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

**Кафедра геодезії та землеустрою**

**Колодій Андрій**
**(прізвище, ім'я, по батькові)**

**УДК 528.48**
**(індекс)**

# БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**« Дослідження визначення координат точок у RTK режимі із декількох GNSS систем використовуючи Android-додаток»**
**(назва роботи)**

**193 Геодезія та землеустрій**
(шифр і назва спеціальності)

***А.Колодій, студент групи ГЗ-21-1***
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

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

**Допущено до захисту**

**Завідувач кафедри** ***проф. Микола ПРИХОДЬКО***
(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Рецензент**

(посада) (підпис) (дата) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

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

**2025**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

*(повне найменування вищого навчального закладу)*

**Інститут архітектури, будівництва 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**

**Колодій Андрій**

*(прізвище, ім'я, по батькові)*

**1. Тема роботи: « Дослідження визначення координат точок у RTK режимі із декількох GNSS систем використовуючи Android-додаток»**

**керівник роботи: *к.т.н. доцент Ірина Боднарук***

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від_____

**2. Строк подання студентом роботи _____ року**

**3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**

1. Методи дослідження
2. Додаток GEA для виконання дослідження
3. Результати дослідження

**5. Перелік графічного матеріалу:**

**6. Дата видачі завдання: _____**

**7. Календарний план**

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітки |
|---|---|---|---|
| 1 | Методи дослідження | | |
| 2 | Додаток GEA для виконання дослідження | | |
| 3 | Результати дослідження | | |
| 4 | Оформлення бакалаврської роботи | | |

**Студент** _____ ***Колодій А.***
*(підпис)* *(прізвище та ініціали)*

**Керівник роботи** _____ ***Боднарук І.***

## Анотація

Метою даної бакалаврської роботи є дослідження можливостей використання мобільних пристроїв з GNSS-приймачами для збору позиційних даних, а також розробка та реалізація системи їх обробки в реальному часі з використанням хмарних обчислень.

**Актуальність теми**

У сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, забезпечення високоточного позиціонування стало критично важливим для широкого спектра додатків — від навігації до геоінформаційних сервісів.

Значне зростання кількості мобільних пристроїв, оснащених GNSS-приймачами, створює потужне джерело даних про місцезнаходження.

Проте ефективна обробка таких даних у режимі реального часу потребує значних обчислювальних ресурсів.

У цьому контексті використання хмарних технологій стає особливо актуальним, оскільки дозволяє миттєво обробляти великі обсяги інформації без перевантаження мобільних пристроїв.

**Наукова новизна**

Новизна роботи полягає в інтеграції технологій GNSS у реальному часі з хмарними обчисленнями на базі Android-платформи для забезпечення високоточних результатів позиціонування.

Особливу увагу приділено мінімізації обчислювального навантаження на мобільний пристрій шляхом передачі необроблених даних до хмарної інфраструктури, що дозволяє створити масштабовану систему для подальшого застосування у геоінформаційних сервісах.

**Практична цінність**

Результати роботи мають значну практичну цінність, оскільки можуть бути використані при розробці інтерактивних картографічних додатків, транспортних навігаційних систем, сервісів логістики та інших

застосунків, що використовують інформацію про місцезнаходження користувача.

Запропонований підхід також відкриває нові можливості для створення інноваційних сервісів, які працюють у режимі реального часу та забезпечують високу точність позиціонування при мінімальних вимогах до апаратного забезпечення.

**Ключові слова:** GNSS у реальному часі, Смартфон, Хмарні обчислення, Android.

## Abstract

The purpose of this bachelor's thesis is to study the possibilities of using mobile devices with GNSS receivers to collect positional data, as well as to develop and implement a system for their processing in real time using cloud computing.

**Relevance of the topic**

In today's conditions of rapid development of digital technologies, ensuring high-precision positioning has become critically important for a wide range of applications - from navigation to geoinformation services.

A significant increase in the number of mobile devices equipped with GNSS receivers creates a powerful source of location data.

However, effective processing of such data in real time requires significant computing resources.

In this context, the use of cloud technologies becomes especially relevant, since it allows you to instantly process large amounts of information without overloading mobile devices.

**Scientific novelty**

The novelty of the work lies in the integration of real-time GNSS technologies with cloud computing based on the Android platform to provide highly accurate positioning results.

Particular attention is paid to minimizing the computational load on the mobile device by transferring raw data to the cloud infrastructure, which allows creating a scalable system for further use in geoinformation services.

**Practical value**

The results of the work have significant practical value, as they can be used in the development of interactive cartographic applications, transport navigation systems, logistics services and other applications that use information about the user's location.

The proposed approach also opens up new opportunities for creating innovative services that operate in real time and provide high positioning accuracy with minimal hardware requirements.

**Keywords**: Real-time GNSS, Smartphone, Cloud computing, Android.

**Зміст**

**Вступ**

**1. Методи дослідження**

1.1 Інтерфейс

1.2 Платформа Node.js

1.3 Робочі процеси хмарних обчислень GNSS

1.4 Затримка сигналу

**2. Додаток GEA для виконання дослідження**

2.1 Інтерфейс програми

**3. Результати дослідження**

**Висновок**

**Список використаних джерел**

# Вступ

Одним з найбільших викликів у сучасному світі технологій позиціонування є поєднання двох важливих аспектів: висока точність та економічна вигідність.

Традиційні GNSS-приймачі, які використовуються у комерційних навігаційних системах, мають обмеження через свою високу вартість, складну конструкцію та необхідність спеціалізованого обладнання.

З іншого боку, мобільні пристрої пропонують прийнятну точність позиціонування, але вимагають інтеграції з іншими технологіями, на кшталт RTK та точне позиціонування точки, а також додаткових обчислювальних ресурсів для обробки даних, щоб отримати найкращий результат.

Останні здобутки у царині сенсорів GNSS та обробки сигналів відкрили нові горизонти для підвищення точності позиціонування, зокрема, на смартфонах.

Зокрема, застосування систем, що використовують багато супутників та двочастотні сигнали, забезпечило стабільніші й точніші дані навіть у найскладніших умовах, скажімо, у щільній міській забудові або на відкритому просторі.

Ключовим елементом у розвитку GNSS є її інтеграція з іншими технологіями, зокрема з геоінформаційними системами (ГІС) та даними дистанційного зондування Землі.[6]

Сучасні смартфони з GPS чудово підходять для моніторингу та контролю транспорту, довкілля, енергетичних ресурсів та показників енергоефективності.

У тандемі з хмарними платформами, що надають можливість опрацювання колосальних масивів інформації, ці технології відкривають шлях до створення розумних, орієнтованих на місцезнаходження систем.

Більше того, застосування хмарних технологій дозволяє значно знизити вимоги до обчислювальних ресурсів на пристроях кінцевих користувачів.

Це критично важливо при розробці мобільних застосунків, де першорядна точність має поєднуватися з обмеженими обчислювальними можливостями та низьким енергоспоживанням.

Хмарні сервіси суттєво розвантажують обладнання, адже левова частка обчислювальних процесів відбувається на продуктивних віддалених центрах обробки даних.

Отже, взаємодія GNSS, хмарних обчислень та сучасних смартфонів відкриває перспективи для точного спостереження у реальному часі.

Ключовим завданням є створення алгоритмів, здатних оперативно опрацьовувати дані, нівелювати похибки та забезпечувати стабільність і коректність системи.

Необхідність пристосування технології до реальних обставин (переривчастість сигналу, урбаністичні перешкоди, несприятливі погодні явища) теж має вирішальне значення для подальшого вдосконалення програмного забезпечення.

Впровадження цих технологій відкриває перспективу суттєвого поліпшення сервісу в різноманітних секторах, включаючи агропромисловість, будівельну сферу, захист довкілля, транспортну галузь та забезпечення безпеки під час надзвичайних ситуацій.

Об'єднання хмарних обчислень з GNSS сприяє появі додаткових перспектив для інтеграції з різноманітними масивами даних, які зберігаються у розподілених сховищах, зокрема, для потреб аналізу та прогнозування.

У перспективі, спираючись на нові технологічні досягнення, ці рішення стануть фундаментом для формування більш гнучких та ефективних систем моніторингу та навігації, які оперативно реагуватимуть

на динаміку навколишнього середовища, потреби споживачів та забезпечуватимуть безпрецедентний рівень точності позиціювання.

# 1. Методи дослідження

У цьому розділі подається вичерпний опис методології, що була використана в рамках проведеного дослідження.

Він містить детальний огляд послідовності операцій, задіяних у обчисленні координат з використанням хмарних обчислень.

Особлива увага приділяється етапам збору інформації, її подальшої обробки та аналізу даних ГНСС, а також інтеграції цих процесів із хмарними технологіями, з метою покращення точності визначення місцезнаходження.

Використана робоча схема дає змогу більш ефективно працювати з великими масивами даних, отриманих з мобільних пристроїв, а також оптимізувати використання обчислювальних ресурсів і споживання енергії.

Підсумовуючи, зазначена методологія не лише забезпечує точне позиціонування, але й відкриває перспективи для подальших наукових розробок у галузі геопросторових технологій та розробки мобільних застосувань.[4]

## 1.1 Інтерфейс

Андроїд-програма, задіяна в цьому аналізі, була збудована на основі Flutter, багатофункціонального інструментарію для розробки мобільних застосунків з відкритим вихідним кодом.

Створений Google, Flutter славиться своєю адаптивністю, і вагомою перевагою Flutter є можливість його використання як на Android, так і на iOS платформах.

Це робить його одним з улюблених серед розробників, що прагнуть до створення програм, які поєднують привабливий зовнішній вигляд з високою ефективністю.

Додатки, створені на Flutter, характеризуються двома ключовими властивостями.

Перш за все, Flutter забезпечує функціональність роботи офлайн, що дозволяє збирати інформацію та зберігати її у текстовий файл для подальшого опрацювання.

Цей режим є особливо корисним у випадку відсутності підключення до мережі, зберігаючи цінну інформацію для майбутнього аналізу без втрати даних (див. рис. 1).[4]

По-друге, програма реалізує підтримку онлайн-режиму, який передбачає обробку необроблених даних у реальному часі за допомогою хмарних сервісів.

Рисунок 1. Відображення файлу журналу сирих даних: захоплення полів даних у реальному часі та їх збереження у текстовий файл.

Такий підхід дозволяє оптимізувати обробку інформації та здійснювати точні обчислення координат в реальному часі, не потребуючи зберігання великих обсягів даних на місці.

Більше того, створення додатків на основі Flutter спрощує їх інтеграцію з іншими технологіями та системами, зокрема з геоінформаційними системами (ГІС) та платформами аналізу даних.

Це додає гнучкості у використанні додатків в різних галузях, серед яких транспорт, сільське господарство та екологічний моніторинг.

Застосування Flutter не тільки пришвидшує розробку і супровід програм, але й дарує інтуїтивно зрозумілий та зручний інтерфейс, значно полегшуючи взаємодію з даними GNSS.[4,7]

Інтеграція з Android API, реалізована в обох версіях додатку, забезпечила прямий доступ до сирих даних, що надходять з GNSS-сенсорів смартфона.

Для збору даних з пристрою використовувався стандартний набір інструментів, що дозволяють отримувати точні параметри позиціювання.

На основі отриманих сирих даних були сформовані супутникові повідомлення, які мали структуру, аналогічну формату додатку Google GNSSLogger.

Цей формат побудови гарантує взаємодію з різноманітними аналітичними засобами, що їх пропонує Google, сприяючи безперешкодному використанню сирих GNSS-даних для подальшої обробки та аналізу.

Завдяки цій інтеграції досягається високий рівень взаємодії з іншими додатками та сервісами, що призначені для відстеження і аналізу даних про місцезнаходження.

Відтак, програма виступає як GNSS-приймач, реалізуючи подвійну функцію: з одного боку, зберігає зібрану інформацію у файлі, а з іншого – передає ці дані на сервер для подальшої обробки.

В режимі реального часу програма отримує результати позиціонування, обчислені на сервері, і демонструє їх користувачеві через інтерфейс програми.[4]

Це гарантує надзвичайно точне визначення місця розташування та обчислення координат, навіть коли умови далекі від ідеальних, наприклад, у місцевостях з обмеженим сигналом чи на значних відстанях.

Використання хмарних технологій дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси смартфона, таким чином сприяючи економії заряду акумулятора та знижуючи навантаження на його центральний процесор.

Завдяки цій архітектурі, додатки мають змогу гарантувати високий рівень продуктивності та стабільності під час збору та подальшої обробки даних GNSS.[4]

## 1.2 Платформа Node.js

Платформа Node.js базується на JavaScript, мові програмування, та була сконструйована для створення потужних веб-застосунків.

Він слугує для розробки серверних скриптів, що відповідають за обробку веб-запитів, а також дозволяє створювати як клієнтські, так і серверні скрипти.

Застосовується широко для розробки обох типів застосунків, а завдяки надзвичайній продуктивності рушія V8 від Google, Node.js є платформою, яка ідеально підходить для розробки високопродуктивних, здатних до масштабування та ефективних серверних рішень.

Node.js забезпечений численними бібліотеками та пакетами, що допомагають розробникам спростити процес програмування та збільшити ефективність їхніх застосунків.

Втім, однопотокова архітектура платформи може в окремих ситуаціях обмежувати можливості масштабування.

Для обчислень позиціонування в режимі реального часу, в таких програмах, застосовуючи потужний програмний комплекс RTKLib.[4]

RTKLib - це програмний інструментарій з відкритим кодом, спроектований для спрощення стандартизованого та надточного визначення координат.

Універсальність RTKLib надає можливість розробляти додатки, що можуть бути придатними для розв'язання широкого кола задач, пов'язаних із GNSS, що робить його надзвичайно корисним для опрацювання GNSS-даних в різноманітних сферах.

Щоб пришвидшити визначення епох розташування, застосовувалися дані з постійних станцій, що надходили через інтернет-протоколи.

Це надає можливість оперативно надсилати дані GNSS-поправок та іншу ключову інформацію, що підвищує точність позиціонування.

Коригувальні дані є особливо значущими для випадків кінематичного позиціонування в реальному часі (RTK) та точного позиціонування (PPP).[5]

Для обміну даними та сигналами корекції між програмою та сервером використовується канал зв'язку на основі протоколу WebSocket.

Цей протокол є найкращим варіантом для застосунків, де критично важливий обмін інформацією в реальному часі, адже він забезпечує мінімальну затримку та демонструє високу продуктивність при частих оновленнях.

Використання WebSocket гарантує безперебійну та високошвидкісну передачу даних між клієнтською частиною та сервером, що є надзвичайно важливим для програм, які потребують максимально точного визначення координат у реальному часі.

Отже, комбінація Node.js, RTKLib і WebSocket дозволяє використати надзвичайно потужне, високоефективне та масштабоване рішення для збору, обробки та подальшої передачі GNSS-даних, суттєво покращуючи точність і швидкість позиціонування в практичних, реальних сценаріях використання.[4]

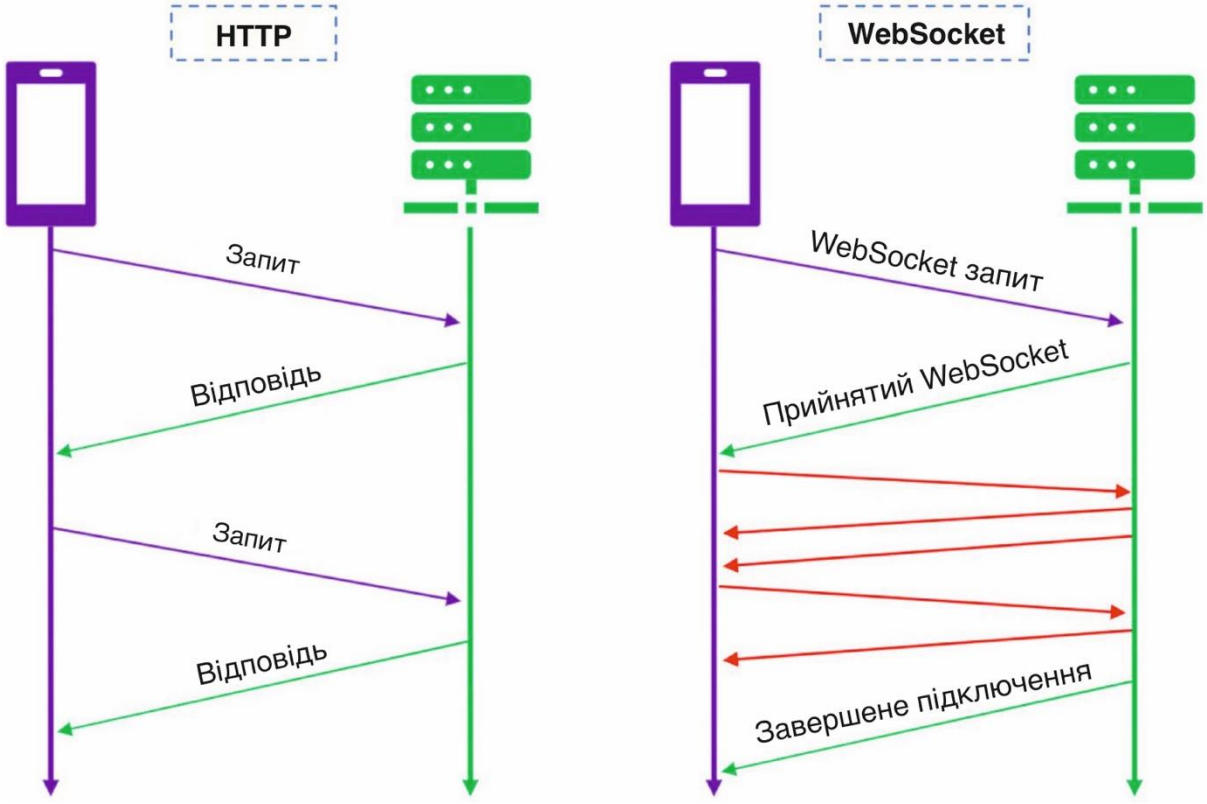



Рисунок 2. Порівняльна діаграма: HTTP та з'єднання WebSocket.

Згідно з ілюстрацією, WebSocket створює постійне з'єднання, в якому кожна зі сторін має можливість надсилати та отримувати дані незалежно одна від одної, одразу після встановлення з'єднання.

Відсутня потреба очікувати на відповідь, що відправляється від іншого учасника.

Ключові переваги використання WebSocket для взаємодії в реальному часі полягають у наступному:[4]

- **Мінімальна затримка та двосторонній обмін**. WebSockets суттєво зменшують затримку при передачі інформації між клієнтом та сервером і забезпечують двосторонній обмін даними без перерв у реальному часі.

На відміну від звичайних HTTP-запитів, де клієнт завжди виступає ініціатором, а сервер реагує, протокол WebSockets відкриває можливості для безперервного двостороннього зв'язку.

Завдяки йому передача та отримання даних стає миттєвою та позбавленою зайвих затримок.

**- Ефективність та простота** WebSockets роблять процес встановлення і підтримки з'єднань неймовірно простим.

Після початкового з'єднання всі подальші обміни інформацією здійснюються через одне єдине з'єднання, що значно зменшує обсяг додаткової роботи, пов'язаної з відкриттям нового каналу зв'язку на кожен запит.

**- Безперервне з'єднання** WebSockets забезпечує безперервний потік даних між клієнтом та сервером.

Ця особливість є критичною для програм, яким необхідна блискавична реакція на події та постійне оновлення даних.

**- Оновлення через WebSockets у реальному часі** – це чудове рішення для програм, де критично важливо миттєво отримувати свіжі дані.

До цієї категорії належать чати, платформи для спільної роботи, онлайн-ігри, сервіси фінансового моніторингу, додатки для відстеження розташування та багато інших проєктів, які потребують регулярного та оперативного оновлення інформації.

**- Масштабованість** WebSockets вражає, адже вони здатні підтримувати значну кількість одночасних підключень клієнтів.

Цей протокол ідеально підходить для додатків з великою аудиторією, оскільки сервери можуть без проблем обробляти великий обсяг з'єднань, не знижуючи загальну продуктивність.

**- Архітектура, що реагує на події**, - ключовий компонент WebSocket, оскільки вона визначає механізм взаємодії.

Завдяки такому підходу, сервер сповіщає клієнт про зміни лише у випадку виникнення визначених подій.

Це виключає потребу в постійних запитах від клієнта, збільшуючи швидкість та ефективність обміну інформацією.

WebSocket реалізує засоби шифрування, зокрема SSL/TLS.

Ці інструменти забезпечують захист даних від потенційного перехоплення та змін під час передавання, тим самим гарантуючи безпеку комунікації.

Отже, WebSocket - це надзвичайно ефективний та стабільний механізм для миттєвого обміну інформацією між клієнтською та серверною сторонами.[4,7]

Він характеризується мінімальною затримкою, можливістю двостороннього спілкування, зручністю впровадження та широкою підтримкою у браузерах, що робить його чудовим вибором для розробки інтерактивних і чутливих до змін застосунків, які працюють у реальному часі, в найрізноманітніших сферах.

## 1.3 Робочі процеси хмарних обчислень GNSS

У цій системі, що поєднала можливості, Android-застосунок постає ключовим елементом.

Він виступає джерелом даних, що надходять від вбудованих у смартфон ГНСС-сенсорів, як показано на рисунку 3.

Ця програма дає змогу збирати та опрацьовувати інформацію від GNSS-датчиків, забезпечуючи дані, необхідні для визначення точного місцезнаходження в режимі реального часу.

В залежності від налаштувань системи, зібрані дані можуть бути надіслані на сервер для подальшої обробки, або збережені безпосередньо на пристрої для майбутнього аналізу.

Такий підхід гарантує злагоджений та надійний процес збору, обробки та передачі даних, що в кінцевому підсумку забезпечує високу точність позиціонування.

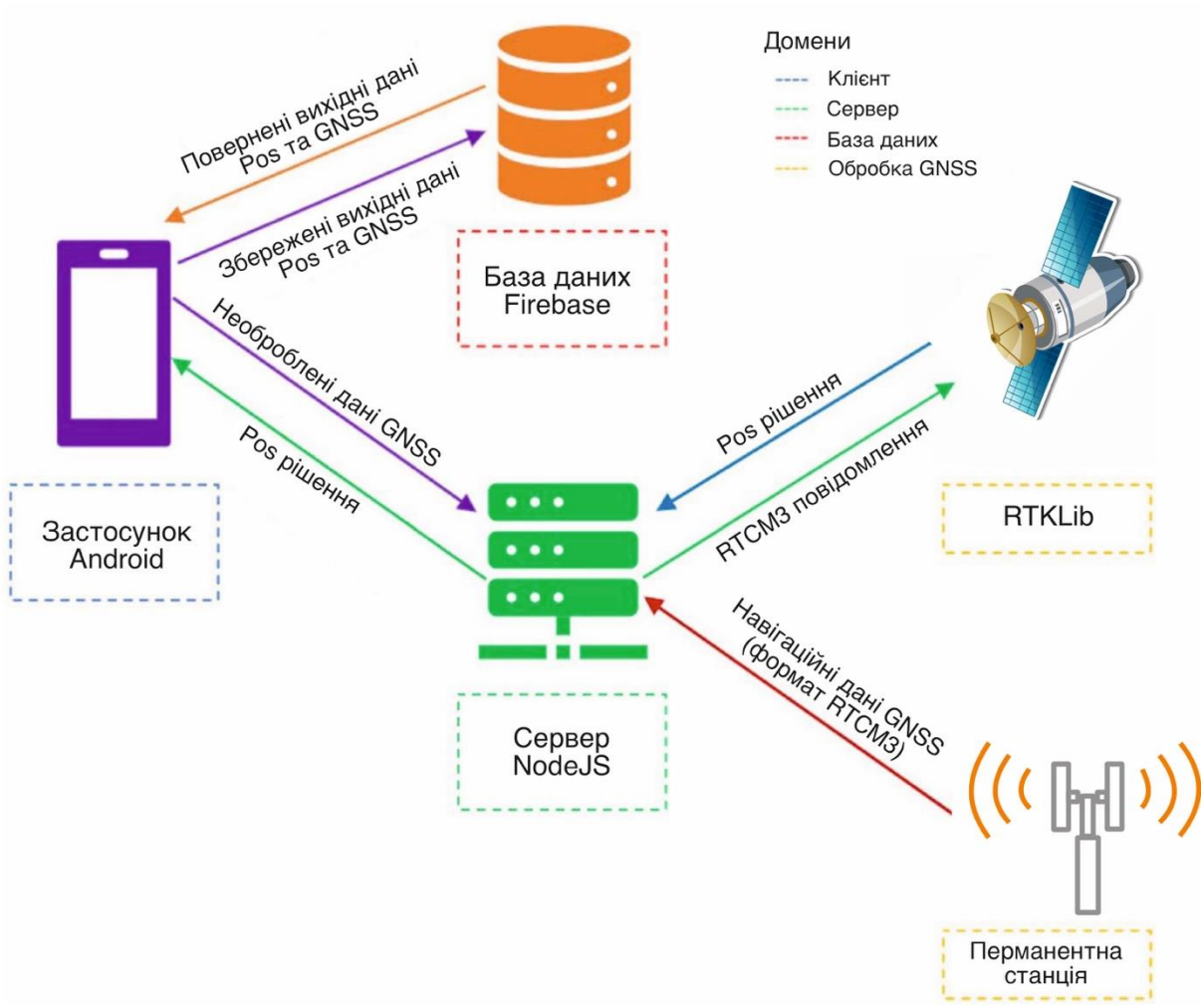



Рисунок 3 Робочі процеси на платформі хмарних обчислень

Процес базується на п'яти ключових елементах, які спільно утворюють цілісну систему для збору та обробки GNSS-даних:

1. Android-застосунок, що виступає як приймач для Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS);
2. NodeJS, що забезпечує керування процесом у реальному часі;
3. Android-застосунок, який використовує стаціонарну станцію, що займається отриманням навігаційних повідомлень.

4. Виконання розрахунків позиціонування за допомогою RTKLib
5. Firebase для управління базами даних

Android-додаток, використовуючи потенціал GNSS-сенсора телефону, збирає сирі GNSS-дані, як-от дистанції, фазу несучої частоти та доплерівські виміри, не маючи обмежень на доступ до них.[4]

Зібрані дані аплікація оперативно та ефективно пересилає на сервер, використовуючи WebSocket-підключення.

Після успішного з'єднання додаток передає на сервер команду «start», щоб ініціювати процес.

Цей сигнал повідомляє серверу про початок підготовчих дій, і програма переходить в режим підготовки, в якому вона приймає та обробляє нові GNSS-дані.

На першому кроці сервер активує RTKLib, паралельно налагоджуючи двосторонній TCP/IP зв'язок.

Також сервер створює окреме TCP/IP з'єднання з базовою станцією.

Це з'єднання функціонує у фоновому режимі та забезпечує сервер навігаційними даними у режимі реального часу.

Завдяки цьому з'єднанню сервер отримує від програми точні дані, необхідні для подальшої обробки.

Після успішного отримання GNSS-даних у "сирому" форматі, сервер приступає до важливого етапу попередньої обробки.

Йдеться про перетворення даних у формат RTCM3, який прийнято за стандарт для диференціальних GNSS-застосувань, що працюють в режимі реального часу.[4]

Цей етап є ключовим для гарантування коректності визначення місцезнаходження та подальшої обробки за допомогою RTKLib, як головного обчислювача даних в системі.

Формат RTCM3 застосовується для поліпшення точності позиціонування, використовуючи перетворення даних спостережень, навігаційних відомостей ГНСС, а також поправкових даних.

Для перетворення даних у формат RTCM3 здійснюється низка розрахунків, серед яких: псевдодальність, фаза несучої частоти, доплерівські вимірювання, час та інші параметри.

Створення GPS-часу на Android (починаючи з версії 7) не передбачає безпосереднього доступу до GNSS часу.

Втім, існує внутрішній апаратний годинник, здатний корегувати зсув від реального часу GPS, вимірюваного в наносекундах; для інших платформ, таких як ГЛОНАСС та Galileo, час GPS можна вивести, використовуючи різницю між GPS-часом та часом відповідного сузір'я.

Формування псевдовідстаней у системах Android не передбачає безпосереднього надання даних про псевдовідстані, але надаються всі компоненти, потрібні для їх розрахунку.

Псевдовідстань визначається, враховуючи часові відмінності, конкретно – різницю між часом вимірювання і передачі сигналу, та обчислюється за допомогою спеціалізованої формули 1:

$$\rho = \frac{(t_{Rx} - t_{Tx})}{1 \cdot 10^{-9}} \cdot c \qquad (1)$$

де $t_{Tx}$ - визначає зафіксований супутниковий час GNSS у місці вимірювання, або час випромінювання, що синхронізується з базовим часом GNSS, коли сигнал був відправлений.

$t_{Rx}$ - вказує на час вимірювання, тобто отриманий час, а c є константою - швидкістю світла у вакуумі.

$t_{Tx}$ - формується операційною системою Android і відображає час випромінювання, виміряний в наносекундах (нс).

Виміри фази несучої в системах Android традиційно подаються у метрах.

Вони мають двозначність, адже ці виміри не прив'язані до часу; приймач може визначити лише кількість циклів між фазами, не маючи можливості точно зафіксувати абсолютну фазу.

Тільки справжні виміри з цієї категорії беруться до уваги в процесі наших обчислень.

Доплерівський зсув, зумовлений рухом супутника, може бути оцінений за допомогою параметра псевдодальномірної швидкості, що виражається в метрах за секунду (м/с).

Це число визначається відповідно до швидкості псевдодалекоміру, що зафіксована у конкретний момент часу або в момент спостереження.

Слід звернути увагу, що доплерівське зміщення, виражене в герцах (Гц), є величиною «некоригованою», адже воно не бере до уваги поправку на різницю частот між годинниками приймача та супутника.[4]

Додатне значення «некоригованого» доплерівського зміщення засвідчує віддалення супутника від приймача, тоді як від'ємне значення показує наближення супутника.

Залежність між «некоригованим» доплерівським зсувом, «псевдодалекобійністю» та «доплерівською швидкістю» можна виразити за допомогою рівняння 2:

$$f_d = \frac{\Delta d}{\Delta t} \qquad (2)$$

де:

- $f_d$ — доплерівський зсув (в Гц),
- $\Delta d$ — зміна відстані (в метрах),
- $\Delta t$ — часова зміна (в секундах).

Це рівняння демонструє взаємозв'язок між зміною відстані між космічним апаратом та наземною станцією і доплерівським зсувом сигналу. Завдяки цьому можна оцінити відносний рух супутника та приймача, що позитивно впливає на точність визначення координат.

Слід врахувати, що отримане значення подається в герцах (Гц).

Воно є "некоригованим", оскільки не враховує відмінності в частоті тактових генераторів, що використовуються на супутнику та у приймачі.

Додатне "некориговане" значення свідчить про те, що супутник віддаляється від приймача.

Взаємозв'язок між параметрами "некориговане", "псевдодальність" та "допплерівський зсув" представлено в рівнянні 3.

$$Doppler = \frac{v_{\text{псевдо}}}{k} \qquad (3)$$

У даному рівнянні, $k$ представляє собою центральну частоту сигналу (скажімо, $f_c$ (1575,42 МГц) для L1), а c – це стала, що відповідає швидкості світла.

Після завершення попередніх обчислень, повідомлення MSM5 (Повідомлення з кількома сигналами - Тип 5), використовуючи формат RTCM3, сприяє пересиланню неопрацьованих GNSS даних до RTKLib.

Повідомлення MSM5 містить так звані показники дальності, фази несучої, вимірювання доплера, індикатори якості сигналу, а також інші критичні дані щодо супутникових вимірювань.

Дані спостережень надходять від різноманітних супутників GNSS, серед яких GPS, ГЛОНАСС, Galileo та Beidou.

З міркувань зручності, смартфони зберігають отримані рішення у текстових документах, а потім подають їх кінцевому споживачеві.[4]

Для гарантування збереження цілісності та надійності цих даних, смартфон надійно зберігає файли у базі даних Firebase, формуючи хмарне сховище для майбутнього аналізу.

Firebase - це розробницька платформа від Google, призначена для багатьох мобільних та веб-застосунків.

Вона містить багато корисних інструментів та сервісів.

Розробку значно полегшено завдяки використанню баз даних, що працюють у реальному часі, механізмам автентифікації, хмарним функціям та хостингу.

Firebase славиться легкістю освоєння, здатністю до масштабування та блискучою сумісністю з рештою сервісів Google.

Це робить її бажаним інструментом для розробників, які працюють над додатками будь-яких масштабів, і заслужено здобула визнання.

Отже, база даних Firebase забезпечує зручне зберігання та управління даними про позиціонування, обробленими за допомогою RTKLib та на основі сирих GNSS-даних.[4,6]

## 1.4 Затримка сигналу

Затримка сигналу - ключовий момент у розробці та застосуванні технологій, що працюють в режимі реального часу.

Адже вона значно впливає на точність визначення координат в GNSS-системах.

Причин затримок може бути безліч.

Наприклад, застаріла інформація про розташування супутників (ефемериди), а також обмежені можливості каналів зв'язку, що використовуються для передачі даних, і ресурсів сервера для їх обробки.

Основна мета статичних випробувань полягала у вивченні, як тривалі затримки впливають на надійність визначення координат при нормальних умовах експлуатації GNSS-системи.

Тестування продемонструвало, що для тривалих вимірювань, де зміни позиції відбуваються рідко, застарілі ефемериди здатні відчутно зменшити точність та збільшити похибки у кінцевих координатах.

Водночас, кінематичні випробування показали, що в динамічних умовах, де позиціонування потребує постійного оновлення, навіть короткочасні затримки здатні призвести до помітних змін у точності позиціонування.

Це було особливо виразно під час відстеження переміщень пішоходів.

Під час переміщення пішоходів важливо, щоб дані про їхнє місцезнаходження оновлювалися оперативно, оскільки затримки в надходженні інформації можуть впливати на здатність швидко приймати рішення, які є ключовими для точної навігації.

Наукові дослідження продемонстрували, що негативний вплив затримок можна суттєво зменшити шляхом застосування алгоритмів корекції, що оптимізують мінімізацію похибок під час передавання даних.

Ці алгоритмічні покращення відкривають перспективи створення більш точних і надійних систем визначення місця розташування, призначених для широкого спектру практичного застосування, зокрема в мобільних навігаційних додатках і хмарних сервісах GNSS.

Окрім того, скоріші та стійкіші засоби сполучення, а також вдосконалена обробка інформації здатні суттєво знизити час затримки та підвищити загальну точність визначення місця розташування.

Ці дані є надзвичайно значущими для подальшого прогресу та покращення технології GNSS та сприяють її впровадженню у реальні сценарії використання, де точність і швидкість розв'язання є першорядними,

як-от навігаційні програми для безпілотного транспорту, геодезичні дослідження та мобільні пристрої.

## 2. Додаток GEA для виконання дослідження

У цьому розділі подано вичерпний звіт про польові випробування, що мали на меті оцінити ефективність роботи застосунку, а також його адаптивність до реалій експлуатації.

Дослідження охоплювали всебічне дослідження дизайну, функціональних можливостей та взаємодії користувача з програмним забезпеченням в умовах, максимально наближених до реальних.

Ключовим завданням було з'ясувати, як саме додаток функціонує при моделюванні різних життєвих ситуацій, зокрема: переривчастий супутниковий зв'язок, проблеми з затримками в передачі даних та зміни місця розташування користувача.

Зокрема, було зосереджено увагу на аналізі часу реакції інтерфейсу на введення інформації від користувача, коректності результатів визначення місцезнаходження в режимі реального часу, а також на загальній продуктивності програми у процесі обробки даних GNSS.[4]

Тестування програми охоплювало різноманітні сценарії, серед яких були статичні спостереження в умовах слабкого сигналу та кінематичні випробування, що імітували рух як у міській забудові, так і на відкритій місцевості.

Це дало можливість зібрати всебічні дані щодо поведінки програми за різних умов експлуатації та визначити способи забезпечення стабільної точності позиціонування в умовах навколишнього середовища, які варіюються.

Додатково, було приділено значну увагу перевірці зручності користування інтерфейсом, включаючи простоту використання, подання ключової інформації та інтуїтивність переходу між функціями додатка.

Це дало можливість визначити, наскільки зручний додаток для людей у повсякденному використанні та наскільки легко можна витягти інформацію для наступного дослідження.

Вивчення результатів експериментів дозволяє сформулювати значущі висновки, котрі можуть бути застосовані для подальшого підвищення продуктивності та ефективності застосунку в майбутньому.

## 2.1 Інтерфейс програми

На рисунках 4 та 5 можна побачити ключові елементи інтерфейсу програми під час її роботи в режимі реального часу.[4]

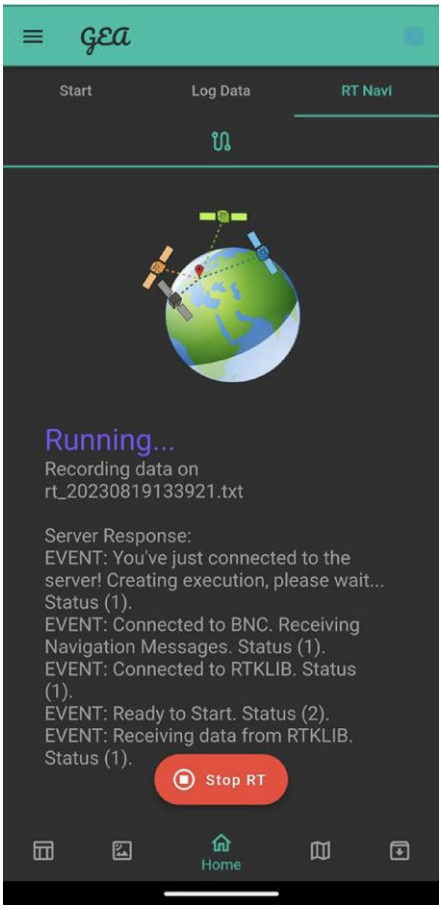



Рисунок 4 Приклади інтерфейсу 1

Ці візуальні матеріали дають наочне уявлення про будову інтерфейсу і демонструють, яким чином візуалізуються дані позиціювання та супутні ключові показники, як-от точність сигналу, статус з'єднання з сервером, а також дані про супутники.

На рис.4 зображено головний екран програми, де користувач має змогу спостерігати за поточним місцезнаходженням та отримувати додаткові відомості, зокрема навігаційні повідомлення і стан з'єднання з сервером.

Завдяки цьому користувач має можливість моніторити якість сигналу у режимі реального часу та вживати відповідних заходів у разі потреби.

На рис. 5 показано розширений інтерфейс, який надає глибшу інформацію про GNSS дані, зокрема відображення псевдодальностей супутників, фази несучої частоти та доплерівських вимірювань.[4]

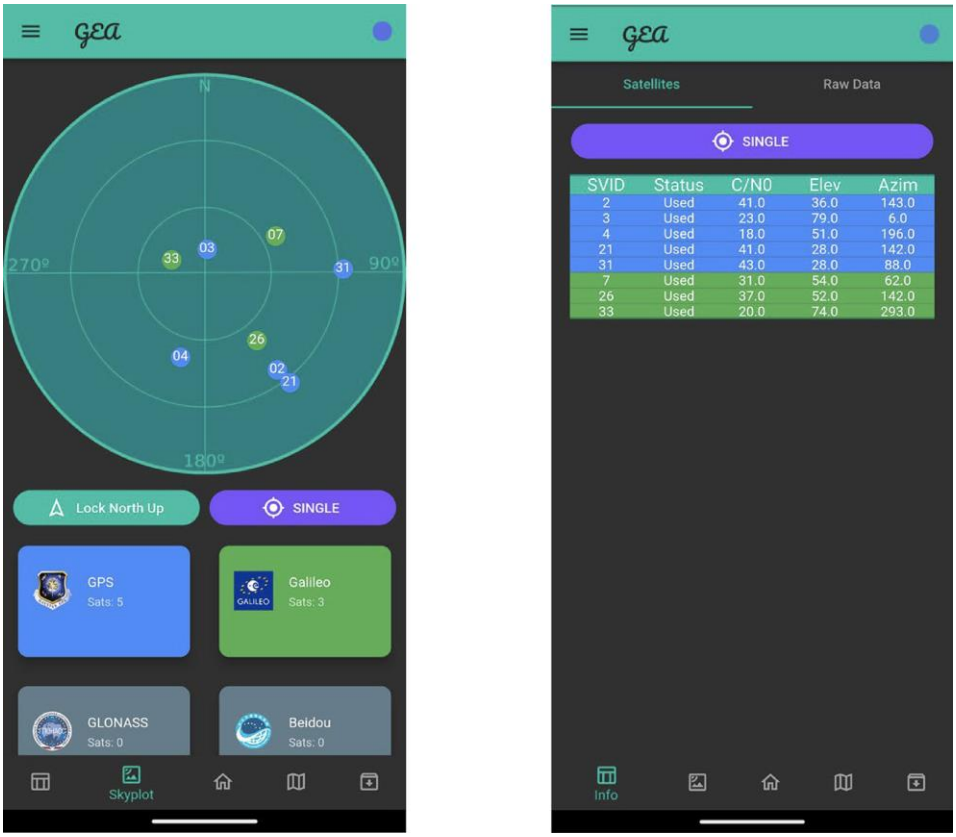



Рисунок 5 Приклади інтерфейсу 2

Ці екрани дають можливість користувачам глибше усвідомлювати перебіг обробки інформації, а також вносити необхідні виправлення з максимальною точністю, якщо це буде потрібно.

Компоненти інтерфейсу, у свою чергу, реалізовують взаємодію з користувачем в режимі, наближеному до реального часу, що сприяє ефективному контролю та моніторингу процесу позиціонування.

Вкладка "Запуск в реальному часі" представляє актуальний стан програми у режимі реального часу, відображаючи зокрема й стан з’єднання із сервером.

Така візуалізація дозволяє користувачам перевірити активність процесу передачі даних та загалом контролювати поточний стан функціонуючої системи.

Вкладка "Карта" надає користувачу наочне уявлення про позиції, що надходять у режимі реального часу в результаті обробки даних GNSS.

Тут користувач здатен відстежувати миттєві дані про власне позиціювання, розуміючи водночас наскільки воно є точним та вірогідним.

Вкладка "Небесна карта" (Skyplot) демонструє розташування космічних супутників на небосхилі, що є ключовим аспектом процесу визначення місця знаходження.[4,6]

Це дає можливість користувачу бачити, які супутники використовуються в процесі обчислення, і чи можливо на основі цього отримати коректні координати.

Вкладка "Інформація" містить детальні відомості про супутник в табличній формі, зокрема кут висоти, азимут і співвідношення несучої до шуму (C/No).

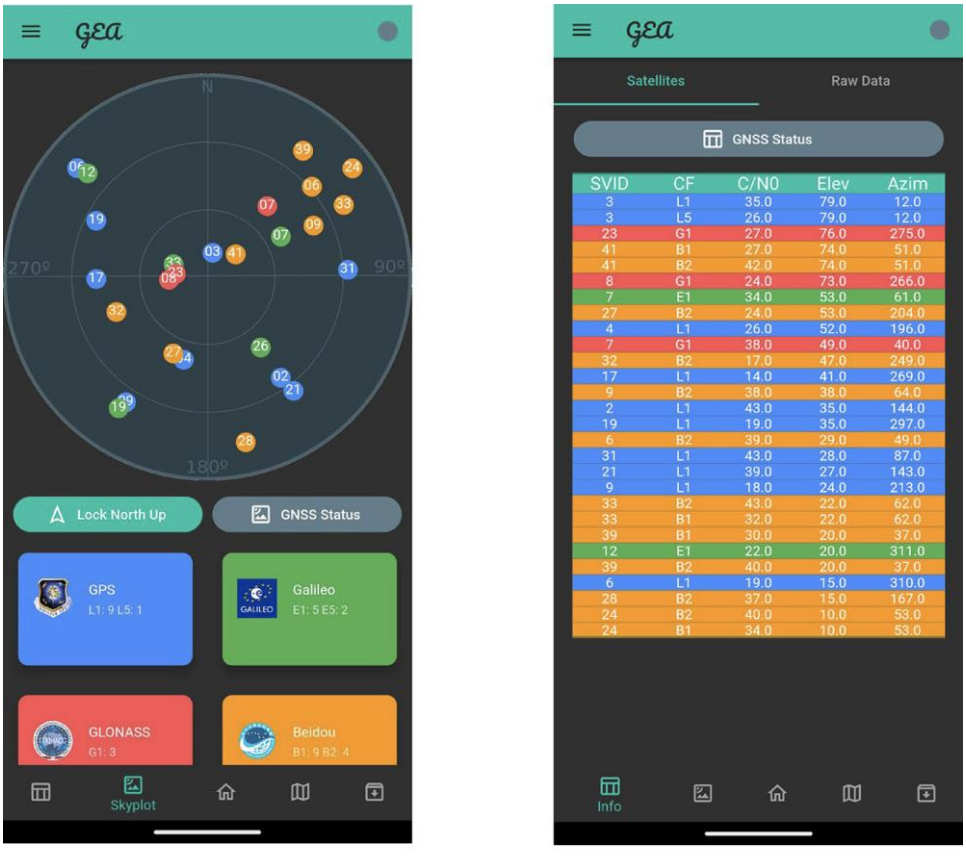
Ці відомості є помічними для користувача у визначенні якості сигналу, що дає можливість зрозуміти, чи є достатньо супутників для точного визначення позиції.

Після отримання рішення щодо позиціонування, додаток зберігає зібрану інформацію в архіві, забезпечуючи доступ до неї для подальшого аналізу безпосередньо в програмному забезпеченні.

Коли поточне відтворення вимкнено, або дані збираються в режимі ведення журналу, інформація про супутники, отримана з GNSSStatus Android API, виводиться на вкладках "Skyplot" та "Інформація".

Через цей інтерфейс користувач отримує детальні відомості, такі як кут піднесення супутника, його азимут та показник співвідношення потужності несучої до рівня шуму.

Як видно на рисунку 6, дана функціональність дає користувачам можливість здійснити попередній аналіз видимості супутників перед тим, як проводити спостереження в реальному часі, що в сукупності підвищує точність визначення місця розташування.[4]




(a) (b)

Рисунок 6. Вкладка Skyplot з інформацією про стан GNSS

Використання Google Pixel 8 Pro для тестування надає можливість не лише точно фіксувати відомості про доступність супутників, але й дослідити, як пристрій працює з різними навігаційними системами, наприклад, чи здатен приймати сигнали на двох частотах.

Відсутність апаратних перешкод для зчитування даних з GNSS-датчика смартфону сприяє проведенню детальнішого аналізу, включно з перевіркою моделей спостереження за супутниками та точності зібраних даних.

Google Pixel 8 Pro має інтерфейс, що без проблем взаємодіє з застосунками, які використовують дані GNSS, гарантуючи точне визначення місцезнаходження та властивості сигналу.

Відмінна якість сенсорів разом із підтримкою різноманітних супутникових систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou) перетворюють цей пристрій на потужний інструмент для дослідів GNSS.

Завдяки цьому є можливість оцінити результативність запропонованого рішення в реальному середовищі та провести порівняння з наявними технологіями.

## 3. Результати дослідження

Польові дослідження були спрямовані на визначення функціональності хмарної платформи для опрацювання інформації ГНСС в умовах, максимально наближених до реальних, особливо щодо її можливості оперувати з даними в різних навколишніх обставинах.

Дослідження організовувалися як на територіях з незначною рослинністю, щоб мінімізувати вплив природних перешкод на коректність сигналу, так і на ділянках з висадженими рослинами, які можуть призводити до тимчасових затримок та викривлень при прийнятті сигналів від супутників.

Головним завданням цього тесту була оцінка ефективності алгоритмів визначення місцезнаходження.

Крім того, ми перевіряли, наскільки добре хмарна інфраструктура здатна оперативно обробляти значні масиви інформації, забезпечуючи швидкий доступ до результатів розрахунків та їх зберігання для подальшого дослідження.

Також цей тест надав можливість оцінити, як хмарне рішення справлятиметься з даними GNSS в різних умовах прийому сигналу, враховуючи вплив навколишнього середовища.[4]

Рисунок 7 Район дослідження.

На малюнку 7 представлено зону дослідження, яка охоплює території з різним рослинним шаром, зокрема з наявністю дерев, котрі потенційно можуть впливати на якість сигналу ГНСС.

Також на рисунку відображено маршрути, прокладені вздовж різних типів місцевості, серед яких ділянки з незначною рослинністю та регулярним обробітком землі.

Це дає змогу оцінити ефективність системи за різних обставин.

У таблиці 1 представлено детальний огляд технічних особливостей GNSS-приймача, інтегрованого у смартфон Google Pixel 8 Pro, котрий служив ключовим засобом для збору інформації.

У таблиці 2 міститься опис технічних параметрів додаткового обладнання та програмного забезпечення, застосованого для обробки та архівування даних у хмарному середовищі.

Таблиця 1. Технічні специфікації обладнання

| **Пристрій** | **Версія програмного забезпечення** | **Псевдовіддалі** | **ADRM** | **Системи GNSS** | **Мережа** |
|---|---|---|---|---|---|
| Google Pixel 8 Pro | Android 13 | так | так | GPS<br>GAL<br>GLO<br>BDS | Vadafone 4G |

Таблиця 2 Конфігурація RTKLib

| **Опції** | **Параметри** |
|---|---|
| Режим позиціонування | Одиночний |
| Частоти | L1 |
| Маска висоти | $15^0$ |
| Корекція іоносфери | Трансляція |
| Корекція тропосфери | Систематично |
| Ефемериди/Годинник | Трансляція |
| Системи GNSS | GPS, GAL, GLO, BDS |

Визначення маршрутів відбулося з певним умислом, аби створити сприятливі тестові середовища, зокрема для вивчення впливу дисперсії супутникових сигналів на кінцеву точність позиціонування в умовах, максимально наближених до реальності.

Задля спрощення візуалізації результатів на картографічному інтерфейсі було обрано наперед задані траєкторії руху.

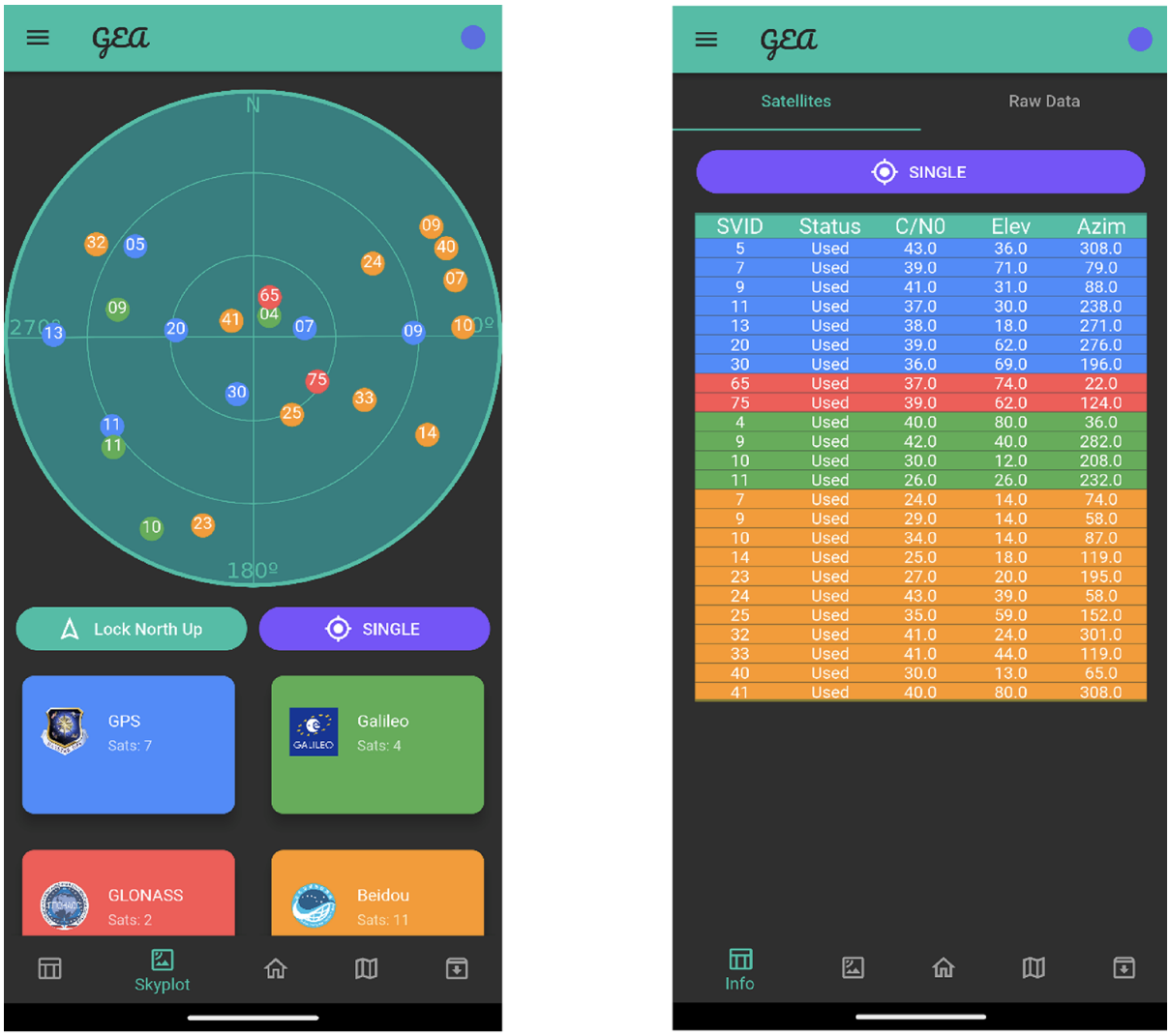
Це дало змогу акумулювати багатший масив даних, необхідний для поглибленого дослідження та всебічного аналізу.

В ході випробувань було зроблено серію знімків екрану (скріншотів), щоб зафіксувати позицію супутникового угруповання на різних відтинках тестових шляхів.

Це дозволило мати чітке уявлення про конфігурації супутників, які брали участь в розрахунках позиції.

Як ілюструють рисунки 8а та 8б, на скріншотах демонструється інформація про стан супутникового угруповання, сформована RTKLib в режимі реального часу у вигляді повідомлень.[4]

Ці повідомлення, котрі миттєво відображаються на екрані, оновлюються з кожною новою епохою, забезпечуючи користувачеві можливість точно спостерігати за змінами в навігаційній картині.




(a) (b)

Рисунок 8 Статус супутника

Як відображено на вкладці "Небосхил", розташування супутників у небі під час випробування було зображено графічно, що дало змогу візуально оцінити силу сигналу та ефективність супутників у процесі визначення позиції.

Візуалізація супутників на вкладці "Небосхил" демонструє, що всі задіяні супутники відповідали вимозі щодо кута піднесення 15 градусів і вище, згідно з налаштуваннями системи.

Такий підхід гарантує надійне й точне збирання даних, необхідних для обчислення місцезнаходження.

Вкладка "Інформація" містить розширений аналіз супутників, відображаючи відношення дрейфу до шуму, та засвідчує, що сила сигналу більшості з них відповідає нормі.

Завдяки цьому користувач має змогу чітко визначити якість сигналу кожного окремого супутника, що дозволяє зробити висновок щодо вірогідності отримання точних даних позиціонування.

Після завершення тестової процедури були зроблені знімки екрану вкладки "Карта", що ілюструють кінцеві результати позиціонування, для подальшого аналізу.

На рисунках 9a та 9b видно, що отримані дані позиціонування відповідають заявленим вимогам, підтверджуючи здатність системи точно визначати положення в реальних умовах.[4], [7]

Рисунок 9 Рішення для позиціонування.

a) Вкладка "Мапа" демонструє позицію на шарі мапи, надаючи можливість оцінити коректність визначення місцезнаходження на загальному картографічному полотні.

d) Вкладка "Тестова точка" відображає місцезнаходження тестової точки на шарі мапи, що дозволяє проаналізувати точність тестової точки на загальній карті.

Вихідна та фінальна точки тесту позначені синіми мітками в нижній частині мапи, що сприяє виявленню критичних вузлів тесту.

Скупчення точок в цій області пояснюється нетривалою зупинкою смартфону під час етапу ініціалізації, в результаті чого початкова точка демонструє більшу похибку.

Після завершення ініціалізації відбувається подальший рух проти годинникової стрілки, що візуально фіксується на обох мапових вкладках.

Проте, на фінальному відрізку шляху визначення позиції продемонструвало більшу погрішність.

Ймовірно, це спричинено підвищеною густотою дерев, що негативно впливає на якість приймаємого сигналу.[4]

На відміну від цього, на ділянках з відкритим небом спостерігається менший рівень помилок.

Це пояснюється зменшенням перешкод для супутникового сигналу, який демонструє стабільність без значних відхилень, що свідчить про більш точне позиціювання.

Щоб отримати максимально точну картину, аналогічні траєкторії були згенеровані у постоброблювальному сценарії, використовуючи дані, що зберігалися в архіві.

Це надало нам можливість сформувати еталонний набір даних, з яким ми могли зіставити результати, отримані в процесі реального часу.

Шляхом зіставлення даних, отриманих безпосередньо та після постобробки, можна було виявити потенційні розбіжності, як наприклад, затримки передачі чи втрата даних.

Постобробка виконувалась за допомогою тієї ж версії RTKLib, використовуючи ті самі налаштування обробки, що зазначені в Таблиці 2.

Це гарантувало відповідність і коректність зіставлень.

Ключова відмінність між даними з реального часу та післяобробки полягає у кількості точок: 493 точки проти 468 відповідно.

Таку різницю можна пояснити більш суворою фільтрацією, застосованою в процесі післяобробки, яка відсіює точки, які неможливо точно ідентифікувати.

Як демонструють рисунки 10a та 10b, порівняльний аналіз обох рішень показує невідповідність траєкторій, що свідчить про те, що більш суворий фільтр, застосований під час післяобробки, призводить до більшої похибки у відфільтрованих точках.[4]

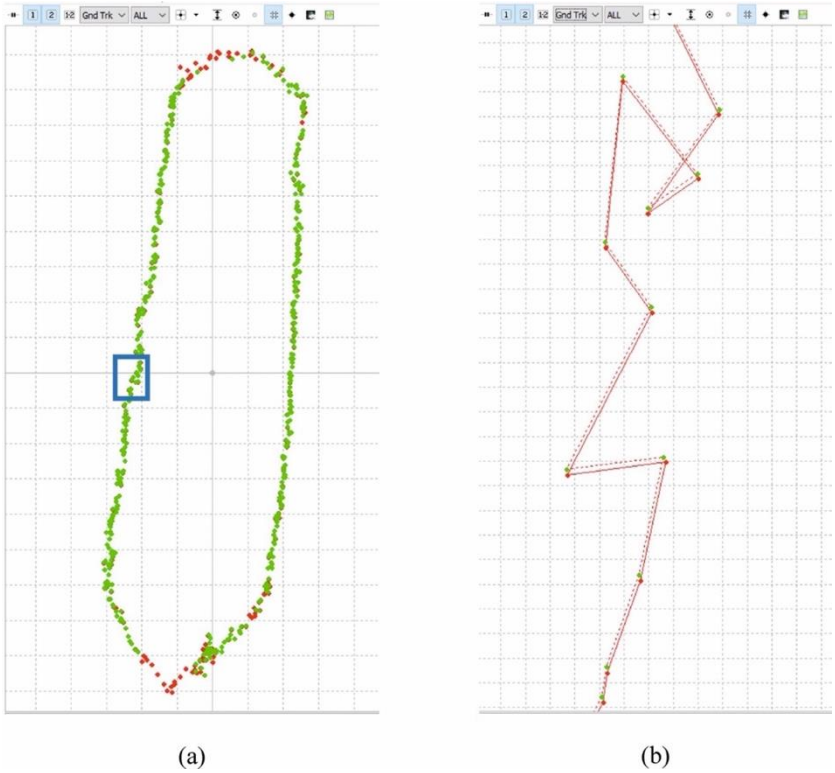



Рисунок 10 Порівняння позиційного рішення

На малюнку 10a демонструється зіставлення даних у режимі реального часу, виділених червоним, та оброблених даних, позначених зеленим.

Це дає змогу наочно побачити різницю між результатами визначення місцезнаходження, отриманими безпосередньо, та тими, що були скориговані після постобробки.

На малюнку 10b представлено схему певної території, де акцентується увага на розбіжностях між позиціями, визначеними в режимі реального часу, і контрольними точками.

У таблиці 3 представлено статистичний аналіз, який показує відмінності між даними, обробленими у режимі реального часу, та результатами після обробки.

Ця таблиця містить інформацію про компоненти позиціонування, зокрема E (довгота), N (широта) та величини стандартних відхилень.

Це дає змогу глибше оцінити точність кожного компонента, порівнюючи його з еталонним значенням.

Аналіз починається з моменту отримання рішення у реальному часі, що дозволяє зіставляти отримані дані з іншими, щоб виявити розбіжності у визначенні положення відносно N-кадру.

Таблиця 3 Статистика розбіжностей між розв’язками у реальному часі та постобробкою

| **Параметр** | **$d_{пд}$** | **$d_{пн}$** | **Середнє** |
|---|---|---|---|
| Максимум | 0.0023 | 0.0042 | 0.2465 |
| Мінімум | 0.0001 | 0.0005 | 0.0003 |
| Стандартне відхилення | 0.0003 | 0.0003 | 0.0423 |
| Середнє | 0.0010 | 0.0020 | 0.0552 |
| Медіана | 0.0008 | 0.0021 | 0.0482 |

Статистичні дані, здобуті під час випробувань, було обчислено, враховуючи періоди, коли було зафіксовано рішення про позицію, як у режимі реального часу, так і після обробки даних.

Отримані результати демонструють, що навіть у найменш сприятливих обставинах погрішність не перевищує 30 сантиметрів, а середнє квадратичне відхилення фіксується приблизно на рівні ±5 см.

Зважаючи на те, що розбіжність між розрахунками в реальному часі та фінальним результатом обробки коливається біля 2 см по горизонталі та до 5 см по вертикалі, зазначені показники цілком задовільні.

Застосований підхід продемонстрував свою працездатність: всі етапи пройшли без будь-яких перешкод.

У процесі тестування не було зафіксовано проблем зі встановленням з'єднання; похибки позиціонування, спричинені затримками, були незначними, а будь-які помітні перебої чи стрибки – відсутні.

Більше того, втрата даних при передачі на сервер відсутня, що свідчить про надійність процесу.

Усі дані, сформовані RTKLib, безперешкодно передано між сервером та додатком, а також успішно створено записи у базі даних.

## Висновки

У нашому бакалаврському проєкті було застосовано комплексну систему, де мобільний додаток без проблем комунікував з GNSS-сенсорами пристрою, здійснюючи захоплення потрібних даних, включаючи псевдодальності, фази несучої частоти та доплерівські вимірювання.

Запуск операції реалізовувався через WebSocket-підключення до спеціалізованого серверу, що виступав як ефективний канал передачі інформації.

Роботу сервера було налагоджено на основі RTKLib, програмного забезпечення, яке обробляло супутникові дані та формувало точні рішення щодо визначення позиції.

Необроблені GNSS-дані перетворюються на формат RTCM3 задля подальшої їхньої обробки, а одержані результати надсилаються в додаток для накопичення та наступного вивчення.

Важливою складовою системи є база даних Firebase, котра забезпечує непорушність та вірогідність збережених відомостей, а також формує хмарне сховище для подальшої роботи з отриманими результатами.

Об'єднуючи мобільні технології, зв'язок у реальному часі, хмарні обчислення і зберігання даних, система надає широкі перспективи для розробки додатків GNSS-позиціонування, котрі можуть бути задіяні для наукових розвідок, таких як аналіз іоносферних, тропосферних та інших атмосферних проявів.

Окрім вищесказаного, цей програмний продукт здатен служити фундаментом для розбудови концепції «розумного міста».

Універсальність та великий функціонал дають змогу інтегрувати його у різноманітні сфери, наприклад, для автоматизації ведення земельного реєстру, створення картографічних матеріалів, а також для проектування та апробації нових рішень з метою покращення точності навігаційних систем.

## Список використаних джерел


1. Бакалаврська робота. Методичні вказівки. За ред. проф. Полянської А. С., доц. Станьковської І.М., доц. Вербовської Л. С. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. 42 с.

2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання / Нац. Стандарт України. Вид. офіц. [Уведено вперше ; чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

3. 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).

4. Hernández Olcina, J., Anquela Julián, A.B. & Martín Furones, Á.E. Real-time cloud computing of GNSS measurements from smartphones and mobile devices for enhanced positioning and navigation. *GPS Solut* **28**, 167 (2024). https://doi.org/10.1007/s10291-024-01705-8

5. Banville S, Van Diggelen F (2016) Точна ГНСС для всіх: точне позиціонування з використанням необроблених GPS-вимірювань зі смартфонів Android. GPS World 27(11):43–48

6. Dutta D, Mahato S, Raja S, Ganguli S, Verma S, Bose A (2020) Смартфони Android для досліджень ГНСС у середовищі з кількома сузір'ями. У: Національна конференція з нових тенденцій у сфері стійких технологій та інженерних застосувань, Дургапур, с. 7–8.

7. García-Molina JA, Parro JM (2017) Хмарна обробка розподілених приймачів можливостей ГНСС: методи, застосування та стратегії збору даних. У: 6-й міжнародний колоквіум з наукових та фундаментальних аспектів ГНСС/Galileo. Іспанія, 25–27 жовтня 2017 року

**БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА**

Тема бакалаврської роботи:

**« Дослідження визначення координат точок у RTK режимі із декількох GNSS систем використовуючи Android-додаток».**

Обсяг пояснювальної записки: ____ аркуша.

_____рік _____

(дата) (підпис студента)