

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРНОГО
РОЗВИТКУ

КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Рівня вищої освіти «Магістр»

НА ТЕМУ:

«Інтеграція GNSS технологій у процеси встановлення та
відновлення меж земельних ділянок»

Виконав: студент групи ЗВ-63

Напряму підготовки (спеціальності)

193 «Геодезія та землеустрій»

Вагін. М.В.

Керівник: доцент Бочко О.І.

Дубляни- 2025

ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ GNSS-ТЕХНОЛОГІЙ У ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННІ	7
1.1 Сучасні підходи до встановлення та відновлення меж земельних ділянок	7
1.2 Структура GNSS, космічний, наземний та користувацький сегменти	13
1.3 Принцип визначення координат за супутниковими сигналами	16
1.3 Переваги GNSS RTK над традиційними методами геодезичних вимірювань	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ, ПРИРОДНИХ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ GNSS-ВИМІРЮВАНЬ	28
2.1. Види похибок GNSS-вимірювань та методи їх мінімізації	28
2.2 Технічні характеристики та можливості сучасного GNSS-обладнання	37
РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ GNSS-ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОЦЕСИ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ МЕЖ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК	44
3.1 Методика виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж	44
3.2. Методика виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж	49
4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	54
ВИСНОВОК	58
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	60

УДК: 528.44:332.2.021.8

Інтеграція GNSS-технологій у встановлення та відновлення меж земельних ділянок значно підвищує якість кадастрових даних, забезпечує точність і надійність позиціонування, сприяє уникненню конфліктів між землевласниками та створює передумови для формування сучасного цифрового землеустрою. Використання таких технологій є важливим кроком до цифровізації державних кадастрових систем і впровадження сучасної геоінформаційної інфраструктури.

ВСТУП

Сучасні процеси землеустрою та кадастрових робіт вимагають високої точності, оперативності та надійності при визначенні координат поворотних точок земельних ділянок. Традиційні геодезичні методи, базовані на використанні тахеометрів або класичних засічок, не завжди забезпечують необхідну ефективність, особливо в умовах великих територій або складного рельєфу. У зв'язку з цим особливого значення набувають GNSS-технології, які дозволяють здійснювати точне позиціонування в режимі реального часу та забезпечують високу якість геодезичних вимірювань.

Інтеграція GNSS у процеси встановлення та відновлення меж земельних ділянок суттєво вдосконалює роботи, пов'язані з кадастровими процедурами, землеустроєм та моніторингом територій. Використання таких технологій, як RTK, NRTK, DGNS та PPP, дозволяє одержувати координати з точністю від десятків сантиметрів до кількох міліметрів залежно від поставленого завдання. Завдяки цьому забезпечується юридична достовірність меж, спрощується процедура винесення точок у натуру та зменшується ризик виникнення спірних ситуацій між землевласниками. Розвиток GNSS-систем відкриває нові можливості для підвищення ефективності землеустрою, оптимізації витрат часу і трудових ресурсів, а також забезпечує інтеграцію результатів у державні геоінформаційні структури.

Серед GNSS-методів, що застосовуються в кадастровій діяльності, найбільше поширення отримали відносні методи позиціонування — RTK та NRTK, які забезпечують сантиметрову точність у режимі реального часу. Використання мережі постійно діючих станцій дозволяє виконувати польові вимірювання без потреби у власній базовій станції, що значно оптимізує роботу виконавця. DGNS-метод забезпечує дециметрову точність і широко застосовується в умовах, де сантиметрова точність не є критичною. Для завдань високої точності та наукових досліджень застосовують фазові методи з постобробкою, зокрема статику й кінематику, які дозволяють отримати координати з міліметровою точністю.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ GNSS-ТЕХНОЛОГІЙ У ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННІ

1.1. Сучасні підходи до встановлення та відновлення меж земельних ділянок

Встановлення та відновлення меж земельних ділянок є базовою процедурою землепорядкування, що забезпечує юридичну визначеність земельних відносин та формує основу для ведення Державного земельного кадастру. У процесі становлення сучасної системи управління земельними ресурсами значення точного визначення меж набуло особливої актуальності, оскільки якість просторових кадастрових даних прямо визначає ефективність державної реєстрації прав, здійснення містобудівної діяльності, оподаткування, моніторингу та охорони земель.

Протягом останніх десятиліть методи встановлення меж зазнали суттєвої еволюції — від класичних геодезичних вимірювань до застосування високоточних GNSS-технологій, цифрових моделей місцевості та автоматизованих систем обробки просторової інформації. У сучасній практиці підходи до встановлення меж базуються на принципах точності, правової легітимності, технологічної ефективності та узгодженості з національною картографо-геодезичною основою.

Межі земельної ділянки — це лінії, що визначають просторовий обсяг права власності або користування. Відповідно, будь-які помилки у визначенні їхнього положення можуть спричинити правові конфлікти, накладення ділянок, помилкове визначення площі або порушення меж суміжних землекористувачів.

Точність визначення меж обумовлюється такими чинниками:

- методом знімання (тахеометричний, GNSS, комбінований);
- тривалістю спостережень та використовуваним обладнанням;
- наявністю перешкод для прийому сигналу;
- станом геодезичної опорної мережі на території;
- використаною системою координат;

- правильністю обробки результатів.

Сучасні стандарти вимагають отримання координат точок меж із середньоквадратичною похибкою на рівні сантиметрів.

Це можливо лише за умови застосування високоточних технологій та дотримання методичних і нормативних вимог. Хоча сучасні підходи орієнтовані на використання супутникових технологій, традиційні геодезичні методи не втратили актуальності та залишаються важливою складовою практики. У сучасних умовах під час виконання польових геодезичних робіт висуваються підвищені вимоги до оперативності, точності та якості вимірювань. Саме тому виникає необхідність застосування глобальних навігаційних супутникових систем для визначення просторових координат точок.

GNSS-приймачі, встановлені на референтних станціях, характеризуються мультичастотністю (підтримують дві й більше частоти — L1, L2, L5) та здатністю приймати сигнали від систем GPS і ГЛОНАСС. Дані виводяться у стандартних форматах, а самі приймачі оснащуються додатковими технологічними можливостями, такими як вбудовані модулі Bluetooth і GSM, наявність портів RS232, USB тощо.

Виробництвом приймачів для референтних станцій займаються такі компанії, як Trimble, Leica, Sokkia, Topcon. Ці прилади мають від 24 до 440 каналів, підтримують системи GPS, Galileo, а також оснащені технологіями R-Track, NTRIP. Сучасні зовнішні антени мають подібні технічні параметри, проте на відміну від приймачів референтних станцій містять блоки для приймання поправок, герметично вбудовані GSM/GPRS-модеми та модулі бездротового зв'язку Bluetooth.

Роверні GNSS-приймачі обладнані новітніми запатентованими розробками, спрямованими на підвищення точності спостережень, пришвидшення ініціалізації, забезпечення стабільного прийому супутникових сигналів, зменшення впливу мультипасового ефекту та збільшення продуктивності робіт.

Керування роботою зовнішніх антен здійснюється за допомогою контролера або мобільного телефону через кабельний чи бездротовий зв'язок. Контролер слугує накопичувачем даних, пристосований до польового використання, працює на операційній системі та має програмне забезпечення, що забезпечує виконання геодезичних польових робіт.

GNSS-антена призначена для прийому радіосигналів від супутників, які перебувають у зоні видимості приймача. Тип антени впливає на якість та точність прийняття супутникових сигналів. Важливим параметром є фазовий центр антени — точка, від якої відраховуються віддалі до супутників. Її положення прив'язується до геодезичного центру пункту спостережень і має бути стабільним у часі.

За функціональним призначенням антени поділяють на два типи:

- антени, встановлені на референтних станціях;
- компактні геодезичні антени, що працюють у комплекті з роверним приймачем.

Режими визначення планового та висотного положення пунктів залежать від типів використовуваного GNSS-обладнання (приймачів, антен тощо) та від розташування вихідних пунктів геодезичних і GNSS.

Визначення координат у статичному режимі (Static). Для кожної сесії спостережень використовують щонайменше два пункти Державної геодезичної мережі або постійно діючі станції GNSS-мереж. Якщо задіяно лише один вихідний пункт, обов'язково проводять контрольні спостереження на найближчих пунктах геодезичної мережі. Під час статичних спостережень усі приймачі залишаються нерухомими, а спостереження на вихідних і визначуваних пунктах виконуються одночасно для прийому сигналів від однакових супутників.

Після увімкнення GNSS-приймач автоматично проводить тестування, фіксує доступні супутникові сигнали, реєструє дані й формує файл спостережень. Тривалість статичної сесії має становити не менше 30 хвилин за відстані 15–25 км до вихідних або базових пунктів державної геодезичної

мережі чи референтних станцій GNSS-мереж. Уся інформація зі спостережень записується як у прилад, так і до протоколу GNSS-спостережень.

Швидкостатичний метод є порівняно новою технологією, розробленою протягом останніх років, яка дала змогу суттєво підвищити продуктивність GNSS-знімання. Його відмінність від псевдостатичного режиму полягає в тому, що для визначення координат точок достатньо одного відвідування пунктів, причому тривалість спостережень становить усього 5–10 хвилин, незалежно від відстані між опорним та визначуваним пунктом.

Спочатку цей метод був доступний лише для двочастотних приймачів, що працювали з P-кодovими сигналами. Проте із розвитком технологій деякі сучасні одночастотні GNSS-приймачі також можуть застосовуватися у швидкостатичному режимі.

Режим RTK (Real Time Kinematic) є найбільш продуктивним та оперативним способом визначення координат у польових умовах. Його принцип полягає у тому, що диференційні GNSS-поправки передаються з базової станції на роверний приймач у режимі реального часу через канали бездротового зв'язку. Отже, оброблення даних після завершення спостережень не потрібне — координати визначаються безпосередньо під час виконання вимірювань.

Основні переваги RTK-регіму:

- можливість визначення координат у межах зони покриття мобільної мережі, де доступні GSM або GPRS сигнали, а також за наявності альтернативних каналів виходу в Інтернет;
- виконання робіт безпосередньо у будь-якій необхідній системі координат;
- усунення ризику грубих помилок на вихідних пунктах завдяки жорсткому закріпленню антени на постійно діючій станції GNSS-мережі;
- можливість безперервного контролю точності у процесі вимірювань;

- зменшення витрат на обладнання, оскільки немає потреби встановлювати власну базову станцію — достатньо одного комплекту роверного приймача;

- скорочення витрат на транспорт та персонал, можливість роботи одним оператором;

- значне підвищення продуктивності, адже координати пункту можна отримати за кілька секунд;

- відсутність необхідності післяпольової обробки базових ліній та урівноваження мережі;

- можливість застосування додаткових сервісів постобробки — обробка сирих даних RINEX, використання віртуальної базової станції (VRS), автоматизована обробка результатів та оцінка точності на сервері мережі (AutoPP, QC);

- доступність даних цілодобово, 24/7;

- комплексне використання переваг GNSS-мережі: у випадку недоступності каналів зв'язку координати можуть бути визначені у статичному режимі (Static) з подальшою постобробкою у спеціалізованому програмному забезпеченні.

GNSS являє собою комплексну інфраструктуру, що включає сукупність орбітальних навігаційних супутників із глобальним охопленням, наземні контрольні станції та системи диференціальної корекції. Її функціонування забезпечує можливість визначення географічного положення, відстаней, напрямків, швидкості руху та локального часу користувачького приймача в будь-якій точці земної поверхні чи в повітряному просторі. Отримання цих даних здійснюється шляхом обробки навігаційних сигналів, які надходять від супутників.

Особливе значення у геодезичній практиці мають кінематичні методи GNSS-вимірювань — RTK (Real Time Kinematic) та PPK (Post-Processed Kinematic). Їх застосування дозволяє виконувати знімання великої кількості точок протягом мінімального проміжку часу, досягаючи високої точності:

орієнтовно 1 см + 2 ppm у плані та 2 см + 2 ppm за висотою. Активне впровадження цих технологій в Україні стало можливим завдяки розбудові мережі постійно діючих GNSS-станцій [17].

Українська мережа постійно діючих GNSS-станцій охоплює державні, міжнародні та комерційні системи (станом на 2022 рік), серед яких:

- станції Головної астрономічної обсерваторії НАН України;
- станції мережі System.NET, дані яких передаються до міжнародних систем IGS та EPN через Операційний центр ГАО НАН України;
- станції Системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України, спостереження яких також надсилаються до EPN;
- GNSS-станції, що більше не перебувають в управлінні ГАО;
- станції, які були демонтовані або тимчасово припинені [18].

RTK (Real-Time Kinematic — кінематичне визначення координат у реальному часі) — це метод високоточної супутникової зйомки, за якого мобільний приймач отримує корекційні дані й визначає свої координати майже миттєво, забезпечуючи сантиметрову точність у режимі реального часу.

Для роботи цього методу застосовується два типи приймачів:

- базовий приймач, установлений на пункті з відомими координатами;
- ровер, який використовується безпосередньо для виконання вимірювань у полі.

Базова станція може бути власною, обладнаною UHF-радіомодемом або GSM-модемом, або ж ровер може отримувати корекційні дані від мережі сторонніх базових станцій, які керуються спеціалізованими службами. У такому разі зв'язок здійснюється через Інтернет із використанням протоколу NTRIP, а передавання поправок на ровер відбувається через GSM/GPRS-модем (див. рисунок 1.1).



Рис. 1.1 GNSS South Galaxy G9 база + ровер Trimble

Для забезпечення коректної роботи RTK-знімання необхідно виконати початкову ініціалізацію системи та підтримувати її стабільність протягом усього періоду вимірювань. До роботи можуть одночасно підключатися кілька роверних приймачів, кожен з яких отримує корекційні дані від однієї й тієї самої базової станції. Фіксація та визначення координат точок здійснюються в обраній системі координат, зокрема в Українській системі координат УСК-2000.

1.2 Структура GNSS, космічний, наземний та користувацький сегменти

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) складаються з трьох взаємопов'язаних сегментів — космічного, наземного та користувацького. Їхня узгоджена робота забезпечує можливість точного визначення координат у будь-якій точці Землі та в будь-який час. Кожен сегмент виконує свої функції, але тільки у поєднанні вони формують цілісну навігаційну систему, здатну задовольняти потреби геодезії, землевпорядкування, транспорту, навігації та наукових досліджень.

Космічний сегмент включає орбітальне угруповання навігаційних супутників, які передають сигнали з точним часом та навігаційними даними.

Супутники рухаються на середньовисотних орбітах і забезпечують глобальне покриття та можливість точного позиціонування.

Порівняльна характеристика GNSS систем

Таблиця 1.1

Система	Кількість супутників	Висота орбіти (км)	Період обертання	Особливості
GPS	24–32	≈20 200	≈11 год 58 хв	Найпоширеніша у світі
GLONASS	24	≈19 100	≈11 год 15 хв	3 орбітальні площини
Galileo	24–30	≈23 200	≈14 год	Висока точність
BeiDou	35	21 500–36 000	різний	МЕО, GEO, IGSO супутники

Наземний сегмент складається зі станцій моніторингу, командних станцій та головного центру керування. Він забезпечує підтримку точності орбіт, оновлення навігаційних повідомлень і контроль роботи супутників. Важливим компонентом також є мережі референцних станцій, які формують корекційні дані для високоточного RTK/NRTK позиціонування.

Ефективність GNSS визначається узгодженою роботою всіх трьох сегментів. Космічний сегмент генерує сигнали, наземний контролює та коригує їх, а користувачський приймає, обробляє та перетворює у навігаційне рішення. Будь-які похибки в одному із сегментів впливають на кінцеву точність, що особливо важливо під час виконання кадастрових та геодезичних робіт. Саме така багаторівнева структура забезпечує GNSS високу точність, надійність і глобальність.

Контрольний сегмент (рис. 3) являє собою комплекс наземних засобів, які забезпечують повноцінне функціонування навігаційної системи, здійснюють постійний нагляд за її роботою та виконують безпосереднє управління супутниковим угрупованням. Основою цього сегмента є система оперативного контролю OCS (Operational Control System) Міністерства оборони США. До її складу входить шість станцій безперервного моніторингу супутників, головна станція управління та три додаткові.

Моніторингові станції розташовані в різних частинах світу: Колорадо-Спрінгс, Флориді, а також на островах Гаваї, Вознесіння, Дієго-Гарсія та Кваджелейн. Кожна з них обладнана водневими стандартами частоти та приймачами, що працюють із Р-кодом. Через кожні 1,5 секунди ці станції вимірюють псевдовідстані до всіх супутників системи NAVSTAR, які перебувають над горизонтом, визначають атмосферні впливи та передають на головну контрольну станцію уточнені дані, вже скориговані на іоносферну та тропосферну рефракції та усереднені за 15 хвилин.

Станції управління зазвичай розташовані на тих самих територіях, що й моніторингові пункти. Головна станція керування знаходиться в Колорадо-Спрінгс і має спеціальний канал зв'язку з Службою часу Морської астрономічної обсерваторії США у Вашингтоні, атомні еталони якої використовуються для контролю системного часу GPS. На головній станції обробляються всі дані спостережень, що надходять від станцій моніторингу, уточнюються орбіти супутників, прогнозуються їх параметри на майбутній період, а також оцінюється технічний стан кожного космічного апарата та системи загалом. На рисунку 1.2 показано основні користувацькі сегменти системи GNSS.

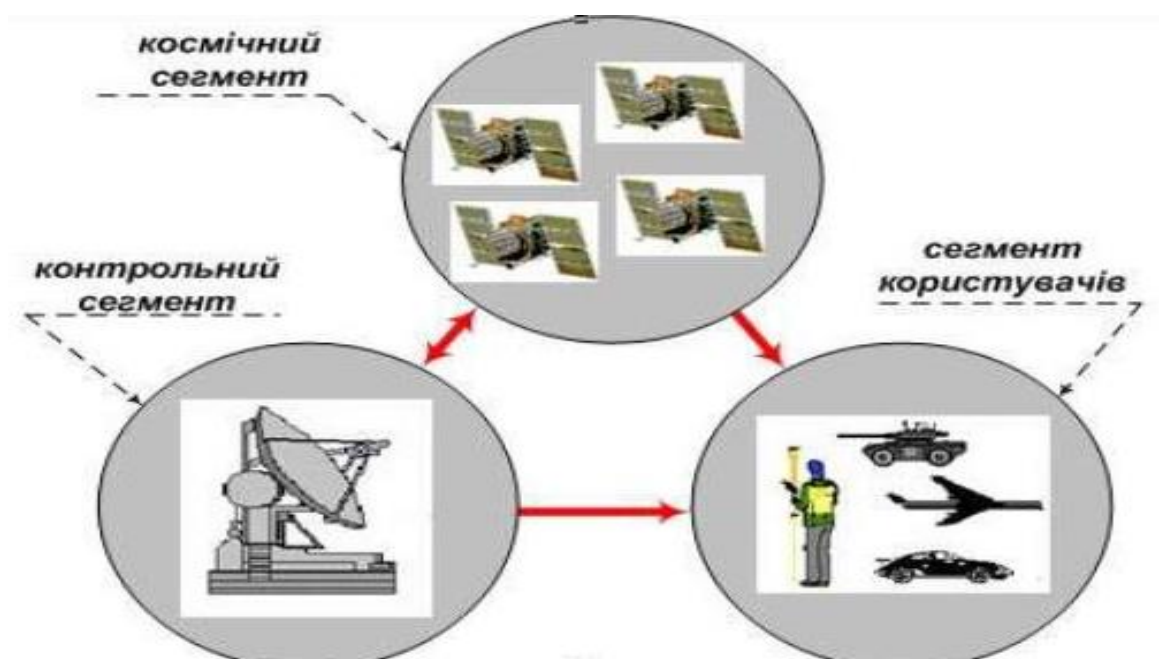


Рисунок 1.2 Основні сегменти системи GNSS

Користувацький сегмент включає широкий спектр операторів та автоматизованих станцій, які за допомогою спеціалізованих приладів — приймачів GPS-сигналів — визначають у конкретний момент координати свого розташування, навігаційні параметри транспортних засобів, а також здійснюють корекцію часу. Кількість приймачів, що можуть працювати одночасно, необмежена. Визначення координат відбувається в глобальній геоцентричній системі WGS-84, яка за своїми параметрами близька до референцної системи GRS-80, тоді як відлік часу ведеться у шкалі часу GPS.

Багато міжнародних компаній виготовляють GPS-приймачі різного призначення та конструкції — від компактних туристичних моделей до високоточних геодезичних приладів, які застосовуються у геодезії, геодинаміці та службах точного часу. За своєю будовою та принципом функціонування GPS-приймач є сучасним електронним реєструвальним пристроєм, подібним до телекомунікаційних приладів.

Типовий приймач складається з кількох основних блоків: антенного, радіочастотного (вимірювального), контрольного модуля з дисплеєм і панеллю керування, обчислювального блока з процесором і програмним забезпеченням, блока пам'яті (жорсткий диск обсягом близько 2,5 МБ та змінні магнітні накопичувачі на 2, 4, 8 або 20 МБ), а також джерела електроживлення. Серед виробників геодезичних GPS-приймачів можна назвати такі фірми, як Trimble, Texas Instruments (TI), Leica, Topcon, Sokkia та інші. Моделі приймачів відрізняються між собою кількістю радіочастотних каналів, числом робочих несучих частот (одно- або двочастотні), а також набором установлених кодів.

1.3 Принцип визначення координат за супутниковими сигналами

Сучасна інженерна геодезія вже немислима без використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), які кардинально змінили традиційні підходи до визначення координат і висот точок на земній поверхні. Застосування супутникових технологій забезпечує суттєве підвищення

точності, оперативності та загальної ефективності геодезичних вимірювань порівняно з класичними методами.

Застосування ГНСС відкрило можливість вирішення широкого спектра геодезичних завдань — від створення опорних геодезичних мереж і моніторингу деформацій інженерних споруд до геодезичного супроводу будівництва, виконання землепорядних робіт та високоточного картографування. У курсі особливий акцент робиться на порівнянні супутникових і традиційних методів вимірювань, їх поєднанні для підвищення достовірності результатів, а також на аналізі факторів, що впливають на точність супутникових спостережень у різних умовах.

Принцип визначення координат за супутниковими сигналами базується на вимірюванні відстані від приймача до кількох супутників, місцезнаходження яких відоме. Відстань обчислюється шляхом множення часу проходження сигналу (виміряного за допомогою псевдовипадкового коду) на швидкість світла. Для точного визначення позиції потрібно як мінімум чотири супутники: три для визначення тривимірних координат (широта, довгота, висота) та четвертий для корекції похибок часу приймач.

GNSS являє собою супутникову навігаційну систему, призначену для визначення просторового положення об'єктів, тобто їхніх координат. Сучасні навігаційні технології дають змогу не лише встановлювати місцеположення, а й визначати напрямок руху об'єкта та його швидкість. Наразі близько двохсот організацій по всьому світу здійснюють збір GNSS-даних з базових станцій та входять до складу IGS (International GNSS Service), яка є структурною частиною Міжнародної асоціації геодезії. Сьогодні функціонує шість глобальних навігаційних систем які зокрема представлені на рисунку 1.3

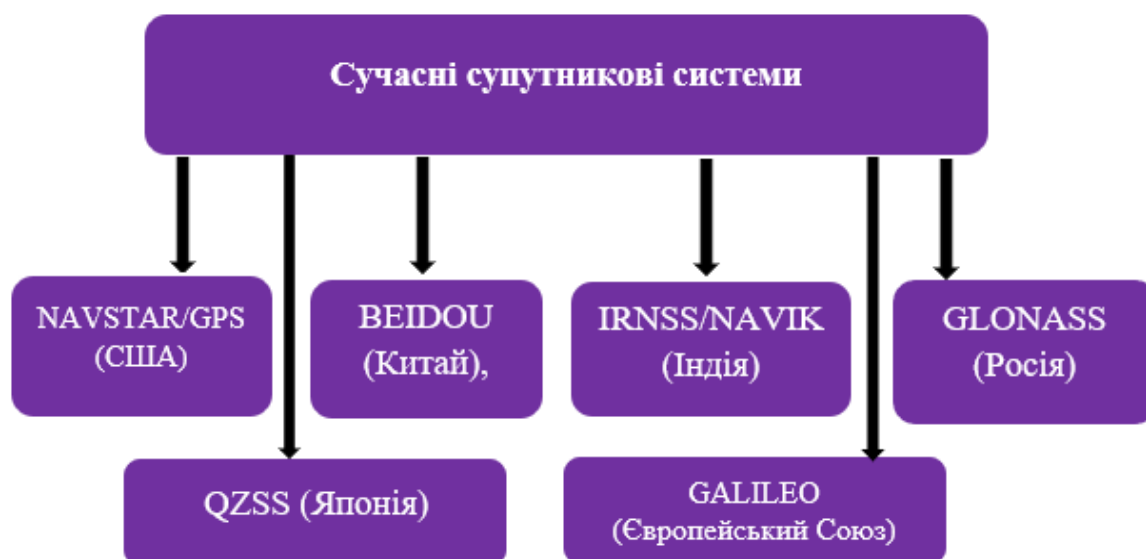


Рисунок 1.3 Сучасні супутникові системи

Кожна із супутникових систем має власні технічні особливості. Окрім того, що розробниками є різні країни, супутники цих систем розташовані на різних висотах орбіт, які варіюються приблизно від 19 до 36 тисяч кілометрів. Від висоти орбіти залежить і період обертання супутника навколо Землі, тому для кожної системи він є індивідуальним.

Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) працюють на основі принципу трилатерації, який полягає у визначенні просторового положення об'єкта шляхом вимірювання відстаней до кількох супутників. Кожен супутник передає специфічний радіосигнал, що містить інформацію про час його випромінювання та параметри орбіти. Приймач, розташований на поверхні Землі, фіксує ці сигнали, визначає затримку їхнього проходження та, використовуючи швидкість світла, обчислює відстань до кожного супутника.

Для отримання точних координат необхідно приймати сигнали щонайменше від чотирьох супутників. Вимірювання від трьох супутників дозволяють визначити положення точки у тривимірному просторі — широту, довготу та висоту, під час коли дані від четвертого супутника дають змогу компенсувати похибку часу внутрішнього годинника приймача. Чим більше супутників доступні одночасно, тим точнішим буде визначення координат.

Робота ГНСС урахує низку зовнішніх факторів, що здатні впливати на точність позиціонування. До них належать іоносферні й тропосферні затримки, багатоприменовість сигналу та неточності у визначенні орбіт супутників. Новітні супутники обладнуються високоточними атомними годинниками та удосконаленими антенними системами, що забезпечує ще більшу надійність і точність навігаційних визначень.

Геодезичні параметри Землі 1990 року (ПЗ-90) охоплюють сукупність основних астрономічних і геодезичних констант, єдину геоцентричну систему координат (ЄСК), моделі гравітаційного поля Землі, подані у вигляді коефіцієнтів розкладу геопотенціалу за сферичними функціями та системами точкових мас, каталоги висот квазігеоїда над загально-земним еліпсоїдом, а також параметри зв'язку ЄСК з національною референційною системою координат 1942 року (СК-42).

Система ПЗ-90 була сформована на основі комплексного аналізу спостережень геодезичних супутників серії Гео-ІК, які включали доплерівські вимірювання, радіотехнічні далекомірні спостереження та лазерне дальномірювання. Додатково використовувалися дані про висоти супутників над рівнем моря та результати їх фотографування на фоні зоряного неба. У процесі визначення параметрів також застосовували радіотехнічні та лазерні вимірювання відстаней до супутників систем ГЛОНАСС і ЕТАЛОН, а також гравіметричні спостереження, виконані як на суходолі, так і в акваторії Світового океану.

Згідно з визначенням, система координат ПЗ-90 є геоцентричною прямокутною просторовою системою, початок якої розташований у центрі мас Землі. Вісь Z орієнтована у напрямку до СІО відповідно до рекомендацій IERS, вісь X спрямована до точки перетину площини екватора з нульовим меридіаном, визначеним ВІН, а вісь Y утворює праву систему координат, доповнюючи дві попередні осі. Система координат ПЗ-90 закріплена на земній поверхні за допомогою координат 33 пунктів Супутникової геодезичної мережі (СМР). Середньоквадратична похибка прив'язки системи ПЗ-90 до

центру мас Землі становить приблизно 1–2 м, а точність відтворення взаємного положення пунктів оцінюється на рівні близько 0,3 м при середніх відстанях між ними у 1,5–2 тис. км, що відповідає точності приблизно до сьомого знака у відносному вираженні.

Геодезичні параметри Землі 1990 року (ПЗ-90) охоплюють набір основних астрономічних та геодезичних констант, єдину геоцентричну систему координат (ЄСК), моделі гравітаційного поля Землі, подані у вигляді коефіцієнтів розкладу геопотенціалу за сферичними функціями та системами точкових мас, каталоги висот квазігеоїда відносно загальноземного еліпсоїда, а також параметри взаємозв'язку ЄСК з національною референцною системою координат 1942 року (СК-42).

1.4 Переваги GNSS RTK над традиційними методами геодезичних вимірювань

Супутникова навігаційна система (англ. Global Navigation Satellite Systems, GNSS) — це комплекс, створений для визначення місцеположення наземних, водних і повітряних об'єктів за їхніми географічними координатами. Такі системи дають змогу також оцінювати швидкість та напрям руху приймача сигналу, а в деяких випадках — отримувати високоточний час. GNSS зазвичай складається з космічного сегмента, наземної інфраструктури керування та обладнання користувачів. Нині повноцінне та безперервне глобальне покриття забезпечують лише дві системи — GPS і ГЛОНАСС.

Космічний сегмент кожної навігаційної системи включає супутники, що рухаються навколо Землі. Їхні орбіти розраховані так, щоб у будь-якій точці планети в будь-який момент часу було видно щонайменше чотири супутники. Саме така кількість є мінімально необхідною для визначення тривимірних координат — широти, довготи та висоти.

Контрольний сегмент складається зі станцій спостереження, головного центру керування та основної станції управління. Станції спостереження

безперервно приймають і передають сигнали супутникам, визначаючи відстань до них. Вони також здійснюють метеорологічне зондування атмосфери, щоб скоригувати вплив тропосфери на сигнали. Оброблені дані передаються до головного центру керування, де обчислюються ефемериди супутників на найближчі 12 годин. Після цього інформація надсилається на супутники, а ті — на приймачі користувачів. Основна станція управління може вносити корективи в орбіти супутників за потреби.

Високоточне GNSS-позиціонування має ключове значення для виконання сучасних геодезичних і маркшейдерських робіт. Метод RTK забезпечує визначення координат із сантиметровою точністю в режимі реального часу, однак результативність цього підходу значною мірою залежить від якості та стабільності мережі корекційних станцій. На сьогодні існують як комерційні, так і безкоштовні RTK-мережі, проте питання їх порівняльної точності у польових умовах досі вивчене недостатньо. Вивчення наукових публікацій та джерел, що стали основою дослідження, демонструє інтенсивний розвиток супутникових технологій позиціонування та підкреслює значущість аналізу точності RTK- і PPK-методів у сучасній геодезичній практиці. Сучасні геодезичні, картографічні та інженерні роботи дедалі частіше вимагають високоточного визначення координат у режимі реального часу. GNSS-технології, особливо метод RTK, широко використовуються для отримання сантиметрової точності безпосередньо під час польових вимірювань. Водночас рівень досягнутої точності значною мірою залежить від якості та надійності обраної мережі корекційних сигналів.

Метод RTK базується на диференційному визначенні координат у режимі реального часу, що здійснюється за участю двох GNSS-приймачів — базового та роверного. Базова станція встановлюється на точці з точно відомими координатами та виконує синхронні з ровером спостереження фаз несучих сигналів і псевдовідстаней до супутників. Порівняння отриманих спостережень із відомими координатами бази дає змогу обчислити поправки,

які передаються роверному приймачу через радіоканал або мережеве інтернет-з'єднання.

Отримані поправки компенсують основні похибки супутникових вимірювань, зокрема іоносферні та тропосферні затримки, а також неточності супутникових годинників, що дозволяє RTK-технології забезпечувати сантиметровий рівень точності у реальному часі. Однією з ключових процедур методу є оперативне визначення цілих фазових неоднозначностей, що забезпечує швидке отримання координат у заданій системі.

Для надійної роботи RTK необхідна безперервна передача поправок із частотою не менше 1 Гц. Важливим фактором, що впливає на точність, є відстань між базовим і роверним приймачами: зі збільшенням базової лінії точність зменшується через накопичення некорельованих похибок, передусім іоносферних. За звичайних умов у межах дистанції до 30 км типова точність RTK становить близько $8 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ у плані та приблизно $15 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ за висотою (СКП) [4].

Для підвищення ефективності та доступності високоточного GNSS-позиціонування були створені мережі референцних станцій, які працюють у безперервному режимі й передають користувачам корекційні дані. Залежно від масштабів охоплення та функціонального призначення такі мережі поділяють на глобальні чи континентальні, що переважно використовуються для наукових і навігаційних задач, а також на регіональні та локальні, орієнтовані на практичне застосування у сфері землеустрою, будівництва, транспорту та інших галузях. Некомерційні мережі зазвичай створюються державними або науково-дослідними організаціями та надають дані безкоштовно або за пільговими умовами. Одним із прикладів є континентальна мережа європейського союзу, GALILEO, що включає понад 300 безперервно функціонуючих станцій по всій Європі.

Геодезичний GPS-приймач — це радіоприймальний пристрій, що забезпечує визначення географічних координат точки, де розташована антена,

на основі аналізу часових затримок радіосигналів, тобто шляхом точного вимірювання часу їх проходження.

Сучасний геодезичний GPS-комплект зазвичай містить три ключові компоненти:

- приймач — основний модуль, який отримує супутникові сигнали, обробляє їх і зберігає результати у внутрішній пам'яті або на зовнішньому носії;
- антена — елемент, що приймає та передає радіосигнали;
- контролер — пристрій для керування функціями приймача та налаштування параметрів роботи [3].

За точністю супутникові приймачі поділяють на такі групи:

- навігаційний клас — похибка визначення координат становить приблизно 150–200 м;
- картографічний та GIS-клас — точність у межах 1–5 м;
- геодезичний клас — точність до 1 см (у кінематичному режимі 1–3 см, у статичному — до 1 см) [4].

Під час роботи з GNSS-приймачами зазвичай застосовують кінематичний метод. У цьому режимі використовуються фазові вимірювання від щонайменше чотирьох спільних супутників для базової станції та ровера. Щоб отримати сантиметрову точність, необхідно провести ініціалізацію вимірювань, яка може виконуватися різними способами:

Для одностотних приймачів ініціалізація здійснюється шляхом встановлення ровера на точці з відомими координатами або на спеціальній штанзі, що створює фіксовану штучну базову лінію.

Для двочастотних приймачів у режимі реального часу ровер встановлюють на контрольній точці або на пункті з відомими координатами. Якщо пристрій підтримує безперервну ініціалізацію й у полі зору є щонайменше п'ять спільних супутників, процес ініціалізації виконується автоматично під час руху ровера.

Для двочастотних приймачів із постобробкою OTF ініціалізація проводиться незалежно від того, чи передбачена вона вбудованими функціями приймача. Якщо кількість спільних супутників під час роботи зменшується до менш ніж чотирьох, після їх повторної появи (чотири або більше) процес ініціалізації потрібно виконати знову [5].

Традиційні методи геодезичних вимірювань охоплюють комплекс класичних інструментальних технологій, що сформували основу геодезії задовго до появи супутникових систем позиціювання. До них належать нівелювання, тахеометрична зйомка, теодолітні ходи, полігонометрія, триангуляція та трилатерація. Ці способи базуються на вимірюванні кутів, відстаней і висот з використанням оптичних або електронних приладів, що потребує ретельної організації польових робіт, забезпечення точних умов візування та значних часових затрат. Наприклад, нівелювання використовується для визначення перевищень між точками місцевості і передбачає встановлення нівеліра на рівній поверхні, наведення на рейки та послідовні відліки — процес, який вимагає стабільності інструмента, високої кваліфікації виконавця і достатнього часу. Тахеометричне знімання, дає змогу визначати положення точок у просторі, також потребує прямої видимості між тахеометром і віхою, точного наведення та повторних вимірювань для мінімізації похибок. У свою чергу, теодолітні та полігонометричні ходи передбачають побудову мережі взаємопов'язаних точок, де на кожній станції вимірюються горизонтальні й вертикальні кути, а також відстані, після чого дані обробляються шляхом урівноваження, що додатково збільшує тривалість камеральних робіт.

Тахеометричне знімання, або тахеометрія (від грец. — «швидке вимірювання»), застосовується для створення топографічних планів, на яких відображаються об'єкти місцевості, її контури та рельєф. Під час таких робіт планове положення точок визначають полярним методом, а їхні висоти — за допомогою тригонометричного нівелювання, тобто нівелювання нахиленим променем. Для кожної точки при одному наведенні виконують низку

вимірювань: фіксують горизонтальний кут між заданим напрямком і напрямком на точку, де встановлено рейку; визначають відстань від теодоліта до цієї точки за допомогою ниткового віддалеміра; а також вимірюють кут нахилу візирного променя відносно горизонту. Для проведення тахеометричного знімання використовують різноманітне геодезичне обладнання, серед якого оптичні й електронні теодоліти, електронні тахеометри, нівелірні рейки, геодезичні та телескопічні віхи з відбивачами для електронних тахеометрів, світловіддалеміри й відповідні насадки, лазерні рулетки, сталеві або капронові рулетки та землемірні стрічки. Наземне тахеометричне знімання виконують з точок опорної геодезичної мережі та пунктів теодолітних ходів. На відміну від теодолітної зйомки, тахеометрична передбачає не лише фіксацію ситуації, а й детальне відтворення рельєфу місцевості. Зазвичай її виконують у масштабах від 1:500 до 1:5000 для створення планів порівняно невеликих територій.

До недоліків цього методу належить те, що під час камеральної обробки виконавець не має змоги бачити реальні об'єкти місцевості, оскільки працює лише з польовими матеріалами, що робить неможливим виявлення деяких помилок, допущених під час знімання. Водночас тахеометричне знімання має суттєві переваги: воно забезпечує високу продуктивність і дозволяє працювати практично на будь-якому рельєфі. Метод особливо ефективний для витягнутих вузьких ділянок, таких як дороги, русла річок, канали та інші подібні об'єкти. На рисунку 1.4 показано електронний тахеометр TOPCON.



Рисунок 1.4 Електронний тахеометр TOPCON

Тахеометричне знімання застосовують переважно для створення планів з горизонталями, які використовуються під час проєктування житлових будівель, автомобільних і залізничних доріг, гідротехнічних споруд, промислових об'єктів та інших інженерних конструкцій. Головною особливістю цього виду знімання є детальне відтворення рельєфу місцевості. На основі отриманих даних складають плани з горизонталями у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Максимальна відстань від приладу до рейкової точки залежить від обраного масштабу: для масштабу 1:5000 вона становить 300 м, для 1:2000 — 200 м, для 1:1000 — 150 м, а для 1:500 — 100 м.

Похибки, що виникають через спрощення у виведенні тахеометричних формул, навіть за найскладніших умов (коли кут нахилу становить 45° і постійна с дорівнює 0,50 м), не перевищують 10 см як у плановому, так і у висотному положенні. Проте значні помилки можуть з'являтися через нахил рейки. Саме тому її необхідно встановлювати за допомогою круглого рівня: чим більший ухил місцевості, тим точніше потрібно виставляти рейку у вертикальному положенні.

Складність традиційних методів полягає в тому, що вони вимагають кількох учасників — мінімум оператора приладу та візирувальника з віхою, а інколи й більшої команди залежно від масштабу робіт. Крім того, будь-які природні або техногенні перешкоди, такі як будівлі, густі насадження, рельєфні перегини, можуть унеможливити візування та змусити геодезистів змінювати схему знімання або встановлювати додаткові проміжні точки. Традиційні інструменти мають також обмежений робочий радіус: вимірювання обмежуються прямою видимістю, а точність зменшується із збільшенням відстані. Камеральна обробка результатів займає значний час, передбачає перевірку замикань, урівноваження ходів і детальний контроль точності.

Попри високу надійність та точність, традиційні методи є трудомісткими, повільними, менш мобільними та більш залежними від умов місцевості й людського фактора. Саме тому розвиток GNSS-технологій став суттєвим

проривом: сучасні супутникові системи дозволяють отримувати ті самі геодезичні результати набагато швидше та з меншими ресурсними витратами, тоді як традиційні методи сьогодні застосовуються переважно у випадках, де GNSS працює недостатньо ефективно — наприклад, у щільній забудові, тунелях, під кронами дерев або при високих вимогах до вертикальної точності.

GNSS RTK має низку істотних переваг над традиційними геодезичними методами. Ця технологія забезпечує визначення координат у реальному часі з сантиметровою точністю, що дозволяє значно прискорити польові роботи та виконувати вимірювання швидше, ніж під час використання теодолітів чи тахеометрів. На відміну від класичних інструментів, RTK не потребує прямої видимості між точками, тому може застосовуватися в міських умовах, на пересіченій місцевості та великих територіях з перешкодами. Крім того, для роботи достатньо одного оператора з роверним приймачем, що зменшує потребу в персоналі і знижує витрати. Технологія дозволяє проводити вимірювання на великих відстанях — від десятків до кількох десятків кілометрів, особливо при використанні мережі постійних станцій. GNSS RTK також зменшує кількість помилок, пов'язаних з людським фактором, адже не потребує візування, а координати передаються безпосередньо у цифрові системи, що спрощує подальшу обробку та інтеграцію у GIS чи CAD. Завдяки мобільності, точності та швидкості роботи метод підвищує безпеку під час вимірювань і дозволяє працювати у важкодоступних або небезпечних зонах.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ, ПРИРОДНИХ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ТОЧНІСТЬ GNSS-ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Види похибок GNSS-вимірювань та методи їх мінімізації

Глобальна супутникова навігаційна система (GNSS) — це узагальнена назва для будь-якого супутникового угруповання, що забезпечує послуги визначення координат, навігації та синхронізації (PNT — positioning, navigation, timing) у глобальному або регіональному масштабі.

Хоча GPS є найпоширенішою ГНСС у світі, різні держави створюють власні навігаційні системи, формуючи додаткові й незалежні можливості для отримання PNT-даних.

Технології визначення координат за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем активно впроваджуються в різні сфери діяльності та суттєво впливають на розвиток суспільства. Особливо важливу роль відіграють високоточні системи позиціонування, що базуються на фазових вимірюваннях навігаційних сигналів і дають змогу визначати взаємне положення об'єктів з максимальною точністю.

Такі системи широко застосовуються у таких напрямках:

- високоточний моніторинг деформацій, зсувів і коливань інженерних споруд (мостів, гребель, веж, висотних будівель та інших складних конструкцій);
- контроль зміщень земної поверхні у сейсмічно активних районах, зонах вічної мерзлоти, на ділянках, схильних до зсувів та інших геодинамічних процесів;
- геодезичний супровід територіального планування, розмітки земельних ділянок, будівництва доріг та інших об'єктів.

Сучасні супутникові навігаційні системи працюють на основі віддалемірних визначень між навігаційними супутниками та приймачем користувача. Це означає, що разом із навігаційним сигналом споживач

отримує дані про просторове положення супутників у момент передавання сигналу. Паралельно та синхронно приймач виконує вимірювання відстаней до кожного з них. Принцип визначення віддалей базується на обчисленні різниці часу проходження сигналу від супутника до приймача порівняно з сигналом, який генерує власна апаратура користувача.

На рисунку 1.1 подано схематичне зображення визначення просторового положення споживача з координатами x, y, z на основі віддалемірних спостережень до чотирьох навігаційних супутників. Яскравими кольоровими лініями позначено кола, центри яких відповідають положенню супутників, а їхні радіуси дорівнюють дійсним відстаням між супутниками та приймачем. Натомість лінії тьмянішого кольору відображають кола з радіусами, що відповідають вимірним дистанціям; ці величини відрізняються від реальних значень, тому їх називають псевдовіддалями.

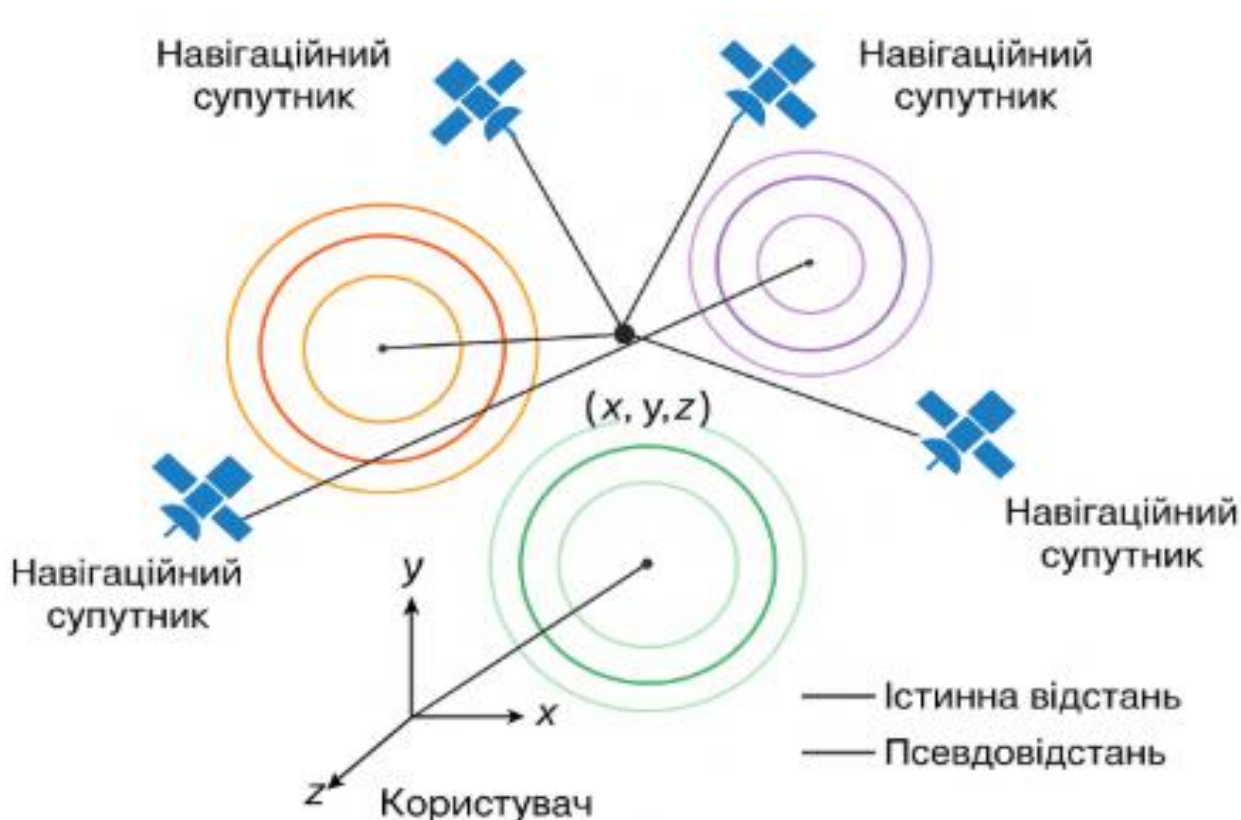


Рисунок 2.1 Визначення просторового положення точки на

Конструктивний строк експлуатації GPS-супутників становить близько десяти років. Однак для підтримання працездатності всього угруповання у випадку непередбачених відмов на орбіті перебувають резервні апарати, які можуть бути оперативно введені в роботу.

Живлення супутників забезпечується за рахунок сонячних батарей. Їхні панелі, які мають довжину близько 5 метрів, генерують приблизно 700 Вт потужності — цього достатньо як для функціонування систем супутника, так і для заряджання його акумуляторів під час перебування у зоні сонячного освітлення.

Оскільки частину орбіти супутник проходить над темною півкулею Землі, коли сонячні панелі не виробляють електроенергії, акумулятори повинні підтримувати його роботу в цей період. Тому під час освітлення Сонцем панелі мають генерувати енергію не лише для забезпечення роботи бортових систем, а й для відновлення запасів у батареях [9].

Тривалість зберігання навігаційного повідомлення залежить від модифікації супутника та може становити від 14 днів до максимально 210 днів із поділом на 4-годинні або 6-годинні інтервали. Альманах являє собою скорочений набір параметрів ефемерид: він містить 7 із 15 орбітальних характеристик та використовується для прогнозування орієнтовного положення супутника, а також для швидкого вибору потрібного навігаційного сигналу.

Крім того, у межах роботи системи здійснюється аналіз стану супутників, визначаються псевдовідстані, проводяться вимірювання різниці ходу сигналів на віддалених моніторингових станціях. Це дає змогу виявляти необхідні корекції супутникових годинників, ефемерид та даних альманаху. Для виконання всіх цих функцій контрольний сегмент системи включає три основні компоненти: головну контрольну станцію (MCS), мережу моніторингових станцій і наземні антени.

Основна контрольна станція (MCS), що розташована на авіабазі Фолкон у місті Колорадо-Спрінгс, є центром управління всією системою.

Моніторингові станції здійснюють пасивне спостереження за супутниками, коли ті перебувають у зоні видимості, виконують вимірювання псевдовідстаней і похибок. Ці вимірювання базуються на сигналах GPS L1 та L2. Отримані дані, включно з навігаційною інформацією та місцевими метеорологічними спостереженнями, передаються до MCS через захищені супутникові та наземні канали зв'язку.

До MCS надходять усі результати спостережень, які використовуються для оцінювання орбітальних параметрів супутників, корекцій годинників, а також для формування оновлених ефемерид і альманахів для кожного супутника. У свою чергу, моніторингові станції оснащені двочастотними приймачами (L1/L2), що забезпечують безперервні вимірювання псевдовідстаней та похибок. Координати фазового центру їхніх антен визначено з високою точністю. Для формування єдиного шкального часу GPS на станціях також використовують два цезієві атомні годинники.

Отримані вимірювання застосовуються в алгоритмах фільтра Калмана, який оновлюється кожні 15 хвилин для уточнення параметрів позиції, швидкості та часу (PVT) кожного супутника. Така регулярність забезпечує високу точність визначення його ефемерид та зміни ходу бортового годинника. Оскільки навігаційні дані повинні бути відомими наперед, в MCS здійснюється прогнозування положення супутників і часових поправок на основі детальних моделей руху та впливу навколишнього середовища.

Наземні антени забезпечують керування супутниками та завантаження службової інформації й навігаційних даних. Саме вони здійснюють передачу телеметрії, відстеження та команд (TT&C). Для кожного супутника формується окремий набір TT&C-даних, який включає навігаційне повідомлення. Ця інформація передається з MCS до наземної антени, де зберігається до моменту проходження супутника над станцією. Передавання здійснюється у S-діапазоні, після чого дані завантажуються на борт навігаційного супутника для подальшої трансляції користувачам.

Всі супутники обладнані атомними годинниками, які забезпечують синхронізацію всіх бортових операцій, зокрема формування навігаційного сигналу. Незважаючи на їх високу стабільність, у навігаційному повідомленні передбачаються спеціальні параметри корекції, оскільки різниця між бортовим часом супутника та еталонним часом GPS може досягати 1 мс [21]. Варто зазначити, що відхилення в 1 мс спричиняє похибку визначення псевдовідстані приблизно на 300 км. Головна контрольна станція (MCS) обчислює необхідні поправки до бортових годинників і передає їх супутникам для подальшої трансляції користувачам у складі навігаційного повідомлення.

Приймачі GNSS, у свою чергу, оснащені менш точними годинниками, що також зумовлює появу похибок під час визначення псевдовідстаней. На рисунку продемонстровано, як неточність ходу годинника впливає на результати обчислення псевдовідстаней та кінцеве визначення координат приймача. Позначення P1, P2, P3 відповідають супутникам, а дуги відображають проєкції сфер з центром у точці розташування супутника та радіусом, що дорівнює розрахованій псевдовідстані.

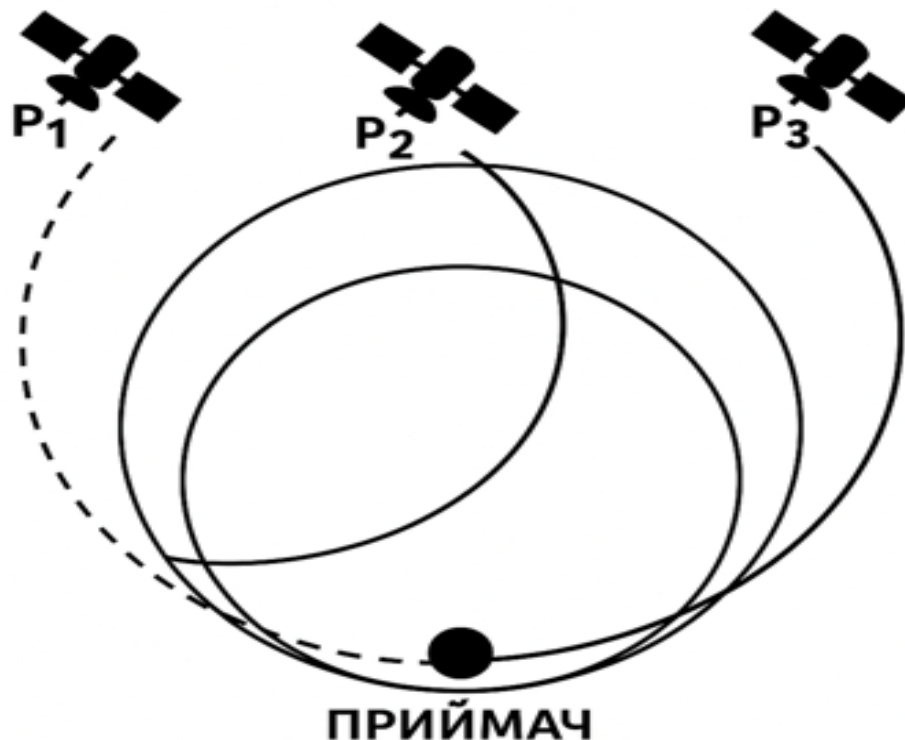


Рисунок 2.2 Вплив похибки годинника на визначення псевдовіддалі.

Компоненти похибок ефемерид, що проявляються вздовж траєкторії руху супутника (повздовжній напрям) та у перпендикулярному до неї напрямку (поперечний або перехресний), є значно більшими за інші. Контрольному сегменту складно спостерігати ці похибки за допомогою наземних станцій моніторингу, оскільки вони майже не змінюють лінію прямої видимості між супутником і пунктом спостереження на Землі. З тієї ж причини користувач також не відчуває суттєвого впливу таких помилок у процесі визначення координат. Сумарна ефективна похибка псевдовідстаней чи фазових вимірювань, спричинена неточностями прогнозованих ефемерид, становить приблизно 0,8 м.

Похибка багатопроменевості виникає в ситуаціях, коли антена приймача розташована поряд із великими відбивними поверхнями — наприклад, поблизу водойми, будівлі чи металевих конструкцій. У таких умовах сигнал супутника, прямуючи до приймача, може частково відбиватися від навколишніх об'єктів і надходити до антени із запізненням, що спричиняє додаткові похибки вимірювань.

Поки приймач здатен відстежувати прямий сигнал (який завжди прибуває раніше за його відбиті копії), вплив багатопроменевості залишається незначним. Проте відбиті сигнали — як від близьких, так і від віддалених поверхонь — можуть надходити із затримками тривалістю від кількох десятків до сотень наносекунд. Такі копії змінюють форму кореляційної функції між прийнятим (сумарним) сигналом та локально сформованим кодом у приймачі. Окрім цього, вони спотворюють фазу отриманого сигналу, що призводить до помилок у визначенні псевдовідстаней та довжини хвилі несучої. Оскільки багатопроменеві похибки відрізняються для сигналів різних супутників, це впливає на точність визначення координат, швидкості та часу.

Затінення — це значне ослаблення сигналу, яке виникає під час проходження прямої хвилі крізь перешкоди, наприклад, крону дерев, конструкції будівель або щільні матеріали. У деяких випадках при багатопроменевості рівень прийнятої потужності може виявитися навіть

більшим, ніж під час затінення прямого шляху [18]. Таке явище спостерігається на вулиці, як зображено на рисунку 1.4.

У крайніх випадках шлях прямого сигналу може бути настільки сильно ослабленим, що приймач здатен фіксувати лише відбиті багатопроменеві сигнали.

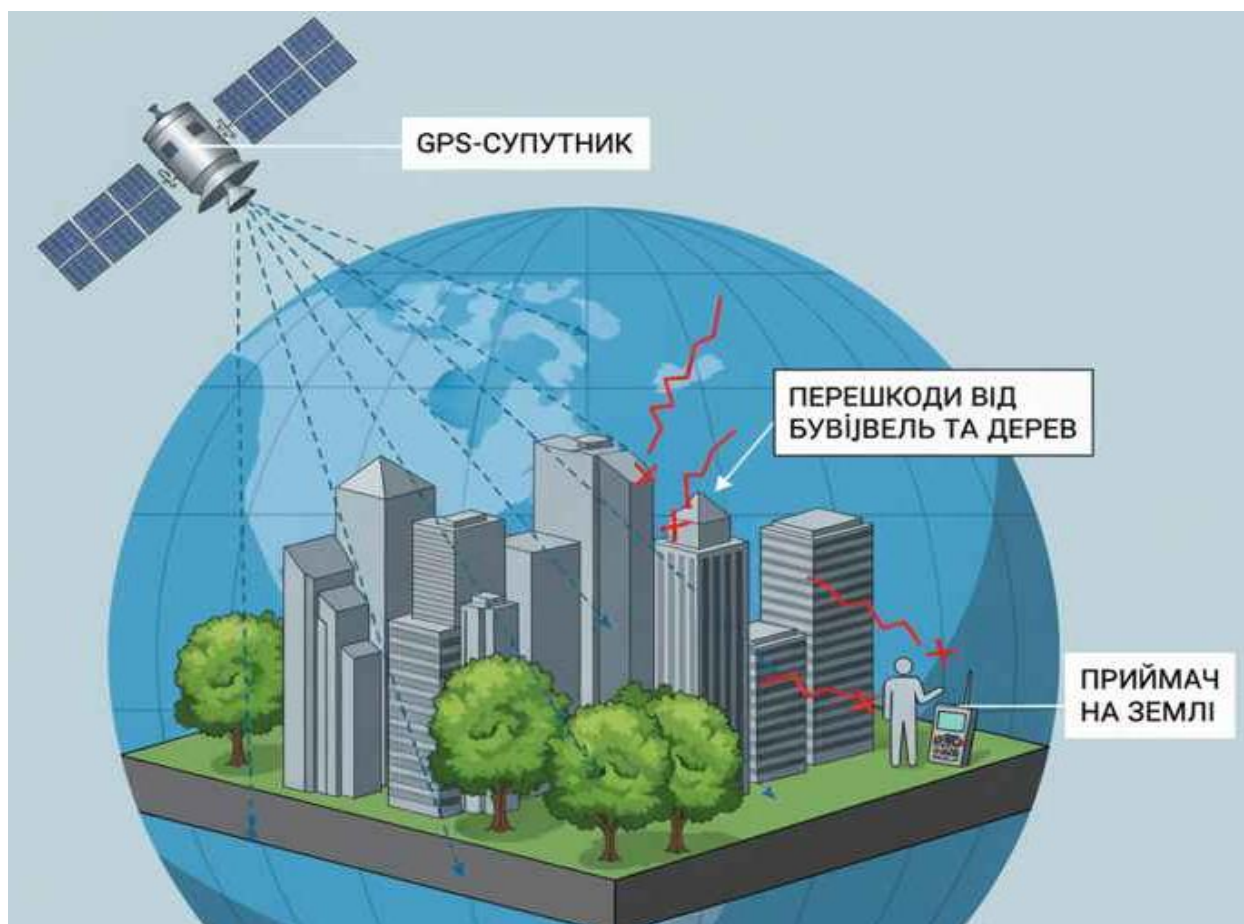


Рисунок 2.3 Похибка багатопроменевості

Похибка, що виникає внаслідок багатопроменевого поширення сигналу, визначається величиною затримки відбитих компонент, а також їх потужністю та фазою несучої щодо прямого сигналу. Якщо відбитий сигнал має значно меншу потужність порівняно з прямим, його вплив на форму прийнятого сигналу є мінімальним, а відповідно й похибка залишається незначною. Фазовий зсув відбитої хвилі відносно прямої також суттєво впливає на обсяг і характер спотворень, які вона вносить.

Під час проходження супутникового сигналу крізь атмосферу його швидкість зменшується, оскільки повітря має дещо вищий показник заломлення (приблизно 1,0003 [11]). У середньому це зумовлює уповільнення сигналу приблизно на 0,03%. Водночас неоднорідна структура атмосфери, особливо іоносфери, спричиняє нерівномірне зменшення швидкості поширення сигналу.

Цей вплив є мінімальним, коли супутник розташований майже вертикально над приймачем, і зростає для супутників, що перебувають ближче до горизонту, оскільки шлях сигналу через атмосферу стає довшим. Після визначення приблизного місцезнаходження приймача за псевдовідстанями допускається використання математичних моделей для оцінювання середньої величини атмосферної затримки. Проте такі моделі не завжди здатні точно відтворити повний ефект іоносферного впливу.

Набагато точнішим методом компенсації іоносферних похибок є застосування двочастотних вимірювань. Оскільки іоносферна затримка впливає на мікрохвильові сигнали залежно від частоти (дисперсійний ефект), різниця затримок на двох частотах дає змогу обчислити величину дисперсії та визначити затримку для кожної частоти окремо.

Інший спосіб корекції полягає у порівнянні визначеної приймачем позиції з точно відомими координатами контрольного пункту. Оскільки іоносферні ефекти змінюються відносно повільно, середнє значення затримки може бути використане для корекції інших приймачів у межах тієї самої території.

Системи супутникового підсилення (SBAS), зокрема WAAS (Північна Америка та Гаваї), EGNOS (Європа та частина Азії) та MSAS (Японія), забезпечують передавання іоносферних поправок через супутниковий канал. Системи наземного підсилення (GBAS) передають корекційні дані локально через радіопередавач безпосередньо на приймач.

Вологість у тропосфері також спричиняє додаткові похибки, подібні до іоносферних затримок. Однак цей вплив є більш локальним, характеризується

швидшими змінами i , на відміну від іоносферного ефекту, не залежить від частоти сигналу.



2.4 Вплив положення супутника на шлях крізь іоносферу та тропосферу

Під час поширення радіосигналів GNSS (GPS, GLONASS, Galileo тощо) від супутника до приймача вони проходять крізь різні шари атмосфери. Найбільший вплив на точність визначення координат спричиняють іоносфера та тропосфера, оскільки в цих шарах радіохвилі змінюють швидкість і напрямок поширення.

Іоносфера є дисперсним середовищем, тобто швидкість проходження сигналу залежить від частоти хвилі. Тому сигнали L1 і L2 сповільнюються по-різному. Це призводить до:

- збільшення часу поширення сигналу,
- викривлення хвильового фронту,
- зростання похибки псевдовідстаней.

Чим нижчий кут над горизонтом, тим довший шлях сигналу в іоносфері — і тим більша похибка.

Тропосфера — найнижчий шар атмосфери (до 10–12 км), що містить більшість пари та газів.

На відміну від іоносфери, тропосфера не є дисперсною для GNSS-сигналів. Це означає, що ефект затримки не залежить від частоти.

На затримку впливають:

- атмосферний тиск,
- температура,
- вологість,
- кількість водяної пари.

2.2 Технічні характеристики та можливості сучасного GNSS-обладнання

Сучасне GNSS-обладнання — це високоточні багатосистемні та багаточастотні приймачі, здатні забезпечувати сантиметрову точність визначення координат у реальному часі завдяки підтримці RTK-технологій, мережових корекцій, потужних антен та інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів.

У сучасній практиці виконання польових геодезичних робіт висуваються дедалі вищі вимоги до оперативності, точності та якісної надійності вимірювань. Це зумовлює активне впровадження у виробничі процеси новітніх технологій і технічних засобів, що забезпечують швидке та високоточне визначення координат. Саме тому проєктно-вишукувальні, земельно-кадастрові й будівельні організації все частіше застосовують інструменти на основі глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) [5].

Протягом останнього десятиліття супутникові технології позиціонування зазнали суттєвого розвитку: удосконалено апаратне забезпечення, алгоритми обробки сигналів, підвищено точність та розширено сфери їх застосування. На зміну традиційним GPS-спостереженням прийшли методи високоточного

позиціювання в реальному часі, зокрема кінематичне знімання у режимі реального часу — RTK (Real Time Kinematic). Завдяки впровадженню сучасних технічних рішень RTK-технологія за останні кілька років стала ключовим інструментом у високоточних геодезичних вимірюваннях.

RTK забезпечує визначення координат пунктів за кілька секунд із точністю 1–2 см на відстанях до 100 км від активної референцної станції — постійної GNSS-станції зі стабільно визначеними координатами [7]. Водночас користувач отримує можливість у польових умовах не лише виконувати типові геодезичні задачі, а й контролювати якість вимірювань, аналізувати хід робіт та оперативно виявляти пропущені або недостатньо відпрацьовані ділянки. Перевагою є й те, що дані, отримані в режимі RTK, як правило, не потребують додаткової камеральної обробки, оскільки корекції застосовуються безпосередньо під час вимірювання.

Для роботи в RTK-режимі користувачеві необхідне відповідне технічне забезпечення, основою якого є роверний двочастотний мультиканальний GNSS-приймач, який отримує корекційні дані від референцної станції. Комплект обладнання зазвичай включає GNSS-приймач (ровер) та польовий контролер або портативний комп'ютер. Як і прийнято в сучасних дослідженнях, подальший аналіз стосується саме роверних приймачів, припускаючи, що мережа референчних станцій вже функціонує.

Одним із ключових аспектів ефективного RTK-знімання є отримання корекцій у реальному часі через мережу Інтернет від референцної станції або центру обробки мережових даних. Для цього приймач повинен бути оснащений GSM/GPRS-модемом. Раніше широко застосовувалися радіомодеми, однак цей спосіб мав суттєві недоліки: необхідність прямої радіовидимості між приймачем і станцією, обмеженість дальності дії та потреба в отриманні дозволів на використання радіочастот. З розширенням покриття GSM-мереж у Європі, зокрема в Україні, GPRS-зв'язок став основним каналом передавання RTK-поправок, забезпечивши стабільну й якісну роботу методики RTK у різних умовах [18].

Що стосується технічних можливостей сучасних GNSS-приймачів, то, як правило, всі фірми-виробники дають однакові характеристики щодо точності, часу ініціалізації, формату отриманих поправок тощо. На ринку сьогодні працює досить багато фірм, які спеціалізуються на виготовленні обладнання саме для геодезичних робіт. Вибрати якийсь один продукт конкретної фірми та стверджувати, що він найкращий, досить важко, адже передусім користувачеві необхідно визначитись зі складностями виконання майбутніх робіт, а також купівельною спроможністю. Було здійснено практичне порівняння одночасно різних GNSS-приймачів у RTK-режимі було [15].

Сучасні роверні GNSS-приймачі мають загалом ті самі технічні характеристики, що й приймачі, встановлені на референцних станціях, проте їхньою ключовою відмінністю є наявність спеціального модуля для приймання корекційних даних, вбудованого герметичного GSM/GPRS-модема та бездротового інтерфейсу Bluetooth. У подальшому розгляді зосереджено увагу саме на тих моделях роверів, які оснащені GSM-модемом і підтримують Bluetooth-зв'язок.

Більшість сучасних роверних приймачів комплектуються новітніми технологічними рішеннями, розробленими та запатентованими провідними виробниками обладнання, такими як R-Track (Trimble), SmartTrack+ (Leica), Co-Op Tracking (Topcon). Ці системи спрямовані на підвищення точності вимірювань, пришвидшення ініціалізації, покращення стабільності приймання супутникових сигналів, зменшення впливу багатопроменевості та збільшення загальної ефективності польових робіт. Роверні приймачі розраховані на роботу в різноманітних кліматичних умовах, оскільки мають високий ступінь захисту від пилу, бруду та вологи, а також широкий температурний діапазон експлуатації — від -30°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Точність визначення координат у режимі RTK становить:

$\pm 10 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ у плановому положенні;

$\pm 20 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ за висотою.

Одночастотні GNSS-приймачі, на відміну від двочастотних, суттєво обмежені за своїми можливостями та не забезпечують належної точності й надійності роботи в RTK-режимі, тому їх використання для високоточних знімань є небажаним.



Порівняльна таблиця				
Модель		A631	C631	S631
Число каналів		800+		
Тип антени				
Отримані сигнали	GPS	+	+	+
	GLONASS	+	+	+
	Atlas	+	+	+
	SBAS	+	+	+
	BeiDou	+	+	+
	Galileo	+	+	+
	QZSS	+	+	+
	IRNSS	-	+	+
Точність позиціонування				
RTK	RMS (67%)	8 мм + 1 ppm		
	2DRMS (95%)	15 мм + 2 ppm		
SBAS (WAAS)	RMS (67%)	0,3 м		
	2DRMS (95%)	0,6 м		
Atlas (H10)	RMS (67%)	0,04 м		
	2DRMS (95%)	0,08 м		
Автономний, без SA	RMS (67%)	1,2 м		
	2DRMS (95%)	2,5 м		

Таблиця порівнює моделі A631, C631 і S631 за кількістю каналів (усі понад 800), підтримкою супутникових систем (усі приймають GPS, GLONASS, Atlas, SBAS, BeiDou, Galileo та QZSS, тоді як IRNSS підтримують лише C631 і S631) та за точністю позиціонування: у режимі RTK точність становить 8 мм + 1 ppm (RMS) і 15 мм + 2 ppm (95%), у SBAS — 0,3 м і 0,6 м відповідно, у режимі Atlas H10 — 0,04 м і 0,08 м, а в автономному режимі — 1,2 м і 2,5 м.



Технічні характеристики моделей

Параметр	QS8	Q88	V30	V60	V90 Plus	V100
Число каналів	120				220	
Bluetooth	+	+	+	+	+	+
Тип антени			вбудована			
Телеметрія GSM	+	+			+	+
Телеметрія UHF	—			опція		
GPS	+	+	+	+	+	+
GLONASS	+	+	+	+	+	+
SBAS	+	+	+	+	+	+
Galileo			опція			
BeiDou	+	+	+	+	+	+
QZSS	—	—	—	—	—	—

У таблиці наведено порівняння шести GNSS-приймачів: QS8, Q88, V30, V60, V90 Plus та V100. Модель QS8 має 120 каналів, тоді як V90 Plus — 220 каналів; для інших моделей кількість каналів не вказана. Усі приймачі підтримують Bluetooth, що дає змогу під'єднувати їх до

контролерів чи інших пристроїв. Модель V30 має вбудовану антену, тоді як у решти тип антени не уточнено. Телеметрія GSM доступна в моделях QS8, Q88, V90 Plus і V100, забезпечуючи можливість роботи через мобільний зв'язок. Телеметрія UHF відсутня в QS8, є опційною у V60, а для інших моделей інформація не зазначена. Усі моделі підтримують основні навігаційні системи GPS, GLONASS, SBAS і BeiDou. Система Galileo доступна лише в V30 як опція.

Сучасне GNSS-обладнання — це високоточні багаточастотні приймачі, які одночасно працюють із глобальними супутниковими системами GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou та SBAS, забезпечують сантиметрову точність завдяки RTK і PPK-технологіям, підтримують різні канали зв'язку, включно з GSM, LTE, UHF, Wi-Fi, Bluetooth і NTRIP, інтегруються з інерційними модулями IMU для стабільної роботи без вирівнювання віхи, мають інтелектуальні програмні функції, розширені можливості керування та хмарної синхронізації, довготривалі автономні батареї, підвищений захист корпусу за стандартами IP67–IP68 і здатні надійно працювати в складних умовах місцевості, забезпечуючи точні вимірювання для геодезії, будівництва, картографування та інших сфер.

Завдяки високій точності та надійності, технології GNSS RTK відіграють ключову роль у процесі розмінування територій. Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) дозволяють визначати координати об'єктів, а використання технології RTK дозволяє це робити з високим ступенем точності, що особливо важливо при виявленні та видаленні мін та боєприпасів. Системи RTK (Real-Time Kinematic) додають ще більшої точності, забезпечуючи практично миттєву корекцію даних і дозволяючи працювати з об'єктами з сантиметровою точністю. Це суттєво покращує безпеку операцій з розмінування, мінімізуючи ризики для фахівців та забезпечуючи точну геоприв'язку небезпечних об'єктів. Таким чином, GNSS RTK стає незамінним інструментом у зусиллях з очищення територій від вибухових предметів та забезпечення безпеки населення.

Завдяки високій точності та швидкості GNSS RTK, операції з розмінування можуть виконуватися більш ефективно. Це особливо важливо у ситуаціях, які потребують швидкого реагування та мінімізації часу перебування на небезпечній території. Позиціонування з отриманням сантиметрової точності не займає більшого часу, ніж звичайна навігація. Технологія GNSS RTK дає змогу формувати високоточні тривимірні моделі ділянок, де проводиться розмінування. Це суттєво покращує розуміння просторового розташування вибухонебезпечних предметів, сприяє розробці ефективних оперативних планів і підтримує ухвалення обґрунтованих рішень.

РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ GNSS-ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОЦЕСИ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ МЕЖ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК

3.1 Методика виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж

Методика проведення GNSS-вимірювань під час встановлення меж земельних ділянок передбачає комплекс підготовчих, польових та камеральних процедур, спрямованих на отримання точних координат поворотних точок межі. Процес починається з аналізу вихідних матеріалів: кадастрових планів, правовстановлюючих документів, топографічних даних та інформації з ДЗК. На основі цих матеріалів визначаються орієнтовні точки поворотів меж, вибирається система координат та уточнюється необхідна точність вимірювань.

У польових умовах зазвичай застосовують технологію GNSS RTK, яка забезпечує отримання координат у реальному часі з сантиметровою точністю. Для цього один приймач використовується як ровер, який здійснює вимірювання, а корекції надходять або від мережі постійно діючих станцій, або від власної базової станції. Перед початком робіт проводиться ініціалізація обладнання, перевірка якості сигналів і забезпечення стабільного зв'язку з джерелом поправок. Під час зйомки кожна точка фіксується з контролем параметрів якості: PDOP, кількості супутників, статусу фіксації (FIX), тривалості спостереження. Для підвищення надійності координати можуть визначатися повторно в різний час або за допомогою різних похідних стоянок.

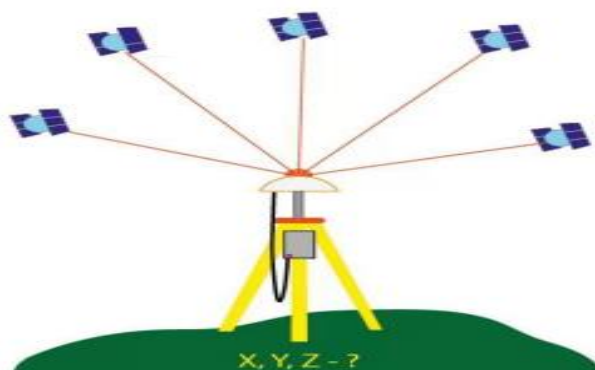
Після завершення польових робіт дані перевіряються, очищуються від помилок і переносяться до камеральної обробки. На камеральному етапі координати підлягають контролю відповідності вимогам нормативних документів, виконується порівняння отриманих меж із наявними кадастровими даними, за потреби розраховуються площі, довжини ліній та уточнюються геодезичні побудови. Результати оформлюються у вигляді плану меж земельної ділянки з нанесенням усіх поворотних точок і описом їх координат у встановленій системі.

Таким чином, методика GNSS-вимірювань при встановленні меж забезпечує надійність, точність та юридичну значимість отриманих координат, що є ключовим для подальшого землевпорядкування, кадастрової реєстрації та уникнення межових спорів.

Існують два типи спостережень — абсолютні та відносні. Обидва методи дають змогу визначати координати точки, використовуючи результати вимірювання псевдовідстаней, що ґрунтуються на кодових або фазових сигналах від супутників.

Абсолютний метод передбачає визначення просторового положення приймача за принципом тривимірної засічки. Для його реалізації потрібно мати значення псевдовідстаней та координати щонайменше чотирьох супутників. Псевдовідстань може бути отримана за кодовими або фазовими вимірюваннями, а координати супутників надходять у складі навігаційного повідомлення. На основі цих даних обчислюють невідомі координати приймача X, Y, Z , а також поправку його внутрішнього годинника.

Цей підхід є найпоширенішим способом використання GPS поза сферою геодезії та топографії й фактично реалізує первинну концепцію системи GPS. Однак його суттєвим недоліком є залежність від інформації навігаційного повідомлення, яка містить неточності щодо положення супутників, похибок супутникових годинників, іоносферних затримок та інших параметрів. Через це отримані координати точки, визначеної за псевдовідстанями чи фазою несучої, як правило, не можуть бути високоточними. На рисунку 3.1 показано абсолютний метод визначення пунктів.



3.1 Абсолютний метод визначення пунктів методом GNSS

У межах абсолютного методу, що базується на кодових вимірюваннях, точність визначення координат залежить від стабільності кварцового генератора часу в приймачі й зазвичай становить 5–10 метрів. Такий підхід переважно застосовують у сферах, де не потрібна висока точність, зокрема в навігації автотранспорту, морських суден та під час моніторингу рухомих об'єктів.

Проте точність цього методу можна підвищити завдяки введенню корекцій в ефемеридну та часову інформацію як для кодових, так і для фазових вимірювань. Кодові поправки реалізуються через широкозонні диференціальні системи (Wide Area Differential GNSS), такі як WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN. Вони дають змогу зменшити похибку визначення координат до рівня 0,5–2 метрів, забезпечуючи корекцію ефемерид, часових параметрів, атмосферних спотворень і навігаційних параметрів, які фіксує приймач.

Відносний метод передбачає використання щонайменше двох приймачів: один розміщується на пункті з точно відомими координатами (База), а другий — на точці, координати якої потрібно визначити (Ровер). У цьому методі базовий приймач обчислює різницю між координатами, отриманими зі супутникових вимірювань, і координатами пункту, заданими вручну. На основі цієї різниці формуються поправки до псевдовідстаней $dD_1, dD_2, \dots, dD_n$. Далі ці поправки передаються на роверний приймач, де вони використовуються для корекції його власних виміряних псевдовідстаней D , що забезпечує більш точне визначення координат шуканої точки.

Відносний метод, що базується на кодових вимірюваннях, також відомий як диференціальний або DGNSS. Його точність зазвичай становить від 50 до 80 сантиметрів, при цьому корекції псевдовідстаней можуть передаватися на значні відстані — приблизно 200–300 км. Завдяки такій можливості метод DGPS широко застосовують у морській навігації, аграрних технологіях та залізничному моніторингу. До диференціальних методів належить і RTK. Він

використовує локальні системи поправок до фазових вимірювань у реальному часі та забезпечує визначення координат із точністю близько 1–5 сантиметрів.

Статичний режим передбачає визначення координат однієї фіксованої точки, коли приймач протягом певного проміжку часу збирає дані кількох епох, після чого ці спостереження усереднюються. Кінематичний режим, навпаки, застосовують для побудови траєкторії руху приймача. Залежно від того, чи вважається приймач нерухомим або таким, що переміщується, оброблення даних виконується за різними алгоритмами. Загалом підвищення точності пов'язане з тривалістю спостережень та умовами проведення зйомки.

Надзвичайно поширеним є метод RTK, за якого ровер отримує сигнал від супутників та диференційну поправку від мережі корекцій або окремої базової станції. Оброблення вимірювань здійснюється в реальному часі, а поправки передаються через мобільний інтернет або радіоканал. При цьому коригуються не псевдовідстані, а безпосередньо координати роверної станції.

Алгоритм роботи RTK можна описати так:

- ровер надсилає на базову станцію або в мережу базових станцій власні спостереження супутників та приблизне місцеположення;
- з отриманих даних вибирають супутники, що одночасно спостерігаються і базою, і ровером; ці спільні супутники формують геометричні зв'язки між двома приймачами у вигляді спільних трикутників;
- на основі цих геометричних фігур обчислюють відстань і напрям між базою та ровером;
- встановлюють координати ровера відносно бази, координати якої відомі заздалегідь, та формують поправки до координат роверної точки;
- надсилають ці поправки назад на ровер для моментального уточнення його положення.

Тому визначення координат точки в різних системах координат здійснюється прямо в польових умовах. Такий підхід забезпечує зручність під час винесення точок у натуру, зокрема поворотних точок земельних ділянок.

На рисунку представлено порівняння різних методів позиціонування — NRTK, PPP та RTK — з погляду точності та максимальної довжини базової лінії. На відміну від класичного RTK, ці методи дають змогу працювати на значно більших відстанях між базовою та роверною станціями. Усі підходи, про які ми сьогодні говорили, можна узагальнено подати у вигляді подібної схеми.

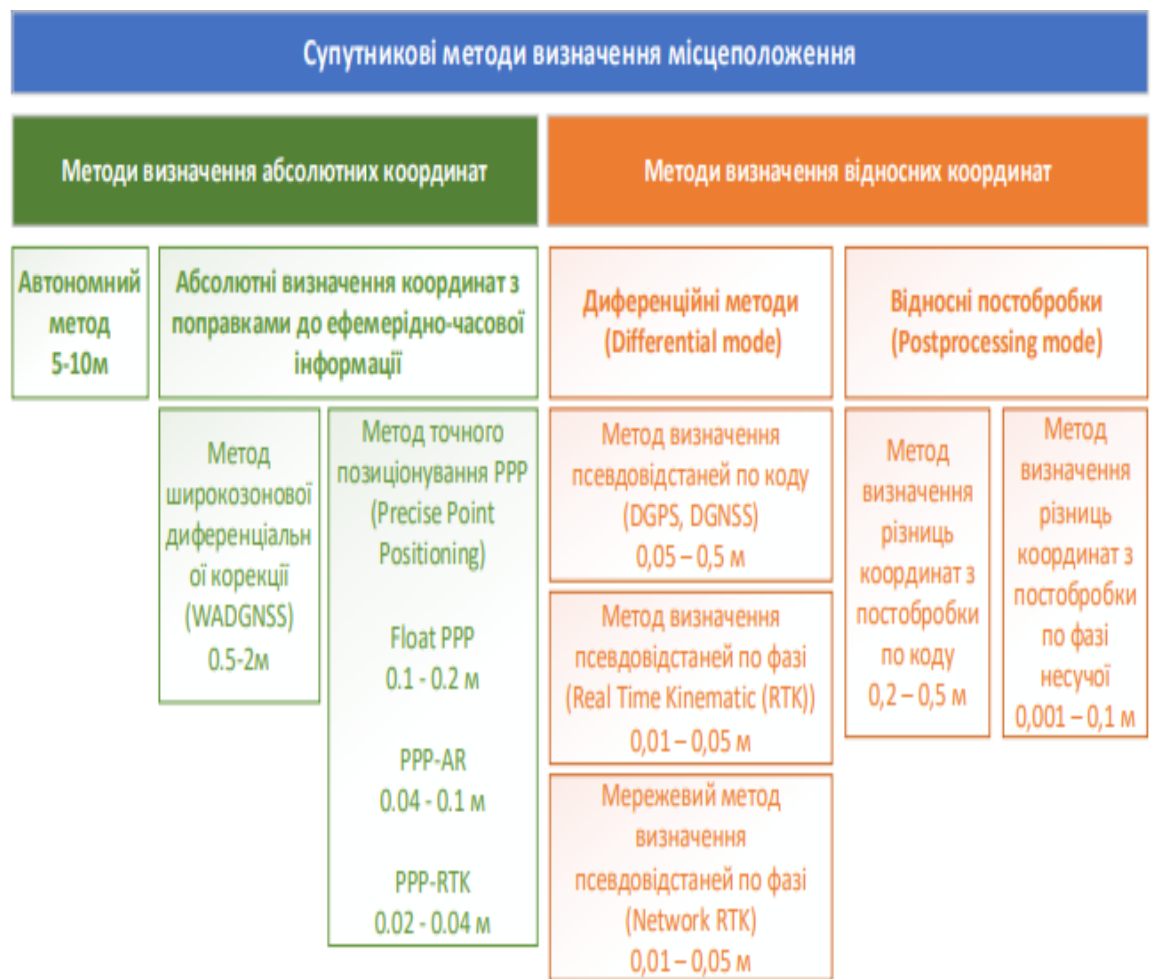


Рисунок 3.2 Методи позиціонування

Загальна методика вибору місця для встановлення станції знімання включає декілька послідовних етапів. Спочатку оцінюють поточний стан угруповання супутників GNSS та визначають їхнє просторове розташування. Далі встановлюють наближені координати точки, у якій планується виконувати GNSS-спостереження, після чого аналізують можливі джерела перешкод, що можуть впливати на якість вимірювань. Наступним кроком є

оцінка часу та дати проведення робіт із урахуванням параметра PDOP, який відображає геометричну якість супутникової конфігурації. Завершальний етап — прогноз космічної погоди на заплановану дату, оскільки зміни в іоносфері можуть суттєво впливати на точність вимірювань.

3.2. Методика виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж

Методика виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж земельних ділянок являє собою комплекс організаційних, технічних та технологічних заходів, спрямованих на забезпечення високої точності визначення координат поворотних точок меж. Використання глобальних навігаційних супутникових систем у сучасному землеустрої обумовлене необхідністю отримання просторово узгоджених даних, що відповідають вимогам Державного земельного кадастру та чинним нормативно-правовим актам. GNSS-вимірювання під час встановлення меж виконуються з метою закріплення меж земельних ділянок на місцевості, відновлення раніше встановлених меж, а також уточнення координат поворотних точок у разі виявлення розбіжностей між фактичним та кадастровим положенням меж. Отримані координати є основою для формування кадастрової документації та подальшої реєстрації земельних ділянок.

Методика виконання GNSS-вимірювань передбачає поетапне виконання робіт, яке включає підготовчий, польовий та камеральний етапи. Кожен з етапів має чітко визначені завдання та послідовність дій, порушення яких може призвести до зниження точності результатів або виникнення помилок у визначенні координат.

На підготовчому етапі здійснюється аналіз правовстановлювальних документів на земельну ділянку, матеріалів попередніх землеустрою, кадастрових планів та координат суміжних земельних ділянок. Особлива увага приділяється перевірці відповідності координат у документації прийнятій

Выходной пункт: SULP
Координата X=5513597,109
Масштаб: 1:100000

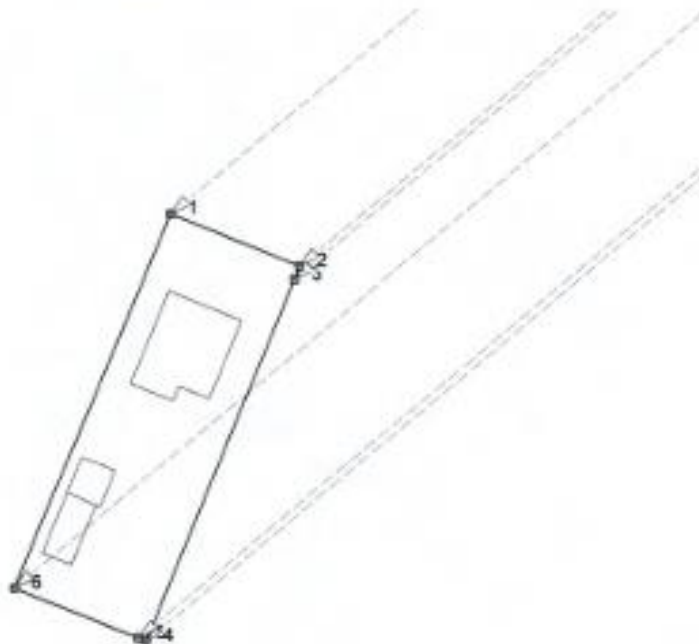
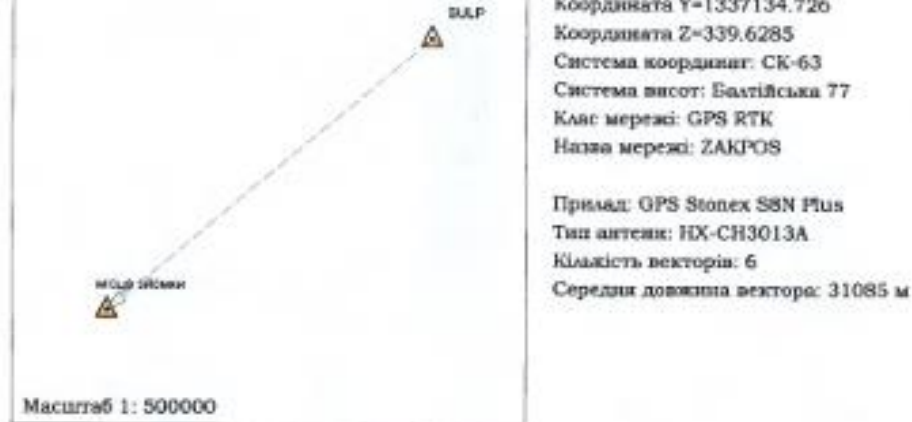


Рисунок 3.1 Схеми GNSS вимірювань

На рисунку 3.1 зображено виконання GNSS-вимірювань, виконаних під час встановлення меж земельної ділянки з використанням технології супутникового позиціювання у режимі RTK. Схема складається з двох логічно пов'язаних частин: оглядової схеми розташування вихідного пункту та детального плану земельної ділянки з визначеними поворотними точками меж, рисунок 3.2.

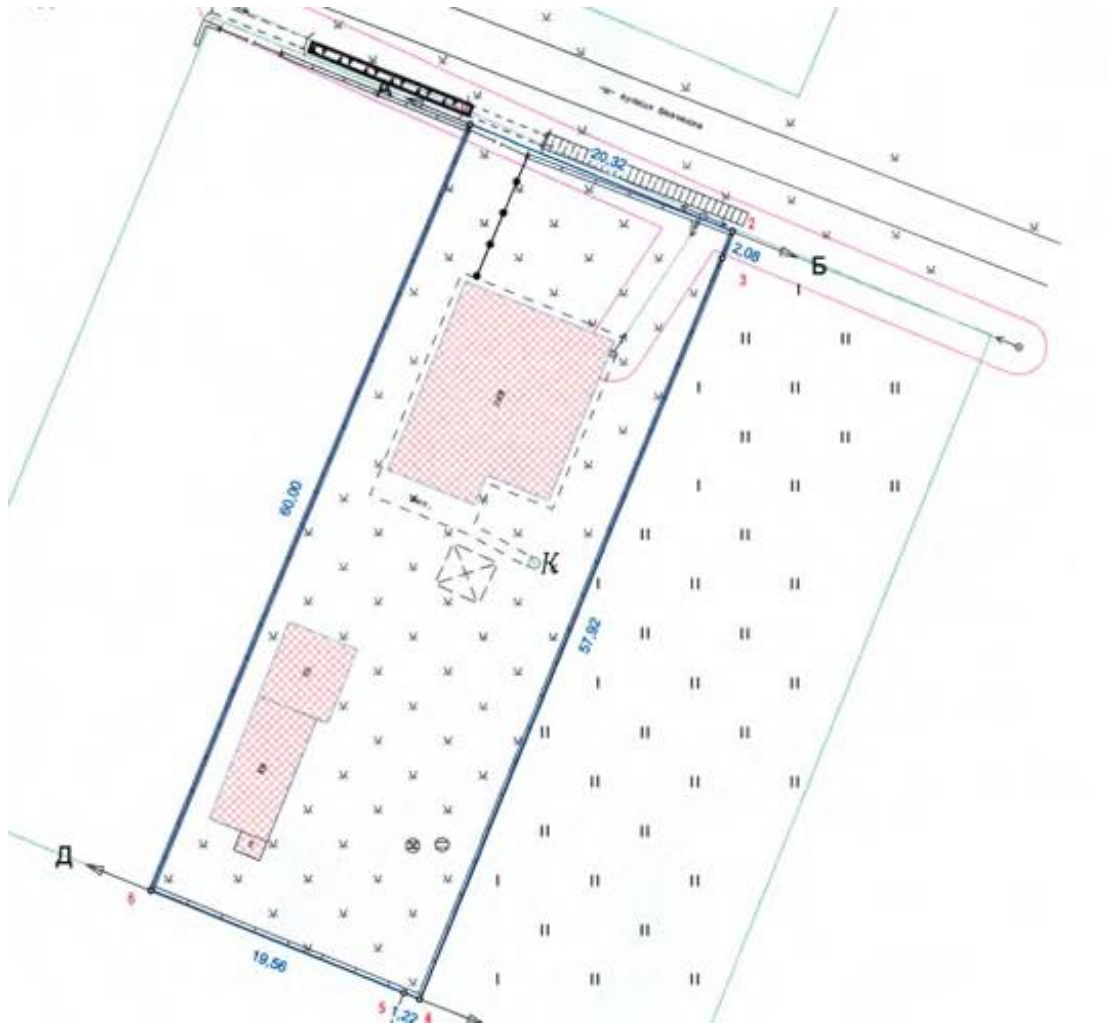


Рисунок 3.2 Встановлені межі земельної ділянки

На рисунку представлено план земельної ділянки з елементами топографо-кадастрової зйомки та забудови. Межі земельної ділянки чітко окреслені суцільними лініями з нанесенням лінійних розмірів сторін, що характеризують її геометричні параметри та конфігурацію. Ділянка має витягнуту форму та обмежена суміжними землекористуваннями.

Вибір методу GNSS-вимірювань є одним з ключових моментів методики. Залежно від вимог до точності, площі земельної ділянки та умов місцевості можуть застосовуватися статичний, швидкий статичний або кінематичний методи вимірювань у режимі реального часу (RTK). Для більшості кадастрових робіт достатньою є точність, яку забезпечує RTK-метод. Польовий етап GNSS-вимірювань полягає у безпосередньому

визначенні координат поворотних точок меж на місцевості. GNSS-приймач встановлюється над кожною точкою з дотриманням вимог до центрування та горизонтирування, а висота антени вимірюється з необхідною точністю. Під час вимірювань забезпечується стабільний прийом супутникових сигналів та мінімізується вплив перешкод. Важливою умовою отримання якісних результатів є дотримання вимог до умов виконання GNSS-вимірювань. Не рекомендується виконувати спостереження поблизу високих будівель, ліній електропередач, щільної деревної рослинності, які можуть спричиняти мультитрас-ефект та зниження точності визначення координат.

Камеральна обробка результатів GNSS-вимірювань виконується із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення. На цьому етапі здійснюється обробка супутникових спостережень, трансформація координат у необхідну систему, а також оцінка середньоквадратичних похибок визначення координат. Результати камеральної обробки оформлюються у вигляді таблиць координат поворотних точок меж земельної ділянки. Дані таблиці використовуються для складання кадастрового плану та внесення інформації до Державного земельного кадастру. Контроль точності GNSS-вимірювань є завершальним етапом методики встановлення меж. Він включає перевірку замкненості контуру земельної ділянки, аналіз отриманих похибок та порівняння результатів з наявними кадастровими даними. У разі виявлення невідповідностей виконуються повторні вимірювання або уточнення координат.

Під час встановлення меж земельної ділянки на місцевості поворотні точки меж були визначені за результатами GNSS-вимірювань. Закріплення межових знаків подано в таблиці 3.1, і здійснювалося відповідно до чинних нормативних вимог із забезпеченням необхідної точності.

Відомості про встановлені межові знаки

Таблиця 3.1

№	X, м	Y, м	Z, м	Тип межового знаку	Примітка
1	465.81	844.201	20.311	бетонний	
2	448.35	820.341	20.171	бетонний	
3	436.81	802.112	20.214	бетонний	
4	455.42	781.098	19.953	бетонний	

Таким чином, дотримання методики виконання GNSS-вимірювань під час встановлення меж забезпечує отримання достовірних та юридично значущих результатів. Використання сучасних GNSS-технологій дозволяє підвищити ефективність землеустрою, зменшити кількість спірних ситуацій та забезпечити надійність кадастрової інформації.

Встановлення меж земельних ділянок є одним із ключових етапів землевпорядних робіт, що забезпечує юридичну визначеність прав власності та раціональне використання земельних ресурсів. Сучасний розвиток геодезичних технологій зумовив широке впровадження супутникових методів позиціонування, зокрема глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), які забезпечують високу точність, оперативність та надійність визначення просторових координат поворотних точок меж земельних ділянок. Метод GNSS ґрунтується на прийомі та обробці сигналів від навігаційних супутників з метою визначення координат точок на земній поверхні в єдиній геоцентричній системі координат. У процесі встановлення меж земельних ділянок застосовують диференціальні та мережеві GNSS-методи, зокрема статичні, швидкі статичні та кінематичні режими вимірювань у реальному часі (RTK/Network RTK). Вибір конкретного режиму залежить від вимог до точності, площі ділянки, складності рельєфу та наявності перешкод для прийому супутникових сигналів.

Польові GNSS-вимірювання передбачають попередню підготовку, яка включає аналіз вихідних кадастрових і топографічних матеріалів, рекогносцировку місцевості та планування спостережень. Безпосередньо в

польових умовах здійснюється визначення координат поворотних точок меж із використанням сертифікованих GNSS-приймачів, що працюють у державній системі координат. Для підвищення точності результатів застосовується корекція похибок, зумовлених атмосферними впливами, орбітальними неточностями та багатоприменовістю сигналів.

Камеральна обробка результатів GNSS-спостережень включає перевірку якості вимірювань, обчислення остаточних координат, оцінювання точності та формування геодезичної основи меж земельної ділянки. Отримані координати використовують для побудови планів меж, визначення площі земельної ділянки та підготовки технічної документації із землеустрою. Важливим аспектом є узгодження встановлених меж із суміжними землекористувачами та забезпечення відповідності результатів чинним нормативно-правовим вимогам.

Застосування GNSS-технологій у процесі встановлення меж земельних ділянок суттєво підвищує ефективність землепорядних робіт, зменшує вплив людського фактора та забезпечує відтворюваність результатів. Висока точність і оперативність GNSS-методів роблять їх основним інструментом сучасного землеустрою, що сприяє прозорості земельних відносин, удосконаленню кадастрових систем та сталому управлінню земельними ресурсами.

4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона навколишнього середовища є невід’ємною складовою сучасної землевпорядної діяльності та просторового планування. У процесах встановлення й відновлення меж земельних ділянок особливого значення набуває забезпечення екологічної безпеки, раціонального використання земельних ресурсів та мінімізації негативного впливу на природні компоненти довкілля. Інтеграція GNSS-технологій у землевпорядні роботи створює передумови для підвищення екологічної ефективності таких процесів завдяки зростанню точності, оперативності та зменшенню антропогенного навантаження на територію.

Земельні ресурси є базовим компонентом навколишнього природного середовища, а їх стан безпосередньо впливає на екологічну рівновагу, продуктивність агроландшафтів та якість життя населення. Порушення або неточність встановлення меж земельних ділянок може призводити до нераціонального землекористування, самовільного зайняття земель, деградації ґрунтів, знищення природних екосистем та конфліктів між землекористувачами. Застосування GNSS-технологій дає змогу істотно зменшити такі ризики шляхом забезпечення достовірного просторового положення меж, їх узгодженості з державними кадастровими даними та фактичним використанням територій.

Однією з ключових екологічних переваг GNSS-методів є мінімізація впливу польових робіт на природне середовище. Традиційні геодезичні методи часто потребують прокладання візирних ліній, розчищення рослинності або встановлення значної кількості тимчасових знаків, що може порушувати ґрунтовий покрив і рослинні угруповання. GNSS-вимірювання, навпаки, дозволяють виконувати визначення координат точок без суттєвого втручання в природне середовище, обмежуючись локальним розміщенням геодезичного обладнання. Це особливо важливо під час робіт на землях природоохоронного, рекреаційного та сільськогосподарського призначення.

Використання GNSS-технологій також сприяє підвищенню точності визначення меж земельних ділянок, що має безпосереднє екологічне значення. Чітко визначені межі унеможливляють розширення землекористування за рахунок суміжних природних територій, лісосмуг, водоохоронних зон та прибережних захисних смуг. Це сприяє дотриманню встановлених екологічних обмежень і режимів використання земель, передбачених земельним та природоохоронним законодавством.

Особливу роль GNSS-технології відіграють у процесах відновлення втрачених або пошкоджених меж земельних ділянок. Унаслідок природних процесів (ерозії, зсувів, підтоплення), господарської діяльності або тривалої експлуатації межові знаки можуть бути знищені чи зміщені. Відновлення таких меж із використанням супутникових методів позиціонування дозволяє відтворити їх початкове просторове положення з високою точністю, що запобігає подальшому несанкціонованому використанню земель і негативному впливу на навколишнє середовище.

Інтеграція GNSS-даних із геоінформаційними системами (ГІС) створює додаткові можливості для екологічного аналізу та моніторингу земель. Поєднання координат меж земельних ділянок із даними про ґрунти, рельєф, рослинний покрив, гідрографічну мережу та зони екологічних обмежень дозволяє здійснювати комплексну оцінку екологічного стану територій. Це, у свою чергу, сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень щодо використання та охорони земельних ресурсів.

Застосування GNSS-технологій у землевпорядних роботах також має позитивний соціально-екологічний ефект. Зменшення кількості земельних спорів і конфліктів між землекористувачами сприяє стабільності землекористування та дотриманню принципів сталого розвитку. Чітке закріплення меж дозволяє ефективніше контролювати дотримання екологічних норм, зокрема щодо охорони ґрунтів, водних ресурсів та зелених насаджень.

Водночас використання GNSS-обладнання потребує дотримання вимог екологічної та техногенної безпеки. Хоча супутникові приймачі не створюють значного фізичного чи хімічного впливу на довкілля, необхідно забезпечувати правильну експлуатацію технічних засобів, уникати засмічення територій та дотримуватися вимог охорони праці під час виконання польових робіт. Особливу увагу слід приділяти роботам у межах природоохоронних територій, де будь-яке втручання має здійснюватися з урахуванням встановлених режимів охорони.

Використання сучасних супутникових методів позиціювання забезпечує точність і надійність землевпорядних робіт, зменшує негативний вплив на природні компоненти та сприяє раціональному використанню земельних ресурсів. У контексті сталого розвитку територій GNSS-технології виступають ефективним інструментом гармонізації земельних відносин, економічних інтересів і вимог екологічної безпеки.

Висновок

Проведений огляд методів GNSS-вимірювань показує, що сучасні супутникові технології формують універсальну та високоточну основу для визначення координат у різних галузях. Абсолютні методи залишаються базовими для навігації, транспорту та моніторингу, забезпечуючи доступне та оперативне позиціонування. Використання диференціальних корекцій суттєво зменшує похибки, дозволяючи досягати дециметрової точності без складного обладнання та тривалих спостережень.

Відносні методи, особливо такі як DGNSS чи RTK, демонструють значний потенціал завдяки роботі в реальному часі, що надзвичайно важливо для інженерно-геодезичних робіт, кадастрових зйомок та будівництва. RTK і NRTK-системи забезпечують точність на рівні кількох сантиметрів, що дозволяє оперативно виконувати вимірювання та винесення точок у натуру. Методи високоточної постобробки, побудовані на фазових спостереженнях, забезпечують найвищий рівень точності — від міліметрової до субміліметрової, роблячи їх незамінними у деформаційному моніторингу, наукових дослідженнях і високоточних інженерних проектах.

Успішне виконання GNSS-вимірювань потребує врахування великої кількості чинників, серед яких: геометрія супутникового сузір'я, якість обладнання, стабільність каналів зв'язку, стан іоносфери, наявність перешкод та особливості рельєфу. Підготовчий аналіз, що включає оцінку PDOP, прогноз космічної погоди та визначення оптимального часу зйомки, має суттєве значення для досягнення максимальної точності.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що GNSS-технології є ключовим елементом сучасних систем позиціонування та геодезичного забезпечення. Вони поєднують високу точність, зручність використання, високу продуктивність та можливість працювати навіть у складних умовах. Широкий спектр методів — від найпростіших навігаційних до високоточних наукових — дозволяє адаптувати GNSS-підходи до будь-яких завдань, що робить їх

фундаментально важливими для розвитку сучасної інфраструктури, картографування, землеустрою, моніторингу та інженерної діяльності.

З упевненістю можна стверджувати, що у перспективі значущість супутникових систем навігації помітно зросте. Безсумнівно, їх широко застосовуватимуть у міському господарстві та повсякденному житті людини.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Земельний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
2. Про державну реєстрацію речових прав на нерухоме майно та їх обтяжень: Закон України № 1952-IV від 25.12.2015 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1952-15#Text>.
3. Про затвердження порядку щодо ведення Державного земельного кадастру: постанова КМУ № 1051 від 17.10.2012 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#Text>.
4. Про затвердження Порядку щодо використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при виконанні робіт із землеустрою: Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України № 509 від 02.12.2016 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1646-16#Text>.
5. Про землеустрій: Закон України № 858-IV від 22.05.2003 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>. 1
6. Про регулювання містобудівної діяльності: Закон України № 3038- IV від 17.02.2011 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.
7. Про топографо-геодезичну, картографічну діяльність: Закон України № 353- XIV від 23.12.1998 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
8. Рій І. Ф., Бочко О. І., Біда О. Ю. Електронні геодезичні прилади : навч. пос. – Львів : «ГАЛИЧ-ПРЕС», 2021. – 336 с.: іл.
9. Савчук С. Г. Вища геодезія. Сфероїдна геодезія: підручник. Львів, 2000. 248 с.
10. Сновидов І. Фактори, що впливають на точність промірювань. Вісник Держгідрографії. 2015. № 1 (48). С. 4-6.
11. Черняга П. Г., Бялик І. М., Янчук Р. М. Супутникова геодезія: навч. посібник (2-ге вид.). Рівне: НУВГП, 2014. 222 с.
12. Інструкція з виконання топографо-геодезичного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500: Наказ Головного управління геодезії, картографії

- та кадастру при Кабінеті Міністрів України № 56 від 09.04.1998 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98#Text>.
13. Шумаков Ф. Т. Конспект лекцій з дисципліни «Супутникова геодезія» (для студентів 4 курсу денної форми навчання, спеціальності 7.070900 «Геоінформаційні системи та технології»). Харків, 2009. 88 с. 20. Що таке VRS і як це працює? URL: <https://ipit.ooo/pl/what-is-vrs-andhow-does-it-work>. 21. SystemNET. URL: <https://systemnet.com.ua/ua/>.
14. Інструкція про встановлення, відновлення меж земельних ділянок в натурі або на місцевості та їх закріплення межовими знаками: Наказ Державного комітету України із земельних ресурсів № 376 від 18.05.2010 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0391-10#Text>.
15. Катренко Л.А., Пістун І.П. Охорона праці в галузі освіти: Навчальний посібник. 2-ге вид., доп. - Суми: ВТД «Університетська книга», 2004. 304 с.
16. Костецька Я. М. Геодезичні прилади. Частина II. Електроні геодезичні прилади. Львів, 2000. 321 с.
17. Методичні рекомендації для написання кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти ОС «Магістр» за спеціальністю 193 Геодезія та землеустрій / Укл.: Колодій П., Таратула Р. – Львів, ЛНУП, 2023. – 33 с.
18. Налаштування GNSS-приймача South S82t для роботи в мережі System.NET в режимі RTK. URL: <https://systemnet.com.ua/nalashtuvannya-gnssprijmach-south/>.
19. Основи охорони довкілля в Україні. URL: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/4413-osnovi-ohoroni-dovkilliya-v-ukraini/>.
20. Про Державний земельний кадастр: Закон України № 3613-VI від 07.07.2011 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>.