

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА"

Кафедра геодезії та землеустрою

Колдачевський Павло Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Оцінка продуктивності багаточастотних сигналів GNSS-смартфонів у
геодезичних вимірюваннях

(назва роботи)

Геодезія

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник

к.т.н., доц. Пилип'юк Ростислав Романович

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

м. Івано – Франківськ
2025р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітній рівень магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

« ____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Колдачевський Павло Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка продуктивності багаточастотних сигналів GNSS-смартфонів у геодезичних вимірюваннях

Керівник роботи к.т.н., доц. Пилип'юк Ростислав Романович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від " __ " _____ 2025 року №

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики, матеріали польових досліджень

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення
сигнал - шум

Матеріали та методи

Результати дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2,3	Пилип'юк Р.Р.		

7.Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення сигнал - шум		
2	Матеріали та методи		
3	Результати дослідження		

Студент _____
(підпис)
Керівник роботи _____
(підпис)

Колдачевський П.
(прізвище та ініціали)
Пилип'юк Р. Р.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Сучасні смартфони оснащені інтегрованими модулями глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), які підтримують одночасну роботу з кількома супутниковими сузір'ями.

Завдяки цьому досягається вища точність визначення координат, покращуються навігаційні розрахунки та забезпечується більш точна синхронізація часу.

Технологія інтерферометричної рефлектометрії GNSS (GNSS-IR) спирається на використання цих можливостей, зокрема аналізу багатохвильових сигналів і їх відбитків, для більш детального вивчення властивостей поверхні.

Можливість одночасної роботи з різними GNSS-системами та їх частотними діапазонами, а також нижча вартість і висока портативність у порівнянні зі стандартними геодезичними приймачами роблять смартфони новим інструментом для застосування GNSS-IR.

У рамках нашої магістерської роботи проведено триденний експеримент, під час якого щодня виконували шестогодинні вимірювання.

Метою дослідження було оцінити точність визначення висоти відбивача та її змін, спираючись на багаточастотні SNR-дані GNSS, зібрані як з професійних геодезичних приймачів, так і зі смартфонів.

Експериментальна установка включала два професійні приймачі Raquete GNSS i90 PRO і два смартфони Samsung Galaxy Note 20 Ultra, які були закріплені на горизонтальній рейці штатива в різних напрямках – до неба та в сторону надирів.

Головним об'єктом дослідження була кількість надійних оцінок, співвідношення пікових амплітуд сигналу до рівня фонового шуму (PBNR), а також точність розрахунку висоти відбивача та різниці висот, отриманих за допомогою різних супутників і частот.

Результати аналізу доводять, що у порівнянні зі смартфонами геодезичні приймачі забезпечують більш послідовне отримання даних для GNSS-IR.

При цьому виявлено, що орієнтація смартфонів – будь-то горизонтальна, перевернена чи схилена – майже не впливає на точність отриманих оцінок, а найвищу якість результатів забезпечують сигнали GPS-супутників.

Ключові слова: Multi-GNSS, багатопроменевість, GNSS-IR, SNR, смартфони

Abstract

Modern smartphones are equipped with integrated modules of global navigation satellite systems (GNSS), which support simultaneous operation with several satellite constellations.

This achieves higher accuracy of coordinate determination, improves navigation calculations and provides more accurate time synchronization.

GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR) technology is based on the use of these capabilities, in particular the analysis of multi-wavelength signals and their reflections, for a more detailed study of surface properties.

The ability to simultaneously work with different GNSS systems and their frequency ranges, as well as lower cost and high portability compared to standard geodetic receivers, make smartphones a new tool for the application of GNSS-IR.

As part of our master's thesis, a three-day experiment was conducted, during which six-hour measurements were performed daily.

The aim of the study was to evaluate the accuracy of the reflector height determination and its changes, based on multi-frequency SNR GNSS data collected from both professional survey receivers and smartphones.

The experimental setup included two professional Paquete GNSS i90 PRO receivers and two Samsung Galaxy Note 20 Ultra smartphones, which were mounted on a horizontal tripod rail in different directions - towards the sky and towards the nadirs.

The main object of the study was the number of reliable estimates, the ratio of peak signal amplitudes to the background noise level (PBNR), as well as the accuracy of the calculation of the reflector height and height difference obtained using different satellites and frequencies.

The results of the analysis prove that, compared to smartphones, survey receivers provide more consistent data acquisition for GNSS-IR.

It was found that the orientation of smartphones – whether horizontal, upside down or tilted – has almost no effect on the accuracy of the obtained estimates, and the highest quality results are provided by GPS satellite signals.

Keywords: Multi-GNSS, multi-beam, GNSS-IR, SNR, smartphones

Зміст

Вступ

1. Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення сигнал - шум

2. Матеріали та методи

2.1 Досліджувана область та план експерименту

2.2 Попередній проект

2.2.1 Придатність азимутального діапазону

2.2.2 Умова мінімальної ширини діапазону кута піднесення супутника

2.2.3 Мінімальна умова відношення максимальної амплітуди до фонового шуму

2.3 Подальший аналіз

3. Результати дослідження

3.1 Оцінка на основі супутникової системи

3.1.1 Кількість оцінок

3.1.2 Значення рендингу

3.1.3 Оцінки висоти відбивача

3.2 Оцінка на основі частоти

3.2.1 Кількість оцінок

3.2.2 Значення рендингу

3.2.3 Оцінки висоти відбивача

3.2.4 Оцінки зміни висоти відбивача

Висновки

Список використаних джерел

Вступ

Кількість портативних і мобільних пристроїв — у тому числі смартфонів, планшетів і смарт-годинників — постійно зростає, подібно до підвищеного попиту на сучасні додатки та супутні розробки.

У XXI столітті смартфон став справжнім «особистим помічником» для більшості людей.

Пристрій об'єднує широкий спектр можливостей: доступ до інтернету, здійснення голосових і відеодзвінків, роботу з різноманітними сенсорними програмами, а також швидке забезпечення послуг позиціонування, навігації й синхронізації часу (PNT) завдяки глобальним навігаційним супутниковим системам (GNSS).

Ключовими причинами їхньої популярності залишаються мобільність і компактність.

Внаслідок цього, сегмент смартфонів значно випереджає інші групи мобільної техніки.

Прогнози на 2024 рік передбачають, що до кінця 2026 р. кількість користувачів смартфонів у світі складе близько 5,5 мільярда.

Згідно зі звітом Європейського агентства програми космосу (EUSPA) за 2024 рік, щорічний обсяг поставок GNSS-пристроїв зросте з 1,6 млрд одиниць у 2023 р. до 2,2 млрд у 2033 р.

Переважаючу частину ринку формуватимуть споживчі гаджети — смартфони, фітнес-трекери, планшети — а також автомобільні системи, включаючи бортові комплекси й різноманітне навігаційне обладнання.

Завдяки своїй доступності та портативності сучасні мобільні пристрої вже застосовуються в інженерних проектах.

Сьогодні смартфони обладнані не лише GNSS-чіпами, а й LiDAR, акселерометрами та іншими сенсорами, що суттєво розширює їх практичні можливості.

Серед усіх сенсорів особливо важливими є GNSS-модулі, що поєднують у собі приймач і антену, надаючи навігаційні та часові функції з різними рівнями точності.

Перші GPS-чіпи з'явилися в смартфонах ще у 1999 році, проте сьогодні майже всі пристрої підтримують багатосистемні налаштування (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS і SBAS).

Вирішальним кроком стало оголошення Google у 2016 році про відкритий доступ до «сырих» GNSS-даних в Android 7.0.

Ця ініціатива дала змогу використовувати кодові, фазові та доплер-частотні вимірювання в дослідженнях з точністю до субметра.

Іншим значущим досягненням став випуск у 2018 році смартфона Xiaomi Mi 8 — першого у світі двочастотного мобільного пристрою з чіпом Broadcom BCM47755, який приймає сигнали GPS L1/L5 і Galileo E1/E5a, а також одночастотні сигнали GLONASS, BeiDou і QZSS.

Таке відкриття дозволило застосовувати смартфони для досягнення точності позиціонування на рівні декількох сантиметрів, перетворивши їх на більш економічну заміну традиційним геодезичним приймачам.

Проте між GNSS-приймачами, що використовуються в геодезії, і мобільними чіпами існує фундаментальна різниця, що полягає у типі антени.

У геодезичних системах антени мають кругову поляризацію і знижують негативний вплив багатопроменевих ефектів, тоді як у смартфонах застосовуються антени з лінійною поляризацією, що робить їх більш сприйнятливими до сигналів, що відбиваються.

Через це точність отриманих вимірювань зменшується.

Натомість метод GNSS-IR, який активно розвивається вже близько п'ятнадцяти років, навпаки, експлуатує ці «шумові» відбиття для дослідження відбивних поверхонь і визначення їхніх геометричних і радіометричних параметрів.

Інтенсивність сигналу, спотвореного багатопроменевими ефектами, залежить від відстані між фазовим центром антени (ФЦА) і відбивною поверхнею.

Отже, показники сигнал-шум (SNR чи C/N₀), що вимірюються як у традиційних приймачах, так і в смартфонах, можна застосовувати для визначення вертикальних відстаней і характеристик поверхонь.

Використання методу GNSS-IR продемонструвало свою дієвість при спостереженні за кліматичними параметрами, зокрема за вологістю ґрунтів, глибиною сніжного шару та рівнем морської поверхні.

Так, у одному з досліджень, де застосовували планшет Samsung Galaxy Tab A 10.1 4G, рівень морської поверхні оцінювали, порівнюючи отримані дані із результатами GNSS-станції.

Середньоквадратична похибка склала 6,2 см, проте, оскільки пристрій працював виключно на частоті L1, кількість надійних спостережень виявилася нижчою, ніж у геодезичного приймача, який використовував L1, L2 і L5.

У інших роботах аналізували SNR-дані, отримані зі смартфона Xiaomi Mi8 Lite, а також зі спеціального геодезичного приймача Trimble NetR9, оснащеного антеною TRM57970.

Протягом трьох днів, коли вимірювання здійснювалися по 5 годин щоденно, досліджували точність визначення висоти відбитого сигналу.

Отримані дані виявили, що середньоквадратична похибка склала 1,9 см для смартфона і 3,7 см для геодезичного обладнання.

Отже, незважаючи на окремі недоліки GNSS-чипів у смартфонах, результати підтверджують їхню перспективу у використанні технології GNSS-IR.

Проте в наукових публікаціях поки що недостатньо всебічних досліджень сучасних Android-смартфонів з двочастотними багатосистемними GNSS-чіпами.

Це саме й стало ядром нашого дослідження: протягом трьох діб, щодня по шість годин, ми досліджували точність визначення висоти відбивача, застосовуючи двочастотні дані Multi-GNSS, отримані зі смартфонів, за різноманітними висотними та орієнтаційними умовами приймачів.

У експериментальній частині використали два професійних приймачі Raquete GNSS i90 PRO разом із двома смартфонами Samsung Galaxy Note 20 Ultra, які розміщували у зенітному та інвертованому положеннях.

Оцінка проводилась за кількома параметрами: кількість вірних оцінок, величина пікового співвідношення сигнал-шум (PBNR), точність визначення висоти відбивача та розбіжність виміряних висот.

1. Інтерферометрична рефлектометрія GNSS на основі співвідношення сигнал - шум

Навігаційні сигнали супутників глобальних систем позиціонування (GNSS) під час свого шляху від передавача до приймача піддаються різноманітним змінам і спотворенням.

Найбільший вплив чинять атмосферні шари — зокрема іоносфера і тропосфера, через які сигнал проходить, втрачаючи частину початкової стабільності та енергії.

Такі явища можуть викликати затримки, фазові зрушення та зниження точності вимірювань.

Серед найсуттєвіших і найпоширеніших факторів, що знижують якість супутникових даних, виділяється багатопроменевий вплив (multipath).

Цей феномен проявляється тоді, коли сигнал, крім прямого маршруту від супутника до приймальної антени, ще й відбивається від різноманітних об'єктів навколишнього середовища – земної поверхні, будівель, водних площ, технічних споруд тощо – і потрапляє до приймача з часовою затримкою.

Через це в антену одночасно надходить кілька компонент сигналу: пряма хвиля і одна або декілька відбитих.

У наземних GNSS-вимірюваннях така багатоканальна структура створює суттєву проблему, оскільки прямі та відбиті хвилі перекриваються в приймальному пристрої, формуючи складну інтерференційну картину.

Таке явище створює нові похибки при розрахунку координат і знижує точність геодезичних вимірювань.

Водночас, сучасні алгоритми обробки сигналу дозволяють ефективно використовувати ці ж ефекти.

Наприклад, у підході інтерферометричної рефлектометрії GNSS (GNSS-IR) багатопрореневість сприймається не як перешкода, а як джерело додаткових даних про навколишнє середовище.

Аналіз інтерференційної структури отриманого сигналу відкриває можливість визначити геометричні та фізико-радіометричні характеристики відбиваючих його поверхонь.

Зокрема, це дає змогу оцінити рельєф місцевості, вологість ґрунту, наявність снігового покриву та ознаки водних об'єктів.

Тож відбиті компоненти GNSS-сигналу стають корисними у геофізичних та гідрометеорологічних дослідженнях.

Сучасні GNSS-приймачі можуть не лише здійснювати фазові вимірювання з високою точністю, а й зберігати кодові дані, навігаційні повідомлення, а також вимірювати потужність сигналу і рівень шуму.

Пристрій антенної системи фіксує вхідний сигнал, який далі передається до апаратного блоку приймача для подальшої обробки, завдяки чому можливо визначити ряд ключових параметрів. Зокрема, потужність отриманого сигналу зазвичай вимірюється за допомогою співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR), розрахованого за умови, що ширина смуги шуму дорівнює 1 Гц.

Показник SNR включає два головних складових: повільну, або трендову, що описує загальну енергію сигналу, та гармонійну, яка виникає в результаті взаємодії прямої та відбитої хвиль і залежить від параметрів діаграми підсилення антени (Antenna Gain Pattern, AGP).

Цей гармонічний елемент є вирішальним для застосування методики GNSS-IR, бо він містить дані про параметри відбивних поверхонь.

Показник SNR включає у себе повільно мінливу частину (тренд) і гармонічні складові, що виникають внаслідок взаємодії прямого та відбитого сигналів, а також особливостей діаграми підсилення антени (AGP).

$$\text{Сигнал} - \text{шум} = t_{\text{сигнал-шум}} + d_{\text{Сигнал-шум}} \quad (1)$$

При аналізі структури супутникових сигналів у процесах обробки вимірювань зазвичай використовують два параметри: $t_{\text{сигнал-шум}}$ і $d_{\text{сигнал-шум}}$.

Перший з них, $t_{\text{сигнал-шум}}$, відображає трендову (повільно змінювану) складову співвідношення сигнал/шум, що характеризує загальний рівень прийнятого сигналу.

На його значення суттєво впливають зовнішні умови — різноманітні завади, а також параметри діаграми спрямованості приймальної антени.

Для нейтралізації впливу трендової складової застосовують різні математичні методи апроксимації.

Зазвичай застосовують поліноміальну апроксимацію другого, а іноді й більш високого порядку, що дозволяє розділити повільно змінювану складову від швидких коливань.

У результаті виконання процесу детрендингу отримується величина $d_{\text{сигнал-шум}}$, яка представляє собою відносно високочастотний сигнал з періодичною структурою.

На відміну від трендової складової, детрендований сигнал надає більше інформативної цінності при аналізі багатопроменевих процесів, оскільки в ньому присутні гармонічні компоненти, що виникають внаслідок інтерференції прямого та відбитого сигналів.

Таку періодичність можна ефективно представити математичною моделлю, заснованою на гармонічних функціях.

Отже, застосування детренованої складової $d_{\text{сигнал-шум}}$ розширює перспективи більш детального дослідження умов розповсюдження GNSS-сигналів і дає змогу отримати суттєву інформацію про параметри відбивних поверхонь.

Саме такий метод становить фундамент інтерферометричної рефлектометрії GNSS (GNSS-IR), яку використовують у спостереженнях за станом довкілля, у геодезичних роботах та гідрометеорологічних дослідженнях.

У загальному вигляді його можна записати такою формулою:

$$d_{\text{сигнал-шум}} = A \cos \left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin \varepsilon + \phi \right) \quad (2)$$

У наведеній формулі параметри A і ϕ грають ключову роль: A вказує на амплітуду детрендованого сигналу ($d_{\text{сигнал/шум}}$), а ϕ задовольняє його початкову фазу, що визначає позицію гармонічних коливань у часі або при зміні спостережуваного кута.

Значення h розуміється як ефективна висота антени над відбивною поверхнею, тобто фактична відстань, на якій проявляється інтерференційний ефект.

Саме цей показник має чіткий фізичний сенс і слугує основою для подальшого аналізу отриманих даних.

Параметр λ означає довжину хвилі GNSS-сигналу, яка визначається частотою передачі в певному частотному діапазоні (наприклад, L1 або L2), тоді як ε позначає кут підйому супутника над горизонтом.

Важливість цього кута полягає у тому, що саме він формує траєкторію розповсюдження як прямих, так і відбитих сигналів.

Оскільки у формулі для $d_{\text{сигнал-шум}}$ функція $\sin \varepsilon$ виступає в ролі вільної змінної, саме вона визначає основу періодичності спостережуваних коливань.

Це дозволяє встановити зв'язок між головною частотою сигналу (f) та висотою відбивача (h).

Іншими словами, розглядаючи частотні характеристики інтерференційної складової, можна отримати оцінку ефективної висоти антени над відбиваючою площею.

Цей співвідношення є основою методу GNSS-IR і використовується для визначення фізичних параметрів навколишнього середовища, зокрема рівня води, товщини сніжного покриву чи висоти рельєфу.

Оскільки величина $\sin \varepsilon$ виступає незалежною змінною у виразі параметра d сигнал-шум, можна сформулювати залежність між її домінантною частотою (f) і висотою відбивача.

$$h = \frac{f\lambda}{2} \quad (3)$$

Оскільки параметр $\sin \varepsilon$ визначає синус кута підйому супутника над горизонтом, його значення розподіляються нерівномірно та залежать від траєкторії руху по небесній сфері.

Така неоднорідність ускладнює пряме застосування традиційних спектральних методів, які вимагають сталого кроку дискретизації.

Враховуючи це, у даному дослідженні для виявлення домінантної частоти детрендованого сигналу d сигнал-шум був обраний підхід аналізу періодограми.

Завдяки цьому підходу можна виявляти основні частотні компоненти навіть у випадках, коли дані характеризуються нерівномірною дискретизацією або присутністю шуму.

Періодограма — один із найпоширеніших і найефективніших інструментів спектрального аналізу, оскільки дає змогу оцінити потужність сигналу в частотному домені та виділити гармонійні елементи, пов'язані з багатопроменевими явищами.

Отже, застосування аналізу періодограм забезпечує більш точне визначення домінуючої частоти сигналу, що, в свою чергу, дозволяє точно задати ефективну висоту відбивача і робить метод GNSS-IR придатним для практичних досліджень у сфері геодезії та моніторингу навколишнього середовища.

2. Матеріали та методи

У цьому розділі перш за все представлено докладний опис досліджуваної ділянки, її географічних і топографічних особливостей, а також вказано, які технічні засоби й програмне забезпечення застосовувалися під час проведення експериментальних спостережень.

Особливу увагу приділяються технічним параметрам обладнання, оскільки саме вони безпосередньо визначають точність і надійність отриманих даних.

Далі здійснюється аналіз початкових стадій обробки даних, спрямований на виділення ключових ознак, потрібних для подальшого дослідження.

Зокрема, встановлюється азимутальний спектр супутників, аналізується діапазон їхніх кутів піднесення та формуються мінімальні вимоги для включення супутникових сигналів у процес обробки. Ці дії є базовими, оскільки гарантують належну підготовку даних і усувають надлишкову або зашумлену інформацію.

Виходячи з отриманого набору відфільтрованих даних, впроваджуються подальші етапи аналітичних процесів.

Їхнє призначення — глибокий спектральний і просторово-часовий аналіз, який відкриває можливість знайти закономірності в будові сигналів, ідентифікувати провідні частоти, а також оцінити, як відбивні поверхні впливають на якість прийому GNSS-сигналів.

Отримані дані слугують основою для формулювання узагальнень і висновків про потенціал використання методу GNSS-IR у практичних умовах.

2.1 Досліджувана область та план експерименту

Для досліджень обрано в якості об'єкта територію геодезичного полігону Національного університету «Львівська політехніка», розташовану в межах міста Бережани (рисунок 1).



Рисунок 1: Досліджувана зона

Вибір цього ділянки не став випадковим, адже вона має низку важливих властивостей, які роблять її оптимальною для проведення експериментальних спостережень.

Головними факторами, які вплинули на визначення місця, стали відкритий горизонт у напрямках південного сходу і південного заходу, що забезпечує якісний прийом супутникових сигналів у широкому діапазоні

кутів підйому, а також рівнинний рельєф з надзвичайно малою шорсткістю поверхні.

Така топографічна рівність значно знижує вплив локальних геоморфологічних особливостей на результати вимірювань і мінімізує потенційні багатопроменеві ефекти, які виникають через неоднорідність рельєфу.

Досліджувана поверхня становить приблизно 90×140 м, що дає можливість розмістити апаратуру та здійснити комплексні спостереження з різними просторовими конфігураціями.

Збір інформації проводився у три окремі дні експериментальної серії — 10, 11 та 13 жовтня 2024 р., що співпадає з 283[□]м, 284[□]м і 286[□]м днями календарного року.

У кожному з цих днів виконували два спостережних сеанси, тривалістю близько трьох годин кожен.

Таке планування забезпечило достатній обсяг вимірювань для подальшого аналізу, охопивши як ранкові, так і післяобідні часи, і дало змогу відстежити вплив змін умов приймання сигналів протягом доби.

Під час проведення експериментальних спостережень застосували два високоточних геодезичних приймачі Paquete GNSS i90 PRO та два сучасних смартфони Samsung Galaxy Note 20 Ultra, які виконували роль альтернативних приймальних пристроїв.

Таким способом було можливо не лише оцінити ефективність професійного обладнання, а й порівняти його з можливостями масових мобільних пристроїв, що є важливим у контексті розвитку технологій краудсорсингових вимірювань.

Розташування приймачів і смартфонів змінювалося залежно від дня проведення експерименту.

Зокрема:

- першого дня під час спостережень обладнання монтували під кутом +20%,
- другого дня пристрої розміщували з кутом –20%,
- третього дня антенні системи і смартфони розташовувалися у звичному, тобто нейтральному положенні без нахилу (0%) (рисунок 2).

Обрана система позначення кутових відхилень передбачала використання символу «+» або «-» залежно від напрямку відхилення від горизонтальної площини.

Відлік базувався на куті нахилу платформи, який встановлювали шляхом бокового візуального спостереження, беручи до уваги орієнтацію в азимутальному напрямку праворуч.

Цей підхід забезпечив точне відтворення умов для різних схем розташування обладнання та дозволив оцінити, як кут нахилу антен впливає на якість прийому супутникових сигналів.



Рисунок 2 Загальний вигляд та кути нахилу, що застосовувалися до приймачів

Одне з головних завдань цього дослідження було вивчення того, як зміна кутів нахилу приймачів впливає на величину співвідношення сигнал/шум, що є важливим індикатором стабільності та якості отриманих GNSS-даних.

Контроль цього параметра дозволяє встановити, яким чином орієнтація обладнання й його переміщення в просторі позначаються на результатах позиціонування та точності подальших геодезичних розрахунків.

Протягом усіх трьох днів виміральної кампанії приймачі разом із всім супутнім обладнанням залишалися налаштованими на азимут 160° .

Вибір даного напрямку був зумовлений потребою забезпечити найвищу стабільність сигналу та уникнути сторонніх завад, оскільки орієнтація спрямовувалася до рівної та відкритої ділянки поверхні.

Це дозволяло знизити вплив багатопроменевого розповсюдження (multipath) та інших факторів, які потенційно могли б погіршувати якість супутникових спостережень.

Спостереження здійснювалися щодня в одному часовому інтервалі – з 09:30 до 15:30 за місцевим часом.

Вибір цього інтервалу був обґрунтований: саме в цей час доби на орбіті перебуває достатня кількість супутників і створюються вигідні геометричні умови їх розташування (низький PDOP), що має вирішальне значення для якісного збору даних.

Крім того, це забезпечувало дотримання принципу відтворюваності експерименту, оскільки спостереження в однаковий часовий проміжок дозволяють об'єктивно порівнювати отримані результати.

У кожному спостережному циклі передбачалося два етапи: протягом перших трьох годин приймачі працювали зі стандартною висотою установки відбивачів, після чого ця висота зменшувалась на 10 см.

Таке дослідження дало змогу зрозуміти, як навіть незначне коригування позиції антенної установки впливає на якість прийнятого сигналу та співвідношення сигнал/шум.

Протягом наступних трьох годин спостереження здійснювалися вже за нових параметрів, що дозволило порівняти результати й встановити характер змін.

Фактичні висоти відбивачів визначали, вимірюючи координати антенної опорної точки (ARP), що забезпечувало підвищену точність та відтворюваність даних.

Отримані результати подано в таблиці 1, яка слугує підставою для подальшого аналізу впливу параметрів монтажу обладнання на якість GNSS-вимірювань.

Таблиця 1: Висоти відбивачів на місці, знайдені шляхом додавання значень зміщення калібрування антени до висот опорної точки антени

Приймач		День 1 (день року: 283)	День 2 (день року: 284)	День 3 (день року: 286)
Raquete GNSS i90 PRO	Висота відбивача (перші 3 год.)(м)	1.900	1.943	1.976
	Висота відбивача (останні 3 год.)(м)	1.790	1.826	1.856
Raquete GNSS i90 PRO	Висота відбивача (перші 3 год.)(м)	1.123	1.123	1.153
	Висота відбивача (останні 3 год.)(м)	1.080	1.012	1.055
Samsung Galaxy Note 20 Ultra	Висота відбивача (перші 3 год.)(м)	1.932	1.942	1.942
	Висота відбивача (останні 3 год.)(м)	1.798	1.798	1.790
Samsung Galaxy Note 20 Ultra	Висота відбивача (перші 3 год.)(м)	1.220	1.200	1.200
	Висота відбивача (останні 3 год.)(м)	1.155	1.138	1.138
Орієнтація		20%	20%	-20%

2.2 Попередній проект

Роботу поділили на два послідовні етапи, кожен із яких передбачав власні завдання та методичні підходи.

Під час першого, підготовчого етапу проводилося загальне оцінювання експериментальних умов і визначалися ключові критерії, необхідні для подальшого детального аналізу.

Завдяки цьому етапу було сформовано базові методичні принципи і обрано оптимальні параметри, що стали основою для розробки стратегії майбутніх спостережень.

Другий етап був практичним і спрямованим на отримання підсумкових результатів.

У цьому випадку застосовувалися підходи та алгоритми, розроблені на основі результатів попереднього аналізу, що гарантувало послідовність і логічність усього дослідницького процесу.

Для оцінки сигналів, що надходять від супутників з різних напрямків, на початковій фазі було обрано азимутальний інтервал від 0° до 360° .

Таким чином отримували повний горизонтальний сектор, що забезпечувало всебічність спостережень.

При цьому для кутових параметрів встановлене обмеження: вимірювання виконувались у діапазоні 5° – 25° .

Для забезпечення відсутності перешкод, викликаних рельєфом чи наземними об'єктами, мінімальний кут розташування супутника встановився на 10° , тоді як нижньою межею прийнятності сигналу була задана гранична умова у 3° .

Особливу увагу приділяли часовим впливам на якість даних. Виявилось, що вже після трьох годин щоденних спостережень висота відбивачів поступово спадала приблизно на 10 см.

Через цю специфіку доводилося розбивати дані для аналізу на дві окремі частини — на першу і другу половини добового циклу.

Таке рішення забезпечувало більш точне тлумачення результатів та урахування впливу зовнішніх факторів на точність вимірювань.

2.2.1 Придатність азимутального діапазону

У зв'язку з тим, що під час експериментальних спостережень не було використано азимутальної маски, початковий етап оцінювання орієнтувався на підтвердження правильності і виправданості застосування обраного азимутального діапазону.

Такий підхід дозволив визначити, якою мірою всебічне охоплення азимутальних напрямків впливає на якість подальшого аналізу і чи потрібно вводити додаткові обмеження у методику.

Для глибокого аналізу коливань висоти відбивачів застосували практичні дані, накопичені протягом перших трьох годин першого дня дослідження.

Саме цей інтервал часу вважали найбільш інформативним, тому що він дозволяв зафіксувати початкові умови експерименту без значного впливу тривалих зовнішніх факторів.

Враховуючи можливу зміну висот приймачів під час роботи, для кожного пристрою було розраховано середнє значення висоти відбивача.

Далі аналіз полягав у виявленні відхилень окремих оцінок від отриманого середнього, що дозволило спостерігати розбіжності вимірювань та оцінити стабільність отриманих результатів.

Для глибокого аналізу коливань висоти відбивачів застосували практичні дані, накопичені протягом перших трьох годин першого дня дослідження.

Саме цей інтервал часу вважали найбільш інформативним, тому що він дозволяв зафіксувати початкові умови експерименту без значного впливу тривалих зовнішніх факторів.

Враховуючи можливу зміну висот приймачів під час роботи, для кожного пристрою було розраховано середнє значення висоти відбивача.

Далі аналіз полягав у виявленні відхилень окремих оцінок від отриманого середнього, що дозволило спостерігати розбіжності вимірювань та оцінити стабільність отриманих результатів.

Графічне представлення залежності отриманих різниць від азимутального кута було здійснено у вигляді діаграми (рисунок 3).

Таке подання дозволило наочно показати просторові особливості спостережень і виявити закономірності, які важко виявити лише за допомогою числових даних.

Тому графічний матеріал став головним інструментом аналізу, додаючи візуальну складову та підвищуючи інформативність експериментальної частини дослідження.

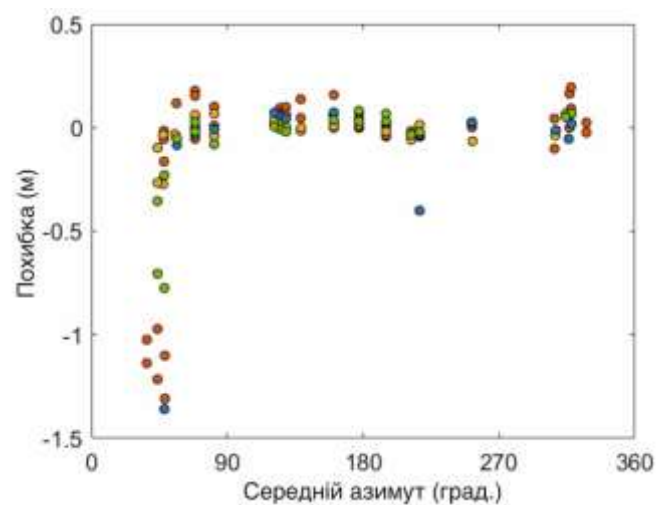


Рисунок 3: Зміна похибок оцінки з азимутом

Як видно з результатів, наведених на рисунку 3, вимірювання, які мають середнє азимутальне значення нижче $45 \square 50^\circ$, переважно характеризуються меншою точністю визначення висоти відбивача.

Ймовірно, така закономірність обумовлена рельєфними особливостями місцевості у відповідних напрямках: тут поверхня вужча, нерівна, що ускладнює якісний прийом сигналу.

Внаслідок цього спостерігаються великі відхилення у отриманих даних, що підриває достовірність подальших розрахунків.

За результатами аналізу, середня ширина азимутального інтервалу склала $10,5^\circ$.

Завдяки цьому параметру вдалося підтвердити, що варто обмежити робочий діапазон азимутальних кутів.

В особливості, заміна повного кутового кола ($0^\circ\text{--}360^\circ$) на інтервал $60^\circ\text{--}360^\circ$ дозволила усунути з розгляду ті вимірювання, у яких спостерігалися найбільші похибки через локальні азимутальні аномалії.

Отже, скорочення діапазону не лише підвищує точність отриманих результатів, а й гарантує стабільність їхніх значень у майбутніх обчисленнях.

Беручи до уваги отримані результати, на наступному етапі дослідження вирішили використовувати саме азимутальний діапазон $60^\circ\text{--}360^\circ$.

Таке рішення дозволяє зменшити вплив недостовірних даних, уникнути спотворень, викликаних місцевими умовами, і зосередитись на більш надійній сукупності інформації.

Внаслідок цього підвищується наукова обґрунтованість аналізу, а підсумкові висновки стають значно переконливішими.

2.2.2 Умова мінімальної ширини діапазону кута піднесення супутника

Щоб забезпечити точні та надійні оцінки потрібних параметрів, потрібні тривалі сукупності даних, отримані протягом кожного індивідуального польоту супутника.

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що поки що відсутній універсальний загальноприйнятий критерій щодо мінімальної чи оптимальної тривалості подібних спостережень.

Такий стан справ ускладнює роботу вчених, адже різні дослідники впроваджують власні підходи та вимоги, що ускладнює порівняння отриманих результатів у різних експериментах.

Зрозуміло, що у отриманих даних спостерігаються коливання, які в основному виникають через багатопроменеве розповсюдження сигналу.

Інтенсивність цих коливань прямо пов'язана з висотою відбивача: підвищення висоти призводить до зростання частоти коливань, тоді як її зниження поступово зменшує цей параметр.

Отже, висота відбивача є одним із головних факторів, що впливають на якість отриманих результатів.

Якщо в наборі даних виявляється недостача хвиль, це неминуче знижує спектральну роздільну здатність під час визначення частоти сигналу.

Іншими словами, для отримання достовірних результатів потрібна достатня кількість хвиль, які дозволяють виявити характерні патерни у поведінці сигналу.

Кількість хвиль у даних, що визначає співвідношення сигнал/шум, обчислюється як функція синуса кута підйому супутника.

У цьому контексті виявляється захоплююча тенденція: коливання параметрів більше залежать від спектру кутів підйому, а не від тривалості спостереження.

Така залежність підкреслює необхідність ретельного підбору геометричних критеріїв у процесі аналізу.

Щоб наочно продемонструвати описаний ефект, було проведено вимірювання сигналу S1C з супутника G27, записаного смартфоном у перший день експерименту.

У процесі аналізу зібраних даних застосували третій-порядкову поліноміальну апроксимацію, що забезпечило згладжування випадкових коливань та виділення основних тенденцій сигналу.

Результати подано у вигляді чисельних характеристик (таблиця 2) та графічних матеріалів (рисунок 4).

У таблиці наведено оцінки висоти відбивача, ширину піку сигналу та величини похибок для різних діапазонів кутів піднесення супутників.

Термін «значення рендингу» використовується для позначення співвідношення амплітуди спектрального піку до середньої величини спектральної амплітуди.

Показник «ширина піку» обчислюється як розмір цього піку на рівні, який відповідає половині його максимальної амплітуди.

У цьому контексті під «помилкою» розуміється відхилення між розрахованою оцінкою висоти конкретного відбивача та фактичною *in situ* величиною, встановленою для обраного супутника на підставі даних про співвідношення сигнал/шум.

Отже, запропонований підхід дозволяє всебічно дослідити вплив геометричних і технічних параметрів на точність визначення висоти відбивачів і продемонструвати ефективність використання спектральних методів аналізу при вивченні багатопроменевих ефектів.

Таблиця 2: Оцінки висоти відбивача, похибки оцінки, значення, отримані з використанням різних діапазонів кутів місця супутника та ширини діапазону для сигналу

Діапазон	Ширина діапазону	Висота відбивача (м)	Похибка (см)
5-25	20	1.960	1.5
5-20	15	1.977	3.1
5-15	10	1.934	-1.2
5-10	5	2.013	6.9
10-25	15	1.987	0.3
10-20	10	1.945	0.7
10-15	5	2.342	47.2
15-25	10	1.914	-0.3
15-20	5	2.123	17.9
20-25	5	2.455	56.4

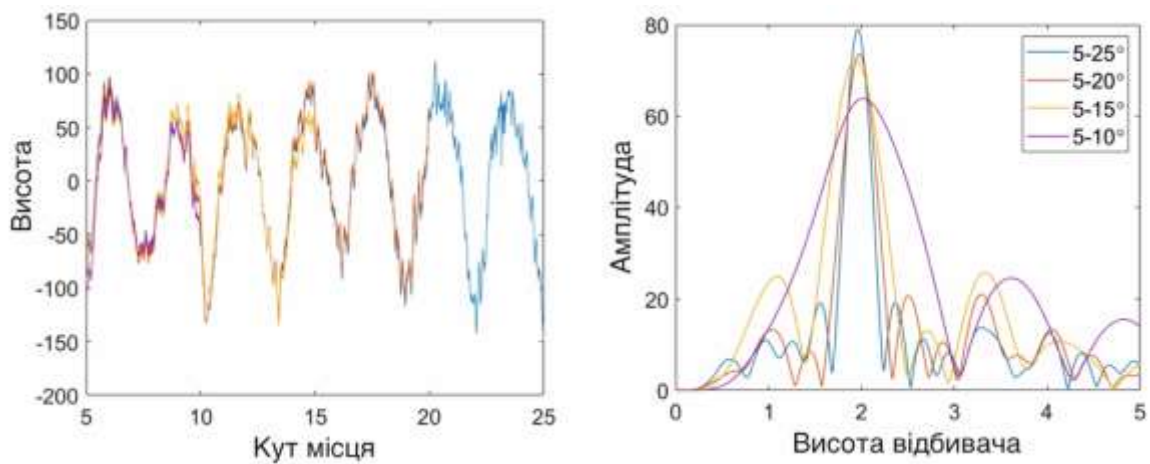


Рисунок 4 Графіки для різних діапазонів кутів місця супутника для даних GNSS, та зібраних смартфоном

Вивчення чисельних даних, наведених у таблиці 2, демонструє, що обмеження робочого діапазону неминуче призводить до збільшення помилок при оцінюванні параметрів.

Це обумовлено тим, що розмір помилки залежить у протилежному напрямку від спектральної роздільної здатності частоти: чим менша ширина діапазону, тим гірша точність визначення частотних параметрів, що безпосередньо знижує достовірність отриманих результатів.

Коли значення низькі, отримані результати вказують на присутність слабого або надмірно зашумленого сигналу «сигнал/шум», що, в свою чергу, зменшує точність розрахованих оцінок.

Підсумовуючи дані з таблиці 2, видно суттєву закономірність: при діапазонах 10° , 15° і 20° похибка оцінки не перевищує 4 см, при цьому значення показника залишаються вище 3, а середнє відхилення не перевищує 0,8 м.

Це свідчить, що навіть при найменшому прийнятному діапазоні результати залишаються в межах допустимих похибок, проте їхня достовірність поступово знижується з подальшим звуженням.

На рисунку 4 показано приклад серії даних співвідношення сигнал-шум, де чітко видно відбиток.

Спостерігається закономірність: зі скороченням ширини діапазону кількість хвиль у наборі зменшується з 7 до 2.

Через це піки на графіку стають менш різкими і ширшими, що суттєво підвищує рівень невизначеності при вимірюванні висоти відбивача.

Зокрема, навіть коли розглядається найвисокоякісна серія даних у всьому дослідженні (наприклад, на рисунку 4), скорочення ширини діапазону спричиняє не лише розширення пікових значень, а й підвищення оцінювальних похибок.

Слід також підкреслити, що встановлене обмеження нижньої межі ширини діапазону кута розташування супутника, яке не перевищує 20° у рамках даного експерименту, призводить до суттєвого скорочення обсягу даних.

Унаслідок цього відбувається помітне зменшення кількості можливих оцінок, що, в свою чергу, негативно впливає на повноту та репрезентативність аналізу.

Враховуючи отримані дані, для подальших етапів дослідження вирішено застосовувати мінімальну ширину діапазону у 10° .

Такий підхід забезпечує баланс між кількістю оцінок та їхньою точністю: у цьому випадку відхилення не перевищує 4 см, що вважається прийнятним, і водночас збільшується кількість отриманих даних, підвищуючи статистичну надійність аналізу.

2.2.3 Мінімальна умова відношення максимальної амплітуди до фонового шуму

У сучасних наукових працях широко застосовують співвідношення максимальної амплітуди сигналу до рівня фонового шуму як основний критерій оцінки його якості.

Така методика обґрунтована тим, що лише велика амплітуда сама по собі не забезпечує коректність і стійкість визначення частоти сигналу.

З досліджень випливає, що навіть при високих амплітудних значеннях точність може різко падати, коли присутні перешкоди від інших сигналів різної потужності чи частоти, або коли рівень шумових компонентів підвищений.

Тому оцінка надійності сигналу при частотній дискримінації базується не на самих амплітудних величинах, а на їх відношенні до рівня фонових шумів.

Лише коли сигнал явно перевищує шум, його можна розглядати як достатньо якісний для подальшої обробки і аналізу.

У більшості досліджень поріг мінімального значення цього параметра встановлюють на рівні 4, проте існують і інші варіанти.

Залежно від умов експерименту чи локальних особливостей місцевості можуть застосовуватись пороги 2, 2,5 або 3.

Те, що в даній галузі відсутні універсальні стандарти, підкреслює, що поріг зазвичай підбирається індивідуально під конкретне завдання.

Під час експерименту антени і приймачі розташовувалися під різними кутами — і з позитивним, і з негативним нахилом, в діапазоні близько 20 %.

Таке налаштування давало можливість проаналізувати, як орієнтація приймальної системи впливає на якість отриманих сигналів.

Слід підкреслити, що специфіка будови геодезичних антен передбачає зменшення підсилювального коефіцієнта під час прийому сигналів від супутників, розташованих під малими кутами піднесення.

Отже, саме в цьому діапазоні сигнали виявляються найчутливішими до багатопроменевого розповсюдження.

З результатами проведеного дослідження встановлено, що ефект багатопроменевості на рівень співвідношення сигнал/шум спостерігається найбільш виразно в інтервалі кутів піднесення 25° – 30° для приймача, розташованого на горизонтальній платформі.

У разі, коли платформа нахилена вперед (позитивний кут), амплітудні коливання, викликані багатопроменевим ефектом, спостерігаються з меншою інтенсивністю або рідше в напрямку, що збігається з азимутальною орієнтацією приймача.

Таким чином підкреслюється необхідність брати до уваги геометричне розташування платформи при обробці отриманої інформації.

Враховуючи отримані результати і прагнучи забезпечити адекватне порівняння даних, зібраних у різні дати, у цьому дослідженні обґрунтовано використання порогу 3 для співвідношення амплітуди сигналу до рівня фонового шуму.

Такий підхід відповідає практиці, задокументованій у наукових джерелах, і одночасно враховує специфіку проведеного експерименту, роблячи його найвиправданішим для подальшого аналізу.

2.3 Подальший аналіз

На другому етапі дослідження впроваджено методи оцінки, які були індивідуально налаштовані під вимоги кожної станції і сформовані з урахуванням результатів попереднього аналізу.

Таке рішення гарантувало стабільність дослідницького процесу і дало можливість врахувати як технічні характеристики пристроїв, так і просторові параметри їх встановлення.

Для обробки експериментальних даних застосовано єдиний підхід, який включав результати як високоточних геодезичних приймачів, так і звичайних мобільних телефонів (смартфонів).

Використовуючи цей підхід, змогли порівняти роботу різних типів приймальних систем у єдиній методологічній рамці, що підвищило інформативність і практичну цінність дослідження.

Для усунення довгострокових трендів і потенційних низькочастотних складових у зібраних даних обрали апроксимацію поліномом п'ятого степеня.

Таке рішення дозволило згладити небажані коливання, які могли спотворювати результати аналізу, і сконцентруватися на вивченні корисних сигналів.

Під час цього етапу аналіз проводився в суворо визначених просторових рамках: розглядалися кути підйому супутників у діапазоні від 5° до 25° і азимутальний діапазон від 60° до 360° .

Це рішення обґрунтовано попередніми даними і сприяло зниженню впливу поганих вимірювань, які з'являються при малих азимутах та низьких кутах підйому.

Усі отримані дані — і ті, що надходили з геодезичних приладів, і ті, що збиралися зі смартфонів — оброблялися з урахуванням сигналів різних супутникових навігаційних систем та їхніх частотних діапазонів.

Такий підхід забезпечив більш комплексний аналіз, враховуючи відмінності у функціонуванні окремих систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) і дозволив встановити, яким саме способом вони впливають на кінцеві результати.

Отримані висновки внаслідок застосування описаної методології викладено і докладно проаналізовано у наступному розділі.

Для кожної супутникової системи і кожного частотного діапазону результати подано окремо, що дозволяє не лише спостерігати загальні тенденції, а й досліджувати специфічні особливості функціонування різних навігаційних технологій.

3. Результати дослідження

3.1 Оцінка на основі супутникової системи

Усі прилади, які брали участь у проведених експериментальних вимірюваннях, одночасно приймають і обробляють сигнали чотирьох глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS): GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС) та BeiDou (Китай).

Така багатосистема є головною перевагою сучасних приймачів, оскільки збільшує надійність позиціонування і підвищує точність координат завдяки більшій кількості супутників у полі зору.

Сигнали різних навігаційних систем відрізняються за низкою важливих технічних параметрів.

Перш за все це стосується спектрального діапазону, рівня потужності випромінюваного сигналу та особливостей застосованих методів модуляції.

Саме ці параметри визначають спосіб поширення сигналу, його сприйняття приймачем і стійкість до зовнішніх завад.

Отже, навіть при одночасному використанні кількох систем оцінка їх ефективності вимагає уважного аналізу з урахуванням приналежності сигналів до конкретного супутникового групування.

Враховуючи поставлені задачі, дослідження було проведено за допомогою двох методологічних підходів.

Під час першого варіанту не накладали обмежень на мінімальну ширину діапазону кута підйому супутника, що дало можливість зберегти більшу кількість даних для їх аналізу.

У другому підході, навпаки, були введені додаткові вимоги щодо мінімально дозволеної ширини діапазону кутів підйому, що забезпечило відбір більш якісних та репрезентативних даних.

З метою спрощення подальшої обробки і інтерпретації результати, отримані за другим підходом, позначені як «дійсні».

Завдяки цьому вдалося однозначно розрізнити дані, що задовольняють встановлені критерії якості, від результатів, одержаних за менш строгих умов.

Такий розподіл дає змогу більш точно відстежити, яким чином застосовані обмеження впливають на кінцеву якість оцінки сигналів, і сформулювати обґрунтовані висновки щодо оптимальних параметрів для подальших досліджень.

3.1.1 Кількість оцінок

У результаті проведеного дослідження з використанням супутникових технологій отримано такі кінцеві дані щодо частки коректних оцінок:

- Для геодезичного приймача Raquete GNSS i90 PRO з 430 зафіксованих вимірювань валідними виявились лише 208, що відповідає 48,4 %. У іншій сесії, серед 425 отриманих оцінок, достовірними стали 244, тобто 57,4 %.
- Для мобільного пристрою частка валідних даних була нижчою: з 164 спостережень підтверджено лише 74 (45,1 %). Така ж рівень достовірності зафіксовано й для приймача SP02 – з 213 вимірювань надійними виявились 96 (45,1 %).

Показники стабільності й якості даних геодезичного приймача протягом трьох днів змінювалися:

- у перший день становили 43,2 %,

- у другий піднялися до 50,7 %,
- а в третій – досягли 51,0 %.

Для GNSS-оцінок спостерігалася схожа позитивна тенденція:

- у перший день зафіксовано 48,5 %,
- у другий – 58,0 %,
- а в третій – 64,9 % валідних результатів.

Зниження точності на стартовій стадії обумовлюється розташуванням антени.

Зокрема, через те, що платформа схилена приблизно на 20 % у напрямку, протилежному азимуту 160°, головна підсилювальна антена була спрямована не найкращим чином.

Такий кут призвів до появи множинних відбитків сигналу, які, у свою чергу, скоротили кількість надійних оцінок за методом GNSS-IR і позначились на вихідній якості даних.

У подальші дні розрив у показниках достовірності спостережень склав лише 0,3 % і був практично непомітним.

Це пояснюється тим, що у обох випадках у платформи був незначний негативний нахил, проте вона залишалася достатньо стабільною й рівною, що створювало подібні умови отримання сигналу.

Протягом усього експерименту застосування однієї області кутів підйому супутників (від 5° до 25°) довело, що між даними другого і третього днів не спостерігається суттєвих розбіжностей.

Найвищий рівень достовірності — 64,9 % — зафіксовано саме в останній день дослідження.

У смартфоні виявлена специфічна проблема з передачею даних: протягом трьох останніх годин другого дня не отримано жодної валідної оцінки, що, ймовірно, пов'язано з нестабільністю зв'язку або особливостями ПЗ.

В цілому, найбільшу частину отриманих вимірювань формувала система GPS, після якої за кількістю спостережень слідували Galileo та BeiDou.

При цьому, у перший день експлуатації смартфона не вдалося отримати дані даних від GLONASS; у другий день спостерігалася відсутність сигналів як від BeiDou, так і від GLONASS; а третій день не надходили вимірювання з Galileo.

У випадку іншого мобільного пристрою обставини були ще більш ускладнені: протягом усієї тривалості спостережень система GLONASS не надсилала жодної інформації.

Ймовірними джерелами такої проблеми можуть бути апаратні дефекти приймального модуля або програмні помилки, які перешкоджали належному обробленню сигналів даної навігаційної системи.

У обох пристроях найнадійніше працювали дані GPS, а наступною за кількістю достовірних вимірювань була система BeiDou.

Навпаки, система Galileo, хоча й надала велику кількість результатів, продемонструвала низьку достовірність: лише 17,1 % коректних оцінок у першому смартфоні та 25,6 % у другому.

3.1.2 Значення рендингу

У спектрі досліджень методики GNSS-IR індекс рендингу слугує одним із головних критеріїв для оцінки якості прийнятих сигналів.

Коли цей коефіцієнт набуває великого значення, це зазвичай вказує на стабільність ефекту відбиття хвиль, який необхідний для отримання достовірних даних щодо висот та властивостей поверхні.

Після завершення обробки супутникових даних були отримані наступні результати:

- GNSS-приймач 1. Протягом першого дня експерименту зафіксовано найнижчі значення рендерингу, тоді як найбільші показники отримано на другий день спостережень. Така картина відповідає теоретичним очікуванням, оскільки в перший день платформа була у стані позитивного нахилу, що знижувало ефективність приймання сигналів, а на другий день – у стані негативного нахилу, який створив кращі умови для формування стабільного відбиття.
- GNSS-приймач 2. Цей пристрій, розташований у протилежному до зеніту напрямку, показав протилежну динаміку у порівнянні з приймачем 1. Зокрема, протягом першого доби рівень рендерингу склав 11,7 і 10,5 (у перші та останні три години спостереження відповідно), а під час другого доби значення впали до 6,1 та 5,8. Визначальним фактором виявилась орієнтація платформи: збіг напрямку з позицією антени в перший день підвищив показники, тоді як протилежний напрямок разом із нахилом призвів до зниження рендерингу у другий день.

Якщо орієнтуватися лише на надійні дані, то серед усіх геодезичних приймачів найвища середня величина рендингу спостерігається у системи Galileo.

Наступними за цим параметром йдуть GPS, GLONASS і BeiDou.

Для смартфонів 1 і 2 вимірювання виявили лише слабку залежність рендингу від зміни орієнтації — незалежно від того, чи спрямовували пристрій до зеніту, чи від нього.

Дослідження показало, що кут нахилу платформи майже не змінював параметри рендерингу на цих мобільних пристроях, ймовірно через специфіку вбудованих антенних конструкцій.

Зібрані результати доводять, що необхідно брати до уваги геометрію розташування антени та тип приймача для досягнення стабільного рендерингу, а також виявляють різницю у впливі цього параметра між

професійними геодезичними приладами і комерційними мобільними гаджетами.

3.1.4 Оцінки висоти відбивача

Після проведеного аналізу показників рендерингу вдалося визначити оцінки висоти відбивача, використовуючи дані супутникових спостережень. Розглянемо отримані результати по кожному GNSS-приймачу.

Приймач 1.

Під час першого дня експерименту виміряні відхилення склали – 4,1 см та –6,2 см; у другий день – 4,2 см і –2,5 см, а в третій – відповідно – 6,4 см і –4,8 см.

Преобладання односпрямованих відхилень, переважно з негативним знаком, вказує на існування негативного зсуву, який, ймовірно, зумовлений особливостями рельєфу та нерівною структурою відбивної поверхні.

Стандартні відхилення вимірювань склали:

- o у перший день — 8,2 см і 6,7 см,
- o у другий — 4,9 см і 5,6 см,
- o у третій — 6,1 см в обох часових інтервалах.

Найменші показники зафіксовано у другий день, коли антену орієнтували на азимут 160° , що створило сприятливі умови прийому сигналу.

Найвищі похибки спостерігалися у перший день, коли антену розташували проти напрямку до цільового об'єкта.

Отримані дані демонструють, що орієнтація платформи у бік цільового об'єкта підвищує точність вимірювань при використанні методу GNSS-IR.

Приймач 2.

У випадку іншого пристрою у перших вимірювальних відрізках переважають від'ємні похибки: $-4,8$ см, $-3,2$ см і $-6,1$ см для першого, другого та третього днів відповідно. У другому часовому інтервалі, навпаки, спостерігаються переважно додатні відхилення: $0,8$ см, $6,2$ см та $1,0$ см.

При цьому дисперсії у другій частині дослідження значно вищі – $17,9$ см (другий день) і $13,2$ см (третій день), що не дозволяє стверджувати про сталий позитивний зсув.

У першому періоді ці значення були значно меншими – $4,5$ см, $9,4$ см та $7,3$ см, що відповідає даним приймача 1 і підтверджує схильність до негативного зрушення оцінок висоти відбивача.

Найвищу точність вимірювань приймача 2 зафіксовано в перший день дослідження; ймовірно, це зумовлено особливостями самого приладу та більш вигідною конфігурацією платформи в той час.

Порівняльний аналіз не виявив суттєвих різниць між окремими супутниковими системами для приймача 1.

Тим часом, у другий день дослідження, помилки сигналів Galileo та GLONASS, отримані приймачем 2, склали ≈ 45 см, що суттєво перевищує середні показники інших періодів.

Це переважно зумовлено тим, що висота розташування приймача 2 була нижчою порівняно з приймачем 1.

Через скорочену відстань до земної поверхні кількість хвиль у відбитому сигналі зменшилася, що погіршило спектральну роздільну здатність і, як наслідок, знизило точність оцінки висоти відбивача.

Смартфон 1.

У другому часовому відрізку другого дня спостерігалось порушення передачі даних, що суттєво знизило якість отриманих результатів.

Навіть у першому сегменті того ж дня чутливість приймача виявилася нижчою, порівняно з першим і третім днями, внаслідок чого похибка склала $32,6$ см, а стандартне відхилення — $16,6$ см.

Кількість достовірних оцінок була вкрай небагатою — лише 6, тоді як у перший день їх було 14, а у третій — 20. Така вибірка не забезпечує статистичної достовірності, тому цей інтервал виключено з подальшого аналізу.

У перший і третій дні спостерігався постійний негативний зсув: у перший день похибка становила $-4,0$ см та $-6,1$ см, а у третій $-5,7$ см і $-6,2$ см.

Це вказує на те, що систематичне відхилення зумовлене не апаратними особливостями смартфона, а властивостями відбивної поверхні.

Смартфон 2.

У випадку іншого смартфона негативні відхилення зафіксовано лише у перший день і в першому інтервалі третього дня.

Найвищу стабільність вимірювань протягом усієї експериментальної серії забезпечували GPS-супутники, тоді як система GLONASS характеризувалася найбільшою кількістю пропусків та розривів у даних.

Додатково, у другий день експерименту виявлено труднощі з передачею сигналів супутників Galileo та BeiDou, що спричинило погіршення загальної якості даних.

Оскільки під час тестування геодезичні приймачі одночасно й безперебійно отримували дані від кількох GNSS-систем, можна зробити висновок, що неточності у вимірюваннях смартфонів мали апаратно-програмний характер.

Це свідчить про те, що апаратна частина та ПЗ мобільних телефонів значно поступаються професійному геодезичному обладнанню.

Як видно з даних, наведених у графіках (рис. 5), у другому часовому інтервалі приймач 2 продемонстрував найвищі значення стандартних відхилень, що вказує на знижену стабільність отриманих оцінок у цей період.

У протилежність цьому, приймач 1 відзначився найменшими коливаннями результатів і найстабільнішими оцінками протягом першого спостерігаемого інтервалу, що підтверджує його кращі показники за однакових експериментальних умов.

Слід підкреслити, що після вилучення даних другого дня, коли спостерігалися збої в роботі програмного забезпечення та перерви у передачі сигналів, продуктивність смартфона 1 була практично на рівні результатів приймача 1, що свідчить про можливість ефективного використання сучасних мобільних пристроїв у задачах GNSS-IR за належних умов.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що і геодезичні GNSS-приймачі, і смартфони можуть визначати висоту об'єкта з похибкою від 5 до 10 см, коли застосовують типові конфігурації та стандартні параметри отримання сигналу.

Така точність вважається прийнятною для широкого спектра практичних завдань з моніторингу та аналізу поверхневих даних.

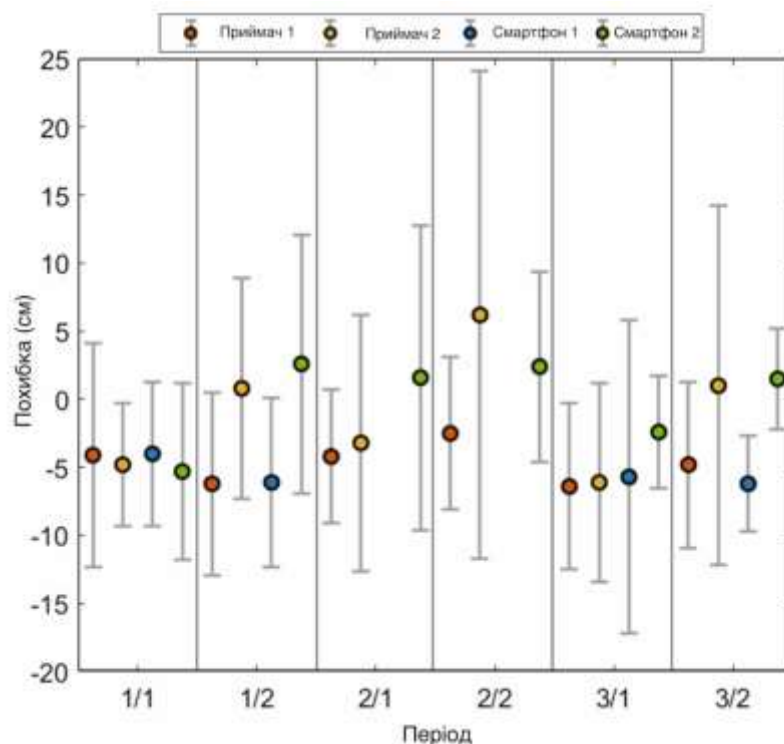


Рисунок 5 Похибки оцінки висоти відбивача за допомогою геодезичних приймачів та даних зі смартфонів у різні дні та періоди

Ключовим результатом проведеного експерименту стало вимірювання коливань рівня відбивача, що є надзвичайно важливим для тривалих моніторингових програм.

Зокрема, спостереження за змінами кліматичних показників — зокрема товщини снігового покриву або рівня океану — спираються саме на фіксацію часових коливань висоти.

В рамках проведеного дослідження передбачалося змоделювати підйом або опускання на 10 см між двома вимірювальними інтервалами.

Однак у практичних польових умовах це еталонне значення дещо змінювалося залежно від дня проведення експерименту.

Приймач 1.

Виміряно підвищення висоти: 9,0 см у перший день і 10,5 см протягом наступних двох днів.

Приймач 2.

Отримані дані виявились менш стабільними: 4,5 см у перший день, 12,0 см у другий і 10,5 см у третій.

Смартфони.

У випадку смартфонів 1 і 2 підйом на 10 см зазвичай відбувався без коливань, окрім другого дня у смартфона 1, коли спостерігалось короткочасне припинення запису.

Середні значення, розраховані для приймача 1 за даними всіх супутникових систем, склали 11,1 см у перший день, 8,0 см у другий і 8,9 см у третій.

За винятком окремих моментів — BeiDou у перший день, GLONASS у другий і Galileo у третій — різниця не перевищувала 3 см, і отримані оцінки підйому залишалися майже рівними запланованим 10 см.

У порівнянні з попереднім пристроєм, приймач 2 продемонстрував суттєві відхилення у вимірюваннях, що стали особливо виразними на другий день експерименту.

Значно підвищені стандартні відхилення при визначенні висоти відбивача призвели до суттєвого зниження точності обчислення різниці висот.

Наприклад, обчислення за даними BeiDou у перший день склало 4,7 см, хоча очікувалося 4,5 см.

Отже, лише використання супутникових даних для класифікації вимірювань є недостатнім для правильного розрізнення чистих сигналів і шумних.

У даному випадку більш ефективним способом є оцінка, заснована на частотних властивостях сигналу.

Смартфон 1 показав значення 12,1 см у перший день і 10,5 см у третій.

У випадку смартфона 2 спостерігались зміни 2,1 см у перший день, 9,2 см у другий і 6,1 см у третій.

Високі відхилення у вимірюваннях смартфона 2 у порівнянні зі смартфоном 1 обумовлені його нижчою позицією над землею, що призвело до зниження спектральної розрізняювальної спроможності під час визначення частоти відбитого сигналу.

Крім того, на отримані дані могли вплинути багатопроменеві явища та перешкоди, пов'язані з експериментальним обладнанням і встановленими на ньому приймачами.

Щоб знизити негативний вплив у майбутніх вимірюваннях, доцільно розташовувати смартфони і геодезичні приймачі на окремих конструкціях, уникаючи будь-якого фізичного дотику, що дозволить мінімізувати взаємні інтерференції й підвищити точність спостережень.

3.2 Оцінка на основі частоти

За результатами виконаного дослідження як геодезичні приймачі, так і смартфони змогли реєструвати сигнали у декількох частотних діапазонах.

Кожен із цих спектральних діапазонів володіє унікальною чутливістю до багатопроменевих процесів, специфічними умовами розповсюдження та особливостями відбивання сигналу від різноманітних типів поверхонь, що безпосередньо визначає якість і точність вимірювання висоти відбивача.

Використання багаточастотних вимірювань не лише посилює стійкість до шумових та завадних впливів, а й знижує вплив іоносферних затримок, що має особливе значення для методів GNSS-IR.

Внаслідок цього аналіз частотних характеристик сигналів стає фундаментом для адекватного порівняння ефективності різних видів приймачів і встановлення найкращих умов спостереження.

У Таблиці 3 подано основні параметри використаних у дослідженні сигналів: їх типи, робочі діапазони, центральні частоти та відповідні довжини хвиль, які здатні фіксувати як геодезичні приймачі, так і смартфони.

Таке порівняння дає можливість визначити, наскільки відрізняються можливості окремих пристроїв при фіксації відбитих сигналів.

GLONASS-система вимагає особливого підходу, бо у її описі використовується параметр «k», що позначає номер частотного каналу і може набувати значень у діапазоні від -7 до $+12$.

Таке становить особливість способу розподілу частот у GLONASS, тому під час обробки даних необхідно запобігати похибкам у визначенні довжини хвилі.

Аналіз спектрального складу сигналів дозволяє точніше визначати, які частоти найвразливіші до зміни висоти відбивача, а також підбирати оптимальні частотні комбінації для моніторингу кліматичних і геодинамічних параметрів, зокрема рівня води, товщини снігового покриву та сезонних деформацій ґрунту.

Таблиця 3: Підтримувані сигнали, діапазони частот, частоти та довжини хвиль для геодезичних приймачів та смартфонів, що використовуються

Супутникова система	Тип сигналу	Смуга частот	Частота (МГц)	Довжина хвилі (см)
GPS	S1C	L1	1575.42	19.03
	S2P	L2	1227.60	24.43
	S5X	L5	1176.44	25.44
GLONASS	S1C	G1	1602+к	18.64-18.75
	S2P	G2	1246+к	23.67-24.15
Galileo	S1X	E1	1575.42	19.03
	S5X	E5a	1176.45	25.43
	S8X	E5(E5a+E5b)	1191.795	25.12
BeiDou	S1I	B1	1561.098	19.15
	S2I	B1-2	1561.098	19.15
	S6I	B3	1268.52	23.55

Оскільки і геодезичні приймачі, і смартфони проводять вимірювання на однакових частотах, проте використовують різні види сигналів, виникла потреба їх класифікувати.

Це пояснюється тим, що частота сигналу — ключовий параметр, що визначає характер відбиття від поверхні і впливає на точність визначення висоти об'єкта.

Вибір частотного діапазону має величезне значення, оскільки хвилі різної довжини по-різному реагують на багатопроменеві процеси, наявність перешкод і нерівності рельєфу.

Враховуючи зворотний зв'язок між частотою та довжиною хвилі, сигнали групували за параметром довжини хвилі, що забезпечує більш точне порівняння ефективності спостережень різних приладів та враховує фізичні характеристики сигналу.

Таке групування також дозволяє визначити, які частоти характеризуються найвищою стабільністю та точністю при вимірюванні висоти відбивача.

У процесі дослідження були ідентифіковані два набори частот:

- Набір 1 (FG1): GPS S1C, GLO S1C, GAL S1X, BDS S1I та BDS S2I.
- Набір 2 (FG2): GPS S2P, GPS S5X, GLO S2P, GAL S5X, GAL S8X, BDS S6I.

Подальша обробка зібраних даних здійснювалась з урахуванням лише цих двох наборів.

Завдяки такому підходу можна було дослідити, як довжина хвилі впливає на стабільність сигналу, зокрема на розмір стандартного відхилення і точність визначення висоти відбивача.

На додаток, детальний аналіз розподілу сигналів дозволяє виявити характерні відмінності між різними супутниковими системами, а також між геодезичними приймачами й смартфонами.

Поділ сигналів за їх частотними діапазонами також грає важливу роль у вдосконаленні методик GNSS-IR, оскільки відкриває такі можливості:

1. Вибирати ті сигнали, які найменше піддаються багатопроменевим спотворенням.

2. Підвищувати точність визначення висоти відбивача шляхом комбінованого використання стабільних частотних діапазонів.
3. Визначати специфіку впливу рельєфу, позиції приймача та апаратних обмежень на якість вимірювань.

Отже, поділ сигналів за частотними діапазонами виявився вирішальним етапом, який забезпечує правильну обробку даних експерименту та підвищує точність визначення змін висоти відбивача, незалежно від того, чи застосовуються професійні геодезичні приймачі, чи смартфони.

3.2.1 Кількість оцінок

Для кожного приймача та смартфона підраховано кількість оцінок у частотних діапазонах 1 і 2 (далі — група 1 та група 2).

Таблиця 4 демонструє отримані значення оцінок, засновані на даних, зібраних з приймачів і смартфонів.

Таблиця 4: Кількість оцінок для даних на різних частотах, зібраних геодезичними приймачами та смартфонами

			День 1		День 2		День 3	
Приймачі	Частотна група	Тип даних	Перші	Останні	Перші	Останні	Перші	Останні
			3 год.	3 год.	3 год.	3 год.	3 год.	3 год.
Приймач GNSS1	Група 1	Усі	26	36	26	40	31	35
		Дійсні	10	12	10	20	12	16
	Група 2	Усі	33	43	31	46	36	40
		Дійсні	16	18	18	23	18	21
Приймач GNSS2	Група 1	Усі	25	35	24	40	29	35
		Дійсні	12	18	13	22	17	23
	Група 2	Усі	30	41	30	45	37	44
		Дійсні	16	16	20	26	24	30
	Група 1	Усі	22	28	13	5	23	23

Смартфон 1	Група 2	Дійсні	12	15	6	-	17	17
		Усі	10	12	7	1	9	5
		Дійсні	1	1	-	-	2	-
Смартфон 2	Група 1	Усі	22	27	18	26	22	21
		Дійсні	12	16	12	18	14	14
	Група 2	Усі	10	12	9	14	11	11
		Дійсні	2	1	-	2	1	-

Згідно з інформацією, наведеною у Таблиці 4, у випадку геодезичних приймачів 1 і 2 кількість оцінок у другій групі переважає кількість оцінок у першій групі.

Для смартфонів 1 і 2 навпаки спостерігається протилежна картина: у першій групі число оцінок у двічі, а іноді й у кілька разів, перевищує значення, отримані у другій групі.

Зокрема, щодо смартфона 1 практично всі достовірні оцінки походять саме з першої групи.

Результати групи 2 дали лише по одній правильній оцінці у кожному з двох інтервалів першого дня та ще по дві у першому інтервалі останнього дня дослідження.

Смартфон 2 також виявив перевагу групи 1 у частотних оцінках. Проте мала кількість отриманих даних у групі 2 суттєво обмежує її корисність при проведенні GNSS-IR аналізу.

3.2.2 Значення рендингу

Аналіз частотних груп за показником рендингу виявив значні розбіжності між геодезичними приймачами і смартфонами.

Зокрема, у геодезичних приймачах найвищі показники рендингу зафіксовано у групі 2, тоді як у смартфонах переважає група 1, що дала більш виразні результати.

У випадку смартфонів значення рендингу в групі 1 перевищували відповідні показники групи 2 приблизно вдвічі.

3.2.3 Оцінки висоти відбивача

У Таблиці 5 представлено дані про вимірювану висоту відбивача разом із їхніми стандартними відхиленнями, які отримано на основі вимірювань, зібраних при використанні різних частот геодезичних приймачів та смартфонів.

Маркер «всі» означає набори результатів без застосування додаткових фільтрів, у той час як «дійсні» — це результати, відсортовані за встановленим набором критеріїв.

Числа в дужках вказують величину стандартного відхилення у сантиметрах.

Таблиця 5: Оцінки висоти відбивача та їх стандартні відхилення

			День 1		День 2		День 3	
Приймачі	Частотна група	Тип даних	Перші	Останні	Перші	Останні	Перші	Останні
			3 год.	3 год.	3 год.	3 год.	3 год.	3 год.
Приймач GNSS1	Група 1	Усі	1.852	2.317	2.412	2.024	2.067	2.254
		Дійсні	1.865	1.654	1.854	1.789	1.897	1.865
	Група 2	Усі	1.987	2.289	1.798	2.245	2.040	2.143
		Дійсні	1.876	1.751	1.933	1.824	1.912	1.843
Приймач GNSS2	Група 1	Усі	1.450	1.780	1.962	1.907	1.430	1.601
		Дійсні	1.063	1.068	1.071	0.985	1.091	0.986
	Група 2	Усі	1.818	1.967	1.780	1.945	1.823	1.584
		Дійсні	1.105	1.129	1.125	1.158	1.123	1.143

Смартфон 1	Група 1	Усі	2.457	2.465	2.333	2.104	2.106	2.227
		Дійсні	1.903	15	6	-	17	17
	Група 2	Усі	2.093	2.361	2.821	0.007	2.512	2.224
		Дійсні	1.927	1.922	-	-	1.654	-
Смартфон 2	Група 1	Усі	1.745	1.944	1.461	1.845	1.922	2.176
		Дійсні	1.184	1.180	1.234	1.149	1.221	1.145
	Група 2	Усі	1.576	2.300	2.257	2.278	2.645	2.465
		Дійсні	1.306	1.299	-	1.299	1.167	-

У випадку приймача 1, хоча кількість визначень була меншою, обчислення висоти відбивача, що базувалися на даних групи 1, виявилися точнішими, ніж при використанні даних групи 2.

З таблиці 5 випливає, що при стандартних налаштуваннях саме інформація першої групи дає більш достовірні оцінки висоти відбивача.

Для приймача 2 застосування сигналів з групи 1 також значно підвищило якість отриманих результатів.

Отже, незалежно від того, в якому напрямку розташований геодезичний приймач — до zenіту чи проти нього — дані групи 1 залишаються кращим джерелом для визначення висоти відбивача GNSS+IR у порівнянні з групою 2.

Щодо смартфона 1, майже всі достовірні оцінки були отримані саме з групи 1.

Навпаки, результати групи 2 включали лише по одній правильній оцінці у двох інтервалах першого дня і дві оцінки в першому інтервалі останнього дня.

Стандартне відхилення, обчислене з цих двох вимірювань у останній день, склало 25,3 см, що вказує на надзвичайно низьку придатність сигналів групи 2 для GNSS+IR досліджень за допомогою смартфонів.

Навпаки, результати групи 1 дали можливість визначити висоту відбивача з точністю, що характеризується стандартним відхиленням меншим за 6 см, у перший і третій дні.

У телефоні 2 також спостерігається переважаюча роль групи 1 у спектральному аналізі.

Невелика кількість оцінок у групі 2 та її низька точність обмежують застосування в GNSS-IR дослідженнях.

Варто зазначити, що використання виключно сигналів групи 1 дає кращі результати порівняно з використанням усіх сигналів.

Наприклад, у першому інтервалі першого дня стандартне відхилення всіх сигналів склало 6,5 см, тоді як у групі 1 — лише 4,2 см.

Подібна тенденція була помічена у другому інтервалі другого дня: 7,0 см при обробці всіх сигналів проти 3,5 см при використанні лише групи 1.

3.2.4 Оцінки зміни висоти відбивача

У Таблиці 6 наведено отримані дані оцінки зміни висоти відбивача разом із їхніми стандартними відхиленнями, зібрані з вимірювань на різних частотах геодезичних приймачів та смартфонів.

Для визначення зміни висоти відбивача обчислювали різницю між двома незалежними оцінками його висоти; цей підхід автоматично переносить похибки як у розрахунку абсолютних величин, так і у оцінці їхньої зміни.

Тут подано виключно ті результати, які були отримані з урахуванням встановлених критеріїв відбору, бо значення, розраховані без дотримання цих умов, не досягли статистичної значущості.

Таблиця 6: Оцінки зміни висоти відбивача, їх стандартні відхилення та вимірювання на місці в одиницях см

Приймач	Тип даних	День 1	День 2	День 3
	На місці	9.0	10.4	10.4

Приймач GNSS1	Група 1	11.0	9.4	8.6
	Група 2	11.1	8.5	9.2
	Всі	11.1	8.7	8.8
Приймач GNSS2	На місці	4.4	11.9	10.4
	Група 1	-0.4	8.7	10.6
	Група 2	-2.4	-3.2	-2.5
	Всі	-1.1	2.5	3.2
Смартфон 1	На місці	10.0	9.4	10.0
	Група 1	12.7	-	13.3
	Група 2	-0.7	-	-
	Всі	12.2	-	10.4
Смартфон 2	На місці	10.0	10.0	10.0
	Група 1	0.3	10.5	6.4
	Група 2	0.8	-	-
	Всі	2.1	9.1	5.9

Застосування сигналів першої групи для визначення зміни висоти відбивача за допомогою першого приймача продемонструвало суттєве підвищення точності.

У першому дні середньоквадратичні відхилення скоротились з 10,6 см до 9,4 см, у другому — з 7,4 см до 5,9 см, а в третьому — з 8,6 см до 7,6 см.

Як було виявлено під час аналізу, заснованого на супутникових даних, з приймачем 2 не вдалося точно визначити внесені зміни висоти, якщо застосовувати усі сигнали чи здійснювати розгляд окремо для різних супутникових систем.

Проте, після розподілу сигналів на групи вдалося досягти більш точних результатів: у другий і третій дні сигнали з групи 1 дали можливість визначити зміни висоти з похибкою менше 3,5 см.

Зокрема, у другий день підйом на 12 см був оцінений як 8,6 см, а у третій — підйом на 10,5 см — як 10,7 см.

Отримані за сигналами групи 2 результати не є статистично значущими, що свідчить про доцільність використання саме групи 1 у GNSS-IR дослідженнях для приймача 2.

У вимірюваннях зміни висоти відбивача за допомогою смартфонів переважає група 1.

У випадку смартфона 1 зафіксовано рост 12,9 см у перший день і 13,1 см у третій, тоді як смартфон 2 показав 0,4 см у перший, 10,7 см у другий і 6,5 см у третій день.

Для обох пристроїв дисперсія оцінок зміни висоти, отриманих за сигналами групи 1, виявилась меншою, ніж при використанні всіх сигналів.

Висновки

У межах магістерської дослідницької роботи здійснено порівняльне дослідження точності визначення параметрів, використовуючи мульти-GNSS та багаточастотні дані, зібрані як з геодезичних приймачів, так і з Android-смартфонів, розташованих під різними кутами.

Оцінка результатів триденних польових випробувань проводилась з урахуванням впливу супутникових систем та частотних характеристик сигналів.

Основні результати дослідження:

- Здатність геодезичних приймачів забезпечує більш стабільний збір даних у порівнянні зі смартфонами.
- У випадку смартфонів нахил або перевертання пристрою (горизонтальне, вертикальне або під кутом) майже не змінює результати GNSS-IR.
- Найнадійніші вимірювання на смартфонах отримані з GPS, тоді як сигнали від Galileo, BeiDou та ГЛОНАСС часто були нестабільними.
- У дослідженнях GNSS-IR за участю смартфонів використання сигналів з довжиною хвилі меншою 20 см (група 1) забезпечує вищу точність порівняно з усіма доступними сигналами.
- Для приймача 1 сигнали групи 1 дали більш точні оцінки зміни висоти відбивача, з похибкою менше 3 см.

- При застосуванні приймача 2 разом зі смартфонами сигнали першої групи виявили помітно вищу ефективність, тоді як друга група виявилась обмеженою у використанні.
- І геодезичні приймачі, і смартфони здатні визначати висоту відбивача, відстежувати її зміни та здійснювати довгострокове спостереження за кліматичними параметрами, зокрема глибиною снігу, рівнем моря та висотою рослинності.
- Використання смартфонів у GNSS-IR є економічно обґрунтованою альтернативою, оскільки їхня вартість значно нижча у порівнянні з геодезичними приймачами.

Отже, отримані в дослідженнях дані свідчать про те, що смартфони можна застосовувати разом із геодезичними приймачами для спостереження за природними процесами, що відкриває нові можливості використання GNSS-IR у практичних та наукових задачах.

Список використаних джерел

1. Баран П.І. Інженерна геодезія — Київ: Віпол, 2012
2. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. – Львів, 2008.
3. Волосецький Б.І. Інженерна геодезія. – Львів, 2003.
4. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: ГКНТА, 1999.
5. Тартачинський Р.М., Дейнека Ю.П., Смірнова О.М. Практикум з інженерної геодезії – Львів, 2001.
6. Головне управління геодезії, картографії та кадастру України "Інструкція з топографічної зйомки в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500", - Київ, 2001 рік.
7. Проф. Могильний С.Г. і д.т.н. Войтенко С.П. "Геодезія" (частина перша). Чернігів 2002р.
8. Altuntas, Cemali & Tunalioglu, Nursu. (2025). Assessment of GNSS-IR performance using multi-GNSS and multi-frequency SNR data from smartphones. *Journal of Geodesy and Geoinformation*. 12. 1-19.
9. Besel, C., & Kayıkcı, E. T. (2021). Дослідження коливань рівня моря на турецьких узбережжях за допомогою рефлектометрії GNSS (турецькою мовою). *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 8(1), 1-17.
10. Chen, L., Chai, H., Zheng, N., Wang, M., & Xiang, M. (2023). Оцінка доцільності та ефективності недорогих пристроїв GNSS для вимірювання

рівня моря на основі GNSS-IR. *Advances in Space Research*, 72(11), 4651-4662.

11. Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., & Zavorotny, V. U. (2013). Вплив приповерхневої вологості ґрунту на дані GPS SNR: розробка алгоритму отримання даних про вологість ґрунту. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1), 537-543.

12. EUSPA. (2024). Звіт про ринок EUSPA EO та GNSS, випуск 2. Публікаційне бюро Європейського Союзу, Люксембург.

13. GSA. (2019) Звіт про ринок GNSS, випуск 6. Публікаційне бюро Європейського Союзу, Люксембург. Hu, Y., Yuan, X., Liu, W., Wickert, J., Jiang, Z., & Haas, R. (2021). Модель GNSS-IR оцінки висоти рівня моря, що поєднує варіаційне розкладання мод. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 10405-10414.

14. Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J., & Zavorotny, V. U. (2008). Використання GPS-приймачів як мережі вологості ґрунту для досліджень водного циклу. *Geophysical Research Letters*, 35(24).

15. Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., & Nievinski, F. G. (2009). Чи можемо ми виміряти глибину снігу за допомогою GPS-приймачів? *Geophysical research letters*, 36(17).

16. Larson, K. M., Löfgren, J. S., & Haas, R. (2013). Вимірювання рівня моря в прибережній зоні за допомогою одного геодезичного GPS-приймача. *Advances in space research*, 51(8), 1301-1310.

17. Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS-зондування снігу: результати обсерваторії EarthScope Plate Boundary. *GPS Solutions*, 17, 41-52.

Liu, Z., Du, L., Zhou, P., Liu, Z., Zhang, Z., & Xu, Z. (2022). Оцінка продуктивності GNSS-IR альтиметрії з використанням даних співвідношення сигнал/шум зі смартфона Huawei P30. *GPS Solutions*, 26(2), 42.

18. Strandberg, J., & Haas, R. (2019). Чи можемо ми виміряти рівень моря за допомогою планшетного комп'ютера?. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(11), 1876-1878.

19. Tunalioglu, N., Dogan, A. H., & Durdag, U. M. (2019). Визначення глибини снігу за співвідношенням сигнал/шум GPS (турецькою мовою). *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 6(1), 1-9.

20. Williams, S. D., Bell, P. S., McCann, D. L., Cooke, R., & Sams, C. (2020). Демонстрація потенціалу недорогих GPS-пристроїв для дистанційного вимірювання припливів та рівня води за допомогою інтерферометричної рефлектометрії. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 37(10), 1925-1935.