

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

Скуматчук Максим Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка точності GNSS-позиціонування смарт-пристроїв на основі
фазових спостережень

(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

М.П. Скуматчук

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Ковтун Віталій Миронович ст.викладач

(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

Скуматчук Максим Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: « Оцінка точності GNSS-позиціонування смарт-пристроїв на основі фазових спостережень »

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. Теоретичні основи GNSS-позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях
2. Проведення дослідження
3. Отримані результати

5. Перелік графічного матеріалу:

6. Дата видачі завдання: _____

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Теоретичні основи GNSS- позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях		
2	2. Проведення дослідження		
3	3. Отримані результати		
4	Оформлення бакалаврської роботи		

Студент

Скуматчук М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Анотація

В нинішніх реаліях розвитку світових супутникових навігаційних систем (GNSS) портативні розумні гаджети дедалі частіше залучаються для встановлення координат місця розташування об'єктів.

Можливість використання фазових GNSS-вимірювань на портативних апаратах надає потенціал для покращення точності визначення координат і розширює діапазон їх використання у геодезичній справі, землевпорядкуванні та контролі просторових змін.

Для України, де GNSS-технології становлять значущу частину інженерно-геодезичних завдань та кадастрових заходів, пріоритетним є вивчення відтворюваності точності визначення координат смарт-пристроїв у практичних умовах збору даних.

Бакалаврська праця має за мету з'ясувати рівень достовірності визначення координат смарт-гаджетів за допомогою фазових даних, отриманих від супутникових навігаційних систем, із застосуванням принципів відносного визначення місцеположення.

Напрямок наукових розвідок є сам процес навігації з використанням фазових вимірювань сигналів від глобальних супутникових систем.

А предметом вивчення став ступінь точності координатних даних мобільних пристроїв, що залежить від відстані між точками вимірювання, зовнішніх умов для прийому сигналу та застосованих алгоритмів опрацювання інформації.

У межах цього дослідження було проведено огляд актуальних підходів до використання GNSS-навігації у мобільних пристроях, а також вивчено теоретичні аспекти роботи з фазовими вимірами та способи їхнього опрацювання.

Опрацювання фазових GNSS-вимірювань, здобутих за допомогою портативних гаджетів, було здійснено, застосувавши відкритий софт та інформацію з референцних станцій.

Виконано аналіз точності позиціювання у різних середовищах спостережень та при різній протяжності ліній між точками.

Також проведено зіставлення здобутих даних з відомими еталонними величинами.

Підсумки цієї роботи дають змогу зрозуміти можливості застосування сучасних смартфонів для вирішення низки практичних задач у галузях геодезії, освіти та моніторингу, зокрема на території нашої держави.

Ключові слова: GNSS; інтелектуальні пристрої; точне позиціонування

Abstract

In the current realities of the development of global satellite navigation systems (GNSS), portable smart gadgets are increasingly used to determine the coordinates of the location of objects.

The possibility of using phase GNSS measurements on portable devices provides the potential to improve the accuracy of determining coordinates and expands the range of their use in geodetic work, land management and control of spatial changes.

For Ukraine, where GNSS technologies constitute a significant part of engineering and geodetic tasks and cadastral activities, the priority is to study the reproducibility of the accuracy of determining the coordinates of smart devices in practical data collection conditions.

The bachelor's thesis aims to determine the level of reliability of determining the coordinates of smart gadgets using phase data obtained from satellite navigation systems, using the principles of relative positioning.

The direction of scientific exploration is the process of navigation itself using phase measurements of signals from global satellite systems.

And the subject of study was the degree of accuracy of coordinate data of mobile devices, which depends on the distance between measurement points, external conditions for signal reception and applied information processing algorithms.

Within the framework of this study, a review of current approaches to the use of GNSS navigation in mobile devices was conducted, as well as theoretical aspects of working with phase measurements and methods of their processing were studied.

Processing of phase GNSS measurements obtained using portable gadgets was carried out using open software and information from reference stations.

An analysis of positioning accuracy in different observation environments and with different lengths of lines between points was performed.

The obtained data was also compared with known reference values.

The results of this work allow us to understand the possibilities of using modern smartphones to solve a number of practical problems in the fields of geodesy, education and monitoring, in particular on the territory of our country.

Keywords: GNSS; intelligent devices; precise positioning

Зміст

Вступ

1 Теоретичні основи GNSS-позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях

1.1. Загальні принципи GNSS-позиціонування

1.2. Фазові GNSS-спостереження та методи відносного позиціонування

1.3. Особливості GNSS-позиціонування за допомогою смарт-пристроїв

1.4. Програмні засоби реєстрації та обробки GNSS-даних смарт-пристроїв

1.5. Порівняння GNSS-позиціонування смарт-пристроїв з іншими методами визначення координат

1.6. Аналіз факторів, що впливають на точність GNSS-позиціонування смарт-пристроїв

2. Проведення дослідження

2.1. Налаштування обладнання

2.2. Обробка даних GNSS

2.3. Експериментальні результати

3 Отримані результати

Висновки

Список використаної літератури

Вступ

У цей час, коли геодезія та споріднені сфери активно розвиваються, супутникові системи глобальної навігації (GNSS) виступають як один із ключових інструментаріїв для встановлення координатних положень об'єктів.

Методики GNSS знайшли своє широке впровадження у сферах геодезичного вимірювання, землевпорядкування, будівництва, ведення кадастру, контролю стану штучних споруд та природних явищ, а також у системах навігації та для програм, що працюють на портативних пристроях.

Хоча для досягнення високих показників точності традиційно застосовують професійне геодезичне обладнання GNSS, здатне забезпечувати вимірювання з точністю до сантиметрів, їхня висока ціна та певні складнощі у використанні стримують їхнє поширення у завданнях, що потребують масового застосування чи навчального процесу.

Проте, останнім часом спостерігається значний технологічний стрибок, який полягає у наданні можливості доступу до необроблених даних GNSS-вимірювань, особливо до вимірювань фази сигналу, безпосередньо на мобільних гаджетах.

Це сталося завдяки прогресу у сфері апаратної частини мобільних гаджетів та імплементації потрібних можливостей у новітні операційні системи.

З огляду на це, звичайні масові "розумні" пристрої набули здатності вирішувати завдання, які донедавна були прерогативою виключно фахового геодезичного інструментарію.

Застосування GNSS-вимірювань у фазовій області дає змогу оперувати техніками релятивного визначення положення, що істотно покращує точність

обчислення координат порівняно зі стандартним навігаційним визначенням місця.

Однак ступінь достовірності даних, здобутих за допомогою смарт-пристроїв, сильно обумовлений параметрами антени, стабільністю роботи приймача, зовнішніми умовами для сигналу, а також застосовуваними алгоритмами для опрацювання отриманих даних.

З огляду на вищевикладене, постає потреба у практичній апробації точності подібних висновків.

Для нашої держави це питання набуває особливої ваги, адже в геодезії активно впроваджуються GNSS-технології, розбудовуються мережі безперервно працюючих референцних станцій, і водночас зростає попит на доступні та переміщувані апарати для визначення місця розташування.

Можливість залучення сучасних портативних гаджетів для виконання окремих завдань у царині геодезії, кадастру чи моніторингу здатна значно зменшити фінансові вкладення у збирання даних, а також розширити сферу застосування супутникової навігації у навчанні.

Хоча певні наукові розробки у цій галузі вже існують, ступінь вивченості точності позиціонування за допомогою GNSS на мобільних пристроях у реальних умовах польових вимірювань, особливо при зміні відстаней до базових точок та варіаціях умов знімання, залишається недостатнім.

Цим і зумовлена вагомість цієї бакалаврської роботи.

Завданням роботи є визначення рівня точності визначення місця розташування смарт-пристроїв, що використовують фазові дані GNSS, шляхом застосування технік відносного визначення позиції.

Предметом вивчення слугує точність встановлення координат мобільних пристроїв, що залежить від ситуації спостереження, протяжності ліній між точками та способів аналізу отриманих величин, тоді як об'єктом дослідження виступає процес визначення координат за допомогою фазових зніманих сигналів від супутникових навігаційних систем.

Щоб досягти окресленої мети, у межах роботи заплановано вивчити теоретичні засади, що стосуються фазових зніманих у GNSS, вивчити потенціал апаратних засобів смартфонів для збору таких даних, здійснити обробку зібраних вимірювань із застосуванням загальнодоступного програмного забезпечення та перевірити достовірність отриманих координат.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про те, наскільки виправданим є застосування сучасних гаджетів у практичних геодезичних роботах та в освітньому процесі.

Можливість залучення портативних інтелектуальних апаратів до операцій супутникового визначення місця розташування стала результатом нововведень, які були реалізовані корпорацією Google у 2016 році.

Від версії Android 7.0 (Nougat) і далі, мобільні апарати типу "смартфон" і "планшет" почали надавати доступ до первинних даних, отриманих від супутникових систем навігації – інформації, яка раніше була закрита для широкого загалу користувачів.

Ця зміна відкрила шлях для інтеграції мобільних систем у ті завдання, які до цього часу вважалися прерогативою спеціалістів із професійної геодезії.

Після того, як в останньому кварталі 2016 року відкрили доступ до необроблених даних GNSS-спостережень, серед науковців значно зріс ентузіазм щодо вивчення можливостей, які надають ці смарт-пристрої.

Початкові спроби експериментального характеру зосереджувалися на дослідженні потенціалу реєстрації змін фази та визначенні, наскільки ці

виміри можуть бути корисними для визначення відносного положення за допомогою GNSS.

Водночас, перші версії програмного забезпечення для Android зіткнулися із доволі значними обмеженнями у функціональності.

Конкретно, вбудовані засоби не дозволяли напряму зберігати первинні (сирі) дані GNSS у формі RINEX — загальновизнаному стандарті для професійної обробки спостережень від супутників.

Натомість, для користувача були доступні лише вторинні показники, а саме — накопичені фазові величини, що подавалися як результат множення фази носія сигналу на відповідну довжину хвилі.

Цей спосіб представлення інформації аж надто звужував поле для використання традиційних методів високоточного визначення координат.

Значний поступ у подоланні цього вади було здійснено 2017 року, коли вийшов спеціалізований софт Geo++ RINEX Logger.

Ця програма дала змогу робити повний збір "сирих" даних (спостережень) від супутникових угруповань GPS, ГЛОНАСС та Galileo безпосередньо з портативних гаджетів, після чого дані зберігалися у форматі RINEX, який зручно використовувати для подальшого наукового чи практичного аналізу.

Окремою завадою, що лімітує точність визначення координат при користуванні "розумними" апаратами, виступають саме характеристики роботи інтегрованих GNSS-чіпсетів.

Для економії енергоресурсу більшість портативних гаджетів застосовують режим циклічної роботи приймача.

Суть його полягає у чергуванні періодів активного пошуку супутників через проміжки повного вимкнення.

Ця особливість спричиняє постійні збої у фіксації фази, що негативно позначається на достовірності даних при використанні високоточних технік визначення координат.

Проте, серед апаратного забезпечення Android старого покоління трапляються екземпляри, де циклічний режим роботи GNSS або деактивовано, або значно звужено його вплив.

Прикладом такого пристрою слугує планшет Nexus 9.

Це дає йому перевагу для проведення досліджень, сфокусованих на вивченні фазових вимірювань GNSS.

У межах цього дослідження було проведено аналіз, метою якого була апробація точності визначення географічних координат, що досягається завдяки використанню GNSS-приймача та антени, вбудованих безпосередньо у планшет моделі Nexus 9.

Головний акцент було зроблено на з'ясуванні, чи реально здійснити швидке статичне визначення положення, обходячись без підключення будь-яких зовнішніх антен, додаткових приймальних апаратів чи іншого спеціалізованого устаткування.

Робота із зібраними даними супутникових вимірювань була виконана за допомогою вільнодоступного програмного забезпечення goGPS.

В результаті вдалося показати перспективи розробки недорогих та рентабельних GNSS-систем, призначених для оперативних геодезичних зйомок, які здатні забезпечити точність визначення координат у межах дециметрового діапазону.

1 Теоретичні основи GNSS-позиціонування та можливості його застосування на смарт-пристроях

1.1. Загальні принципи GNSS-позиціонування

Супутникові системи глобальної навігації (GNSS) слугують засобом для встановлення просторових координат, швидкості та точного часу споживача, покладаючись на прийом сигналів, що надходять від навігаційних апаратів на орбіті.

Фундаментом для визначення положення за допомогою GNSS є фіксація часу проходження радіосигналу від супутника до пристрою приймача, що дає змогу розрахувати відстань, яка розділяє ці два об'єкти.

Щоб отримати повні тривимірні координати, критично важливо реєструвати сигнали, отримані одночасно, щонайменше від чотирьох космічних апаратів.

У сфері геодезичних робіт технології GNSS активно використовуються для проведення зйомок місцевості, формування опорних геодезичних систем, виконання кадастрових заходів, а також для контролю за зміщеннями як штучних споруд, так і природних об'єктів.

Досягнення значної точності у визначеннях GNSS уможлиблюється завдяки застосуванню передових алгоритмів для опрацювання даних та використанню апаратної частини професійного класу.

Залежно від характеру проведених спостережень, виокремлюють навігаційне визначення місця розташування, що спирається на реєстрацію кодових сигналів, і, власне, високоточне позиціонування, яке оперує даними фазових вимірювань носійної хвилі.

Фазові дані, по суті, є тим фундаментом, на якому будуються усі методи, що дають змогу розраховувати географічні координати з похибкою у межах сантиметра чи дециметра.

1.2. Фазові GNSS-спостереження та методи відносного позиціонування

Вимірювання фази носійної хвилі навігаційного сигналу, який надходить від супутника до приймача, складає суть фазових GNSS-вимірювань.

На противагу вимірам псевдовизначень коду, фазові спостереження вирізняються значно меншою випадковою складовою похибки, проте вимагають вирішення питання щодо невідомості початкової фази.

Принципи визначення місцеположення відносно ґрунтуються на паралельному прийомі сигналів GNSS двома чи більше приймальними апаратами, де один із них, із заздалегідь відомими просторовими координатами, функціонує як еталонна (базова) станція.

Визначення координат об'єкта, що рухається чи перебуває у стані спокою, здійснюється завдяки опрацюванню різниць між зібраними фазовими вимірами, що дає змогу суттєво нівелювати вплив системних дефектів, спричинених затримками в іоносфері та тропосфері, а також неточностями в даних про орбіти супутників.

Відносний метод позиціонування знаходить широке використання як під час стаціонарних та швидкостатичних геодезичних зйомок, так і в умовах функціонування в реальному часі.

Кінцева точність визначення координат безпосередньо залежить від довжини сполучної лінії між приймачами, якості прийому сигналів та загального часу, витраченого на спостереження.

1.3. Особливості GNSS-позиціонування за допомогою смарт-пристроїв

Портативні гаджети, такі як мобільні телефони та планшети, тривалий час задовольнялися лише навігаційною функцією, забезпечуючи точність у межах метра.

Ключовими перешкодами були примітивні антени для прийому сигналів GNSS, нестабільність роботи приймальних модулів та унеможливлення доступу до "сирих" даних від супутників.

Та картина кардинально змінилася, коли на мобільних девайсах стало можливим фіксувати необроблені виміри GNSS.

Це відкрило шлях до використання вимірів фази, а звідси – до застосування технологій для відносного визначення координат безпосередньо на смарт-приладах.

Однак, конструктивні недоліки цих гаджетів, насамперед мініатюрні антени та вразливість до зовнішніх перешкод, досі суттєво позначаються на достовірності отриманих даних.

Компромісом є також режим економії енергії, який змушує GNSS-приймач періодично вимикатися.

Подібна практика породжує прогалини у безперервному моніторингу фази, що здатне згубно позначитися на коректному знаходженні початкових цілочисельних значень неоднозначності фазових вимірів.

1.4. Програмні засоби реєстрації та обробки GNSS-даних смарт-пристроїв

Щоб застосовувати фазові виміри GNSS, критично важливо мати змогу їх фіксувати у форматі, який підходить для професійних інструментів аналізу.

Стандартом де-факто для зберігання сирих даних супутникових вимірювань слугує формат RINEX, який активно застосовується у щоденній геодезичній роботі.

Завдяки появі програмування, спеціалізованого для мобільних гаджетів, стало можливим збирати дані GNSS прямо на «розумних» пристроях, а потім опрацьовувати їх на стаціонарних комп'ютерах.

Перевагою значною є можливість оперувати відкритими програмами для аналізу фазових даних, адже це робить високоточне визначення координат доступним для великої кількості людей.

Впровадження подібних софтверних рішень відкриває шлях до інтеграції мобільних пристроїв у навчальний процес, а також для вирішення певних практичних геодезичних задач, де жорсткі вимоги до точності не є пріоритетом.

1.5. Порівняння GNSS-позиціонування смарт-пристроїв з іншими методами визначення координат

Щоб з'ясувати потенціал визначення місцезнаходження за допомогою ГНСС на смартфонах, варто зіставити цю технологію з іншими загальноновживаними у сфері геодезії способами отримання координат.

Кожен із цих методів має свої сильні сторони, недоліки та зони ефективного застосування.

Стандартні навігаційні системи, що ґрунтуються на фіксації GNSS-кодів, дають відносно невелику точність, але вирізняються легкістю впровадження та швидкістю отримання результатів.

Спеціалізовані геодезичні ГНСС-приймачі, які використовують вимірювання фази сигналу, можуть забезпечити точність до сантиметра, проте

це пов'язано з істотними фінансовими вкладеннями та вимагає від оператора відповідної кваліфікації.

Смартфони, які здатні опрацьовувати фазові дані ГНСС, посідають позицію посередині між простими навігаційними та високоточними геодезичними інструментами.

Вони поєднують доступну вартість та портативність із потенціалом покращення точності завдяки використанню технік релятивного (відносного) визначення координат.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів визначення координат

Метод позиціонування	Тип вимірювань	Типова точність	Вартість обладнання	Основні сфери застосування
Навігаційне GNSS (смартфон)	Кодові	3–10 м	Низька	Навігація, орієнтування
GNSS смарт- пристрою (фазові)	Фазові	0,1–1,0 м	Низька	Навчальні, прикладні, моніторингові
Професійний GNSS (RTK/Static)	Фазові	0,01–0,05 м	Висока	Геодезія, кадастр, будівництво
Тахеометричні вимірювання	Кутові та лінійні	0,005–0,02 м	Висока	Детальна зйомка
Фотограмметрія з БПЛА	Оптичні	0,03–0,10 м	Середня	Топографія, моніторинг

1.6. Аналіз факторів, що впливають на точність GNSS-позиціонування смарт-пристроїв

На противагу професійному обладнанню для роботи з ГНСС, портативні гаджети володіють низкою специфічних характеристик, що прямо позначаються на тому, наскільки точно визначаються координати.

Серед ключових аспектів, на які варто звернути увагу, виділяються:

- конструктивні особливості та якість антени; як правило, вона інтегрована і не створювалася з прицілом на геодезичні вимірювання високої точності;
- зовнішні умови, за яких відбувається приймання сигналу, зокрема, ступінь впливу багатопроменевого поширення та перешкоди, що блокують сигнал;
- відстань (базова лінія) між апаратом користувача та опорною станцією;
- час, витрачений на збір даних, що критично важливо для методів швидкої статичної фіксації точок;
- спосіб функціонування приймача ГНСС та наявність механізмів періодичного зниження енергоспоживання;
- методики, що застосовуються для опрацювання даних фазових вимірювань.

Зазвичай, вплив перелічених чинників визначається шляхом детального вивчення помилок, що виникають при визначенні позиції як у горизонтальній площині, так і по вертикалі.

2. Проведення дослідження

2.1. Налаштування обладнання

Приймання даних від супутникових навігаційних систем було здійснене четвертого серпня дві тисячі двадцять першого року, тривалістю близько дев'яноста хвилин за умов нерухомого розміщення.

Для фіксації необроблених супутникових даних залучено планшет HTC Nexus 9, на котрому було інстальовано спеціалізований софт Geo++ RINEX, призначений для збереження прийманих GNSS-вимірів у стандарті RINEX.

Цей планшет розташували зовсім поруч із референсним приймачем u-blox EVK-6T, укомплектованим типовою антенною типу "патч" ANN MS, що дало змогу досягти зіставних умов для отримання сигналів.

Nexus 9 має вбудований GNSS-чіп Broadcom BCM4752, здатний приймати сигнали від навігаційних угруповань GPS і ГЛОНАСС.

У контексті цього наукового пошуку, для забезпечення єдності методології обробки та валідності зіставлення, були задіяні лише ті спостереження, що надходили від системи GPS.

Конструктивні особливості антени GNSS, інтегрованої в планшет Nexus 9, а також її точна модель виробником не розкриваються.

Приблизні фізичні габарити апарату сягають 22 на 15 сантиметрів, а блок антени, найімовірніше, інтегровано у верхньому лівому куті корпусу.

Разом з тим, бракує підтверджених відомостей щодо того, чи містить цей елемент окремий, спеціально розроблений приймач сигналу GNSS, що зазвичай є характерним для апаратів, призначених для широкого загалу користувачів.

Обидва системи позиціонування (GNSS) були розміщені на покрівлі будівлі, яка налічує п'ять поверхів, що забезпечило практично повний огляд небосхилу та знизило ефект блокування проходження сигналів.

Дане розташування для проведення вимірювань дозволило не лише зменшити кількість відбитих сигналів (багатопроменевість), але й сформувати оптимальні умови для детального дослідження точності вимірювань фази супутникових систем навігації.



Рисунок 1. Планшет Nexus 9 (ліворуч) та антена u-blox ANN-MS (праворуч).

Аби зібрати референтні заміри в рамках дослідження, на ті ж самій висоті даху встановили додатковий апарат для роботи з ГНСС.

Дві постійні точки вимірювання розташували приблизно за 13 метрів від зони фокусного моніторингу, завдяки чому вдалося створити еталонні лінії відліку з найменшою можливою довжиною.

Перша з цих опорних точок була обладнана передовим багаточастотним приймачем Trimble BD930, що функціонував у зв'язці з геодезичною антеною моделі Trimble Zephyr.

Друга точка ґрунтувалася на системі контролю GeoGuard, яка використовувала одночастотний приймач ГНСС u-blox LEA-M8T, укомплектований антеною Tallysman TW3470.

Слугували ці системи аж для єдиної цілі — бути референсними пунктами при обробці результатів визначення місця розташування на мікродистанціях.

Аби перевірити ефективність підходу у сценаріях, котрі більше імітують реальні геодезичні роботи, була інтегрована у вивчення вже функціонуюча GNSS-база FRKV, котра є частиною системи SistemSolution.

Ця база знаходиться у межах Івано-Франківська, приблизно за 8 кілометрів від зони здійснення випробувань, і обладнана висококласним приймально-антенним апаратом від Leica, зокрема моделлю антени Leica A10.

Окрім власне фізично наявних референсних пунктів, у рамках проєкту задіяли потенціал інтернет-сервісів для визначення координат, які дозволили згенерувати штучні орієнтири.

Відтак, було зкомпільовано дві віртуальні бази: перша з позиційними даними, що повністю збігаються з локацією приймача Trimble BD930, якій присвоєно робочу назву GRVR, а друга — із штучно створеною позицією на дистанції близько 4 кілометрів від об'єкту дослідження, що отримала маркування VR4K.

Використання цих віртуальних точок дало змогу оцінити точність визначення місця, якби система функціонувала з використанням мережевих поправок GNSS.

На Рисунок 2, відображено взаємне просторове розміщення усіх фізичних та змодельованих еталонних точок, що були залучені до цього вивчення.

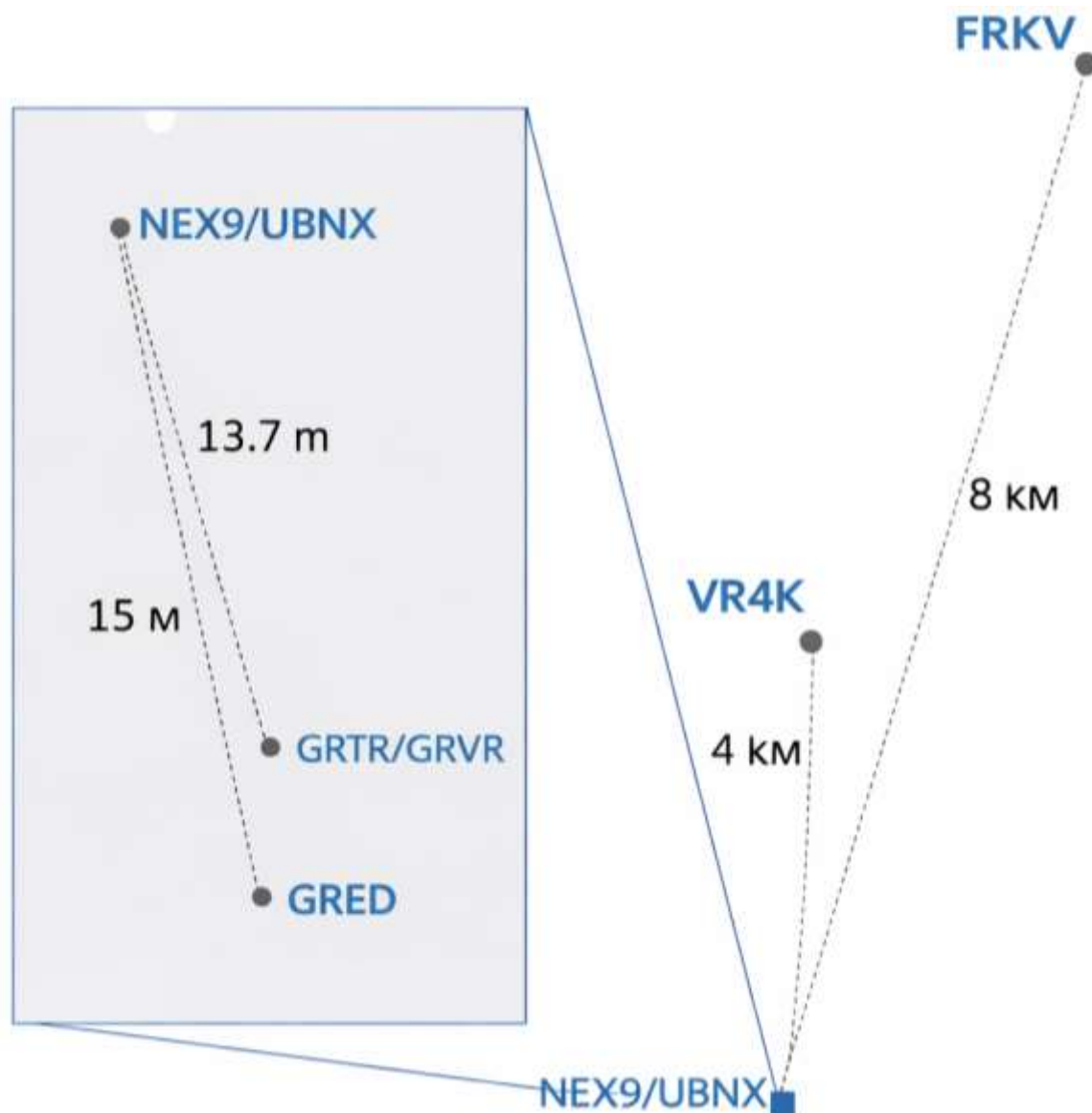


Рисунок 2. Схема розташування станцій GNSS

Таким чином, у рамках цієї роботи було проведено визначення розташування двох засобів вимірювання, які у подальшому тексті позначаються наступними умовними іменами у дужках:

- планшет Nexus 9 (позначення NEX9);
- приймач GNSS-типу u-blox (позначення UBNX).

Координати цих апаратів визначалися за допомогою техніки відносного GNSS-визначення положення, спираючись на низку референцних (базових) станцій.

Список використаних базових станцій наведено нижче, відсортований за збільшенням відстані до об'єкта дослідження, разом із їхніми ідентифікаторами:

- приймач Trimble, відстань до якого становила 13,7 м (маркер GRTR);
- віртуальна референцна станція SPIN VRS, з ідентичною відстанню 13,7 м (маркер GRVR);
- апарат моніторингу GeoGuard GMU, розташований на відстані 15 метрів (маркер GRED);
- віртуальна станція, створена на віддалі 4 км від точки вимірювань (маркер VR4K);
- стаціонарна станція, що належить мережі SistemSolution, розміщена на відстані 8 кілометрів (маркер FRKV).

2.2. Обробка даних GNSS

Обробка мережевих GNSS-вимірювань здійснювалася за допомогою програмних рішень Leica Geo Office та MATLAB.

Для обчислення географічних координат приймачів u-blox та Nexus 9 стосовно кожної з п'яти опорних станцій було задіяно пакетний алгоритм, що ґрунтується на принципі мінімізації найменших квадратів.

В основу обчислювального процесу лягли фазові вимірювання на частоті L1 GPS, представлені у вигляді подвійних різниць.

Для виконання розрахунків були задіяні ефемериди та дані про час супутників, отримані безпосередньо з навігаційного сигналу.

Жодні зовнішні, високоточні орбітальні дані для корекції не застосовувалися.

На початковій стадії підготовки відомостей для з'ясування вихідних координат та оцінки надійності отриманих вимірювань використовувалися псевдовиміри дальності та ефекти Доплера, зафіксовані на частоті L1 системи GPS.

Координати приймачів марок u-blox та Nexus 9 визначалися незалежно, без залучення будь-яких попередньо відомих відомостей про їхнє місцезнаходження.

Для апаратури, що працює на одній частоті та належить до недорогого сегменту (NEX9, UBNX, GRED), процедура виявлення стрибків у фазових обліках здійснювалася шляхом аналізу вимірювань Доплера та фази.

У випадку, коли набір даних охоплював вимірювання на двох частотах (GRTR, GRVR, VR4K, FRKV), використовувався підхід, що ґрунтується на комбінаціях, вільних від геометричних внесків.

Програмний механізм автоматично оптимізував критерій для знаходження розривів, керуючись характером наявних даних.

Впливи іоносфери та тропосфери були інтегровані у розрахунки з використанням загальноприйнятих моделей.

Проте, через скромну протяжність вихідних ліній, їхній ефект було майже цілком нівельовано завдяки застосуванню методу подвійних різниць.

Найменший допустимий кут підйому супутників було зафіксовано на позначці 15 градусів.

При присвоєнні ваг вимірюванням бралася до уваги висота супутника над горизонтом.

Період, що використовувався для обробки даних, відповідав частоті їхнього запису для кожної з вихідних ліній і складав 5 секунд для пунктів GRTR та GRED, 1 секунду для умовних точок GRVR та VR4K, та 30 секунд для станції FRKV.

Щодо кожної вихідної лінії, опрацьовувався як цілісний масив даних тривалістю півтори години, так і шість окремих 15-хвилинних інтервалів, кожен з яких підлягав незалежному аналізу, аби перевірити стійкість отриманих значень.

2.3. Експериментальні результати

З огляду на те, що головним завданням цієї праці є з'ясування потенційної точності швидких статичних GNSS-вимірювань, що тривають кілька десятків хвилин із залученням смарт-гаджетів, ми додатково розрахували еталонні визначення тривалістю півтори години.

Ці опорні розрахунки, здобуті завдяки використанню низки різних референцних станцій, слугували точкою для звірки із результатами, отриманими під час 15-хвилинних фіксацій, як для планшета Nexus 9, так і для апаратури u-blox.

Опрацювання даних продемонструвало, що розходження між півторагодинними результатами, визначеними для пристрою u-blox за

допомогою п'яти окремих опорних станцій, сягає близько п'яти міліметрів по горизонталі та не перевищує сімнадцять міліметрів по вертикалі, що узгоджується з прогнозованими показниками точності.

Стосовно планшета Nexus 9, отримані опорні дані демонструють трохи меншу точність, проте в жодній із ситуацій похибка не сягає 2 см по жодній із трьох координатних осей, що знаходить своє підтвердження у відомостях, представлених у Таблиці 1.

Таблиця 1. Середні похибки, отримані для 1,5-годинного зйомки

Станції дослідження	UBNX			NEX9		
	X	Y	Z	X	Y	Z
GRTR (см)	0.0	0.3	-1.6	-0.4	0.2	0.1
GRVR (см)	-0.1	0.4	0.9	1.7	-0.3	1.9
GRED (см)	0.3	-0.4	0.5	-2.1	0.7	-2.3
VR4K (см)	-0.2	0.2	1.3	1.3	-0.2	1.5
FRKV (см)	0.0	-0.6	-1.0	-0.4	-0.5	-1.3

Аби приблизно звірити узгодженість тих координат, що присвоєні планшету Nexus 9, було здійснено зіставлення дистанції між ним та приймальною антеною u-blox, розрахованої GPS-даними, із фактичною відстанню, заміряною під час випробувань рулеткою.

Треба підкреслити, що така валідація є скоріше приблизною, адже справжнє місцезнаходження GNSS-антени у корпусі Nexus 9 не є відомим напевно.

Беручи до уваги габарити планшета, реальна дистанція між антеною u-blox та можливим місцем розташування антени Nexus 9 може коливатися у межах десь від 19 до 32 сантиметрів.

У світлі цього, відстань у 23,5 см, отримана завдяки GPS-визначенню місцезнаходження, визнається прийнятною, оскільки вона потрапляє у межі прогнозованого діапазону величин.

Протягом шести чвертьгодинних інтервалів вимірювань, отриманих з кожної базової станції, проводилося зіставлення результатів із еталонним рішенням, тривалість якого становила півтори години.

При обробці даних для планшета Nexus 9 спостерігалися проблеми з точним визначенням цілочислових значень фазових неоднозначностей.

Частина обчислень показала, що програмний алгоритм робив помилки у виборі цих цілих чисел, як наслідок, значення, отримані у фіксованому режимі, мали значніші розбіжності з еталоном, аніж ті, що були здобуті у плаваючому режимі.

Натомість, для апаратури u-blox процес визначення фазових неоднозначностей демонстрував повну стійкість та відсутність збоїв у всіх проаналізованих сценаріях.

Спільне представлення даних про точність визначення координат планшета Nexus 9 та приймача u-blox, коли обидва працювали у режимі розв'язання плаваючих неоднозначностей, візуалізовано на графіку, що позначений цифрою 3.

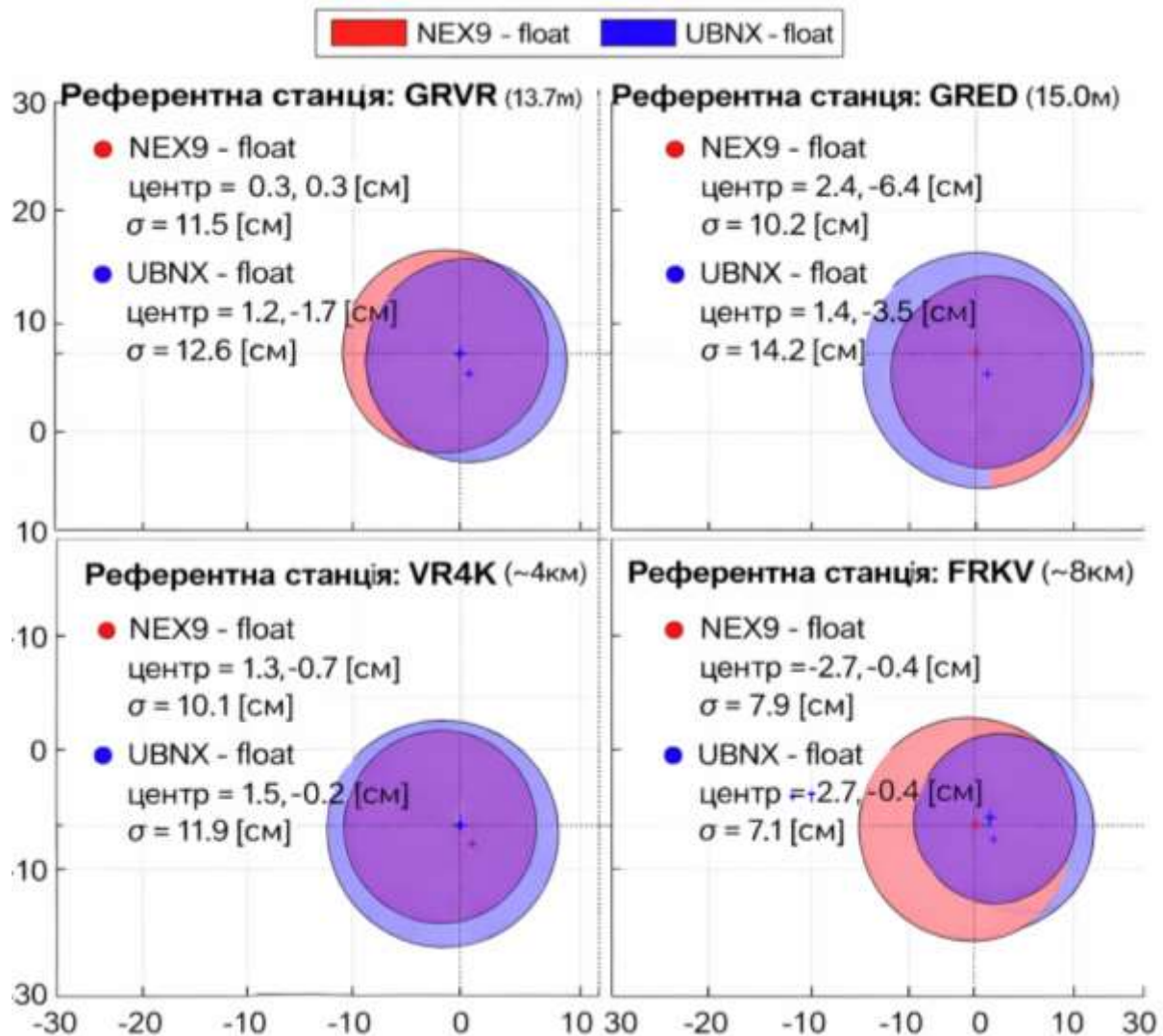


Рисунок 3. Розподіл даних для референтних станцій

Згідно з проведеним аналізом, робота обох приймальних пристроїв є доволі схожою.

При умові задіяння дійсних геодезичних референсних точок (GRTR та FRKV) приймач від u-blox демонструє дещо вищі показники якості, водночас планшет Nexus 9 демонструє більшу консистентність отриманих даних, коли залучаються віртуальні станції або застосовується сумісний референсний приймач.

У загальному підсумку, для будь-якої з проаналізованих конфігурацій опорних станцій, розраховані розбіжності виявляються в одній і тій же порядковій величині для обох моделей приймачів, що підтверджує ідентичний ступінь стійкості обчислених позицій.

Як не було передбачено, найнижчий середній показник відхилення було зафіксовано для планшета Nexus 9, коли як опора використовувалася станція GRVR.

У цій конкретній ситуації, розбіжність у середньому склала приблизно 0,3 см, причому це спостерігалось як у східному, так і в північному спрямуваннях.

Найкраща загальна точність була зафіксована при залученні референсної станції GRTR, яка являє собою фізичну двочастотну геодезичну точку з дуже малою довжиною бази, що дорівнює 13,7 м.

Для цієї конфігурації граничні відхилення склали 7,4 см для апарату Nexus 9 та 4,7 см для u-blox.

Коли ж довжину базової лінії розтягнули до 8 кілометрів (сценарій FRKV), точність дещо погіршилася, хоча це погіршення виявилось мінімальним: середньоквадратичні відхилення досягли 9,9 см для комбінації FRKV–NEX9 та 7,1 см для FRKV–UBNX.

Дані, отримані завдяки застосуванню віртуальних референцних точок GRVR та VR4K, демонструють практично ідентичний рівень точності.

У зазначених ситуаціях стандартні розбіжності коливалися у діапазоні від 10,1 до 12,6 сантиметрів, незалежно від того, чи йшлося про приймач Nexus 9, чи про апаратне забезпечення u-blox.

Стосовно еталонної станції GRED, яка продемонструвала дещо менш вражаючі показники порівняно з іншими конфігураціями, варто підкреслити,

що це єдина станція, яка використовувала одночастотний приймач із низькою вартістю.

Попри це, точність визначення місцеположення планшета Nexus 9, навіть за таких умов, трималася в межах кількох сантиметрів: стандартне відхилення склало 13,2 см, а середні зсуви сягали 2,4 см на схід та -6,4 см на північ.

На четвертому зображенні проілюстровано, наскільки значно покращилися показники для приймача u-blox після застосування процедури фіксації цілочисельної фазової невизначеності.

Раніше, як демонструвало третє зображення, були представлені аналогічні обчислення, де використовувалися розв'язки із дробовими невизначеностями.

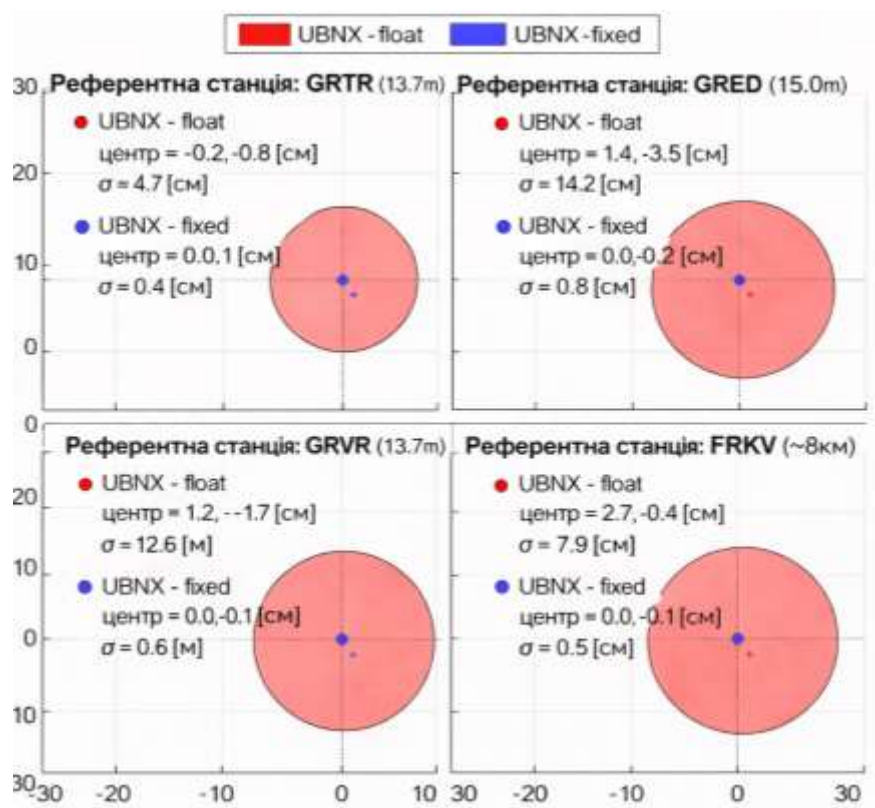


Рисунок 4 Розміщення даних референтних станцій

Щойно фазові невизначеності вдається усунути, зміщення зазнають помітного скорочення: замість кількох сантиметрів вони сягають близько 0,1 см.

Схожа динаміка спостерігається й у показниках розкиду даних, адже стандартні відхилення знижуються майже в десять разів, коли ми розглядаємо розв'язки з усуненими невизначеностями, коливаючись у діапазоні від 0,4 см до 0,8 см.

Аналогічне поліпшення якості даних простежується також і у вертикальному вимірі.

У Таблиці 2 представлені середні показники та стандартні відхилення розбіжностей у визначенні висот, отриманих на основі 1,5-годинних еталонних розрахунків та 15-хвилинних сесій вимірювань.

Таблиця 2. Середнє значення та стандартне відхилення

Станції дослідження	UBNX		NEX9		UBNX фіксоване	
	середній	стандартний	середній	стандартний	середній	стандартний
GRTR (см)	-0.1	3.4	-0.6	4.8	-0.1	0.3
GRVR (см)	-0.2	9.4	0.3	8.8	-0.1	0.4
GRED (см)	-3.5	10.1	-6.4	9.2	-0.2	0.6
VR4K (см)	-2.1	9.0	-0.7	8.5	-0.1	0.3
FRKV (см)	0.3	3.5	-0.4	8.0	-0.1	0.2

Подібно до ситуацій, що мали місце раніше, найкращі показники точності були зафіксовані для тих інтервалів, що пролягали між приймачем UBNX та реальними реперними станціями, демонструючи стандартне відхилення у межах 3,5 сантиметрів.

Також варто відзначити високу якість результатів, отриманих для надзвичайно короткого плеча GRTR–NEX9, де стандартне відхилення сягає 4,8

см, тоді як для інших конфігурацій базових ліній точність тримається ближче до позначки у десять сантиметрів.

Якщо ж розглядати вертикальний вимір, то після досягнення стійкого (фіксованого) розв'язку (за умови використання даних приймача UBNX) спостерігається суттєве покращення: і середні зсуви, і розкиди (стандартні відхилення) знижуються до значень, менших за один сантиметр.

На ілюстрації 5 представлено фазові залишкові значення подвійних диференціалів, отримані після проведення обробки для інтервалів GRTR–NEX9, GRTR–UBNX, GRED–NEX9 та GRED–UBNX, що наочно підтверджує рівень якості знайдених розв'язків.

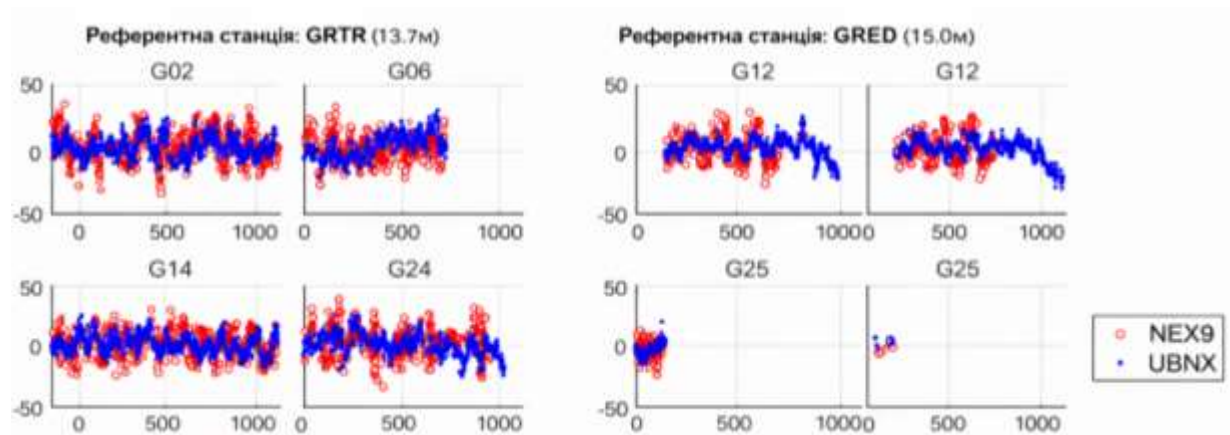


Рисунок 5. Фазові залишки подвійної різниці після апроксимації

Проведене дослідження демонструє, що стосовно всіх проаналізованих відрізків, фазові залишкові значення планшета Nexus 9 (NEX9) після корекції, як правило, демонструють вищу ступінь розсіювання, ніж аналогічні залишкові значення, отримані від апаратури u-blox (UBNX).

Цей факт вказує на те, що якість приймання сигналу, що забезпечується внутрішньою антеною NEX9, є нижчою, аніж у випадку з виносним антенним елементом, який застосовується у вимірювальному приладі UBNX.

При цьому для обох моделей обладнання не було зафіксовано значних систематичних зсувів у залишках, що дозволяє зробити висновок про відсутність серйозних неточностей у моделюванні.

Окремо слід звернути увагу на те, що у випадку дуже невеликих відстаней (надкоротких базових ліній) дані, отримані відносно референсних станцій GRTR та GRED, виявилися досить близькими, попри відчутну різницю у технічних параметрах та цінній категорії обладнання цих двох станцій.

Схожа ситуація простежується й тоді, коли задіяні віртуальні опорні станції.

На рисунку 6 представлено фазові залишки подвійних різниць, отримані після апроксимації для базових ліній, створених завдяки станціям GRVR та VR4K.

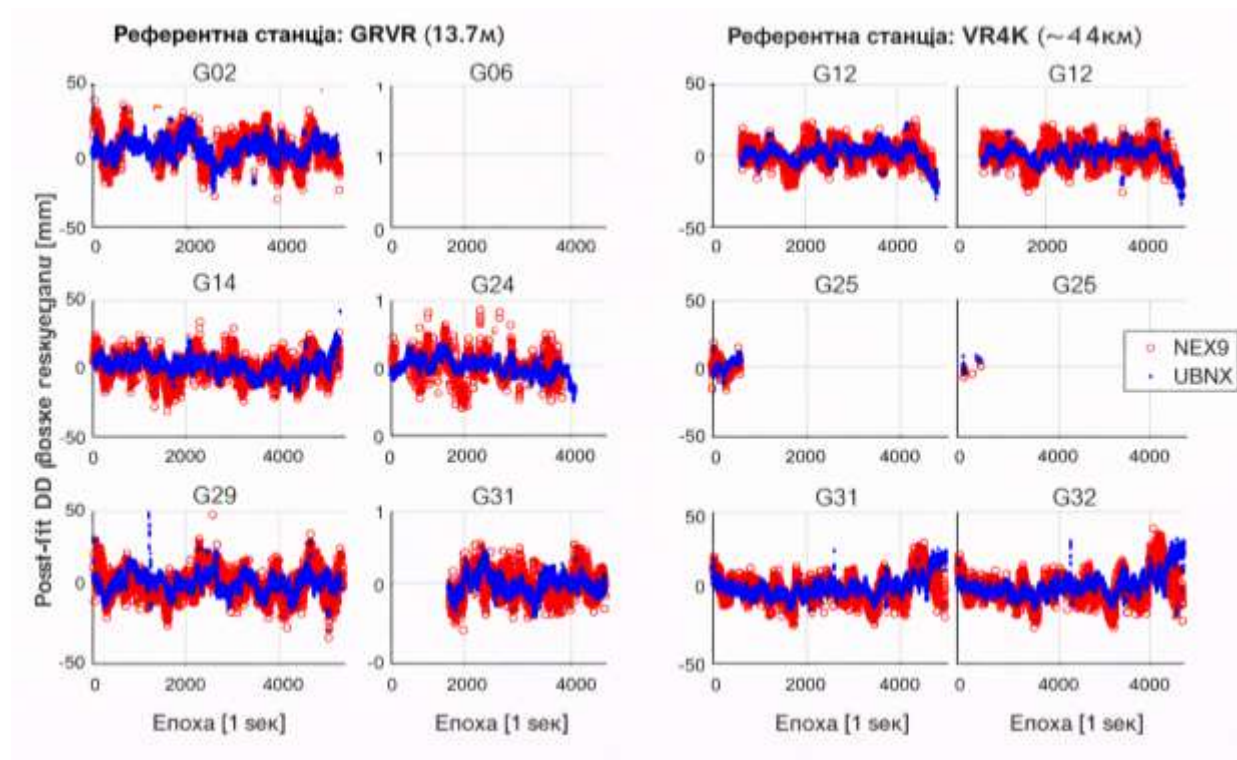


Рисунок 6. Фазові залишки подвійної різниці після апроксимації

Розгляд представленої схеми демонструє, що розбіжність у протяжності опорних відрізків — а саме 13,7 метрів для сценарію GRVR та приблизно 4 кілометри для VR4K — не має значущого ефекту на амплітуду фазових зсувів.

Характер фінальних даних, здобутих для обох конфігурацій, є схожим, що підтверджує стійкість процесу опрацювання в межах встановлених параметрів.

Аби змодельовати ситуацію, коли кількість супутників, доступних для використання, скорочується (що може траплятися через екранування або наявність сторонніх перешкод), ми здійснили повторне опрацювання 15-хвилинних розрахунків GRTR–NEX9, використовуючи алгоритм з плаваючими цілими невизначеностями.

У процесі цього, кутовий поріг видимості планомірно підвищувався від 15 до 35 градусів, із кроком у 5 градусів.

У міру проведення цього аналізу, середня кількість супутників, задіяних у розрахунках, поступово скорочувалася з приблизно восьми до чотирьох, коли відбувався перехід від найменшого до найбільшого кута відсікання.

Ці отримані значення відображено на Рисунку 7, з якого помітно, що середньозважені показники та стандартні розкиди розбіжностей стосовно еталонного ковзного розрахунку за 1,5 години не перевищують 10 сантиметрів, поки кут відсікання не досягне 30 градусів.

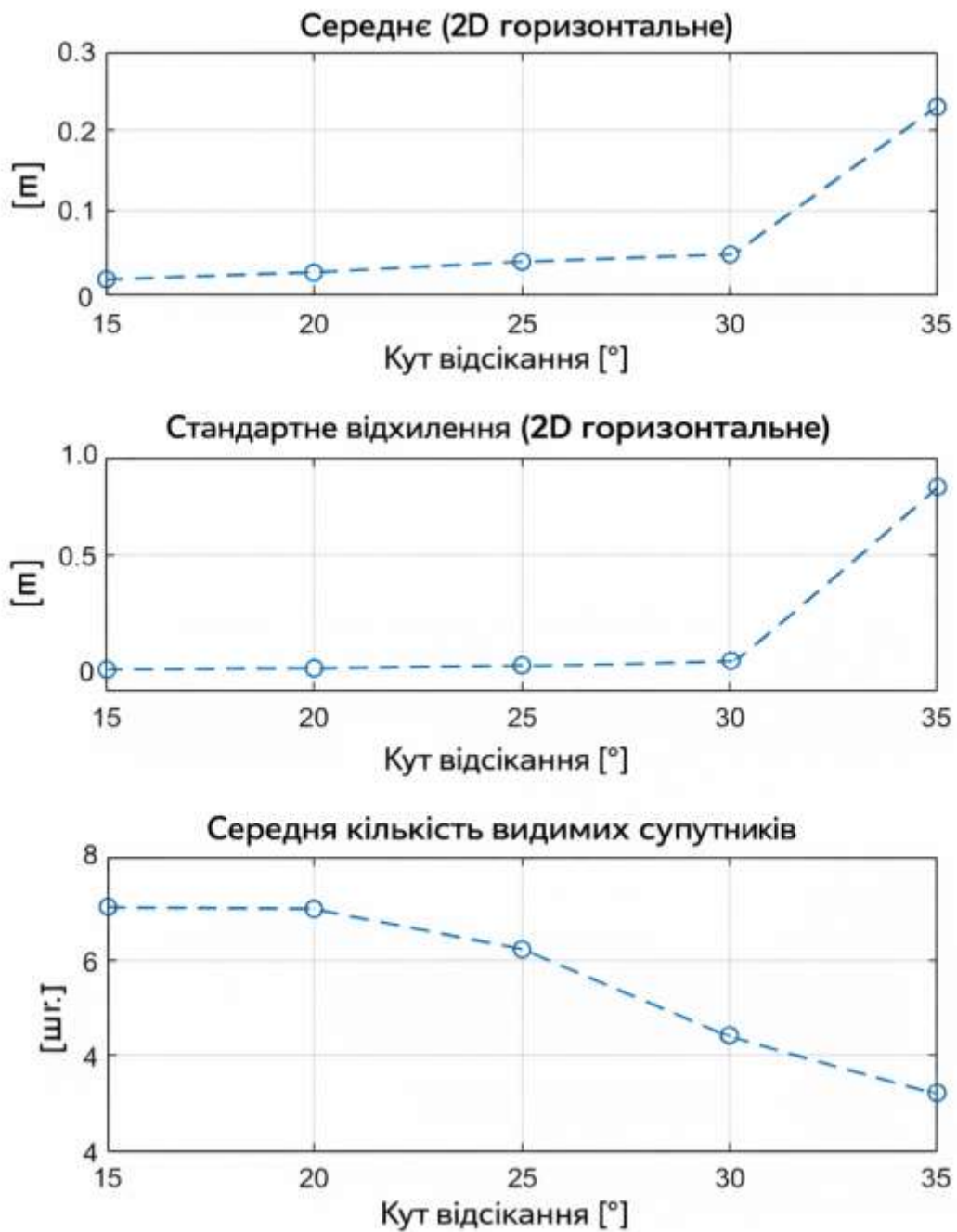


Рисунок 7. Графіки точності супутників

При доведенні кута зрізу до позначки 35° фіксується відчутне спадання параметрів точності.

Конкретизуючи, середній показник горизонтальної похибки піднімається приблизно до 20 сантиметрів, у той час як відхилення стандартного типу доходить до позначки біля 1 метра.

Подібне здешевлення отриманих даних напряму корелює з суттєвою зменшенням числа використовуваних супутників, яких у цьому сценарії залишається в середньому чотири, що негативно позначається на конфігурації просторового розміщення супутникового угруповання та надійності обчислювального результату.

3 Отримані результати

Як було продемонстровано перед цим, фазові дані GNSS, зафіксовані планшетом Nexus 9 за допомогою спеціального софту, за якістю не поступаються вимірам, зібраним за допомогою тогочасних бюджетних GNSS-приймачів.

З цього випливає, що нинішні розумні гаджети в змозі гарантувати надійне захоплення сигналів несучої фази, що придатні для використання підходів референційного визначення місцеположення.

Дані, здобуті в ході експериментів, емпірично довели спроможність інтелектуальних девайсів, зокрема Nexus 9, ефективно застосовуватися для швидкого статичного збору GNSS-інформації з точністю, що сягає дециметрів.

У рамках цієї роботи було зафіксовано стандартне відхилення приблизно 10 сантиметрів для ліній відліку завдовжки до орієнтовно 8 кілометрів, коли час сесії вимірювань становив 15 хвилин у режимі розв'язання "плаваючої" фазової невизначеності.

Слід підкреслити: алгоритм обробки, застосований у цьому дослідженні, не зміг гарантувати стабільного й певної фази цілочисельних невизначеностей для даних, зібраних із планшета Nexus 9.

З огляду на вищесказане, усі розрахунки визначення місця розташування для цього конкретного апарату були здійснені у режимі "плаваючого" (вільного) рішення.

Водночас, експерименти з приймачем u-blox засвідчили, що за умови успішного визначення цілочисельних неоднозначностей є цілком реальним досягти точності до рівня менше сантиметра, що дає змогу сформулювати обґрунтовану гіпотезу стосовно можливості покращення метрологічних характеристик і для сучасних мобільних гаджетів.

Зіставлення даних про місцезнаходження, отриманих у режимі вільно визначених неоднозначностей, між Nexus 9 та u-blox, поряд із вивченням залишків фаз після застосування фільтра (постапроксимаційних фазових залишків), свідчить про те, що обидва типи приймачів загалом реагують схожим чином.

Ключові розбіжності зумовлені насамперед характеристиками антенного ланцюга.

Справа в тому, що смарт-гаджети зазвичай мають інтегровану антену, чий точні розміри невідомі, тоді як приймачі u-blox традиційно комплектуються зовнішньою GNSS-антеною, що вирізняється вищими приймальними здібностями.

Цілком логічно, що точність визначення координат, яку може забезпечити розумний пристрій, певною мірою лишається не повною через невідому точну локацію GNSS-антени усередині його корпусу.

Однак, беручи до уваги сучасний вектор еволюції компонентної бази мобільних приладів, є підстави вважати, що найближчим часом ця перешкода буде або повністю знята, або суттєво мінімізована.

Дослідження впливу відстані між точками (довжини базової лінії) та типу референцної станції (чи це буде високоточна геодезична, чи бюджетна, матеріальна чи віртуальна) підтвердило ті тенденції, на які й розраховували.

Зокрема, чим менша довжина базової лінії, тим ліпшою є точність визначення місця; базові станції, що є апаратно реалізованими, показують дещо вищі показники у порівнянні з програмними, а ж приймачі геодезичного класу демонструють більшу стійкість та точність, ніж апарати з малою вартістю.

Водночас, кожен із протестованих підходів дав можливість визначити координати смарт-пристрою з точністю, що не перевищувала 20 сантиметрів, а коли застосовувалися фізичні геодезичні станції — точність сягала менше ніж 10 сантиметрів.

Базуючись на здобутих даних, можна дійти висновку, що потенціал визначення розташування смарт-апаратів, за умови, що вони можуть обробляти сирі GNSS-дані з неперервною фазою, повністю відповідає потребам геодезичних завдань, які вимагають точності до дециметрів.

Незважаючи на те, що ці дослідження ще на початковій стадії, вони свідчать про вагомий потенціал звичайних портативних гаджетів у сфері високоточного визначення місця.

Отже, вперше наочно доведено, що отримати точність до сантиметра цілком реально, навіть якщо застосовується надзвичайно економний підхід, який обмежується лише використанням смартфона з інтегрованим GNSS-модулем та антеною, повністю виключаючи потребу у застосуванні професійного геодезичного інструментарію безпосередньо у зоні робіт.

Висновки

У цій бакалаврській праці проведено всебічне вивчення потенціалу використання інтелектуальних гаджетів для визначення географічного положення за допомогою ГНСС, ґрунтуючись на фазових вимірах і застосовуючи технології відносного визначення місця розташування.

Важливість обраної проблематики обумовлена постійним зростанням інтересу до бюджетних та портативних інструментів для з'ясування координат, а також тим фактом, що необроблені дані ГНСС-систем стали доступні на широкому спектрі сучасних розумних пристроїв.

Під час виконання дослідження було розглянуто фундаментальні засади позиціонування через ГНСС, специфічні характеристики фазових вимірювань та алгоритми їхньої обробки, а також особливості впровадження мобільних гаджетів у процесах високоточного визначення координат.

Проаналізовано, як довжина лінії бази, вибір типу приймальної станції, зовнішні умови отримання сигналів та методики опрацювання даних впливають на точність, яку можливо досягти у визначенні місцеположення.

Практичні випробування довели, що фазові виміри GNSS, зняті за допомогою портативного гаджета Nexus 9, демонструють якість, співставну з даними, які збирають недорогі GNSS-приймачі, що працюють на одній частоті.

Результати, отримані під час аналізу, свідчать: якщо застосовувати швидкі стаціонарні сесії тривалістю чверті години і лінії бази не перевищують орієнтовно вісім кілометрів, то цілком реально досягти точності визначення координат у межах дециметра.

Стосовно коротших віддалей між точками та використання постійно встановлених геодезичних реперів, визначення координат самого гаджета стає точнішим, локально не перевищуючи позначку в десять сантиметрів.

З'ясовано: ключові чинники, котрі стримують точність визначення положення смарт-апаратів, полягають у скрутності певної розв'язки цілочисельних зсувів фази, до того ж, у невизначеності, де саме розміщена антена GNSS у корпусі апарату.

При цьому, як показують дані, здобуті з приймача u-blox, якщо фазові зміщення вдається вирішити коректно, то цілком реально досягти визначення координат із точністю до міліметра, що свідчить про неабиякі перспективи для прогресування у цій площині.

Зіставлення показників, отриманих від застосування як фізичних, так і програмно-імітованих (віртуальних) референцних станцій, підтвердило прогнозовані тенденції: що менша відстань до базової станції, то вища точність; апаратура, розташована фізично, демонструє дещо більшу надійність роботи, аніж програмні аналоги; професійне геодезичне обладнання забезпечує кращі показники, ніж бюджетні варіанти.

Проте, навіть за менш ідеальних обставин, застосування сучасних мобільних пристроїв дає змогу отримувати дані, що цілком підходять для низки практичних потреб та освітніх цілей у сфері геодезії.

Зокрема, у цьому дослідженні продемонстровано, що нинішні розумні гаджети, якщо їм надати можливість опрацьовувати сирі фазові дані супутникових навігаційних систем (GNSS), здатні успішно використовуватися для визначення координат із точністю до десятих часток метра.

Ці здобутки окреслюють можливості залучення поширених портативних апаратів до геодезичних завдань як рентабельного заміни професійного інструментарію для певних типів вимірювань, а також закладають підґрунтя для майбутніх наукових пошуків, спрямованих на вдосконалення цих методик щодо їхньої точності та стійкості.

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. Лазарєва 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. Лазарєва, С. М. Смирнова. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 28 с. (Методична серія ; вип. 383).

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи:

**«Оцінка стабільності геометричних параметрів наземних
лазерних скануючих систем».**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

____ рік
(дата)

(підпис студента)