227,60 МГц), не перетинаються, було застосовано окремі еталонні супутники для формування вимірювань по кожній системі.

Такий підхід мав на меті мінімізувати вірогідні похибки, що могли виникнути через взаємодію між двома сузір'ями.

Вплив атмосферних затримок сигналу, зокрема в тропосфері та іоносфері, на точність визначення положення, вважається мінімальним.

Це обумовлено тим, що найбільша базова лінія в рамках даного дослідження обмежена двома кілометрами.

Така відстань суттєво знижує ймовірність значного впливу атмосфери на отримані дані.[4]

При обробці даних, що містять невідомі параметри для кожного періоду спостережень, виникає тривимірний компонент базової лінії та цілочисельна неоднозначність.

Спочатку було проведено обчислення розв'язку та коваріаційної матриці істинної похибки, що критично важливо для досягнення високої точності одержаних даних.

Для коригування цілочисельного рішення було використано лямбда-метод, який дозволив збільшити надійність зібраних даних через виправлення потенційних похибок у визначенні неоднозначностей.

Після виправлення неоднозначностей, отримані розв'язки піддавалися перевірці з використанням тесту відношення на всіх етапах, за винятком двочастотного статичного тесту, де було застосовано значення 1.5.

Якщо зафіксоване рішення відповідало критерію співвідношення, відповідна невизначеність слугувала основою для обчислення фіксованого фундаментального розв'язку.[5]

Процедури забезпечення якості даних мали ключове значення в цьому дослідженні.

Вони сприяли виявленню помилок у вимірах коду та спостереженнях, що було необхідним для досягнення високоточної локалізації.

В рамках даної методології, для кожного випадку, де швидкість залишалася сталою, розраховували пропорцію епох, у яких успішно враховувалася невизначеність, від загальної кількості розглянутих епох.

Це дало змогу точно встановити ефективність одноепохального кінематичного позиціонування в процесі кожного проведеного випробування.

Помилкові фіксації визначали шляхом зіставлення з наперед встановленим "істинним" цілочисельним розв'язком, отриманим на основі всіх доступних даних.

Для оцінки кінематичного рішення додатково застосовувалося базове рішення, відповідним чином відкориговане з урахуванням невизначеності, із залученням усіх двійкових частот як ГЛОНАСС, так і GPS.

Це «справжнє» значення лягло в основу наступного аналізу здобутих результатів.

Відхилення та зміни у фазовому центрі не враховувались, адже на сьогодні відсутнє визначене калібрувальне значення для антен систем ГЛОНАСС та GPS.[4]

Вплив іоносферної затримки теж брався до уваги при обчисленні вихідного розв'язку, що дало змогу виявити можливі похибки через взаємодію сигналів з різних частотних діапазонів.

Ці помилки розглядали як невідомі невизначеності та оцінювали разом з іншими параметрами задля подальшого коригування.

До того ж, враховувався вплив різноманітних погодних умов та перешкод на точність одержаних результатів.

Найголовніше - система демонструє високу працездатність навіть у місцях з обмеженим сигналом, як от в умовах міської забудови чи поблизу висотних споруд, де GPS-технології часто дають збої; застосування ГЛОНАСС спільно з GPS, особливо при зменшеній видимості космічних апаратів, може суттєво збільшити продуктивність та стабільність.

Даний метод не тільки генерує достовірну інформацію, а й виявляє стійкість до зовнішніх чинників, котрі здатні спотворювати точність позиціонування, серед них: атмосферні явища, перешкоди та обмежений огляд супутників.

2. Проведення досліджень

У Львові, з квітня по червень 2018 року, було організовано три стаціонарні випробування (тести 1, 2 та 3).

Максимальне значення висоти прийому сигналу в кожному з цих тестів було зафіксовано на рівні 100 умовних одиниць.

Таке рішення забезпечувало оптимальне середовище для збору інформації та мінімізувало будь-які можливі перешкоди під час процедури вимірювання.

У Таблиці 1 подано вичерпні відомості про параметри кожного окремого тесту.

Тут зібрані ключові дані: координати пунктів спостереження, тип космічного апарату, тривалість спостережень та інші суттєві фактори, що мають безпосередній вплив на точність і вірогідність отриманих результатів.[4]

Ця деталізована інформація дає змогу більш точно оцінити контекст проведення кожного випробування та, відповідно, рівень точності зібраних даних.

Таблиця 1 Деталі даних тесту

Номер тесту	Дата	База	Ровер	Довжина базової лінії (м)	Епохи	Середній показник K_p
1	06.04.2018	02	01	2.186	117.582	1.9
2	09.05.2018	01	03	1.987	86.875	2.7
3	04.06.2018	02	02	2.204	19.432	2.8

Як приклад другого тесту, на малюнку 2 представлено схеми небесних сфер, які демонструють розташування супутників систем ГЛОНАСС та GPS в ході експерименту.

Дані графічні зображення ілюструють розповсюдження супутників на небосхилі в різні проміжки часу, що є ключовим аспектом для оцінки похибки визначення координат.

На малюнку 3 зображено показники, що обумовлюють зміну точності для ГЛОНАСС, GPS та комбінованого використання ГЛОНАСС та GPS.

Серед них: EDOP (коефіцієнт похибки за висотою), NDOP (коефіцієнт похибки на північ), UDOP (коефіцієнт похибки по вертикалі), інколи визначається як VDOP (Vertical Dilution of Precision - вертикальне розмивання точності).[4]

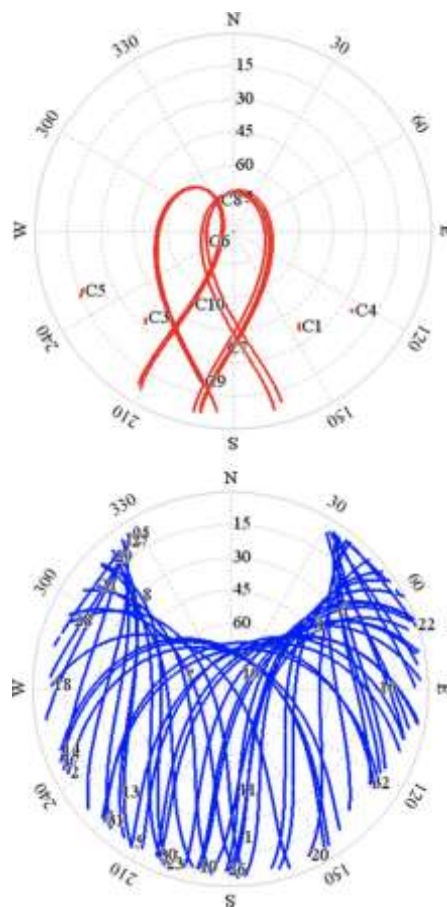


Рисунок 2 Графіки видимості апаратів ГЛОНАСС (угорі) та GPS (внизу).

Ці коефіцієнти виступають ключовими індикаторами, що визначають прецизійність визначення координат у різних площинах, дозволяючи аналізувати результативність інтегрованої системи та даючи уявлення про те, як варіації положення космічних апаратів у зоряному небі впливають на чіткість вимірювань при синхронному застосуванні двох навігаційних технологій.[4]

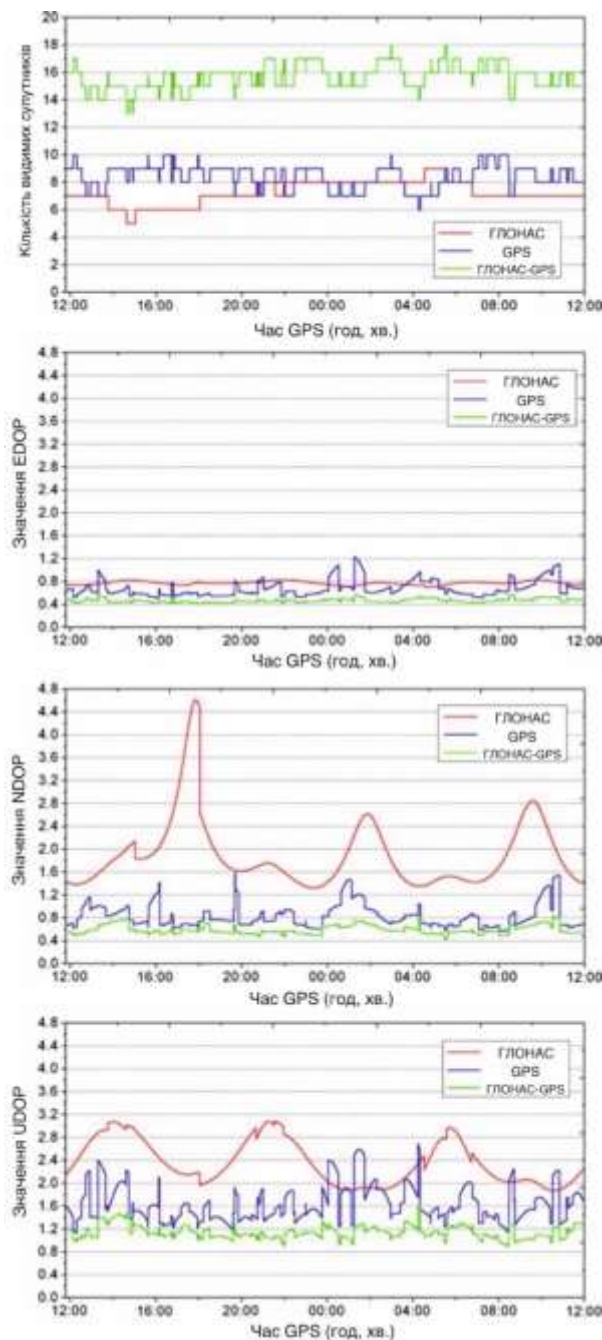


Рисунок 3 Коефіцієнти варіації точності у тесті 2.

Як і VDOP, показники EDOP та NDOP служать для відображення зниження точності позиціонування у напрямках, що відповідають сходу-заходу та півночі-півдню, та більш чітко демонструють геометрію розташування супутників ГЛОНАСС.

Як ілюструє рисунок 3, діапазон видимих супутників коливається: для системи GPS – від 6 до 10, а для ГЛОНАСС – від 5 до 9.

Внаслідок інтеграції ГЛОНАСС та GPS кількість видимих супутників помітно збільшується, досягаючи діапазону 13-18.

Це майже двократне збільшення кількості доступних супутників, якщо порівнювати кожен систему окремо.

У випадку застосування лише GPS середні показники EDOP, NDOP та UDOP складають відповідно 0,68, 0,83 та 1,63.[4]

Після об'єднання даних ГЛОНАСС та GPS ці показники зазнають покращення, зменшуючись до 0,46, 0,59 та 1,14 відповідно.

Це вказує на істотне поліпшення точності визначення позиції.

Відносна різниця, яка характеризує покращення EDOP, NDOP та UDOP, становить 32,4%, 28,9% та 30,1% відповідно.

Це підтверджує факт, що об'єднання даних з ГЛОНАСС та GPS суттєво оптимізує позиціонування в просторі.

Додатково, середні показники EDOP, NDOP і UDOP для системи ГЛОНАСС сягають лише 0.77, 1.89 і 2.36 відповідно, що є менш вигідними, порівнюючи з показниками GPS.

Зокрема, величина NDOP для ГЛОНАСС значно переважає показник EDOP, тоді як для GPS ці показники майже ідентичні.

Висновком є те, що попри меншу кількість видимих супутників, геометрія розташування супутників ГЛОНАСС є менш вдалою, ніж у GPS, і може впливати на точність визначення координат в окремих ситуаціях.[7]

2.1 Одночастотні спостереження

Для визначення результативності одночастотного однопроменевого кінематичного позиціонування, застосовано чотири різних методики:

Схема 1: одночастотна система ГЛОНАСС (L1);

Схема 2: одночастотна система GPS (L1);

Схема 3: одночастотне поєднання ГЛОНАСС-GPS (обидві системи, L1);

Схема 4: двочастотна система GPS (L1/L2).

Показники частоти та хибних визначень позицій для кожної з представлених методик при одноперіодних спостереженнях, зібрані в таблиці 2.

Таблиця 2 Фіксовані та неточні фіксовані показники (у відсотках)

Номер тесту	Схема 1		Схема 2		Схема 3		Схема 4	
	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані
1	15.32	87.34	32.55	15.43	97.34	0.00	98.55	0.00
2	32.45	25.54	67.77	2.33	99.12	0.00	99.34	0.00
3	14.45	85.67	13.78	35.55	62.87	0.00	81.56	0.00

Значення коефіцієнтів для Схеми 3 та Схеми 4, отримані в Тесті 3, візуалізовані на рисунку 3.

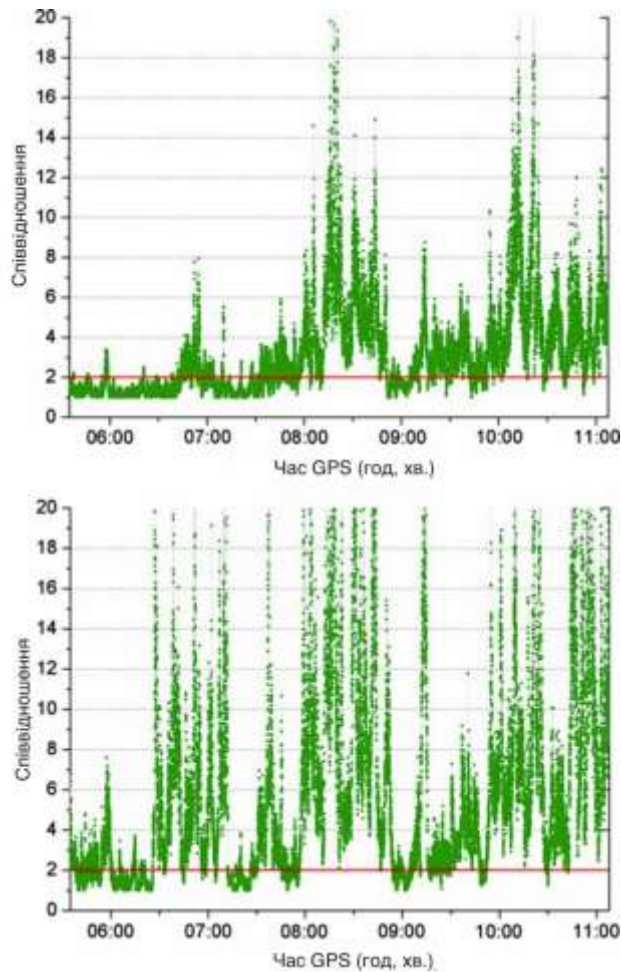


Рисунок 3 Значення співвідношення для Схеми 3 (вгорі) та Схеми 4 (внизу) в тесті 3

Для кожного з названих методів здійснено скрупульозні виміри та проаналізовано критичні параметри, зокрема сталість швидкості й безперебійність роботи алгоритму для кожного з методів.

До уваги береться кількість доступних супутників та конфігурація перешкод, що чинять прямий вплив на точність визначення координат.

У разі одночастотних систем ГЛОНАСС та GPS (схеми 1 та 2) ефективність аналізується на основі показників лише одного частотного діапазону (L1).[4]

На відміну від цього, схема 3, яка поєднувала сигнали ГЛОНАСС та GPS (використовуючи L1 діапазон обох систем), продемонструвала збільшену кількість доступних супутників.

Це, в свою чергу, призвело до підвищення надійності та точності визначення положення.

Проте, двочастотна система позиціонування на базі GPS у схемі 4 (L1/L2) виявила суттєві переваги щодо точності й стабільності результатів. Застосування двох частот значно зменшило вплив іоносферних затримок сигналу.

Для кожної розглянутої схеми були визначені відповідні коефіцієнти корекції та періоди виправлення помилок.

Це дозволило порівняти продуктивність кожного з методів за різних умов доступності супутників та геометрії спостережень.

Результати для кожного методу представлені в таблиці 2.

Це дає змогу глибше зануритися у здобуті дані та визначити, які саме фактори суттєво впливають на точність та стійкість визначення положення в реальному світі.

Як демонструє таблиця 2, навіть за умови вкрай короткої базової лінії (експеримент В), показник стабілізації для одночастотного позиціонування ГЛОНАСС сягає лише 36,48%.

При цьому відсоток епох з некоректною стабілізацією становить 27,53%.

Це є показником того, що легкість застосування та надійність на даний момент не можуть бути гарантовані з наявним сузір'ям.

Для надзвичайно коротких базових ліній рівень одночастотної GPS-фіксації становить 69,92%, а частка помилково зафіксованих епох обмежується лише 2,77%. [4]

Однак, за довжини базової лінії 2 км (тести 1 та 3) спостерігаємо низький рівень доступності й надійності.

Це вказує на недостатню ефективність системи в умовах одночасового кінематичного позиціонування.

Зіставлення графіків 2 і 3 чітко демонструє, що інтеграція систем ГЛОНАСС і GPS суттєво покращує якість одночастотних спостережень.

Частота коректних і некоректних визначень у разі інтеграції практично ідентична показнику двочастотної GPS, що підтверджує високу ефективність такого рішення у всіх проведених тестах.

Отже, реалізація одночастотного кінематичного позиціонування на базі систем ГЛОНАСС та GPS за одну епоху можлива, за умови використання короткої довжини базової лінії. Ініціалізація одночастотного RTK на ГЛОНАСС-GPS відбувається майже миттєво, вимагаючи лічені секунди.[4], [6]

На рисунку 3 демонструється, що більшість показників швидкості знаходяться нижче порогового значення 2 в інтервалі з 06:00 до 08:00 годин (відповідно з 14:00 до 16:00 за місцевим часом), що може бути пояснено інтенсивною іонізацією, котра спостерігається в другій половині дня за місцевим часом.

Аналогічна картина виявилася для коефіцієнтів одноепохових коригувань для випробувань 1 та 3.

Обидва тести використовували схожі вихідні дані, проте тест 1 проводився у квітні ($K_p=2.1$), коли вплив іоносфери був помірним, а тест 3 – в червні ($K_p=3.3$), під час більшої активності іоносфери; коефіцієнт корекції для тесту 3 виявився менш ефективним, ніж для тесту 1.

Крім продуктивності в окремі епохи, у дослідженні також вивчалась точність базового одночастотного односеансового розв'язку для корекції.

Похибки позиціонування у напрямках Схід (E), Північ (N) та Верх (U), отримані одночастотними односеансовими рішеннями ГЛОНАСС-GPS у тестах 1, 2 та 3 порівняно з базовим рішенням, представлені на рисунку 4.[4]

Ці дані дозволяють глибше оцінити вплив різноманітних чинників, зокрема іоносферної активності, на точність визначення позиції в залежності від специфіки умов експерименту.

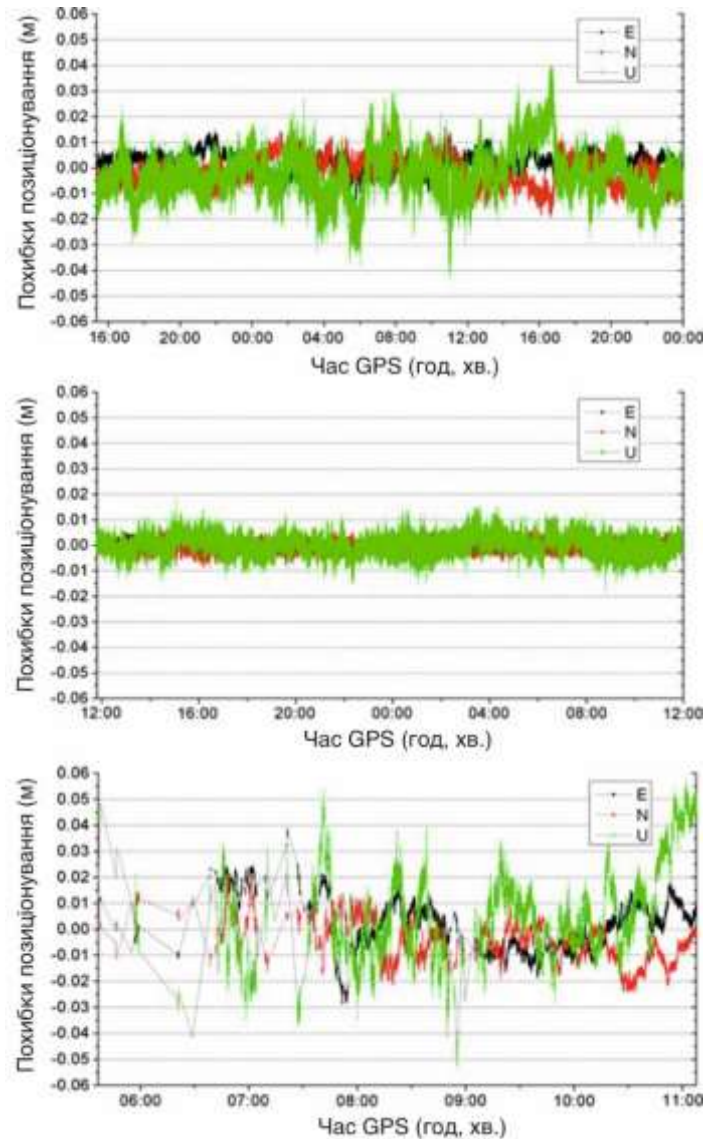


Рисунок 4 Похибки визначення координат для одночастотних систем, які працюють одночасно з ГЛОНАСС та GPS, при закріплених умовах (згори: випробування 1; посередині: випробування 2; внизу: випробування 3).

На рисунку 4 продемонстровано, що похибки визначення координат для фіксованих одночастотних розв'язків систем ГЛОНАСС-GPS, як

правило, не перетинають позначку в 2 см по горизонталі та 4 см по вертикалі.

Отримані дані свідчать про можливість досягнення високої точності визначення координат при односеансових спостереженнях з використанням інтегрованої системи.

В таблиці 3 знаходимо підтвердження, що середньоквадратична похибка (СКП) одночастотного статичного рішення ГЛОНАСС-GPS на гранично короткій базовій лінії варіюється близько 0,2 см в горизонтальному вимірі та 0,4 см у вертикальному.[4],[6]

Це вказує на постійно малу похибку, що підтверджує доцільність застосування подібних систем для надзвичайно точних вимірювань в умовах реального середовища.

Таблиця 3 Найменша, найбільша та середньоквадратична похибка позиціонування (см) одночастотних фіксованих ГЛОНАСС-GPS рішень

Напрямок	Тест 1			Тест 2			Тест 3		
	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП
Схід (E)	-1.32	1.43	0.41	-0.51	0.52	0.12	-2.81	3.79	1.00
Північ (N)	-1.95	1.76	0.56	-0.84	0.79	0.15	-2.35	2.45	0.98
Вгору (U)	-4.32	4.05	0.96	-1.71	1.72	0.31	-5.12	5.41	1.65

Для коротких вихідних ліній, кореневе значення середньоквадратичної помилки (RMS) для тесту 2 коливається приблизно в межах 0,5 см по горизонталі та до 1 см по вертикалі.

Під час проведення тесту 3, показники RMS похибки виявились дещо вищими, аніж під час тесту 1, однак залишаються в межах 1-2 см, як у горизонтальному, так і у вертикальному вимірах.

2.2 Двочастотне спостереження

Для оцінки продуктивності одноперіодних спостережень на двох частотах розглянуто три варіанти:

1. Виключно ГЛОНАСС (L1/L2);
2. Виключно GPS (L1/L2);
3. Поєднання ГЛОНАСС та GPS (L1/L2 в кожній системі).

Результати тестів 1 та 2 показали, що ключова перевага мульти-GNSS полягає у суттєвому збільшенні доступності та точності визначення координат, особливо на значних висотах.

Для моделювання нетривіальних умов оцінювалися стабільні та змінні швидкості ехо-сигналу в умовах різної висоти відсікання (100, 150, 200, 250, 300, 350 та 400 м).

Підсумки цих двочастотних спостережень одиночного ехо відображено у таблицях 4 та 5 для тестів 1 та 3 відповідно.[4]

Таблиця 4 Коригування та помилкові корекції двочастотних одноперіодних значень AR у тесті 1.

Гранична висота (град.)	ГЛОНАС		GPS		ГЛОНАС - GPS	
	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані
10	95.65	0.05	98.22	0.03	99.21	0.00
15	96.12	0.08	99.33	0.02	100.00	0.00
20	93.43	0.29	98.65	0.01	100.00	0.00
25	88.97	0.89	97.31	0.12	100.00	0.00
30	64.65	1.99	92.87	0.72	100.00	0.00
35	25.27	15.45	74.56	1.53	99.76	0.04
40	2.99	6.98	51.43	0.67	90.97	1.57

Таблиця 5 Спостереження з постійною подвійною частотою в тесті 3.

Гранична висота (град.)	ГЛОНАС		GPS		ГЛОНАС - GPS	
	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані	Фіксована	Неправильно фіксовані
10	85.65	2.05	78.62	4.03	77.21	2.70
15	86.12	2.08	89.73	0.43	95.34	0.10
20	91.43	0.79	96.35	0.04	100.00	0.00
25	85.47	0.29	92.91	0.13	100.00	0.00
30	84.65	7.99	87.17	0.12	100.00	0.00
35	35.27	6.95	81.96	0.43	99.76	0.00
40	-	-	61.83	0.47	90.97	0.57

З таблиць 4 і 5 випливає, що стабільна швидкість і швидкість помилкової фіксації при встановленні положення одностотного сигналу ГЛОНАСС з двома частотами-носіями наближаються до GPS, якщо порогова висота знижується до 250 метрів.[4]

Це створює підґрунтя вважати, що сучасні двочастотні RTK-рішення, що використовують сузір'я ГЛОНАСС, здатні ефективно функціонувати в умовах відкритого неба.

Втім, зі збільшенням висоти над рівнем моря ефективність ГЛОНАСС різко знижується, оскільки більшість супутників стає недоступними; стабільна швидкість комбінованої системи ГЛОНАСС/GPS відчутно перевищує показники окремих систем у більшості випадків, за винятком тестового сценарію 3, де висота відсікання складає 100 метрів.

Зі зростанням висоти відсікання, ефективність спільної роботи ГЛОНАСС та GPS стає дедалі виразнішою.[4]

Коефіцієнт корекції ГЛОНАСС-GPS зберігає показник вище 90% навіть при висоті відсікання у 400 метрів. Відсоток помилкових корекцій,

загалом, менший, ніж при використанні кожної системи окремо, як і було передбачено, окрім висоти у 400 метрів.

Кількість помилкових даних близька до нуля для висот відсікання менше 300 метрів і не перевищує 2% на висоті 400 метрів.

Отримані дані вказують на значні перспективи застосування ГЛОНАСС - GPS RTK в міських умовах, де супутники, що знаходяться низько над горизонтом, можуть бути заблоковані спорудами чи іншими перешкодами.

Помилки визначення місцезнаходження для двочастотного однопроменевого стаціонарного розв'язку, що стосуються тестів 1 та 3, зображено на рисунках 5 та 6, відповідно.[4]

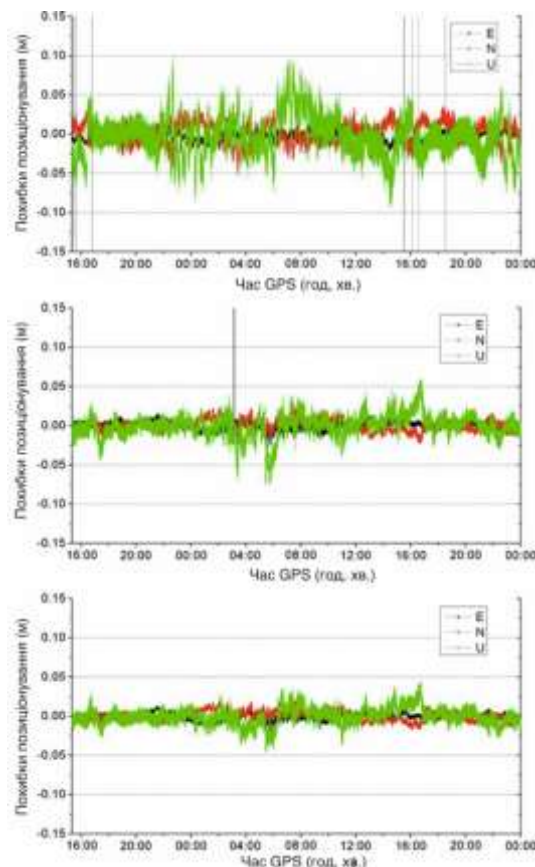


Рисунок 5 Похибки визначення координат (зверху: ГЛОНАСС, в середині: GPS, внизу: ГЛОНАСС-GPS) для двочастотного фіксованого розв'язку у тесті 1.

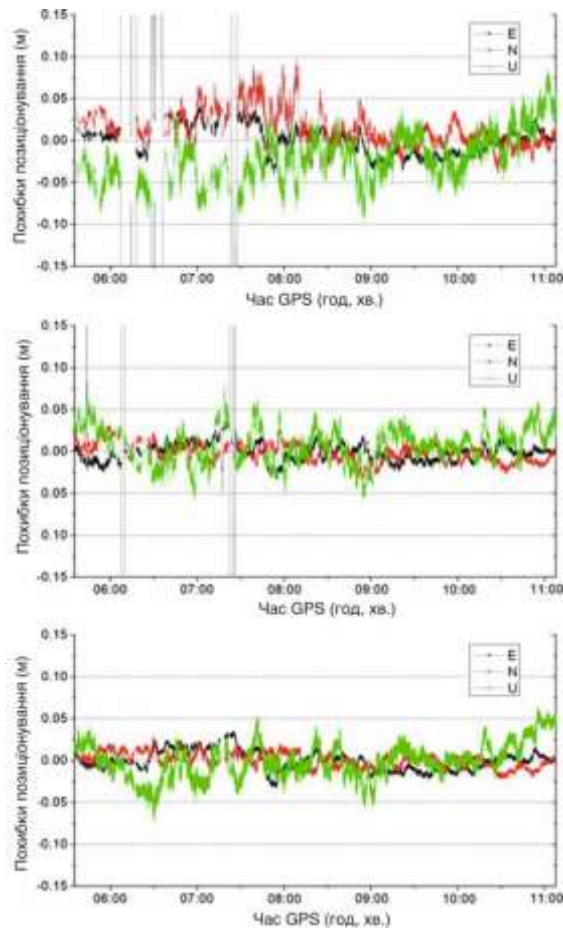


Рисунок 6. Похибки визначення координат для двочастотного стаціонарного розв'язку в тесті 3 (згори: ГЛОНАСС, посередині: GPS, знизу: ГЛОНАСС-GPS).

Ці результати дають можливість проаналізувати коректність одночастотного двопроменевого спостереження в різних ситуаціях та вивчити вплив коригування висоти відсікання на якість отриманих даних.

Достовірність обчислень на різних рівнях обрізування демонструє помітне покращення при застосуванні об'єднаних систем ГЛОНАСС та GPS, у порівнянні з окремими, зокрема, коли висота відсікання є значною.

Це вказує на перспективу їх використання в специфічних міських середовищах.

Таблиця 6 Мінімальна, максимальна та середньоквадратична похибка визначення координат (см) двочастотного фіксованого рішення тесту 1.

Напрямок	Тест 1			Тест 2			Тест 3		
	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП
Схід (E)	-2.32	1.43	0.51	-2.51	1.52	0.42	-1.81	1.55	0.24
Північ (N)	-5.95	3.76	1.56	-3.84	2.79	0.65	-1.35	2.15	0.58
Вгору (U)	-9.32	9.05	2.96	-7.71	5.72	1.71	-4.12	4.41	1.05

Таблиця 7 Мінімальна, максимальна та середньоквадратична похибка визначення координат (см) двочастотного фіксованого рішення тесту 3.

Напрямок	Тест 1			Тест 2			Тест 3		
	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП	мін	макс	СКП
Схід (E)	-4.32	4.43	1.41	-3.51	3.52	1.12	-3.81	3.51	1.18
Північ (N)	-3.95	9.76	2.56	-3.84	3.79	1.15	-2.85	2.69	0.93
Вгору (U)	-9.62	8.05	3.96	-5.71	7.72	2.31	-7.12	6.47	2.15

З аналізу, що ілюструють рисунки 5 та 6, а також дані з таблиць 6 і 7, впливають такі спостереження.

За інформацією з рисунків 5 та 6, простежуються певні систематичні відхилення у північній (N) та верхній (U) складових для рішення, що використовує ГЛОНАСС.

Проте, ці похибки переважно коливаються в межах ± 5 см, а іноді можуть досягати ± 10 см для випробувань під номерами 1 та 3.

Це дозволяє стверджувати, що точність вимірювань у вказаних напрямках є задовільною для різноманітних практичних застосувань, але не слід забувати про потенційні систематичні похибки, спричинені обмеженнями супутникової конфігурації.[4],[5]

У тестах під номерами 1 та 3, одночасні фіксовані розв'язки ГЛОНАСС показали меншу точність, ніж GPS, відносно східного, північного та вертикального напрямків.

Це особливо помітно у північному та висхідному вимірах.

У першому тесті, похибка складала: 0,61 см на схід, 1,09 см на північ та 2,43 см по вертикалі.

У третьому тесті відповідні показники: 1,68 см на схід, 2,50 см на північ та 3,52 см вгору.

Отримані дані відповідають загальновідомій тенденції – північна складова ГЛОНАСС поступається в точності східній.

Це обумовлено особливостями розташування орбіт супутників ГЛОНАСС, що демонструє рисунок 2, де вони зображені з майже фіксованим положенням.[7]

Проте, комбінування даних GPS та ГЛОНАСС може значно покращити загальну точність визначення координат, хоча існують випадки, коли це не працює оптимально.

Наприклад, у першому випробуванні середньоквадратична похибка GPS при позиціонуванні зазнала зменшення: з 0,50 см, 0,68 см та 1,41 см до 0,43 см, 0,57 см і 1,05 см, відповідно у східному, північному та вертикальному напрямках.

Відсоток відносного покращення у кожному з цих напрямків становив 14,0%, 16,2% та 25,5%.

У третьому тесті спостерігалось поліпшення у кожному напрямку: - 11,7%, 16,7% та 4,9%.[4]

Сумарно, тест 1 покращив точність на 23%, а тест 3 – на 4%.

Попри суттєве покращення, ці результати не повністю узгоджуються з результатами DOP.

Проаналізовані дані надали можливість порівняти точність визначення координат різними системами, а також продемонстрували залежність точності від часу, геометрії супутників та навколишніх умов.

Випробування розгорталися на відкритому просторі, що дозволило визначити можливості кожної навігаційної системи у забезпеченні стійкого з'єднання із супутниками на значних відстанях.

Згідно з ілюстрацією на малюнку 8, об'єднана система ГЛОНАСС та GPS демонструє помітно більшу кількість супутників для моніторингу, що сприятливо позначається на точності та стабільності визначення місцезнаходження.[4]

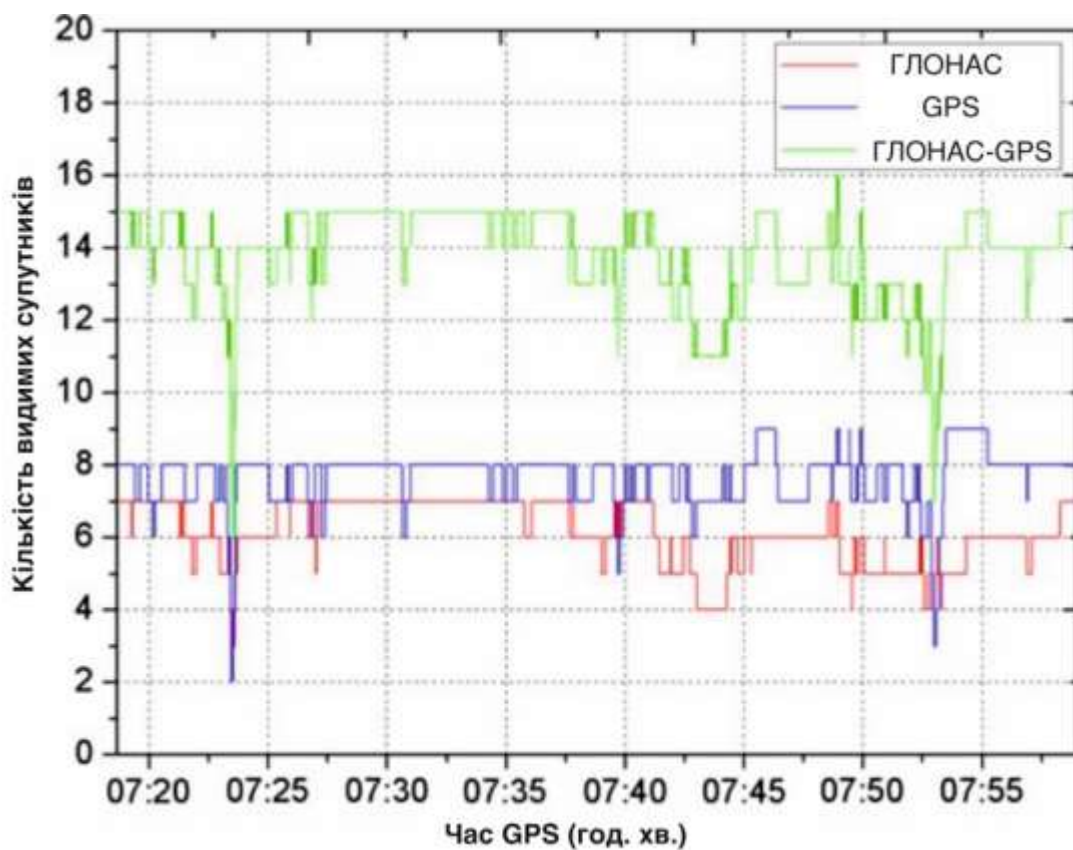


Рисунок 8 Кількість зафіксованих супутників у процесі кінематичного випробування.

У порівнянні з роботою лише з однією системою, скажімо, ГЛОНАСС чи GPS, об'єднання зусиль обох мінімізує вплив атмосферних факторів та явищ іонізації, тим самим зменшуючи похибки у визначенні координат.

Додатково, одночасне відстеження більшої кількості супутників створює кращу геометричну конфігурацію, що безпосередньо впливає на точність отриманих вимірювань, підвищуючи їх загальну надійність.

Підсумовуючи, комбіновані системи, що використовують і ГЛОНАСС, і GPS, демонструють стабільну та надійну роботу навіть у важких умовах, наприклад, при обмеженій видимості супутників обох систем, забезпечуючи більш стійкі результати.[7]

Ці інформаційні матеріали мають критичне значення для впровадження технології GNSS у широкому спектрі сфер: геодезії, складанні карт, будівництві, транспорті.

Там, де високоточне і стабільне визначення координат становить основу успішної діяльності.

Випробування кінематичної невизначеності створили сприятливі умови для однозначного розв'язання цілочисельної неоднозначності та дозволили оцінити результати одноепохальних рішень з врахуванням всієї двочастотної інформації від систем ГЛОНАСС та GPS.

Знайдені епохальні розв'язки послугували фундаментом для аналізу точності одноразових фіксованих рішень.

Згідно з візуалізацією на рисунку 8, у часові інтервали 07:23 та 07:53 спостерігалось зменшення кількості супутників ГЛОНАСС і GPS до чотирьох.[4]

Причиною стало переривання сигналів внаслідок перешкод на шляху їх поширення.

Це зумовлює неможливість визначення місцезнаходження, використовуючи лише одну систему у конкретний момент часу.

Проте, комбінована система, що використовує ГЛОНАСС та GPS, гарантує мінімум 6 супутників.

Це, своєю чергою, забезпечує надійне позиціонування навіть тоді, коли кожна з систем, розглянута окремо, не може забезпечити необхідну кількість супутників для точного визначення координат.

Отже, комбіноване використання ГЛОНАСС та GPS стає вигідним з точки зору доступності та стійкості визначення місця знаходження, оскільки дозволяє збалансувати недоліки окремих систем та гарантувати безперебійну роботу навіть в умовах з обмеженим сигналом.

3. Результати дослідження

3.1 Одночастотне спостереження

У таблиці 8 подано кількість епох з точним одноточковим позиціонуванням, а також показники успішних фіксацій та помилкових фіксацій, отримані під час спостережень в цих епохах.

Це дає змогу оцінити ефективність роботи системи в умовах кінематичного тестування.

Успішні фіксації свідчать про стабільність визначення положення, натомість, відсутність фіксації вказує на епохи, коли системі не вдалося забезпечити точне позиціонування, що могло бути зумовлено перешкодами або недостатньою кількістю супутників для надійного визначення координат.[4]

Таблиця 8. Частота фіксації та помилкової фіксації для одночастотних спостережень одиночних сигналів.

	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 4
Кількість епох	2.442	2.421	2.507	2.345
Фіксована (%)	22.9	20.6	64.8	81.9
Неправильно фіксована (%)	88.6	65.9	4.2	0.6

На малюнку 9 чітко видно, що переважна більшість похибок у визначенні позиції на схід, північ і вгору для одночастотних, одночасних стаціонарних рішень ГЛОНАСС-GPS не перевищує декількох сантиметрів.

Проте, в окремих випадках спостерігаються значні відхилення, особливо на північному напрямку.

Це може бути зумовлено не лише геометрією розташування супутників, а й атмосферними впливами, зокрема, змінами в іоносфері та тропосфері.

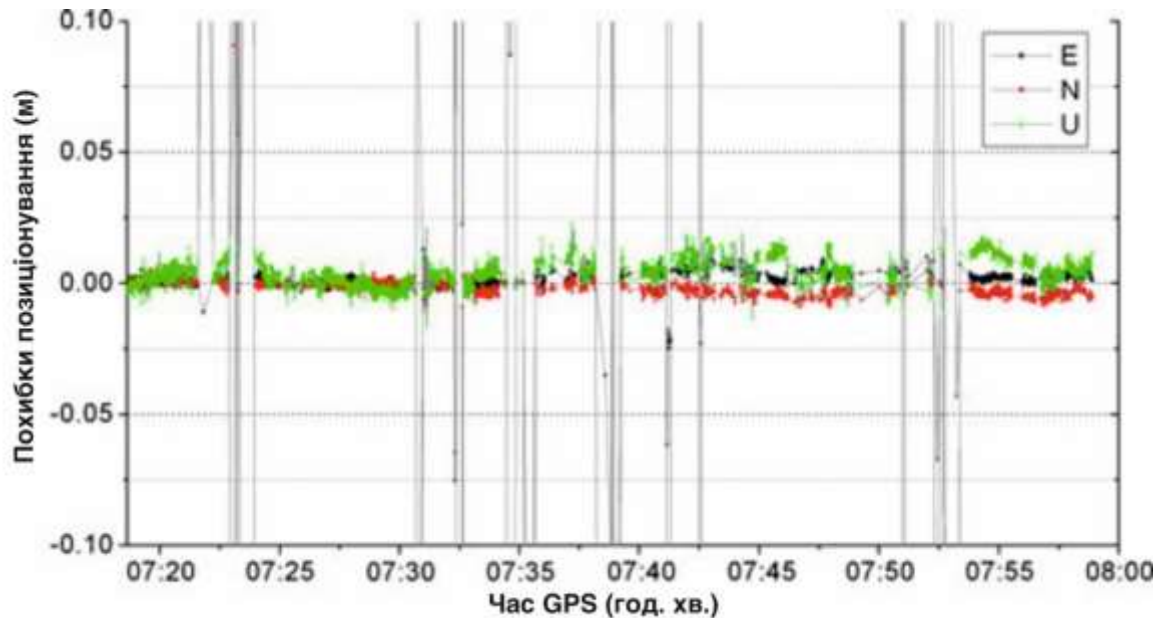


Рисунок 9 Похибки позиціонування в одночастотних стаціонарних рішеннях ГЛОНАСС/GPS для кінематичних випробувань.

Ці обставини часто стають причиною нетривких змін у точності визначення координат.

В цілому, все ж, стабільність визначення місцезнаходження з використанням комплексної системи ГЛОНАСС-GPS демонструє себе добре, гарантуючи високу точність при одночасних обчисленнях, особливо на невеликих відстанях між пунктами.

Отримані дані підкреслюють високу продуктивність системи ГЛОНАСС-GPS у реальних умовах, коли наявність численних супутників різних систем забезпечує значну точність, зокрема, в умовах міської забудови та на значних дистанціях, де інші системи можуть мати обмеження через перешкоди або перевантаження сигналу.[4]

Згідно з таблицею 8, рівень стабільності при спостереженнях за допомогою ГЛОНАСС-GPS на одній частоті сягає 62,3%, що є показником удвічі вищим, ніж для окремо взятих систем ГЛОНАСС або GPS.

Однак, цей показник ще поступається двочастотному GPS, котрий демонструє до 82,1%.

Це вказує на вагомій переваги двочастотного відстеження.

Середньоквадратична похибка, що визначається на основі помилок позиціонування, наведена на рисунку 9.

У випадку одноепохального фіксованого рішення системи ГЛОНАСС-GPS, похибки в напрямках на схід (X), північ (Y) та вгору (Z) відповідно становлять: 0,32 см, 0,31 см та 0,70 см.

Ймовірно, це обумовлено меншою видимістю супутників та певними атмосферними умовами, проте точність досить висока, хоча спостерігаються більші похибки у вертикальному напрямку.

3.2 Двочастотне спостереження

Для проведення кінематичних випробувань на двох частотах було відібрано три з вищеназваних варіантів одночастотних спостережень.

Дані двочастотних спостережень з використанням одного променя представлено в таблиці 9.

На рисунку 10 зображено похибки визначення положення систем ГЛОНАСС та GPS у напрямках: східному (X), північному (Y) та вертикальному (Z) для двочастотного стаціонарного рішення з одним променем.

Вважається, що використання двох частот дозволить отримати більш точні результати, оскільки це зменшує вплив похибок, пов'язаних зі зсувами фаз, та загалом підвищує точність позиціонування.

Таблиця 9. Частота фіксації сигналу та показники помилкових фіксацій для експериментів з кінематикою на двох частотах.

	ГЛОНАС	GPS	ГЛОНАС - GPS
Кількість епох	2.332	2.321	2.437
Фіксована (%)	72.9	81.6	94.8
Неправильно фіксована (%)	4.6	0.9	0.5

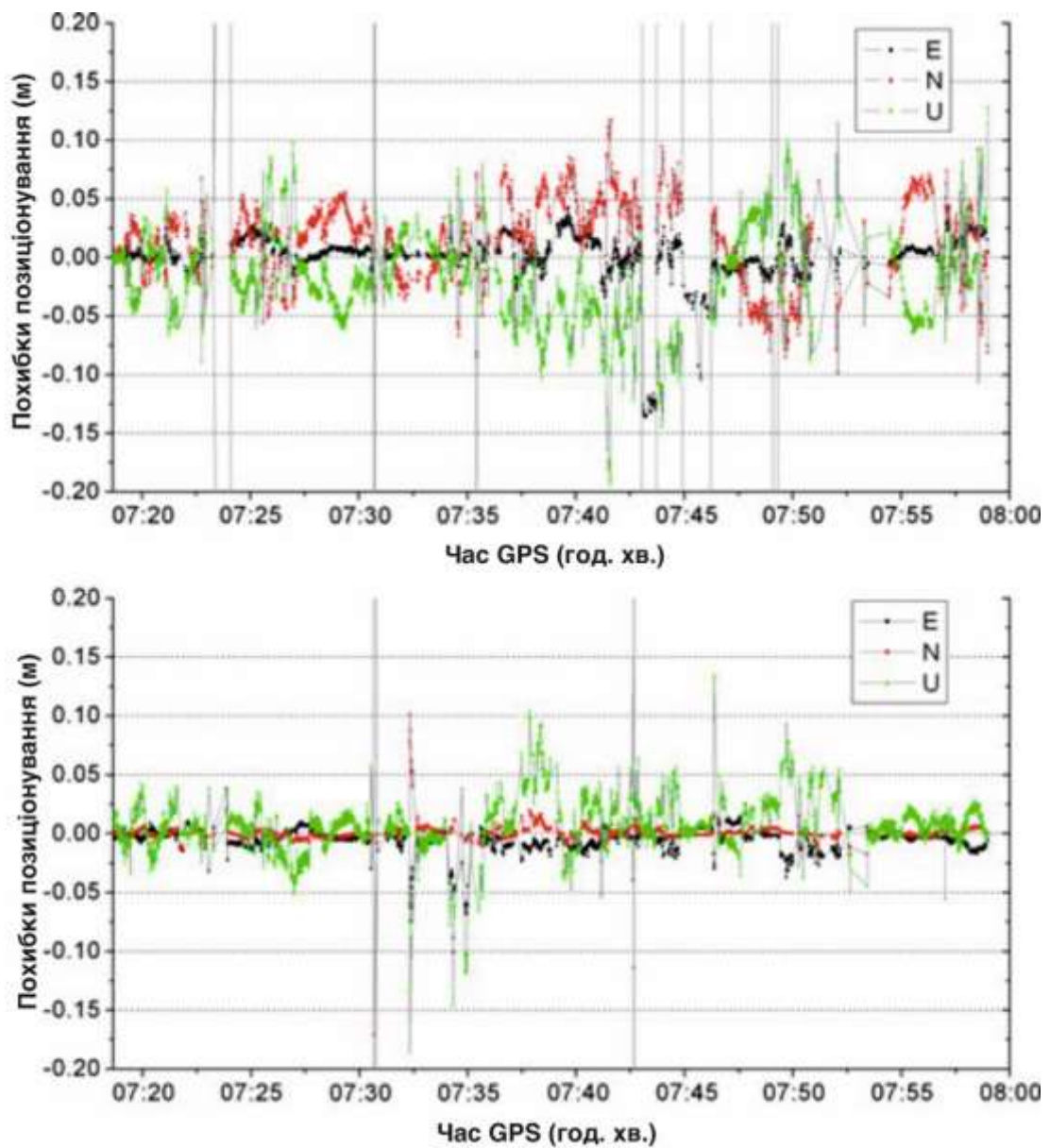


Рисунок 10 Двочастотні, сталі похибки визначення місця розташування ГЛОНАСС (зверху) та GPS (внизу).

З таблиці 9 стає очевидним, що швидкість усталення сигналу при одночасному використанні двочастотних сигналів ГЛОНАСС та GPS значно вища, ніж при окремому використанні ГЛОНАСС або GPS.

Так, показники становлять 78,5% для ГЛОНАСС і 82,1% для GPS, тоді як в інтегрованій системі ГЛОНАСС-GPS цей параметр зростає до 94,2%, а кількість помилкових визначень обмежена всього 0,7%.

З цього випливає, що поєднання ГЛОНАСС і GPS не лише збільшує зручність використання, а й суттєво підвищує достовірність визначення координат при двочастотних спостереженнях.[4]

Середні квадратичні похибки позиціонування, що базуються на даних, наведених на рисунку 10, демонструють значне покращення точності.

Для системи ГЛОНАСС величина похибок у напрямках E, N та U складає відповідно 1,22 см, 3,55 см та 4,18 см.

Водночас, для GPS ці значення менші: 0,97 см, 0,49 см та 2,51 см. Це чітко вказує на те, що GPS показує суттєво кращу точність, ніж ГЛОНАСС, особливо у північному та вертикальному вимірах.[4]

Цей факт додатково підкреслює переваги спільного використання ГЛОНАСС та GPS.

Сумісне функціонування двох систем призводить до значного зменшення похибок, що в свою чергу покращує точність кінематичних вимірювань.

Інтегрований двочастотний моніторинг ГЛОНАСС та GPS демонструє значне покращення точності визначення позиції.

Це стає надзвичайно важливим у випадках, коли критичними вимогами є висока надійність та точність, наприклад, у геодезії, навігації та картографії.

Згідно з отриманими даними, комбіноване використання вказаних систем не тільки прискорює процес стабілізації, а й гарантує надійне позиціонування навіть у непростих обставинах.

Зокрема, у випадках, коли наявні перепони чи інші чинники знижують доступність обох сузір'їв (як ГЛОНАСС, так і GPS), їх інтеграція здатна нівелювати втрату сигналу, забезпечуючи безперервне та високоточне визначення місця розташування.

Це є особливо корисним в умовах міської забудови, де висотні будівлі можуть блокувати сигнали від супутників, або ж в гірській місцевості, де складний рельєф ускладнює процес відстеження.

Окрім того, дані кінематичних досліджень демонструють відмінну стабільність двочастотних рішень в нестабільних середовищах, та їх здатність зберігати точне визначення координат навіть в важкодоступних ситуаціях.[5]

Завдяки цьому двочастотні спостереження ГЛОНАСС-GPS є чудовим засобом для швидкого та точного створення карт, а також для реалізації проєктів з регіонального моніторингу і управління.

Додатково, вдосконалення алгоритмів обробки сигналів та виправлення похибок, разом з інтеграцією додаткової інформації, наприклад, даних з інерціальних навігаційних систем (INS), сприяє мінімізації помилок і збільшенню точності визначення положення в умовах складного міського рельєфу.

Висновок

У бакалаврській роботі ми провели дослідження ефективності актуальної системи ГЛОНАСС, а також інтегрованої системи ГЛОНАСС-GPS.

За мету було оцінити їх можливості при одно та двочастотному кінематичному позиціонуванні протягом однієї епохи, використовуючи реальні двочастотні дані, отримані як в статичному, так і в кінематичному режимах.

На основі проведеного аналізу, сформульовано наступні висновки:

1. Покращення доступності та стабільності: інтегрування ГЛОНАСС та GPS, якщо порівнювати з одночастотною системою GPS, суттєво покращує доступність та надійність одночастотного кінематичного позиціонування, що відбувається протягом однієї епохи.

Ефективність такої системи позиціонування майже аналогічна двочастотній GPS, а ініціалізація одночастотного ГЛОНАСС-GPS RTK може відбуватися миттєво або в межах кількох секунд.

2. Двочастотне ГЛОНАСС RTK позиціонування: використовуючи наявне сузір'я ГЛОНАСС, відкрите небо, двочастотний GPS, та демонструючи продуктивність, аналогічну двочастотному GPS у відкритому просторі.

Це підкреслює факт, що двочастотне RTK-позиціонування виключно на базі ГЛОНАСС є вже реалізованою технологією і може бути застосоване для високоточного позиціонування.

3. Інтеграція ГЛОНАСС-GPS: застосування двочастотної RTK-технології з використанням ГЛОНАСС та GPS покращує стабільність однопроменевих AR-систем у порівнянні з рішеннями, що використовують лише двочастотний GPS.

Це значно збільшує швидкість отримання фіксації сигналу на значних висотах (від 300 до 400 метрів), відкриваючи перспективи для ефективного використання в умовах з обмеженим доступом до GPS.

Показники стабілізації на рівні 90% та ймовірність помилкових спрацьовувань всього 2% підкреслюють високу продуктивність цього інтегрованого рішення.

4. Точність визначення місцезнаходження за допомогою ГЛОНАСС: кінематична точність визначення положення об'єктів виключно з використанням системи ГЛОНАСС демонструє дещо нижчі показники, ніж при використанні GPS, особливо у північному напрямку.

Проте важливо підкреслити, що точність у східному напрямку є вищою, ніж у північному.

Ця суттєва відмінність робить ГЛОНАСС унікальним у порівнянні з GPS.

5. Зростання точності ГЛОНАСС-GPS: точність визначення місця розташування за єдиним ехосигналом з використанням двочастотної системи ГЛОНАСС-GPS зросла на 23% у порівнянні з GPS у випробуваннях з короткою базою (8 км), і на 4% в іншому тесті.

Це свідчить про значний потенціал точності внаслідок об'єднання даних ГЛОНАСС та GPS, хоча іоносферні затримки, здатні суттєво впливати на точність, не були враховані в даному дослідженні.

6. Майбутнє розвитку: з завершенням формування всесвітньої супутникової мережі ГЛОНАСС передбачається, що комбінована система ГЛОНАСС-GPS RTK, яка включає ГЛОНАСС, значно покращить зручність та стабільність використання, а також відкриє нові перспективи для точного визначення місцезнаходження у різних галузях, від землевимірювання до навігації в складних погодних умовах.

Отримані дані підкреслюють значний потенціал поєднання ГЛОНАСС та GPS для поліпшення точності та забезпечення надійності позиціонування.

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. Li, Jinlong & Yang, Yuanxi & Xu, Junyi & Haibo, He & Guo, Hairong & Wang, Aibing. (2013). Performance Analysis of Single-Epoch Dual-Frequency RTK by BeiDou Navigation Satellite System. 10.1007/978-3-642-37407-4_12.

5. Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, Hugentobler U, Teunissen P, Nakamura S (2013) Початкова оцінка регіональної навігаційної супутникової системи COMPASS/BeiDou-2. GPS Solut 17(2):211–222. doi:10.1007/s10291-012-0272-x

6. Odijk D, Teunissen PJG, Huisman L (2012) Перші результати змішаного одночастотного RTK GPS GIOVE в Австралії. J Sp Sci 57(1):3–18

7. Takasu T, Yasuda A (2008) Оцінка продуктивності RTK-GPS з недорогими одночастотними GPS-приймачами. У: Матеріали міжнародного симпозіуму з GPS/GNSS 2008 Токуо, стор. 852–861

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

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

Обсяг пояснювальної записки: _____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)