

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та
інфраструктури
Кафедра економічної експертизи та землевпорядкування

КРИВОШЛИК Вікторія Андріївна
Застосування супутникових навігаційних систем для
визначення координат на місцевості / Use of satellite
navigation systems for the ground coordinates determination
спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
освітньо-професійна програма - Експертна оцінка землі та нерухомого
майна

Кваліфікаційна робота

Виконала студентка групи
ГЕОЗ-41 В. А. Кривошлик

Науковий керівник:
к.т.н., Ю. О. Лук'янченко

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

«___» _____ 20___ р.

Завідувач кафедри

_____ Б. О. Язлюк

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОПИС ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ: GPS, GALILEO, BEIDOU ТА ІНШІ

1.1 Глобальна система позиціонування (GPS)

1.2 Європейська навігаційна система Galileo

1.3 Азійська навігаційна система BeiDou

1.4 Навігаційна система ГЛОНАСС

1.5 Інші супутникові системи та доповнюючі технології

Висновки до розділу 1

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ GPS ЗНІМАННЯ - СТАТИЧНИЙ ТА RTK

2.1 Метод RTK (Real-Time Kinematic)

2.2 Статичний метод GPS-знімання

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ЗНІМАННЯ ПРИ ЗЕМЛЕВПОРЯДНИХ РОБОТАХ (РЕЖИМИ ЗНІМАННЯ В RTK МЕТОДІ)

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4. GNSS-ПРИЙМАЧ GALAXY G1 У РЕЖИМАХ RTK І СТАТИКИ: ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

Висновки до розділу 4

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BeiDou – супутникова навігаційна система

CORS – continuously operating reference stations – постійно діючі референсні станції

EGNOS – європейська система супутникового покращення точності

FIX – фіксоване рішення у RTK-зніманні

FIXED – режим фіксованого рішення в RTK

FLOAT – нефіксоване (плаваюче) рішення у RTK-зніманні

Galileo – європейська глобальна навігаційна система

ГЛОНАСС – глобальна навігаційна супутникова система

ГНСС (GNSS) – глобальна навігаційна супутникова система

GPS – Global Positioning System – глобальна система місцевизначення

IoT-платформа – інтернет речей – цифрова система для взаємодії пристроїв у мережі

NavIC – індійська регіональна навігаційна система

NTRIP – networked transport of RTCM via internet protocol – протокол передавання поправок через Інтернет

ПЗ – програмне забезпечення

ПЗС – мережа постійно діючих станцій

PPP – precise point positioning – метод високоточного позиціювання

QZSS – японська регіональна навігаційна система

RINEX – receiver independent exchange format – універсальний формат зберігання супутникових вимірювань

RTK – real-time kinematic – метод кінематичного позиціювання в реальному часі

SBAS – супутникова система диференційних поправок

Stop&Go – режим роботи GNSS-приймача з періодичними зупинками

Trimble Business Center – програмне забезпечення для обробки GNSS-даних

VRS – virtual reference station – віртуальна базова станція

WAAS – американська система супутникового підвищення точності

ВСТУП

Актуальність теми. Традиційні методи геодезичних знімань поступово поступаються місцем сучасним супутниковим технологіям, які дозволяють швидко й точно визначати координати у різноманітних умовах. Вивчення та правильне застосування методів знімання, таких як RTK та статичний, а також розуміння специфіки різних GNSS-систем (GPS, Galileo, BeiDou, ГЛОНАСС) є важливою складовою підготовки інженера-геодезиста. Особливої актуальності ці питання набувають у контексті землевпорядних робіт, де точність визначення меж земельних ділянок безпосередньо впливає на юридичну та економічну складову процесу.

Метою роботи є аналіз можливостей застосування сучасних супутникових навігаційних систем для визначення координат на місцевості з акцентом на їх практичне використання під час виконання землевпорядних робіт.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. характеристика основних глобальних навігаційних супутникових систем, розкриття принципів їх роботи та переваги у використанні;
2. аналіз методів GPS-знімання, зокрема RTK та статичний метод, їхні переваги, обмеження й сфери застосування;
3. дослідження режимів роботи в RTK-зніманні та їхню ефективність у польових умовах;
4. оцінка особливостей використання GNSS-приймачів у практиці землевпорядних робіт, з урахуванням різних технічних, природних та організаційних факторів.

Об'єктом дослідження є технології визначення координат на місцевості за допомогою супутникових навігаційних систем.

Предметом дослідження виступають технічні характеристики та функціональні можливості GNSS-систем, а також методи їх застосування для отримання високоточної просторової інформації у процесі землевпорядних

робіт.

Наукова новизна цієї роботи полягає в системному аналізі можливостей використання сучасних супутникових навігаційних технологій у землепорядній діяльності з урахуванням технічного розвитку в цій галузі. У дослідженні на основі практичного використання GNSS-приймача Galaxy G1 проведено порівняння ефективності різних режимів RTK-знімання в реальних умовах. Це дало змогу визначити найбільш доцільні параметри роботи обладнання для точного визначення координат. Також у роботі розглянуто переваги одночасного використання кількох супутникових систем (GPS, Galileo, BeiDou, ГЛОНАСС), що позитивно впливає на точність позиціонування. Окрему увагу приділено практичним рекомендаціям щодо підвищення ефективності геодезичних вимірювань з урахуванням технічних характеристик приладів і впливу зовнішніх умов.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості використання матеріалів дипломної роботи для підвищення ефективності виконання геодезичних вимірювань у сфері землеустрою. Висновки та рекомендації, сформовані на основі аналізу роботи GNSS-приймачів у різних режимах, можуть бути корисними як для початківців, так і для досвідчених фахівців, що працюють із супутниковим обладнанням у польових умовах. Запропоновані підходи сприятимуть зменшенню похибок, економії часу та ресурсів під час знімальних робіт, а також полегшать ухвалення точних управлінських рішень на основі просторових даних.

РОЗДІЛ 1. ОПИС ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ: GPS, GALILEO, BEIDOU ТА ІНШІ

1.1 Глобальна система позиціонування (GPS)

Глобальна система позиціонування (GPS) – це технологія, яка дозволяє точно визначати місцезнаходження об'єктів на поверхні Землі в будь-який час доби та за будь-яких погодних умов. Базується на мережі супутників і приймальних пристроїв, які працюють разом для обчислення координат у реальному часі. Вона є частиною ширшої системи – Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), яка включає також європейську Galileo, ГЛОНАСС та BeiDou [4], [5], [14], [30].

GPS базується на трьох основних компонентах:

1. Космічний сегмент – це сузір'я з 31–32 супутників, що обертаються навколо Землі на висоті приблизно 20 200 км. Вони розташовані в шести орбітальних площинах під кутом 55° до екватора й здійснюють повний оберт навколо планети кожні 12 годин [4], [26].

2. Контрольний сегмент – мережа наземних станцій по всьому світу. Вони контролюють орбіти супутників, точність сигналів і координат, а також коригують дані у разі відхилень [1], [4].

3. Сегмент користувачів – це приймачі GPS, які можна знайти у смартфонах, автомобілях, кораблях, літаках тощо. Приймач обробляє сигнали від щонайменше чотирьох супутників, щоб обчислити своє місце розташування за допомогою методу трилатерації. «Принцип трилатерації полягає в тому, що місцезнаходження визначається шляхом перетину сфер радіусів сигналів кількох супутників» [4].

Найточніші GPS-приймачі можуть визначати координати з точністю до кількох сантиметрів, а в деяких випадках навіть до міліметра. Крім того, GPS забезпечує надточний час – із похибкою до 10 наносекунд [3], [4].

GPS є важливим інструментом у численних галузях:

1. Транспорт і навігація. У повсякденному житті GPS допомагає водіям орієнтуватися на місцевості: «GPS-приймач наносить місцезнаходження автомобіля на електронну карту, що дозволяє точно прокладати маршрут» [4]. Його також активно використовують в авіації, морських перевезеннях, залізничному транспорті та навіть у космічних апаратах [1].

2. Наука і моніторинг природних явищ. Геологи застосовують GPS для вимірювання зсувів ґрунту та визначення сили землетрусів. Наприклад, «GPS-датчики, закріплені в землі, дозволяють обчислити силу підземного поштовху протягом 15 хвилин після події» [1].

3. Безпека та надзвичайні ситуації. Одне з найважливіших застосувань GPS – це попередження про цунамі. Вимірюючи переміщення земної кори, система може оцінити ризик утворення руйнівних хвиль [9].

4. Екологія та зоологія. Дослідники використовують GPS для відстеження міграції диких тварин – від китів до птахів. «Супутникове стеження дозволяє з'ясувати маршрути пересування тварин і вивчити зміни в їхній поведінці» [13].

5. Сільське господарство та будівництво. У точному землеробстві GPS використовується для оптимізації посівів, зрошення та збору врожаю, а в будівництві – для точного розташування елементів інфраструктури [1].

Незважаючи на високу точність, на сигнали GPS можуть впливати зовнішні фактори:

1. Атмосферні явища (іоносфера й тропосфера);
2. Фізичні перешкоди (високі будівлі, щільні ліси);
3. Відхилення орбіт супутників, спричинені гравітаційними впливами;
4. Багатошляховість сигналу, коли він відбивається від поверхонь перед досягненням приймача [4].

Саме тому контрольні станції регулярно відстежують стан супутників і надсилають виправлення, що суттєво підвищує точність визначення координат [1].

Система постійно вдосконалюється. Нове покоління супутників GPS III забезпечує більшу точність, стійкість до перешкод і сумісність з іншими глобальними системами. У перспективі очікується глибша інтеграція GPS із технологіями штучного інтелекту, доповненої реальності, автономного транспорту та Інтернету речей (IoT) [2], [26].

1.2 Європейська навігаційна система Galileo

У сучасному світі, де точність визначення місцезнаходження та часу має вирішальне значення, система Galileo, ініційована Європейським Союзом та Європейським космічним агентством (ESA), стала надійною альтернативою іншим глобальним навігаційним системам. На відміну від американської GPS та азійської ГЛОНАСС, Galileo перебуває під цивільним контролем, що гарантує незалежність та безпеку користувачів [30].

Космічний сегмент системи складається із сузір'я з 28 супутників, розміщених на середній навколоземній орбіті на висоті приблизно 23 222 км. Вони рівномірно розподілені по трьох орбітальних площинах, нахилених під кутом 56° до екватора, що забезпечує повне глобальне покриття. Кожен супутник здійснює оберт навколо Землі приблизно за 14 годин, гарантуючи постійну доступність сигналу для користувачів у будь-якій точці світу [30], [31].

Контрольний сегмент, або сегмент управління, включає розгалужену мережу наземних станцій, які відповідають за моніторинг і управління супутниками. Його основу становлять два центри управління місією – в Оберпфаффенгофені (Німеччина) та Фучіно (Італія). Крім них, до складу входять Європейський сервісний центр GNSS у Торрехоні (Іспанія), Центр моніторингу безпеки Galileo (GSMC), розташований у Франції та Іспанії, а також Довідковий центр Galileo (GRC) у Нідерландах. Ці установи забезпечують точність навігаційного сигналу, контроль орбітальних параметрів та безперебійну роботу сервісів [31], [32].

Користувацький сегмент охоплює всі пристрої, які можуть приймати сигнал від супутників Galileo. Це можуть бути смартфони, автомобільні навігатори, дрони, бортові комп'ютери, авіаційні системи навігації, геодезичне обладнання та інші засоби позиціонування. Galileo сумісна з іншими глобальними навігаційними системами – GPS, GLONASS та BeiDou – що дозволяє користувачам отримувати ще точніші координати, особливо у складних умовах прийому сигналу [31], [34].

Galileo забезпечує високу точність позиціонування, до 1 метра для загального користування, що втричі перевищує точність GPS [1]. Крім того, система пропонує High Accuracy Service (HAS), який дозволяє досягати точності до 20 см у реальному часі без додаткового обладнання [33].

Galileo знаходить широке застосування в різних галузях:

1. Транспорт та логістика: забезпечення точного позиціонування транспортних засобів, оптимізація маршрутів та контроль швидкості [32];
2. Соціальні послуги: допомога людям з обмеженими можливостями та літнім особам у навігації;
3. Правоохоронні органи: моніторинг місцезнаходження підозрюваних та контроль кордонів [32];
4. Громадські роботи: створення та оновлення географічних інформаційних систем [31];
5. Пошуково-рятувальні операції: швидке виявлення та допомога постраждалим у надзвичайних ситуаціях [31].

Завдяки високій точності та надійності, Galileo стає незамінним інструментом у багатьох сферах сучасного життя.

1.3 Азійська навігаційна система BeiDou

Супутникова навігаційна система BeiDou (BDS) є національною GNSS, розробленою та керованою Управлінням супутникової навігації Азії. Назва системи походить від терміна для сузір'я Великої Ведмедиці. Розробка BeiDou

почалася наприкінці 1990-х років і пройшла три етапи: BeiDou-1, BeiDou-2 і поточний BeiDou-3 [23].

Система BeiDou-1 була обмеженою регіональною службою, що використовувала геостационарні супутники і працювала в період з 2000 по 2012 рік. Вона забезпечувала навігаційні послуги для азійських країн та прилеглих територій. Другий етап розвитку, відомий також як BeiDou-2 або Compass, розширив можливості системи та покриття, надаючи послуги в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Третій етап, BeiDou-3, був оголошений повністю працездатним у 2020 році та надає глобальні навігаційні послуги з підвищеною точністю та розширеними функціями [23], [25].

Структура системи BeiDou включає три ключові компоненти, які забезпечують повноцінне функціонування навігаційної мережі на глобальному рівні.

Космічний сегмент системи BeiDou-3 складається з 35 супутників, що розташовані на трьох типах орбіт: середній навколоземній орбіті (MEO), геостационарній орбіті (GEO) та похилій геосинхронній орбіті (IGSO). Супутники MEO, які розміщені на висоті близько 21 500 км, відповідають за глобальне покриття, тоді як GEO та IGSO орієнтовані переважно на регіональне покриття держави та сусідніх територій, посилюючи точність і надійність сигналу у цьому регіоні [12], [23].

Наземний, або сегмент управління, включає широку мережу об'єктів, до якої входять центри управління, телеметричні станції та пункти моніторингу. Ці об'єкти забезпечують постійний контроль над станом супутників, обробку навігаційної інформації, синхронізацію сигналів і контроль за їхньою цілісністю. Вся інфраструктура координується Центральним командним центром BeiDou, який відповідає за безперервне керування системою в реальному часі [23].

Користувацький сегмент системи BeiDou охоплює широке коло пристроїв, які приймають навігаційні сигнали. Користувачі мають доступ до кількох типів сервісів: відкритої служби (Open Service) для цивільного

застосування, авторизованої служби (Authorized Service) для державних і військових структур, а також унікальної для BeiDou служби коротких повідомлень (Short Message Service), яка дозволяє передавати повідомлення довжиною до 120 символів через супутники, що особливо корисно в умовах відсутності традиційного мобільного зв'язку [14].

Крім того, BeiDou підтримує передавання сигналів на кількох частотах – зокрема B1I, B2I, B1C, B2a і B3I – що забезпечує сумісність з іншими системами GNSS, такими як GPS та Galileo. Також система підтримує функції точного позиціонування (PPP), моніторинг цілісності та супутникові послуги розширення [12], [14].

1.4 Навігаційна система ГЛОНАСС

ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система) – це GNSS, розроблена та експлуатована азійським регіоном. Як і GPS, вона спочатку створювалася для військових цілей, але згодом стала доступною для цивільного використання. Повноцінна експлуатація системи розпочалася у 1995 році, однак після періоду занепаду вона була відновлена на початку 2000-х років [16]. Система ГЛОНАСС побудована за класичною трирівневою архітектурою, яка включає космічний, наземний і користувацький сегменти.

У межах космічного сегмента функціонує сузір'я з 24 супутників, що розміщені у трьох орбітальних площинах на висоті близько 19 100 км з нахилом $64,8^\circ$ до екватора. Така конфігурація забезпечує ефективне покриття високоширотних районів, що особливо важливо для північних територій [5]. Передача сигналів здійснюється в діапазонах L1 (1602 МГц) і L2 (1246 МГц) із використанням схеми частотного розділення каналів (FDMA). Останнє покоління супутників – ГЛОНАСС-К – також транслює сигнали за технологією CDMA в діапазоні L3 (1202,025 МГц), що значно підвищує сумісність з іншими навігаційними системами, зокрема GPS і Galileo [16].

Наземний сегмент охоплює розгалужену мережу командно-вимірювальних станцій, які відповідають за управління орбітальними

параметрами супутників, синхронізацію часових сигналів і моніторинг технічного стану системи. [16].

Користувацький сегмент системи охоплює широкий спектр приймального обладнання: від державних і військових приладів до цивільних навігаторів і мобільних пристроїв. Більшість сучасних GNSS-приймачів підтримують роботу одночасно з кількома навігаційними системами, що дозволяє значно покращити точність визначення координат у складних умовах, наприклад, у щільній міській забудові або в лісистій місцевості [19].

1.5 Інші супутникові системи та доповнюючі технології

Окрім чотирьох основних глобальних навігаційних супутникових систем (GPS, Galileo, BeiDou і ГЛОНАСС), деякі країни розробили власні регіональні навігаційні системи для забезпечення високоточного позиціонування у межах певних географічних зон. Ці регіональні системи створені для задоволення локальних потреб у навігаційних даних, підвищення надійності та точності, а також для доповнення роботи глобальних GNSS, особливо в умовах обмеженого покриття або складного рельєфу [1].

Індійська система NavIC (Navigation with Indian Constellation), раніше відома як IRNSS, є незалежною регіональною навігаційною системою, розробленою Індійською організацією космічних досліджень (ISRO). Вона забезпечує високоточне позиціонування на території Індії та в навколишньому регіоні радіусом до 1500 км. Система складається з семи супутників: три розміщені на геостаціонарній орбіті, чотири – на похилій геосинхронній орбіті. NavIC передає сигнали в діапазоні L5 (1176,45 МГц) і S-діапазоні (2492,028 МГц), забезпечуючи як стандартні послуги для цивільного використання, так і обмежений доступ для уповноважених користувачів [6].

Японська система QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) розроблена для покращення GNSS-покриття в регіоні Азії та Океанії, особливо в Японії. Її супутники розміщені на високо еліптичних орбітах з великим нахилом, що дозволяє одному або декільком супутникам перебувати майже безпосередньо

над Японією у будь-який момент часу. Це значно зменшує втрату сигналу в урбанізованих районах та покращує якість позиціонування. QZSS повністю сумісна з GPS і транслює сигнали на подібних частотах, що дозволяє зменшити багатопроменеве спотворення сигналів і підвищити точність [19].

До інших регіональних рішень належать системи супутникового доповнення (SBAS), які використовуються для поліпшення якості GNSS-сигналів. Наприклад, WAAS (Wide Area Augmentation System) у Північній Америці, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) у Європі та інші системи в Азії, Австралії й Африці. Вони забезпечують користувачів реальними поправками до сигналів GNSS та моніторингом цілісності, що особливо важливо для критичних сфер, таких як авіація чи точне землеробство [1].

Таким чином, глобальні навігаційні супутникові системи – це фундамент сучасної цифрової інфраструктури. Вони забезпечують широкий спектр послуг: від навігації на смартфонах до високоточних сервісів синхронізації для банківської справи, телекомунікацій і науки [1], [4]. Кожна GNSS має унікальні характеристики та технічні новації, які посилюють взаємодію між системами, розширюючи охоплення, точність і надійність. Регіональні системи, зокрема NavIC і QZSS, суттєво доповнюють глобальну екосистему GNSS, сприяючи подальшому розвитку послуг позиціонування, навігації та синхронізації в усьому світі [6], [19]. Узагальнена порівняльна характеристика основних GNSS та регіональних систем наведена в таблиці 1.1 (табл. 1.1)

**Порівняльна характеристика глобальних і регіональних навігаційних
супутникових систем (GNSS)**

Система	Країна / Регіон	Тип системи	Характеристики
GPS	США	Глобальна GNSS	Система у повному складі з 1995 р. Має 24–33 супутники на середній орбіті (~20 200 км), охоплює всю Землю. Керується ВПС США. Забезпечує точність на рівні 5–10 м для цивільних користувачів, підтримує сигнали L1, L2, L5 [4].
GLONASS	Азія	Глобальна GNSS	Експлуатується з 1996 р., повне відновлення – з 2011 р. Містить 24 супутники на кругових орбітах (~19 100 км), охоплює глобально. Передає сигнали на частотах L1, L2. Менш точна за GPS, але перевага — стабільна орбітальна конфігурація [5].
Galileo	ЄС	Глобальна GNSS	Цивільна система з 30 супутників (на МEO ~23 222 км). Працює у сервісному режимі з 2016 р., повна готовність очікується найближчими роками. Дає найвищу точність серед GNSS (до 1 м або менше), сигнали E1, E5, E6 [31].
BeiDou (BDS)	Азія	Глобальна GNSS	Перша фаза – з 2000 р., глобальне покриття з 2020 р. Має понад 35 супутників на МEO, GEO, IGSO. Забезпечує високу точність, підтримує різні сигнали (B1I, B1C, B2a, B2b, B3) і надає послуги повідомлень [12].
NavIC (IRNSS)	Індія	Регіональ на GNSS	Запущена ISRO. Має 7 супутників на орбітах GEO/IGSO (~36 000 км), охоплює Індію та 1 500 км довкола. Працює з 2016 р., точність – 10–20 м. Орієнтована на внутрішнє цивільне та військове використання [6].

Продовження таблиці 1.1

QZSS	Японія	Регіональ на GNSS	Діє з 2018 р., має 7 супутників (до 11 планується), переважно на квазізенітній орбіті (~32 000 км). Працює як доповнення до GPS, забезпечує кращий прийом сигналу у міських каньйонах [19].
EGNOS	ЄС	SBAS	Система супутникового підвищення точності (SBAS), працює з 2009 р. Доповнює GPS над Європою. Поліпшує точність до 1–2 м. Має 3 супутники, підтримує авіаційну сертифікацію [1].
WAAS	США	SBAS	Американська SBAS, введена в експлуатацію у 2003 р. Працює з GPS, покриває Північну Америку. Поліпшує точність до 1–2 м, сертифікована для авіації. Близько 3 GEO-супутників [1].

Висновки до розділу 1

Глобальні навігаційні супутникові системи, зокрема GPS (США), Galileo (ЄС) та BeiDou (Азія), є основою сучасних технологій позиціонування, визначення точного часу та навігації. Вони стали невід’ємною частиною повсякденного життя, забезпечуючи стабільну роботу численних сервісів – від навігації в автомобілях і смартфонах до точного землеробства, аеронавігації й рятувальних операцій. Найпоширенішою з них є GPS, що вже понад чотири десятиліття успішно функціонує й постійно модернізується. Європейська система Galileo, орієнтована передусім на цивільне використання, вирізняється підвищеною точністю визначення координат, що особливо важливо для критично важливих застосувань. Тим часом азійська BeiDou демонструє динамічний розвиток і вже пропонує повноцінне глобальне покриття з великою кількістю супутників у різних орбітах, що підвищує її стійкість до збоїв.

Усі ці системи побудовані за подібним принципом: вони складаються з космічного сегмента (мережі супутників), наземної інфраструктури управління і контролю, а також приймачів, що безпосередньо використовуються

користувачами. Така архітектура дозволяє отримувати точні координати в будь-якій точці Землі, майже в реальному часі. Сфера застосування GNSS постійно розширюється: вони використовуються в геодезії, моніторингу довкілля, нафтогазовій промисловості, у логістиці та навіть у мобільних додатках, які щодня допомагають мільйонам людей орієнтуватися в просторі.

Висока точність навігації досягається завдяки постійній роботі над удосконаленням сигналів, впровадженню систем диференціальної корекції, а також модернізації супутникових груп. Водночас, точність і стабільність роботи GNSS можуть залежати від низки зовнішніх чинників – зокрема, впливу атмосфери, наявності фізичних перешкод (наприклад, у щільній міській забудові чи в горах), а також стану приймального обладнання.

У перспективі очікується ще глибша інтеграція навігаційних систем з інтелектуальними технологіями, такими як машинне навчання та штучний інтелект. Це відкриє нові можливості для автоматизованих транспортних засобів, розумних міст та складних інженерних рішень. У підсумку, GNSS перетворюються з простої навігаційної допомоги на універсальний інструмент, який змінює спосіб нашої взаємодії зі світом.

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ GPS ЗНІМАННЯ - СТАТИЧНИЙ ТА RTK

У геодезичних дослідженнях для збору координатних даних широко використовуються методи супутникової навігації. Одним із найбільш ефективних підходів є GPS-зйомка, яка дозволяє отримати високоточні результати навіть у складних умовах [1]. З-поміж методів супутникових вимірювань особливо виділяються статичний метод та кінематичний метод у реальному часі (RTK). Саме RTK став основою для сучасних рішень, які вимагають швидкого збору просторових даних із високим рівнем точності.

2.1 Метод RTK (Real-Time Kinematic)

Метод RTK (Real-Time Kinematic) базується на одночасному використанні двох приймачів: базової станції та ровера. Базова станція розташовується на фіксованій, відомій позиції та постійно передає роверному приймачу сигнали корекції [22]. Ці сигнали надсилаються різними способами, серед яких найпоширеніші – радіомодеми та мобільні мережі через інтернет-протокол NTRIP (рис. 2.1) [8].

Корекції в режимі реального часу компенсують помилки, що виникають через атмосферні впливи, супутникові годинникові зсуви та інші джерела неточностей. Це дозволяє досягати точності на рівні 1–2 сантиметрів, що особливо цінно для топографічної зйомки, кадастрових робіт, проектування будівельних майданчиків та інших завдань [15].

Точність RTK визначається правилами: зазвичай 8 мм по горизонталі та 15 мм по вертикалі з додаванням 1 мм на кожен кілометр від базової станції [9]. Однак цей показник може коливатись залежно від таких факторів, як погодні умови, іоносферні збурення, рельєф місцевості, наявність перешкод для сигналу та якість обладнання [15].

Зокрема, багатопроменевість (відбиття сигналів від об'єктів) у міських умовах або густому лісі здатна істотно впливати на результати [8].

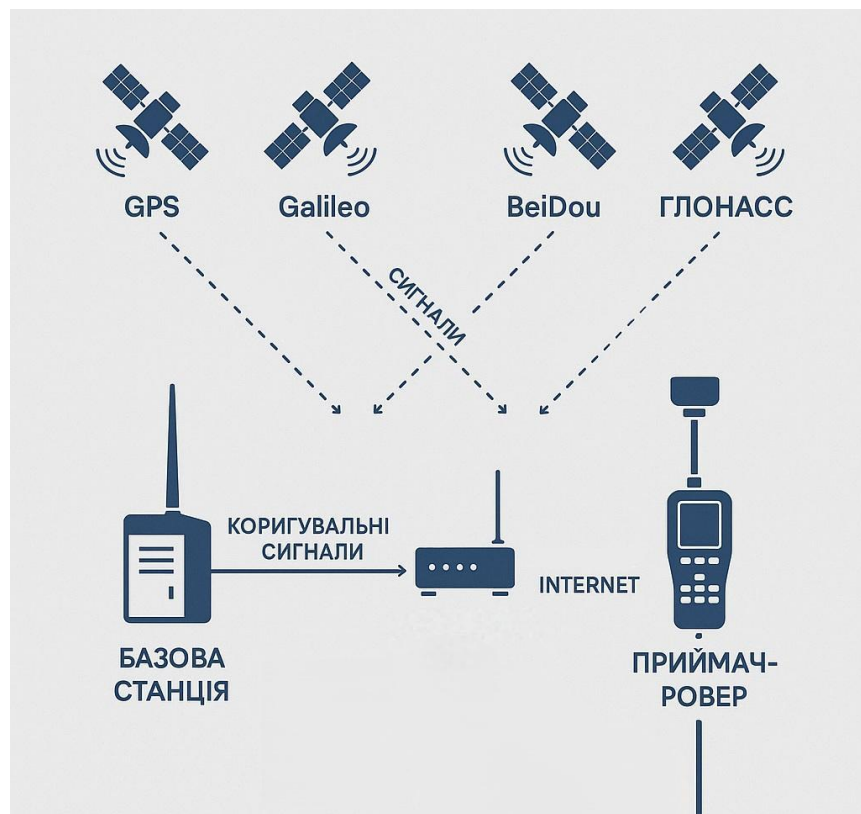


Рис. 2.1. Схема роботи RTK: базова станція передає поправки до ровера

Щоб мінімізувати потенційні похибки, базова станція повинна бути розташована на відкритій місцевості, де немає високих будівель чи дерев, а роверний приймач має забезпечувати безперервний прийом сигналу від супутників [22]. Важливо також налаштувати систему координат та провести локалізацію місцевості. Це дозволяє уникнути систематичних похибок і зробити результати сумісними з державними кадастровими системами [20].

Передача поправок може здійснюватися за допомогою радіомодемів (звичайно на відстані до 10 км) або мобільного інтернету через протокол NTRIP (радіус до 35 км і більше) [29]. Якщо працювати в зоні покриття мережі базових станцій, можна використовувати технологію VRS (Virtual Reference Station). У цьому випадку сервер створює віртуальну базову станцію прямо над місцем вимірювання, що ще більше покращує якість поправок і точність вимірювань [8].

Перевагами RTK є не лише висока точність, а й оперативність отримання результатів. Час спостереження на одній точці може складати всього 1 секунду [15]. Це дає змогу значно пришвидшити топографічні, кадастрові, планувальні роботи. У багатьох випадках RTK дозволяє повністю замінити тахеометричну зйомку, особливо там, де немає прямих ліній видимості або є потреба у великому радіусі дії [18].

Однак метод RTK має і свої недоліки. Найсуттєвіші ризики – це втрата сигналу через фізичні перешкоди або велика відстань до бази. Зі збільшенням відстані більше 10–15 км точність може почати поступово знижуватись [15]. Крім того, великі затримки в передачі корекційних сигналів через інтернет або радіозв'язок можуть також призводити до втрати фіксованого рішення ("fixed solution"), що критично для точності.

Для покращення надійності роботи у складних умовах використовують зовнішні базові радіостанції для збільшення дальності сигналу, додаткові акумулятори для забезпечення безперебійної роботи та професійні штативи і віхи для стабілізації антен [8].

Збирання даних за RTK-технологією потребує використання спеціалізованого програмного забезпечення. Найпоширенішими програмами для польових вимірювань є FieldGenius від MicroSurvey, Trimble Access та Carlson SurvCE [8]. Це програмне забезпечення дозволяє не тільки фіксувати координати точок, але й додавати атрибутивну інформацію, вести польові нотатки та формувати готові до обробки дані.

RTK стає незамінним у багатьох сучасних сферах: від будівництва доріг до створення цифрових кадастрів і планування інженерних мереж. Завдяки здатності оперативно отримувати результати з високою точністю цей метод значно підвищує ефективність польових робіт та якість кінцевого продукту [15].

Втім, успіх зйомки за допомогою RTK залежить від комплексного підходу: правильного налаштування обладнання, кваліфікації оператора,

вибору відповідного методу передавання корекцій і врахування специфіки місцевості [8].

2.2 Статичний метод GPS-знімання

Статичні вимірювання в глобальних навігаційних супутникових системах (GNSS) передбачають збір необроблених даних тривалий час із фіксованого місця. Приймач встановлюється стаціонарно та безперервно спостерігає за супутниковими сигналами протягом декількох годин або навіть днів [27]. Отримані дані перетворюються у формат RINEX для подальшої обробки.

Зазвичай для такої роботи достатньо одного GNSS-приймача, встановленого на триногу або спеціальну підставку. Якщо використовується державна безкоштовна служба (наприклад, CSRS-PPP або OPUS), необхідність у базовій станції може відпасти [22].

Після завершення збору дані завантажуються в спеціалізоване програмне забезпечення для постобробки, яке дозволяє досягти високої точності визначення координат. Наприклад, сервіси CSRS-PPP (Канада) та OPUS (США) надають користувачам можливість обробляти результати безкоштовно [18]. Однак варто врахувати, що обидві платформи підтримують тільки GPS та ГЛОНАСС, а для використання супутників Galileo чи BeiDou потрібне комерційне програмне забезпечення, таке як Trimble Business Center або Leica Infinity [11].

Точність результатів статичних спостережень залежить від низки факторів: тривалості збору даних, інтервалу реєстрації, погодних умов та характеристик обладнання. Довші сеанси спостереження (8-24 години) дозволяють мінімізувати вплив мультипуткових перешкод та іоносферних збурень, забезпечуючи сантиметрову точність і навіть краще [28].

Переваги статичних вимірювань очевидні. Вони забезпечують найвищий рівень точності, що є особливо важливим для створення опорних геодезичних мереж або при роботах у місцевості без контрольних точок [18]. Наприклад, статичні спостереження дозволяють створювати нові контрольні пункти у

віддалених районах або горах, де RTK-зв'язок неможливий через відсутність базових станцій [18].

Незважаючи на високу точність, цей метод має певні обмеження. Основним недоліком є тривалість збору даних: для досягнення кращої якості потрібно кілька годин безперервної роботи приймача. Також будь-яке переміщення приймача під час сесії може зіпсувати результати спостереження [18].

Крім того, слід зважати на обмеження самих сервісів обробки. Наприклад, OPUS не підтримує Galileo або BeiDou, що може вплинути на якість обробки в регіонах, де покриття GPS і ГЛОНАСС не оптимальне [22].

Техніка налаштування статичного знімання включає ретельний вибір місця розміщення приймача (рис. 2.2). Варто уникати ділянок із деревами, високими будівлями або іншими перешкодами, що викликають багатопроменевість. В ідеалі приймач має мати вільний огляд неба під кутом не менше 15° до горизонту [11].



Рис. 2.2. Принцип роботи статичного методу

Процедура встановлення включає використання штатива, трибраха і точного вирівнювання приладу над геодезичним знаком або маркером. Це дозволяє звести до мінімуму похибки вимірювання і забезпечити повторюваність результатів [28].

Статичні вимірювання не залежать від бездротового зв'язку або передачі поправок у реальному часі, що значно розширює їх робочий діапазон у порівнянні з RTK-зйомкою. Це дозволяє проводити роботи навіть у найвіддаленіших регіонах [18].

І хоча обробка даних може займати чимало часу, результат того вартий. Сучасне програмне забезпечення дає змогу досягати горизонтальної точності до 2,5 мм і вертикальної до 5 мм за умови тривалих спостережень [18].

Для підвищення точності в умовах обмеженої видимості супутників (наприклад, у лісі) рекомендовано збільшити тривалість збору даних, що допомагає компенсувати вплив перешкод [22].

Статичне знімання знаходить особливе застосування в геодезичних роботах, моніторингу деформацій споруд та створенні прецизійних мереж. Там, де реальний час не є критичним, а на першому плані стоїть абсолютна точність, статика залишається незамінною технологією [27].

У практиці геодезії часто поєднують обидва методи: під час RTK-зйомки паралельно збирають статичні дані для подальшої перевірки та корекції. Таким чином, статичні спостереження виступають основою для високоточних робіт та калібрування результатів RTK [20].

На завершення варто відзначити: правильне розуміння особливостей та вимог статичного GNSS-знімання дозволяє суттєво підвищити якість та надійність геодезичних робіт, особливо в умовах складної місцевості чи відсутності контрольних пунктів [28].

Методи RTK (Real-Time Kinematic) та статичного GNSS-знімання активно використовуються в геодезії, проте кожен із них має свої особливості, переваги й обмеження [29].

RTK-знімання орієнтоване на оперативність отримання результатів у реальному часі, з точністю на рівні 1–2 см [8]. Завдяки використанню базової станції та роверного приймача з передачею корекцій через радіозв'язок або інтернет-протокол NTRIP, RTK дозволяє швидко виконувати топографічні, кадастрові та будівельні роботи [29]. Час спостереження на одній точці може складати всього 1–5 секунд, що значно прискорює процес вимірювань [7].

Водночас статичне знімання орієнтоване на досягнення максимальної точності. У цьому методі приймач протягом кількох годин безперервно фіксує сирі дані супутникових сигналів для подальшої обробки [11]. Завдяки тривалим сесіям збору даних, точність визначення координат може досягати до 2,5 мм по горизонталі та 5 мм по вертикалі [11]. Це робить статичне знімання незамінним для створення опорних геодезичних мереж, моніторингу деформацій та інших високоточних робіт.

Проте RTK залежить від стабільного зв'язку між базою і ровером: наявність фізичних перешкод або велика відстань до бази може призводити до втрати фіксованого рішення і зниження точності [15]. Особливо це критично в умовах міської забудови або пересіченого рельєфу, де багатопроменевість суттєво впливає на результати [15].

Статичний метод, навпаки, не потребує реального з'єднання під час збору даних. Це дає можливість працювати в найвіддаленіших регіонах без доступу до мобільної мережі або базових станцій [7]. Однак за це доводиться «платити» часом: для досягнення високої точності необхідні багатогодинні сеанси, що знижує оперативність робіт (табл. 2.1) [7].

Таблиця 2.1

Порівняння методів RTK та статичного GNSS-знімання

Характеристика	RTK (Real-Time Kinematic)	Статичне GNSS-знімання
Точність	1–2 см [15]	До 2,5 мм горизонтально [11]
Час збору даних	1–5 сек на точку [15]	1–24 год на точку [11]

Продовження таблиці 2.1

Залежність від зв'язку	Висока (радіо/інтернет) [29]	Немає потреби у зв'язку [11]
Застосування	Топографія, кадастр, будівництво [20]	Геодезичні мережі, деформаційний моніторинг [11]
Основні ризики	Втрата сигналу, багатопроменевість [29]	Тривалість збору, переміщення приймача [11]

Висновки до розділу 2

Методи супутникового позиціювання, зокрема RTK і статичне знімання, відіграють важливу роль у сучасній геодезії. RTK дозволяє оперативно отримувати координати з точністю до кількох сантиметрів, що особливо цінно при виконанні топографічних, будівельних чи кадастрових робіт. Однак ефективність цього методу залежить від стабільного зв'язку з базовими станціями та відсутності перешкод.

У випадках, коли реального часу недостатньо або він недоступний, доцільно використовувати статичний метод. Він забезпечує найвищу точність і підходить для створення опорних геодезичних мереж. Незважаючи на потребу в тривалішому зборі даних і подальшій обробці, цей метод дає змогу працювати в будь-яких умовах, навіть у віддалених місцевостях.

На практиці часто поєднують обидва підходи, що дозволяє досягти оптимального результату. Завдяки розвитку GNSS-технологій, збільшенню кількості супутників і вдосконаленню програмного забезпечення точність та ефективність геодезичних вимірювань постійно зростають.

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ЗНІМАННЯ ПРИ ЗЕМЛЕВПОРЯДНИХ РОБОТАХ (РЕЖИМИ ЗНІМАННЯ В РТК МЕТОДІ)

Землевпорядні роботи неможливо уявити без точного визначення координат, рельєфу та меж земельних ділянок. Серед сучасних методів отримання просторових даних значну роль відіграє RTK (Real-Time Kinematic) – один із найточніших способів позиціонування в режимі реального часу. Його переваги стають особливо помітними під час виконання геодезичних знімів, пов'язаних із кадастровими роботами, розробкою технічної документації або землеустроєм [17].

У RTK технології існує декілька режимів знімання, які варто вибирати залежно від характеру території, точності вимірювань і умов прийому сигналу. Найпоширеніші режими такі:

1. Фіксований режим (FIXED). Це основний режим, у якому координати визначаються з максимальною точністю. Вимірювання проводяться після стабільного отримання фіксованого рішення від GNSS-приймача. Цей режим рекомендовано використовувати під час знімання точок меж ділянок, кутів повороту або при винесенні в натуру, де похибка не повинна перевищувати кількох сантиметрів [20].

2. Плаваючий режим (FLOAT). У випадках, коли фіксоване рішення недоступне через завади (наприклад, щільна забудова або дерева), приймач працює у FLOAT-режимі. Точність трохи нижча, однак залишається прийнятною для загальних вимірювань рельєфу, підрахунку площ або підготовчих робіт [20].

3. Режим збір даних із середнім значенням (Averaging). Цей підхід застосовують для зменшення похибки на одному місці: приймач фіксує кілька вимірювань координат протягом певного часу, після чого вираховується середнє значення. Такий режим доцільний для визначення координат базової станції або опорних точок [20].

4. Режим «Статика в RTK» (Stop & Go). Поєднання точності статичних спостережень і мобільності RTK. Приймач здійснює фіксацію лише під час зупинок, що дає змогу зібрати точні дані без необхідності постійної фіксації сигналу. Режим часто використовується в складних умовах, де потрібно обійти перешкоди або працювати автономно [20].

Польове RTK-знімання потребує дотримання ряду практичних вимог, які суттєво впливають на якість результату. Основними умовами для успішної роботи є стабільний прийом супутникового сигналу, точне налаштування приймача та досвід оператора. Однак у реальних ситуаціях виникає низка нюансів, які варто враховувати.

1. Вимірювання меж ділянки поблизу лісосмуги або в забудованій зоні. Під час знімання поворотних точок меж у сільській місцевості нерідко виникає проблема втрати фіксованого рішення через дерев'яні насадження або господарські споруди. У таких випадках оптимальним буде перехід на режим FLOAT або застосування методу Stop&Go. Наприклад, якщо точка розташована поруч із сараєм або під деревом, ровер слід встановити в точці з видимістю неба, а координату знайти за допомогою ексцентриситету (виносу), обчислюючи її геометрично [15].

2. Робота на пересіченій місцевості або схилах. У гірських або пагористих районах виникають труднощі з утриманням стабільного зв'язку з базовою станцією. У такому випадку варто застосовувати зовнішню GSM-антену для підсилення мобільного сигналу або тимчасову базову станцію, встановлену ближче до об'єкта знімання. Також слід періодично перевіряти вертикальність віхи, особливо на ухилах, де навіть незначне відхилення призводить до великої похибки [15].

3. Вимірювання в умовах обмеженого часу. Іноді необхідно швидко виконати знімання великої кількості точок. У таких випадках варто активувати режим накопичення координат з автоматичним фіксуванням після досягнення фіксованого рішення. Наприклад, у приймачах Trimble або South можна задати

умову, за якої точка автоматично зберігається після 5 секунд фіксованого сигналу – це значно прискорює процес без втрати точності [15].

4. Робота в міських умовах. У щільно забудованих районах багатоповерхові будівлі створюють ефект мультипутінгу (відбиття сигналу), що може викривляти координати. Тут RTK варто поєднувати з іншими джерелами – наприклад, використанням Total Station для критичних точок або постобробкою при сумнівних вимірюваннях. Також варто уникати роботи поблизу металевих об'єктів (огорож, ЛЕП), які можуть спотворити електромагнітне поле [20].

5. Особливості фіксації координат межових знаків. Під час знімання межових знаків слід переконатися, що GPS-антена точно розташована над центром знака. Для цього використовують спеціальні центрувальні пристрої або мітки. У документації про надання кадастрових послуг часто вимагається, щоб точність становила не більше ± 3 см, тому кожне вимірювання краще дублювати або звіряти з додатковими GNSS-пунктами, зафіксованими в попередніх проектах [15].

Загалом, успіх роботи з RTK залежить не лише від обладнання, а й від грамотної стратегії знімання та гнучкого реагування на польові умови.

Станом на 2024 рік в Україні спостерігається активний розвиток RTK-інфраструктури:

1. Національна RTK-мережа: В Україні відсутня єдина національна RTK-мережа. Однак існують окремі регіональні та комерційні сервіси, які надають RTK-корекції через NTRIP-протокол. Наприклад, компанія ArduSimple пропонує RTK-корекційні сервіси та NTRIP-кастери, доступні в Україні через інтернет [23].

2. CORS-мережа від Trimble: Компанія Trimble у співпраці з українським оператором мобільного зв'язку Київстар реалізує проєкт зі створення мережі безперервно працюючих парманент-станцій (CORS). Ця мережа забезпечить точність позиціонування до 2 см і буде доступна через

підписку [21]. Перший етап проєкту передбачає встановлення 41 вежі, а другий – ще 150 веж, з очікуваним завершенням у 2024 році [15], [21].

3. Міжнародні RTK-сервіси: Для користувачів, які потребують сантиметрової точності, доступні безкоштовні міжнародні RTK-сервіси, такі як RTK2GO, IGS та UNAVCO. Ці сервіси забезпечують корекційні дані через NTRIP, однак їх точність може бути нижчою порівняно з локальними базовими станціями [29].

RTK-технологія має низку переваг у землепорядних роботах:

1. Висока точність: Досягнення сантиметрової точності дозволяє точно визначати межі земельних ділянок, що є критично важливим для кадастрових зйомок та межування [29].

2. Оперативність: Можливість отримання результатів у реальному часі значно прискорює процес знімання та обробки даних [29].

3. Сумісність з державними системами: Правильне налаштування системи координат та проведення локалізації місцевості дозволяє інтегрувати RTK-дані з державними кадастровими системами [29].

Для ефективного використання RTK-приймачів у землепорядних роботах необхідно застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення:

1. FieldGenius від MicroSurvey: Програмне забезпечення для польових вимірювань, яке підтримує роботу з RTK-приймачами та дозволяє здійснювати знімання координат, додавати атрибутивну інформацію та формувати звіти [8].

2. Trimble Access: Програмне забезпечення для геодезичних вимірювань, яке забезпечує інтеграцію з RTK-приймачами та підтримує різноманітні функції для знімання та обробки даних [21].

3. Carlson SurvCE: Програмне забезпечення для польових вимірювань, яке підтримує роботу з RTK-приймачами та надає інтерфейс для знімання та обробки даних [15].

У 2025 році очікується подальший розвиток RTK-інфраструктури в Україні:

1. Розширення CORS-мережі: Завершення другого етапу проєкту зі створення мережі безперервно працюючих парманент-станцій (CORS) забезпечить покриття більшої території України та підвищить точність позиціонування [29].
2. Інтеграція з міжнародними сервісами: Покращення доступу до міжнародних RTK-сервісів через NTRIP дозволить користувачам отримувати корекційні дані з більшої кількості базових станцій [20].
3. Впровадження нових технологій: Розвиток технологій, таких як 5G та Інтернет речей (IoT), сприятиме інтеграції RTK-технології в різноманітні галузі, включаючи землевпорядкування [29].

Висновки до розділу 3

RTK-технологія (Real-Time Kinematic) є однією з найточніших і найоперативніших методик супутникового позиціонування, яка широко застосовується в геодезії, землевпорядкуванні, будівництві та кадастрових роботах. Вона дозволяє отримувати координати з точністю до кількох сантиметрів у режимі реального часу, що значно підвищує ефективність польових робіт, скорочує витрати часу та знижує ризик помилок.

Для досягнення максимальної точності важливо враховувати не лише характеристики самого приймача, а й стабільність зв'язку з базовими станціями, тип рельєфу, наявність перешкод і рівень підготовки оператора. Сучасні RTK-приймачі підтримують різні режими роботи, зокрема FIXED, FLOAT, Stop & Go, середнє значення, що дозволяє адаптувати процес знімання до конкретних умов місцевості.

В Україні поступово розвивається національна мережа постійно діючих базових станцій (CORS), а також зростає доступ до міжнародних NTRIP-сервісів. Це відкриває нові перспективи для фахівців, які працюють із просторовими даними. Крім того, інтеграція RTK з технологіями 5G,

мобільними додатками та платформами Інтернету речей (IoT) сприяє подальшій автоматизації геопросторових вимірювань.

Таким чином, RTK стає важливим елементом цифрової трансформації просторових даних, забезпечуючи високу точність, оперативність і адаптивність до сучасних викликів.

РОЗДІЛ 4. GNSS-ПРИЙМАЧ GALAXY G1 У РЕЖИМАХ RTK І СТАТИКИ: ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

У межах виконання дипломного проєкту одним із ключових і найвідповідальніших етапів стало проведення високоточного супутникового знімання з використанням сучасних методів позиціювання – статичної зйомки та технології RTK (Real-Time Kinematic). Головна мета цих робіт полягала у максимально точному визначенні координат контрольної точки, а також у подальшому аналізі ефективності застосування обох методів у реальних польових умовах. Такий підхід дав змогу не лише оцінити точність отриманих результатів, а й зробити висновки щодо доцільності використання тієї чи іншої методики у різних інженерно-геодезичних задачах.

Для знімання було використано сучасне геодезичне обладнання – GNSS-приймач Galaxy G1, який зарекомендував себе як надійний і точний прилад у сфері супутникової геодезії (рис. 4.1).

Його роботу забезпечував контролер із встановленим програмним забезпеченням South SurvX версії 4.0, що дозволяє зручно керувати процесом вимірювань та оперативно змінювати параметри знімання залежно від потреб.

Статичний метод супутникового позиціювання є одним із найточніших серед GNSS-технологій. Він передбачає тривале безперервне спостереження за супутниками з фіксованої точки. Такий підхід дозволяє досягати сантиметрової точності у визначенні координат, що особливо важливо при побудові опорних геодезичних мереж, створенні локальних систем координат, визначенні координат пунктів згущення та інших високоточних геодезичних робіт.

Контрольна точка була заздалегідь підібрана на відкритій ділянці території університетського кампусу, що дозволило уникнути затінення сигналів та знизити ризик мультипутового ефекту. Крім того, завдяки відсутності значних перешкод у вигляді будівель або дерев, було забезпечено стабільний прийом сигналів від супутників усіх діючих навігаційних систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).



Рис. 4.1. GNSS-приймач Galaxy G1

Порядок виконання статичної зйомки

1. GNSS-приймач Galaxy G1 встановлено на тринозі з використанням оптичного центриру для забезпечення точного положення над пунктом (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Galaxy G1 встановлено з використанням триноги

2. Проведено юстування приладу та перевірку вертикального положення антени (рис 4.3).
3. Підключено контролер за допомогою Bluetooth-з'єднання.
4. У ПЗ South SurvX активовано режим статичної зйомки.



Рис. 4.3. Регулювання приладу і перевірка правильного вертикального встановлення антени

Задано такі параметри:

1. Кут маскування супутників: 10°
2. Частота запису вимірювань: 1 Гц
3. Тривалість сесії: 15 хвилин (рис. 4.4)

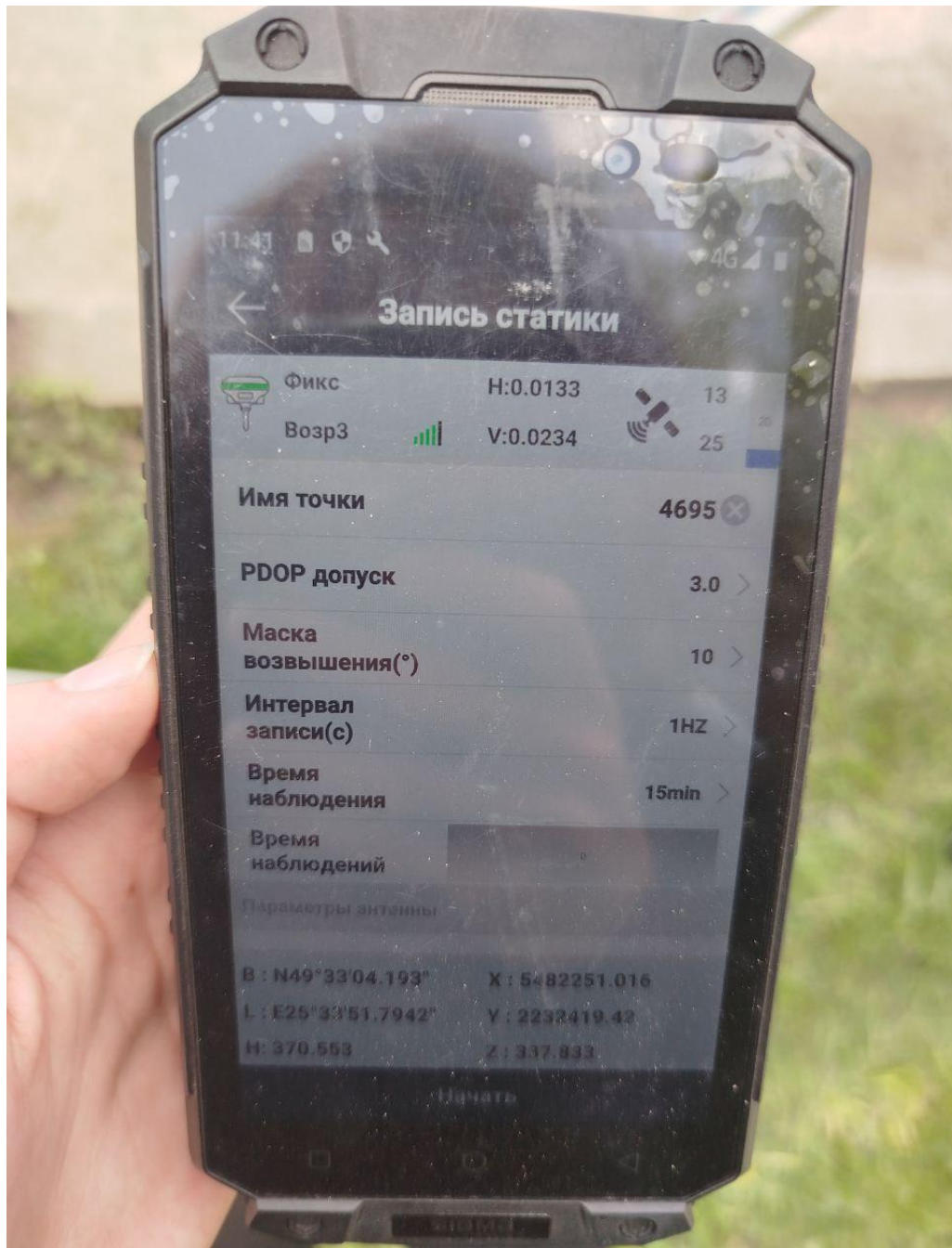


Рис. 4.4. Встановлені параметри в програмному забезпеченні South SurvX

Після завершення спостереження було сформовано файл спостережень у форматі RINEX, який є загальноприйнятим стандартом для подальшої обробки даних. Дані були експортовані до програми Trimble Business Center, що дозволяє проводити комплексну обробку вимірювань, включно з вирівнюванням, перевіркою точності та інтеграцією даних з кількох джерел.

Для оперативного аналізу й порівняння результатів паралельно було проведено знімання тієї ж контрольної точки за технологією RTK. Цей метод

широко застосовується у землепорядних, кадастрових та будівельно-геодезичних роботах, де важлива швидкість отримання результатів із прийнятною точністю.

Послідовність виконання RTK-знімання:

1. GNSS-приймач закріплено на геодезичній вісі (висота антени – 1,5 м) (рис. 4.5).

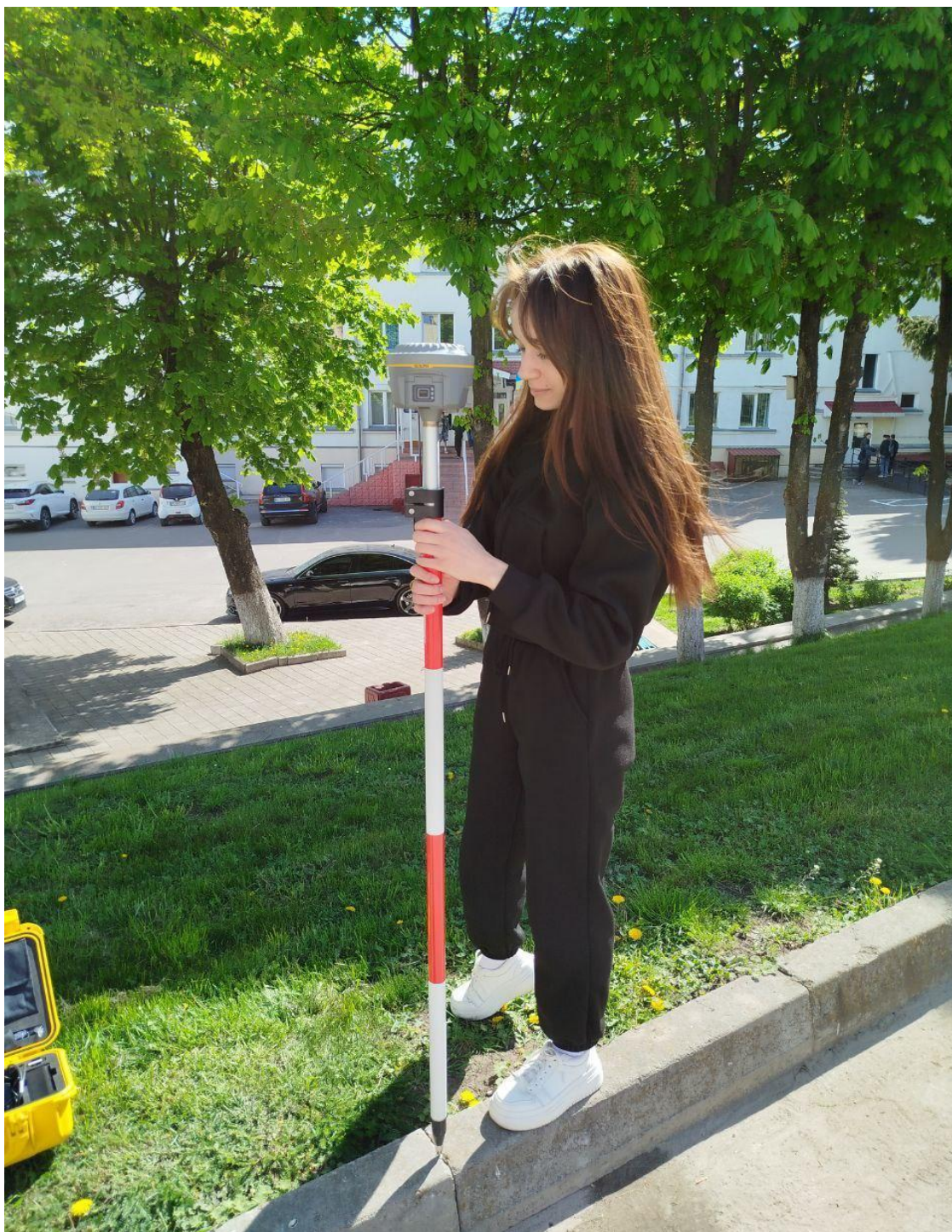


Рис. 4.5. Приймач розташовано на геодезичній вісі

2. Під'єднано контролер до приймача через Bluetooth.
3. У South SurvX обрано режим RTK.
4. Встановлено з'єднання з мережею ПЗС (мережа постійно діючих станцій) через NTRIP-протокол.
5. В якості базової станції використано найближчу референцну станцію, віддалену не більш ніж на 30 км (рис 4.6).

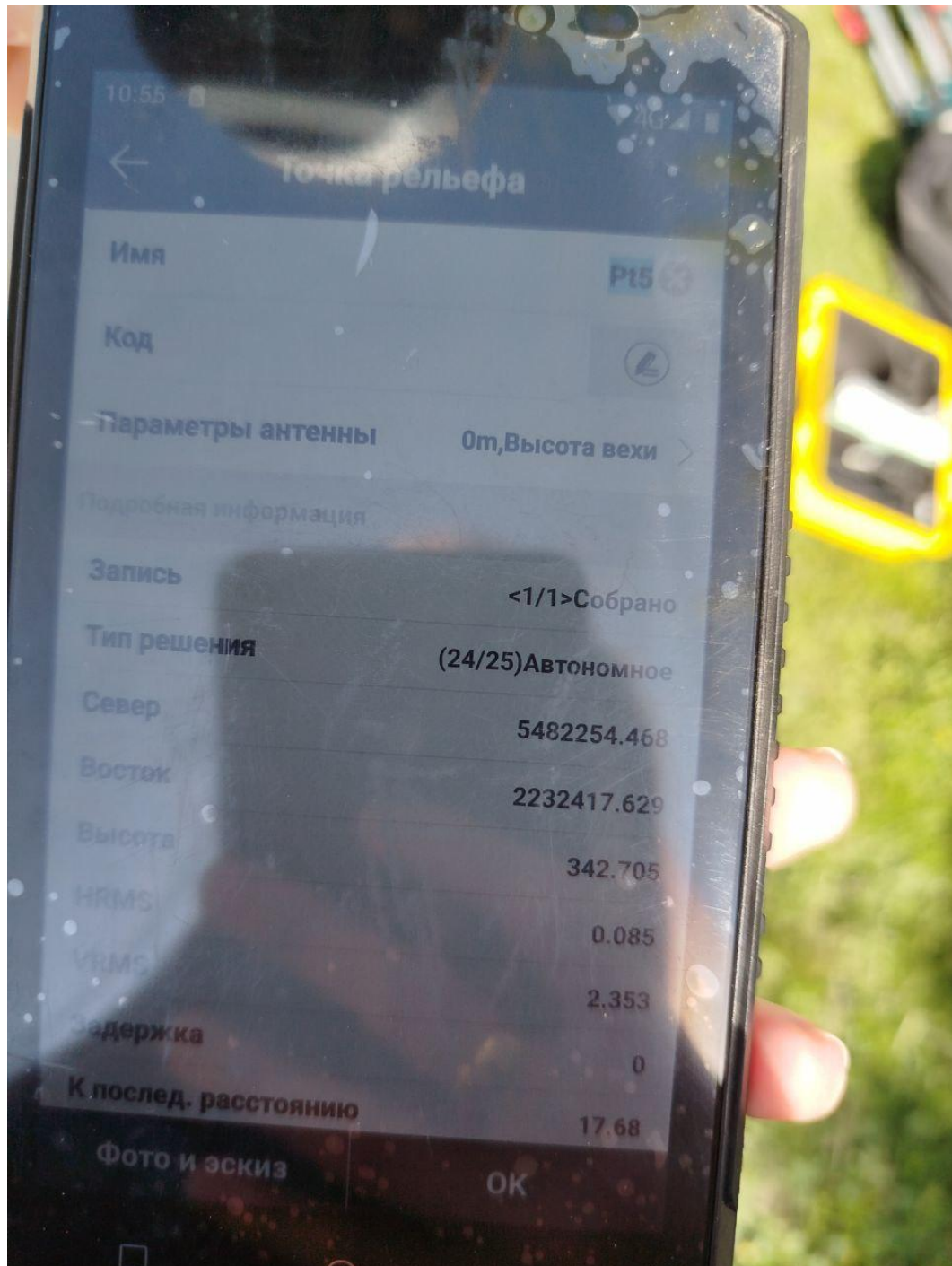


Рис. 4.6. Налаштування RTK-режиму з використанням мережі референцних станцій

6. Після отримання фіксованого рішення координати точки були зафіксовані (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Порівняння результатів знімання

Метод вимірювання	Північ (N, м)	Схід (E, м)	Висота (H, м)
RTK-зйомка	5482254.468	2232417.629	342.705
Статична зйомка	5482251.011	2232419.420	337.834

Як видно з таблиці, розбіжності між координатами, отриманими двома методами, є незначними, особливо в плановому положенні. Найбільша різниця спостерігається у висотній складовій, що є характерним для RTK-методу, який, зазвичай, має дещо гіршу вертикальну точність порівняно зі статичним позиціонуванням. Саме тому статичний метод залишається основним при визначенні висот у рамках точного нівелювання або геодезичних робіт високої категорії точності.

Для підвищення точності результатів і зменшення впливу похибок, зокрема атмосферного походження, я використала дані трьох найближчих постійно діючих GNSS-станцій. Це були:

1. MUK2 (Мукачево);
2. SULP2 (Львів);
3. TER2 (Тернопіль).

Під час підготовчого етапу я скористалась офіційним сайтом EUREF, який надає доступ до перевіреної та оновленої інформації про функціонування постійних GNSS-станцій по всій Європі. Через інтерактивну карту та базу даних ресурсу вдалося знайти потрібні станції, перевірити їхній поточний статус та завантажити точні координати для подальшого використання в обробці. Це дало змогу не лише підтвердити справність і наявність сигналу з обраних референтних точок, а й переконатися, що ці дані є актуальними й придатними для високоточного геодезичного аналізу (рис. 4.7).

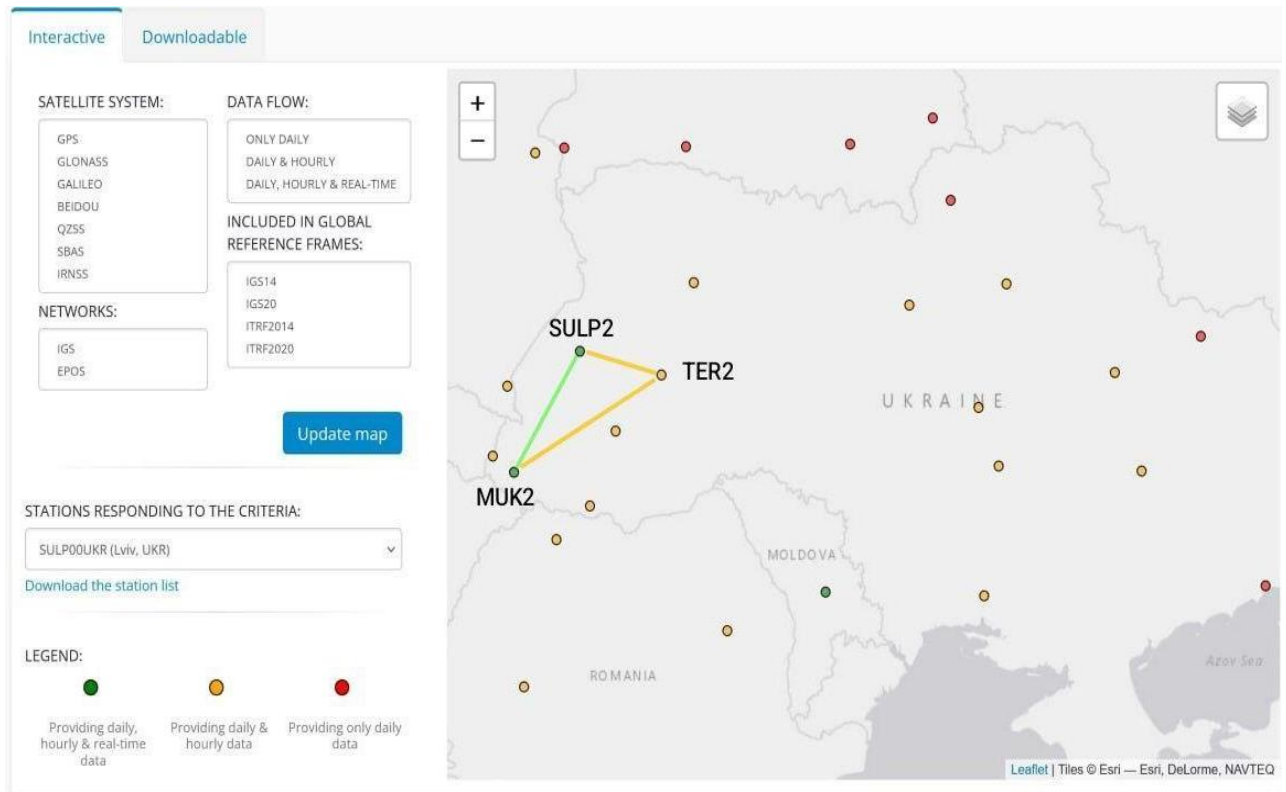


Рис. 4.7. Вибір референтних станцій на основі даних EUREF

У програмі Trimble Business Center я збудувала геодезичну мережу, з'єднавши ці три станції в єдину систему.

У результаті побудови мережі в програмному середовищі чітко видно, що між вибраними референтними станціями сформувалася замкнена геометрична фігура (рис. 4.8). Такий тип структури є надзвичайно важливим у геодезичних побудовах, оскільки забезпечує хорошу просторову конфігурацію, що сприяє рівномірному розподілу похибок і підвищує стійкість результатів. Завдяки цьому значно покращується якість вирівнювання координат під час подальшої обробки. Це забезпечує високу точність та надійність вимірювань у межах досліджуваної території.

Залучення даних з трьох точок дало змогу:

1. Підвищити точність розрахунків координат;
2. Компенсувати вплив локальних похибок, зокрема іоносферних збурень;
3. Забезпечити контроль якості спостережень;
4. Провести перехресну перевірку результатів.

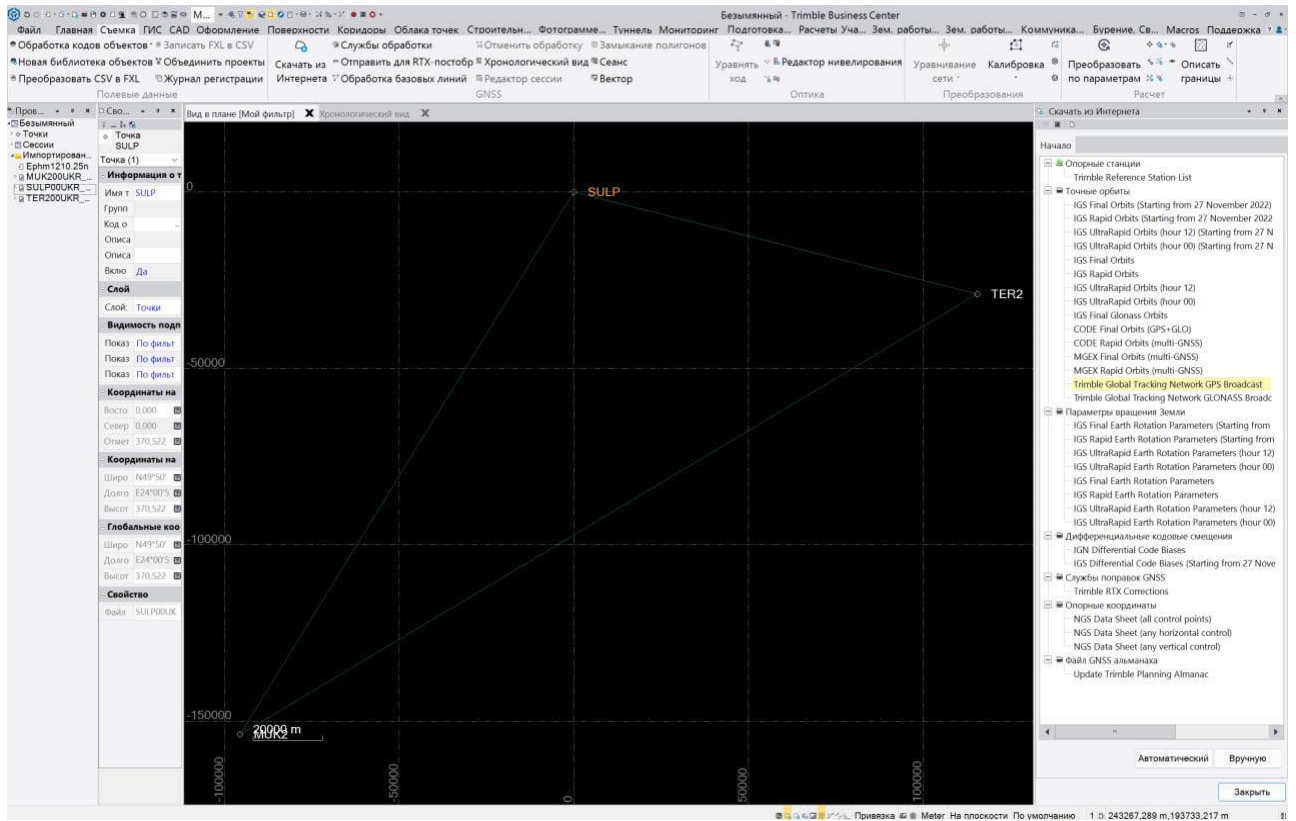


Рис. 4.8. Візуалізація конфігурації GNSS-мережі в Trimble Business Center

Після побудови мережі я виконала вирівнювання (рис. 4.9).

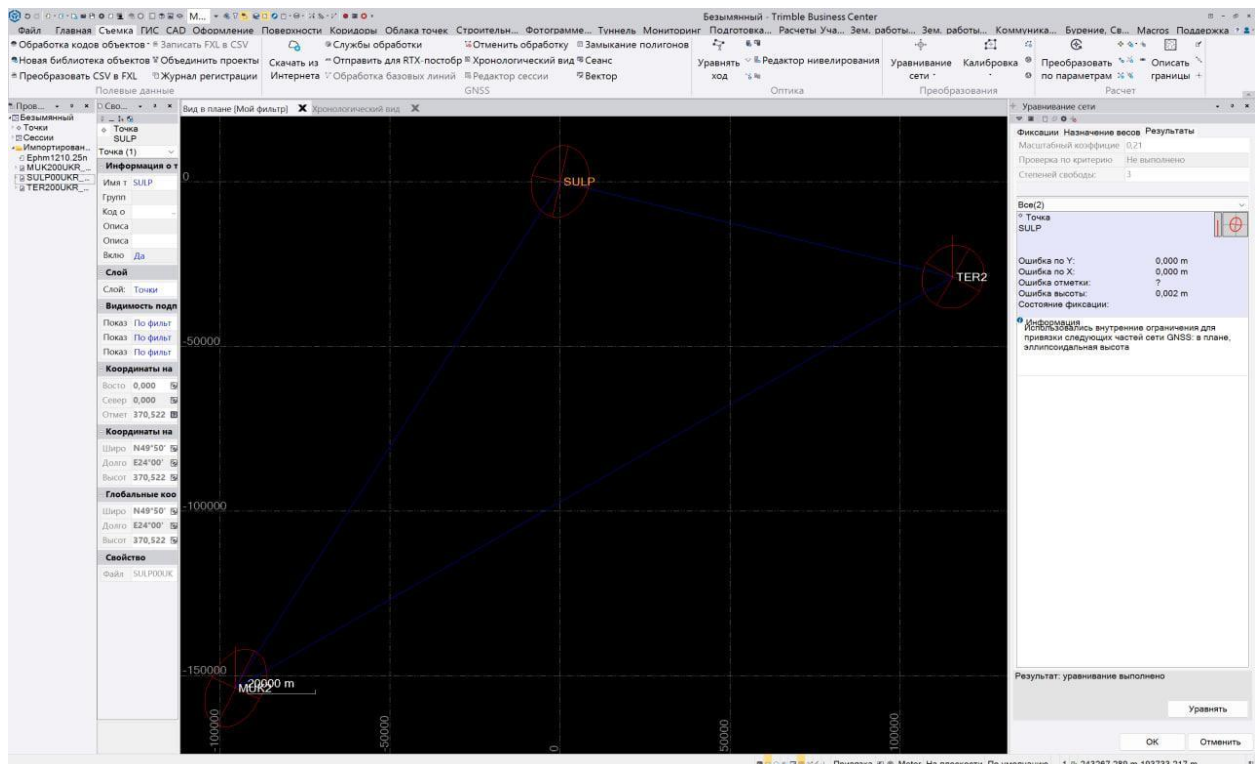


Рис. 4.9. Результати вирівнювання референційної мережі

У вікні з результатами виведено значення похибок по осях X, Y та Z – всі вони в межах 0.002 м, що цілком відповідає вимогам до точного GNSS-знімання. Програма підтвердила, що вирівнювання виконано успішно, а використані фіксовані обмеження дозволили зберегти правильну геометричну форму мережі.

У підсумку мені вдалося отримати точні координати не лише об'єкта спостереження, а й самих референтних станцій у географічній системі координат. Це створює надійну основу для подальших вимірювань і обробки даних (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Результати обробки координат базових станцій у Trimble Business Center

Ім'я точки	MUK2	SULP	TER2
Широта N	48°26'44,86460"	49°50'08,10916"	49°33'52,36728"
Довгота E	22°43'20,57846"	24°00'52,14025"	25°36'36,63842"
Висота Н (м)	170,432	370,522	393,641
Північ Х (м)	-153755,339	0,000	-28922,295
Схід Y (м)	-95588,849	0,000	115432,119
Похибка по висоті (м)	0,003	0,002	0,002
Похибка по широті (м)	0,001	0,000	0,000
Похибка по довготі (м)	0,001	0,000	0,000

Висновки до розділу 4

Проведені геодезичні спостереження підтвердили доцільність і високу ефективність застосування обох основних методів GNSS-знімання – статичного та RTK – у практичній діяльності. Статичний метод виявився особливо ефективним у завданнях, де критично важливо досягти максимальної точності,

зокрема за висотою. Це має принципове значення при створенні опорних геодезичних мереж, перенесенні висот з високим класом точності або при моніторингу деформацій інженерних споруд. Тривалість спостережень та ретельна обробка результатів дозволили отримати координати з міліметровим рівнем точності, що підтверджує надійність методу в складних умовах.

Водночас RTK-знімання продемонструвало себе як незамінний інструмент у ситуаціях, де потрібна швидкість і оперативність. Його застосування дозволило в реальному часі отримувати координати точок з точністю, цілком достатньою для виконання топографічної зйомки, маркування меж земельних ділянок чи проведення польових інженерно-геодезичних робіт. Особливо зручною виявилася можливість миттєвої перевірки результатів на місці.

Залучення кількох референтних станцій через NTRIP-протоколи та використання професійного програмного забезпечення Trimble Business Center дало змогу провести якісну після обробку отриманих даних. Це значно підвищило надійність підсумкових координат, зменшило вплив можливих похибок у полі й забезпечило цілісність результатів вимірювань.

Отримані дані мають практичну цінність і можуть бути безпосередньо використані для створення та уточнення геодезичних мереж, інженерного проєктування, кадастрових робіт, моделювання рельєфу чи побудови цифрових карт. Комплексне використання обох методів дозволяє поєднати переваги точності та швидкості, що в підсумку сприяє підвищенню якості геопросторових досліджень.

ВИСНОВКИ

У процесі підготовки дипломної роботи було здійснено всебічний аналіз основних глобальних навігаційних супутникових систем, методів визначення координат у польових умовах, а також особливостей їх використання в межах землевпорядної діяльності. Сучасна геодезична практика свідчить про те, що GNSS-технології стали незамінним інструментом не тільки для наукових досліджень, а й для вирішення широкого спектра прикладних завдань, пов'язаних з обробкою просторових даних.

У роботі розглянуто чотири ключові системи супутникової навігації – GPS, Galileo, BeiDou та ГЛОНАСС. Кожна з них має свої конструктивні особливості, переваги та специфіку використання. GPS залишається найпоширенішою системою, що демонструє стабільну роботу в різних регіонах. Galileo вирізняється високою точністю та відкритою архітектурою, що робить її привабливою для цивільних користувачів. Азійська система BeiDou активно розвивається, впроваджуючи передові сервіси, зокрема Precise Point Positioning (PPP) і функцію передачі коротких повідомлень. ГЛОНАСС виступає повноцінною альтернативою GPS, хоча її точність може варіюватися залежно від географічного положення. Допоміжні технології, такі як SBAS-системи, QZSS і мережі парманент-станцій, сприяють підвищенню якості позиціювання, особливо в складних умовах прийому сигналу.

Окрему увагу приділено методам знімання координат – зокрема, RTK та статичному способу. RTK-метод дозволяє отримувати координати з точністю до 1–2 см практично в реальному часі, що надзвичайно важливо для кадастрових вимірювань, створення топографічних планів, визначення меж землекористування тощо. Статичний метод, хоч і потребує більше часу на виконання польових робіт та подальшу обробку, забезпечує найвищий рівень точності, що робить його незамінним у побудові опорних геодезичних мереж.

У рамках дипломної роботи було розглянуто також практичні аспекти використання RTK-знімання в умовах польових робіт. Режими FIXED, FLOAT,

Stop & Go та режим усереднення координат дозволяють адаптуватися до різних технічних і природних умов. У місцевостях зі слабким покриттям або складним рельєфом ефективність RTK-технології значною мірою залежить від наявності та якості парманент-мереж, мобільних базових станцій чи технологій віртуальних базових станцій (VRS). Надійність отриманих результатів забезпечується також якісним калібруванням обладнання, стабільним прийомом супутникових сигналів та врахуванням атмосферних завад.

Загалом проведене дослідження засвідчило, що ефективність використання супутникових навігаційних технологій визначається не лише технічними характеристиками апаратури, а й професійною підготовкою фахівця, його вмінням аналізувати умови знімання та правильно обирати методи для виконання конкретного завдання.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що впровадження GNSS-технологій кардинально трансформувало підходи до визначення просторових координат, зробивши ці процеси значно швидшими, точнішими й доступнішими. У сфері землевпорядкування це відкриває нові можливості – від оптимізації польових робіт і зменшення трудомісткості до побудови надійної геоінформаційної основи для прийняття управлінських рішень у просторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ESA. Використання GNSS для моніторингу природних небезпек. URL: <https://www.esa.int>
2. GISGeography. How GPS Receivers Work: Trilateration vs Triangulation. URL: <https://gisgeography.com>
3. GPS World. Inside the Box: GPS and Relativity. URL: <https://www.gpsworld.com>
4. GPS.gov. GPS Accuracy. URL: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
5. Inside GNSS. GLONASS та багатосегментні GNSS-приймачі. URL: <https://insidegnss.com>
6. ISRO. NavIC — Навігаційна система з індійською сукупністю супутників. URL: <https://www.isro.gov.in>
7. Lauer, I. Посібник зі статичних методів GPS/GNSS обстежень. SERC (Carleton College). URL: <https://serc.carleton.edu/download/files/142491>
8. Lee, I.-S., Ge, L. Продуктивність RTK-GPS для обстежень в складних умовах навколишнього середовища. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/241398905>
9. ResearchGate. Швидке визначення магнітуди землетрусів за допомогою GPS для систем попередження цунамі. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228629519>
10. RTK GPS: Розуміння технології реального часу кінематичного GPS. Global GPS Systems. URL: <https://globalgpssystems.com/gnss/rtk-gps-understanding-real-time-kinematic-gps-technology/>
11. Santos, M., Souza, C.B., De Freitas, S. Практична оцінка методу швидкої статичної GPS. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283598410>

12. Sun H., Zhao Y. Навігаційна система BeiDou: сигнали та послуги. Журнал аеронавтики, 2019. – 32(7). – С. 1134–1145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.07.004>
13. Wikipedia. GPS-трекінг тварин. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/GPS\ animal\ tracking](https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_%20animal_%20tracking)
14. Zhang Q., Liu W. Навігаційна супутникова система BeiDou: поточний стан і перспективи на майбутнє. Журнал Journal of Geodesy, 2020. – 94(8). – С. 732–748. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-020-01375-5>
15. Вивчення світу RTK обстежень: докладний посібник. Redhawk Surveying. URL: <https://www.redhawksurveying.com/articles/usage-of-rtk-for-construction-staking/>
16. Геоінформатика. Огляд системи GLONASS та її контрольний сегмент. URL: <https://www.geoinform.org.ua>
17. Геоінформатика. RTK-технологія в кадастрових роботах: принцип дії та особливості застосування. URL: <https://www.geoinform.org.ua/news/rtk-tekhnohiya-v-kadastrovykh-robotakh-pryntsyp-dii-ta-osoblyvosti-zastosuvannia/>
18. Деякі методи GPS обстежень. GEOG 862 - Dutton Institute, Penn State University. URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1792>
19. Кабінет Міністрів Японії. Квазі-зенітна супутникова система (QZSS). URL: <https://qzss.go.jp/en/>
20. Картографія та геодезія. Впровадження RTK для геодезії та землевпорядкування. URL: <https://www.geo-carto.com>
21. Київстар. Київстар та Trimble запускають в Україні високоточний геопозиціонування сервіс на базі CORS-мережі. URL: <https://kyivstar.ua/uk/about/news/kiyivstar-ta-trimble-zapuskayut-v-ukrayini-visokotochnij-geopozitsionuvannya-servis-na-bazi-cors-merezhi>
22. Методи обстежень GNSS: вивчення точності та технік. Global GPS Systems. URL: <https://globalgpssystems.com/gnss/gnss-surveying-methods-exploring-accuracy-and-techniques/>

23. Національне космічне агентство (CNSA). Система BeiDou-3 досягла повного глобального покриття. URL: <http://www.cnsa.gov.cn>
24. Національний координаційний офіс для космічного ПНТ. Застосування технології GPS. URL: <https://www.gps.gov/applications/>
25. Національний центр дистанційного зондування. Огляд BeiDou-1 та BeiDou-2. URL: <http://www.beidou.gov.cn>
26. Обстеження за допомогою GPS та висновок. Міжурядовий комітет з обстежень та картографії (ICSM), Австралія. URL: <https://www.icsm.gov.au/education/fundamentals-mapping/surveying-mapping/surveying-using-gps-and-conclusion>
27. Онлайн навчання GNSS. Використання GNSS у системах точного землевпорядкування. URL: <https://onlinelearninggnss.com>
28. Оцінка та перевірка точності статичного методу GPS при моніторингу горизонтальних деформацій структур. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/360345992>
29. Систем-Солюшнс. RTK (Real Time Kinematic) для землевпорядкування. URL: <https://www.systemsolutions.com.ua/rtk-gps-geodezycheskie-izmereniya/>
30. Центр обслуговування Galileo (GSC). Огляд системи Galileo. URL: <https://www.gsc-europa.eu>
31. Європейська комісія. Galileo: Європейська глобальна навігаційна супутникова система. URL: <https://defence-industry-space.ec.europa.eu>
32. Європейське агентство з GNSS. Огляд служби високої точності Galileo (HAS). URL: <https://www.gsc-europa.eu>
33. Європейське агентство з GNSS. Що таке GLONASS? URL: <https://www.euspa.europa.eu>
34. Європейське космічне агентство (ESA). Galileo: Сукупність навігаційних супутників. URL: <https://www.esa.int>