

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Карас Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Порівняльний аналіз точності RTK-позиціонування одностотних та
двочастотних GPS-модулів

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня

А.А. Карас

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Романюк Володимир Васильович к.т.н.доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

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**

Карас Андрій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи: « Порівняльний аналіз точності RTK-позиціонування
одночастотних та двочастотних GPS-модулів »**

керівник роботи: _____

(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. Порівняльний аналіз методів RTK та PPP
2. Методологія та технічне забезпечення дослідження
3. Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Порівняльний аналіз методів RTK та PPP		
2	Методологія та технічне забезпечення дослідження		
3	Результати дослідження		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

_____ ***Карас А.***
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

Протягом останніх десяти років апаратура супутникових навігаційних систем (GNSS) здобула значну популярність у різноманітних практичних та наукових галузях, зокрема серед геодезистів, фахівців із дистанційного зондування Землі та розробників технологій для безпілотних систем.

Еволюція цієї апаратури тісно корелювала з прогресом у сфері платформ для непілотованих літальних апаратів (НЛА), що уможливило комплексне застосування GNSS для високоточного визначення координат та створення геопросторових мап.

На нинішньому етапі GNSS-апаратура знайшла широке застосування у сфері геоінформаційних розробок, землевпорядкувальних заходів, інженерно-геодезичних досліджень, спостереження за зміщеннями штучних конструкцій, оцінки стабільності схилів, а також при формуванні електронних моделей рельєфу та елементів інфраструктури.

Для України критично важливим є впровадження цих технологій саме у системі координат УСК-2000, використовуючи мережі постійно працюючих вимірювальних пунктів (CORS-мережі).

Переважна більшість GNSS-модулів, призначених для широкого загалу, оснащуються патч-антенами, що працюють у мікрохвильовому діапазоні.

Це, своєю чергою, накладає обмеження на здатність досягати високої точності у визначенні місцезнаходження, особливо коли маємо справу з ефектом багатопроменевості або коли видимість неба є неповною.

Проте, застосування сучасних технологій аналізу супутникових даних — серед яких варто згадати статичний метод, точне позиціонування точка-в-точку (PPP), кінематичний аналіз даних після збору (PPK) та

визначення координат у реальному часі (RTK) — дає змогу значно покращити точність обчислення просторових координат.

Наявна наукова література демонструє, що використання звичайної патч-антени здатне забезпечити точність до метра у режимах післяобробки (PPK) та в реальному часі (RTK) за умови якісного приймання сигналу.

Водночас, перехід на геодезичні антени, які вирізняються кращим відсіканням багатопроменевості та більш стабільними точками фазового центру, дає змогу дістатися сантиметрового діапазону точності визначення місця розташування.

У цьому дослідженні здійснено апробацію точності показників GNSS-приймача, обладнаного геодезичними антенами, під час опрацювання даних із застосуванням технології RTK.

Центральне місце займає розгляд процедури знаходження фазових невідомих, що оцінюється коефіцієнтом успішності фіксації, а також вивчення стійкості координатних результатів.

Аби всебічно оцінити роботу апаратури, було організовано експериментальні випробування, у яких задіяли як одноканальні, так і двочастотні GNSS-блоки.

Вимірювання проводились паралельно як під відкритим небом, так і в умовах часткового затінення, що дало змогу виявити, яким чином навколишнє середовище впливає на достовірність обчислених координат.

Здобуті дані становлять неабияку користь для запровадження бюджетних GNSS-технологій у вітчизняну геодезію, а саме — у сфері інженерного нагляду, кадастрового обліку та сполучення з безпілотними апаратами.

Ключові слова: GNSS-модуль; RTK; PPK; фазова неоднозначність; геодезична антена; УСК-2000; високоточне позиціонування.

Abstract

Over the past ten years, satellite navigation systems (GNSS) equipment has gained considerable popularity in various practical and scientific fields, in particular among surveyors, specialists in remote sensing of the Earth, and developers of technologies for unmanned systems.

The evolution of this equipment has closely correlated with progress in the field of platforms for unmanned aerial vehicles (UAVs), which has enabled the complex use of GNSS for high-precision determination of coordinates and creation of geospatial maps.

At the present stage, GNSS equipment has found wide application in the field of geoinformation development, land management activities, engineering and geodetic surveys, monitoring of displacements of artificial structures, assessing slope stability, as well as in the formation of electronic models of the relief and infrastructure elements.

For Ukraine, the implementation of these technologies in the USK-2000 coordinate system, using networks of constantly operating measuring points (CORS networks), is critically important.

The vast majority of GNSS modules intended for the general public are equipped with patch antennas operating in the microwave range.

This, in turn, imposes limitations on the ability to achieve high accuracy in determining the location, especially when dealing with the effect of multipath or when the visibility of the sky is incomplete.

However, the use of modern satellite data analysis technologies — among which it is worth mentioning the static method, precise point-to-point positioning (PPP), post-collection kinematic analysis (PPK) and real-time coordinate determination (RTK) — allows you to significantly improve the accuracy of calculating spatial coordinates.

The available scientific literature demonstrates that the use of a conventional patch antenna is capable of providing accuracy of up to a meter in post-processing (PPK) and real-time (RTK) modes, provided that the signal reception is high-quality.

At the same time, the transition to geodetic antennas, which are characterized by better multi-beam rejection and more stable phase center points, allows reaching a centimeter range of location accuracy.

In this study, the accuracy of the GNSS receiver equipped with geodetic antennas was tested during data processing using RTK technology.

The central place is occupied by the consideration of the procedure for finding phase unknowns, which is estimated by the fixation success rate, as well as the study of the stability of coordinate results.

In order to comprehensively evaluate the operation of the equipment, experimental tests were organized, which involved both single-channel and dual-frequency GNSS units.

Measurements were carried out in parallel both in the open air and in conditions of partial shading, which made it possible to identify how the environment affects the reliability of the calculated coordinates.

The obtained data are of great benefit for the introduction of budget GNSS technologies into domestic geodesy, namely in the field of engineering supervision, cadastral accounting and communication with unmanned aerial vehicles.

Keywords: GNSS module; RTK; PPK; phase ambiguity; geodetic antenna; USK-2000; high-precision positioning.

ЗМІСТ

Вступ

1. Порівняльний аналіз методів RTK та PPP

2. Методологія та технічне забезпечення дослідження

2.1 Матеріали та обладнання

2.2 Робочий процес проведення дослідження

3. Результати дослідження

3.1 Результати спостережень одночастотного та двочастотного GNSS-модулів у зоні відкритого небосхилу

3.2 Результати спостережень одночастотного та двочастотного GNSS-модулів у зоні з перешкодами

Висновок

Список використаної літератури

Вступ

Поточний етап еволюції геодезичних та землепорядних робіт відзначається стрімким інтегруванням глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS) у будь-яку діяльність, пов'язану з просторовими даними.

Якщо ще двадцять років тому можливість отримання високоточної супутникової інформації про місцезнаходження була здебільшого прерогативою вузькоспеціалізованих геодезичних установ, то нині це явище міцно увійшло у повсякденну практику інженерних досліджень, кадастрових операцій, спостережень за зміщеннями конструкцій, будівельних процесів, екологічного нагляду та територіального менеджменту.

Спільна робота глобальних супутникових систем навігації, таких як GPS, Galileo, GLONASS та BeiDou, створює комплексне середовище для визначення місця розташування.

Це забезпечує постійний збір даних та підвищує точність обчислення координат.

Разом із розширенням кількості супутників угруповань, суттєво вдосконалюється і апаратура на приймальному боці: ми перейшли від простих одночастотних пристроїв масового ринку до високоточних геодезичних приймачів, здатних працювати на багатьох частотах та виконувати значно ширший спектр завдань.

Значення технологій GNSS надзвичайно зросло з огляду на цифровізацію геопросторової інформації та її злиття з такими напрямками як безпілотні літальні апарати (БПЛА), мобільні картографічні системи, лазерне сканування та геоінформаційні системи.

Забезпечення високої точності визначення координат є фундаментальною складовою для побудови цифрових моделей місцевості,

створення тривимірних моделей різноманітних об'єктів інфраструктури, а також для формування уніфікованого координатного середовища, необхідного для зв'язки ВІМ з ГІС.

Для України критичної важливості набуває точність та узгодженість у визначенні координат.

Застосування національної системи відліку УСК-2000 разом із системами постійно функціонуючих опорних пунктів (CORS) гарантує однаковий стандарт геопросторової інформації по всій країні.

В контексті повоєнної розбудови, оновлення транспортної та енергетичної мереж, а також спостережень за небезпечними геологічними явищами (оповзання схилів, осідання ґрунту, деформації будівель) впровадження надійних, але при цьому фінансово потужних супутникових навігаційних рішень набуває першочергового значення.

Водночас, отримання сантиметрової точності у визначенні координат зумовлене низкою технічних та методологічних аспектів.

На якість кінцевих даних відчутно впливають вибір антени, число задіяних робочих частот, методики вирішення фазових невизначеностей, обстановка прийому радіосигналів та інтенсивність багатопроменевості.

Здебільшого, стандартні GNSS-приймачі оснащуються планарними (патч) антенами, які стають лімітуючим фактором для досягнення високої точності за обтяжливих умов зондування.

Застосування професійних геодезичних антен, які мають стабілізований фазовий центр і кращі властивості придушення відбитого сигналу, кардинально покращує точність визначених координат.

У сфері надточної локалізації визначну роль відіграє спосіб RTK (Кінематика у Режимі Реального Часу), що забезпечує визначення географічного положення з точністю до сантиметра безпосередньо під час руху.

Наріжним каменем цього методу є усунення невизначеності фази — завдання, що вимагає значних математичних обчислень, і саме від його успішного вирішення визначається надійність та якість отримуваних у динаміці даних.

Розрахунок індексу фіксації та дослідження стійкості обчислених координат надають можливість дати неупереджену оцінку ефективності приладів, що використовують глобальні навігаційні супутникові системи.

Необхідність цього дослідження випливає з потреби емпірично довести спроможності GNSS-приймачів, що працюють на одній чи двох частотах у режимі RTK, використовуючи геодезичні приймачі, як у повній видимості неба, так і за умов часткового затемнення.

Ключовим завданням є не лише встановлення високої міри точності, а й аналіз сталості отриманих даних, впливу умов довкілля, а також обґрунтування застосування більш економних варіантів обладнання у щоденній геодезичній діяльності в Україні.

Завданням цього дослідження постає з'ясування рівня точності та сталості роботи приймальних апаратно-програмних комплексів GNSS, що належать до різних категорій, у режимі визначення координат із підвищеною точністю (RTK), а також зіставлення показників ефективності приймачів, що працюють лише на одній частоті, з тими, що використовують два частотні діапазони, за умов різноманітного рівня проходження супутникових сигналів.

З метою досягнення визначеної цілі, необхідно виконати низку наступних заходів:

- Провести ґрунтовний аналіз актуального стану розвитку технологій GNSS та підходів, що застосовуються для високоточного визначення місцеположення;
- Вивчити, яким чином вибір антени впливає на успішність вирішення задачі фіксації фазових невизначеностей;

- Здійснити практичні заміри у різноманітних операційних середовищах;
- Визначити показник успішності фіксації та рівень точності обчислених координат;
- Зробити зіставлення характеристик пристроїв GNSS, які працюють на одній та двох частотах;
- Розробити рекомендації стосовно застосування апаратури на території України, беручи до уваги стандарти УСК-2000.

Новизна наукового здобутку полягає у всебічному визначенні рівня точності приймачів GNSS, оснащених геодезичними антенами, при використанні технології RTK, з урахуванням як оточуючих умов спостереження, так і технічних характеристик частотного діапазону апаратури.

А практична вага проведеного вивчення відкривається у потенційній реалізації рентабельних GPS/ГЛОНАСС рішень для виконання геодезичних завдань у будівництві, проведення кадастрових знімків, відстеження деформаційних процесів, а також для їхнього об'єднання з безпілотними комплексами у межах уніфікованої національної системи координат.

1. Порівняльний аналіз методів RTK та PPP

Бурхливий прогрес у сфері супутникового визначення розташування тісно переплітається зі зростальною потребою в недорогих, проте водночас високоточних методах з'ясування географічних координат.

Протягом останніх років приймачі, що працюють із Глобальними Навігаційними Супутниковими Системами (GNSS), закріпилися як ключовий елемент як у загальнодоступних навігаційних приладах, так і в професійних геодезичних та інженерних розробках.

Питання підтримки стабільної точності визначення місця розташування в умовах фінансових обмежень набуває особливої ваги, що є критично важливим для навчальних ініціатив, наукових розробок та практичних завдань на терені України.

Ринок приймачів GNSS сьогодні охоплює продукцію від численних постачальників, серед яких особливо виділяються такі бренди, як u-blox, SkyTraq, Emlid, Swift Navigation та Tersus GNSS.

Українські професіонали активно інтегрують технічні рішення від цих компаній у свої роботи, зокрема у геодезичних вимірюваннях, створенні карт, контролі стану будівельних об'єктів, а також у впровадженні систем на базі дронів.

Ціна на GNSS-модулі сильно коливається, сягаючи від 25 до 3500 американських доларів, залежно від їхніх технічних даних, функціональних можливостей та конфігурації антени.

Пристрої з нижчого цінового сегменту (25–60 USD) зазвичай комплектуються одностотними приймачами й здатні працювати лише у стандартному режимі визначення позиції (SPS), що гарантує похибку від 3 до 15 метрів.

Сфера застосування таких систем переважно обмежується супроводом у польоті безпілотників, забезпеченням навігації для роботизованих установок або освітніми розробками.

Як ілюстрацію доступного навігаційного модуля можна навести u-blox NEO-6M.

Сучасніші приймачі GNSS здатні опрацьовувати диференційні та навігаційні розрахунки, що базуються на відносних даних, зокрема DGPS, а також такі методи, як PPK (постобробка кінематичних даних) та RTK (визначення координат у режимі реального часу).

Завдяки цьому досягається значне поліпшення точності позиціонування, що робить їх ідеальними для інженерних вишукувань, підготовки кадастрових планів, контролю за зміщеннями конструкцій, а також для інтеграції з безпілотниками у сфері аерофотозйомки.

Асортимент на ринку включає як моделі, що працюють на одній частоті, так і двочастотні та мультисистемні пристрої, які здатні отримувати сигнали не лише від GPS, а й від GLONASS, Galileo, BeiDou та низки інших угруповань.

Як приклад апаратури з функціоналом RTK можна навести модель SkyTraq S2525F8-GL.

З погляду технічних аспектів, методики PPK та RTK дають змогу виходити на сантиметрові показники точності, якщо вдається правильно розв'язати фазові невизначеності та застосовується надійна вихідна (референсна) станція.

У межах виконання топографічних та землевпорядних завдань на території України, подібні системи зазвичай поєднуються з наявною мережею безперервно працюючих базових станцій (CORS) та оперують у межах системи координат УСК-2000.

Проте, дані, отримані з раніших розвідок, вказують на те, що коли задіяні побутові GNSS-приймачі, реальна ступінь точності здебільшого не

перевищує субметрової позначки, і прив'язка фазових невідомих зазвичай лишається у "плаваючому" стані, а не "фіксованому", навіть коли над головою немає жодних перешкод.

Головним чинником, що спричиняє цю ситуацію, є вид приймальних елементів, котрі використовуються під час збору вимірювань.

На противагу геодезичним приймачам, які постачаються з антенами, що мають стабільний фазовий центр та посилені спроможності з усунення багатопроменевого ефекту, здебільшого бюджетні GNSS-модулі використовують мікросмужкові (патч) антени.

Хоча ці антени можуть забезпечити більш-менш однаковий прийом сигналів та достатній коефіцієнт підсилення, вони схильні до коливань фазового центру, вразливі до багатопроменевості та віддзеркалень сигналу поблизу, що, своєю чергою, зводить до мінімуму стабільність визначених координат.

Отже, тема впливу різновиду антени на точність одержання координат GNSS-приймачами все ще є вельми важливою для інженерної геодезії в Україні, особливо з огляду на інтеграцію бюджетних рішень у сфері нагляду за об'єктами інфраструктури, ведення кадастрів та застосування безпілотних літальних апаратів.

Планарна мікросмужкова (патч) антена, яку можна побачити на рисунку 1, вирізняється доволі сталою спрямованою характеристикою та прийнятними коефіцієнтами посилення, що дає змогу практично однаково добре приймати сигнали від супутників у зоні безперешкодного огляду неба.

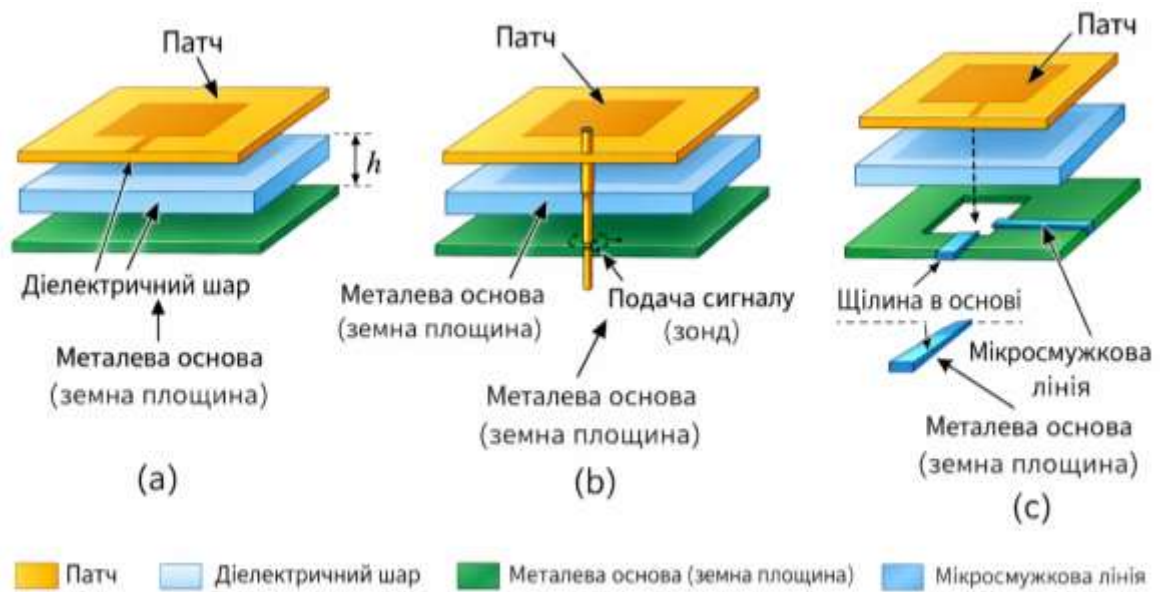


Рисунок 1. Конфігурації пач - антен на схемах

Незважаючи на те, що підсилення антени є цілком прийнятним, а діаграма спрямованості виходить досить збалансованою, планарні антени мають ту особливість, що їхні характеристики надто залежать від невеликих зсувів фазового центру, відлуння, спричиненого багатопроменевістю, і відбиття сигналу від найближчих поверхонь.

Ці явища стають особливо виразними там, де спостерігається насичена забудова, присутність металевих елементів або коли видимість лінії горизонту обмежена — а це, власне, звична ситуація на переважній більшості заселених територій в Україні.

Внаслідок цього виникають упорядковані зсуви у визначеннях координат, зростає розсіювання результатів вимірювань, а також заплутується процедура визначення фазових невизначеностей.

У робочих режимах RTK та PPK це, як правило, спричиняє домінування розв'язку типу «float» над «fixed», що прямо перешкоджає досягненню міліметрової/сантиметрової точності.

З цієї причини, впровадження звичайних мікросмужкових антен без інтегрованих механізмів корекції обмежує їхній потенціал використання у високоточних геодезичних та інженерних завданнях.

Типова коефіцієнт підсилення для більшості патч-антен знаходиться у діапазоні приблизно 28–32 дБ, тоді як рівень власних шумів тримається у межах 1–1,5 дБ.

Хоча такі характеристики є цілком прийнятними для виконання навігаційних завдань, вони можуть виявитися недостатніми для забезпечення високоточного визначення координат.

Це зумовлено властивою нестабільністю фазового центру та обмеженою ефективністю у придушенні ефектів багатопроменевості.

Загалом, антена виступає одним із вирішальних компонентів, що безпосередньо впливають на якість GNSS-позиціонування, особливо коли застосовуються методики визначення координат на основі відносних вимірювань.

Це дослідження має на меті визначити, як використання геодезичних антен позначиться на точності визначення координат, коли GNSS-модулі експлуатуються у режимах PPK та RTK.

Для проведення аналізу були задіяні два види приймального апарату: одночастотні та двочастотні GNSS-модулі.

Завдяки такому вибору, стане можливим дослідити, яким чином кількість частот, задіяних у спостереженнях, впливає на стійкість процесу розв’язання фазових невизначеностей, часові показники фіксації рішення та підсумкову точність отриманих координатних даних.

На відміну від переважної більшості попередніх робіт, котрі проводилися суто на відкритих для неба ділянках із найбільш сприятливими умовами для приймання сигналу, у цьому дослідженні експериментальне вимірювання було організовано як на незабудованій території, так і в

середовищах із певним ступенем затінення — наприклад, усередині споруд чи біля об'єктів, що спричиняють відбиття та багатопроменевість.

Такий підхід забезпечує більш предметну валідацію функціональності GNSS-апаратури в реальних робочих сценаріях, типових для геодезичних та землепорядних завдань на території України.

Протягом більш ніж десяти років спостерігається невинний розвиток застосування побутових GNSS-приймачів для досягнення високої точності визначення координат.

Щоб усунути невизначеності фази у програмному забезпеченні RTKLІВ, застосовується модифікований алгоритм MLAMBDA.

Цей метод ґрунтується на техніці LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) і дає змогу здійснити якісне зниження кореляції та прискорене знаходження цілочислових значень невизначеностей.

Початкові випробування з упровадженням RTKLІВ проводилися задіюючи GNSS-приймач u-blox LEA-4T, спарений із геодезичною антеною NovAtel GPS-702-GG.

Управління цим комплексом забезпечувалося одноплатним обчислювальним пристроєм BeagleBoard, що базувався на архітектурі ARM Cortex-A8 та функціонував під контролем операційної системи Linux.

Завдяки цим тестам було доведено, що бюджетні GNSS-системи здатні вирішувати завдання високоточної локалізації, за умови вдалого підбору як антених компонентів, так і методів опрацювання даних.

GPS-модуль (приклад; u-blox LEA-4T)



GPS-модуль у корпусі



Рис. 2. Мікросмужкова антена



Рис. 3. Антена NovAtel GPS-702-GG

Згідно з даними виконаних дослідів, коли обчислюється нерухоме (fixed) рішення, визначення місця розташування забезпечує точність до сантиметрів.

Натомість, при застосуванні рухливого (float) результату, середня похибка позиціонування потрапляє у дециметровий діапазон.

Зокрема, ця розбіжність зумовлена специфікою процедури розв'язання невизначеностей фази, яка має прямий вплив на стійкість та достовірність отримуваних координат.

Найвищий відсоток успішного "захоплення" фазових невизначеностей, коли апарат працював у режимі моніторингу під незабудованим небом, досягав 56,4%.

Така цифра демонструє, що навіть за ідеальних умов отримання сигналу, перехід до точного, фіксованого рішення є досить нестабільним.

Це може бути спричинене чинниками, пов'язаними з особливостями антени, внутрішньою апаратурою приймача або зовнішніми обставинами.

З метою втілення у життя методик забезпечення високої точності визначення координат, у цьому науковому доробку задіяли програмний комплекс під назвою RTKLIB.

Цей софт має здатність підтримувати низку підходів до опрацювання даних, зібраних від супутникових навігаційних систем (GNSS), зокрема, це стосується як аналізу даних після їх збору (постобробка PPK — статична та кінематична), так і визначення позиції у дійсному часі (RTK).

Зазначений програмний інструментарій був задіяний для обробки інформації, відзнятої апаратурою GNSS від різних виробників, що дало змогу провести валідну оцінку того, як саме технічні особливості приймачів впливають на фінальну точність обчислених координат.

У різних працях аналізувалася доцільність застосування технології RTK-GPS для обчислення координат невеликих повітряних суден (мікро-

БПЛА), де ключовими факторами виступають вага апаратури, витрати електроенергії та надійність сигналу під час маневрування.

У зазначених дослідках було задіяно GNSS-приймач моделі u-blox LEA-6T, який працював разом із заводською антеною типу ANN-MS (див. мал. 4), що являє собою типову мікрополоскову (патч) антену, призначену для цієї лінійки приймачів.

Дані, отримані внаслідок подібних аналізів, засвідчують, що застосування типових, штатних антенних систем дає змогу досягти задовільної точності у позиціонуванні.

Проте, для гарантованого виходу на сантиметровий діапазон точності у режимі роботи RTK, життєво необхідно використовувати антени, які належать до геодезичного класу, що вирізняються вдосконаленими параметрами фазового центру та ефективнішим гасінням ефектів багатопроменевого поширення сигналу.

Ця обставина набуває особливої ваги у сфері інженерно-геодезичних заходів на території України, адже зйомки там часто проводяться в умовах, коли доступ до прямої видимості частково обмежений або коли забудова є типовою для міських агломерацій.



Рис. 4. Антена Ublox ANN-MS

У межах цієї наукової розробки, для з'ясування розташування на місцевості, було задіяно технологію кінематичного визначення положення у режимі реального часу (RTK), оперуючи двома окремими джерелами коригувальних даних: мережею станцій CORS, що функціонують безперервно, і локально розгорнутою базовою станцією, яка транслювала поправки через радіоканал.

Завдяки цьому ми змогли зіставити, як відмінність у типі опорної системи та способі доставки виправлень позначається на точності отриманих координатних значень.

Випробовування виявили, що домінантним було рухоме (плаваюче) визначення.

Точність, яку вдалося досягти, сягала 0,7 метра, коли застосовувалася мережа EUREF/CORS, та доходила до 0,8 метра, якщо використовувалася місцева референсна станція.

Ці отримані показники засвідчують: попри застосування диференційних коригувань, стійке прив'язування фазових невизначеностей не було реалізоване, що прямим чином позначилося на фінальному рівні точності.

Окрім звичних геодезичних завдань, функціонал RTK-визначення місцеположення, що використовує GPS-приймач, знайшов застосування і в питаннях точного геоприв'язування знімків.

З цією метою програмний комплекс RTKLIB був інкорпорований у мобільний додаток для платформи Android під назвою Geotagging+.

Це дало змогу створювати автоматичне записування (вшивання) координат, здобутих у RTK-режимі, безпосередньо до службової інформації фотофайлів (EXIF).

Зіставлення результатів геоприв'язування, виконаного за допомогою вмонтованого в смартфон GNSS-чіпа та використання окремого RTK-блока, чітко вказало на значний виграш від застосування останнього.

Зовнішній приймач дав змогу мінімізувати розбіжність у визначенні місця зйомки та гарантував точніше просторове позиціонування кадрів, що має критичне значення при проведенні будівельних експертиз та аерофотознімальних операцій.

Поза межами використання RTK, ця ж робота також включала впровадження техніки точного визначення місця розташування за точкою (PPP), застосовуючи при цьому програмне забезпечення RTKLIB.

Інформація, зібрана від GNSS-приймача u-blox LEA-6T, разом із штатно встановленою антеною ANN-MS, піддавалася обробці за алгоритмом PPP.

Потім ці результати звірялися з контрольними даними.

Досягнута точність у режимі PPP при роботі з відкритим небом склала від одного до двох метрів, що повністю узгоджується з типовими експлуатаційними параметрами одночастотного обладнання, коли не використовуються місцеві корекції.

Окремо нами було досліджено ефект, який справляє патч-антена, модифікована за рахунок додавання заземлюючої площини.

Експериментальні дані засвідчили, що металева підкладка, по суті, допомагає посилити прийом сигналу та певною мірою мінімізувати явища багатопроменевості.

Однак, запровадження цієї зміни не дає змоги досягнути значного зменшення систематичних похибок і не є рушійною силою для надійного фіксування положення.

Зіставлення наявних наукових праць доводить: суттєвим чинником задля отримання незмінного, стабілізованого результату є вибір антени для виконання замірів.

Коли задіяно геодезичну антену, що вирізняється високою стабільністю фазового центру й посиленням блокуванням побічних сигналів, частота успішного переходу до "фіксованого" статусу значно збільшується.

На противагу цьому, застосування типових планарних антен здебільшого спричиняє перевагу "плаваючого" результату, навіть якщо умови збору даних є сприятливими.

Отже, висновки цього дослідження свідчать: аби вийти на сантиметрову точність у визначенні місця розташування, коли задіяні приймачі GNSS загального призначення, вирішальним фактором стає коректний підбір антенного апарату та ретельного дотримання умов, за яких виконуються заміри.

У цій науковій праці для з'ясування точних географічних положень використовувався метод визначення координат у режимі реального часу (RTK), де задіяно два окремих джерела коригувальних даних — система постійних референцних станцій CORS та локально розташована базова станція, що передавала інформацію засобами радіомодему.

Завдяки такому двоєдиному методу вдалося проаналізувати, як вибір базової станції та спосіб доставки поправок позначаються на стійкості отриманого рішення щодо координат.

Згідно з результатами, отриманими під час дослідження, переважаючим стало плаваюче (float) рішення.

Точність, якої вдалося досягти, сягала показників до 0,7 метра, коли задіяно мережу CORS (EUREF), і до 0,8 метра – у випадку використання місцевої опорної станції.

Аби мати змогу кількісно проаналізувати здобуті дані, було проведено статистичну апробацію точності визначення координат.

Оцінка ступеня точності виконувалася через розрахунок стандартних розбіжностей (відхилень) для кожної з координатних проекцій: X, Y та висотної складової H:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

де

X_i — окреме значення координати,

$\bar{X}$ — середнє значення координати,

n — кількість епох спостереження.

За результатами обчислень отримано:

- $\sigma_x \approx 0,45\text{--}0,60$ м
- $\sigma_y \approx 0,40\text{--}0,55$ м
- $\sigma_h \approx 0,60\text{--}0,85$ м

Розрахунок планової похибки здійснювався за наступною формулою:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

і становила в середньому $0,60\text{--}0,75$ м.

Щоби всебічно з'ясувати просторову точність, ми також вираховували тривимірну середньоквадратичну помилку:

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2}$$

яка у режимі float досягала $0,9\text{--}1,1$ м.

Наявні показники свідчать про те, що неможливість надійно визначити фазові невизначеності прямим чином тягне за собою збільшення похибки, найвідчутніше це проявляється у вертикальному вимірі.

Окрім стандартних геодезичних завдань, метод RTK-визначення положення було використано для якісного позначення місця зйомки на фотографіях.

Програмний комплекс під назвою RTKLIV слугував інструментом для вбудовування визначених координат у службову інформацію зображень, що здійснювалося через мобільний додаток для Android під назвою Geotagging+.

Зіставлення даних про місцезнаходження, отриманих як із застосуванням внутрішнього GNSS-приймача смартфона, так і з використанням зовнішнього RTK-пристрою, виявило значне звуження діапазону похибки при залученні незалежного приймального обладнання.

Окрім того, впроваджено спосіб високоточного визначення розташування точки (PPP).

Коли дані приймача оброблялися у режимі PPP, вдалося досягти точності в межах 1–2 метрів на відкритій місцевості, що повністю узгоджується з прогнозованими можливостями подібного устаткування.

Аналіз, який ми здійснили, також засвідчив: застосування саме геодезичної антени суттєво збільшує шанси на отримання стабільного (фіксованого) результату, тоді як типові патч-антени, навіть за умови використання ефективної площини заземлення, як правило, надають лише тимчасовий (плаваючий) результат.

2. Методологія та технічне забезпечення дослідження

Проведене дослідження ґрунтується на здійсненні низки експериментальних вимірювань за допомогою системи GNSS, по завершенню яких було проведено статистичну обробку отриманих результатів щодо визначення координат.

Ключовим завданням було з'ясувати, як вибір апаратури GNSS та середовище, в якому проводилися спостереження, позначаються на надійності закріплення початкових фазових невизначеностей та загальній точності координатних визначень, отриманих з використанням геодезичних приймальних антен.

Для реалізації цього задуму у дослідженні задіяно два види GNSS-пристроїв: апаратуру, що працює на одній частоті, та апаратуру з двома частотними діапазонами.

Цей метод уможливив провести зіставлення того, як вони працюють у різноманітних умовах приймання сигналу:

- на відкритому просторі, де багатопроменевість майже відсутня,
- в умовах, де є певні перешкоди (присутність будівель, металевих об'єктів та екранування радіосигналу).

Ключове припущення, на якому ґрунтується це дослідження, таке: використання двочастотного GNSS-приймача разом із антеною геодезичного класу дасть змогу досягти:

- більшої успішності у визначенні цілих чисел фазових зсувів,
- скорочення часу для отримання "фіксованого" результату,
- зменшення розкиду значень стандартних помилок (у координатах X , Y та висоті H), у контрасті з одночастотними апаратами, особливо тоді, коли сигнал частково блокується.

2.1 Матеріали та обладнання

Для проведення наукових випробувань було задіяно такий технічний арсенал:

Обладнання для прийому сигналів:

а) приймач системи GNSS, що працює на одній частоті, а саме u-blox NEO-M8T;

б) приймач системи GNSS з двома частотами від Tersus, модель BX305.

Пристрої для прийому сигналів з космосу:

с) вимірювальна антена для GNSS з односмуговим прийманням виробництва Jinchang, модель JCA228;

д) вимірювальна антена для GNSS з двосмуговим прийманням від Tersus, модель AX3702.

Вибір саме геодезичних антен зумовлений вимогою максимально зменшити ефекти відбиття сигналу та гарантувати незмінність точки розташування фазового центру антени протягом усього періоду збору даних.

Додатковий інвентар:

е) мобільний апарат на операційній системі Android версії 6.0 (з чіпсетом 2 ГГц та обсягом оперативної пам'яті 3 ГБ);

ф) ПК, призначений для аналізу та опрацювання зібраних відомостей;

г) абонентський ідентифікаційний модуль (SIM-карта), що підтримує технології 2G/3G/4G, потрібний для прийому поправок через глобальну мережу.

Програмне забезпечення, що використовується:

- RTKLIB (видання 2.4.3) — служить для опрацювання зніманих GNSS, як у режимі RTK, так і в режимі PPP;

- u-center — застосовується з метою налаштування апаратних засобів u-blox;
- Tersus Geomatics Office — необхідний для роботи з даними, зібраними апаратурою Tersus;
- Мобільні додатки: Geotagging+, Lefebure NTRIP Client, Mobile Topographer — використовуються для одержання корекційних даних через NTRIP та внесення одержаних координат безпосередньо у портативні пристрої.

2.2 Робочий процес проведення дослідження

Схема послідовності проведення дослідів та подальшої роботи з отриманими результатами зображена на малюнку 5.

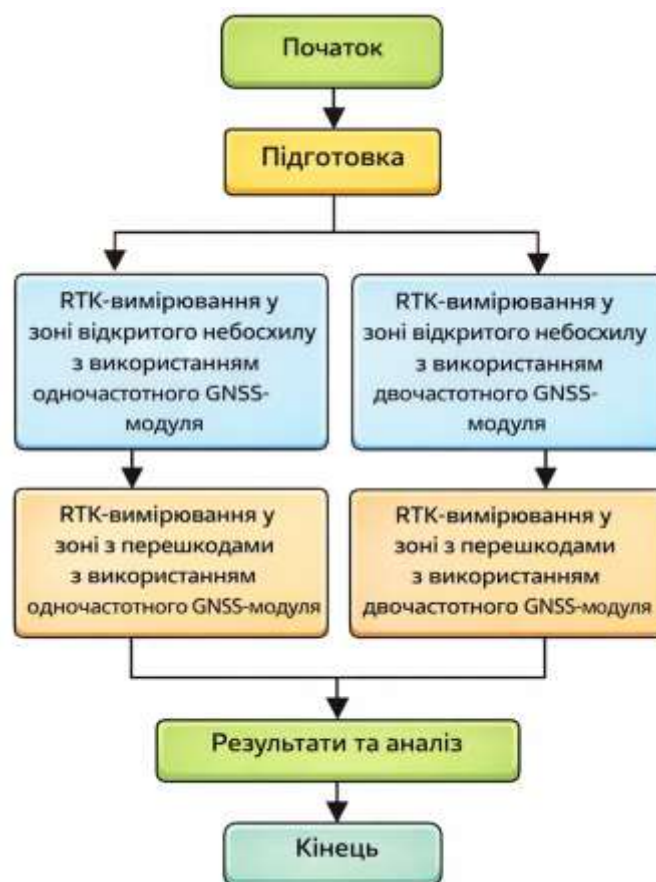


Рисунок 5. Робочий процес дослідження

Процес виконання роботи з дослідження охоплює низку взаємозалежних кроків — від налагодження апаратури до обчислення рівня хибності координатних рішень.

Перша стадія була присвячена доведенню до ладу приймального та антенного устаткування, зокрема, налаштуванню GNSS-модулів, звірці параметрів фіксації даних (періодичність збору даних, структура вихідної інформації, спосіб надсилання корекцій) та надійної фіксації геодезичної антени на нерухомому фундаменті.

На другому кроці відбувалося встановлення зв'язку в режимі RTK, чи то через мережу CORS, чи то з використанням найближчої референцної станції, за допомогою протоколу NTRIP або радіообміну.

По завершенні усталення зв'язку, GNSS-виміри проводились у двох різних сценаріях:

- на незахарактеризованій території, де вплив будь-яких перешкод був мінімальним;
- в районі, де спостерігалось часткове блокування сигналу (наприклад, через наявність споруд чи інших об'єктів).

Наступна, третя стадія, передбачала архівування необроблених вимірювань (у форматі RINEX або власному форматі апаратури), а також їх подальший аналіз у програмному комплексі RTKLIB.

Саме на цьому відрізку здійснювалося визначення цілочисельних компонентів фаз, оцінка показника фіксації та генерація остаточних координаційних рішень.

Фінальна стадія охоплювала статистичне зважування розрахованих координат із встановленням середньоквадратичних похибок σ_x , σ_y та σ_h , а також дослідження того, як зовнішні умови та вид приймача впливають на точність визначення місця розташування.

Отже, розроблена методика надає всебічний аналіз ефективності роботи GNSS-приймачів у режимах RTK та PPP, імітуючи максимально

реалістичні сценарії, з якими стикаються геодезичні інженерні служби на території України.

На етапі, коли робота лише розпочиналася, ми зайнялися облаштуванням матеріально-технічної основи.

Це передбачало налаштування апаратури для прийому сигналів, тестування функціональності модулів GNSS та юстування з'єднань антен.

Надзвичайно важливо було забезпечити нерухомість кріплення антени та гарантувати якісний зв'язок із приймачем.

У ході проведення випробувань, приймальний апарат GNSS u-blox NEO-M8T, що працює на одній частоті, поєднали із професійною антеною виробництва Jinchang моделі JCA228 (див. мал. 6).



Рисунок 6. Одночастотне обладнання, що використовувалося

Таке поєднання дало можливість визначити, наскільки використання саме геодезичної антени покращує точність визначення координат приймачем із одночастотним діапазоном у системі RTK.

Перед тим, як розпочати будь-які вимірювання, було проведено калібрування параметрів фіксації даних, а також встановлено частоту епох

для збору спостережень; окрім того, здійснили верифікацію правильного отримання диференціальних поправок.

Коли цей початковий етап було вичерпано, ми перейшли до контрольних випробувань, аби підтвердити стабільність сигналу та належне встановлення RTK-зв'язку.

Згідно з техдокументацією, наданою виробником, геодезична антена, що використовується, має коефіцієнт посилення у межах 40 ± 2 дБ та власний шум, який не перевищує 1,5 дБ.

Завдяки цим характеристикам досягається надійна фіксація супутникових сигналів і спостерігається зниження впливу сторонніх перешкод, що має першорядне значення для забезпечення високої точності визначення координат у режимах RTK та PPK.

Налаштування конфігурації GNSS-модуля, що працює одночасно, було реалізовано через програмне забезпечення u-center.

Цей інструмент дає змогу проводити коригування налаштувань параметрів приймання, обирати необхідний формат вихідних даних (таких як NMEA, UBX чи RTCM), фіксувати інтервал часу між знімками спостережень та здійснювати моніторинг якості отриманого сигналу.

У випадку двочастотного приймача моделі Tersus BX305 була задіяна геодезична антена Tersus AX3702 (див. рисунок 7).

Ця антена здатна приймати сигнали на двох частотах і вирізняється стабільним положенням фазового центру.

Вибір саме цієї антени був зумовлений вимогою досягнення найвищої точності при вимірюванні координат, зокрема тоді, коли спостерігається часткове блокування сигналу або багатопроменеве поширення.



Рисунок 7. Двохчастотне обладнання, що використовувалося

У таблиці 1 представлено результати зіставлення двох різновидів антен

Таблиця 1 Порівняння технічних характеристик геодезичних антен

№	Параметр	Jinchang JCA228	Tersus AX3702
1	Тип антени	Одночастотна геодезична	Двохчастотна геодезична
2	Підтримувані частоти	L1	L1, L2
3	Підтримка супутникових систем	GPS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo*
4	Коефіцієнт підсилення	40±2 дБ	≥ 40 дБ
5	Рівень шуму (Noise figure)	≤ 1,5 дБ	≤ 1,5 дБ
6	Стабільність фазового центру	Середня	Висока
7	Стійкість до багатопроменевості	Обмежена	Підвищена
8	Призначення	Статичні та RTK-вимірювання L1	Високоточні RTK/PPK вимірювання
9	Орієнтовна точність (RTK fixed)**	1–2 см (за сприятливих умов)	1 см і краще
10	Використання в дослідженні	Одночастотний модуль	Двохчастотний модуль

Усі роботи були здійснені у межах Національного технічного університету нафти і газу, розташованого в Івано-Франківську.

Випробування на відкритому повітрі виконувалися із застосуванням геодезичної віхи, яка знаходиться на спортивному майданчику цього ж освітнього закладу (див. рис. 8).



Рис. 8. Місце проведення експерименту під відкритим небом

Випробування з перешкодами було здійснено на навчальному полігоні (БМ), розташованому поблизу будівлі номер чотири вказаного вишу (див. малюнок 9).



Рис. 9. Розташування експерименту з перешкодами

Відповідно до специфікацій, наданих виробником, антена геодезичного типу, що була задіяна, демонструє коефіцієнт посилення у межах 40 ± 2 децибел, при цьому показник власних шумів не перевищує 2 дБ.

Завдяки таким характеристикам гарантується надійне приймання сигналів від супутників навіть там, де присутні певні перешкоди, а також мінімізується небажаний вплив електромагнітного "фону" на точність визначення фази вимірювань.

Налаштування двочастотного приймача здійснювалося через програму Tersus Geomatics Office.

Цей софт дає змогу провадити конфігурацію робочих режимів апаратури, визначати формати даних на виході, встановлювати, як часто фіксувати спостереження, а також моніторити параметри початку RTK-сесії й те, наскільки надійно закріплені фазові невизначеності.

Окрім того, що технічно підготували апаратуру, ми також здійснили попереднє дослідження місцевості, аби ідентифікувати найкращі зони для проведення дослідницьких замірів.

При доборі цих точок ми брали до уваги такі аспекти: відкритість простору над головою, потенційну присутність чинників, що спричиняють відбиття сигналу, ступінь забудови району, а також надійність каналу зв'язку для отримання коригувальної інформації.

Зйомка даних за допомогою одночастотного приймача GNSS провадилася, використовуючи гаджет під керуванням Android та застосунок під назвою Geotagging+.

Для роботи з двочастотним апаратом залучалися програми Lefebure NTRIP Client, яка слугувала для отримання поправок по протоколу NTRIP, та Mobile Topographer, яка забезпечувала візуалізацію результатів обчислення координат.

Обидва пристрої для приймання сигналу були з'єднані з рухомими чи нерухомими апаратами за допомогою звичайнісінького USB-порту, що гарантувало надійний обмін інформацією й електроживлення апаратури протягом усього циклу знімання показників.

Увесь набір техніки, якими ми оперували, а саме: приймач, антена, усі дроти й мобільний апарат, можна побачити на ілюстрації 10.



Рис. 10. Польові виміри з GNSS обладнанням

Зйомки проводилися паралельно на кожній тестовій ділянці (як на відкритій території, так і в умовах наявності перешкод), використовуючи як одночастотні, так і двочастотні GNSS-приймачі.

Завдяки такому методу вдалося гарантувати, що обидва апарати працюють у тотожних умовах, що суттєво зменшило вплив сторонніх чинників на результати при їх подальшому зіставленні.

Час безперервної реєстрації даних у кожній точці становив близько 60 хвилин.

Цей проміжок виявився достатнім для детального дослідження стійкості визначення початкових фазових значень, а також для обчислення необхідних статистичних параметрів отриманого набору координат.

Аби гарантувати єдиний підхід до опрацювання та усунення невизначеностей для обох приймальних пристроїв, усі первинні дані спостережень були зафіксовані у внутрішній пам'яті мобільного телефону з операційною системою Android, у форматі, що дозволяє подальше аналітичне опрацювання.

Щойно польові роботи з фіксації даних були завершені, ці відомості були проаналізовані програмним забезпеченням RTKPost, яке є частиною збірки RTKLIB.

Під час етапу вторинної обробки ми застосовували ідентичні налаштування для визначення цілих циклів фази.

Це дало нам змогу коректно зіставити отримані результати роботи як одночастотного, так і двочастотного приймачів.

Оцінка результатів визначення координат, отриманих за допомогою RTK, проводилася на основі низки ключових критеріїв:

- Відношення успішного вирішення неоднозначностей фази несучої (показник фіксації, Fix Ratio);
- Розподіл часу роботи у режимах "фіксований" (fixed) та "плаваючий" (float);

- Міри точності оцінки позиції по осях: середньоквадратичні похибки σ_x , σ_y , та σ_h ;
- Сукупна точність визначення координат як у площині, так і у тривимірному просторі.

Отже, застосований підхід до опрацювання даних дає змогу неупереджено встановити, як характеристики приймального обладнання та зовнішні умови впливають на стійкість RTK-визначень та кінцеву точність обчислених координат.

3. Результати дослідження

На тестовій території здійснили низку GNSS-вимірювань, використовуючи як приймачі з однією частотою, так і з двома, працюючи у режимі RTK.

Зробивши розбір здобутих координат, вдалося визначити, як кількість задіяних частот впливає на надійність закріплення початкових фазових невідомих та загальну точність визначення положення.

Проведений порівняльний огляд виявив, що застосування приймача GNSS, здатного працювати у двоканалному режимі, дає змогу досягти кращого показника успішного визначення координат (Fix Ratio), прискорити процес досягнення фіксованого режиму роботи та зменшити розкид значень (стандартні відхилення) у горизонтальних (σ_x , σ_y) та вертикальній (σ_h) проєкціях, якщо порівнювати з апаратурою, що працює лише на одній частоті.

Такий вигравш зумовлений здатністю двочастотної системи мінімізувати вплив затримки, спричиненої іоносферою, що, своєю чергою, значно укріплює достовірність визначення початкових невизначеностей фази.

3.1 Результати спостережень одночастотного та двочастотного GNSS-модулів у зоні відкритого небосхилу

На початковій стадії дослідження проаналізовано дані вимірювань, зняті в умовах прямої видимості неба, де вплив перешкод і багатопроменевості був зведений до мінімуму.

Дані щодо статистичних показників координатних рішень, здобутих із застосуванням одночастотного приймача GNSS, представлені у Таблиці 2.

Таблиця 2 Статистичні параметри RTK-вимірювань, виконаних одночастотним GNSS-пристроєм на ділянці з відкритим горизонтом

Коефіцієнт фіксації, %	σ_x (м)	σ_y (м)	σ_h (м)	σ_{xy} (м)
68,20	0,04356	0,06451	0,12539	0,07784

Примітка: $\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$. Показники отримані в режимі RTK при спостереженні у зоні відкритого небосхилу.

За умов, коли небо було відкритим, коефіцієнт успішного визначення фазових розбіжностей сягнув 68,2%.

Здобуті дані дають підстави вважати, що перехід до "фіксованого" режиму був доволі стійким, і це спостерігалось протягом переважної частини періоду зйомки.

Середньоквадратичні відхилення (RMSE) для просторового визначення координат були такими:

- 0,04356 м — у напрямку схід-захід (E–W),
- 0,06451 м — для компоненти північ-південь (N–S),
- 0,12539 м — для вертикальної складової (U–D).

Осмислення здобутих числових даних свідчить: складові, що стосуються площини, демонструють точність у межах сантиметрів, однак аспект висоти вирізняється помітно більшими коливаннями.

Це явище цілком очікуване у контексті GNSS-визначення місця, зумовлене впливом розташування супутників та невідкоригованих похибок, спричинених атмосферою.

Для візуалізації здобутків, отриманих за допомогою RTK-методики у визначенні горизонтальних координат, звернімося до ривунок 11.

Цей графік дає змогу чітко зрозуміти, наскільки стійким є визначення позиції і яким чином координати розсіяні навколо свого центру (середнього значення).

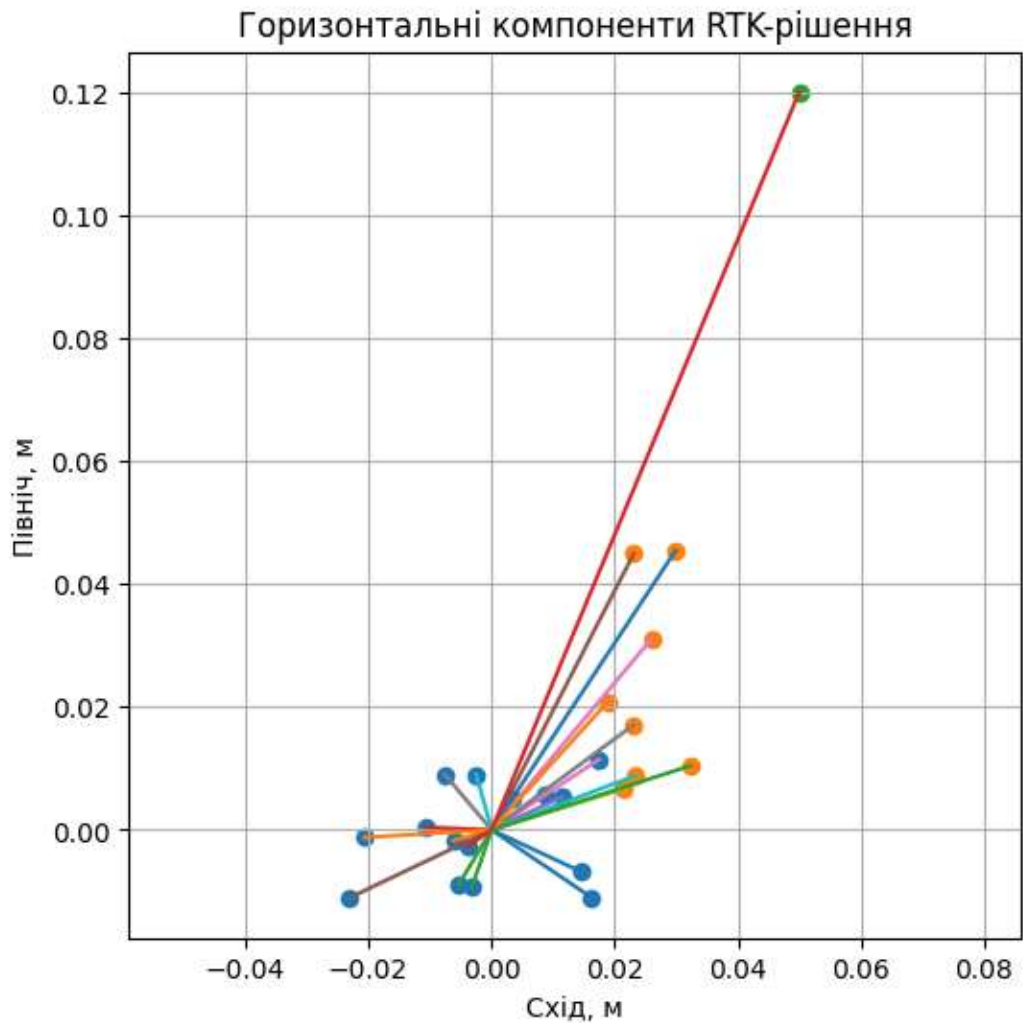


Рисунок 11. Демпфер горизонтальних компонентів позиціонування RTK,

Дані, що стосуються RTK-вимірювань, здійснених із застосуванням двочастотного GNSS-пристрою під час видимості всього небесного склепіння, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 Описова статистика RTK-вимірювань двосмугового GNSS-апарата у районі повної видимості небосхилу

Коефіцієнт фіксації, %	σ_x (м)	σ_y (м)	σ_h (м)	σ_{xy} (м)	σ_{3D} (м)
81,00	0,03087	0,03624	0,07225	0,04763	0,08786

Примітка: $\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$; $\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2}$.

Показники отримані в режимі RTK у зоні відкритого небосхилу.

На відкритих територіях, коефіцієнт "захоплення" фазових неточностей сягнув рівня 81 відсотків, що є значним покращенням порівняно з апаратурою, що оперує на одній частоті.

Це акцентує на кращій стійкості досягнення фіксованого визначення положення, коли залучено два робочі частотні діапазони.

Середньоквадратичні відхилення (СКВ) для складових координат були такими:

- 0,04356 м — у напрямку схід-захід (E–W),
- 0,03087 м — для компоненти північ-південь (N–S),
- 0,03624 м — по вертикалі (U–D).

Сукупне горизонтальне (планове) СКВ, позначене як σ_{xy} , дорівнювало 0,07225 м.

Виявлені дані свідчать про значне скорочення діапазону зміни позиційних значень, коли порівнювати з апаратурою, що працює на єдиній частоті, найбільш помітно це стосується північного та вертикального (висотнісного) напрямків.

Підвищення точності зумовлене здатністю приймача з подвійною частотою нівелювати затримки, спричинені іоносферою, а також забезпечувати більш стійке усунення невизначеності фазових вимірювань.

Візуалізація даних, отриманих за допомогою RTK-алгоритму стосовно горизонтальних складових координат, представлена на рисунку 12.

Цей графічний матеріал демонструє розкид точок у визначеній площині "Схід – Північ", що дає змогу наочно з'ясувати, наскільки стабільним є визначення координат, а також зрозуміти природу просторових коливань отриманих значень.

Розгляд того, де розташовані точки, демонструє, що спостереження збиваються досить тісно біля середньої точки, що слугує доказом надійності дводіапазонного RTK-визначення, коли немає перешкод над головою.

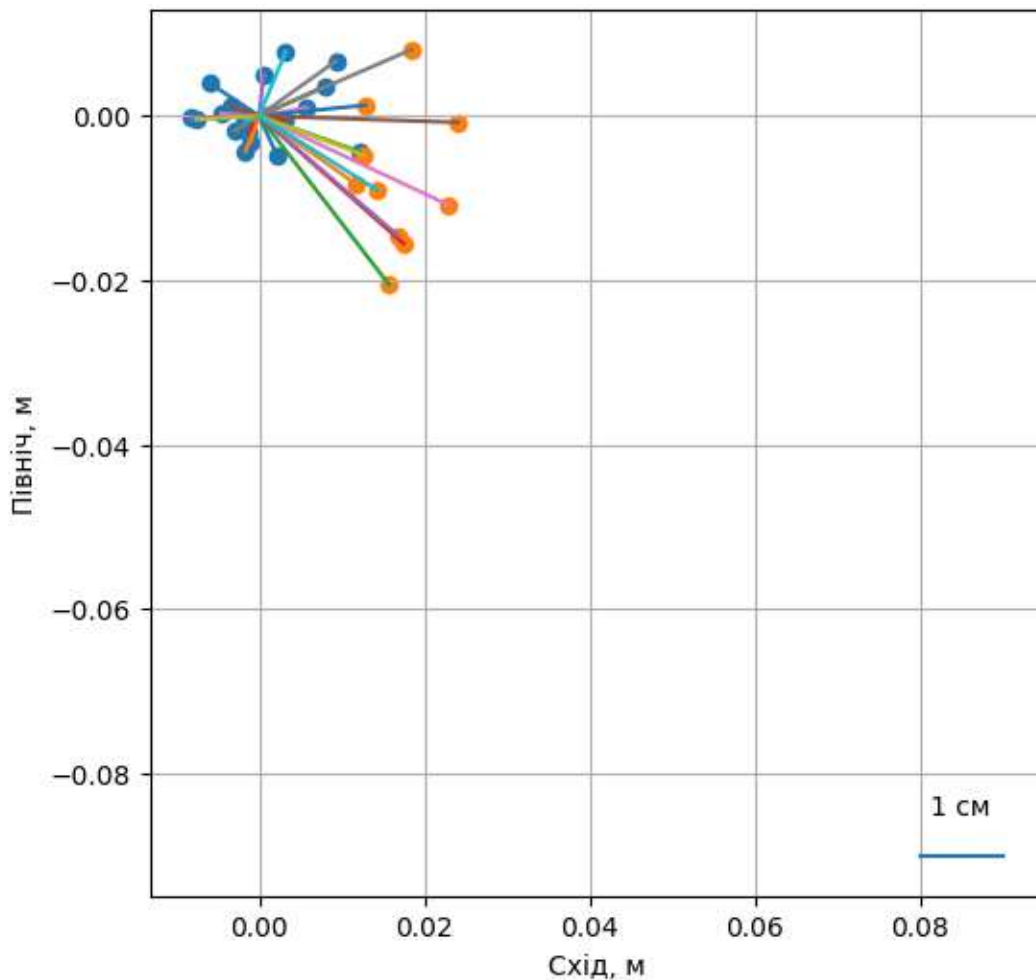


Рисунок 12. Графік горизонтальних складових положення RTK

Розгляд даних, представлених на малюнках 11 та 12, показує, що GNSS-приймач, здатний працювати на двох частотах, демонструє кращі показники щодо коефіцієнта успішного закріплення фазових невизначеностей, а також меншу середньоквадратичну помилку (RMSE) у порівнянні з апаратурою, що працює лише на одній частоті.

Таким чином, стає очевидною перевага застосування двох робочих частот під час виконання RTK-визначення координат.

Для апаратури з однією частотою було зафіксовано випадки, коли система переходила у стан "float", що неминуче призводило до погіршення точності визначення місцеположення аж до діапазону дециметрів.

Подібна поведінка є типовою для початкової стадії запуску RTK-системи, коли фіксація фазових невизначеностей спирається на обмежений набір вимірювань, і програмне забезпечення ще не вийшло на етап стабільного розв'язку.

Стосовно двочастотних приймачів, ми також реєстрували окремі епохи, де обчислювалося рішення з плаваючою комою, але навіть за таких умов достовірність визначення положення сягала лише сантиметрового діапазону.

Причина цього криється у здатності формувати лінійні поєднання вимірювань, отриманих на обох частотах, що дає змогу якісніше нівелювати запізнення, спричинені іоносферою, та зміцнити надійність визначення початкової невизначеності фази.

Таким чином, застосування даних із двох частот гарантує більш стійкий результат RTK, прискорює досягнення фіксованого режиму й мінімізує розкид значень у визначенні координат.

Ключова перевага приймача з двома частотами полягає у здатності створювати лінійні суми фазових вимірювань, отриманих на частотах $L1$ і $L2$.

Зважаючи на те, що затримка, спричинена іоносферою, залежить від частоти, обернено пропорційно квадрату частоти сигналу, застосування двох різних частот дає змогу розрахувати та усунути цей ефект.

Іоносферно-незалежна лінійна комбінація визначається наступною формулою:

$$L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

Отже,

$L1$ та $L2$ позначають фазові вимірювання, отримані на відповідних частотах $L1$ і $L2$,

тоді як f_1 і f_2 — це несучі частоти цих сигналів.

Застосування саме цієї комбінації дає змогу суттєво зменшити вплив іоносферних помилок, що належать до першого порядку.

Це, своєю чергою, підвищує надійність процедури обчислення цілочисельних значень фазових зсувів (фазових неоднозначностей) та прискорює досягнення стабільного, так званого "фіксованого" результату.

Саме цими факторами пояснюється кращий відсоток успішного закріплення та нижчі середньоквадратичні відхилення (RMSE) під час функціонування GNSS-приймача у двочастотному режимі RTK.

3.2 Результати спостережень одночастотного та двочастотного GNSS-модулів у зоні з перешкодами

На другому етапі дослідження ми зайнялися аналізом знятих RTK-даних.

Ці вимірювання виконувалися у зоні, де сигналу заважали об'єкти: поблизу будівель та різноманітних конструкцій, що призводили до часткового блокування сигналу та появи мультипроменевого ефекту.

Інформація про вимірювання, отримана за допомогою одночастотного GNSS-приймача, зведена у Таблиці 3.

Таблиця 3 Статистичні показники RTK-вимірювань, здійснених одночастотним GNSS-приймачем, за умов наявності перешкод

Коефіцієнт фіксації, %	σ_x (м)	σ_y (м)	σ_h (м)	σ_{xy} (м)	σ_{3D} (м)
0.00	0.28723	0.06229	0.30661	0.29391	0.42472

Примітка: $\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$; $\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2}$.

Показники отримані в режимі RTK у зоні з частковим екрануванням сигналу.

Дані, які ми маємо, вказують на помітне зменшення показника закріплення фазових невизначеностей, коли застосовується порівняно з ситуацією, коли небо є повністю відкритим.

Зростання показників σ_x , σ_y та σ_h дає підстави стверджувати, що багатопроменевість та екранування, яке впливає на сигнал, негативно позначаються на надійності RTK-рішення.

Зокрема, вертикальна складова координат виявилася найбільш вразливою до подібних перешкод.

За умов часткового блокування сигналу, коефіцієнт фіксації фазових неоднозначностей зафіксовано на рівні 0%.

Це означає, що протягом часу збору даних жодного разу не відбулося переходу до "фіксованого" режиму.

Всі отримані просторові рішення були сформовані у "плаваючому" режимі, що прямо призвело до погіршення якості визначення координат.

Значення середньоквадратичних помилок (RMSE) для визначення просторових координат були такі:

- Складова "схід-захід" (E–W) мала похибку, що дорівнює 0,28723 метрам,
- Для "північ-південь" (N–S) цей показник становив 0,06229 м,
- Вертикальна (висотність, U–D) складова зафіксувала RMSE на рівні 0,30661 м.

Отримані нами величини засвідчують помітне збільшення неточності, особливо це стосується східної та вертикальної складових.

Така нерівномірність у розкиді може бути зумовлена конфігурацією супутникового угруповання, місцевими віддзеркаленнями сигналу та ефектом поширення по багатьох шляхах, що типово для територій з перешкодами.

Візуалізація результатів RTK-визначення відносно горизонтальних координатних елементів представлена на рисунку 13.

Розгляд щільності точок дає можливість унаочнити коливання у визначенні координат і підтверджує суттєве зростання мінливості позиціонування, якщо порівнювати з ситуацією, коли немає перешкод.

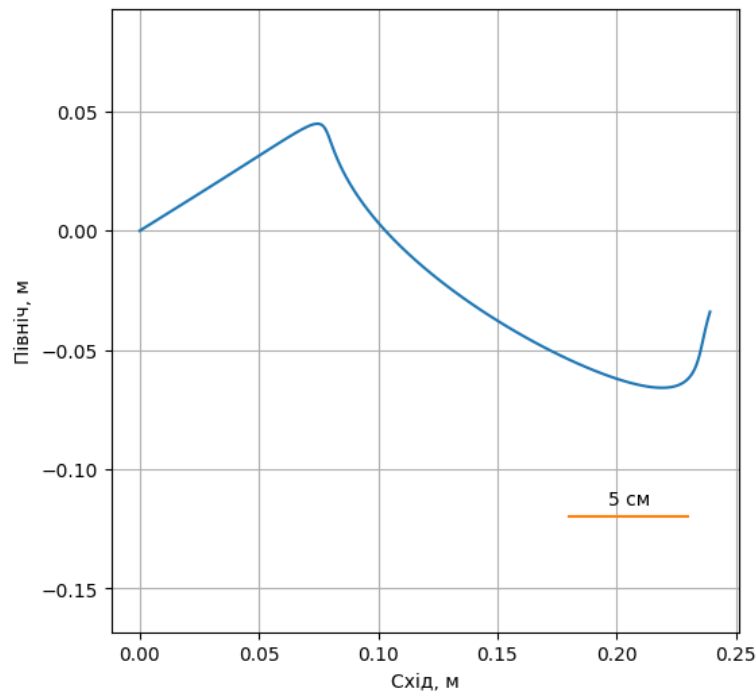


Рисунок 13. Графік горизонтальних компонентів положення RTK

Наприкінці дослідження було піддано аналізу дані, отримані шляхом RTK-вимірювань, здійснених за допомогою двочастотного приймача GNSS у місцевості, де спостерігалися перешкоди.

За таких обставин зазвичай спостерігається часткове блокування сигналів від супутників, посилення ефекту багатопроменевості, а також погіршення надійності просторового визначення положення.

Дані щодо статистичної оцінки точності визначення координат та показників успішності фіксації даних можна знайти у Таблиці 4.

Таблиця 4. Статистика двочастотного спостереження з перешкодами

Коефіцієнт фіксації, %	σ_x (м)	σ_y (м)	σ_h (м)	σ_{xy} (м)	σ_{3D} (м)
72.80	0.06928	0.03931	0.13978	0.07966	0.16088

Примітка: $\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$; $\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2}$.

Показники отримані в режимі RTK (fixed-рішення) у зоні з перешкодами.

За умов часткового затінення сигналу, система подвійної частоти GNSS демонструвала фіксаційний коефіцієнт фазових невизначеностей на рівні 72,8%, що вказує на підтримання прийнятної стійкості RTK-рішення попри наявність зовнішніх перешкод.

Показники середньоквадратичних помилок (RMSE) для визначення координатних осей були такими:

- 0,06928 м — для зміни напрямку схід-захід (E–W),
- 0,03931 м — для зміни напрямку північ-південь (N–S),
- 0,13978 м — для зміни вертикальної осі (U–D).

Зафіксовані показники засвідчують незначне збільшення похибок порівняно з тими, що мали місце за умов безперешкодного огляду неба.

Проте, здатність до визначення місця розташування залишається на позначці сантиметрової роздільної здатності для вимірів у горизонтальній площині.

Цей факт слугує доказом кращої витривалості апаратури, що працює у двочастотному режимі, до ефектів перевідбиття сигналів та випадків часткового блокування їх надходження.

Візуалізацію процесу знаходження координат за стандартом RTK для площинних складових представлено на ілюстрації, позначеній як Рис. 14.

Дослідження розкиду фіксованих точок демонструє досить тісне скупчення визначених позицій навколо їхнього середнього рівня, що засвідчує підвищену ступінь довіри до результатів, отриманих

двочастотним методом, навіть у ситуаціях ускладненого прийому вхідних сигналів.

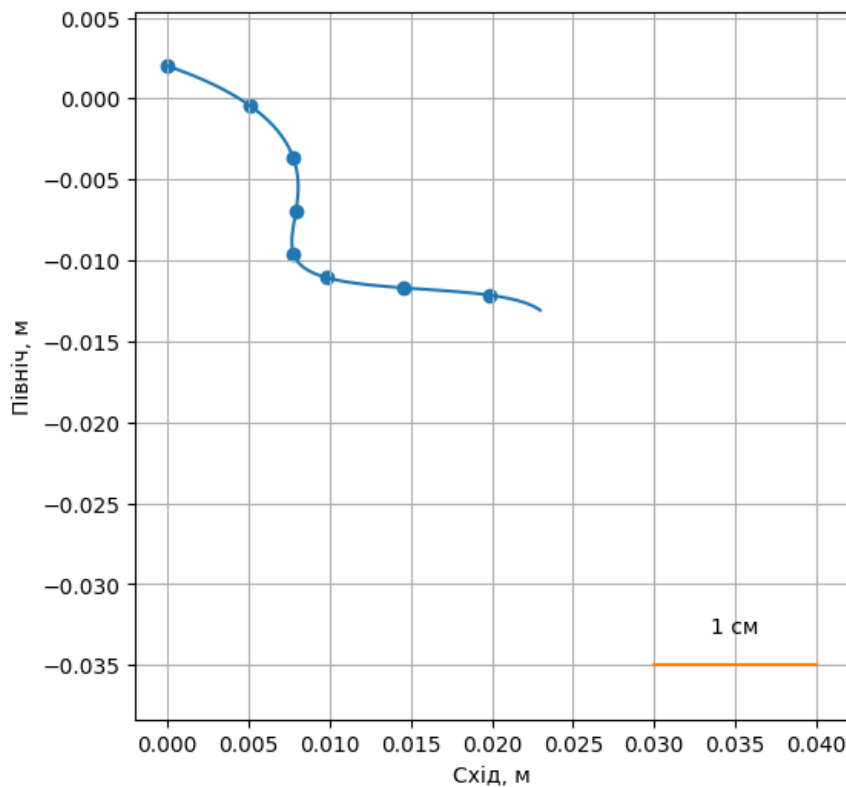


Рис. 14. Горизонтальний компонент RTK рішення (двочастотний приймач, зона з перешкодами).

Розглядаючи дані з Таблиці 3 та рисунку 13, можна констатувати, що одночастотний GNSS-модуль демонструє помітне падіння продуктивності, коли присутні інтерференції.

За весь час вимірювань RTK-рішення утримувалося у стані "float", що однозначно видно з нульового показника фіксації.

Внаслідок цього, точність визначення місця розташування не підіймалася вище дециметра, а коливання значень координат суттєво збільшувалися.

За ідентичних обставин, дводіапазонний GNSS-приймач показав набагато стійкіше функціонування.

Показник фіксації утримувався на задовільно високих значеннях, а похибки у визначенні горизонтальних координат середнім квадратом не виходили за межі сантиметрового діапазону.

Дане положення ілюструє вагому перевагу застосування приймачів, що працюють на двох частотах, коли виконується високоточне позиціонування (RTK) у зонах, де сигнал частково перекритий.

Покращення, що досягається, зумовлене здатністю створювати лінійні комбінації вимірювань фази хвилі на частотах L1 і L2.

Це дає змогу значно краще усувати вплив іоносфери та зміцнювати впевненість у визначенні початкових фазових невідомих.

Отже, використання апаратури з двома частотами сприяє прискореному виходу на точне (fixed) рішення і знижує коливання значень визначених координат у непростих умовах радіоприйому.

Висновок

На основі виконаного аналізу в межах цієї бакалаврської праці було з'ясовано, що RTK-вимірювання, застосовуючи одночастотний GNSS-приймач разом із професійною геодезичною антеною, дають змогу досягти задовільного рівня фіксації фазових невизначеностей та адекватної точності визначення місця розташування за умови необмеженого огляду небесної сфери.

При такій конфігурації спостерігається надійна стабілізація у "фіксованому" режимі, а похибки у визначенні горизонтальних координат (RMS) укладаються в діапазон сантиметрів.

Водночас, у районах із значними перешкодами, суттєво падає ефективність роботи одночастотного модуля.

Системи, що використовують технологію RTK, часто застрягають у режимі "float", через що похибки позиціонування можуть сягати рівня дециметрів.

Причина криється у значному впливі багатопроменевості, частковому блокуванні сигналу та нездатності адекватно компенсувати затримки, спричинені іоносферою, коли задіяно лише одну робочу частоту.

Натомість, модуль GNSS, що працює у двох частотах, у парі з геодезичною антеною показав стабільно кращі результати у двох розглянутих сценаріях.

Фіксація супутникових сигналів відбувалася більше ніж у 70% випадків, а горизонтальна точність визначення місця розташування залишалася у межах сантиметрів навіть за наявності завад.

Це слугує доказом того, що використання лінійних поєднань вимірювань L1–L2 є дієвим методом для мінімізації впливу іоносфери та підвищення надійності визначення початкових невизначеностей фази.

Отже, висновки демонструють перевагу застосування двочастотного приймача GNSS, обладнаного геодезичною антенною, для проведення точних геодезичних вимірювань, зокрема у міських забудованих ландшафтах, що є типовим для території нашої країни.

Варто підкреслити, що у цьому дослідженні детальному розгляду піддавалися переважно горизонтальні компоненти розв'язку RTK.

Наступні роботи логічно скерувати на більш ґрунтовне вивчення вертикального параметра, а також на визначення того, як різноманітні перешкоди та конфігурація супутникового угруповання впливають на надійність результатів, отриманих за допомогою RTK.

Список використаної літератури

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).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**« Порівняльний аналіз точності RTK-позиціонування одночастотних
та двочастотних GPS-модулів »**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____ рік
(дата)

(підпис студента)