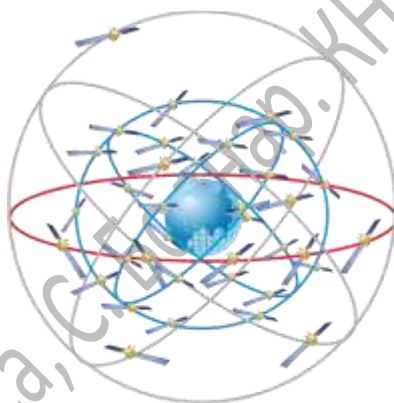


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
Географічний факультет  
Кафедра геодезії, картографії та землеустрою

Олексій МІХНО, Богдан СОССА, Сергій БОДНАР

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДО ДИСЦИПЛІНИ  
СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ / GNSS СПОСТЕРЕЖЕННЯ В ПРИКЛАДНИХ  
ЗАДАЧАХ ГЕОДЕЗІЇ

для студентів першого (бакалаврського) рівня  
ОПП «ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ»  
Спеціальність G18 – Геодезія та землеустрій



*Затверджено Вченою радою географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (протокол №1 від 04.09.2026 року)*

*Навчально-методичний комплекс обговорено й схвалено на засіданні кафедри геодезії, картографії та землеустрою (протокол №1 від 25.08.2026 р.)*

**Автори:** **О.Г. Міхно** – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Б.Р. Сосса** – PhD з геодезії та землеустрою, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**С.П. Боднар** – асистент кафедри геодезії, картографії та землеустрою Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Рецензенти:** **О.С. Гончаренко** – кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**В.А. Бабченко** – директор ПрАТ «Систем Солюшнс»

**Міхно О.Г., Сосса Б.Р., Боднар С.П.** Навчально-методичний комплекс до дисципліни «Супутникова геодезія / GNSS спостереження в прикладних задачах геодезії»: електронна версія / Міхно О.Г., Сосса Б.Р., Боднар С.П. Київ: КНУ імені Тараса Шевченка, 2026. 112 с. (9 д.а.)

*Навчально-методичний комплекс призначено для забезпечення цілісності навчального процесу дисципліни «Супутникова геодезія / GNSS спостереження в прикладних задачах геодезії», яка є освітнім компонентом ОПП «Геодезія та землеустрій» для студентів першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю G18 «Геодезія та землеустрій». Головна мета навчально-методичного комплексу – це надання системного дидактичного засобу навчання щодо реалізації освітніх завдань (отримання інтегральної та спеціальних компетентностей) та програмних результатів, сформульованих навчальною робочою програмою дисципліни. Для здобувачів вищої освіти, викладачів закладів вищої освіти спеціальності G18 - Геодезія та землеустрій.*

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП .....                                                                                                                                                   | 4   |
| 1. ХАРАКТЕРИСТИКА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....                                                                                                                  | 6   |
| 2. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....                                                                                                                       | 11  |
| 3. КУРС ЛЕКЦІЙ (І САМОСТІЙНА РОБОТА) .....                                                                                                                    | 12  |
| ЗМІСТОВНА ЧАСТИНА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВИХ<br>РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ .....                                                                         | 12  |
| ТЕМА 1. СИСТЕМИ КООРДИНАТ У СУПУТНИКОВІЙ ГЕОДЕЗІЇ (2 ГОД.).....                                                                                               | 12  |
| ТЕМА 2. СУПУТНИКОВІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ (1 ГОД.).....                                                                                                         | 26  |
| САМОСТІЙНА РОБОТА (5 ГОД.) .....                                                                                                                              | 32  |
| ТЕМА 3. ОБЧИСЛЕННЯ РУХУ СУПУТНИКІВ НА ОРБІТІ (1 ГОД.).....                                                                                                    | 32  |
| САМОСТІЙНА РОБОТА (5 ГОД.).....                                                                                                                               | 39  |
| САМОСТІЙНА РОБОТА ДО ЗМІСТОВНОЇ ЧАСТИНИ 1 .....                                                                                                               | 39  |
| ПИТАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ .....                                                                                                                           | 40  |
| ЗМІСТОВНА ЧАСТИНА 2. ВИКОНАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРІВ<br>СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ.....                                                                             | 42  |
| ТЕМА 4. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....                                                                                                      | 42  |
| ТЕМА 5. ПОБУДОВА ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ .....                                                                                                                      | 53  |
| ТЕМА 6. ВИКОНАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРІВ.....                                                                                                                    | 62  |
| САМОСТІЙНА РОБОТА ДО ЗМІСТОВНОЇ ЧАСТИНИ 2 (24 ГОД.).....                                                                                                      | 81  |
| 4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....                                                                                                                             | 86  |
| 5. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ.....                                                                                                                                    | 88  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ТРАНСФОРМУВАННЯ КООРДИНАТ.....                                                                                                         | 88  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ОБЧИСЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЗБУРЕНОЇ ОРБІТИ<br>ІШТУЧНОГО СУПУТНИКА ЗЕМЛІ .....                                                              | 92  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ГНСС-<br>ВИМІРЮВАНЬ, МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ ТА<br>АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНОЇ НАДЛИШКОВОСТІ..... | 96  |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ПРОЄКТУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ГНСС-МЕРЕЖ<br>ЗГУЩЕННЯ ТА РОЗРОБКА ГРАФІКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГІС ТА<br>САПР .....                 | 100 |
| 6. ПИТАННЯ ДО ІСПИТУ.....                                                                                                                                     | 105 |
| 7. СЛОВНИК ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ .....                                                                                                                            | 109 |

## ВСТУП

Розвиток суспільства та науково-технічний прогрес ХХІ століття висувають підвищені вимоги до точності, оперативності й обсягів геопросторової інформації. Стрімкий розвиток космічних технологій та глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС / GNSS) докорінно змінив методологію класичної геодезії, трансформувавши її з суто наземної науки у високотехнологічний комплекс космічних і геоінформаційних методів.

Історичний шлях від перших супутникових систем низькоорбітальної навігації першого покоління («ТРАНЗИТ» і «ЦИКАДА») до сучасних багаточастотних та багатофункціональних орбітальних угруповань (GPS, GALILEO, BeiDou, ГЛОНАСС) забезпечив революційний стрибок у вирішенні фундаментальних та прикладних завдань наук про Землю.

Сучасне геодезичне виробництво, землевпорядне проєктування, інженерні вишукування, містобудування та кадастрові знімання повністю орієнтовані на широке впровадження супутникових методів позиціонування. Навігаційні супутникові системи та супутникові методи вимірювань виконують у сучасному просторово-координатному забезпеченні держави такі ключові функції:

- *координатно-часову* — забезпечення створення, підтримки та розвитку високоточних геоцентричних і національних систем координат, реалізації державної та спеціальних геодезичних мереж, а також забезпечення єдиного точного часу;
- *моніторингову* — інформаційне та метричне забезпечення вивчення деформацій земної кори, спостереження за зсувними й техногенними процесами, а також постійного контролю геометричного стану унікальних інженерних споруд, мостів і дамб у режимі реального часу;
- *інженерно-виробничу* — забезпечення високоточного виконання топографо-геодезичних знімань, винесення проєктів в натуру, супроводу будівництва, гідрографічних робіт і координатної прив'язки матеріалів дистанційного зондування Землі й аерофотознімання з БПЛА;
- *оперативно-технологічну (RTK)* — використання методів вимірювань у реальному часі (Real-Time Kinematic) з сантиметровою точністю для потреб землевпорядкування, інвентаризації земель, розмежування територій та ведення державних кадастрів;
- *інфраструктурну* — розбудову та мережеву інтеграцію перманентних базових (коригуючих) станцій, що утворюють сучасну супутникову інфраструктуру України та забезпечують роботу диференціальних сервісів позиціонування.

Динамічний розвиток геоінформаційних технологій, формування Національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) та перехід до тривимірного обліку об'єктів

нерухомості й кадастру вимагають від сучасного фахівця високої кваліфікації у сфері супутникової геодезії. Сюди належить розуміння фізичних основ позиціонування, механіки руху супутників на орбітах, методів опрацювання орбітальної інформації, а також володіння методиками побудови та вирівнювання геодезичних мереж.

*Метою освітньо-професійної програми «Геодезія та землеустрій»* (бакалаврського рівня), зміст якої побудовано згідно зі Стандартом вищої освіти спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій», є надання професійної освіти у сфері геодезії, землеустрою та кадастрів із формуванням у здобувачів вищої освіти здатності до розв'язання складних спеціалізованих задач та практичних проблем із використанням сучасних методів збору, аналізу та інтерпретації геопросторових даних, сучасних геодезичних приладів і супутникових технологій.

Навчальна дисципліна «Супутникова геодезія / GNSS спостереження в прикладних задачах геодезії» охоплює вивчення двох змістових частин:

**«Теоретичні основи супутникових радіонавігаційних систем»** — присвячена вивченню систем координат у супутниковій геодезії, еволюції орбітальних угруповань ГНСС та математичного апарату обчислення руху супутників на орбіті.

**«Виконання геодезичних вимірів супутниковими методами»** — спрямована на опанування фізичних основ позиціонування, методології побудови геодезичних мереж у режимі статики, використання мереж коригуючих станцій на території України, виконання вимірювань у RTK-режимі та застосування високоточних навігаційних даних у прикладних задачах.

Все вищезазначене обґрунтовує необхідність, значимість та сучасність викладання цієї дисципліни для здобувачів вищої освіти спеціальності G18 «Геодезія та землеустрій», а також стане в пригоді для студентів і фахівців споріднених спеціальностей.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

**Навчальна дисципліна «Супутникова геодезія / GNSS спостереження в прикладних задачах геодезії»** - освітня компонента освітньо-професійної програми «Геодезія та землеустрій» з підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня, спеціальність 193 - Геодезія та землеустрій, галузь знань - 19 - Архітектура та будівництво. Викладається на IV курсі бакалаврату, у 8-му семестрі в обсязі 90 годин (3,0 кредитів ECTS), зокрема: лекції – 14 год., лабораторні заняття - 14 год., самосійна робота – 58 год., консультації – 4 год.. Форма підсумкового контролю – іспит. Мова викладання, навчання та оцінювання українська.

**Мета дисципліни** – ознайомлення з загальними принципами побудови і функціонування глобальних супутникових систем позиціонування, вивчення засобів і методів сучасних геодезичних вимірів за допомогою глобальних супутникових систем позиціонування і порядку їхнього застосування в знімальних роботах.

### **Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:**

- ✓ успішне опанування курсів: «Геодезія», «Фізика з основами геофізики», «Основи геоінформаційних систем та технологій»;
- ✓ знання теоретичних та практичних основ геодезії, фізики радіохвиль, геоінформаційних систем і технологій;
- ✓ володіння навичками роботи в програмному середовищі QGIS і AutoCAD.

### **Анотація навчальної дисципліни:**

Курс складається з двох змістовних частин.

Перша присвячена вивченню теоретичних засад побудови і функціонування глобальних супутникових систем позиціонування GPS і ГЛОНАСС, систем координат, що використовуються в супутникових системах позиціонування, факторів, що впливають на точність геодезичних вимірів супутниковими методами.

Друга – безпосередньо механізму здійснення геодезичних вимірів сучасними супутниковими геодезичними приладами, особливостям функціонування глобальних супутникових систем позиціонування GPS і ГЛОНАСС при застосуванні для вирішення геодезичних задач, порядку створення геодезичних мереж супутниковими методами.

Дисципліна «Супутникова геодезія / GNSS спостереження в прикладних задачах геодезії» є однією з базових дисциплін практичного спрямування, яка формує навички створення геодезичних мереж супутниковими методами.

**Завдання вивчення дисципліни** полягає в опануванні базових принципів побудови і функціонування глобальних супутникових систем позиціонування GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BEIDOU, режимів їх роботи й методів вимірів, факторів, що впливають на точність

вимірів; сформувати практичні навички з визначення координат й різниць координат наземних пунктів сучасними приладами супутникової геодезії; формувати вміння планувати розташування базисного вектора і найбільш зручного інтервалу подальших супутникових вимірювань в програмному забезпеченні QGIS.

Опанування знань спрямоване на формування інтегральної, загальних та фахових компетенцій та зазначених програмних результатів за освітньо-професійною програмою «Геодезія та землеустрій» (редакція 2021 р.), дисципліна забезпечує набуття студентами таких компетентностей та відповідно програмних результатів: **ЗК02.** Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. **ЗК06.** Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології. **ЗК13.** Здатність зберігати, примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства на основі розуміння історії, закономірностей розвитку предметної області, її місця в загальній системі знань про природу й суспільство, а також в розвитку суспільства, техніки і технологій, використовувати різні види та форми рухової активності для відпочинку та ведення здорового способу життя. **СК02.** Здатність застосовувати теорії, принципи, методи фізико-математичних, природничих, соціально-економічних, інженерних наук при виконанні завдань геодезії та землеустрою. **СК04.** Здатність обирати та використовувати ефективні методи, технології та обладнання для здійснення професійної діяльності у сфері геодезії та землеустрою. **СК05.** Здатність застосовувати сучасне інформаційне, технічне і технологічне забезпечення для вирішення складних питань геодезії та землеустрою. **СК06.** Здатність виконувати дистанційні, наземні, польові та камеральні дослідження, інженерні розрахунки з опрацювання результатів досліджень, оформляти результати досліджень, готувати звіти при вирішенні завдань геодезії та землеустрою. **СК07.** Здатність збирати, оновлювати, опрацьовувати, критично оцінювати, інтерпретувати, зберігати, оприлюднювати і використовувати геопросторові дані та метадані щодо об'єктів природного і техногенного походження. **СК08.** Здатність здійснювати професійну діяльність у сфері геодезії та землеустрою з урахуванням вимог професійної і цивільної безпеки, охорони праці, соціальних, екологічних, етичних, економічних аспектів. **СК09.** Здатність застосовувати інструменти, прилади, обладнання, устаткування при виконанні завдань геодезії та землеустрою. **СК11.** Здатність здійснювати геодезичний моніторинг земної поверхні, природних об'єктів, інженерних споруд.

## ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### Результати навчання за дисципліною:

| Результат навчання<br>(1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність) |                                                                                                                                         | Форми (та/або методи і технології) викладання і навчання | Методи оцінювання та пороговий критерій оцінювання | Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Код                                                                                             | Результат навчання                                                                                                                      |                                                          |                                                    |                                            |
| 1.1                                                                                             | системи координат, які використовуються у супутниковій геодезії;                                                                        | Лекція,<br>лабораторна робота,<br>самостійна робота      | Контрольні роботи,<br>звіти з лабораторних робіт   | 5%                                         |
| 1.2                                                                                             | структуру супутникових радіонавігаційних систем;                                                                                        | Лекція,<br>самостійна робота                             |                                                    | 5%                                         |
| 1.3                                                                                             | елементи орбіти супутника і порядок руху супутників на орбітах;                                                                         | Лекція,<br>лабораторна робота,<br>самостійна робота      |                                                    | 5%                                         |
| 1.4                                                                                             | схеми побудови геодезичних мереж супутниковими методами;                                                                                | Лекція,<br>самостійна робота                             |                                                    | 5%                                         |
| 1.5                                                                                             | методи супутникових геодезичних вимірів;                                                                                                | Лекція,<br>самостійна робота                             |                                                    | 5%                                         |
| 1.6                                                                                             | порядок проєктування і планування геодезичних робіт при супутникових вимірах;                                                           | Лекція,<br>лабораторна робота,<br>самостійна робота      |                                                    | 5%                                         |
| 2.1                                                                                             | проводити перерахунки зі сферичної до геодезичної системи координат і навпаки;                                                          | Лабораторна робота,<br>самостійна робота                 |                                                    | 10%                                        |
| 2.2                                                                                             | обчислювати положення супутника в геоцентричній системі координат;                                                                      | Лабораторна робота,<br>самостійна робота                 |                                                    | 10%                                        |
| 2.3                                                                                             | складати технічний і робочий проєкти при плануванні геодезичних робіт;                                                                  | Лабораторна робота,<br>самостійна робота                 |                                                    | 10%                                        |
| 2.4                                                                                             | планувати розташування базисного вектора і найбільш зручного інтервалу подальших супутникових вимірювань в програмному середовищі QGIS; | Лабораторна робота,<br>самостійна робота                 |                                                    | 10%                                        |
| 3.1                                                                                             | демонстрація знань, умінь і навичок;                                                                                                    | Консультації                                             | Іспит                                              | 20%                                        |
| 4.1                                                                                             | виконання самостійної роботи.                                                                                                           | Лекції, консультації впродовж семестру                   | Захист самостійної роботи                          | 10%                                        |

**Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами (ПР)  
навчання**

[illegible]

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <b>ПРН7.</b> Виконувати обстеження і вишукувальні, топографо-геодезичні, картографічні, проектні та проектно-вишукувальні роботи при виконанні професійних завдань з геодезії та землеустрою.                                                                                                               |   |   |   | + | + | + | + | + | + |   |   | + | + |
| <b>ПРН8.</b> Брати участь у створенні державних геодезичних мереж та спеціальних інженерно-геодезичних мереж, організовувати та виконувати топографічні та кадастрові знімання, геодезичні вимірювання, інженерно-геодезичні вишукування для проектування, будівництва та експлуатації об'єктів будівництва |   |   |   |   |   |   |   |   | + | + | + | + |   |
| <b>ПРН9.</b> Збирати, оцінювати, інтерпретувати та використовувати геопросторові дані, метадані щодо об'єктів природного і техногенного походження, застосовувати статистичні методи їхнього аналізу для розв'язання спеціалізованих задач у сфері геодезії та землеустрою.                                 | + |   | + |   | + | + |   | + |   |   | + | + | + |
| <b>ПРН10.</b> Обирати і застосовувати інструменти, обладнання, устаткування та програмне забезпечення, які необхідні для дистанційних, наземних, польових і камеральних досліджень у сфері геодезії та землеустрою                                                                                          |   | + |   |   | + |   |   | + |   |   | + |   | + |
| <b>ПРН11.</b> Організовувати та виконувати дистанційні, наземні, польові і камеральні роботи в сфері геодезії та землеустрою, оформляти результати робіт, готувати відповідні звіти.                                                                                                                        | + |   | + |   |   | + | + |   |   |   |   | + | + |
| <b>ПРН12.</b> Розробляти документацію із землеустрою, кадастрову документацію і документацію з оцінки земель із застосуванням комп'ютерних технологій, геоінформаційних систем та цифрової фотограмметрії, наповнювати даними державний земельний, містобудівний та інші кадастри.                          | + | + |   |   | + |   |   | + | + | + |   | + | + |
| <b>ПРН13.</b> Планувати і виконувати геодезичні, топографічні та кадастрові знімання, опрацьовувати отримані результати у геоінформаційних системах.                                                                                                                                                        |   |   |   | + |   | + | + |   |   |   | + |   | + |
| <b>ПРН14.</b> Планувати складну професійну діяльність, розробляти і реалізовувати проекти у сфері геодезії та землеустрою за умов ресурсних та інших обмежень.                                                                                                                                              | + | + |   | + |   |   |   | + |   | + |   | + |   |
| <b>ПРН15.</b> Розробляти і приймати ефективні рішення щодо професійної діяльності у сфері геодезії та землеустрою, у тому числі за умов невизначеності.                                                                                                                                                     | + |   |   |   |   | + | + | + |   |   |   | + | + |
| <b>ПРН16.</b> Знати теоретичні основи геодезії, вищої та інженерної геодезії, топографічного і тематичного картографування, складання та оновлення карт, дистанційного зондування Землі та фотограмметрії, землеустрою, оцінювання нерухомості і земельного кадастру                                        |   |   | + | + | + |   |   |   | + | + | + | + | + |
| <b>ПРН17.</b> Володіти методами організації топографо-геодезичного і землевпорядного виробництва від польових вимірювань до менеджменту та реалізації топографічної та землевпорядної продукції на основі                                                                                                   | + |   | + |   |   |   |   | + |   | + |   | + | + |

|                                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| використання знань з основ законодавства і управління виробництвом. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

**Схема формування оцінки. Форми оцінювання студентів** – рівень досягнення всіх запланованих результатів навчання визначається за результатами написання тестових контрольних робіт та виконання завдань лабораторних робіт.

Питома вага результатів навчання у підсумковій оцінці за умови її опанування на належному рівні:

- ✓ результати навчання – 1.1 – 1.6 (знання) – 5% за кожен (30%);
- ✓ результати навчання – 2.1 – 2.4 (вміння) – 10% за кожен (40%);
- ✓ результати навчання – 3.1 (комунікація) – 20% ;
- ✓ результати навчання – 4.1 (автономність) – 10%.

У курсі передбачено 2 змістовні навчальні частини. Заняття проводяться у вигляді лекцій та лабораторних робіт. Завершується дисципліна – іспитом.

Упродовж семестру, після завершення першої змістовної частини проводиться тематична письмова тестова робота. Для визначення рівня досягнення результатів навчання, передбачених пунктами 2.1 – 2.4, студенти під час лабораторних занять демонструють результати своєї роботи та демонструють набуті навички.

Для студентів, які упродовж семестру не досягли мінімального рубіжного рівня оцінки (60% від максимально можливої кількості балів) проводиться заключна контрольна робота, максимальна оцінка за яку не може перевищувати 40% підсумкової оцінки (до 40 балів за 100 – бальною шкалою).

Умовою отримання позитивної результуючої оцінки з дисципліни є досягнення не менш як 60% від максимально можливої кількості балів.

**Підсумкове оцінювання у формі іспиту (письмова форма):** максимальна кількість балів на іспиті - 40 балів, мінімальна кількість балів, які додаються до семестрових – 24 бали (60% максимальної кількості балів, відведених на іспит).

Студенти, які набрали сумарно меншу кількість балів ніж критично-розрахунковий мінімум – 20 балів **до складання іспиту не допускаються**. Рекомендований мінімум для допуску до іспиту – 36 балів. Загалом, формування оцінки спирається на «Положення про організацію освітнього процесу у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка» (друга редакція), введеного в дію наказом № 170-32 від 11 квітня 2022 року.

**Студент допускається до іспиту за умови виконання всіх передбачених планом лабораторних робіт.**

**За роботи, подані не в зазначений термін, віднімається по 2 бали за кожний тиждень прострочки.**

|          | КР 1 | ЛР 1 | ЛР 2 | ЛР 3 | ЛР 4 | Іспит | Підсумкова оцінка |
|----------|------|------|------|------|------|-------|-------------------|
| Мінімум  | 1    | 8    | 8    | 8    | 11   | 24    | <b>60</b>         |
| Максимум | 5    | 13   | 13   | 13   | 16   | 40    | <b>100</b>        |

**Організація оцінювання.** Оцінювання проводиться протягом семестру по результатах виконання лабораторних робіт (чотири оцінки) і проведення контрольної тестової роботи після виконання завдань першої змістової частини та проведення іспиту в кінці курсу. Загальна оцінка за дисципліну виводиться шляхом сумування отриманих протягом семестру і під час іспиту балів.

#### Шкала відповідності

| Оцінка               | Бали   |
|----------------------|--------|
| Відмінно / Excellent | 90-100 |
| Добре / Good         | 75-89  |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Задовільно / Satisfactory | 60-74 |
| Незадовільно / Fail       | 0-59  |

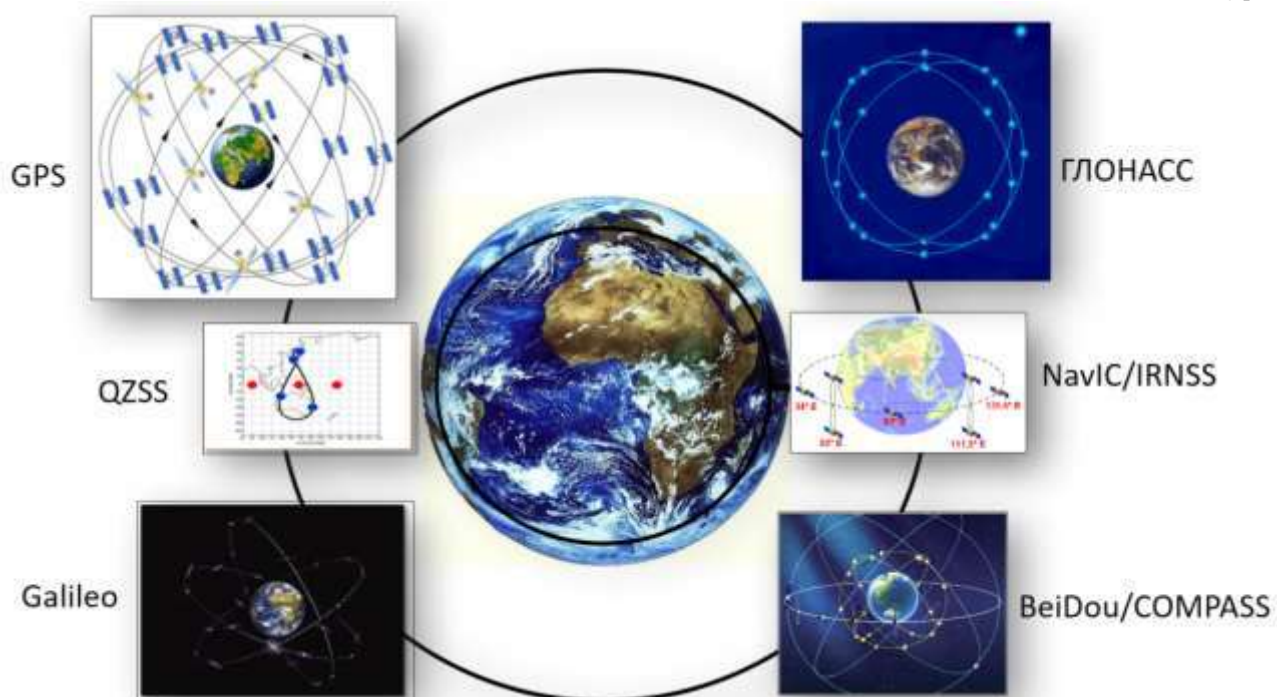
## 2. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЗАНЯТЬ

| №<br>п/п                                                                    | Назва лекції                                                                                          | Кількість годин |        |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|-----|
|                                                                             |                                                                                                       | лекції          | лабор. | С/Р |
| Змістова частина 1. Теоретичні основи супутникових радіонавігаційних систем |                                                                                                       |                 |        |     |
| 1                                                                           | Тема 1. Системи координат у супутниковій геодезії                                                     | 2               | 4      |     |
| 2                                                                           | Тема 2. Супутникові радіонавігаційні системи                                                          | 1               | -      | 5   |
| 3                                                                           | Тема 3. Обчислення параметрів руху супутників на орбіті                                               | 1               | 4      | 5   |
|                                                                             | *Історія становлення ГНСС першого покоління ТРАНЗИТ і ЦИКАДА                                          |                 |        | 8   |
|                                                                             | *Еволюція і розвиток супутників систем GPS та ГЛОНАСС,                                                |                 |        | 8   |
|                                                                             | *Супутникові навігаційні системи GALILEO, BeiDou                                                      |                 |        | 8   |
|                                                                             | Тестова контрольна робота                                                                             | 2               |        |     |
| Змістова частина 2. Виконання геодезичних вимірів супутниковими методами    |                                                                                                       |                 |        |     |
| 4                                                                           | Тема 4. Фізичні основи супутникового позиціонування                                                   | 2               | -      |     |
| 5                                                                           | Тема 5. Побудова геодезичних мереж                                                                    | 2               | 6      |     |
| 6                                                                           | Тема 6. Виконання геодезичних вимірів                                                                 | 4               | -      |     |
|                                                                             | *Структура і стан мережі коригуючих станцій для реалізації RTK-режиму вимірювань на території України |                 |        | 8   |
|                                                                             | *Порти розробників апаратури сегменту користувача для планування ГНСС-спостережень                    |                 |        | 8   |
|                                                                             | *Сфери застосування високоточних навігаційних даних                                                   |                 |        | 8   |
|                                                                             | ВСЬОГО                                                                                                | 14              | 14     | 58  |

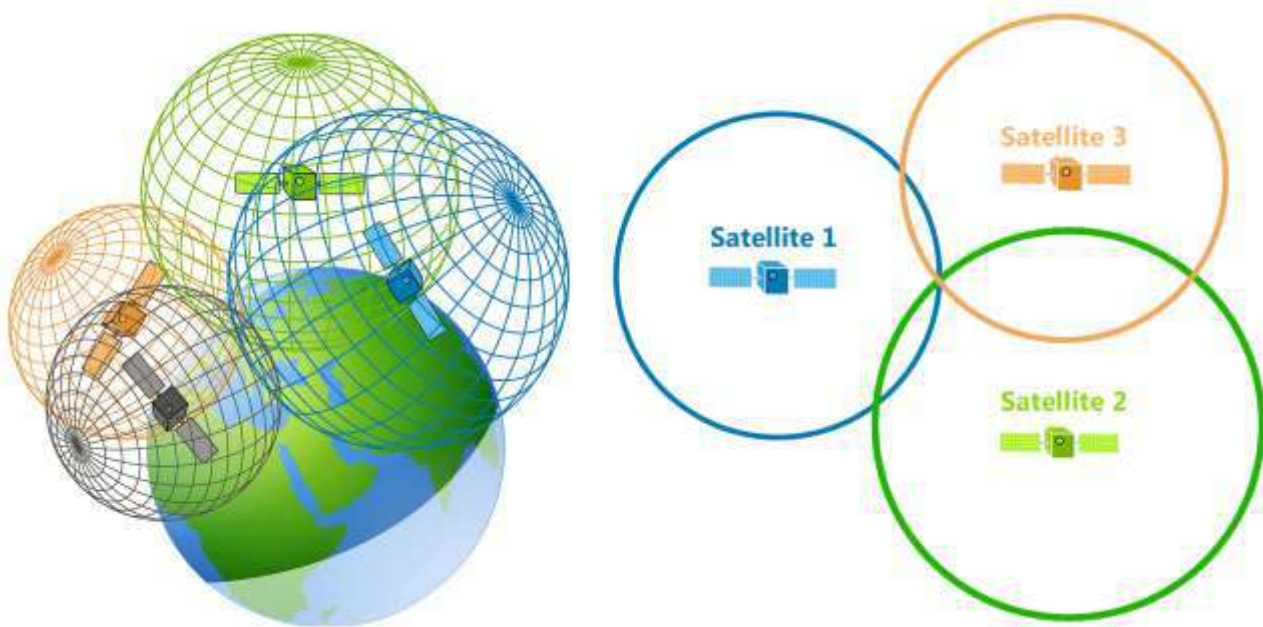
**Всього – 90 год., з них: лекцій – 14 год.; лабораторні роботи – 14 год.; самостійна робота – 58 год.; консультації – 4 год.**

### 3. КУРС ЛЕКЦІЙ (І САМОСТІЙНА РОБОТА)

#### ЗМІСТОВНА ЧАСТИНА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ



#### ТЕМА 1. СИСТЕМИ КООРДИНАТ У СУПУТНИКОВІЙ ГЕОДЕЗІЇ (2 год.)



1. Предмет і завдання курсу
2. Історія становлення та етапи розвитку супутникової геодезії
3. Динамічний та геометричний методи у супутниковій геодезії
4. Допплерівські супутникові системи
5. Класифікація систем координат у супутниковій геодезії

6. Перетворення між системами координат

7. Системи відліку часу

*Геодезія* (грец. *γεωδαισια*) - наука про методи визначення фігури і розмірів Землі, зображення земної поверхні на планах і картах і точних вимірювань на місцевості, пов'язаних з розв'язанням різних наукових і практичних завдань.

*Супутникова геодезія* - розділ геодезичної науки, в якому для вирішення наукових і практичних задач геодезії використовуються результати вимірювань, що виконуються за допомогою апаратури, встановленої на борту штучних супутників Землі (ШСЗ).

**Основними завданнями** супутникової геодезії є:

- вивчення зовнішнього гравітаційного поля і фігури Землі;
- уточнення фундаментальних геодезичних постійних, що характеризують форму, розміри і добове обертання Землі, а також визначення їх змін в часі;
- розвиток теорії спостережень космічних об'єктів і методів визначення та уточнення орбіт ШСЗ;
- розробка апаратного забезпечення ШСЗ і наземних станцій для вирішення геодезичних задач;
- визначення координат геодезичних пунктів в єдиній геоцентричній системі координат;
- підтримка на необхідному рівні точності вимірів в єдиній світовій геодезичній системі координат;
- встановлення зв'язку між відокремленими геодезичними системами координат;
- обробка та інтерпретація отриманих даних.

Історично супутникова геодезія, орієнтована на виконання точних геодезичних вимірів на земній поверхні за допомогою штучних супутників Землі (ШСЗ), виникла в кінці 50-х років, тобто незабаром після запуску перших ШСЗ. За минулий більш ніж 60-річний період ця галузь геодезії безперервно удосконалювалась, пройшовши різні стадії розвитку, які умовно можна розділити на такі три періоди:

**Перший період** (1958 - 1970 рр.) Цей період характеризувався розвитком основоположних методів супутникових спостережень, що включають методи обчислення і аналізу супутникових орбіт. При їх реалізації використовувалися, в основному, методи фотографування супутників за допомогою спеціальних розроблених камер. На основі виконаних досліджень були зроблені перші спроби побудови глобальних геодезичних мереж з використанням супутникових технологій, створення вдосконалених моделей Землі (моделі розроблені Смітсоновською астрофізичною обсерваторією і Годдарським центром космічних

польотів). Значна увага була приділена при цьому глобальним вивченням гравітаційного поля Землі.

**Другий період** (1970 - 1980 рр.) Основна увага протягом даного періоду була приділена розробці різних наукових проєктів. На їх основі були створені такі нові методи спостережень, як лазерні методи виміру відстаней до супутників і супутникова альтиметрія (визначення висоти супутника відносно поверхні). На особливу увагу заслуговують розроблені в цей час доплерівські супутникові системи Транзит (США) і Цикада (Радянський Союз). За цей період виконані глобальні визначення форми геоїда, що супроводжувались визначеннями координат багаточисельних точок, що знаходяться на земній поверхні. Проведені дослідження дозволили уточнити модельне представлення Землі. Підвищення рівня точності супутникових вимірів відкрило можливість детальнішого вивчення швидкості обертання Землі, закономірностей руху її полюсів, деформацій земної кори і інших параметрів.

**Третій період** (з 1980 р. по теперішній час). Останній період ознаменувався широкомасштабним використанням супутникових технологій в геодезії, геодинаміці, топографії і інших суміжних областях. Відмічений прогрес зв'язаний, перш за все, з подальшим удосконаленням радіонавігаційних систем, що виразилося у використанні досконаліших методів виміру величин, на основі яких обчислюються координати точок на земній поверхні, що нас цікавлять, вдаліших параметрів орбіт, а також цілого ряду інших технічних рішень. В результаті були створені такі багатофункціональні радіонавігаційні системи, як Навстар (США) і ГЛОНАСС (Радянський Союз). Стосовно геодезії особливої уваги заслуговують реалізовані в системі Навстар (GPS) методи фазових вимірів, що базуються на використанні несучих коливань, які дозволили реалізувати сантиметровий (а в окремих випадках і міліметровий) рівень точності при вимірі базисних ліній довжиною від декількох метрів до тисячі і більше кілометрів.

При впровадженні супутникових технологій в топографо-геодезичне виробництво різко змінилися не лише організаційні і технічні принципи проведення польових і камеральних робіт, але і багато інших основоположних принципів, що дає підставу говорити про революційні перетворення в геодезії, пов'язані із супутниковими методами геодезичних вимірів на земній поверхні. Суть таких революційних перетворень полягає в наступному:

При використанні традиційних наземних геодезичних методів неминує виникала потреба *забезпечення прямої видимості між суміжними пунктами*, що, у свою чергу, призводило до необхідності вибору пунктів на командних висотах місцевості, доступ до яких був далеко не завжди зручним, а також до будівництва дорогих геодезичних зовнішніх сигналів. Але навіть при виконанні цих вимог максимальна віддаль між суміжними пунктами обмежувалася, в кращому разі, відстанями в декілька десятків кілометрів. Одиничні

вимірювання окремих ліній порядку 100 км, як на Камчатському геодинамічному полігоні, були рідкими виключеннями. Сучасна супутникова технологія відкрила можливість проведення високоточних геодезичних вимірів за відсутності прямої видимості між пунктами, внаслідок чого відпала необхідність споруди зовнішніх сигналів і вибору пунктів на різного роду підвищеннях. При цьому довжина вимірюваних базисних ліній настільки жорстко не лімітується і може досягати тисячі і більше кілометрів.

При виконанні більшості геодезичних вимірів традиційними методами потрібна не лише пряма, але і *оптична видимість між пунктами*, наслідком чого є необхідність вибору хороших умов видимості і відповідного часу доби, що знижує продуктивність польових робіт. Супутникові методи визначення місця розташування є, по суті, всепогодними, внаслідок чого вимірювання можна проводити за будь-якої погоди, у будь-який час доби і у будь-яку пору року. При цьому продуктивність праці польових бригад різко зростає.

Геодезичні вимірювання, що базуються на традиційних методах, доводиться проводити у *високодинамічних нестійких приземних шарах атмосфери*. В результаті цього зовнішні умови виявляються, у багатьох випадках, основним джерелом похибок, що обмежує граничну точність геодезичних вимірів, скорочуючи тим самим круг завдань, що вирішуються геодезичними методами. При використанні супутникових технологій вплив атмосфери вдається зменшити в десятки разів, що дозволяє підвищити граничну точність вимірів на один - два порядки.

Переважна більшість традиційних геодезичних методів пристосована для виконання вимірів в статиці, тобто між нерухомими пунктами, що негативно позначається на розвитку динамічних методів, орієнтованих на виконання геодезичних вимірів в русі (морська геодезія, аерофотознімання і ін.).

При вивченні різного роду деформацій, що виникають в земній корі, великих інженерних спорудах і на інших об'єктах, з'являється необхідність виконання досить частих (а інколи і безперервних в часі) вимірів. Традиційні геодезичні методи погано пристосовані до організації таких моніторингових вимірів на об'єктах великих розмірів. Що стосується супутникової апаратури споживача, то вона без особливого утруднення дозволяє проводити такі вимірювання.

Геодезичні методи, що розвиваються протягом багатьох років, були орієнтовані на роздільне створення планових і висотних мереж, що обумовлено недостатньою універсальністю традиційних методів, які не дозволяють одночасно і з необхідною точністю визначати всі три координати пункту. Супутникові технології відкривають таку можливість, внаслідок чого доцільність роздільної побудови планових і висотних мереж стає, в більшості випадків, необґрунтованою.

Традиційні методи геодезичних вимірів характеризуються порівняно низьким рівнем автоматизації, що не лише знижує продуктивність праці, але і призводить, в окремих випадках, до появи додаткових похибок вимірів, обумовлених суб'єктивними чинниками. При супутникових вимірах роль спостерігача різко зменшується, оскільки практично весь процес вимірів і подальших обчислень повністю автоматизований.

Але не можна казати, що супутникові методи універсальні. Вони теж мають *недоліки*:

1. Проблема *перетворення висот і координат в локальну геодезичну систему*, а висот – додатково в систему нормальних (або ортометричних) висот.
2. Залежність від *перешкод радіосигналу та радіозавад*. Супутникові методи неможливо застосовувати під землею.
3. *Точність визначення висот* в 2-5 разів поступається точності визначення планових координат.
4. *Висока вартість обладнання*, складне програмне забезпечення.

Накопичений до теперішнього часу зарубіжний і вітчизняний досвід роботи з сучасною супутниковою апаратурою свідчить про те, що в результаті перерахованих вище позитивних сторін супутникової технології вдається в 10 — 15 разів підняти продуктивність праці, істотно понизити витрати на виконання різних видів топографо-геодезичних робіт і підвищити при цьому граничну точність основних геодезичних вимірів. В той же час успішна реалізація переваг супутникових методів позиціонування багато в чому залежить від того, наскільки успішно освоєний обслуговуючим персоналом весь комплекс питань, пов'язаних як з особливостями роботи апаратури, використовуваної при цьому, так і з характерною для неї технологією.

Якщо розглядати методи супутникової геодезії в послідовності розвитку, то першим слід вважати *геометричний метод*. Він заснований на синхронному фотографуванні ШСЗ на тлі зоряного неба з двох пунктів (як мінімум) на поверхні Землі, що дозволяє визначити складові вектора, що з'єднує ці пункти. Безліч таких векторів утворює векторну просторову мережу – супутникову (космічну) триангуляцію. Обробка і вирівнювання цієї мережі дають можливість визначати координати нових пунктів в системі координат вихідних пунктів. У силу великих висот спостережуваних супутників виявилось можливим створення мереж супутникового триангуляції зі сторонами порядку 1500-2000 км, що, в свою чергу дозволило зв'язати материки і острови Землі єдиною глобальною геодезичною мережею.

Перевагою геометричного методу є можливість виключити з розгляду теорію руху ШСЗ і разом з нею такі фактори, які важко врахувати, як збурення орбіт ШСЗ, викликані аномальним гравітаційним полем Землі, впливом тяжіння Місяця і Сонця, тиском сонячного випромінювання і т. п. Недоліком цього методу є те, що в результаті визначаються тільки лише

відносні координати нових пунктів в системі вихідних пунктів, без прив'язки до центру мас Землі.

Найбільш загальним методом супутникової геодезії слід вважати динамічний метод, що заснований на вивченні зміни орбіти ШСЗ в часі. Динамічний метод набагато складніше геометричного, тому що для його реалізації необхідно мати у своєму розпорядженні адекватну модель руху ШСЗ. Точність результатів у значній мірі залежить від точності врахування факторів, що впливають на рух ШСЗ: сили ваги, впливу тяжіння Місяця і Сонця, тиску сонячного випромінювання та ін.

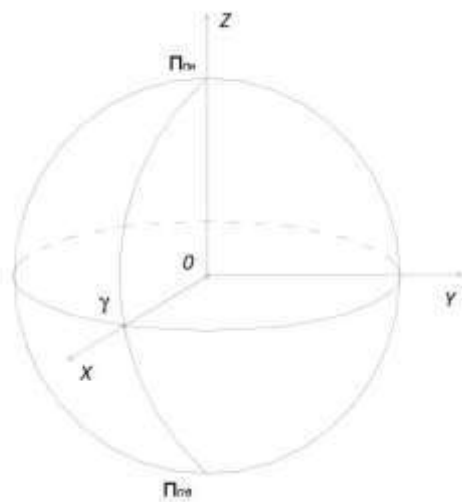
*Динамічний метод* дозволяє отримати положення пунктів в єдиній для всієї планети системі координат з початком у центрі мас, і визначити зовнішнє гравітаційне поле Землі. Особливо важливе значення має визначення параметрів гравітаційного поля Землі, які служать джерелом інформації для вивчення внутрішньої будови планети. Параметри визначаються з аналізу збурень орбіт ШСЗ.

Реалізація динамічного методу потребує виконання значного обсягу обчислень для спільного визначення координат наземних пунктів, елементів орбіт ШСЗ та уточнення параметрів моделей збурюючих сил методом послідовних наближень.

У разі визначення лише координат пунктів та поправок до елементів орбіти без визначення та уточнення параметрів гравітаційного поля Землі, динамічний метод називається *орбітальним*. У орбітальному методі параметри гравітаційного поля використовуються як вихідні. У динамічному і орбітальному методі не потрібна синхронізація спостережень з наземних пунктів на ШСЗ.

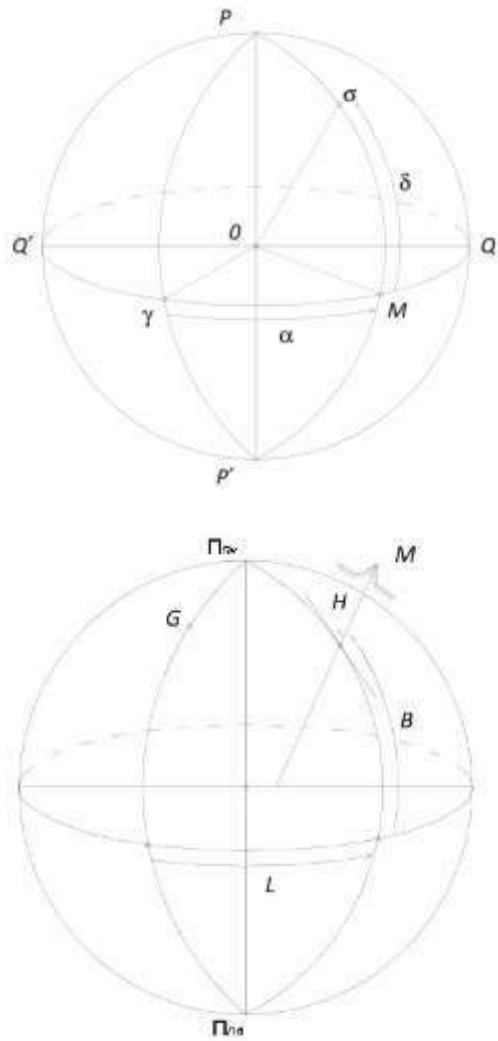
Системи координат, що використовуються у супутниковій геодезії поділяються на:

#### 1. Прямокутні



За основну площину прийнято площину екватора. Основна координатна вісь  $OX$  спрямована в певну точку. Вісь  $OY$  розташована в площині земного екватора під кутом  $90^\circ$  на схід від прийнятого початкового меридіана. Вісь  $OZ$  поєднана з північним напрямком осі обертання Землі.

#### 2. За формою координат



### 2.1. Сферичні (зоряні).

$\alpha$  - праве сходження, вимірюється в годинній мірі від 0 до 24h;

$\delta$  - схилення, відраховується уздовж кола схилень від небесного екватора  $Q'Q$  до об'єкту  $\sigma$  і вимірюється в градусній мірі від  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$

$\gamma$  - точка весняного рівнодення, перетин небесного екватора і екліптики.

### 2.2. Еліпсоїдальні (геодезичні).

$B$  - геодезична широта, кут між нормаллю до еліпсоїда, проведеної через задану точку  $M$  на поверхні Землі, і площиною екватора;

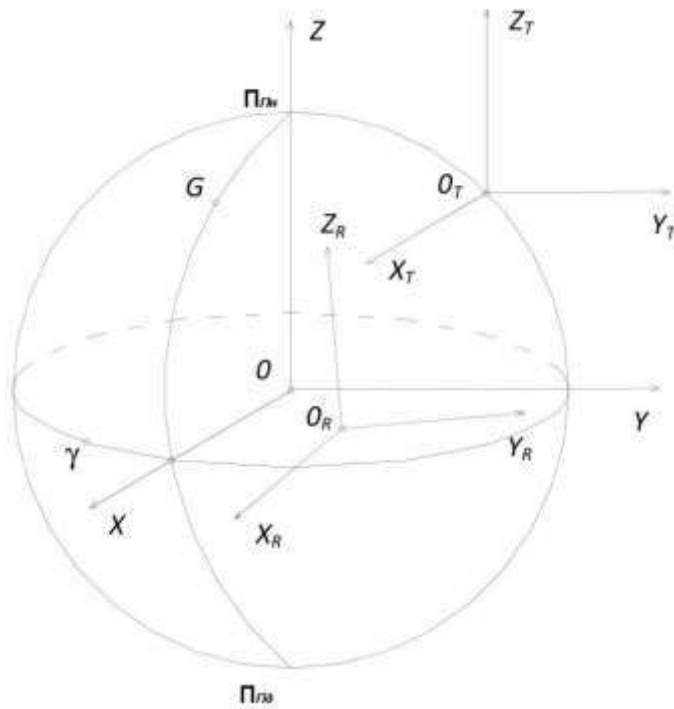
$L$  - геодезична довгота, двограний кут між площинами Гринвіцького  $G$  і заданого меридіанами;

$H$  - геодезична висота над референц-еліпсоїдом, відстань по нормалі від поверхні еліпсоїда до точки  $M$ .

## 3. За розташуванням системи відліку

3.1. Геоцентричні  $X, Y, Z$ , з початком відліку у центрі мас Землі;

3.2. Референці (квазігеоцентричні)  $X_R, Y_R, Z_R$ , з початком поблизу центру мас Землі, в центрі прийнятого референц-еліпсоїда;



3.3. Топоцентричні  $X_T$ ,  $Y_T$ ,  $Z_T$ , з початком відліку на поверхні Землі в точці спостереження.

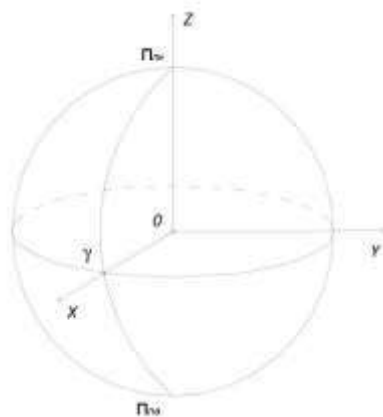
#### 4. За вибором основної координатної площини

*Екваторіальні* — в площині екватора на певну епоху (розрізняють першу і другу системи. Перша — та, що обертається, тобто бере участь у добовому обертанні Землі, друга — нерухома, тобто не бере участь у добовому обертанні Землі);

*Горизонтальні* — у площині місцевого горизонту;

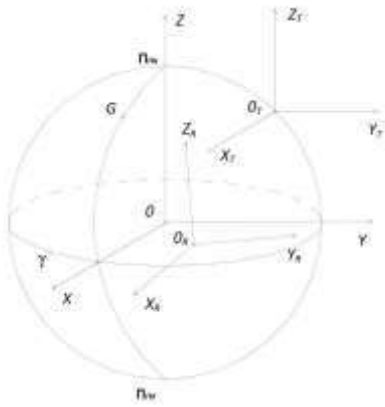
*Орбітальні* — у площині орбіти.

#### 5. За орієнтуванням площини $XOZ$



##### 5.1. Інерціальні (рівноденні).

Площина  $XOZ$  проходить через точку весняного рівнодення  $\gamma$ . В інерціальній сферичній системі координати  $\alpha$  - пряме сходження і  $\delta$  - схилення наводяться у фундаментальних (зоряних) каталогах, наприклад FK5 на епоху 2000 року. Координати точок земної поверхні зазвичай не ставлять в інерціальній сферичній системі.



### 5.2. Гринвіцькі

Вісь  $OX$  визначається перетином площини екватора і площини Гринвіцького меридіана. Вісь  $Y$  перпендикулярна осі  $X$  і доповнює систему координат до правої. Перехід від інерціальної системи координат до Гринвіцької здійснюється поворотом інерціальної системи навколо осі  $Z$  на кут, чисельно рівний істинному зоряному часу  $S$  в Гринвічі.

Для перетворення систем координат використовуються класичні формули вищої геодезії.

Перетворення з еліпсоїдальних у прямокутні (геоцентричні):

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L, \\ Z &= (N(1 - e^2) + H) \sin B, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $N$  – радіус кривизни першого вертикала:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (2)$$

$e$  – ексцентриситет меридіанного еліпса:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad (3)$$

$a, b$  – велика і мала півосі еліпсоїда.

Перетворення з прямокутної (геоцентричної) в еліпсоїдальну:

Спочатку визначають допоміжну величину  $D$ :

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (4)$$

Якщо  $D=0$ , то:

$$B = \frac{\pi}{2} \frac{Z}{|Z|}, \quad L = 0, \quad H = Z \sin B - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \quad (5)$$

Якщо  $D>0$ , то:

$$L_a = \arcsin\left(\frac{Y}{D}\right), \quad (6)$$

при цьому:

$$\text{Якщо } Y < 0, X > 0 \rightarrow L = 2\pi - L_a$$

$$\text{Якщо } Y < 0, X < 0 \rightarrow L = \pi + L_a$$

$$\text{Якщо } Y > 0, X < 0 \rightarrow L = \pi - L_a$$

$$\text{Якщо } Y > 0, X > 0 \rightarrow L = L_a$$

Якщо  $Z=0$ , то:

$$B = 0, \quad H = D - a. \quad (7)$$

У всіх інших випадках використовується така схема обчислень:

1. Знаходять допоміжні величини  $r$ ,  $c$ ,  $p$  за виразами:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad c = \arcsin\left(\frac{Z}{r}\right), \quad p = \frac{e^2 a}{2r}. \quad (8)$$

2. Реалізують ітеративний процес:

$$s_1 = 0,$$

$$b = c + s_1, \quad (9)$$

$$s_2 = \arcsin\left(\frac{p \sin(2b)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 b}}\right).$$

Якщо модуль різниці  $|s_2 - s_1|$  менше заданого  $\varepsilon$ , то

$$B = b,$$

$$H = D \cos B + Z \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \quad (10)$$

В іншому випадку прирівнюють  $s_1 = s_2$  і обчислення повторюють, починаючи з обчислення  $b$ . Значення  $\varepsilon$  приймається рівним 0,0001 ", що забезпечує похибку обчислення  $H$  не гірше 0,003 м.

Перетворення *еліпсоїдальних у плоскі прямокутні* в проекції Гаусса-Крюгера на референц-еліпсоїді Красовського:

$$\begin{aligned} x = & 6367558,4698B - \sin(2B) (16002,8900 + 66,9607 \sin^2 B + 0,3515 \sin^4 B \\ & - l^2(1594561,25 + 5336,535 \sin^2 B + 26,790 \sin^4 B + 0,149 \sin^6 B \\ & + l^2(672483,4 - 811219,9 \sin^2 B + 5420,0 \sin^4 B - 10,6 \sin^6 B \\ & + l^2(278194 - 830174 \sin^2 B + 572434 \sin^4 B - 16010 \sin^6 B \\ & + l^2(109500 - 574700 \sin^2 B + 863700 \sin^4 B - 398600 \sin^6 B)))))) \\ y = & (5 + 10n) \cdot 10^5 + l \cos B (6378245 + 21346,1415 \sin^2 B + 107,159 \sin^4 B + 0,5977 \sin^6 B \\ & + l^2(1070204,16 - 2136826,66 \sin^2 B + 17,98 \sin^4 B - 11,99 \sin^6 B \\ & + l^2(270806 - 1523417 \sin^2 B + 1327645 \sin^4 B - 21701 \sin^6 B \\ & + l^2(79690 - 866190 \sin^2 B + 1730360 \sin^4 B - 945460 \sin^6 B)))))) \end{aligned} \quad (11)$$

У цих виразах значення широти  $B$  виражають у радіанній мірі,  $n$  – номер шестиградусної зони проекції Гаусса-Крюгера, а величина  $l$  обчислюється в радіанній мірі за виразом:

$$l = \frac{L - (3 + 6(n-1))}{57,29577951}. \quad (12)$$

Для перетворення *прямокутних (геоцентричних)* координат між двома системами використовують семипараметричне перетворення Гельмерта.

Для прямого перетворення використовують вираз:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B = (1 + m) \begin{bmatrix} 1 & +\omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & +\omega_X \\ +\omega_Y & -\omega_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (13)$$

а для зворотного:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A = (1 - m) \begin{bmatrix} 1 & -\omega_Z & +\omega_Y \\ +\omega_Z & 1 & -\omega_X \\ -\omega_Y & +\omega_X & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (14)$$

де  $m$  – масштабний коефіцієнт,  $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$  – кути Ейлера (кути обертання осей системи),  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  – лінійні елементи перетворення (вектор зміщення).

Зверніть увагу, що у наведених виразах використовується спрощена (лінеаризована) матриця повороту, яку можна використовувати для малих значень  $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ . При цьому приймається, що  $\cos \omega \approx 1, \sin \omega \approx 0$ . Для оцінки точності такої заміни для кутів у  $10''$  для середнього радіусу Землі 6371 км обчислимо:

$$\Delta \approx R \cdot \frac{\omega^3}{6} \approx 6371000 \text{ м} \cdot \frac{(4,85 \cdot 10^{-5})^3}{6} \approx 0,0000001 \text{ мм}.$$

Одиниці відліку часу, що застосовуються при супутникових спостереженнях, можна розділити на дві групи - астрономічні та неастрономічні. Повний оберт Землі навколо своєї осі складає одиницю часу, звану *добою* (приблизно 86 400 сек) - основну астрономічну одиницю часу. Оберти Землі фіксуються щодо напрямку на будь-яку зірку або напрямком на центр Сонця.

Повний оберт Землі навколо осі щодо напрямку на будь-яку зірку називають *зоряною добою*. У якості початку відліку обертів Землі прийнято використовувати *точку весняного рівнодення*  $\gamma$ . Проміжок часу від точки відліку називається *зоряним часом*. Звичайний час, виміряний на меридіані даного місця, називається *місцевим часом* даного меридіана.

Повний оберт Землі навколо своєї осі щодо напрямку на центр Сонця називають *істинною сонячною добою*. За її початок беруть північ. Істинні сонячні доби не відповідають одній з основних вимог до одиниць виміру часу – вони мають різну тривалість протягом року через нерівномірний рух Землі навколо Сонця і нахил її орбіти до площини небесного екватора. Різниця може досягати 50 сек, тому за основну одиницю часу беруть середню сонячну добу, яка відраховується від «середнього Сонця» - гіпотетичної точки, розрахованої в припущенні рівномірного руху Землі по орбіті. «Середнє Сонце» робить один повний оберт по небесному екватору за такий же час, як і справжнє Сонце по екліптиці і проходить точку весняного рівнодення одночасно з Сонцем. Проміжок часу від моменту нижньої кульмінації «середнього Сонця» на меридіані даного місця називається *середнім сонячним часом* або *середнім часом*.

Вважається, що 24 год зоряного часу дорівнюють приблизно 23 год 56 хв 4,091 сек середнього часу.

Середній сонячний час за гринвіцьким меридіаном називається *всесвітнім часом* **UT** (Universal Time). Цей час містить рік, місяць, число, годину, хвилину і секунду. Перші три

величини відраховуються за загальноприйнятим (григоріанським) календарем, інші - за місцевим середнім часом на Гринвіцькому меридіані. Ця система відліку введена в 1928 р. на III Генеральній асамблеї Міжнародного астрономічного союзу. Всесвітній час вимірюється годинним кутом "середнього Сонця", збільшеним на 12 годин, щодо гринвіцького меридіана.

Так як рух полюсів Землі спричиняє зміну положення меридіанів, то за ступенем обліку збурюючих факторів розрізняють такі системи всесвітнього часу:

**UT0** - всесвітній час, що отримується в результаті поточних астрономічних вимірювань відносно не уточненого поправками Гринвіцького меридіана;

**UT1** - всесвітній час Гринвіцького меридіана, розрахований з урахуванням руху полюсів. Він є основою для вимірювання часу в повсякденному житті;

**UT2** - відрізняється від UT1 сезонними виправленнями;

**UT1R** - відрізняється від UT2 виправленнями на припливи.

Через нерівномірність добового обертання Землі зоряні і сонячні доби незначно змінюються. Для точних розрахунків введено рівномірно поточний час - *ефемеридний (попередньо розрахований) час ET*, де одиниця міри часу (ефемеридна секунда), розраховується як  $1 / 86\,400$  частка середньої тривалості доби 1 січня 1900 року.

Система ефемеридного часу утворена з UT шляхом введення поправки, отриманої за результатами спостереження Місяця. Починаючи з 1986 року в якості аргументу в багатьох таблицях Астрономічного щорічника використовується земний динамічний час TDT. Система часу TDT заснована на теорії руху Сонця, Місяця і планет Сонячної системи. Динамічний час використовується при визначенні ефемерид супутників. Створення надстабільних атомних еталонів частоти (часу) дозволило перейти до неастрономічного способу вимірювання часу і ввести штучну одиницю міри часу, що не залежить від особливостей обертання Землі – *атомну секунду*, близьку до ефемеридної. Атомна секунда прийнята як одиниця виміру часу на XIII Генеральній конференції з мір і ваг у 1967 р.

Атомна секунда дорівнює інтервалу часу, протягом якого відбувається  $9\,192\,631\,770$  коливань, що відповідає резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію-133 при відсутності зовнішніх впливів. Атомна секунда є основою шкали атомного часу **AT** і прийнята в цей час за одиницю часу в системі **CI** (замість ефемеридної секунди). Осереднення значень різних атомних еталонів часу дозволило Міжнародному бюро часу БІН (Bureau International de l'Heure) створити шкалу міжнародного атомного часу **TAI**.

Для того, щоб система AT несуттєво відрізнялася від системи UT1, яка використовується у повсякденному житті, шкала AT періодично коригується так, щоб різниця між значеннями часу, що відносяться до цих систем, не перевищувала 0,9 сек. Скоригована таким чином

система атомного часу називається *всесвітнім координованим часом UTC*. Сигнали UTC передаються по радіомовних мережах. Різниця TAI-UTC становила 25 с на 1 січня 1990 р.

Переваги UTC - порівняно висока рівномірність шкали, притаманна атомним годинникам і прив'язка до природних процесів (схід, захід), характерним для сонячного часу.

*Поясний час ZT* містить рік, місяць і число, які відраховуються аналогічно всесвітньому часу UT. Години, хвилини і секунди - як місцевий середній час центрального географічного меридіана даного часового поясу за формулою  $ZT = UTC + \Delta n$ , де  $\Delta n$  - номер часового поясу. Поясний час введено в більшості країн з 1884 р. При цьому поверхня Землі була поділена на 24 часових пояси, центральні меридіани яких відрізняються за довготою на  $15^\circ$  (1 година). Перевага поясного часу - зручність використання в повсякденному житті, так як час не потребує уточнення при відповідних переміщенні уздовж паралелі.

Повне позначення заданих моментів часу за допомогою розглянутих систем відліку не завжди зручне і вимагає використання як мінімум чотирьох чисел - рік, місяць, число і години з десятковими частками, тому на практиці застосовують систему відліку, яка називається юліанським періодом, зручність якої полягає, зокрема, в тому, що відлік поточного часу ведеться в днях (середніх сонячних добах з десятковими долями). Всі дні в цьому періоді пронумеровані по порядку незалежно від прийнятої календарної системи, номера року, місяця і т. д.

Рахунок днів, названих *юліанським датами JD* (Julian Date), ведеться від полудня 1 січня 4713 до н. е.. (початок юліанського періоду) до заданого моменту часу. Загальна тривалість юліанського періоду складає 7 980 років.

*Юліанське століття* містить 36 525 середніх сонячних діб.

Будь-який момент часу в цій системі відліку виражається числом, в якому ціла частина - число Юліанських днів, що пройшли до останнього середнього за Гринвічем полудня, а дробова частина - інтервал часу в частках середніх сонячних діб, що пройшли від цього полудня до розглянутого моменту часу. Наприклад, в юліанському періоді момент київського часу 8 год 48 хв 1 січня 1985 року позначається числом: 2 446 066, 783 333 JD.

*Оновлена юліанська дата MJD* (Modified Julian Date) отримується вирахуванням з JD 2 400 000,5 діб. У результаті цього в MJD міститься менше цифр, а відлік починається опівночі, а не опівдні. Перерахунок дати загальноприйнятого календаря в юліанському дату здійснюють по довідкових таблицях або розрахункових формулах.

СРНС GPS і ГЛОНАСС функціонують у власних системах часу, заснованих на атомному годиннику. Початок відліку тимчасової шкали прив'язується до моменту ініціалізації системи.

Наприклад, відлік часу системи GPS (час GPS - GPST) починається з 0 годин 6 січня 1980 і на 19 сек менше часу TAI. Для системи GPS є такі спеціальні одиниці:

GPS-тиждень – кількість тижнів, що пройшов з моменту ініціалізації системи (відлік GPS-тижня починається від півночі з суботи на неділю);

GPS-день – номер дня в межах GPS-тижня, відлічуваний від 0 до 6;

GPS-секунда – кількість секунд в межах GPS-тижня.

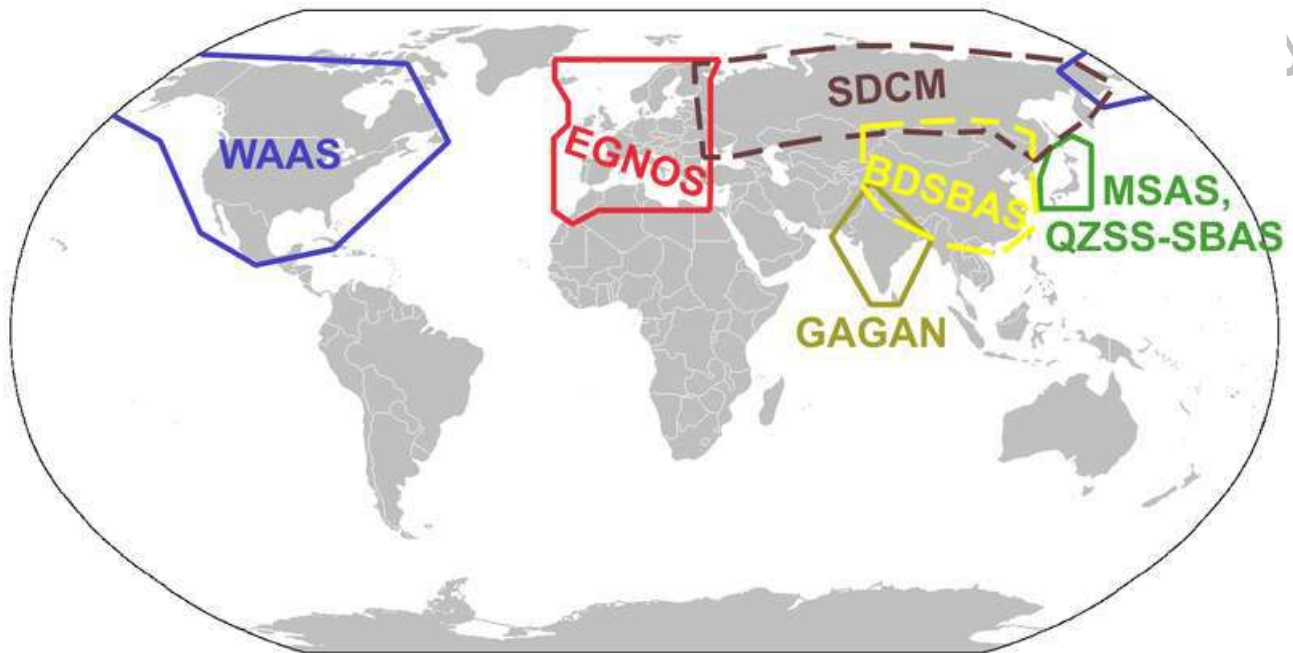
Системний час GPS, Galileo, BeiDou і ГЛОНАСС коригується в останню секунду 31 грудня або 30 червня, або в обидві дати, якщо розбіжність UTC і UT1 (UT, виправлена за зміщення миттєвого полюса Землі щодо його середнього положення) перевищує 0,9 с.



### Контрольні запитання:

1. Які основні наукові й практичні завдання вирішує супутникова геодезія? У чому полягають її ключові переваги та недоліки порівняно з традиційними наземними геодезичними методами?
2. На які три основні періоди поділяють історію розвитку супутникової геодезії? Наведіть коротку характеристику кожного з них.
3. У чому полягає принципова відмінність між геометричним та динамічним (а також його частковим випадком — орбітальним) методами? Які переваги та обмеження має кожен із них?
4. Дайте визначення та поясніть різницю між геоцентричними, референцними (квазігеоцентричними) та топоцентричними системами координат.
5. Чим відрізняються інерціальна (рівноденна) та гринвіцька прямокутні системи координат за орієнтуванням площини  $XOZ$ ? За допомогою якого параметра здійснюється перехід між ними?
6. Дайте визначення геодезичній широті  $B$ , довготі  $L$  та висоті  $H$ . За якими формулами здійснюється перехід від еліпсоїдальних координат  $(B, L, H)$  до просторових прямокутних геоцентричних координат  $(X, Y, Z)$ ?
7. Які 7 параметрів використовуються у перетворенні Гельмерта для зв'язку двох прямокутних систем координат? За якої умови припустимо використовувати спрощену (лінеаризовану) матрицю повороту?
8. У чому полягає відмінність між зоряною та середньою сонячною добою? Чим відрізняються між собою модифікації всесвітнього часу  $UT_0$ ,  $UT_1$ ,  $UT_2$  та  $UT_1R$ ?
9. Яке фізичне визначення має атомна секунда? Поясніть сутність та призначення Всесвітнього координованого часу UTC і спосіб його узгодження з обертанням Землі.
10. У чому полягає зручність використання юліанських дат  $JD$  та  $MJD$  у астрономо-геодезичних розрахунках? За якими одиницями відраховується системний час GPS (GPST)?

## ТЕМА 2. СУПУТНИКОВІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ (1 год.)



[LibreTexts - Ukravinska](#)

1. Історія розвитку сучасних систем визначення місця розташування.
2. Широкозонні диференційні системи
3. Еволюція та сучасний стан глобальних навігаційних супутникових систем
4. Глобальні та регіональні супутникові навігаційні системи

Безпосередньою попередницею сучасних систем визначення місця розташування є беззапитна СРНС військово-морського флоту США NNSS (Navy Navigation Satellite System), пізніше отримала назву ТРАНЗИТ. Її експлуатація була розпочата в 1964 р. Система складалася з шести супутників, розташованих на майже кругових полярних орбітах з висотою близько 1100 км над поверхнею Землі. Система ТРАНЗИТ була розроблена військовими США в першу чергу для визначення координат кораблів і літаків. У 1967 р. Було дозволено цивільне використання цієї системи, і вона стала широко використовуватися по всьому світу для цілей навігації та геодезії.

З 1979 р. в СРСР почалася експлуатація аналогічної системи під назвою ЦИКАДА. Вона складалася з чотирьох навігаційних супутників, виведених на кругові орбіти висотою 1000 км. Ця система дозволяла споживачам в середньому через кожні півтори-дві години входити в радіоконтакт з одним із супутників і визначати планові координати свого місця розташування при тривалості сеансу 5-6 хв.

Принцип дії обох систем заснований на ефекті Доплера. Відома частота випромінювання супутника, який пролітає над пунктом спостереження. Коли супутник знаходиться вертикально над пунктом зсув частоти Доплера дорівнює 0. І в будь-який момент часу відомо місце розташування супутника на орбіті по відомій частоті випромінювання.

Пізніше супутники системи ЦИКАДА були дообладнані приймальною вимірювальною апаратурою виявлення аварій об'єктів, оснащених спеціальними радіобуями, і вони утворили систему "КОСПАС". Спільно з американо-франко-канадською системою САРСАТ вони утворюють єдину службу пошуку і порятунку КОСПАС-САРСАТ.

Основними недоліками системи ТРАНЗИТ і ЦИКАДА були великі перерви між проходженнями супутників і порівняно невисока навігаційна точність (близько 100 м), в результаті чого виникла необхідність створення універсальної навігаційної системи, що задовольняє вимогам усіх потенційних споживачів: авіації, морського флоту, наземних об'єктів і космічних кораблів.

Така СРНС повинна була б у будь-який момент забезпечувати користувачам можливість визначати три просторові координати, вектор швидкості і точний час.

Ці можливості були реалізовані в СРНС GPS NAVSTAR (США) та ГЛОНАСС (Росія), розроблених незалежно один від одного.

Існує ряд завдань, які вимагають високої точності навігації. До цих завдань відносяться: зліт, захід на посадку і посадка літаків, судноводіння в прибережних водах, навігація вертольотів і автомобілів та інші.

Для забезпечення диференціального режиму вимірювань для великого регіону - наприклад, країн Європи, США - передача коригувальних диференціальних поправок здійснюється за допомогою геостационарних супутників. Системи, що реалізують такий підхід, отримали назву *Супутникові системи диференціального доповнення (SBAS)* або Широкозонні диференціальні системи.

SBAS (Satellite-Based Augmentation System - супутникова система диференціального доповнення) - це технологія підвищення точності та надійності стандартних ГНСС (GPS, Galileo тощо) шляхом трансляції коригувальних даних через геостационарні супутники (GEO) на великі географічні регіони.

Точність позиціонування: 1-2 м в плані (проти 5-10 м у стандартному автономному режимі). Ключова властивість системи – цілісність, а саме здатність системи за лічені секунди (Time-to-Alarm) виявити збій або аномалію у роботі навігаційних супутників і попередити користувача. Це критично важливо для задач із підвищеними вимогами до безпеки.

Архітектура та принцип функціонування (Рис.1).

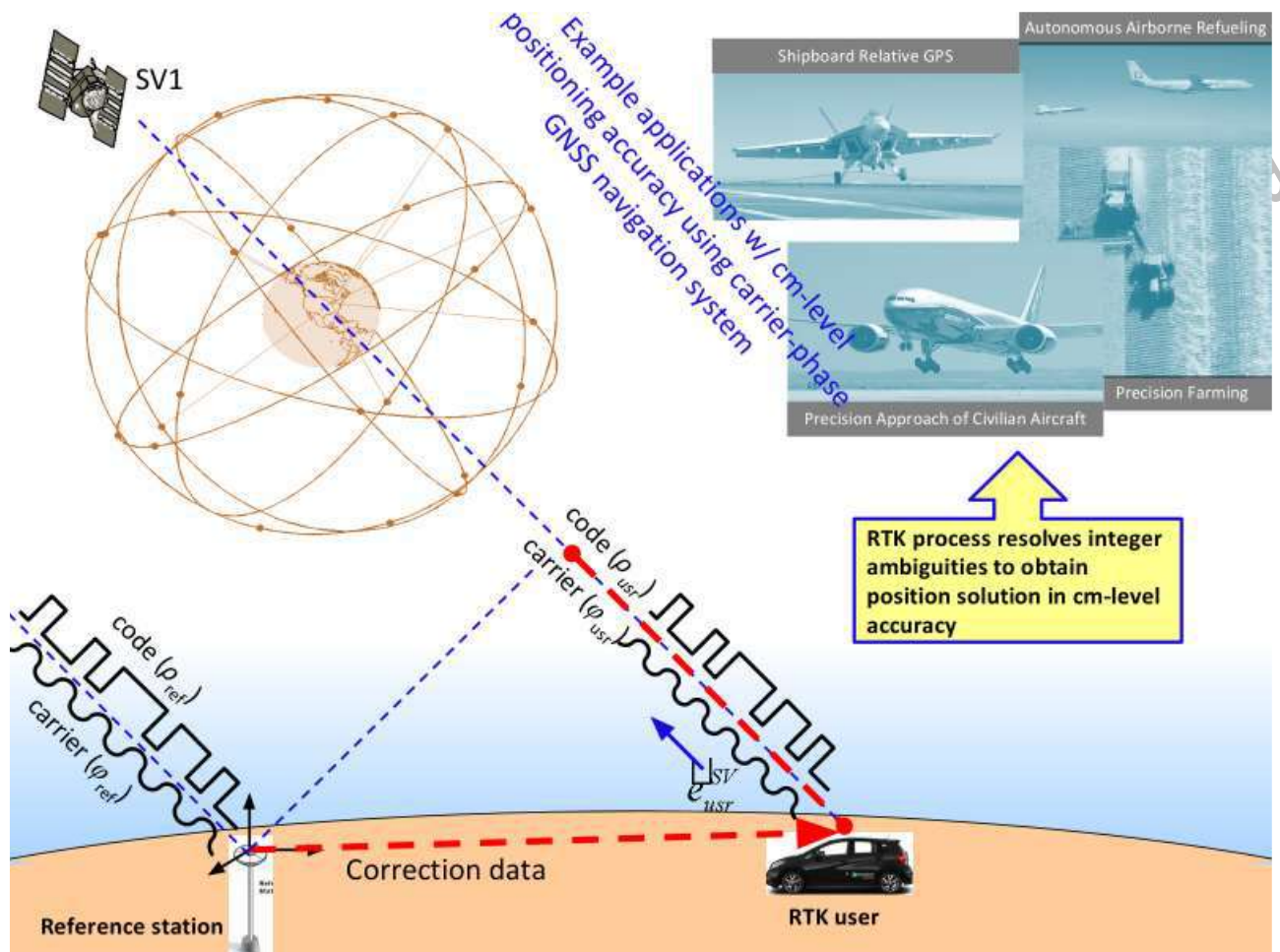


Рис. 1. Принцип функціонування SBAS.

Джерело – розроблено авторами.

Система SBAS складається з трьох основних сегментів:

1. Мережа наземних опорних станцій (RIMS), які розташовані по всьому регіону обслуговування. Вони безперервно приймають сигнали ГНСС і фіксують відхилення.

2. Центральний обчислювальний центр. Він визначає складові похибок і формує комплекс поправок:

- ефемеридні поправки (уточнення орбіт супутників);
- часові поправки (коригування дрейфу годинників супутників);
- іоносферні поправки (сітка затримок сигналу в іоносфері).

3. Геостационарні супутники (GEO). Вони ретранслюють сформований кадр поправок на приймачі користувачів у форматі, сумісному за структурою зі стандартним сигналом GPS (на частоті L1 / L5).

### Основні регіональні системи SBAS

Системи SBAS розгортаються окремими державами чи регіональними союзами, але є взаємосумісними завдяки єдиному стандарту ICAO (Табл.1.):

Таблиця 1. Регіональні системи SBAS

| Назва системи   | Регіон покриття            | Держава / Організація           |
|-----------------|----------------------------|---------------------------------|
| <b>WAAS</b>     | Північна Америка           | США (FAA)                       |
| <b>EGNOS</b>    | Європа та Середземномор'я  | Європейський Союз (ESA / EUSPA) |
| <b>MSAS</b>     | Японія та Східна Азія      | Японія                          |
| <b>GAGAN</b>    | Індія та Індійський океан  | Індія (ISRO / AAI)              |
| <b>SouthPAN</b> | Австралія та Нова Зеландія | Австралія / Нова Зеландія       |
| <b>KASS</b>     | Південна Корея             | Південна Корея                  |

Завдяки взаємосумісності рухомий об'єкт (наприклад, міжконтинентальний літак) може безперервно переключатися між WAAS, EGNOS, GAGAN тощо без втрати точності чи перевизначення параметрів.

Перспективи розвитку (SBAS другого покоління)

Сучасний вектор розвитку SBAS передбачає реалізацію концепції DFMC SBAS (Dual-Frequency Multi-Constellation). Він передбачає багатосистемність, а саме опрацювання поправок не лише для GPS, але й для Galileo, BeiDou. Двочастотність (L1 + L5) дозволить забезпечити пряме виключення іоносферних затримок на боці приймача, що дозволить підвищити точність SBAS до субметрового рівня (<0,5 м). Підвищена завадозахищеність призведе до більшої надійності позиціонування в умовах міської забудови («міських каньйонів») і складного рельєфу.

Перша чверть XXI століття стала епохою якісного стрибка у розвитку супутникових технологій позиціонування. Якщо у кінці XX століття єдиною повноцінно функціонуючою системою була американська GPS, то після 2000 року відбувся масштабний перехід до концепції Multi-GNSS - одночасного використання кількох автономних орбітальних угруповань.

Розвиток чотирьох основних глобальних систем у період 2010–2020+ років характеризується суттєвим нарощуванням кількості супутників, підвищенням їхньої надійності та впровадженням апаратного забезпечення нових поколінь.

#### 1. GPS: етап модернізації та GPS-III

Американська система GPS протягом усього досліджуваного періоду підтримувала статус повністю розгорнутого та високостабільного орбітального угруповання (ОУ), що налічувало 31-32 космічні апарати (КА). Основний акцент було зроблено на послідовне оновлення супутникового парку:

2012-2018 рр.: активна експлуатація та виведення на орбіту супутників серій GPS-IIRM та GPS-III, що забезпечили появу нових цивільних сигналів (L2C, L5) і підвищену завадозахищеність;

З 2020 року: розпочався якісно новий етап — розгортання супутників третього покоління GPS-III. Ці апарати забезпечують вищу точність, мають підвищену стійкість до радіоелектронних перешкод та покращену сумісність із європейською системою Galileo.

## 2. ГЛОНАСС: відновлення та перехід на «Глонасс-К2»

Після глибокої кризи 1990-х років, на початку 2010-х років розгортання системи було відновлено:

2012-2013 рр.: формування штатного угруповання з 24 КА на базі супутників другого покоління «Глонасс-М»;

2014-2020+ рр.: початок випробувань та подальший перехід на супутники третього покоління «Глонасс-К» та «Глонасс-К2». Головною метою цього етапу став перехід від застарілого частотного розділення сигналів (FDMA) до кодового (CDMA), що є стандартом для сучасних GNSS, а також збільшення орбітального угруповання до 30 КА.

## 3. BeiDou: стрімкий перехід до глобального покриття

Китайська програма демонструвала найвищі темпи розвитку, реалізувавши перехід від регіональної системи BeiDou-2 до глобальної BeiDou-3:

2012-2015 рр.: розгортання початкового угруповання з 18 КА, що забезпечило покриття Азіатсько-Тихоокеанського регіону;

2015-2020 рр.: масштабне будівництво глобальної системи BeiDou-3. До 2020 року угруповання досягло повного складу у 35 КА (включаючи супутники на середніх навколоземних, геостаціонарних та похилих геосинхронних орбітах), завершивши створення повноцінної глобальної GNSS.

## 4. Galileo: формування цивільного угруповання

Створення європейської системи Galileo відбувалося під цивільним контролем із фокусом на високу точність та сумісність із GPS:

2012-2016 рр.: формування початкової орбітальної інфраструктури з 18 КА та оголошення про початок надання первинних послуг (Initial Services).

2016-2020+ рр.: доведення угруповання до повного операційного складу в 30 КА (24 активних супутники та 6 резервних на трьох орбітальних площинах). Система досягла повного функціоналу (FOC), забезпечивши високу точність позиціонування у складних умовах міської забудови.

На межі 2020-2021 років усі чотири глобальні системи досягли повного операційного розгортання. Сучасний геодезичний приймач оперує полем із 40+ навігаційних супутників, що знаходяться на орбіті одночасно, гарантуючи більш високу точність позиціонування.

Вищезазначені системи відносяться до глобальних, так як працюють на всій території земної кулі. Крім них також наявні дві регіональні системи супутникової навігації.

1. *NavIC* (до 2016 р. *IRNSS* Індійська регіональна навігаційна супутникова система). Запуск першого КА відбувся у 2013 році. На 2016 рік було сформовано штатне орбітальне утворення з 7 супутників, 4 з яких на геосинхронній орбіті, 3 – на геостаціонарній. Наземні станції розташовано в 15 точках по всій території країни. Система покриває територію Індії та прилеглих країн на відстань до 1500 км від кордону.

2. *QZSS* – Квазізенітна супутникова система *Quasi-Zenith Satellite System* (Японія). Запуск першого КА відбувся у 2010 році. На 2018 рік було сформовано штатне орбітальне утворення з 4 супутників з можливістю розширення до 7. Станом на 2026 рік система має 5 КА, 3 з яких на квазізенітній орбіті і 2 – на геостаціонарній. Покриває територію Японії, Австралії та Океанії.

Вказані системи працюють за принципом SBAS.



### Контрольні запитання:

1. У чому полягав принцип дії перших супутникових систем (*NNSS Transit*, Цикада)? Які головні недоліки цих систем зумовили розробку *GPS NAVSTAR* та *ГЛОНАСС*?
2. Опишіть три основні сегменти супутникової системи диференціального доповнення (*SBAS*). Поясніть, що таке «цілісність» (*integrity*) системи і чому вона є критичною для авіації та високонадійного позиціонування.
3. У чому полягає суть концепції *DFMC SBAS* (*Dual-Frequency Multi-Constellation*)? Які технічні переваги надає використання двох частот ( $L1+L5$ ) та кількох угруповань ГНСС?
4. Які ключові етапи модернізації проходили системи *GPS*, *ГЛОНАСС*, *BeiDou* та *Galileo* протягом 2010–2020+ років? У чому полягає перевага роботи сучасного геодезичного приймача з полем у 40+ супутників?
5. Охарактеризуйте орбітальні угруповання, особливості побудови та зони покриття регіональних систем *NavIC* (Індія) та *QZSS* (Японія).

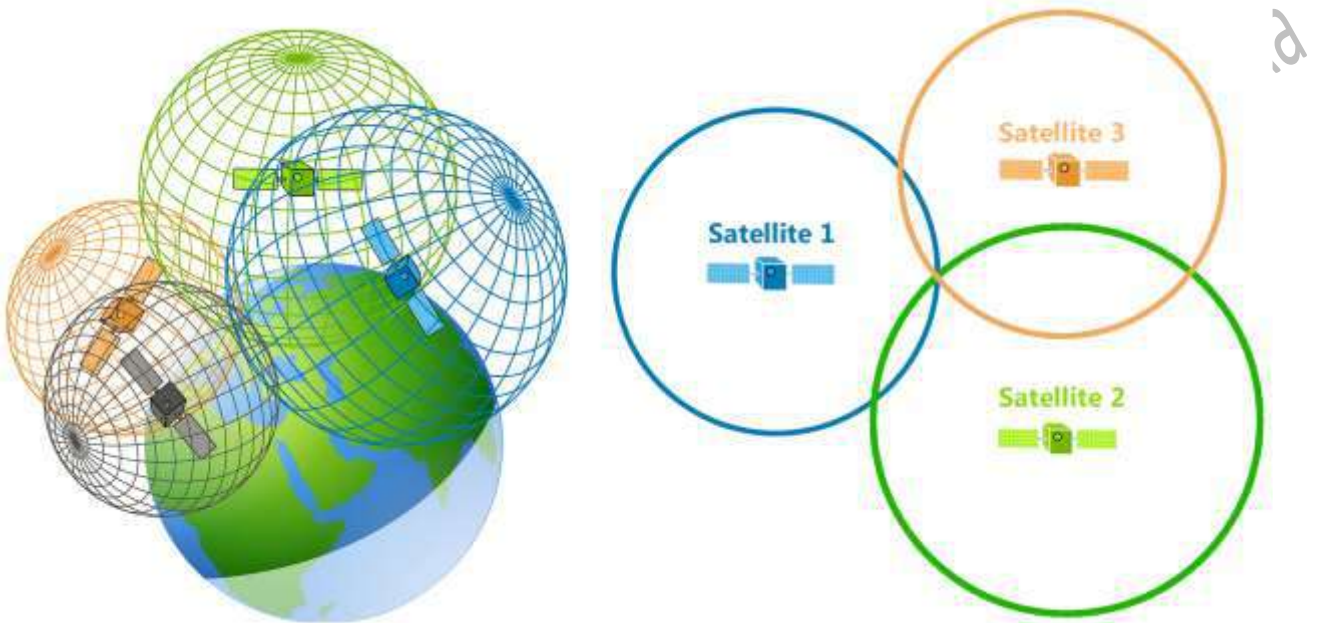
### САМОСТІЙНА РОБОТА (5 год.)

**Завдання:** підготувати стислу доповідь з мультимедійною презентацією (до 5 хвилин) або міні-реферат обсягом 5-7 сторінок.

#### Рекомендовані теми:

1. Порівняльний аналіз та історія розгортання регіональних систем SBAS (на вибір: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, SouthPAN або KASS).;
2. Архітектура, сегменти та специфіка трансляції поправок у системах SBAS (на прикладі однієї з систем);
3. Еволюція та сучасний технічний стан глобальної навігаційної системи (на вибір: GPS-III, ГЛОНАСС-K2, BeiDou-3 чи Galileo FOC);
4. Особливості орбітальної побудови та функціонування регіональних систем (NavIC чи QZSS);
5. Сфери практичного застосування SBAS: використання систем диференціального доповнення в авіації, точному землеробстві, геодезії та транспорті;
6. Перспективи SBAS другого покоління (DFMC SBAS): мультисистемність, двочастотність та захист від радіозавад.

### ТЕМА 3. ОБЧИСЛЕННЯ РУХУ СУПУТНИКІВ НА ОРБІТІ (1 год.)



1. Поняття про незбурений та збурений рух штучних супутників Землі.
2. Принцип роботи систем супутникової навігації
3. Склад ГНСС

*Незбурений рух* штучного супутника Землі (ШСЗ) — це його ідеалізоване переміщення по орбіті, коли враховується виключно тяжіння Землі (яку вважають матеріальною точкою), а будь-які сторонні (збурюючі) чинники відсутні. Такий рух повністю описується трьома законами Кеплера:

- супутник рухається по еліптичній траєкторії, а Земля розташована в одному з її фокусів;
- за однакові інтервали часу радіус-вектор, що сполучає Землю та супутник, покриває рівнозначні площі (супутник рухається швидше біля Землі та повільніше на відстані);
- співвідношення квадратів періодів обертання двох різних супутників дорівнює співвідношенню кубів великих півосей їхніх орбіт.

Реальні сили, що викривляють ідеальну траєкторію, називають *збурюючими*. Вони бувають гравітаційними (притягання інших космічних об'єктів) та негравітаційними (наприклад, опір атмосфери чи тиск сонячного світла). Оскільки гравітація є визначальною, для розрахунків орбіт застосовують такі базові спрощення:

1. Маса супутника вважають нескінченно малою порівняно з масою Землі, а сам апарат — матеріальною точкою.
2. Сонце, Місяць та планети, які чинять найбільший гравітаційний вплив, також моделюють як матеріальні точки.
3. Вплив об'єктів поза межами Сонячної системи та міжзоряного пилу вважають мізерним і не враховують.

Завдяки цим припущенням складну динаміку супутника зводять до класичної задачі *n* тіл. У першому наближенні рух розглядають як базову задачу двох тіл (Земля–супутник), яка описується фундаментальними законами Ньютона: інерції, пропорційності прискорення до сили  $\vec{w} = \frac{\vec{F}}{m}$  та рівності дії й протидії.

У реальних умовах на штучний супутник діють численні сторонні сили — збурюючі фактори. Через це його дійсна траєкторія відхиляється від ідеальної (кеплерової) і називається збуреною орбітою. Ступінь цього впливу безпосередньо залежить від параметрів самої орбіти, маси апарата, площі його поперечного перерізу та здатності поверхні відбивати світло.

За рівнем інтенсивності всі дестабілізуючі чинники можна розділити на три категорії:

1. *Основні збурюючі сили* (найсильніший вплив). Несферичність Землі призводить до нерівномірної сили тяжіння через те, що планета сплюснута біля полюсів і не є ідеальною кулею. Гравітаційні аномалії, викликані локальними неоднорідностями та коливаннями маси в надрах Землі. Зовнішня гравітація, викликана тяжінням з боку Місяця та Сонця. Спротив атмосфери відбувається через гальмування та тертя об повітряну оболонку (суттєве для орбіт

нижче 2000 км). Сонячний тиск здійснюється світловим потоком від Сонця, який фізично "підштовхує" супутник.

2. *Другорядні фактори* (помірний вплив). Припливні деформації, що вносять зміни гравітаційного потенціалу Землі внаслідок припливів, викликаних Сонцем і Місяцем. Рух земної осі, а саме ефекти прецесії та нутації (коливання осі обертання планети). Гравітація інших планет, яка спричинена слабким впливом решти об'єктів Сонячної системи.

3. *Мікрозбурення* (мінімальний вплив). Релятивістські ефекти, що виражені в поправках, які впливають із загальної теорії відносності. Динаміка атмосфери через циркуляцію, обертання та перерозподіл повітряних мас. Інші випадкові чи мізерні чинники космічного середовища.

### Основні принципи супутникової навігації

Кожна система супутникової навігації має в своєму складі деяку кількість космічних апаратів, які сукупно називаються *угрупованням супутників*. Кожен супутник пересувається по власній *орбіті*. Орбіта – умовна лінія в космічному просторі, вздовж якої рухається небесне тіло навколо іншого небесного тіла. ШСЗ обертаються навколо Землі за коловою, а здебільшого – за еліптичною орбітою. Якщо ШСЗ обертається разом із Землею навколо її осі (тобто, робить один оберт за добу), то він знаходиться постійно над однією точкою земної поверхні і називається геостаціонарним. Каталог координат та параметрів, який дозволяє визначити положення ШСЗ на орбіті в будь-який момент часу, називається *ефемеридами*.

Дані про орбіти всіх супутників угруповання називаються *альманахом*. В процесі роботи кожен супутник передає дані не тільки своєї орбіти, а й дані орбіт всього альманаху.

Якщо відомий точний час, коли супутник передав сигнал і час, коли приймач прийняв сигнал, можна визначити різницю між стартовим і кінцевим часом.

$$t_{trans} = t_{start} - t_{finish}. \quad (15)$$

Ця різниця називається *транзитний час*. Знаючи швидкість поширення радіохвиль, можна обчислити відстань між супутником і приймачем.

$$D = c \cdot t_{trans}. \quad (16)$$

Оскільки швидкість світла  $c$  становить приблизно 300 000 км/с у вакуумі, приймач може обчислити відстань або віддаль  $D$  до супутника за допомогою часу поширення сигналу.

Наприклад, якщо час проходження визначено як 0,07 секунди, відстань або псевдовіддаль до супутника від приймача може бути розрахована таким чином:

$$D = 300,000 \text{ km/s} \cdot 0.07 \text{ s}, \quad \text{тоді } D = 21,000 \text{ km}.$$

**Псевдовіддаль** – це віддаль, визначена за допомогою часу, а не вимірювання істинної віддалі.

Звичайно, це приблизний розрахунок, тому що швидкість світла дещо сповільнюється і воно заломлюється, коли входить у середовище, таке як земна атмосфера. Відмінності в рівнях атмосферного тиску викликають різні показники заломлення, чим глибше радіосигнал проникає в атмосферу Землі.

Для того, щоб розрахувати місцеположення приймача користувача (або координати точки на Землі), приймач повинен знати точне положення трьох супутників і точну відстань до кожного з них.

Таким чином, з геометричної точки зору в ГНСС трилатерація опирається на вимірювання відстаней (віддалей) від 3 супутників для того, щоб встановити місцеположення приймача на Землі. Іншими словами, основною ідеєю супутникових навігаційних систем є те, що вони використовують метод *трилатерації* для визначення положення приймача користувача за допомогою розрахунків, пов'язаних з інформацією переданою від кількох супутників.

Кожен супутник передає кодовані сигнали з точними інтервалами. Приймач ГНСС на земній поверхні або поблизу неї використовує ці сигнали для обчислення відстані між ним і передаючим супутником (із затримкою часу передачі). Поєднання поточних даних сигналів від чотирьох або більше супутників дозволяє приймачу визначити його місцеположення, швидкість і час.

Для передачі часу, як частини сигналу ГНСС, кожен супутник повинен дотримуватися дуже точного часу. Для цього супутники ГНСС використовують атомні годинники, що є дуже точними, але дуже дорогими. Всі годинники супутникового угруповання синхронізовані і вони посилають свої коди у відомий момент часу.

Однак, приймачі містять годинники аналогічні до кварцових, що є не дуже точними. Зазвичай кристал кварцу може спізнюватися на другий день, тому завжди існує помилка між годинниками супутника і приймача. Ця помилка називається зміщення часу ( $\Delta t$ ).

Таким чином, перші три вимірювання звужують діапазон місцеположення ГНСС. Трьох віддалей достатньо, якщо ми відкидаємо помилкові результати. Четверте вимірювання необхідне для корекції зміщення часу (різниці в синхронізації між годинниками супутника і приймача). Вимірювання віддалі додаткового 4-ого супутника усуває помилки зміщення часу. Відстані до чотирьох супутників дозволяють приймачу виключити неоднозначності в просторовому позиціонуванні.

Отже ми можемо записати рівняння для визначення вектору від початку відліку в прямокутній геоцентричній системі координат до супутника через вектор від приймача до супутника в референційній системі координат (Рис.2).

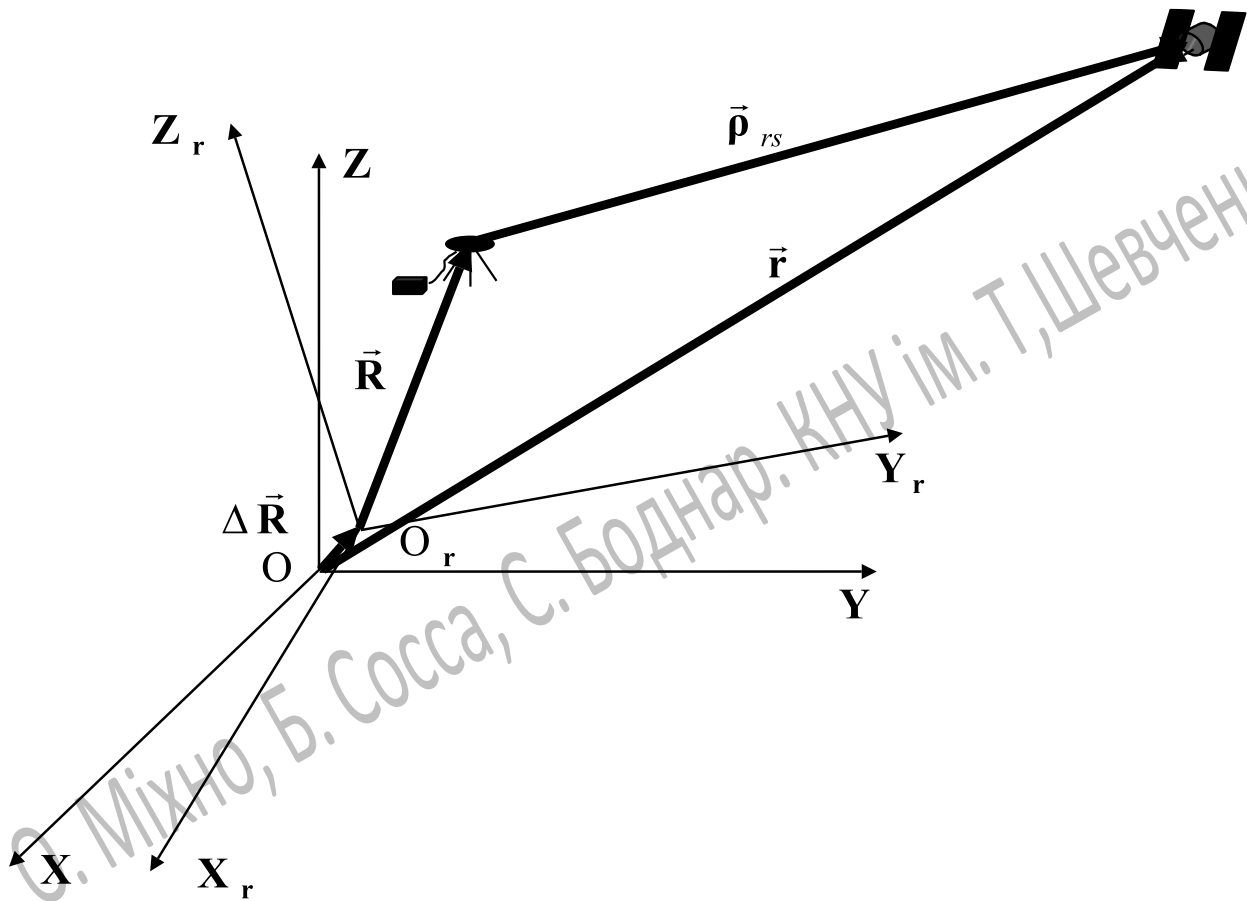


Рис. 2. Зв'язок між системами координат супутника і приймача.

Джерело – розроблено авторами.

Тут  $O$  – початок геоцентричної СК,  $X, Y, Z$  – її координатні осі.  $O_r$  – початок референційної системи координат,  $X_r, Y_r, Z_r$  – її координатні осі.

$$\vec{r} = \vec{\rho}_{rs} + \mathbf{PMR}\vec{R} + \Delta\vec{R}, \quad (17)$$

де  $\mathbf{P}$  – матриця повороту референційної СК ( $X_r, Y_r, Z_r$ ) відносно геоцентричної СК ( $X, Y, Z$ ):

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & \varphi & -\gamma \\ -\varphi & 1 & \vartheta \\ \gamma & -\vartheta & 1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

а  $\mathbf{M}$  – матриця масштабів вздовж осей координат:

$$\mathbf{M} = \text{diag}(\mu_X, \mu_Y, \mu_Z). \quad (19)$$

Рівняння 17 називають фундаментальним рівнянням космічної геодезії.

$$\text{При } \mathbf{P} = \mathbf{M} = \mathbf{E} \text{ і } \Delta\vec{R} = 0 \Rightarrow \vec{\rho}_{rs} = \vec{r} - \vec{R}.$$

Записавши цей вираз по модулю для фіксованого моменту  $t$ , отримаємо:

$$|\vec{\rho}_{rs}| = \sqrt{(X_S - X_r)^2 + (Y_S - Y_r)^2 + (Z_S - Z_r)^2}. \quad (20)$$

Таким чином, для системи з трьох векторів (Рис.3) вираз абсолютного позиціонування можна записати так:

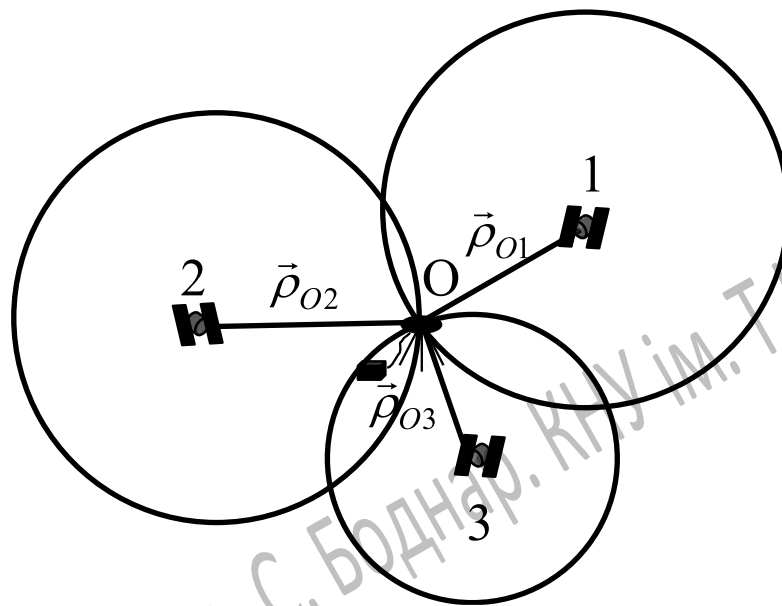


Рис. 3. Система трьох векторів.

Джерело – розроблено авторами.

$$\begin{cases} |\vec{\rho}_{O1}| = \sqrt{(X_1 - X_O)^2 + (Y_1 - Y_O)^2}; \\ |\vec{\rho}_{O2}| = \sqrt{(X_2 - X_O)^2 + (Y_2 - Y_O)^2}; \\ |\vec{\rho}_{O3}| = \sqrt{(X_3 - X_O)^2 + (Y_3 - Y_O)^2}. \end{cases} \quad (21)$$

для планових координат або

$$\begin{cases} |\vec{\rho}_{O1}| = \sqrt{(X_1 - X_O)^2 + (Y_1 - Y_O)^2 + (Z_1 - Z_O)^2}; \\ |\vec{\rho}_{O2}| = \sqrt{(X_2 - X_O)^2 + (Y_2 - Y_O)^2 + (Z_2 - Z_O)^2}; \\ |\vec{\rho}_{O3}| = \sqrt{(X_3 - X_O)^2 + (Y_3 - Y_O)^2 + (Z_3 - Z_O)^2}. \end{cases} \quad (22)$$

для тривимірних координат.

На практиці ми визначаємо не просто координати одинарного приймача, а прирости координат (вектори базових ліній) між двома приймачами  $i$  та  $j$ :

$$\mathbf{D}_{ij} = \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Отже, визначивши вектор базової лінії  $\mathbf{D}_{ij}$  у глобальній геоцентричній системі XYZ (за допомогою моделей із попередніх виразів), ми виконуємо його поворот у точку спостереження  $i$  за допомогою широти  $B_i$  та довготи  $L_i$ . Це дозволяє перейти від просторових геоцентричних приростів до локальних приростів: Північ, Схід, Висота. Для цього здійснюється трансформація різниць геоцентричних координат в локальну топоцентричну СК:

$$\mathbf{d}_{ij} = \begin{pmatrix} \Delta n_{ij} \\ \Delta e_{ij} \\ \Delta u_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin B_i \cos L_i & -\sin B_i \sin L_i & \cos B_i \\ -\sin L_i & \cos L_i & 0 \\ \cos B_i \cos L_i & \cos B_i \sin L_i & \sin B_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

або у матричному вигляді:

$$\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{R}(B_i, L_i) \cdot \mathbf{D}_{ij}. \quad (25)$$

Склад глобальної навігаційної супутникової системи наведено на Рис. 4.



Рис. 4. Склад глобальної навігаційної супутникової системи.

Джерело – [4].

Глобальні навігаційні системи поділяються на три сегменти. *Космічний сегмент* складається зі ШСЗ, які складають угруповання супутників з відомими ефемеридами. Супутники генерують бінарний код, який потім порівнюється з кодом приймача для визначення псевдовіддалі. *Управлінський* або *наземний сегмент* складається з комплексу наземних засобів для забезпечення функціонування космічного сегменту, його контролю та керування. Складається зі станцій безперервного стеження та контрольних станцій. Цей сегмент відіграє ключову роль у підтриманні системи в робочому стані: визначення поправок до орбіт супутників та похибок атомних годинників. Має двосторонній зв'язок з космічним сегментом. *Користувацький сегмент* представляє собою всю множину обладнання, яке використовує супутникове позиціонування.



**Контрольні запитання:**

1. Чим принципово відрізняється незбурений (кеплерів) рух супутника від збуреного? Наведіть класифікацію дестабілізуючих чинників (основні, другорядні та мікрозбурення) та поясніть вплив стиснення Землі й сонячного тиску на орбіту.
2. Як обчислюється транзитний час  $t_{\text{trans}}$  та псевдовіддаль  $D$  від супутника до приймача? Чому для визначення трьох просторових координат потрібні вимірювання мінімум від 4 супутників?
3. Запишіть фундаментальне рівняння космічної геодезії. Який фізичний та геометричний зміст мають матриця повороту  $\mathbf{P}$ , матриця масштабів  $\mathbf{M}$  та вектор зсуву  $\Delta \vec{R}$ , і до якого вигляду приводиться рівняння при їх тотожності ( $\mathbf{P} = \mathbf{M} = \mathbf{E}, \Delta \vec{R} = 0$ )?
4. Як формується вектор базової лінії  $\mathbf{D}_{ij} = (\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}, \Delta Z_{ij})^T$  у глобальній геоцентричній системі? За допомогою яких параметрів та за якою формулою здійснюється його перехід у локальну топоцентричну систему  $(\Delta n_{ij}, \Delta e_{ij}, \Delta u_{ij})^T$ ?
5. Охарактеризуйте функціональне призначення космічного, управлінського та користувацького сегментів ГНСС. Яку роль відіграють альманахи та ефемериди у процесі позиціонування?

### САМОСТІЙНА РОБОТА (5 ГОД.)

**Завдання:** підготувати стислу доповідь з мультимедійною презентацією (до 5 хвилин) або міні-реферат обсягом 5-7 сторінок.

#### Рекомендовані теми:

1. Детальний аналіз збурюючих сил, що впливають на орбіти ГНСС-супутників: вплив некулястості Землі, атмосферного гальмування та сонячного випромінювання;
2. Ефемеридне забезпечення ГНСС: порівняльний аналіз альманаху, оперативних (трансляційних) та точних (апостеріорних IGS) ефемерид;
3. Проблема синхронізації часу в супутниковій навігації: атомні еталони супутників проти кварцових годинників приймачів та методи компенсації часового зміщення  $\Delta t$ ;
4. Математичні моделі переходу від глобальних геоцентричних координат до локальних топоцентричних систем (ТПСК): геометричний зміст та практичне застосування в геодезії;
5. Функціональна структура та наземна інфраструктура управлінського сегмента ГНСС (на прикладі станцій контролю та завантаження даних GPS або Galileo);
6. Релятивістські ефекти в супутниковій геодезії: вплив спеціальної та загальної теорії відносності на хід супутникових годинників та методи їх урахування.

### САМОСТІЙНА РОБОТА ДО ЗМІСТОВНОЇ ЧАСТИНИ 1 (24 год.)

### Тип контролю: тестова контрольна робота

1. Історія становлення ГНСС першого покоління ТРАНЗИТ і ЦИКАДА
2. Еволюція і розвиток супутників систем GPS і ГЛОНАСС
3. Супутникові навігаційні системи GALILEO і BeiDou

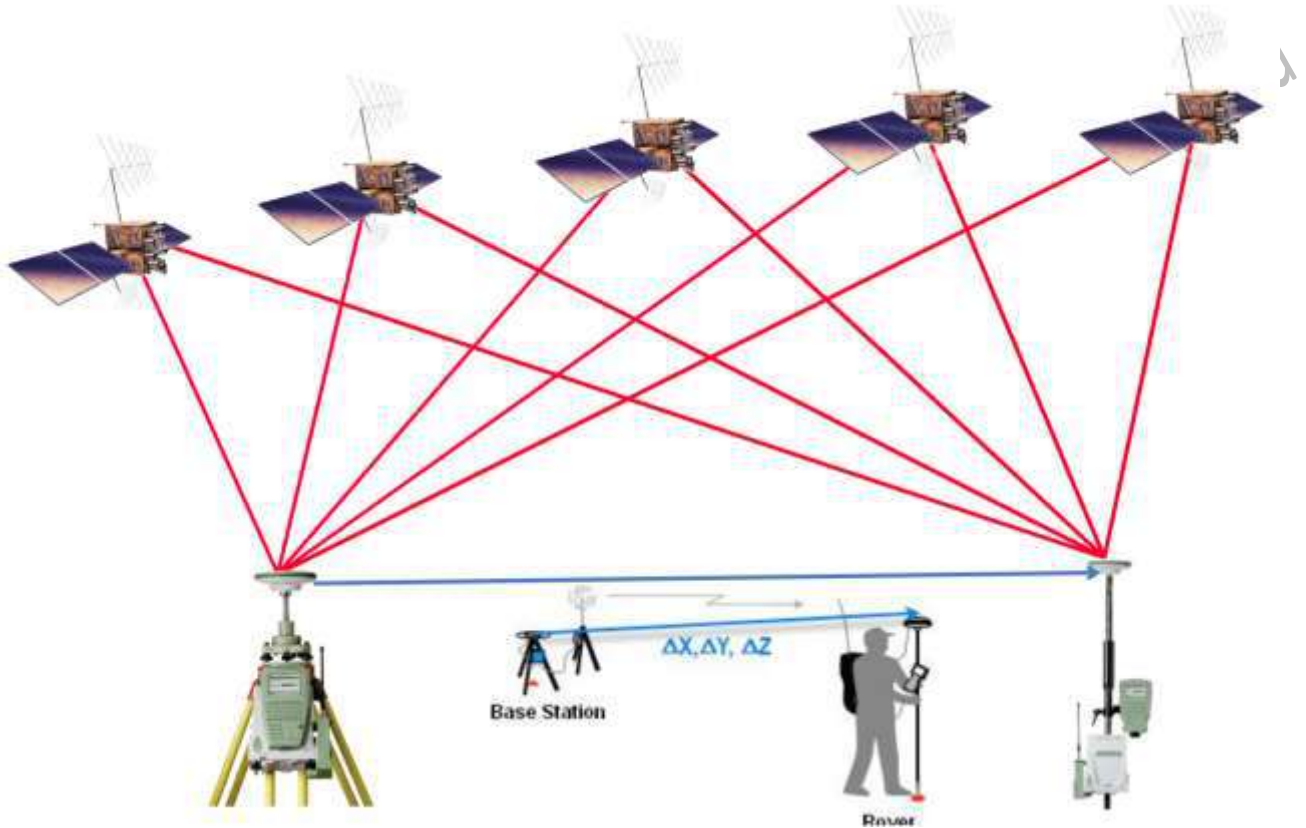
### ПИТАННЯ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

#### ЗМІСТОВНА ЧАСТИНА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

1. Яка головна мета та сфери застосування зумовили розробку супутникових систем першого покоління NNSS Transit (США) та «Цикада» (СРСР)?
2. Поясніть принцип дії систем першого покоління, заснований на ефекті Доплера. Як визначалися координати приймача за зсувом частоти?
3. Які висоти та типи орбіт мали супутники систем Transit та «Цикада»?
4. Яким був середній інтервал часу між проходженнями супутників над точкою спостереження та яка була тривалість одного сеансу зв'язку?
5. Яку точність позиціонування забезпечували системи Transit та «Цикада» і чому вони дозволяли визначати лише планові (двовимірні) координати?
6. Вкажіть ключові технічні й оперативні недоліки Доплерівських систем першого покоління, що спричинили потребу створення ГНСС другого покоління.
7. Як на базі системи «Цикада» та міжнародного співробітництва було створено службу КОСПАС-САРСАТ і яке її призначення?
8. Коли було дозволено цивільне використання системи Transit, і як це вплинуло на розвиток супутникової геодезії?
9. Які кардинальні переваги реалізували системи GPS NAVSTAR та ГЛОНАСС порівняно з системами першого покоління Transit і «Цикада»?
10. Які ключові відмінності та нові можливості з'явилися з виведенням супутників серій GPS-IIRM, GPS-IIF та супутників третього покоління GPS-III?
11. Для чого в процесі модернізації GPS було впроваджено цивільні сигнали L2C та L5?
12. Яка штатна кількість супутників утримується в угрупованні GPS та які їх орбітальні характеристики?
13. Опишіть етапи відновлення та оновлення системи ГЛОНАСС від супутників «Глонасс-М» до «Глонасс-К» та «Глонасс-К2».
14. У чому полягає відмінність між частотним (FDMA) та кодовим (CDMA) розділенням сигналів, і чому ГЛОНАСС здійснює перехід на CDMA?
15. Які системи відліку часу та просторових координат є базовими для систем GPS та ГЛОНАСС?
16. Яка роль бортових атомних еталонів частоти у забезпеченні точності вимірювання псевдовіддалей?
17. У чому полягає унікальність європейської системи Galileo порівняно з іншими ГНСС з точки зору управління (цивільний контроль) та точності?

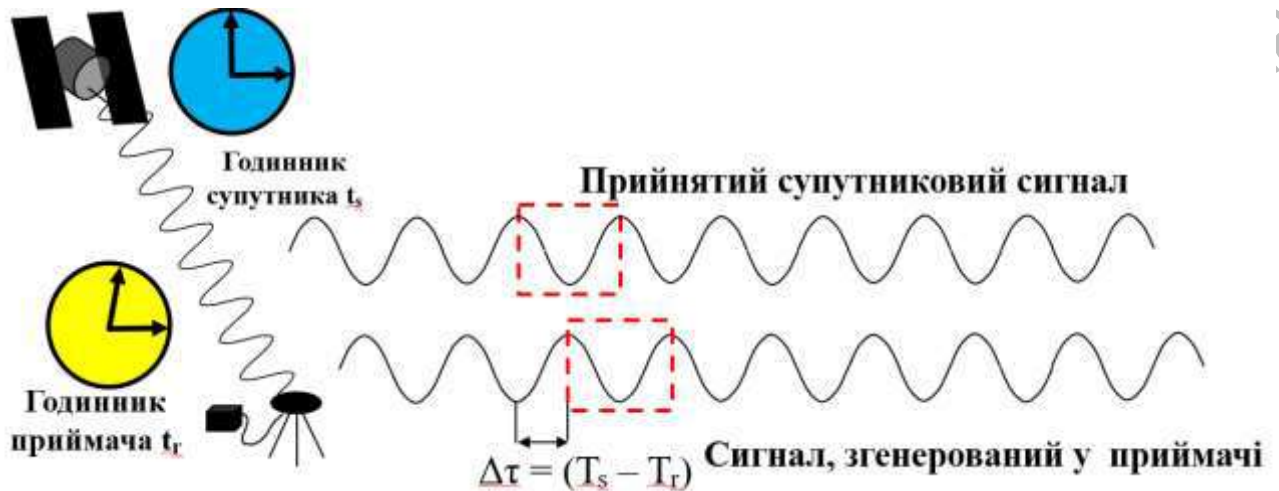
18. Який склад має повністю розгорнуте орбітальне угруповання Galileo (FOC) та на кількох орбітальних площинах воно розміщено?
19. Опишіть три етапи розвитку китайської системи — від регіональних BeiDou-1 та BeiDou-2 до глобальної BeiDou-3.
20. Які види орбіт (MEO, GEO, IGSO) поєднуються в угрупованні BeiDou-3 для забезпечення глобального та регіонального покриття?
21. Які практичні переваги для геодезичних вимірів дає одночасний прийом сигналів від супутників різних систем?
22. Чому важлива апаратна та сигнальна сумісність між GPS, Galileo та BeiDou?
23. Яку роль у сучасній навігаційній інфраструктурі відіграють регіональні системи QZSS (Японія) та NavIC (Індія)?
24. Як системи диференціального доповнення (WAAS, EGNOS тощо) підвищують точність та цілісність позиціонування глобальних систем?
25. У чому полягає відмінність між просторовими прямокутними геоцентричними координатами ( $X, Y, Z$ ) та геодезичними еліпсоїдальними координатами ( $B, L, H$ )? Для яких задач у ГНСС зручніше використовувати кожен з цих систем?
26. Що таке Міжнародна земна референсна система (ITRS) та її практична реалізація ITRF? Як у сучасній супутниковій геодезії враховується часова динаміка (дрейф літосферних плит) при фіксації координат контрольних станцій?
27. Опишіть сутність 7-параметричного перетворення Гельмерта при переході від глобальної системи (наприклад, WGS-84) до національної або локальної референсної системи координат.
28. Як обчислюються топоцентричний кут висоти (елевація)  $\alpha$  та азимут  $A$  супутника відносно спостерігача, і чому встановлення маски кута висоти (наприклад,  $10^\circ - 15^\circ$ ) є обов'язковим при геодезичних зніманнях?
29. Поясніть, завдяки яким єдиним стандартам ICAO досягається сумісність та безперервний перехід повітряних суден між різними регіональними системами SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS).
30. Які функції виконує мережа наземних опорних станцій (RIMS) у складі SBAS? Як саме вони виявляють відхилення сигналів та передають вихідні дані на центральний обчислювальний центр?
31. Порівняйте висоти орбіт та періоди обертання супутників GPS, Galileo та BeiDou. Як ці відмінності впливають на геометрію супутникового сузір'я?
32. Чому китайська система BeiDou-3 використовує комбінацію середньовисотних (MEO), геостаціонарних (GEO) та похилих геосинхронних (IGSO) орбіт, тоді як GPS та Galileo спираються переважно на MEO-орбіти?
33. Яку роль відіграє геоцентрична гравітаційна стала Землі  $\mu$  у формуванні кеплерових елементів орбіти та обчисленні середнього руху супутника  $n$  за третім законом Кеплера?

## ЗМІСТОВНА ЧАСТИНА 2. ВИКОНАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРІВ СУПУТНИКОВИМИ МЕТОДАМИ



Джерело - [I.V.A. Leon OÜ](#).

### ТЕМА 4. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУПУТНИКОВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ (2 год.)



Джерело – розроблено авторами.

1. Загальні характеристики сигналів
2. Кодовий і фазовий методи визначення псевдовіддалей
3. Джерела похибок визначення псевдовіддалей
4. Геометричні фактори погіршення точності

ГНСС супутники передають сигнали в УВЧ діапазоні електромагнітного спектру. На радіохвилі, що вони випромінюють, поширюються ті ж закони, що впливають і на всі інші форми електромагнітних хвиль. Оскільки GPS підтримує кілька військових і цивільних додатків, кожен супутник передає сигнали на декількох різних частотах для підтримки різних пропонуванних послуг. Така ж ситуація для систем Galileo, BeiDou і ГЛОНАСС.

Кожен супутник посилає сигнали такого змісту: ID, місцеположення супутника і відмітка часу. Крім того, кожен супутник передає навігаційне повідомлення про положення інших супутників (ефемериди і дані альманаха), що використовуються в приймачах для подальших розрахунків. Ці дані модулюють в високочастотний сигнал для того, щоб відправити їх від супутника до приймача.

Навігаційне повідомлення містить оперативну і неоперативну навігаційну інформацію. Оперативна інформація відноситься до того супутника, з якого передається даний навігаційний радіосигнал, і складається з таких даних:

- ефемериди супутника – прогнозовані координати і параметри руху супутника на фіксований момент часу;
- зсув шкали часу супутника щодо шкали часу СРНС;
- відносну різницю несучої частоти випромінюваного радіосигналу від номінального значення;
- код мітки часу для синхронізації процесу отримання навігаційної інформації в приймачі користувача.

Ефемериди містять такі основні дані: вік ефемеридних даних, початкову епоху ефемерид, шість параметрів орбіти на початкову епоху, швидкість зміни кута нахилу орбіти і зміни прямого сходження вузла, різні поправочні коефіцієнти.

Неоперативна інформація містить альманах системи. Альманах – набір наближених супутникових даних, що використовується для обчислення приблизного місця розташування супутника, часу появи його над горизонтом, піднесення і азимута. Альманах використовується приймачем для захоплення супутників, а також у процесі планування сеансів спостережень. Альманах містить такі основні дані: дані про стан всіх супутників системи (альманах стану), зсув шкали часу кожного супутника щодо шкали часу системи (альманах фаз), наближені параметри орбіт всіх супутників системи (альманах орбіт) та інші.

Супутники GPS в даний час передають сигнали по п'ятьом високочастотним (ВЧ) каналам, які позначаються з L1 до L5. Частоти, доступність і використання цих ВЧ каналів описані в Таблиці 2. ВЧ сигнал контролюється атомними годинниками. Всі ВЧ радіочастоти та коди генеруються з одного 10,23 МГц кристалу, довгострокова стабільність якого контролюється цезієвим або рубідієвим годинником (старі супутники). 10,23 МГц – це основна частота в GPS.

Таблиця 2. Сигнали, що використовуються в GPS супутниках, їх частоти, використання і поточна доступність.

| Канал (Channel) | Частота (МГц)                     | Оригінальне використання                                                                                           | Модернізоване використання                    | Доступність   |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|
| L1              | 1575.42<br>( $10.23 \times 154$ ) | Зашифрований точний P(Y)-код. Містить 2 коди позиціонування: C/A (грубе/отримання) і P (точний) код. Також містить | C/A, L1 цивільний (L1C) та військовий (M) код | Всі супутники |

|    |                                       |                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                              |                       |
|----|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|    |                                       | навігаційне повідомлення, яке міститься в C/A-коді                                                                                                                                                   |                                                                                                                              |                       |
| L2 | 1227.60<br>( $10.23 \times 120$ )     | Зашифрований точний P(Y)-код. Містить P (точний) Код (резервна передача того ж коду, як в сигналі L1). Цей канал також використовується для вимірювання іоносферної затримки у військових приймачах. | C/A-код був доданий на цьому каналі в нових супутниках (L2 цивільний (L2C) код) і військовий (M) код                         | Всі супутники         |
| L3 | 1381.05<br>( $10.23 \times 135$ )     | Моніторинг ядерної зброї. Використовується для виявлення запусків ракет, ядерних вибухів і інфрачервоних випромінювань високої потужності                                                            | C/A-код був доданий на цьому каналі в нових супутниках (L2 цивільний (L2C) код) і військовий (M) код                         | Block IA і вище       |
| L4 | 1379.913<br>( $10.23 \times 1214/9$ ) |                                                                                                                                                                                                      | Додаткова іоносферна корекція сигналу для поліпшення точності GPS                                                            | Block IIR і вище      |
| L5 | 1176.45<br>( $10.23 \times 115$ )     |                                                                                                                                                                                                      | Сигнали безпеки життя. Використовуються для навігації повітряних суден. У захищених каналах з мінімальними радіоперешкодами. | Block IIF і Block III |

Немодульований сигнал або несуча частота призначений для передачі віддалемірних кодів, необхідних для отримання відстаней кодовим способом, його фаза використовується для отримання відстаней фазовим способом (вища точність) і для передачі споживачам навігаційного повідомлення (Рис.5).

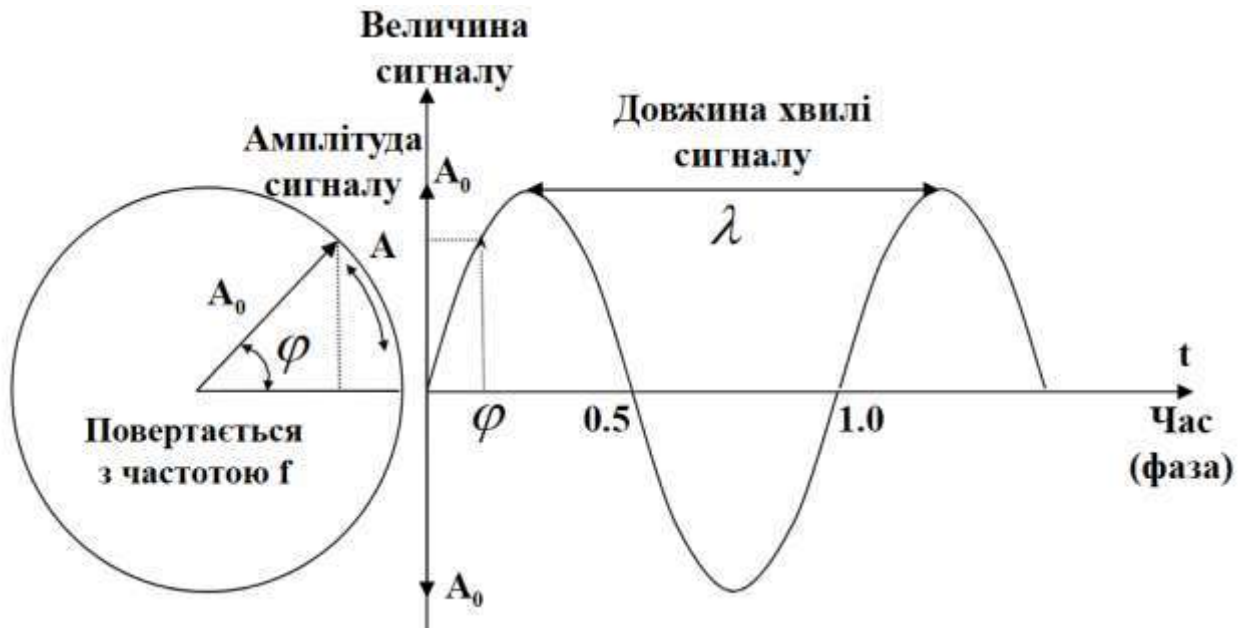


Рис. 5. Структура несучої частоти.

Джерело – розроблено авторами.

Тут  $A_0$  – амплітуда сигналу або максимальне відхилення сигналу від нульового рівня,  $\omega$  – швидкість зміни фази коливань ( $\omega = 2\pi f$ ),  $t$  – поточний момент часу,  $\varphi$  – кутове зміщення коливання ( $\varphi_0$  – у початковий момент часу),  $\lambda$  – довжина хвилі,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $T$  – період коливань і  $f$  – лінійна частота, або кількість циклів за секунду.

Миттєве значення сигналу визначається за виразом

$$a = A_0 \sin(\omega t - \varphi_0), \quad (26)$$

довжина хвилі

$$\lambda = cT, \quad (27)$$

Період коливань

$$T = \frac{1}{f} \quad (28)$$

і лінійна частота

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (29)$$

Для формування сигналу супутники використовують генератор опорної частоти. Так, в системі GPS для передачі навігаційних сигналів на кожному супутнику є генератор основних коливань з опорною частотою 1,023 МГц (C/A-код) і 10,23 МГц (P-,Y-код). Ці коливання випромінюють на несучих частотах:  $f_1 = 1575,42$  МГц (L1) з довжиною хвилі 19,0 см і  $f_2 = 1227,60$  МГц (L2) з довжиною хвилі 24,4 см. Частота L1 модулюється двома далекомірними кодами: точним (Precision) P-кодом і легкодоступним (Clear Acquisition) C/A-кодом.

Частота L2 модулюється одним P-кодом. P-код, на відміну від C/A-коду, призначений для санкціонованих (в основному, військових) користувачів GPS. Усі супутники GPS використовують ті самі частоти, але кожний супутник має свій код. У будь-який час, без попереднього повідомлення, міг бути введений так званий режим виборчого (селективного) доступу SA (Selective Availability), при якому навмисно з метою зниження точності вимірювань спотворюють далекомірний код і ефемериди супутників. Селективний доступ було скасовано у 2001 році. З цією ж метою передбачено режим додаткового шифрування AS (Anti-Spoofing), коли P-код переводиться в новий, Y-код.

Нижче на Рисунку 6 наведено спрощену схему формування радіосигналів на супутниках GPS.

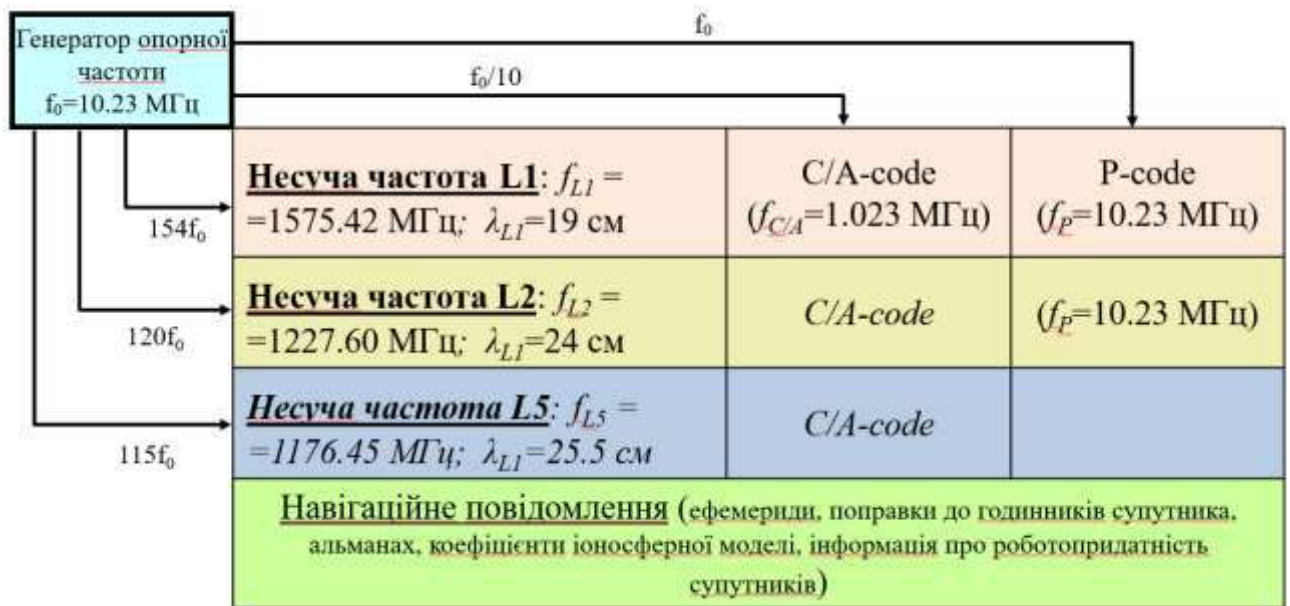


Рис. 6. Спрощена схема формування радіосигналів на супутнику GPS.

Джерело – розроблено авторами.

Існують два різних типи псевдовипадкових кодів: "С/А коди" і "Р коди".

С/А-коди (Clear Acquisition - легке розпізнавання, Coarse/Acquisition - грубий прийом), - це коди, які використовуються для приймачів як цивільного, так і військового призначення. ПВП С/А-коди тривалістю 1 023 символи з тактовою частотою 1,023 МГц мають період повторення  $T = 1 \text{ мс}$ , що відповідає інтервалу однозначного вимірювання псевдовіддалі близько 300 км. Їх тактова частота в десять разів нижче, ніж у Р-кодів. І, як прийнято вважати, вони забезпечують менш точне вимірювання часу поширення радіосигналів. Забезпечують Послугу стандартного позиціонування SPS.

Р-коди (Protected - захищений) можуть бути додатково зашифровані, і тільки військовим користувачам завжди відкритий доступ до них. Додатково до цього, Р-коди майже неможливо заглушити перешкодами. Р (Y)-коди забезпечують Послугу точного позиціонування PPS.

В залежності від частоти, яка використовується, способи визначення псевдовіддалей поділяють на *кодові* і *фазові*. За допомогою кодового способу можна визначити псевдовіддаль з точністю 0,3 – 0,6 м, а за допомогою фазового – до 0,002-0,003 м.

Як було зазначено вище, на борту супутника і в приймачі є годинники. У кожен заданий момент часу супутник генерує *псевдовипадковий код* – послідовність бітів. Це засіб встановлення моменту абсолютного збігу сигналів супутника і опорних сигналів приймача в процесі вимірювання відстані до супутника. Таке кодування дозволяє системі працювати з сигналами дуже низької потужності і з антенами малих розмірів, а так само допускає застосування на всіх супутниках одних і тих же несучих частот (Рис.7).



Рис. 7. Кодовий спосіб визначення псевдовіддалі.

Джерело – розроблено авторами.

Для системи GPS число символів або чіпів коду складає  $M=1023$ , тактова частота  $f_m=1023$  кГц, інтервали слідування символів  $T_m$  – близько 1 мкс.

Відповідно, довжина хвилі символу

$$\lambda_m = \frac{c}{f_m} \sim 293 \text{ м},$$

Період повторення коду  $T_{\Pi}=1$  мс, а довжина всієї хвилі

$$\lambda_{\Pi} = \frac{Mc}{f_m} \sim 300 \text{ км}.$$

Спрощену схему кодового визначення псевдовіддалі наведено на Рис.8.

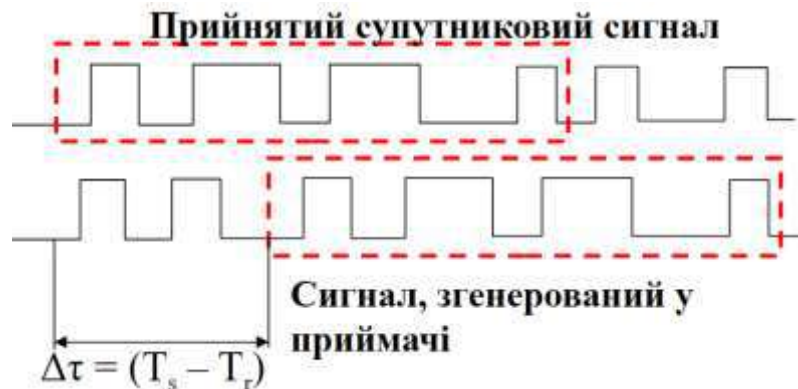


Рис. 8. Спрощена схема кодового визначення псевдовіддалі

Джерело – розроблено авторами.

Для визначення псевдовіддалі  $\rho_{rs}$  повний час проходження сигналу  $\Delta\tau$  розкладаємо на три складові: цілу кількість  $N$  повних кодових слів  $N \cdot T_{\Pi}$ , цілу кількість чіпів всередині останнього слова  $m \cdot T_m$  та дробову частину чіпа  $\phi \cdot T_m$ :

$$\rho_{rs} = c\Delta\tau = c[N T_{\Pi} + (m + \phi) T_m]. \quad (30)$$

Враховуючи, що  $\lambda = cT$ , отримаємо:

$$\rho_{rs} = N\lambda_{\Pi} + (m + \phi)\lambda_m. \quad (31)$$

Дробова частина чіпа  $\phi$  вимірюється віддалемірним корелятором приймача. Теоретично, точність визначення псевдовіддалі залежить від точності вимірювання  $\phi$ . Сучасні

геодезичні приймачі з вузьким корелятором (Narrow Correlator) здатні вимірювати  $\phi$  з точністю до 0.1% ... 0.5% від чіпа.

На практиці ж приймач і супутник мають свої власні годинники, які не є ідеально синхронізованими між собою та із системним часом ГНСС (мають зсуви  $\delta t_r$  та  $\delta t_s$ ). Тому можемо записати:

$$P_{rs} = c(t_r + \delta t_r) - c(t_s + \delta t_s) = c(t_r - t_s) + c(\delta t_r - \delta t_s) = \rho_{rs} + c\delta t_r - c\delta t_s. \quad (32)$$

Тому для визначення геодезичних координат зсув годинника приймача  $c\delta t_r$  вводиться як четверта невідома величина у систему рівнянь ГНСС-позиціонування.

Хоча кодовий спосіб дозволяє швидко та однозначно обчислити відстань до супутника, його точність обмежена відносно великою довжиною кодового чіпа і становить від десятків сантиметрів до кількох метрів, чого недостатньо для вирішення високоточних геодезичних задач. Для досягнення міліметрового рівня точності в ГНСС-вимірюваннях переходять від зчитування кодових міток до вимірювання фази високочастотної несучої хвилі (Рис.9).

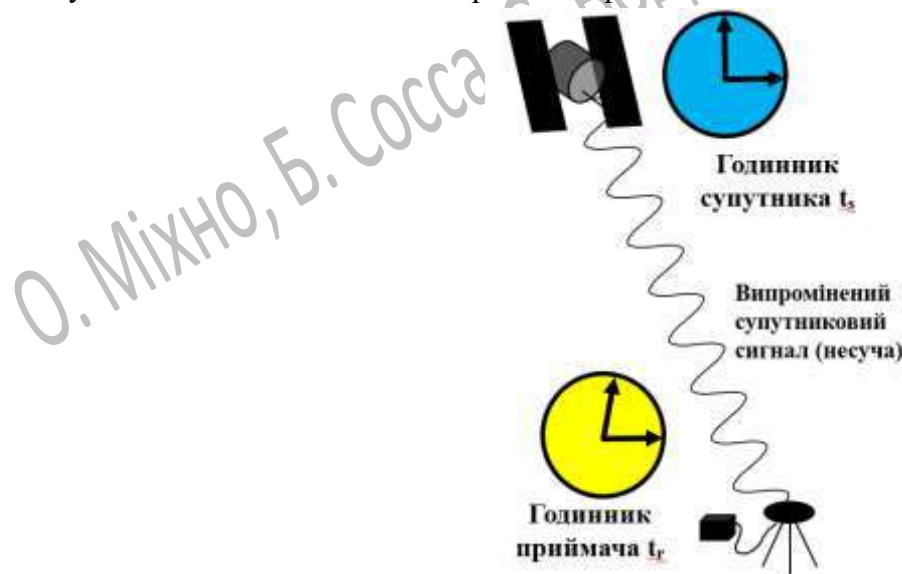


Рис. 9. Фазовий спосіб визначення псевдовіддалі.

Джерело – розроблено авторами.

Замість довгої кодової структури інструментом вимірювання стає сама радіохвиля довжиною усього 19 ... 25 см. Це дозволяє приймачу фіксувати найменші частини зсуву фази, однак ставить нове завдання — визначення цілочисельної фазової неоднозначності, тобто обчислення невідомої кількості повних хвиль, що вклалися на шляху від супутника до антени. Спрощену схему фазового визначення псевдовіддалі наведено на Рис. 10.

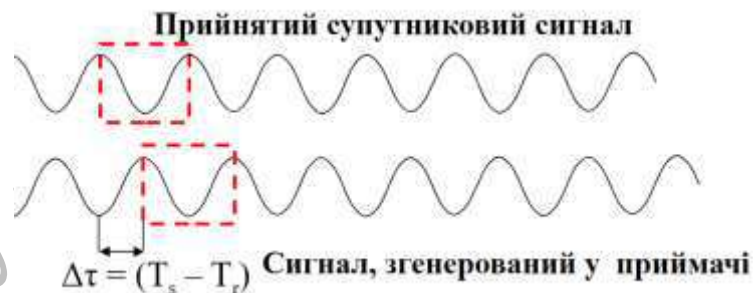


Рис. 10. Спрощена схема фазового визначення псевдовіддалі.

Джерело – розроблено авторами.

Теоретично, різниця фаз розраховується за виразом:

$$\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_s = \omega(t_r - t_s) = \omega\Delta\tau = 2\pi f\Delta\tau = \frac{2\pi}{\lambda} c\Delta\tau. \quad (33)$$

Радіохвиля є гармонійним коливанням. Часова затримка  $\Delta\tau$  пропорційна фазовому зсуву  $\Delta\varphi$ . Оскільки несуча хвиля  $L1$  робить понад півтора мільярда коливань за секунду, вимірювання її фази дає високу роздільну здатність за часом і, відповідно, за відстанню.

Враховуючи, що  $\rho_{rs} = c\Delta\tau$ , отримаємо:

$$\rho_{rs} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda = (N + \Phi)\lambda = N\lambda + \Phi\lambda = N\lambda + dP, \quad (34)$$

де  $N$  - цілочисельна фазова неоднозначність (ціле число повних довжин хвиль  $\lambda$ ),  $\Phi$  - дробова частина фазового вимірювання у циклах ( $\Phi \in [0,1)$ ),  $dP$  - дробова частина фази у лінійній мірі ( $dP = \Phi \cdot \lambda$ ), вимірюється дискримінатором приймача.

Фазовий віддалемір приймача може принципово виміряти тільки дробову частину хвилі ( $\Phi$  або у лінійних одиницях  $dP$ ). Загальна відстань розкладається на цілу кількість хвиль  $N \cdot \lambda$  та добірку  $dP$ . Оскільки фазовий дискримінатор не бачить, скільки цілих хвиль "вклалося" до моменту захоплення сигналу, число  $N$  залишається невідомим (невизначеним) і потребує математичного розв'язання невизначеності (*Ambiguity Resolution*).

Подібно до кодових вимірювань, фазові вимірювання спотворюються неузгодженістю годинників супутника та приймача ( $\delta P_r, \delta P_s$ ). Тому на практиці в найпростішому випадку маємо:

$$\frac{\Delta\varphi + \delta\varphi_r + \delta\varphi_s}{2\pi} \lambda = \rho_{rs} + \frac{\delta\varphi_r}{2\pi} \lambda + \frac{\delta\varphi_s}{2\pi} \lambda, \quad (35)$$

де  $\varphi_r, \varphi_s$  - початкові фази несучих коливань генераторів приймача ( $r$ ) та супутника ( $s$ ).

Через це величина  $P_{rs}$  є фазовою псевдовіддаллю:

$$P_{rs} = N\lambda + dP = \rho_{rs} + \delta P_r + \delta P_s, \quad (36)$$

де  $\delta P_r, \delta P_s$  - еквівалентні лінійні похибки за рахунок зсуву годинників приймача та супутника ( $\delta P = c \cdot \delta t$ ).

Джерела помилок визначення псевдовіддалі ГНСС - сумарна помилка.

Існує багато джерел можливих помилок, які погіршують точність позиціонування та знижують точність обчислених ГНСС-приймачем координат. Серед основних виділяють такі:

### 1. Супутниковий годинник

Діапазон потенційних помилок: 1,5 м, діапазон типових помилок: 0 м.

Основна причина полягає у помилках передачі часу. Невеликі зміни в атомному годиннику (дрейф годинника) на борту супутників можуть призвести до великих помилок визначення координат: зокрема, похибка годинника всього в 1 наносекунду призводить до 3 метрів помилки для користувача на землі.

### 2. Орбітальні помилки (дані ефемерид)

Діапазон потенційних помилок: 2,5 м, діапазон типових помилок: 0 м

Це помилки в передачі місцезнаходження супутника. Похибки в даних ефемерид (інформації про супутникові орбіти) викликають помилки в обчисленнях координат, тому що супутники під час обчислення не перебували справді в тому місці, де приймач ГНСС вважав вони є на основі отриманої інформації.

### 3. Затримки іоносфери

Діапазон потенційних помилок: 5 м, діапазон типових помилок: 0,4 м.

Вплив атмосфери є найбільшим джерелом помилок. Через вільні електрони в іоносфері сигнали ГНСС не розповсюджуються зі швидкістю світла у вакуумі. Модуляція сигналу затримується пропорційно кількості вільних електронів, а також (у першому порядку)

обернено пропорційно несучій частоті у квадраті ( $\frac{1}{f^2}$ ). При роботі з короткою базою (менш ніж 10 км) цей ефект практично однаковий на обох пунктах і усувається під час обчислення рішення. Сонячна активність також викликає перешкоди сигналам ГНСС. Затримки в іоносфері можуть бути компенсовані за допомогою двочастотних приймачів.

#### 4. Затримки тропосфери

Діапазон потенційних помилок: 0,2 м, діапазон типових помилок: 0,2 м

Інше відхилення від вакуумної швидкості світла викликано тропосферою. Перепади температури, тиску і вологості — все це сприяє варіаціям швидкості світлових радіохвиль. Код і ВЧ хвиля зазнають однакових затримок. Затримки в тропосфері не можна виміряти безпосередньо, їх можна тільки оцінити за допомогою моделей.

#### 5. Коефіцієнт шуму приймача

Діапазон потенційних помилок: 0,3 м, діапазон типових помилок: 0,3 м

Спотворення сигналу, викликане електричними перешкодами або внутрішніми помилками, властиве самим приймачам ГНСС. Помилки у діапазоні вимірювань приймача спричиняються тепловим шумом, обмеженою точністю програмного забезпечення та міжканальним зміщенням.

#### 6. Багатопроменевість (Multipath)

Діапазон потенційних помилок: 0,6 м, діапазон типових помилок: 0,6 м

Виникає через відбиття сигналів, що надходять в антену приймача. Сигнал ГНСС є радіохвилею, яка може легко блокуватися чи відбиватися (гори, дерева, вежі та будівлі - лише декілька прикладів таких перешкод). Багатопроменева помилка виникає, коли відбиті сигнали надходять до приймача та маскують реальний кореляційний пік. Ці ефекти більш виражені для статичного приймача поблизу великих віддзеркалюючих поверхонь, де помилки в гірших випадках можуть сягати 15 м і більше. Якщо перешкоди присутні, важливо визначити азимут і висоту над горизонтом цих об'єктів, а потім урахувати можливі похибки при ГНСС-зніманнях. Деякі структури, що є перешкодами в одному напрямку, можуть ставати джерелами багатопроменевості в іншому.

Сумарна похибка бюджету ГНСС-спостережень (User Equivalent Range Error -  $\sigma_0$ , UERE) обчислюється як корінь квадратний із суми квадратів окремих незалежних похибок:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{eph}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{iono}^2 + \sigma_{tropo}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{mp}^2}, \quad (37)$$

де:  $\sigma_{eph}$  - похибка ефемерид (орбітальна похибка);  $\sigma_{clk}$  - похибка годинника супутника;  $\sigma_{iono}$  - затримка в іоносфері;  $\sigma_{tropo}$  - затримка в тропосфері;  $\sigma_{noise}$  - шум приймача та програмного забезпечення;  $\sigma_{mp}$  - похибка багатопроменевості.

Якість геометрії розташування супутників визначається параметром *зниження точності* (ЗТ, DOP - Dilution of Precision). Це безрозмірний коефіцієнт, який показує, у скільки разів похибка вимірювання відстані до супутника збільшується при обчисленні координат. ЗТ є числовим визначенням геометрії супутників, і залежить від розташування супутників, які видимі антені приймача. Чим менше значення ЗТ, тим точніше результат визначення часу або обчислення координат.

Основна формула для розрахунку:

Похибка визначення положення = ЗТ (DOP) × Похибка вимірювання дальності. (38)

Таким чином, якщо ЗТ дуже високе, похибка вимірювання положення буде набагато більша, ніж похибка вимірювання відстані.

Існує п'ять різних видів ЗТ:

ГМЗТ (GDOP) - Геометричне зниження точності.

ПЗТ (PDOP) – Позиційне зниження точності (найбільш часто використовується).

ГЗТ (HDOP) - Зниження горизонтальної (планової) точності.

ВЗТ (VDOP) - Зниження вертикальної (висотної) точності.

ЧЗТ (TDOP) - Часове зниження точності.

Зазвичай, під час ГНСС-спостережень контролюють величини HDOP і VDOP, або їх результуючу суму PDOP ( $PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2$ ).

Класифікація значень PDOP за якістю спостережень:

1: Теоретично ідеальні умови.

1-4: Дуже гарні умови.

5-8: Прийнятні умови.

>9: Погані умови.

Знаючи сумарну похибку  $\sigma_0$  і параметр зниження точності, можна розрахувати похибки визначення координат:

Планові:  $\sigma_H = HDOP \cdot \sigma_0$

Висотні:  $\sigma_V = VDOP \cdot \sigma_0$

Просторові:  $\sigma_{3D} = PDOP \cdot \sigma_0$

(39)

Геометричний зміст зниження точності показано на Рис.11.

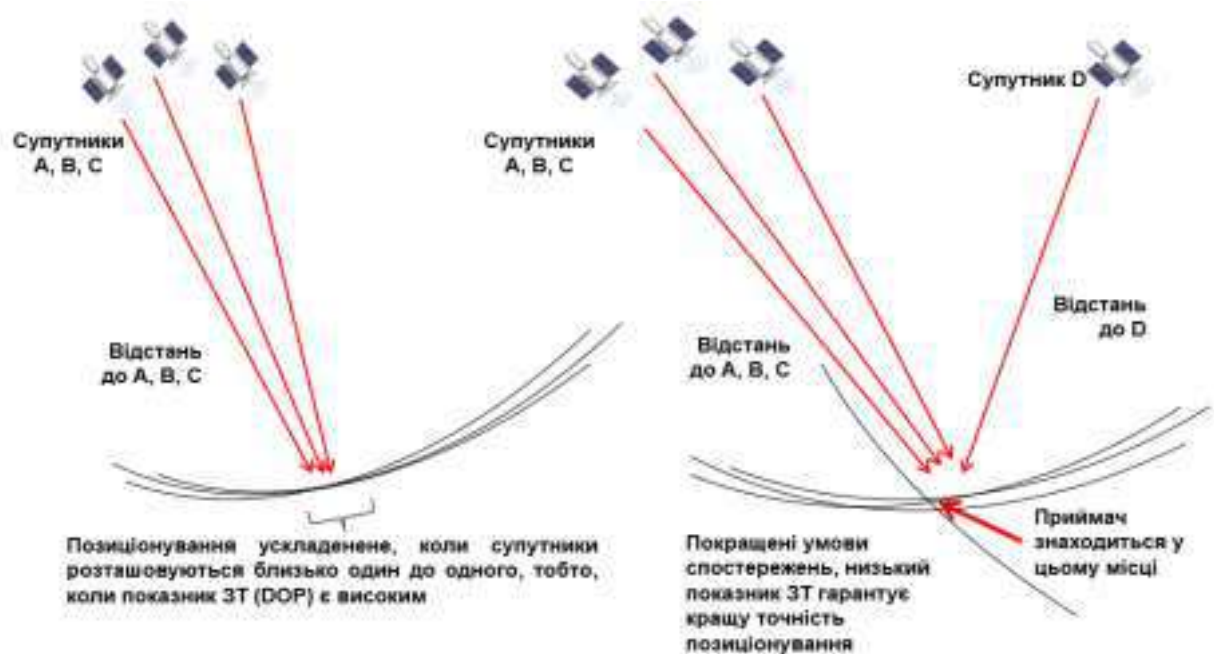


Рис. 11. Геометричний зміст зниження точності (DOP).

Джерело – [4].

Для отримання математичного змісту зниження точності розглянемо лінійне рівняння похибок при лінеаризації супутникових вимірювань:

$$y = A \cdot x + e,$$

(40)

де  $A$  - геометрична матриця розміром  $n \times 4$ , що містить направляючі косинуси векторів «приймач–супутник» та одиничний стовпчик для годинника:

$$A = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_n & m_n & n_n & 1 \end{pmatrix},$$

$x = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, c \cdot \Delta t]^T$  - вектор поправок до координат та часу,  $e$  - вектор похибок / шумів.

За методом найменших квадратів коваріаційна матриця оцінюваних параметрів  $x$  визначається як:

$$\mathbf{Q} = (A^T A)^{-1}. \quad (41)$$

Матриця  $\mathbf{Q}$  має розмірність  $4 \times 4$  і є коваріаційною матрицею вагових коефіцієнтів:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{yx} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{zx} & q_{zy} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{tx} & q_{ty} & q_{tz} & q_{tt} \end{pmatrix}. \quad (42)$$

На діагоналі цієї матриці стоять дисперсійні коефіцієнти для кожної з трьох просторових координат та часового зміщення:

1. GDOP (Geometric DOP) - Геометричне зниження точності:

Це корінь квадратний зі сліду всієї матриці  $\mathbf{Q}$ :

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{Q})} = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}}. \quad (43)$$

2. PDOP (Position DOP) - Зниження точності визначення положення (3D):

Це корінь квадратний зі сліду просторового блоку  $3 \times 3$ :

$$\text{PDOP} = \sqrt{\text{Tr}(\mathbf{Q}_{3 \times 3})} = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}}. \quad (44)$$

3. HDOP (Horizontal DOP) - Зниження точності у горизонтальній площині:

Визначається через діагональні елементи планових координат (після повороту в топоцентричну систему  $N, E, U$ ):

$$\text{HDOP} = \sqrt{q_{nn} + q_{ee}}. \quad (45)$$

4. VDOP (Vertical DOP) - Зниження точності за висотою:

$$\text{VDOP} = \sqrt{q_{uu}} \quad (\text{або } \sqrt{q_{zz}} \text{ у локальній системі}). \quad (46)$$

5. TDOP (Time DOP) - Зниження точності визначення часу:

$$\text{TDOP} = \sqrt{q_{tt}}. \quad (47)$$

*Примітка щодо повороту координат:* оскільки слід матриці  $\text{Tr}(\mathbf{Q})$  є інваріантом відносно ортогональних перетворень повороту систем координат, сума  $q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}$  у геоцентричній системі  $ECEF$  математично дорівнює сумі  $q_{nn} + q_{ee} + q_{uu}$  у топоцентричній  $NEU$ .

Матриця  $\mathbf{Q} = (A^T A)^{-1}$  залежить виключно від взаємного геометричного розташування супутників та антени.

$$\sigma_{3D} = \text{PDOP} \cdot \sigma_0. \quad (48)$$

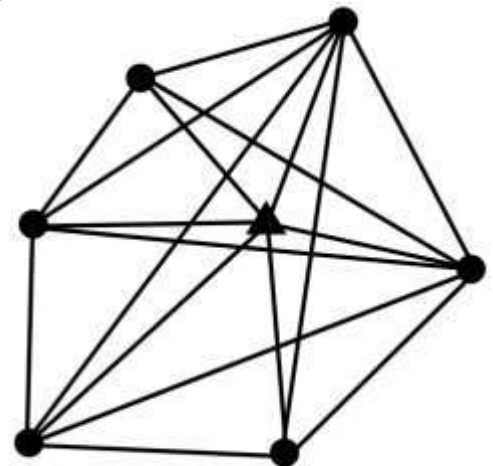
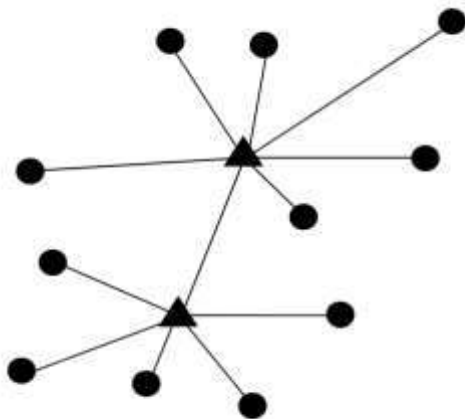
Таким чином, DOP виступає коефіцієнтом-множником, який масштабує помилку вимірювання псевдовіддалі ( $\sigma_0$ , UERE) у помилку визначення координат ( $\sigma_{\text{поз}}$ ).



**Контрольні запитання:**

1. Яка опорна частота є базовою для системи GPS, та яким чином з неї формуються несучі частоти (L1, L2, L5) і віддалемірні коди (C/A, P)?
2. У чому полягає принципова різниця між оперативною та неоперативною інформацією супутникового сигналу? Які завдання вирішує приймач за допомогою альманаху?
3. Розкрийте фізичний та математичний зміст рівняння кодової псевдовіддалі:  
 $\rho_{rs} = N\lambda_{\text{П}} + (m + \phi)\lambda_m$ . Що означають величини  $N$ ,  $m$  та  $\phi$ , і що саме вимірює корелятор приймача?
4. Чому фазовий спосіб вимірювань дає міліметрову точність порівняно з кодовим, та у чому полягає суть проблеми цілочисельної фазової неоднозначності?
5. Чому виміряні відстані називають псевдовіддалями? Як впливає зсув годинника приймача на систему рівнянь позиціонування, і чому він вводиться як обов'язкова 4-та невідома величина?
6. Як саме іоносфера та тропосфера впливають на швидкість поширення ГНСС-сигналу? Чому двочастотні приймачі дозволяють практично повністю усунути іоносферну затримку?
7. Який фізичний механізм виникнення багатопроменевості? В яких умовах спостережень цей ефект проявляється найсильніше та як його можна зменшити?
8. Що таке сумарна похибка бюджету спостережень ( $\sigma_0$ , UERE)? За якою формулою вона обчислюється на основі окремих незалежних джерел помилок?
9. Як математично пов'язані коефіцієнти зниження точності (DOP) із матрицею вагових коефіцієнтів  $Q = (A^T A)^{-1}$ ? Що виражає слід цієї матриці?
10. Наведіть класифікацію значень PDOP за якістю умов спостережень. Як саме геометричне розташування супутників на небосхилі впливає на підсумкову похибку визначення 3D-координат?

## ТЕМА 5. ПОБУДОВА ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ (2 год.)



1. Автономний і диференційний режими
2. Методи визначення координат і передачі поправок при ГНСС-спостереженнях,
3. Точність визначення координат при ГНСС-спостереженнях
4. Особливості побудови геодезичних ГНСС-мереж

При використанні одного ізольованого ГНСС-приймача визначення просторових координат здійснюється в *автономному* (абсолютному) режимі. У цьому випадку приймач розраховує власне місцезонашування безпосередньо за радіонавігаційними сигналами, що надходять від видимої угруповання супутників. Точність автономного позиціонування фундаментально залежить від обраного вимірювального первинного матеріалу (типу спостережень):

- Кодовий спосіб (вимірювання псевдовіддалей за кодами) забезпечує точність порядку 10–15 м. Така відносно висока похибка зумовлена відсутністю оперативного урахування загального бюджету похибок (іоносферної та тропосферної затримок, дрейфу супутникових годинників, орбітальних похибок ефемерид);
- Фазовий спосіб (вимірювання фази несучої частоти) забезпечує автономну точність порядку 0,5–1 м. Завдяки вищій роздільній здатності несучої хвилі точність суттєво зростає порівняно з кодовим режимом, проте залишається обмеженою через наявність нерозв'язаної фазової неоднозначності та неузгодженість годинника приймача.

Для суттєвого підвищення точності визначення координат та компенсації більшості систематичних похибок застосовують *диференційний* режим позиціонування (DGNSS). Він є універсальним технологічним рішенням — бо однаково ефективно застосовується як для кодового, так і для фазового способів вимірювання псевдовіддалей.

Суть диференційного позиціонування полягає в одночасному виконанні синхронних спостережень за допомогою щонайменше двох ГНСС-приймачів:

1. *Базовий* приймач (базова станція / база) – встановлюється на вихідному пункті з заздалегідь відомими координатами;
2. *Роверний* приймач (ровер) – встановлюється на точці, координати якої підлягають визначенню.

Механізм підвищення точності в диференційному режимі реалізується за таким алгоритмом:

Розрахунок *поправки* на базі: у кожен момент (*epoch*) спостережень базовий приймач порівнює координати (або псевдовіддалі до супутників), обчислені за поточними супутниковими сигналами, із реальними (відомими) даними пункту. Різниця між відомими та обчисленими величинами формує диференційну поправку.

Внесення поправки у дані ровера: отримані поправки передаються на роверний приймач (у режимі реального часу через канал зв'язку або під час подальшої пост-обробки).

Підсумковий результат: внесення диференційних поправок у первинні вимірювання ровера дозволяє нейтралізувати більшість просторово-корельованих помилок (вплив атмосфери, помилки годинників та орбіт) і отримати значно точніші координати об'єкта, ніж при використанні автономного режиму (Рис.12). При цьому розрізняють два методи коригування інформації:

1. Метод корекції координат, коли на базовій і роверній точках спостерігаються одні і ті ж ШСЗ, а потім в якості диференціальних поправок передаються з базової точки на роверну.

Недоліком цього методу є необхідність спостереження обома приймачами однакових супутників.

2. Метод корекції навігаційних параметрів, при використанні якого на базовій станції визначаються поправки до змінних параметрів (наприклад, псевдовіддалей) для всіх супутників, які потенційно можуть використовуватись споживачами. Ці поправки передаються на роверні приймачі, де безпосередньо приймач обчислює поправки до координат.

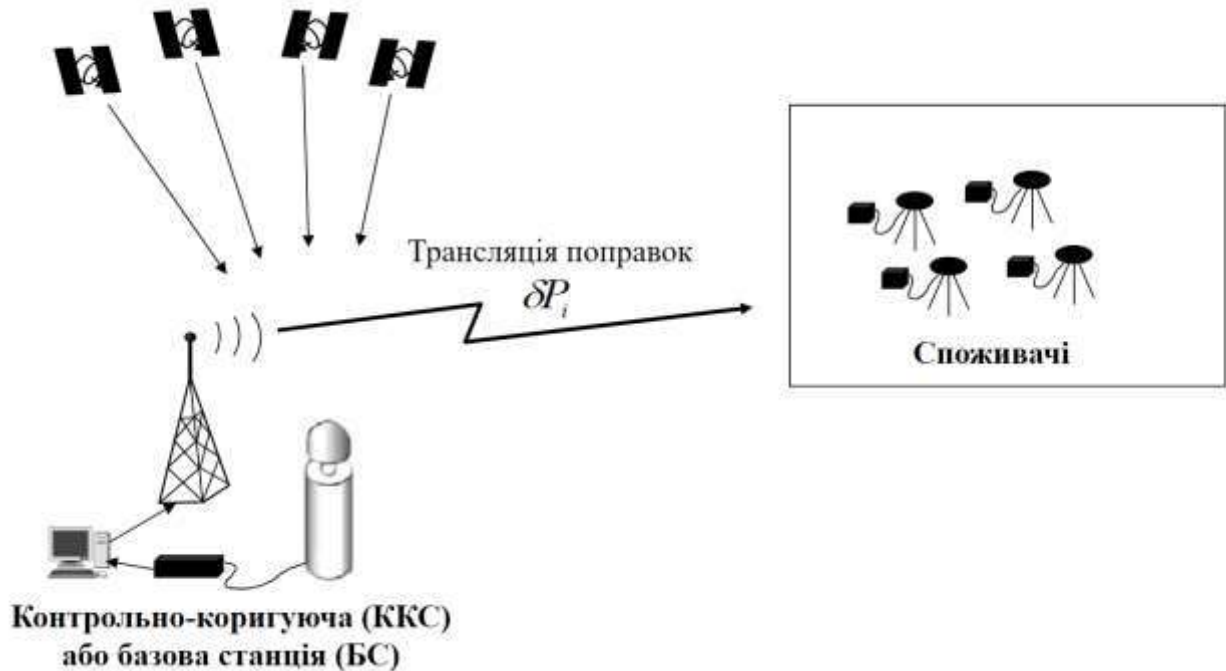


Рис. 12. Принцип DGNSS

Джерело – [2].

Поправки до псевдовіддалей розраховують за виразом:

$$\delta P_j = dP_{BS-j}^{Theor} - dP_{BS-j}^{Observ}, \quad (49)$$

а скориговані псевдовіддалі для ровера розраховують таким чином:

$$dP_{Rov-j}^{Corr} = \delta P_j + dP_{Rov-j}^{Observ}. \quad (50)$$

При цьому, внесення поправок може бути як після проведення спостережень, так і безпосередньо, під час них. Тому також розділяють два типи обробки даних супутникових спостережень – *пост-обробка* (PP, post-processing) і *режим реального часу* (RT, real-time).

За охопленням території DGPS системи діляться на:

*Локальні* (створюються користувачем);

*Регіональні* (усі SBAS системи);

*Глобальні* (Fugro Starfix / Marinestar, Trimble CenterPoint RTX, Hexagon TerraStar, John Deere StarFire).

*Класифікація супутникових спостережень за характером руху ровера.*

Залежно від фізичного стану роверного приймача під час виконання польових вимірювань, у супутниковій геодезії виділяють два базові види спостережень — *статичні* та *кінематичні*.

Суть статичного методу полягає в тому, що ровер залишається повністю нерухомим на точці з невідомими координатами впродовж тривалого проміжку часу. Це дозволяє накопичити

значний обсяг вимірювальної інформації та забезпечити високу точність обчислень. За тривалістю сеансу спостережень статичний режим поділяють на звичайну статистику та швидку статистику. Під час звичайної статистики приймач безперервно фіксує фазові вимірювання протягом 30 хвилин або більше, що необхідно для надійного розв'язання фазової неоднозначності та компенсації системних похибок на довгих базах. *Швидка статистика* передбачає скорочені сеанси вимірювань тривалістю від 10 до 15 хвилин, чого цілком достатньо для роботи на відносно коротких відстанях між базовою станцією та ровером.

Якщо у процесі виконання вимірювань роверний приймач перебуває в русі, такі спостереження відносять до кінематичного методу. У межах кінематики існує кілька технологічних підходів. При звичайній кінематиці прилад безперервно записує координати або виміряні фазові параметри для всіх точок траєкторії руху з попередньо заданим часовим або просторовим інтервалом. Іншими підходами є режим «*Стий-Іди*» (Stop and Go), коли оператор здійснює короточасні зупинки на конкретних пікетах лише на кілька секунд для накопичення необхідної кількості епох та кінематика в режимі реального часу *РТК* (RTK, Real-time Kinematic). Варто зауважити, що в сучасній геодезичній практиці технологія «Стий-Іди» практично втратила актуальність і майже не використовується через стрімкий розвиток та масове впровадження РТК.

Усі варіанти статичних спостережень, а також звичайна кінематика та метод «Стий-Іди» передбачають подальше математичне оброблення даних у спеціалізованому програмному забезпеченні. Загальну групу кінематичних режимів, які потребують наступної камеральної обробки, об'єднують під узагальненою назвою *ППК* (Post-Processing Kinematic).

Головна перевага застосування пост-обробки супутникових даних полягає у можливості суттєвого підвищення підсумкової точності за рахунок використання уточнених ефемерид. Під час роботи в режимі реального часу обчислення поправок виконується безпосередньо в полі на основі бортових або оперативних ефемерид, які транслюються супутниками і мають певний рівень прогнозованої похибки. Натомість при використанні пост-обробки ми маємо змогу виконати камеральні обчислення наступного дня, залучивши уточнені або точні ефемериди, які публікуються міжнародними службами. Це дозволяє значно зменшити помилки вимірювання псевдовіддалей і отримати максимально точні значення координат.

З іншого боку, вирішальною перевагою режиму реального часу РТК (Real-Time Kinematic) є його висока оперативність, оскільки остаточні координати точок обчислюються безпосередньо в процесі спостережень. Отримання точного просторового положення прямо на об'єкті робить режим РТК незамінним інструментом для вирішення оперативних геодезичних задач, зокрема для швидкого та ефективного виносу в натуру точок, проєктних ліній та складних площинних елементів.

Точність ГНСС спостережень визначають за аналогією з лінійними вимірами. Як планова, так і висотна точність складається з адитивної та мультиплікативної складових виду:

$$\sigma = a + b \cdot D, \quad (51)$$

де  $a$  – адитивна складова (мм), постійна інструментальна похибка приймача та антени, що не залежить від довжини бази,  $b$  – мультиплікативна складова (ppm /  $\text{млн}^{-1}$ ), похибка, яка масштабується залежно від відстані  $D$  між базовою станцією та ровером ( $1 \text{ ppm} = 1 \text{ мм на } 1 \text{ км відстані}$ ).

Висотна похибка в ГНСС-вимірюваннях зазвичай у 1,5–3 рази перевищує планову (горизонтальну). Це зумовлено трьома основними факторами:

1. Антена ГНСС-приймача приймає сигнали виключно від супутників, які знаходяться вище лінії горизонту (у верхній півсфері). Оскільки супутники не можуть випромінювати сигнали скрізь товщу Землі (з нижньої півсфери), геометричне засікання за висотою є незамкненим з одного боку. У плані ж супутники рівномірно оточують антену за азимутом на  $360^\circ$ , що дає значно кращу геометричну конфігурацію.
2. Через геометрію супутникового угруповання коефіцієнт зниження вертикальної точності VDOP завжди вищий за коефіцієнт горизонтальної точності HDOP. Оскільки похибка обчислюється як добуток  $\sigma = DOP \cdot \sigma_0$ , вище значення VDOP безпосередньо збільшує висотну похибку.
3. Похибки моделювання тропосферної та іоносферної затримок діють переважно уздовж вертикальної осі. Крім того, для зменшення шуму від атмосфери та багатопроменевості в приймачах встановлюють кут відсічки (маску піднесення, зазвичай  $10^\circ$ – $15^\circ$ ), що ще більше звужує конус корисних сигналів над антеною.

У таблиці 3 наведено основні характеристики точності різних режимів і найпоширеніші сфери їх застосування. Дані вибиралися з технічних характеристик моделей 2025 і 2026 років виробництва «великої четвірки» (Sokkia, Topcon, Leica-Geosystems, Trimble).

Таблиця 3. Типові характеристики точності і сфери застосування різних режимів.

| Режим                  | Точність,<br><i>a</i> , мм | Точність,<br><i>b</i> , ppm | Типова сфера використання                                                                    |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Статика, план          | 3                          | 0,1 – 0,5                   | Побудова опорних геодезичних мереж, моніторинг деформацій, довгі бази (> 20 км)              |
| Статика, висота        | 3,5-5                      | 0,4-0,5                     |                                                                                              |
| Швидка статика, план   | 3-5                        | 0,5                         | Знімальне обґрунтування, згущення мереж, бази до 10–15 км                                    |
| Швидка статика, висота | 5-10                       | 0,5-1                       |                                                                                              |
| РРК, план              | 5-8                        | 0,5-1                       | Аерофотознімання (БПЛА), трасова та гідрографічна зйомка, умовно закриті ділянки без зв'язку |
| РРК, висота            | 10-15                      | 0,5-1                       |                                                                                              |
| RTK, план              | 8                          | 0,5-1                       | Кадастрові та топографічні знімання, винос в натуру, інженерні вишукування                   |
| RTK, висота            | 15                         | 0,5-1                       |                                                                                              |

Слід зазначити, що при використанні супутникових спостережень в геодезичних задачах майже не оперують абсолютними вимірюваннями. В геодезичних визначеннях координат точок місцевості використовуються, в основному, *відносні* вимірювання. Це означає, що з високою точністю визначається не абсолютне положення кожного окремого ГНСС приймача, а прирости координат *D* (вектор) між парами приймачів (Рис.13). Важливою умовою супутникових відносних вимірювань є факт одночасних спостережень парою приймачів одних і тих же супутників. Тільки в цьому випадку можна розрахувати вектор між цими приймачами. При цьому якщо якийсь з приймачів знаходиться на пункті з відомими координатами, то можна точно визначити щодо нього координати інших приймачів в цій же системі координат.

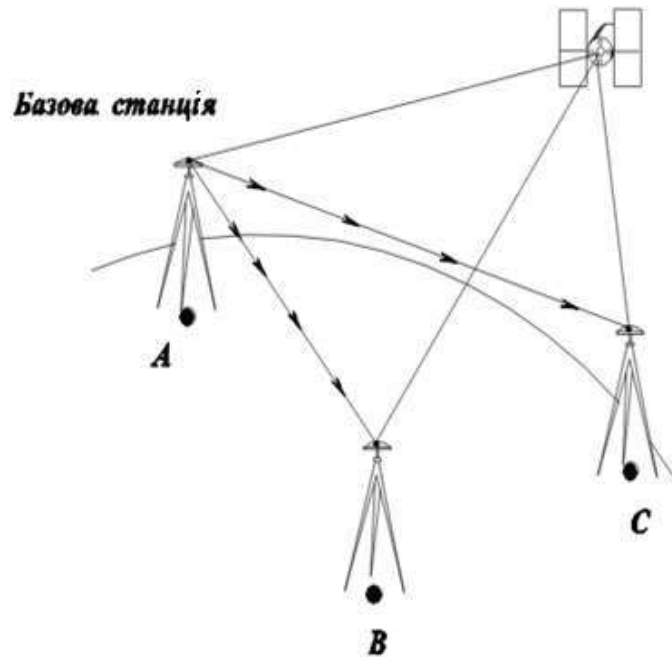


Рис. 13. Відносні вимірювання ГНСС.  
Джерело – [2].

Вектор  $D$  обчислюють за виразом:

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}. \quad (52)$$

Таким чином, координати від опорного пункту передаються до пункту, координати якого визначаються через базову лінію. Помилки такої передачі залежать від довжини базової лінії і безпосередньо включають в себе помилки координат вихідного пункту.

Гранична довжина базової лінії при побудові геодезичних мереж згущення суттєво залежить від частотного діапазону обладнання, що використовується. Для одночастотних приймачів рекомендована довжина бази становить 5–15 км, тоді як для двочастотних та мультимчастотних систем вона розширюється до 50 км і більше.

Головним обмежувальним фактором для одночастотних приймачів є іоносферна затримка сигналів. На коротких відстанях (до 15 км) затримка радіохвиль у верхніх шарах атмосфери над базою та ровером є практично однаковою (висока просторова кореляція), що дозволяє повністю нейтралізувати її математичним відніманням у подвійних різницях. Зі збільшенням відстані просторова кореляція зникає, а відсутність другої частоти не дозволяє визначити реальний стан іоносфери, що унеможливорює надійне розв'язання фазової неоднозначності.

Двочастотні приймачі позбавлені цього обмеження завдяки дисперсійним властивостям іоносфери. Оскільки затримка сигналу обернено пропорційна квадрату його частоти, вимірювання на двох несучих дозволяють обчислити іоносферовільну лінійну комбінацію та повністю виключити іоносферну похибку. Основні залишкові похибки на базах до 50 км мають тропосферне походження і компенсуються моделюванням зенітної тропосферної затримки під час тривалих статичних спостережень.

Проектування супутникових геодезичних мереж висуває специфічні вимоги до вибору місць встановлення пунктів. На відміну від класичних методів, які вимагають взаємної

видимості між суміжними точками, головною умовою для ГНСС-пунктів є забезпечення безперешкодного горизонту для прийому сигналів від супутників.

Фундаментальною вимогою при організації польових спостережень є синхронність (одночасність) роботи всіх приймачів у межах одного сеансу. Тільки за умови одночасного запису сигналів двома або більше приймачами можливо сформувати різниці вимірювань між приймачами і нейтралізувати часові та атмосферні похибки.

Супутникові геодезичні вимірювання за своєю природою є диференціальними. Вони дають змогу обчислити не абсолютні просторові координати, а векторні прирости координат ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) між пунктами спостережень — базисні лінії. Традиційно, такі лінії називають *векторами*.

Для переходу від векторних приростів до абсолютних координат у заданій референційній системі мережа повинна мати зв'язок із вихідною геодезичною основою. Мінімальною формою прив'язки є наявність у складі мережі одного опорного пункту з відомими координатами, а оптимальним варіантом для забезпечення жорсткості та контролю є використання щонайменше трьох вихідних пунктів.

У супутниковій геодезії застосовують два основні методи вимірювань, які визначають конфігурацію та надійність створюваної мережі.

*Променевий метод* передбачає послідовне визначення координат нових пунктів відносно одного вихідного опорного пункту (Рис.14а). Головним недоліком цього підходу є відсутність внутрішнього геометричного контролю. Оцінка точності в цьому випадку базується лише на внутрішній збіжності вимірювань, а реальна перевірка можлива тільки залученням незалежних зовнішніх методів.

*Мережевий метод* полягає у формуванні замкнених геометричних фігур, де вимірювання виконуються на кожній лінії або пункті мережі (Рис.14б). Це забезпечує високу надлишковість вимірювань та дозволяє контролювати помилки за нев'язками в замкнених полігонах.

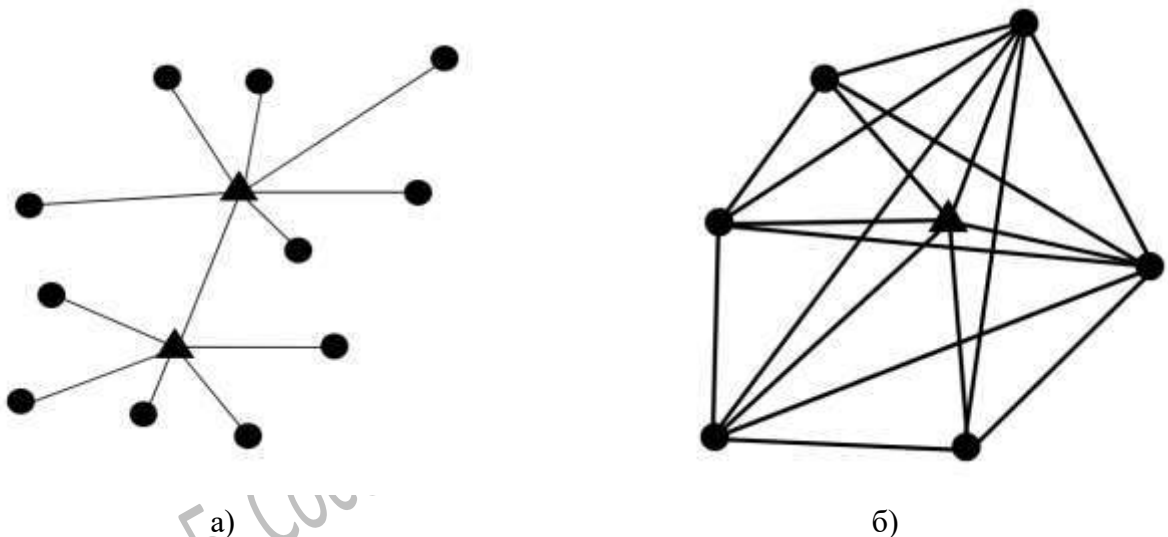


Рис. 14. Променевий (а) та мережевий (б) методи побудови геодезичних мереж.

Джерело – розроблено авторами.

При включенні в мережу кількох опорних пунктів виникає проблема узгодження координат. Похибки вихідних даних між опорними пунктами мають бути суттєво меншими за похибки векторів створюваної мережі. Якщо ця умова не виконується, вихідні дані вносять у мережу додаткові напруження та спотворення, що складно усунути під час вирівнювання.

Залежно від ієрархічної структури та послідовності створення, мережевий метод поділяють на *одноранговий* (Рис. 15а) та *багаторанговий* (Рис. 15б).

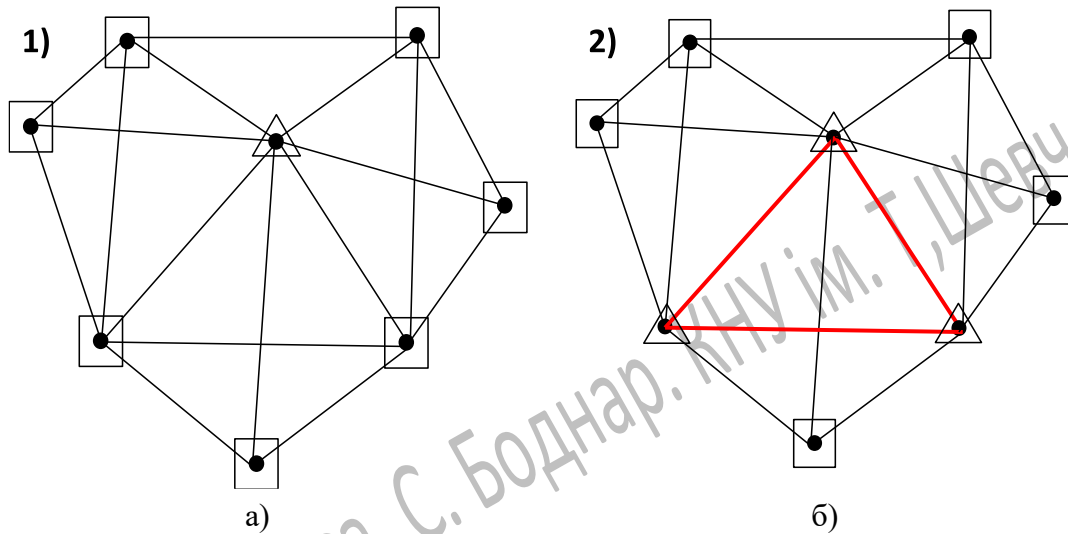


Рис. 15. Однорангові (а) та багаторангові (б) мережі.

Джерело – розроблено авторами.

При одноранговій побудові всі пункти мережі мають однаковий статус та клас точності. Вимірювання виконуються рівномірно між усіма суміжними точками, утворюючи єдину суцільну систему замкнених трикутників чи полігонів. Таке рішення є оптимальним для локальних об'єктів або геодезичних мереж згущення, де немає потреби виділяти окремий вищий рівень геодезичної основи.

У багаторангових мережах реалізується класичний принцип геодезії «від загального до окремого». На першому етапі формується жорсткий каркас вищого рангу з кількох основних пунктів, зв'язки між якими вимірюються з підвищеною точністю та більшою тривалістю сеансів. Ця первинна основа визначає масштаб і орієнтування всієї системи. Наступним етапом є прив'язка та розбудова пунктів нижчого рангу відносно вже сформованого опорного каркаса. Такий підхід дозволяє раціонально розподіляти польові ресурси та покривати значні території без системного накопичення похибок.

При використанні кількох опорних пунктів вищого рангу важливо враховувати якість вихідних даних. Похибки взаємного положення вихідних пунктів мають бути суттєво меншими за похибки векторів створюваної мережі. Якщо ця умова порушується, під час сукупного зрівнювання у визначувану мережу вносяться штучні деформації та напруження, які знижують підсумкову якість геодезичних координат.

Точність визначення векторів у статичному режимі суттєво залежить від тривалості сеансу спостережень  $T$ , оскільки з часом змінюється геометрія супутникового угруповання та усереднюються атмосферні завади.

Для емпіричної оцінки середніх квадратичних похибок залежно від часу сеансу Національна геодезична служба США (NGS) свого часу запропонувала такі співвідношення для компонентів вектора:

$$m_X = \frac{k_X}{\sqrt{T}}, \quad m_Y = \frac{k_Y}{\sqrt{T}}, \quad m_Z = \frac{k_Z}{\sqrt{T}}, \quad (53)$$

де  $T$  - тривалість сеансу спостережень у годинах, а коефіцієнти емпіричної похибки становлять:

$$k_X = 9,5 \pm 2,1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{1/2}$$

$$k_Y = 9,9 \pm 3,1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{1/2}$$

$$k_Z = 36,5 \pm 9,1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{1/2}$$

Ці формули чітко демонструють загальну закономірність: висотна компонента ( $Z$ ) має приблизно втричі більшу похибку порівняно з плановими компонентами ( $X, Y$ ), а збільшення тривалості спостережень зменшує похибку пропорційно  $\sqrt{T}$ . Хоча сучасні багаточастотні приймачі досягають необхідної точності значно швидше, цей підхід ілюструє базовий принцип накопичення фазової інформації в статистиці.

Для попереднього розрахунку точності геодезичних мереж використовують коефіцієнти  $a$  і  $b$  з Таблиці 3 для конкретного приладу.



### Контрольні запитання:

1. У чому полягає фундаментальна відмінність між автономним та диференціальним (DGNSS) режимами позиціонування? Порівняйте порядок точності кодового та фазового способів у кожному з цих режимів.
2. Поясніть різницю між методом корекції координат та методом корекції навігаційних параметрів (псевдовіддалей). Чому другий спосіб є більш універсальним для диференційної роботи?
3. Охарактеризуйте звичайну та швидку статистику (тривалість сеансів, сфери застосування). Завдяки чому накопичення вимірювальної інформації в статистиці забезпечує найвищу точність?
4. У чому полягають відмінності між кінематикою в режимі реального часу (RTK) та кінематикою з подальшою пост-обробкою (PPK)?
5. Розкрийте математичний зміст формули точності  $\sigma = a + b \cdot D$ . Наведіть три основні фактори, через які висотна похибка ГНСС-вимірювань у 1,5–3 рази перевищує планову.
6. Чому для одночастотних приймачів рекомендовано обмеження бази в 5–15 км, тоді як двочастотні дозволяють працювати на відстанях до 50 км і більше?
7. Які специфічні вимоги висуваються до вибору місць розташування ГНСС-пунктів на відміну від пунктів класичної геодезії? Поясніть фізичну та математичну суть принципу синхронності (одночасності) спостережень.
8. Порівняйте променевий та мережевий методи побудови геодезичних мереж.
9. У чому полягає відмінність між одноранговою та багаторанговою схемами побудови мережевим методом? Яка жорстка вимога висувається до взаємної точності вихідних (опорних) пунктів при їх включенні в мережу?

10. Як тривалість сеансу спостережень  $T$  впливає на середні квадратичні похибки компонентів вектора  $m_x, m_y, m_z$  за емпіричними формулами NGS США? Що ця модель демонструє щодо співвідношення планових та висотної похибок?

## ТЕМА 6. ВИКОНАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРІВ (4 год.)



1. Принципова схема ГНСС-приймачів
2. Передача поправок у режимі реального часу
3. Класифікація ГНСС-приймачів
4. Мережі референсних станцій, принцип VRS
5. Планування ГНСС-спостережень
6. Практичні аспекти ГНСС-вимірів
7. Сфери застосування високоточних навігаційних даних
8. Особливості використання супутникових технологій у воєнний час
9. Глобальні навігаційні супутникові системи низької орбіти (LEO-PNT)

Сучасний геодезичний супутниковий приймач є складною радіоелектронною та обчислювальною системою, призначеною для прийому надслабких високочастотних радіосигналів ШСЗ, їх аналогово-цифрової обробки та обчислення просторових координат.

Апаратну структуру ГНСС-приймача можна розділити на внутрішнє обчислювальне ядро та зовнішні (периферійні) блоки. Спрощену принципову схему типового супутникового приймача наведено на Рис.16.

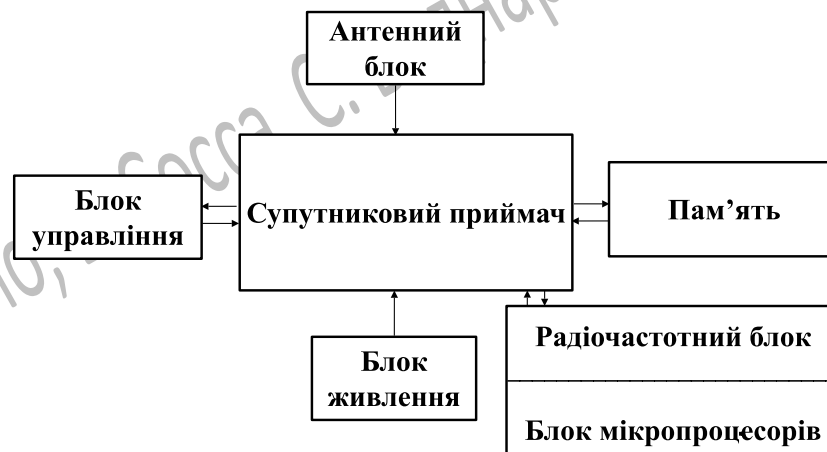


Рис. 16. Спрощена принципова схема приладу та функціонування супутникового приймача.

*Джерело – розроблено авторами.*

### *1. Внутрішнє апаратне ядро приймача*

- Радіочастотний блок (RF Front-End). Отримує аналоговий сигнал від антени, відфільтровує позасмугові завади та підсилює сигнал за допомогою малошумного підсилювача (LNA). За допомогою гетеродина та змішувачів знижує високу несну частоту супутника (понад 1 ГГц) до проміжної частоти (ПЧ). Перетворює безперервний аналоговий сигнал проміжної частоти у цифровий потік для подальшої математичної обробки;
- Блок мікропроцесорів (DSP та центральний процесор). Багатоканальний корелятор здійснює пошук, захоплення та автосупроводження сигналів супутників у слідкуючих системах за затримкою (DLL) та фазою (PLL). Вимірник первинних параметрів формує кодові псевдовіддалі, фазові вимірювання несучої хвилі та фіксує зсув Допплера для кожного супутника. Обчислювальний процесор (PVT-обчислювач) декодує навігаційне повідомлення (ефемериди), розв'язує систему рівнянь позиціонування, оцінює похибку годинника та здійснює розв'язання цілочисельної фазової неоднозначності.

### *2. Зовнішні (периферійні) модулі та їх взаємодія*

- Антенний блок складається з приймального елемента (патч-антени чи спіральної антени) та вбудованого малошумного підсилювача (LNA). Перетворює енергію електромагнітних хвиль у закритичній зоні на електричний сигнал. У геодезичних приймачах антена має фіксований фазовий центр (PCC) та придушувач багатопроменевості (Choke Ring або GND-plane);
- Блок живлення забезпечує стабільну напругу для цифрових мікросхем та аналогових високочастотних кіл. Складається з внутрішніх літій-іонних акумуляторів, контролера заряду та роз'ємів для підключення зовнішнього джерела живлення (зовнішній акумулятор, мережа 220 В);
- Блок управління (інтерфейс користувача / контролер) забезпечує двосторонній обмін інформацією між оператором та приймачем. Реалізується через польовий контролер (панель з сенсорним екраном), світлодіодні індикатори статусу або бездротові веб-інтерфейси (Bluetooth / Wi-Fi / WebUI). Слугує для вибору режиму роботи (статика, RTK, PPK), налаштування маски піднесення, запуску/зупинки запису;
- Блок пам'яті – внутрішній або зовнішній накопичувач (Flash-пам'ять, SD-картка). Забезпечує безперервний двосторонній зв'язок із процесором для енергонезалежного збереження вимірювальних файлів у сирому бінарному форматі (Raw Data) або стандартному форматі RINEX, а також для зчитування конфігураційних файлів та альманахів.

Повна супутникова геодезична система складається з чотирьох основних апаратних блоків:

- Антенний блок (приймає радіосигнал).
- Приймач (здійснює аналогово-цифрову обробку та обчислення).
- Блок живлення (забезпечує автономне електроживлення).
- Блок керування / Польовий контролер (інтерфейс для взаємодії з оператором).

Залежно від технологічних задач та періоду розробки обладнання, ці блоки можуть поєднуватися у різних комбінаціях та форм-факторах. Основні типи компонування ГНСС-обладнання можна розділити на три умовних типи:

1. *Модульні (роздільні) системи.* Усі чотири блоки виконані у вигляді окремих модулів, які з'єднуються між собою височастотними та інтерфейсними кабелями. Застосування: постійно діючі референсні станції (CORS), інженерний моніторинг, навігація важкої техніки та БПЛА. Їх перевага - гнучкість, а саме можливість використовувати одну й ту саму антену з різними моделями приймачів або розміщувати антену на значній відстані від обчислювального блоку.
2. *Інтегровані системи (smart-антени/моноблоки).* Антенний блок, супутниковий приймач та акумуляторна батарея об'єднані в єдиному герметичному міцному корпусі. Зв'язок із зовнішнім контролером здійснюється через бездротові інтерфейси (Bluetooth, Wi-Fi). Застосування: Основний форм-фактор для польових RTK-знімань, винесення в натуру та згущення мереж у статичному режимі.
3. *Компактні моноблоки («Все в одному»).* Усі чотири блоки (включаючи дисплей та органи управління) об'єднані в єдиному корпусі. Застосування: автомобільні навігатори, туристичні та кишенькові ГНСС-приймачі ГПС-класу.

*Класична схема* поєднання модулів (кінець 1990-х - початок 2010-х рр.) передбачала домінування 4-компонентних модульних комплектів. Вони вимагали від оператора перенесення важких транспортних кейсів, використання зовнішніх акумуляторних батарей великої ємності та з'єднання всіх вузлів багатьма кабелями, що знижувало надійність системи у вологих чи запилених умовах.

За сучасними стандартами переважна більшість геодезичних приймачів випускається у форм-факторі Smart-антени. Відсутність зовнішніх дротів підвищує мобільність та захищеність приладу від зовнішніх чинників (стандарт захисту IP67/IP68).

Сучасні Smart-антени оснащуються внутрішнім мікроконтролером із Web-інтерфейсом (WebUI) або внутрішніми органами управління. Це дозволяє виконувати польові роботи (наприклад, запис статистики або встановлення бази RTK) в автономному режимі - без залучення зовнішнього польового контролера.

Для виконання вимірювань у режимі реального часу (RTK) між базовою станцією та ровером має бути організований безперервний та надійний канал цифрового зв'язку. Його призначення - миттєва передача диференційних поправок від базового приймача до ровера з мінімальною затримкою (зазвичай  $< 1$  с).

Апаратною основою для трансляції поправок слугують модеми, які поділяються на два основні типи: радіомодеми (UHF) та стільникові модеми (GSM/LTE).

#### 1. УКХ-Радіомодеми (UHF Radio Modems)

Радіомодеми здійснюють безпосередню трансляцію цифрового сигналу за допомогою електромагнітних хвиль ультракороткого діапазону.

- *Частотний діапазон:* основним робочим діапазоном у геодезії є UHF (410–470 МГц);
- *Апаратне виконання та дальність:*
  - Вбудовані радіомодеми (1–2 Вт) інтегровані в корпус Smart-антени. Забезпечують дальність зв'язку 3–8 км (до 10 км на відкритій місцевості при прямій видимості);
  - Зовнішні радіомодеми (35–45 Вт) підключаються до базової станції через зовнішній кабель і живляться від окремого акумулятора. Дозволяють транслювати поправки на відстань до 20–30 км.

- *Специфіка та протоколи*: передача здійснюється за спеціальними радіопротоколами модуляції (TrimTalk 450S, Satel, Pacific Crest, TRANSPARENT тощо);
- *Сфера застосування*: об'єкти, де повністю відсутнє або нестабільне покриття мобільного зв'язку (кар'єри, лісові масиви, віддалені гірські ділянки, будівельні майданчики поза зоною покриття операторів).

## 2. Стільникові модеми (GSM/LTE) та мережеві технології

GSM/LTE-модеми використовують інфраструктуру операторів мобільного зв'язку та мережу Інтернет для передачі даних.

- *Принцип дії*: базова станція (або мережа референчних станцій CORS) підключається до сервера в мережі Інтернет та транслює туди поправки. Роверний приймач через вбудований GSM/LTE-модем (або SIM-картку в контролері/смартфоні) підключається до цього ж сервера та отримує поправки;
- *Протокол NTRIP*:

Трансляція поправок через Інтернет здійснюється за спеціалізованим геодезичним протоколом NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Архітектура NTRIP включає *NTRIP Server*, який відправляє поправки від базового приймача на кастер; *NTRIP Caster* – це HTTP-сервер, який акумулює поправки від багатьох баз і розподіляє їх між користувачами за обліковими записами (Логін/Пароль); *NTRIP Client* – програмне забезпечення в ровері, яке підключається до вибраної точки доступу (*Mountpoint*) на кастері та завантажує поправки.

- *Переваги та обмеження*:
  - *Переваги*: відсутність обмежень за дальністю зв'язку радіосигналу (ровер може працювати на відстані десятків кілометрів від бази в межах покриття мережі); можливість роботи від мереж мережевих поправок (VRS, FKP, MAC).
  - *Обмеження*: повна залежність від наявності покриття та якості мобільного інтернету; наявність затримок мережі (ping).

Незалежно від обраного каналу зв'язку (радіо чи GSM), самі поправки кодуються у спеціалізовані бінарні формати даних.

За кількістю супутникових систем, з якими працюють супутникові приймачі їх можна класифікувати на такі три типи:

1. *Односистемні/двосистемні*: (історичний клас, застарілі геодезичні чи спеціалізовані приймачі);
2. *Мультисистемні (Full-Constellation)*: приймачі, що одночасно обробляють сигнали всіх доступних ГНСС: GPS, Galileo, BeiDou, ГЛОНАСС, QZSS.

За частотним діапазоном прилади поділяють на:

1. *Одночастотні (L1 / E1 / B1)*: переважно ГІС-клас, навігатори, БПЛА аматорського рівня;
2. *Двочастотні (L1+L2 або L1+L5)*: бюджетні RTK-приймачі, сучасні смартфони з L1+L5);
3. *Багаточастотні / мультичастотні (L1, L2, L5, L6 / E1, E5a, E5b, E6 / B1, B2, B3)*: сучасний геодезичний стандарт.

За типом вимірювань прилади поділяють на:

1. *Кодові (Navigational/GIS)*: виконують вимірювання псевдовіддалей тільки за віддалемірними кодами (C/A, L2C, L5 тощо);

2. *Кодово-фазові (Geodetic/Survey Grade)*: вимірюють кодові псевдовіддалі та фазу несучої хвилі на всіх доступних частотах для забезпечення міліметрової/сантиметрової точності в статиці та RTK.

Залежно від методів позиціонування (абсолютні кодові чи відносні фазові) та точності, що досягається, ГНСС-приймачі поділяють на три основні прикладні класи: *навігаційні*, *ГІС-класу (картографічні)* та *геодезичні*.

1. Навігаційні (користувацькі) приймачі. Цей клас охоплює масовий сегмент: смартфони, автомобільні навігатори, туристичні прилади, реєстратори та трекари. Вони працюють за автономним кодовим методом позиціонування, обчислюючи абсолютні координати в реальному часі за віддалемірними кодами. Сучасні мультиміліметрові чіпи цього класу досягають планової точності від 2 до 5 метрів (у застарілих одночастотних модельних рядах — 10–15 метрів). Основне призначення — загальна навігація, логістика, орієнтування на місцевості та первинна рекогносцировка.

2. Картографічні приймачі (ГІС-клас та субметрові). Приймачі цього класу призначені для збору даних для геоінформаційних систем, кадастрової інвентаризації, картографування інфраструктури, лісового та сільського господарства. Вони поєднують кодові вимірювання з фазовим згладжуванням та обов'язковим використанням методів диференціальної корекції — диференційне кодове позиціонування (DGNSS) або безкоштовні супутникові системи корекції SBAS, що забезпечують точність порядку 1–3 метрів. Субметрові ГІС-системи, які за рахунок первинної обробки фази несучої хвилі, технології PPP (Point Positioning) або роботи від мереж базових станцій у режимі реального часу чи пост-обробки дають планову точність від 10 см до 0,5 м.

3. Геодезичні приймачі (Survey Grade). Найвищий клас апаратури, призначений для виконання високоточних геодезичних робіт: розбудови та згущення Державної геодезичної мережі, інженерно-геодезичних вишукувань, розмічувальних робіт, моніторингу деформацій споруд і топографічного знімання. Геодезичні приймачі обов'язково є багаточастотними та мультисистемними. Вони здійснюють вимірювання фази несучої хвилі на всіх доступних частотах із повним розв'язанням цілочисельної фазової неоднозначності (N). У режимі RTK (Real Time Kinematic) та PPK (Post-Processing Kinematic): забезпечують планову точність близько 10 мм + 1 ppm. У статичному режимі (Static / Rapid Static) із подальшою математичною обробкою забезпечують найвищу міліметрову точність (близько 3–5 мм + 0,5 ppm).

На відміну від мобільних базових станцій, які вимагають щоденного вибору точки, виставлення на штативі, центрування та горизонтування, *постійнодіюча одиночна базова станція* (Single CORS) встановлюється на стаціонарну конструкцію (капітальну будівлю або спеціальний бетонний пілон) для тривалої або безстрокової експлуатації (Рис.17). Єдиним її недоліком є жорстка прив'язка до одного місця та відсутність мобільності. Застосування такого підходу є найбільш доцільним на масштабних об'єктах із тривалим циклом робіт - у глибоких кар'єрах, на великих будівельних майданчиках, у межах агрохолдингів чи морських портів, де одночасно працює декілька роверних комплектів або систем автоматичного керування технікою. Це забезпечує стабільну геометричну основу та короткі вектори «база-ровер».



Рис. 17. Постійнодіюча базова станція.

Джерело – розроблене авторами.

Конструктивною перевагою стаціонарної станції є її повна автоматизація та автономність від оператора. Для забезпечення безперервного функціонування у режимі 24/7/365 використовується комбіноване електроживлення від міської мережі з обов'язковим резервуванням від акумуляторних батарей (ДБЖ) або сонячних панелей. Станція працює в безконтрольному режимі («Headless-mode») під управлінням внутрішнього мікроконтролера. Повний контроль, зміна налаштувань, моніторинг супутникового сузір'я та оновлення програмного забезпечення здійснюються віддалено через мережевий веб-інтерфейс (WebUI).

Передача RTK-поправок у режимі реального часу здійснюється через мережу Інтернет із використанням мережевого протоколу NTRIP або прямих TCP/IP-з'єднань. Фізичне підключення реалізується через дротовий Ethernet або високошвидкісні 4G/5G-модеми. Одночасно із трансляцією поправок роверам, базова станція у фоновому режимі веде автоматичний запис «сірих» супутникових вимірювань (у форматі RINEX) та передає їх на локальний сервер або в хмарне сховище для подальшої статичної обробки та архівування.

Фундаментальною властивістю стаціонарної бази є збільшення точності визначення її власних координат пропорційно до часу перебування на точці. Накопичення безперервних статичних спостережень протягом кількох діб чи тижнів дозволяє виконати суворе вирівнювання її фазового центру відносно пунктів Державної геодезичної мережі або через сервіси PPP із міліметровою точністю. Додатково стаціонарні приймачі можуть інтегруватися з метеорологічними датчиками (температури, атмосферного тиску та вологості), що дає змогу враховувати локальні параметри тропосферної затримки при обробці високоточних інженерних мереж.

### **Мережі перманентних референсних станцій ГНСС (Network RTK)**

*Етап 1: Виникнення та обмеження одиночних станцій (1990-ті роки).*

Розвиток режимів вимірювань у реальному часі розпочався саме з використання одиночних мобільних або стаціонарних базових станцій. Проте класичний метод «одиначна база - ровер» мало жорстке фізичне обмеження: точність вимірювань стрімко знижувалася зі збільшенням відстані між приймачами. Це зумовлено тим, що диференційні похибки (іоносферна та тропосферна затримки, а також похибки ефемерид) є просторово корельованими лише на малих відстанях. На віддальх понад 10-15 км розбіжності в проходженні супутникового сигналу до бази та ровера ставали критичними, що унеможливлювало швидке й надійне розв'язання цілочисельної фазової неоднозначності (N).

*Етап 2: Концепція мережевого RTK та її розвиток (2000-ні роки).*

Для подолання «бар'єра 15 кілометрів» у геодезичну практику було впроваджено концепцію *мережевого RTK* (Network RTK). Вона полягає в об'єднанні багатьох стаціонарних постійнодіючих станцій (CORS) у єдину обчислювальну систему за допомогою високошвидкісних каналів зв'язку та центрального сервера.

Завдяки математичному моделюванню просторового розподілу похибок відстань між базовими станціями вдалося збільшити з 15 км до 50-70 км, що зробило створення покриття масштабних територій економічно доцільним. Саме в цей період сформувалися основні мережеві технології: *VRS* (Virtual Reference Station), *FKP* (Flächen-Korrektur-Parameter) та *MAC* (Master-Auxiliary Concept).

*Етап 3: Сучасний стан*

Сьогодні мережі референчних станцій (Рис.18) є основою національної геодезичної інфраструктури більшості країн світу (наприклад, мережі EPN в Європі, а в Україні - приватні та державні мережі, такі як System.NET, ZAKPOS тощо).

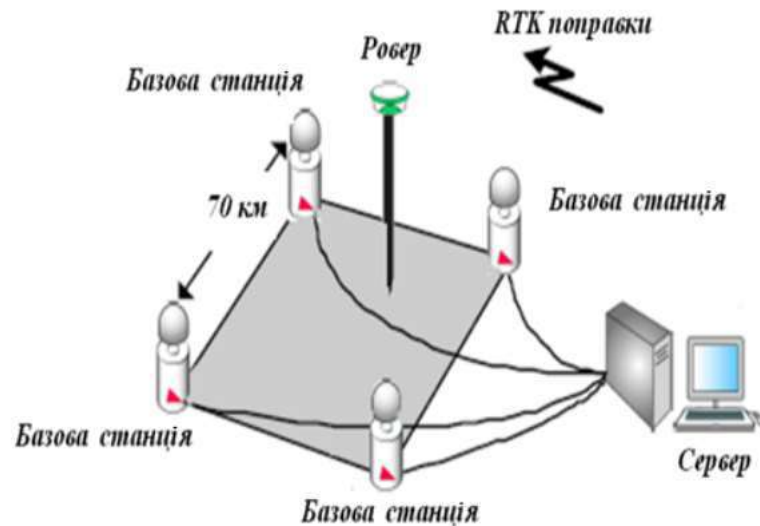


Рис. 18. Принцип роботи мережі референчних станцій.

Джерело – *Leica Geosystems Technical White Paper: Concepts of Network RTK*

Сучасні мережі є мультисистемними та мультичастотними (Full-Constellation), тобто обробляють сигнали всіх діючих ГНСС (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) на всіх доступних частотах. Обчислювальні сервери базуються в хмарних сховищах із функцією автоматичного перерозподілу навантаження та резервування. Поряд із класичним RTK, сучасні мережі активно інтегрують технології PPP-RTK, які дозволяють передавати поправки не лише через мобільний Інтернет (NTRIP), а й через геостаціонарні супутники L-діапазону, забезпечуючи сантиметрову точність без прив'язки до покриття стільникового зв'язку.

Однією з основних переваг використання мережевого RTK є економічна – користувачу не потрібно мати два приймачі для бази і ровера, достатньо одного ровера і підписки на послуги мережі.

Однією з найпоширеніших практик підвищення точності в мережевому RTK є використання технології VRS, або *віртуальної базової станції*. Основна ідея мережевого RTK

полягає в тому, що похибки, які виникають під час проходження супутникового сигналу через атмосферу, обчислюються не для одного вектора, а для всієї території, охопленої мережею.

Усі референсні станції, розташовані на відстані 50–70 км одна від одної, мають прецизійно визначені координати. Станції безперервно транслюють свої поточні «сирі» фазові вимірювання на центральний сервер. Оскільки координати баз відомі з міліметровою точністю, сервер у режимі реального часу обчислює фактичні абсолютні похибки для кожної станції та будує *просторову інтерполяційну модель похибок* (іоносферної, тропосферної затримок та орбітальних розбіжностей) для всієї площі геодезичного полігону.

На відміну від звичайного RTK, де ровер приймає поправки від однієї фізичної бази, при використанні технології VRS обчислювальний процес відбувається таким чином (Рис.19):

1. *Передача наближених координат.* Ровер підключається до сервера мережі через Інтернет за протоколом NTRIP і надсилає свої наближені координати (визначені автономним кодовим методом) у вигляді NMEA-повідомлення.
2. *Генерація віртуальної бази.* Отримавши координати ровера, сервер за допомогою створеної просторової моделі похибок розраховує математичний масив вимірювань для точки, що знаходиться в безпосередній близькості від геодезиста (зазвичай на відстані 10–15 метрів або безпосередньо в точці стояння ровера). Ця математично згенерована точка називається віртуальною референційною станцією (VRS).
3. *Трансляція RTK-поправок.* Сервер формує стандартний потік поправок (у форматі RTCM) так, ніби в цій віртуальній точці справді фізично встановлено реальний ГНСС-приймач, і транслює його назад на ровер.



Рис. 19. Принцип віртуальної референційної станції.

Джерело – Leica Geosystems Technical White Paper: Concepts of Network RTK

Оскільки відстань між польовим ровером і віртуальною базою становить лише кілька метрів, довжина вектора фактично дорівнює нулю. Це майже повністю усуває вплив просторово корельованих атмосферних похибок. У результаті ровер миттєво фіксує цілочисельну фазову неоднозначність і забезпечує стійку сантиметрову точність вимірювань у будь-якій точці всередині контуру мережі, незалежно від того, як далеко знаходяться реальні фізичні базові станції.

Поряд із високою точністю, технологія VRS має кілька суттєвих обмежень:

1. *Крайовий ефект та локальні аномалії.* Модель VRS коректно працює лише всередині геометричного контуру, утвореного базовими станціями. Вихід ровера за межі периметра мережі призводить до помилок екстраполяції. Крім того, математична модель не здатна

врахувати дрібномасштабні атмосферні аномалії, які виникають у просторі між вузлами мережі з розмірами, меншими за відстань між станціями;

2. *Залежність від двостороннього зв'язку.* На відміну від класичного радіо-RTK, технологія VRS вимагає обов'язкового двостороннього з'єднання через Інтернет (ровер повинен не лише отримувати поправки, а й постійно передавати свої NMEA-координати на сервер).

#### *Планування ГНСС-спостережень та оцінка точності мереж*

Під час проєктування супутникових вимірювань раніше ключову роль відігравало часове планування. За допомогою спеціалізованих програмних пакетів геодезисти розраховували оптимальні години та хвилини сеансів за екстрапольованими орбітами, щоб уникнути провалів у геометрії сузір'я. Із розгортанням сучасних глобальних систем Galileo та BeiDou необхідність у складнику часового планування майже зникла. У міських умовах сучасні мультисистемні приймачі одночасно бачать від 20 до 40 супутників, а на відкритих майданчиках — понад 40, що гарантує ідеальну геометрію та низькі значення DOP у будь-який момент часу.

Сьогодні планування зводиться переважно до просторового розміщення пунктів з урахуванням специфіки міської забудови та комплексного використання ГНСС спільно з класичними наземними приладами (електронними тахеометрами). Пункти повинні розташовуватися у зонах із максимально відкритим обрізом (мінімальний вплив багатопроменевості), поза межами проїжджої частини для безпеки й захисту від вібрацій, а між суміжними пунктами обов'язково має забезпечуватися пряма видимість для подальших тахеометричних вимірювань.

Для попереднього розрахунку очікуваної точності використовують параметри адитивної та мультиплікативної похибки конкретного приладу. Остаточна точність пунктів після камеральної пост-обробки формується за результатами суворого вирівнювання мережі за методом найменших квадратів, де за рахунок надлишковості вимірювань та взаємного контролю досягається суттєве підвищення надійності порівняно з поодинокими векторами.

#### **Початок роботи з ГНСС-приймачем**

Під час кодових вимірювань приймач порівнює часові затримки коду супутника та отримує псевдодальність з відносно невисокою точністю (перші метри).

Для досягнення сантиметрової точності використовуються фазові вимірювання (вимірювання фази несучої частоти). Приймач здатний миттєво та з міліметровою точністю виміряти дробову частину фази хвилі, яка надійшла в момент вимірювання. Проте він не знає, яка ціла кількість повних довжин хвиль містилася на відрізку між супутником та антеною в момент відкриття каналу спостереження.

Залежно від наявності диференційних поправок та статусу розв'язання рівняння фазової неоднозначності, польовий контролер або система індикаторів демонструє один із трьох основних типів рішень:

1. *Автономне рішення (Autonomous/Single).* Приймач працює самостійно, обробляючи лише власні кодові спостереження без використання поправок від базових станцій чи мереж CORS. Точність від 1–3 м до 5–10 м (залежно від стану атмосфери та умов видимості).

2. *Плаваюче рішення (Float Solution).* Приймач приймає диференційні поправки (RTK/NTRIP) та починає опрацьовувати фазові вимірювання. На цьому етапі математичний алгоритм (зазвичай, фільтр Калмана) оцінює параметр неоднозначності  $N$  не як ціле число, а

як дробову (дійсну) величину з певною ймовірнісною дисперсією. Точність з часом поступово покращується до субметрового рівня (0,1–0,5 м). Таке рішення є перехідним і вважається недостатнім для виконання високоточних геодезичних робіт та винесення пунктів у натуру.

3. *Фіксоване рішення* (Fixed Solution/Fix). Накопичивши достатню кількість даних, обчислювальний процесор за допомогою спеціальних математичних алгоритмів математично доводить і фіксує цілочисельне значення  $N$  для кожного супутника. Точність – сантиметровий та субсантиметровий рівень.

*Ініціалізація* ГНСС-приймача - це процесуальний інтервал часу, протягом якого приймач збирає необхідний обсяг фазових даних, усуває просторово корельовані похибки та виконує алгоритмічний перехід від плаваючого рішення (Float) до фіксованого (Fixed).

*Режим OTF* (On-The-Fly). Сучасні мультисистемні (L1, L2, L5) та мультисистемні (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) приймачі виконують ініціалізацію безпосередньо, в русі. За сприятливих умов час ініціалізації становить від 1 до 5 секунд.

*Втрата захвату фази* (Cycle Slip). Якщо під час роботи фіксований сигнал переривається (наприклад, через перешкоду - міст, дерево або будівлю), відбувається так званий «зрив фази». Приймач миттєво втрачає значення  $N$ , скидає статус до Float або Single і розпочинає процес ініціалізації заново.

Польова робота в режимі RTK завжди розпочинається з обов'язкового етапу ініціалізації на максимально відкритій ділянці місцевості. Вибір місця з мінімальним кутом закриття горизонту гарантує прийом прямого супутникового сигналу від максимальної кількості апаратів без завад багатоприменовості, що дозволяє алгоритмам обчислювального модуля найшвидше розв'язати фазову неоднозначність і отримати фіксоване рішення.

Під час безпосереднього знімання виконавцю необхідно постійно контролювати навколишню ситуацію. Будь-які фізичні перешкоди на шляху поширення сигналу - щільні крони дерев, фасади споруд, мостові переходи чи лінії електропередач - спричиняють екранування супутників або зрив фази несучої частоти (Cycle Slip). У разі втрати фіксованого рішення виконавець повинен припинити набір пікетів, відійти від джерела перешкод на відкриту ділянку та дочекатися повторної ініціалізації системи.

Одним із найскладніших завдань при класичному RTK-зніманні є координування кутів будівель та споруд. При спробі встановити віху строго вертикально безпосередньо в кут цоколя, стіни та звиси даху перекривають до 50% півсфери огляду неба. Це призводить не лише до втрати зв'язку з частиною супутників, але й до виникнення ефекту багатоприменовості (Multipath), коли відбитий від фасаду сигнал надходить до антени із затримкою. За таких умов приймач може сформувати «хибне фіксоване рішення», помилка якого сягає від кількох дециметрів до метра, що є неприпустимим для точних геодезичних робіт.

Ефективним вирішенням цієї проблеми стало впровадження в роверні ГНСС-приймачі *інерціальних вимірювальних модулів* (IMU - Inertial Measurement Unit) на основі мікроелектромеханічних систем (MEMS). Модуль IMU складається з трьохосових гіроскопів та акселерометрів, які в режимі реального часу з високою частотою вимірюють кути нахилу віхи, прискорення та напрямки її відхилення у просторі. Знаючи вектор нахилу та точну висоту віхи  $h$ , контролер автоматично розраховує просторове зміщення наконечника відносно фазового центру антени й миттєво вносить геометричну поправку в підсумкові координати  $X$ ,  $Y$ ,  $H$  (Рис.20). Це дає виконавцю важливі технологічні переваги:

1. *Подолання перешкод* - геодезист може нахилити віху під кутом до  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ , залишивши антену приймача у зоні відкритого неба поза межами затінення даху, поки наконечник віхи фізично впирається в кут будівлі чи паркану;
2. *Стійкість до магнітних завад* – на відміну від застарілих електронних компасів, сучасні IMU-системи є повністю інерціальними та електронно-механічними. Вони не реагують на металеві конструкції, залізобетонні огорожі, припарковані автомобілі чи лінії високої напруги;
3. *Підвищення продуктивності* – відпадає потреба витратити час на точне виведення циліндричного або круглого рівня у нуль-пункт на кожній точці. Це прискорює виконання польового знімання на 20–30% та знижує втомлюваність оператора.

Попри суттєве підвищення продуктивності, використання компенсації нахилу вносить додаткову складову похибки в підсумкові координати. Величина цієї похибки напряму залежить від кута нахилу віхи  $\alpha$  та точності введення її фізичної висоти  $h$ .



Рис. 20. Робота ГНСС-приймачем з інерціальним вимірювальним модулем.

Джерело – розроблено авторами.

Додаткова планова похибка обчислюється пропорційно синусу кута нахилу:  $\Delta = h \cdot \sin \theta$ . Якщо при вертикальному положенні віхи точність RTK-рішення у плані становить типово 10-30 мм, то при нахилі до  $30^{\circ}$  додаткова похибка може складати ще від 5 до 15 мм залежно від точності калібрування сенсора. При збільшенні кута нахилу понад  $30^{\circ}$ – $45^{\circ}$  похибка починає зростати нелінійно, а точність визначення висотної позначки  $H$  деградує ще суттєвіше через геометричний фактор.

Крім суто математичного зсуву наконечника, на деградацію точності при використанні IMU впливають такі фізичні чинники:

1. *Критичність висоти віхи*. Будь-яка помилка геодезиста при вимірюванні або введенні висоти віхи у контролер при вертикальному зніманні впливає лише на висоту  $H$ . Проте при нахилений вісі помилка у висоті автоматично розкладається у планові координати  $X, Y$ , створюючи систематичний зсув пікета.

2. *Зміна орієнтації антени (PCV)*. При значному нахилі антена відхиляється від зеніту. Це змінює діаграму спрямованості прийому сигналів та зміщує фазовий центр антени відносно супутників, а сам корпус приймача починає затінити низькоракурсні супутники з одного боку горизонту.
3. *Механічна жорсткість*. Найменший вигин віхи, прогин висувної секції чи зазори в кріпленні адаптера створюють фізичний люфти, який інерціальний модуль у принципі не здатний зафіксувати, оскільки він вимірює кут повороту самого приймача, а не наконечника.

З огляду на це у практичній геодезії встановлюється чітке методичне правило: нахил віхи з IMU є чудовим рішенням для оперативного топографічного знімання, кадастру, координування кутів споруд або пікетів у складних умовах. Проте для закладання пунктів опорних мереж, геодезичного моніторингу деформацій чи відповідального розпланування висотних конструкцій віха обов'язково повинна виводитися у нуль-пункт за допомогою фізичного циліндричного або круглого рівня.

При виконанні ГНСС-вимірювань із подальшою камеральною обробкою (пост-обробкою) весь технологічний процес чітко поділяється на *польовий* та *камеральний* етапи.

У режимі РРК (Post-Processed Kinematic) вимоги до геодезиста в полі залишаються такими ж суворими, як і в RTK: обов'язкове проведення початкової ініціалізації на відкритому місці, постійне стеження за затіненнями та відсутність втрат фазового сигналу під час руху. Головна перевага РРК полягає у відсутності потреби в каналі зв'язку (UHF-радіо чи GSM-інтернет) між базою та ровером, оскільки всі сирі дані записуються у внутрішню пам'ять приладів для подальшого сумісного розрахунку.

При статичних спостереженнях вирішальну роль відіграє не лише грамотний вибір місця закладки пункту (відсутність перешкод та багатопроменевості), а й обґрунтування тривалості сеансу вимірювань. Тривалість сеансу визначається довжиною векторів до базових станцій: для коротких баз (до 10 км) достатньо 20–40 хвилин, тоді як для міжбазових відстаней у десятки кілометрів сеанси можуть тривати від 2–3 годин до кількох добових циклів.

Якість підсумкових координат у режимі пост-обробки безпосередньо залежить від точності знання просторового положення супутників на орбіті у момент вимірювань.

За замовчуванням обробка здійснюється за допомогою бортових (бродкастових) ефемерид, які супутник передає у складі навігаційного сигналу. Вони містять елементи прогнозованої орбіти та мають похибку від 1 до 2 метрів. Для високоточних робіт використовують точні ефемериди, які розраховуються Міжнародною ГНСС-службою (IGS) на основі глобальної мережі спостережень.

За часом доступності та рівнем точності ефемериди IGS поділяються на три основні типи:

*Ультрашвидкі (Ultra-Rapid)*. Оновлюються чотири рази на добу (кожні 6 годин) і використовуються для термінової обробки даних або робіт у близькому до реального часу.

*Швидкі (Rapid)*. Стають доступними вже наступного дня (через 17–22 години після завершення доби спостережень) і забезпечують точність орбіт близько 2,5 см, що є оптимальним для більшості інженерно-геодезичних задач.

*Фінальні точні (Final)*. Публікуються з затримкою у 12–14 днів після закінчення розрахункового тижня. Вони забезпечують найвищу міліметрову прецизійність і

застосовуються для побудови державних геодезичних мереж, наукових досліджень та моніторингу деформацій Земної кори.

Завантаження файлів точних ефемерид здійснюється зі спеціалізованих серверів (наприклад, NASA CDDIS чи EUREF) або автоматично засобами програмного забезпечення для пост-обробки.

Під час виконання ГНСС-спостережень супутникові приймачі записують первинну вимірювальну інформацію (псевдовіддалі, фази несучих хвиль, параметри орбіт) у власні закриті бінарні формати розробників. Для забезпечення апаратної незалежності та можливості спільної обробки даних, отриманих обладнанням різних виробників, було розроблено уніфікований текстовий стандарт – *RINEX (Receiver Independent Exchange Format)*.

Формат RINEX є міжнародним стандартом, що дозволяє експортувати «сирі» вимірювання з будь-якого геодезичного приймача та імпортувати їх у довільне програмне забезпечення для суворої камеральної обробки та зрівнювання геодезичних мереж.

#### *Структура та типи файлів RINEX*

Стандартний комплект даних RINEX за замовчуванням складається з трьох основних типів текстових файлів, які ідентифікуються розширенням або суфіксом:

- *Файл спостережень (Observation Data File)*. Містить часові мітки (епохи) та виміряні значення кодових і фазових псевдовіддалей, доплерівського зсуву частоти та рівня сигналу для кожного відстежуваного супутника;
- *Навігаційний файл (Navigation Message File)*. Містить ефемериди супутників (орбітальні параметри), поправки системного годинника та дані про стан супутникового угруповання;
- *Метеорологічний файл (Meteorology Data File)*. Містить записи атмосферного тиску, температури та відносної вологості, якщо під час знімання до приймача були підключені відповідні сенсори.

Формат RINEX на сьогодні має дві версії:

- *RINEX версій 2.xx*. Історичний стандарт, розроблений переважно під одно- та двочастотні системи GPS та ГЛОНАСС. Має суворі обмеження щодо імені файлів (формат 8.3) та кількості кодованих сигналів;
- *RINEX версій 3.xx та 4.xx*. Сучасний багатосистемний (Full-Constellation) стандарт. Він підтримує одночасний запис усіх діючих ГНСС (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS), роботу з будь-якою кількістю частот ( $L1, L2, L5, E5, E6, B1, B2, B3$ ), а також нові типи навігаційних повідомлень та поправок PPP.

Таким чином, пост-обробка супутникових вимірювань надає геодезисту максимальний контроль над якістю результату. Її використовують у випадках, коли вимоги до точності та надійності переважають потребу в оперативності. Відсутність вимог до каналів зв'язку в полі, можливість використання точних ефемерид IGS, алгоритмічний контроль сирих даних та проведення суворого вирівнювання мереж векторів роблять пост-обробку незамінною. Вона є основним інструментом при створенні знімальних і спеціальних геодезичних мереж, вишукуваннях під унікальні об'єкти та геодинамічних дослідженнях.

У підсумку, вибір між RTK та пост-обробкою – це завжди компроміс між швидкістю отримання результату безпосередньо в полі та граничною точністю й контрольованістю

обчислень. Розуміння переваг та обмежень кожного з цих підходів дозволяє фахівцю грамотно проектувати склад ГНСС-робіт під конкретне інженерне завдання.

### **Сфери застосування високоточних навігаційних даних**

Сучасні супутникові навігаційні системи (ГНСС) давно вийшли за межі чистої геодезії чи військового призначення. Сьогодні високоточні координатно-часові дані є фундаментальною основою функціонування світової економіки, наукових досліджень та безпекової інфраструктури.

#### *1. Геодезія, картографія, інженерія та будівництво*

У геодезії та картографії високоточні фазові вимірювання є базовим інструментом для побудови, розвитку та вирівнювання державних і спеціальних геодезичних мереж. На їх основі виконуються комплексні кадастрові роботи, що гарантують юридичну точність встановлення меж земельних ділянок, а також здійснюється оперативна актуалізація цифрових топографічних карт, планів та просторових баз даних.

У галузі будівництва супутникові технології забезпечують автоматизоване управління будівельною технікою при дорожньо-будівельних роботах, дозволяючи автогрейдерам та асфальтоукладачам витримувати проєктні ухили з високою точністю. Високоточне координування є критичним при трасуванні та прокладанні підземних і наземних комунікацій, магістральних трубопроводів, а також під час будівництва, рихтування та поточного ремонту залізничних колій.

#### *2. Транспортні системи: наземний, водний та повітряний транспорт*

На наземному транспорті високоточні дані лежать в основі інтелектуальних транспортних систем (ITS), які регулюють міські та міжміські потоки. Вони забезпечують безперервний контроль та диспетчеризацію при перевезенні особливо небезпечних або великогабаритних вантажів, а також дозволяють здійснювати оперативний автоматизований моніторинг стану геометрії залізничної колії за допомогою спеціалізованих колієвимірювальних вагонів.

У водному транспорті супутникова навігація забезпечує точне маневрування та підхід великотоннажних суден у стиснених акваторіях морських портів, а також гарантує безпечну лоцманську проводку на звужених ділянках внутрішніх водних шляхів.

В авіації висока точність та цілісність ГНСС-сигналу дають змогу виконувати безпечний захід на посадку та безпосередньо посадку повітряних суден за найвищими категоріями Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) навіть за умов складних метеорологічних чинників. Окремим напрямом є високоточна навігація, автоматичне пілотування та орієнтування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для проведення аерознімальних і патрульних робіт.

#### *3. Точне сільське господарство*

У сільському господарстві фазові RTK-вимірювання стали основою концепції точного землеробства (*Precision Farming*). Використання автопілотів на базі ГНСС-приймачів забезпечує паралельне водіння тракторів і комбайнів із сантиметровою точністю. Це усуває пропуски та перекриття під час оранки, посіву, внесення добрив і засобів захисту рослин, дозволяє працювати в умовах туману чи вночі, суттєво знижує витрати палива та оптимізує графіки обслуговування сільськогосподарської техніки.

#### *4. Моніторинг довкілля, геодинаміка та надрокористування*

У сфері вивчення довкілля та фундаментальних геонаук мережі постійно діючих ГНСС-станцій фіксують глобальні та регіональні деформації Землі, включаючи тектонічні зсуви плит і передсейсмічні деформації земної кори. Також супутникові дані є головним джерелом для відстеження змін параметрів обертання Землі (ERP).

Вимірювання затримки супутникових сигналів у шарах атмосфери дозволяє виконувати моніторинг складу і стану тропосфери та іоносфери (ГНСС-метеорологія та космічна погода). Окрім цього, технології застосовуються для обліку й моніторингу стану водних та лісових ресурсів, а у видобувній галузі – для високоточного розроблення родовищ і контролю стійкості бортів кар'єрів та відвалів.

#### 5. Часова синхронізація, зв'язок та критична інфраструктура

Окрім координування, супутникові системи є найточнішим доступним джерелом еталонного часу. У галузі зв'язку та синхронізації часові імпульси високої точності забезпечують узгоджену роботу ліній електропередач та фазовимірювальних пристроїв в об'єднаних енергосистемах.

Навігаційний час є критично важливим для фазової синхронізації обладнання цифрових систем зв'язку та телекомунікацій (зокрема базових станцій 5G/LTE), забезпечення часової сумісності рознесених у просторі споживачів (транзакції у банківському секторі), а також для формування, підтримки та поширення шкали Всесвітнього скоординованого часу (UTC).

#### 6. Космічна галузь, пошуково-рятувальні роботи та персональна навігація

У космічній галузі супутникові дані забезпечують траєкторний контроль і відстеження засобів виведення ракет-носіїв на етапі запуску, а також високоточне визначення орбіт самих космічних апаратів (*Precision Orbit Determination, POD*) у реальному часі та пост-обробці.

Під час пошуково-рятувальних операцій ГНСС-модулі є серцем міжнародних систем аварійного сповіщення (таких як Cospas-Sarsat). Вони дозволяють миттєво визначати координати аварійних радіобуїв морських, авіаційних чи сухопутних суб'єктів, які зазнають лиха, що кардинально скорочує час реагування рятувальних служб.

У сфері персональної навігації високоточні дані надають користувачам смартфонів та портативних пристроїв просторово-орієнтований доступ до інформаційних ресурсів (*Location-Based Services*), інтерактивних карт, міських сервісів та інтелектуальної пішохідної чи автомобільної навігації.

### Спуфінг та джемінг: особливості ГНСС-знімання в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ)

У сучасних умовах проведення інженерно-геодезичних робіт в Україні критичним чинником, що визначає можливість та якість використання ГНСС-технологій, є активний вплив засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Навігаційне поле Землі формується супутниковими сигналами, які доходять до поверхні з вкрай низькою потужністю (близько  $-160$  dBW). Це робить ГНСС-приймачі винятково вразливими до штучних завад двох основних типів - джемінгу та спуфінгу.

#### 1. Джемінг (*Jamming*) - штучне подавлення навігаційного сигналу

Джемінг полягає у випромінюванні глушителями потужного радіошуму на робочих частотах ГНСС. Мета джемінгу - «заглушити» корисний фазовий та кодовий сигнал від супутників.

Глушитель створює рівень завад, що у сотні тисяч разів перевищує потужність супутникового сигналу. В результаті співвідношення «несуча/шум» ( $\frac{C}{N_0}$ ) у приймачі стрімко падає нижче порогового значення.

Приймач втрачає стеження за супутниками, припиняє обчислювати кодові псевдовіддалі та фази несучої. Статус RTK-рішення миттєво скидається з Fixed у Float або Single, після чого кількість супутників у розрахунку падає до нуля. Для геодезиста джемінг є «чесною» завадою, оскільки контролер чітко сигналізує про неможливість виконання вимірювань.

## 2. Спудфінг (Spoofing) - імітаційна підміна навігаційного поля

Спудфінг є небезпечнішим та підступнішим типом РЕБ. Замість подавлення сигналу завадою, спеціалізований передавач (спуфер) генерує імітаційні ГНСС-сигнали, які повністю копіюють структуру сигналів справжніх супутників, але містять викривлені часові затримки або хибні бортові ефемериди.

Спуфер поступово захоплює контур автопідлаштування частоти та фази у приймачі (подаючи сигнал із дещо більшою потужністю, ніж справжній супутник) і починає «посувати» розраховані псевдовіддалі.

Приймач обчислює хибне просторове положення. При цьому зсув координат може становити від кількох десятків метрів до сотень кілометрів і більше. Окрім просторових координат, спудфінг часто спотворює системний час приймача.

Це найголовніша пастка для геодезиста — контролер може продовжувати відображати статус Fixed із нібито мм-точністю (бо алгоритми вирішення фазової невизначеності математично зводяться для імітованого сигналу), проте фактичні координати точки будуть хибними.

Для запобігання грубим помилкам у координатній основі необхідно вміти діагностувати наявність РЕБ за сукупністю таких опосередкованих ознак у контролері:

1. *Аномальне значення  $\frac{C}{N_0}$ .* При спудфінгу всі супутники (навіть ті, що знаходяться низько над горизонтом) раптово демонструють однаково високий та ідеально рівний рівень сигналу (наприклад, 50–55 dB-Hz), що не властиво реальній атмосфері.
2. *Стрибки часу та системних дат.* Різкі зсуви годинника контролера або скидання дати на кілька років назад/вперед.
3. *Невідповідність сузір'їв.* Наприклад, супутники системи GPS показують координати зсуву, тоді як Galileo чи BeiDou втрачають зв'язок (якщо спуфер підробляє лише частоту L1/GPS).
4. *Непропорційна невизначеність.* Статус Fixed досягається за 1–2 секунди в умовах щільної міської забудови або під деревами, де фізично неможливий прямий прийом.

В умовах інтенсивного застосування РЕБ традиційне автономне RTK-знімання втрачає гарантовану надійність. Для забезпечення необхідної точності геодезист повинен дотримуватися таких правил:

*Обов'язковий контроль на відомих пунктах.* Перед початком та після завершення робіт необхідно виконати контрольне вимірювання на пункті ДГМ чи вихідному репері з відомими координатами. Якщо розходження перевищує допуск, роботу в режимі RTK на цій локації виконувати заборонено.

*Мультичастотність та мультисистематичність.* Використання сучасних приймачів, що працюють з усіма наявними сузір'ями (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) та діапазонами (L1, L2, L5, E1, E5, B1, B2). Прості одностотні приймачі піддаються спуфінгу майже миттєво.

*Перехід на пост-обробку (Static / PPK).* Аналіз сирих даних у спеціалізованому ПЗ дає змогу виявити штучні стрибки фази, виключити підмінені супутники чи інтервали спостережень, оцінити стабільність  $\frac{c}{N_0}$  та відфільтрувати зашумлені супутникові треки.

*Комбінування з класичними методами.* В умовах жорсткого джемінгу або спуфінгу єдиним надійним рішенням залишається комплексне використання ГНСС для закладання лише кількох базових точок (з обов'язковим геометричним контролем між ними) та виконання основної знімальної чи розпланувальної роботи за допомогою електронних тахеометрів, цифрових нівелірів або оптичних систем.

### **Глобальні навігаційні супутникові системи низької орбіти (LEO-PNT): архітектура, фізика та перспективи**

Сучасна світова навігаційна інфраструктура понад три десятиліття базується на глобальних супутникових системах середньої орбіти, таких як GPS, Galileo, BeiDou та GLONASS, що функціонують на висотах близько 19 000–23 200 км. Традиційна МЕО-архітектура забезпечує суцільне глобальне покриття, однак володіє фундаментальною вразливістю, зумовленою високим загасанням радіохвиль на значних відстанях. Сигнал класичних GNSS досягає поверхні Землі з потужністю близько -160 dBW (порядок  $10^{-16}$  Вт), що є нижчим за рівень природного фоновому радіошуму в міських забудовах. Така мала енергетика сигналу робить класичну супутникову навігацію надзвичайно вразливою до засобів радіоелектронної боротьби, які здатні легко придушувати або підробляти навігаційне поле на площах у сотні квадратних кілометрів. Саме ця системна вразливість стала головним рушієм створення альтернативного класу навігації — низькоорбітальних систем позиціонування, навігації та синхронізації часу (LEO-PNT). Фундаментальна відмінність LEO-PNT полягає у геометрії розташування космічних апаратів. Низькоорбітальні супутники розміщуються на висотах від 300 до 1200 км, що у 15–60 разів ближче до поверхні Землі порівняно з МЕО-супутниками. Згідно із законом обернених квадратів, таке скорочення відстані забезпечує зростання потужності сигналу на приймачі у 200–400 разів (на 23–26 дБ). Окрім енергетичної переваги, ключовим фактором стає висока орбітальна швидкість: супутники на низьких орбітах рухаються зі швидкістю близько 7,5 км/с проти 3,9 км/с у класичних GNSS. Це викликає виражений ефект Доплера та швидку зміну кутового положення супутників на небосхилі. Концептуально LEO-PNT повертає фахівців до математичних засад першої супутникової системи TRANSIT 1960-х років, проте на сучасному рівні цифрової обробки фазово-кодових вимірювань і високоточного ефемеридного забезпечення.

Експериментальні дослідження за концепцією використання сторонніх сигналів (Signals of Opportunity) на базі існуючих телекомунікаційних сузір'їв Starlink, OneWeb або Iridium підтвердили можливість отримання автономної точності на рівні кількох метрів у статистиці та кількох десятків метрів у динаміці. Водночас спеціалізовані супутникові угруповання LEO-PNT розкривають значно більший потенціал. Завдяки стрімкій зміні геометрії супутників (швидкій трансформації геометричного фактора PDOP) та високій швидкості зміни Допплерівського зсуву, час розв'язання фазової невизначеності скорочується з десятків хвилин до кількох секунд. Це дозволяє досягати сантиметрової точності в режимі PPP практично миттєво, без тривалого очікування конвергенції чи залучення щільних мереж наземних RTK-станцій.

Висока стійкість до завад робить LEO-PNT стратегічним елементом національної безпеки та критичної інфраструктури. Для ефективного придушення сигналу LEO потрібні наземні глушники на порядки більшої потужності. Швидкий рух супутників та широкосмугова структура сигналів з високим темпом псевдовипадкових послідовностей ускладнюють генерацію фальшивих навігаційних полів для спуфінгу. Крім того, просторова надлишковість, забезпечена сузір'ями з сотень космічних апаратів, гарантує високу живучість навігаційного поля навіть за умов щільного радіоелектронного придушення.

На практиці технологія вже виходить за межі теоретичних розробок. Система Iridium STL (Satellite Time and Location) активно використовується для високоточної синхронізації часу з похибкою до десятків наносекунд та некоординованого позиціонування у закритих приміщеннях і міських каньйонах. Комерційний сектор стрімко розвиває спеціалізовані сузір'я: компанія Xona Space Systems створює сузір'я Pulsar із 300 малогабаритних супутників для забезпечення сантиметрової точності та захищеного сигналу, а стартап TrustPoint розробляє альтернативні LEO-платформи з підвищеним криптографічним захистом. Паралельно державні космічні агентства США, Європейського Союзу та Японії інтегрують LEO-сегменти у власні стратегії розвитку PNT-інфраструктури.

Попри значні переваги, розгортання LEO-PNT супроводжується специфічними науково-технічними викликами. Через жорсткі обмеження щодо маси, габаритів та енергоспоживання малогабаритні LEO-супутники складно оснастити великогабаритними атомними годинниками високого класу точності. Це вимагає впровадження малогабаритних атомних годинників на мікросхемах (CSAC), а також розробки алгоритмів міжсупутникової синхронізації та компенсації сильного доплерівського зсуву частоти. Крім того, перебування LEO-супутників безпосередньо у товщі іоносфери (на висотах 300–600 км) створює складну просторово-часову динаміку інтегральної електронної концентрації, що потребує принципово нових моделей рефракції.

У найближчий десятирічний період LEO-PNT функціонуватиме не як заміна, а як високоефективний додатковий шар для класичних GNSS. Масовий комерційний запуск очікується в період 2028-2030 років, що створить багаторівневу навігаційну архітектуру. Для аграрного сектору та автономного транспорту це забезпечить безперебійне автоматичне керування під кронами дерев, у складній рельєфній місцевості та в зонах застосування засобів РЕБ без обов'язкового прив'язування до локальної базової RTK-інфраструктури.



### Контрольні запитання:

1. Які основні функції виконують радіочастотний блок (RF Front-End) та блок мікропроцесорів у вимірювальному ядрі ГНСС-приймача?
2. Чим конструктивно та функціонально відрізняються сучасні геодезичні Smart-антени від застарілих чотирикомпонентних модульних систем?
3. За якими характеристиками ГНСС-приймачі поділяють на навігаційні, ГІС-класу та геодезичні?
4. Чому для сучасного геодезичного приладу є критичною підтримка багаточастотності та мультисистемності?
5. Порівняйте використання UHF-радіомодемів та GSM/LTE-модемів для передачі RTK-поправок: назвіть їхні переваги, недоліки та сфери застосування.
6. Опишіть трикомпонентну архітектуру протоколу NTRIP та поясніть роль точки доступу.
7. У чому полягає математична та фізична суть технології віртуальної референцної станції (VRS)? Яку роль у цьому процесі відіграє NMEA-повідомлення від ровера?
8. Які основні обмеження та джерела помилок притаманні технології VRS?
9. Дайте визначення цілочисельній фазовій неоднозначності та поясніть різницю між статусами рішення Float (плаваюче) і Fixed (фіксоване).
10. Що таке процес ініціалізації в режимі OTF (On-The-Fly) і що відбувається на апаратно-програмному рівні при явищі «зриву фази»?
11. Чому спроба координування кутів будівель без компенсації нахилу може призвести до хибного фіксованого рішення?
12. Які фізичні чинники викликають деградацію точності вимірювань при активованому IMU-модулі?
13. У чому полягає принципова відмінність між режимами PPK та RTK у частині вимог до польового обладнання та каналів зв'язку?

14. Охарактеризуйте три типи точних ефемерид IGS за часом доступності, періодичністю оновлення та точністю орбіт.
15. Яке призначення уніфікованого формату RINEX і які три основні типи файлів входять до стандартного комплексу вимірювальних даних?
16. У чому полягають фундаментальні відмінності та переваги формату RINEX версій 3.xx/4.xx порівняно з застарілою версією 2.xx?
17. Поясніть фізичну природу джемінгу: як випромінювання завад впливає на співвідношення «несуча/шум» та статус RTK-рішення?
18. У чому полягає підступність спуфінгу для геодезиста?
19. За якими непрямыми діагностичними ознаками в польовому контролері можна оперативно виявити факт впливу спуфінгу на ГНСС-приймач?
20. Яких методичних правил та альтернативних геодезичних підходів слід дотримуватися для забезпечення точності вимірювань в умовах активного застосування РЕБ?

### САМОСТІЙНА РОБОТА ДО ЗМІСТОВНОЇ ЧАСТИНИ 2 (24 год.)

**Завдання:** підготувати практичне портфоліо з 3 модулів:

Тема 1. Структура і стан мережі коригуючих станцій для реалізації RTK-режиму вимірювань на території України.

**Завдання:**

Дослідити покриття основних операторів мереж RTK в Україні для району відповідно до свого варіанту. Скласти порівняльну таблицю для всіх наявних операторів. Зробити висновок: яку мережу та тип підписки найдоцільніше обрати для виконання кадастрових робіт у цьому регіоні.

**Результат:**

2–3 сторінки звіту з картою-схемою розміщення баз та аналітичною таблицею.

2. Портали розробників апаратури сегменту користувача для планування ГНСС-спостережень.

**Завдання:**

Практично скористатися одним із безкоштовних онлайн-планувальників. Ввести координати точки в адміністративному центрі свого району, дату – через три дні після видачі завдання та часовий інтервал 10:00-13:00. Встановити маску кута піднесення  $15^\circ$  та варіювати доступні супутникові системи (лише GPS vs GPS+Galileo vs GPS+BeiDou vs GPS+Galileo+BeiDou). Побудувати графіки: кількості видимих супутників, супутникових

треків та динаміки показника PDOP. Визначити «несприятливі вікна» для знімання та обґрунтувати оптимальний час для статичних вимірювань.

**Результат:**

Звіт на 2 сторінки зі скріншотами розрахованих графіків та короткою інтерпретацією PDOP.

3. Сфери застосування високоточних навігаційних даних.

**Завдання:**

Обрати галузь відповідно до свого варіанту. Знайти приклад реального впровадження ГНСС-технології у вибраній галузі (конкретна система, модель приймача/датчика, досягнута точність). Описати, яку саме економічну чи технічну проблему вирішує використання фазових/диференційних вимірювань у цьому кейсі. Практичний кейс не обов'язково повинен бути у районі відповідно до варіанту.

**Результат:**

Коротке есе (до 2 сторінок).

Таблиця варіантів для виконання самостійної роботи.

| №  | Район                    | Область                   | Напрямок / Прикладна галузь (Тема 3)                                                                       |
|----|--------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Вінницький район         | Вінницька область         | Точне землеробство: автопілотування та паралельне водіння сільгосптехніки                                  |
| 2  | Жмеринський район        | Вінницька область         | Будівництво: автоматизація дорожньо-будівельної техніки (3D-системи на автогрейдерів та асфальтоукладачах) |
| 3  | Ковельський район        | Волинська область         | Залізничний транспорт: геодезичний моніторинг геометрії колії та колісвимірювальні вагони                  |
| 4  | Луцький район            | Волинська область         | Кадастр: ведення Державного земельного кадастру та встановлення меж земельних ділянок                      |
| 5  | Дніпровський район       | Дніпропетровська область  | Інженерний моніторинг: відстеження деформацій мостових переходів та шляхопроводів                          |
| 6  | Криворізький район       | Дніпропетровська область  | Гірнична справа: високоточна розробка родовищ та контроль стійкості бортів кар'єрів                        |
| 7  | Житомирський район       | Житомирська область       | Аерознімання: використання БПЛА з RTK/PPK для створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР)                     |
| 8  | Коростенський район      | Житомирська область       | Лісове господарство: інвентаризація лісових масивів та вимірювання площ вирубок                            |
| 9  | Ужгородський район       | Закарпатська область      | Геодинаміка: моніторинг тектонічних зсувів земної кори та зсувонебезпечних схилів                          |
| 10 | Мукачівський район       | Закарпатська область      | Інфраструктура: трасування та координування підземних і наземних інженерних комунікацій                    |
| 11 | Івано-Франківський район | Івано-Франківська область | Цивільне будівництво: геодезичний супровід монтажу висотних будівель і споруд                              |
| 12 | Коломийський район       | Івано-Франківська область | ГНСС-метеорологія: визначення тропосферної затримки для прогнозування небезпечних погодних явищ            |
| 13 | Білоцерківський район    | Київська область          | Точне землеробство: технології диференційованого внесення добрив та ЗЗР                                    |
| 14 | Бориспільський район     | Київська область          | Авіація: навігаційне забезпечення заходу на посадку та посадки повітряних суден (ICAO)                     |
| 15 | Обухівський район        | Київська область          | Гідротехніка: геометричний моніторинг деформацій гребель та дамб ГЕС                                       |
| 16 | Кропивницький район      | Кіровоградська область    | Мобільне сканування: використання систем MMS (ГНСС/IMU/LiDAR) для паспортизації автодоріг                  |
| 17 | Олександрійський район   | Кіровоградська область    | Будівництво: автоматизований контроль земляних робіт при влаштуванні котлованів і насипів                  |

|    |                             |                       |                                                                                                          |
|----|-----------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18 | Львівський район            | Львівська область     | Муніципальний транспорт: інтелектуальні транспортні системи (ITS) та диспетчеризація міського транспорту |
| 19 | Дрогобицький район          | Львівська область     | Гідрографія: навігаційно-геодезичне забезпечення днопоглиблювальних робіт у портах і каналах             |
| 20 | Стрийський район            | Львівська область     | Трубопровідний транспорт: вишукування та трасування магістральних нафто- і газопроводів                  |
| 21 | Миколаївський район         | Миколаївська область  | Морська навігація: безпечна лоцманська проводка та маневрування суден у стиснених акваторіях             |
| 22 | Одеський район              | Одеська область       | Логістика: високоточне координування та позиціонування портових контейнерних кранів (RTG/RMG)            |
| 23 | Ізмаїльський район          | Одеська область       | Гідрографічне знімання: вимірювання рельєфу дна водойм із застосуванням ехолотів та ГНСС                 |
| 24 | Полтавський район           | Полтавська область    | Точне землеробство: картування врожайності та аналіз ущільнення ґрунтів                                  |
| 25 | Кременчуцький район         | Полтавська область    | Надрокористування: моніторинг осідань денної поверхні в зонах видобутку вуглеводнів                      |
| 26 | Рівненський район           | Рівненська область    | Телекомунікації: часова синхронізація базових станцій мобільного зв'язку 5G/LTE                          |
| 27 | Дубенський район            | Рівненська область    | Енергетика: фазова синхронізація пристроїв PMU в об'єднаних енергетичних системах                        |
| 28 | Сумський район              | Сумська область       | Фундаментальні науки: визначення параметрів обертання Землі (ERP) за даними ГНСС                         |
| 29 | Тернопільський район        | Тернопільська область | Точне землеробство: системний контроль перекриттів (Section Control) на сівалках та обприскувачах        |
| 30 | Чортківський район          | Тернопільська область | Картографія: оперативна актуалізація цифрових топографічних планів масштабів 1:500–1:2000                |
| 31 | Хмельницький район          | Хмельницька область   | Промислова безпека: моніторинг стійкості конструкцій та інфраструктури АЕС                               |
| 32 | Кам'янець-Подільський район | Хмельницька область   | Архітектура: геодезичний супровід реставрації та збереження пам'яток культурної спадщини                 |
| 33 | Черкаський район            | Черкаська область     | Моніторинг довкілля: автономне патрулювання та аерознімання екосистем за допомогою БПЛА                  |
| 34 | Чернівецький район          | Чернівецька область   | Рятувальні служби: застосування ГНСС у міжнародній системі аварійного сповіщення Cospas-Sarsat           |

|    |                     |                      |                                                                              |
|----|---------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 35 | Чернігівський район | Чернігівська область | Космічна галузь: високоточне визначення орбіт штучних супутників Землі (POD) |
|----|---------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|

#### 4. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

##### Нормативно-правові акти:

1. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 : Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 17 квітня 2025 р. № 1675.

##### Навчальні та наукові видання:

2. Гофман-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / пер. з англ. - К. : Наукова думка, 1996. - 380 с.
3. Навігаційне забезпечення військ / Міхно О.Г., Багмет А.П., Кравчук О.В., Пастушенко М.С. та ін. // Довідник. - К.: ЦУ ВТН ГУОЗ КСП ЗСУ, 2006. - 382 с.
4. Геоінформаційні технології та інфраструктура геопросторових даних: у шести томах. Том 3: Просторові кадастрові інформаційні системи для інфраструктури просторових даних. Навчальний посібник. / М. Говоров А.А. Лященко Д. Кейк П. Зандберген М.А. Молочко Л. Бевайніс Л.М. Даценко В.В. Путренко - Планета-Прінт 2017. - 532 с.
5. Білоус В.В., Боднар С.П. Радіоелектронна геодезія. Навчальний посібник - К.: Вид-во ВПЦ "Київський університет", 2020 р. - 106 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1dlmv4ldFKIMTmfIM-9sQqIJRv61loSJH/view>
6. Черняга П. Г., Балик І. М., Янчук Р. М. Супутникова геодезія : навчальний посібник. - Рівне : НУВГП, 2013. - 222 с.
7. Шумаков Ф. Т. Супутникова геодезія : навч. посібник. - Х. : ХНАМГ, 2009. - 88 с.
8. Chang K.-t. Introduction to Geographic Information Systems. - 7th ed. - New York : McGraw-Hill, 2013. — 448 p.
9. Військова топографія: підручник / Міхно О.Г., Шмаль С.Г.// Видавничо-поліграфічний центр „Київський університет”, 2008. - 384 с.
10. Боднар С.П., Білоус В.В., Молочко М.А. Лабораторний практикум з курсу «Електронні геодезичні прилади».- К.: КНУ імені Тараса Шевченка, 2023 р.- 92 с.
11. Fischer M. M. GIS and network analysis // Spatial Analysis and GeoComputation: Selected Essays. - Berlin : Springer, 2006. - P. 43–60.
12. Lekkerkerk H.-J. GNSS Survey & Engineering : Handbook for Surveyors and Survey Engineers. - Lemmer : Geomares Education, 2017. - 232 p.
13. Ogundare J. Precision Surveying: The Principles and Applications. - Hoboken : Wiley, 2015. - 624 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119147770>.
14. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / ed. by P. J. Teunissen, O. Montenbruck. - Cham : Springer, 2017. - 1328 p.
15. Van Sickle J. GPS for Land Surveyors. - 5th ed. - Boca Raton : CRC Press, 2024. — 360 p.

##### Офіційні технічні документи, міжнародні стандарти та специфікації

16. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) / European Union / European Space Agency. - Issue 2.1. - Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. - 112 p.
17. IERS Conventions (2010) / ed. by G. Petit, B. Luzum. - Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. - 179 p. (IERS Technical Note ; № 36).
18. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (IS-GPS-200N) / Global Positioning Systems Directorate. - El Segundo : US Air Force, 2022. - 252 p.

19. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05 / IGS RINEX Working Group, Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104. - 2020. - 116 p.

**Інформаційні та електронні ресурси:**

20. CDDIS (NASA's Archive of Space Geodesy Data) / NASA Goddard Space Flight Center. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/centers/cddis-daac> (дата звернення: 14.08.2026).
21. EUREF Permanent Network (EPN) / Royal Observatory of Belgium. URL: <https://epncb.oma.be> (дата звернення: 14.08.2026).
22. IGS (International GNSS Service) Official Website / IGS Central Bureau. URL: <https://igs.org> (дата звернення: 14.08.2026).
23. Official U.S. Government Information on GPS (GPS.gov) / National Coordination Office for Space-Based PNT. URL: <https://www.gps.gov> (дата звернення: 14.08.2026).
24. QGIS Documentation / QGIS Development Team. URL: <https://docs.qgis.org> (дата звернення: 14.08.2026).
25. Trimble GNSS Planning Online / Trimble Inc. URL: <https://www.gnssplanning.com> (дата звернення: 14.08.2026).
26. Геопортал мережі System.NET / ТОВ «Систем Солюшнс». URL: <https://systemnet.com.ua> (дата звернення: 14.08.2026).
27. Мережа IVI-net / ТОВ «ІВІ-НЕТ». URL: <https://ivi-net.com/> (дата звернення: 14.08.2026).
28. Мережа ZAKPOS / UA-POS / ДП «Закарпатське геодезичне підприємство». URL: <https://zakpos.zakgeo.com.ua/> (дата звернення: 14.08.2026).

## 5. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ТРАНСФОРМУВАННЯ КООРДИНАТ

1. Перетворення геодезичних координат в сферичні.
2. Перетворення прямокутних просторових систем координат за допомогою формул Гельмерта.
3. Перетворення висот.

В деякий момент часу UTC з пункту земної поверхні  $P$ , геодезичні координати якого  $\{B, L, H\}$  задані відносно референц - еліпсоїду Красовського з параметрами  $a$  і  $e$ , визначені істинні екваторіальні топоцентричні координати ШСЗ  $\alpha_T^C, \delta_T^C$  і топоцентрична віддаль  $r_T^C$  до ШСЗ. Вважається, що при визначенні істинних екваторіальних топоцентричних координат ШСЗ враховані редуційні поправки (прецесія, нутація), за перехід від системи координат стандартної епохи (епохи каталогу J2000.0) до істинної системи координат на епоху спостереження (момент спостереження UTC – всесвітній координований час).

Передбачається, що синхронним методом вирішена задача з визначення орієнтування (кутів Ейлера  $\psi, \upsilon, \omega$ ) референсної (геодезичної) системи відносно геоцентричної, а орбітальним методом визначені координати  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  центру референц-еліпсоїда Красовського відносно центру мас Землі.

Необхідно обчислити геоцентричні екваторіальні координати ШСЗ  $\alpha_T^C, \delta_T^C$  та геоцентричну віддаль  $r_T^C$  до ШСЗ.

#### *Завдання для самостійної роботи.*

Загальноземні системи координат: WGS-84, система геодезичних параметрів землі ПЗ-90, ITRS і ETRS. Параметри переходу між загальноземними системами координат.

#### **Вихідні дані**

Координати пункту спостереження  $P$ :

геодезична широта  $B = 45,427657^\circ$ ;

геодезична довгота  $L = 30,176232^\circ$ ;

геодезична висота  $H = 231,5$  м.

Параметри референц-еліпсоїда Красовського:

велика піввісь  $a = 6378245$  м;

ексцентриситет  $e = 0,08181333$ .

Координати центра референц-еліпсоїда Красовського відносно центра мас Землі:

$\Delta X = -90$  м;

$\Delta Y = -129$  м;

$\Delta Z = -142$  м.

Кути Ейлера:

прецесії  $\psi = -1,2''$ ;

нутації  $\upsilon = -2,2''$ ;

чистого обертання  $\omega = +1,5''$ .

Координати миттєвого полюса:

$$X_{II} = + 0,152'';$$

$$Y_{II} = - 0,371''.$$

Істинні екваторіальні топоцентричні координати ШСЗ і топоцентрична віддаль на епоху спостереження:

$$\text{віддаль} \quad r_T^C = 1212000 \text{ м} + N \text{ м};$$

$$\text{пряме сходження} \quad \alpha_T^C = 229,746207^\circ;$$

$$\text{схилення} \quad \delta_T^C = 41,016432^\circ;$$

$$\text{момент спостереження} \quad UTC = 20^h 39^m 58,732^s.$$

Поправка за перехід від  $UTC$  до  $UT1$ :

$$DUT1 = + 0,3^s;$$

$$dUT1 = - 0,4^s.$$

Гринвіцький зоряний час опівночі на дату спостереження:

$$S_0 = 16^h 37^m 00,307^s + N^m.$$

**Примітка** (шифр студента  $N$  – тризначне число, формується як 222 + порядковий номер за списком).

#### Алгоритм вирішення задачі.

**1. Обчислюємо геодезичні прямокутні координати  $(X_G^P, Y_G^P, Z_G^P)$  пункту  $P$  в системі референц-еліпсоїда Красовського.**

Початок цієї системи лежить в центрі прийнятого референц-еліпсоїда (Рис. 1.1), вісь  $Z_G$  збігається з віссю обертання еліпсоїда, вісь  $X_G$  спрямована в точку перетину геодезичного меридіана Гринвіча з площиною екватора еліпсоїда, вісь  $Y_G$  лежить у площині екватора і позитивна на схід.

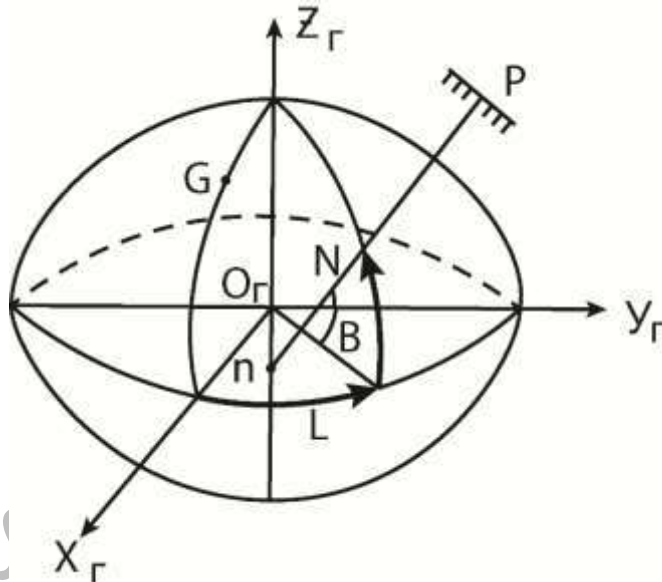


Рис. 1.1. Зв'язок систем координат.

Прямокутні геодезичні координати пункту  $P$  обчислюються за формулою

$$\begin{aligned} X_G^P &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L, \\ Y_G^P &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L, \\ Z_G^P &= (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin B, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $N$  – довжина внутрішньої нормалі до поверхні еліпсоїда, що обчислюється за формулою:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}} \quad (1.2)$$

$a$  – велика піввісь референс – еліпсоїда Красовського.

## 2. Обчислюємо прямокутні координати пункту $P$ в гринвіцькій системі координат.

Початок гринвіцької системи координат  $O_G$  збігається з центром мас Землі (Рис. 1.2).

Вісь  $Z_G$  спрямована в середній північний полюс Землі епохи 1900-1905 рр. (міжнародний умовний початок МУП), вісь  $X_G$  спрямована в точку перетину геоцентричного меридіана Гринвіча з площиною екватора епохи 1900-1905 рр. Вісь  $Y_G$  лежить в площині екватора і доповнює систему до правої.

Із Рис. 1.2 видно, що початок геодезичної і гринвіцької систем не збігаються, а їх осі розвернуті на невеликі кути (кути Ейлера  $\psi$ ,  $\upsilon$ ,  $\omega$ ).

Таким чином, щоб перейти від прямокутних геодезичних координат  $X_G^P$ ,  $Y_G^P$ ,  $Z_G^P$  пункту  $P$  (Рис. 1.2) з початком  $O_G$  в центрі референс-еліпсоїда до прямокутних гринвіцьких координат з початком  $O_G$  в центрі мас Землі, необхідно здійснити перенесення і розворот осей геодезичної системи координат відносно гринвіцької системи.

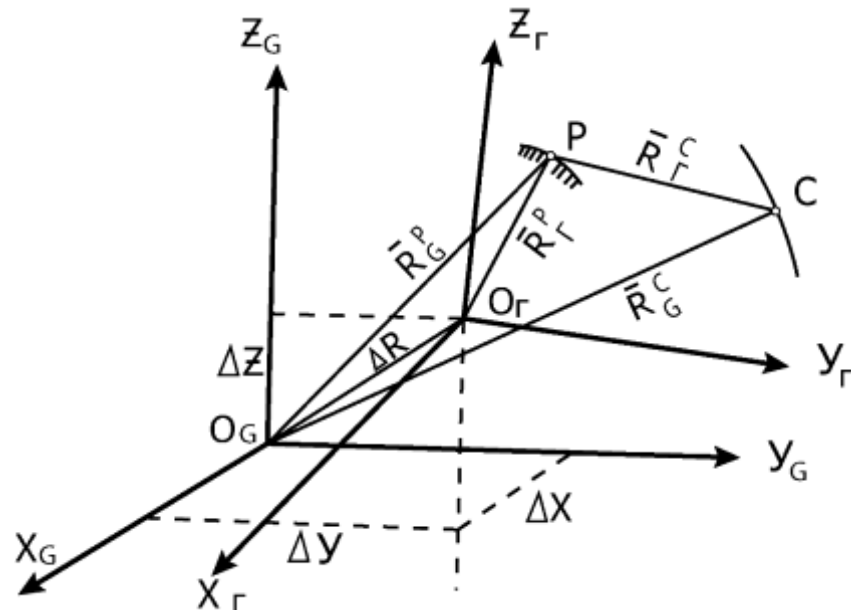


Рис. 1.2. Зв'язок геодезичних і прямокутних систем координат.

Враховуючи, що кути Ейлера  $\psi$ ,  $\upsilon$ ,  $\omega$  малі, біля декількох секунд, перехід від прямокутних геодезичних координат пункту  $P$  до гринвіцьких координат здійснюється на підставі такого виразу, записаного у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} X_G^P \\ Y_G^P \\ Z_G^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \psi & -\omega \\ -\psi & 1 & \vartheta \\ \omega & -\vartheta & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Gr}^P \\ Y_{Gr}^P \\ Z_{Gr}^P \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

або координатній формі:

$$\begin{aligned} X_G^P &= \Delta X + X_\Gamma^P + \psi \cdot Y_\Gamma^P - \omega \cdot Z_\Gamma^P, \\ Y_G^P &= \Delta Y + Y_\Gamma^P - \psi \cdot X_\Gamma^P + \vartheta \cdot Z_\Gamma^P, \\ Z_G^P &= \Delta Z + Z_\Gamma^P + \omega \cdot X_\Gamma^P - \vartheta \cdot Y_\Gamma^P. \end{aligned} \quad (1.4)$$

*Примітка.* Кут Ейлера необхідно виразити в радіанах.

### 3. Обчислення гринвіцьких координат пункту $P$ в інерціальній системі координат.

Здійснюємо перехід від гринвіцьких координат  $(X_G^P, Y_G^P, Z_G^P)$  до інерціальних координат  $(X^P, Y^P, Z^P)$  пункту.

Для цього, на першому етапі, обчислюємо гринвіцькі координати пункту відносно миттєвого полюсу за формулами, що записані в координатній формі:

$$\begin{aligned} X_{MG}^P &= X_G^P - X_\Pi \cdot Z_G^P, \\ Y_{MG}^P &= Y_G^P + Y_\Pi \cdot Z_G^P, \\ Z_{MG}^P &= Z_G^P + X_\Pi \cdot X_G^P - Y_\Pi \cdot Y_G^P. \end{aligned} \quad (1.5)$$

*Примітка.*  $X_\Pi$  та  $Y_\Pi$  необхідно виразити в радіанах, тобто поділити на  $\rho = 206265$ . Це координати полюса, визначені відповідно до конвенції IERS (де  $y_p$  спрямовано на  $90^\circ$  Заходу).

На другому етапі, враховуючи істинний гринвіцький зоряний час  $S$ , здійснюємо перехід до інерціальних геоцентричних прямокутних координат пункту за формулами:

$$\begin{aligned} X^P &= X_{MG}^P \cdot \cos S - Y_{MG}^P \cdot \sin S, \\ Y^P &= X_{MG}^P \cdot \sin S + Y_{MG}^P \cdot \cos S, \\ Z^P &= Z_{MG}^P \end{aligned} \quad (1.6)$$

де  $S$  – істинний сонячний час, що відповідає моменту спостереження  $UT1$ :

$$S = S_0 + UT1 + 9,856^{S/h} (UT1)^h, \quad (1.7)$$

де  $UT1 = UTC + DUT1 + dUT1$ .

### 4. Знаходимо істинні прямокутні топоцентричні координати ШСЗ на момент спостереження $UT1$ .

Початок топоцентричної системи координат збігається з пунктом спостереження  $P$ , а відповідні осі  $X_T, Y_T, Z_T$  паралельні осям екваторіальної геоцентричної (інерціальної) системи координат.

Нагадаємо, що початок екваторіальної системи координат збігається з центром мас Землі, вісь  $X$  спрямована в точку істинного весняного рівнодення  $\Upsilon$  на епоху спостереження, вісь  $Z$  спрямована по миттєвій осі обертання, вісь  $Y$  доповнює систему до правої.

*Примітка.* В астрономічній літературі зустрічається декілька назв інерціальної системи координат: екваторіальна, зіркова, небесна, рівноденна.

Істинні топоцентричні прямокутні координати ШСЗ обчислимо за формулами:

$$\begin{aligned} X_T^C &= r_T^C \cdot \cos \alpha_T^C \cdot \cos \delta_T^C, \\ Y_T^C &= r_T^C \cdot \sin \alpha_T^C \cdot \cos \delta_T^C, \\ Z_T^C &= r_T^C \cdot \sin \delta_T^C. \end{aligned} \quad (1.8)$$

### 5. Знаходимо геоцентричні інерціальні координати ШСЗ:

$$\begin{aligned} X^C &= X^P + X_T^C, \\ Y^C &= Y^P + Y_T^C, \\ Z^C &= Z^P + Z_T^C. \end{aligned} \quad (1.9)$$

З іншого боку, ці координати можна отримати за формулами:

$$\begin{aligned} X^C &= r_\Gamma^C \cdot \cos \alpha_\Gamma^C \cdot \cos \delta_\Gamma^C, \\ Y^C &= r_\Gamma^C \cdot \sin \alpha_\Gamma^C \cdot \cos \delta_\Gamma^C, \\ Z^C &= r_\Gamma^C \cdot \sin \delta_\Gamma^C. \end{aligned} \quad (1.10)$$

де  $\alpha_\Gamma^C, \delta_\Gamma^C$  - екваторіальні геоцентричні координати ШСЗ, а  $r_\Gamma^C$  - геоцентрична віддаль.

Формули для обчислення екваторіальних координат і віддалі виходять з відповідних перетворень формул (1.10):

$$\begin{aligned} \alpha_\Gamma^C &= \arctg \frac{Y^C}{X^C}, \\ \delta_\Gamma^C &= \arctg \frac{Z^C}{\sqrt{(X^C)^2 + (Y^C)^2}}, \\ r_\Gamma^C &= \sqrt{(X^C)^2 + (Y^C)^2 + (Z^C)^2} \end{aligned} \quad (1.11)$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ОБЧИСЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЗБУРЕНОЇ ОРБИТИ ШТУЧНОГО СУПУТНИКА ЗЕМЛІ

### Загальні вказівки

1. При виконанні цього завдання студент повинен вивчити незбурений рух ШСЗ, для цього йому необхідно розглянути матеріали за темою «Структура СРНС».

2. Обчислення елементів незбуреної орбіти ШСЗ в цьому завданні проводять за допомогою способу Гауса. В цьому випадку необхідно мати, як мінімум, два геоцентричних положення ШСЗ. Одне геоцентричне положення студент отримує в результаті вирішення завдання №1, а друге задається його порядковим номером.

3. Треба мати на увазі, що в формулі для обчислення фокального параметру  $P$ :

$$P = \eta^2 \cdot \frac{[r_1 \cdot r_2 \cdot \sin(U_2 - U_1)]^2}{\mu \cdot (t_2 - t_1)^2},$$

$\eta$  приймається рівним 1, що переводить завдання до розряду наближених.

### Постановка завдання

Вважається, що для двох моментів UT1, з обробки фотографічних спостережень ШСЗ отримані топоцентричні напрямки  $\alpha_T^C$ ,  $\delta_T^C$  на супутник, а за допомогою лазерного віддалеміра виміряні відстані  $r_T^C$  до ШСЗ.

Після обчислення геоцентричних координат ШСЗ (отриманих із завдання 1) приступаємо до визначення попередньої орбіти.

Така орбіта і положення ШСЗ, що рухається по ній, визначається шістьма елементами. Два з них – велика піввісь орбіти  $a$  та ексцентриситет орбіти  $e$  визначають розміри і форму орбіти, три елементи визначають орієнтацію площини орбіти відносно осей інерціальної системи координат, шостий елемент разом з моментом часу визначає положення ШСЗ на орбіті.

На Рис. 2.1 зображена площина еліптичної орбіти ШСЗ.

Точка  $P$  є перицентром орбіти і максимально наближена до центру мас Землі, точка  $A$  є апоцентром орбіти і максимально віддалена від центру мас Землі. Лінія, що з'єднує апоцентр і перицентр орбіти, називається лінією *апсид*.

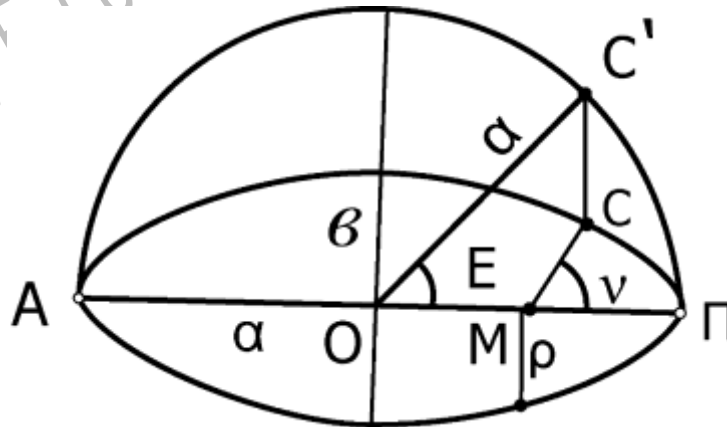


Рис. 2.1. Площина еліптичної орбіти ШСЗ.

Рівняння еліпсу в полярних координатах (рівняння орбіти) має вигляд:

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos V} = \frac{P}{1 + e \cdot \cos V}, \quad (2.1)$$

де  $r$  – радіус-вектор ШСЗ;  $V$  – дійсна аномалія – кут між напрямком на перицентр орбіти і напрямком на ШСЗ;  $P$  – фокальний параметр;  $a$  – велика піввісь орбіти;  $e$  – ексцентриситет орбіти.

Якщо навколо орбітального еліпсу (Рис. 2.1) описати коло радіусом, що дорівнює великій півосі  $a$  і побудувати в точці  $C$  перпендикуляр до лінії апсид і продовжити його до перетину з колом, отримаємо точку  $C'$ . З'єднаємо  $C'$  з геометричним центром  $O$  орбітального еліпсу. Кут між напрямком на точку  $P$  і напрямком на точку  $C'$  з геометричного центру  $O$  називається *ексцентричною аномалією*  $E$ , причому

$$r = a (1 - e \cos E). \quad (2.2)$$

Шостим елементом, частіше всього, є час  $\tau$  проходження ШСЗ через перицентр.

Орієнтація площини орбіти в інерціальному просторі визначається за допомогою двох кутів  $i$  та  $\Omega$  (Рис. 2.2).

Нахил  $i$  – кут між площиною екватору і площиною орбіти ШСЗ.

Довгота висхідного кута  $\Omega$  – кут між позитивним напрямком осі  $X$  та напрямком на точку  $\Omega$ .

Аргумент перицентру  $\omega$  – кут між напрямком на точку висхідного вузла  $\Omega$  і на перицентр  $P$  – задає орієнтацію орбіти в площині орбіти.

Аргумент широти  $U$  – кут між напрямком на  $\Omega$  і на ШСЗ.

Таким чином, нам необхідно визначити шість елементів попередньої орбіти  $a, e, \Omega, \omega, i, \tau$ .

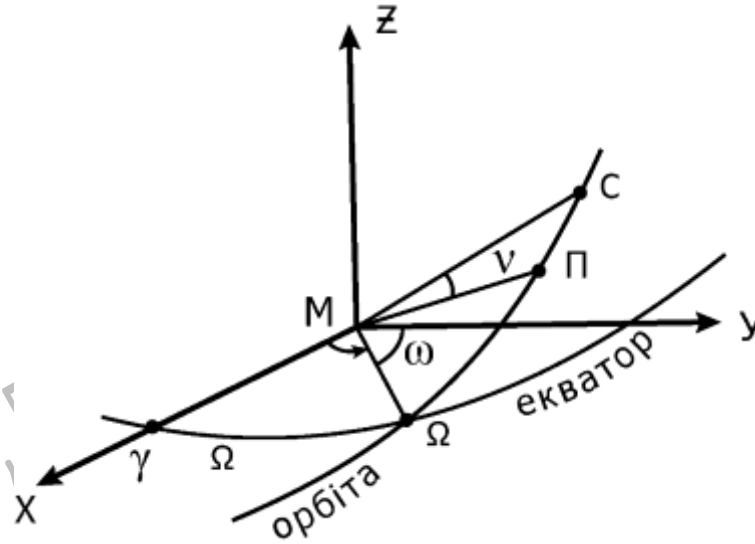


Рис. 2.2. Орієнтація площини орбіти в інерціальному просторі

### Вихідні дані

Геоцентрична гравітаційна стала

$$\mu = 398600,5 \text{ км}^3/\text{с}^2.$$

Геоцентричні координати ШСЗ  $r_1, \alpha_1, \delta_1$  та  $UT1_1$  беруться з завдання 1, а на другий момент обчислюються за формулами:

$$r_2 = r_1 + 200 \text{ км} + n \text{ км};$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 30^\circ + 1' n;$$

$$\delta_2 = \delta_1 + 10^\circ + 1' n;$$

$$UT1_2 = UT1_1 + 6^m 30^s + 0,4^s n,$$

де  $n$  – номер студента за списком плюс 45.

### Алгоритм обчислень

Формули для обчислень попередньої орбіти можна отримати з вирішення прямокутних сферичних трикутників (Рис. 2.3), використовуючи формули сферичної тригонометрії.

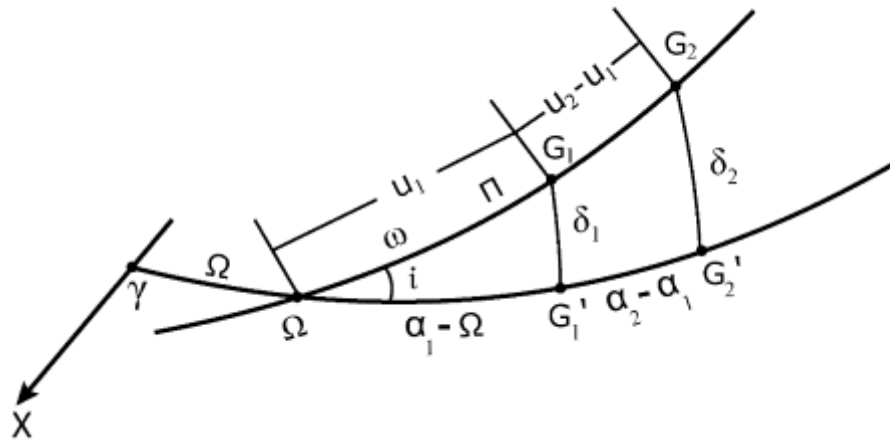


Рис. 2.3. Обчислення попередньої орбіти.

$\Upsilon$  – точка весняного рівнодення;

$C_1, C_2$  – два положення супутника на орбіті в моменти часу  $UT1_1$  та  $UT1_2$ ;

$C_1'$  і  $C_2'$  – проекції положень ШСЗ на екватор;

дуга  $\Upsilon C_1'$  – пряме сходження ШСЗ  $\alpha_1$  в момент часу  $UT1_1$ ;

дуга  $\Upsilon C_2'$  – пряме сходження ШСЗ  $\alpha_2$  в момент часу  $UT1_2$ ;

$\delta_1$  – схилення ШСЗ в перший момент часу;

$\delta_2$  – схилення ШСЗ в другий момент часу.

1. Із вирішення прямокутних сферичних трикутників  $\Upsilon C_1 C_1'$  та  $\Upsilon C_2 C_2'$  отримаємо формули для обчислення довготи висхідного вузла  $\Omega$ , схилення  $i$  та аргументу широти  $U$ :

$$\Omega = \alpha_1 - \arctg \left[ \frac{\tg \delta_1 \cdot \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\tg \delta_2 - \tg \delta_1 \cdot \cos(\alpha_2 - \alpha_1)} \right], \quad (2.3)$$

$$i = \arctg [\tg \delta_j \operatorname{cosec} (\alpha_j - \Omega)], \quad (2.4)$$

де  $j = 1, 2$ . Друге значення  $i$  обчислюється для контролю.

$$U_j = \arccos [\cos \delta_j \cos (\alpha_j - \Omega)], \quad (2.5)$$

де  $j = 1, 2$ .

2. За спрощеною формулою Гауса знаходимо фокальний параметр  $P$ :

$$P = \frac{[r_1 \cdot r_2 \cdot \sin(U_2 - U_1)]^2}{\mu \cdot (UT1_2 - UT1_1)^2}. \quad (2.6)$$

Примітка.  $r_1$  та  $r_2$  необхідно виразити в км, а  $UT1_1$  і  $UT1_2$  в секундах часу.

3. Обчислення  $a, e, \omega$  і середнього руху  $n$ .

З рівняння орбіти (2.1) отримаємо формулу для обчислення дійсної аномалії

$$\tg V_1 = \frac{\frac{P - r_1}{r_1} \cdot \cos(U_2 - U_1) - \frac{P - r_2}{r_2}}{\frac{P - r_1}{r_1} \cdot \sin(U_2 - U_1)}. \quad (2.7)$$

Далі

$$V_2 = V_1 + (U_2 - U_1). \quad (2.8)$$

*Примітка.* Для обчислення дійсної аномалії необхідно вірно визначити чверть кута  $V_1$ .

Після чого обчислюємо ексцентриситет, аргумент перицентру, велику піввісь орбіти і середній рух за формулами:

$$e = \frac{P - r_j}{r_j \cdot \cos V_j}, \quad (2.9)$$

$$\omega = U_j - V_j \quad (2.10)$$

де  $j = 1, 2$ . Для  $j = 2$  обчислення проводяться для контролю.

$$a = \frac{P}{1 - e^2}, \quad (2.11)$$

$$n = \frac{\sqrt{\mu}}{a^{3/2}}, \quad (2.12)$$

4. Обчислення моменту проходження через перицентр  $\tau$ .

Вихідні дані підібрані таким чином, що в завданні має місце еліптичний рух ( $e < 1$ ).

а) Обчислюємо ексцентричну аномалію  $E$  за формулою:

$$\operatorname{tg} \frac{E_j}{2} = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \cdot \operatorname{tg} \frac{V_j}{2}. \quad (2.13)$$

б) З рівняння Кеплера знаходимо момент  $\tau$  проходження ШСЗ через перицентр

$$\tau_j^{h,m,s} = UT1_j^{h,m,s} - \frac{1}{n_{\text{рад./с}}} \cdot (E_j^{\text{рад.}} - e \cdot \sin E_j), \quad (2.14)$$

де  $j = 1, 2$ , а  $n$  – середній рух.

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ, МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОТОЧНИХ ГНСС-ВИМІРЮВАНЬ ТА АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНОЇ НАДЛИШКОВОСТІ

**Мета:** Закріпити знання про джерела похибок ГНСС, навчитися оцінювати вплив геометрії супутників на точність позиціонування, прогнозувати точність ГНСС-рішень при використанні сучасних методів компенсації похибок та оцінити вплив кількості супутників на фінальний результат.

#### Завдання 1: Аналіз бюджету похибок та DOP.

Якість геометрії розташування супутників визначається параметром Зниження точності (DOP — Dilution of Precision). Це безрозмірний коефіцієнт, який показує, у скільки разів похибка вимірювання відстані до супутника збільшується при обчисленні координат.

Основна формула для розрахунку:

Похибка визначення положення =  $3T$  (DOP)  $\times$  Похибка вимірювання дальності.

Класифікація значень PDOP за якістю спостережень:

1: Теоретично ідеальні умови.

1–4: Дуже гарні умови.

5–8: Прийнятні умови.

>9: Погані умови.

Сумарна похибка бюджету ГНСС-спостережень ( $\sigma_{\text{URE}}$ ) обчислюється як корінь квадратний із суми квадратів окремих незалежних похибок:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{eph}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{iono}^2 + \sigma_{tropo}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{mp}^2}, \quad (3.1)$$

де:

$\sigma_{eph}$  — похибка ефемерид (орбітальна похибка);  $\sigma_{clk}$  — похибка годинника супутника;  
 $\sigma_{iono}$  — затримка в іоносфері;  $\sigma_{tropo}$  — затримка в тропосфері;  $\sigma_{noise}$  — шум приймача та програмного забезпечення;  $\sigma_{mp}$  — похибка багатопроменевості (multipath).

**Таблиця вихідних даних.**

| Варіант | $\sigma_{eph}$ , М | $\sigma_{clk}$ , М | $\sigma_{iono}$ , М | $\sigma_{tropo}$ , М | $\sigma_{noise}$ , М | $\sigma_{mp}$ , М | PDOP | HDOP |
|---------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------|------|
| 1       | 2,1                | 1,5                | 5                   | 0,5                  | 0,3                  | 0,6               | 1,8  | 1,1  |
| 2       | 2,5                | 1,2                | 4,2                 | 0,7                  | 0,4                  | 1,2               | 2,5  | 1,5  |
| 3       | 1,8                | 1,8                | 6                   | 0,4                  | 0,5                  | 0,8               | 3,2  | 2    |
| 4       | 2                  | 2                  | 3,5                 | 0,6                  | 0,3                  | 2,5               | 4,5  | 2,8  |
| 5       | 2,3                | 1,4                | 5,5                 | 0,8                  | 0,6                  | 1,5               | 1,5  | 0,9  |
| 6       | 2,4                | 1,6                | 7                   | 0,5                  | 0,2                  | 0,5               | 5    | 3,1  |
| 7       | 1,9                | 1,3                | 4,8                 | 0,9                  | 0,4                  | 3                 | 2,1  | 1,3  |
| 8       | 2,2                | 1,7                | 5,2                 | 0,4                  | 0,3                  | 1                 | 3,8  | 2,4  |
| 9       | 2,6                | 1,9                | 6,5                 | 0,6                  | 0,5                  | 0,7               | 1,2  | 0,8  |
| 10      | 2                  | 1,5                | 3,8                 | 0,7                  | 0,6                  | 1,8               | 6,2  | 4    |
| 11      | 2,1                | 1,2                | 4,5                 | 0,5                  | 0,2                  | 2,2               | 2,8  | 1,7  |
| 12      | 2,5                | 2,1                | 5,8                 | 0,8                  | 0,4                  | 0,9               | 4,1  | 2,5  |
| 13      | 1,7                | 1,4                | 6,2                 | 0,6                  | 0,3                  | 1,4               | 1,9  | 1,2  |
| 14      | 2,2                | 1,6                | 4                   | 0,5                  | 0,5                  | 2,8               | 3,5  | 2,2  |
| 15      | 2,4                | 1,8                | 5,4                 | 0,7                  | 0,4                  | 0,6               | 5,5  | 3,5  |
| 16      | 1,9                | 1,5                | 4,6                 | 0,6                  | 0,4                  | 1,1               | 2,4  | 1,5  |
| 17      | 2,3                | 1,3                | 5                   | 0,5                  | 0,3                  | 0,9               | 3,6  | 2,2  |
| 18      | 2                  | 1,7                | 6,8                 | 0,8                  | 0,5                  | 2                 | 1,6  | 1    |
| 19      | 2,6                | 1,4                | 3,6                 | 0,4                  | 0,2                  | 1,6               | 4,8  | 3    |
| 20      | 1,8                | 2                  | 5,1                 | 0,7                  | 0,6                  | 0,7               | 2,2  | 1,4  |
| 21      | 2,1                | 1,1                | 4,2                 | 0,5                  | 0,3                  | 2,4               | 3    | 1,9  |
| 22      | 2,4                | 1,5                | 6                   | 0,9                  | 0,4                  | 1,3               | 5,2  | 3,2  |
| 23      | 1,6                | 1,8                | 5,6                 | 0,6                  | 0,5                  | 0,5               | 1,4  | 0,9  |
| 24      | 2,2                | 1,2                | 3,9                 | 0,8                  | 0,2                  | 1,7               | 2,6  | 1,6  |
| 25      | 2,5                | 1,6                | 7,2                 | 0,4                  | 0,3                  | 2,1               | 4    | 2,5  |
| 26      | 1,9                | 1,9                | 4,4                 | 0,7                  | 0,6                  | 1                 | 3,3  | 2,1  |
| 27      | 2,3                | 1,4                | 5,9                 | 0,5                  | 0,4                  | 0,8               | 2    | 1,2  |
| 28      | 2                  | 1,6                | 6,4                 | 0,6                  | 0,3                  | 2,6               | 5,8  | 3,6  |
| 29      | 2,7                | 1,3                | 4,1                 | 0,8                  | 0,5                  | 1,2               | 1,7  | 1,1  |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 30 | 1,7 | 2,1 | 5,3 | 0,4 | 0,2 | 1,9 | 3,9 | 2,4 |
| 31 | 2,1 | 1,7 | 3,7 | 0,7 | 0,4 | 0,6 | 2,9 | 1,8 |
| 32 | 2,4 | 1,2 | 6,6 | 0,5 | 0,3 | 2,3 | 4,4 | 2,7 |
| 33 | 1,8 | 1,5 | 4,9 | 0,9 | 0,6 | 1,5 | 1,3 | 0,8 |
| 34 | 2,2 | 1,8 | 5,7 | 0,6 | 0,2 | 0,8 | 3,7 | 2,3 |
| 35 | 2,5 | 1,4 | 6,1 | 0,8 | 0,5 | 2,7 | 4,9 | 3,1 |

Використовуючи таблицю похибок, розрахуйте:

Сумарну похибку дальності (UERE — User Equivalent Range Error  $\sigma_0$ ):

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{eph}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{iono}^2 + \sigma_{tropo}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{mp}^2},$$

Похибки координат.

$$\text{Планова: } \sigma_H = \text{HDOP} \cdot \sigma_0 \quad (3.2.)$$

$$\text{Висотна: } \sigma_V = \sqrt{\text{PDOP}^2 - \text{HDOP}^2} \cdot \sigma_0. \quad (3.3)$$

Студент має надати:

Значення  $\sigma_0$ ,  $\sigma_H$ ,  $\sigma_V$ .

Висновок про умови спостереження (хороші/прийнятні/погані) згідно з показником PDOP.

### Методи мінімізації похибок

Для кожного джерела похибок існують методи їх значного зниження:

- похибки годинника та ефемерид ( $\sigma_{clk}$ ,  $\sigma_{eph}$ ): використання систем диференціальної корекції (SBAS) або уточнених орбіт у реальному часі дозволяє знизити ці похибки на 60%;
- іоносферна затримка ( $\sigma_{iono}$ ): використання двочастотних приймачів (L1/L2) дозволяє напряму виміряти та усунути до 90% впливу іоносфери;
- тропосферна затримка ( $\sigma_{tropo}$ ): застосування стандартних математичних моделей атмосфери (Saastamoinen model) знижує невизначеність на 50%;
- шум та багатопроменевість ( $\sigma_{noise}$ ,  $\sigma_{mp}$ ): використання антен із пригніченням відбитих сигналів та алгоритмів згладжування коду фазою несучої знижує вплив цих факторів на 50%.

**Примітка.** Зазначені величини не є універсальними. Насправді ефективність залежить від обладнання, довжини бази, частот, моделей атмосфери, типу корекцій і умов спостереження. В даному випадку вони є умовними коефіцієнтами для навчального моделювання.

### Завдання 2: Розрахунок модернізованого бюджету похибок.

*Завдання:* обчисліть нові значення кожної компоненти  $\sigma$  з урахуванням відсотків зниження, а потім визначте нову сумарну похибку дальності.

На основі  $\sigma_{0\_new}$  розрахуйте нові значення просторової  $\sigma_{3D}$ , планової  $\sigma_H$  та висотної  $\sigma_V$  похибок для вашого значення PDOP.

$$\sigma_{3D} = PDOP \cdot \sigma_0 \quad (3.4)$$

### Завдання 3: Оцінка впливу кількості супутників на точність позиціонування.

Просторова точність GNSS-позиціонування  $M_P$  визначається добутком еквівалентної похибки дальності ( $\sigma_0$ ) та геометричного фактора PDOP:

$$M_P = PDOP \cdot \sigma_0. \quad (3.5)$$

У геодезичній практиці значення PDOP безпосередньо залежить від кількості спостережуваних супутників  $n$  та їхнього просторового розподілу на небосхилі. Збільшення кількості супутників у сузір'ї покращує геометрію та знижує значення PDOP пропорційно  $\sqrt{n}$ .

Вважаючи, що наведені в таблиці значення PDOP відповідають базовому мінімальному сузір'ю з  $n = 4$  супутників, перерахунок підсумкової точності  $M_P$  для розширених сузір'їв здійснюється за математичною моделлю:

$$M_P(n) = \sigma_{3D\_new} \cdot \sqrt{\frac{4}{n}} \quad \text{або} \quad M_P(n) = PDOP \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{4}{n}} \quad (3.6)$$

де:

- $\sigma_{3D\_new}$  — модернізована просторова похибка, обчислена у Завданні 2;
- $n$  — кількість супутників у сузір'ї ( $n \geq 4$ ).

Побудуйте графік залежності точності від кількості супутників. Розрахуйте значення  $M_P$  для таких станів сузір'я:

- $n = 4$  (мінімально допустима кількість);
- $n = 5$  (початкове надлишкове сузір'я);
- $n = 9$  (середня видимість GPS);
- $n = 13$  (гарні умови);
- $n = 17$  (сучасний мультисистемний режим);
- $n = 21$  (ідеальний відкритий небосхил).

### Порядок оформлення звіту.

1. Порівняльна таблиця «сирих» похибок (з завдань 1 і 2) та модернізованих.
2. Таблиця розрахунку  $M_P$  для різної кількості супутників.
3. Графік залежності точності від  $n$ .

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ПРОЄКТУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ГНСС-МЕРЕЖ ЗГУЩЕННЯ ТА РОЗРОБКА ГРАФІКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГІС ТА САПР

**Мета:** Набуття практичних навичок із підготовки топографо-геодезичної основи в середовищах QGIS та САПР, вибору оптимальних місць закладання нових пунктів ГНСС-мережі з урахуванням фізико-географічних умов (кута закриття горизонту, рельєфу та забудови), а також розробки геометричних схем і часового бюджету супутникових спостережень для різної кількості ГНСС-приймачів.

### Програмне забезпечення та вихідні дані:

*ПЗ:* настільна ГІС QGIS, САПР AutoCAD (або аналог), веб-сервіси OpenStreetMap.

*Вихідні дані:* растровий шар цифрової моделі рельєфу (GeoTIFF), набір номенклатурних планшетів топографічного знімання масштабу 1:2000 на територію м. Києва.

### Етап 1. Підготовка геопросторової основи в QGIS

*1.1. Завантаження базових шарів.* Відкрийте QGIS та додайте підкладку OpenStreetMap (OSM) (через панель Browser → XYZ Tiles). Додайте наданий файл цифрової моделі рельєфу (DEM) у форматі GeoTIFF (просторово прив'язаний растр на територію м. Києва).

*1.2. Візуалізація та аналіз рельєфу.* Створіть дублікат растрового шару ЦМР. Верхній шар переведіть у режим відображення «Горизонталі» (Contour) з кроком перерізу рельєфу 5 м. Для нижнього шару налаштуйте стилізацію «Одноканальний псевдоколір» (Singleband pseudocolor) з використанням градієнта від синього до червоного та встановіть прозорість шару в межах 25–50%.

*1.3. Виділення індивідуальної робочої ділянки.* Створіть новий векторний шар типу Shapefile / GeoPackage з геометричним типом Полігон. В межах м. Києва оцифруйте межу робочої ділянки площею 100–200 га, що охоплює наявні міські квартали згідно з OSM (Рис. 4.1).

*Примітка.* Контур ділянки є унікальним для кожного студента та не повинен дублювати роботи одногрупників.



Рис. 4.1. Зразок результату Етапу 1.

## Етап 2. Попереднє (макро)проектування пунктів у середовищі QGIS

2.1. Створення точкового шару. У QGIS створіть новий векторний шар типу Shapefile / GeoPackage з геометричним типом Точка (назва шару: GNSS\_Points\_Draft).

2.2. Попередній вибір локацій (аналіз рельєфу та OSM). Нанесіть на свою ділянку 4 попередні точки (пари T1-T2 та T3-T4), аналізуючи шар горизонталей/ЦМР та підкладку OpenStreetMap. Проведіть аналіз рельєфу – уникайте глибоких виярів, улоговин та підніжжя стрімких схилів, де природний рельєф перекриватиме супутники з низькими кутами піднесення. Надавайте перевагу підвищеним або рівнинним ділянкам. Аналіз забудови краще проводити по шару OSM. Обирайте відкриті простори (широкі перехрестя вулиць, площі, сквери, роги кварталів) на достатній відстані від суцільної висотної забудови. Для зручного аналізу видимості по рельєфу можна використовувати модуль Profile Tool.

2.3. Попередній аналіз взаємної видимості. Проведіть візуальні лінії між передбачуваними парами точок ( $T1 \rightarrow T2$  та  $T3 \rightarrow T4$ ) вздовж осі вулиць або відкритих територій, щоб переконатися у відсутності великих перешкод між ними на рівні землі.

На основі виконаних етапів 1 і 2 студент отримує від викладача растрові планшети топографічного плану масштабу 1:2000 на дану територію для виконання наступних етапів.

## Етап 3. Компонування планшетів топооснови масштабу 1:2000

3.1. У середовищі САПР (AutoCAD) побудуйте координатну сітку з комірками  $1 \times 1$  км. Для координатної прив'язки використовуйте логіку координат назви: перші дві цифри назви

(наприклад, 48) — координата  $X$  (північ) верхнього лівого кута в км. Другі дві цифри назви (наприклад, 35) — координата  $Y$  (схід) верхнього лівого кута в км. Приклад для 4835.jpg: верхня ліва точка ( $X, Y$ ): 48000, 35000.

3.2. Вставте та сумістіть растрові планшети топографічного плану масштабу 1:2000 за кутами координатної сітки для формування єдиного зведеного планшета на обрану ділянку. Перенесіть або нанесіть зовнішню межу оцифрованого полігона і орієнтовного розміщення пунктів з QGIS на сформовану топооснову.

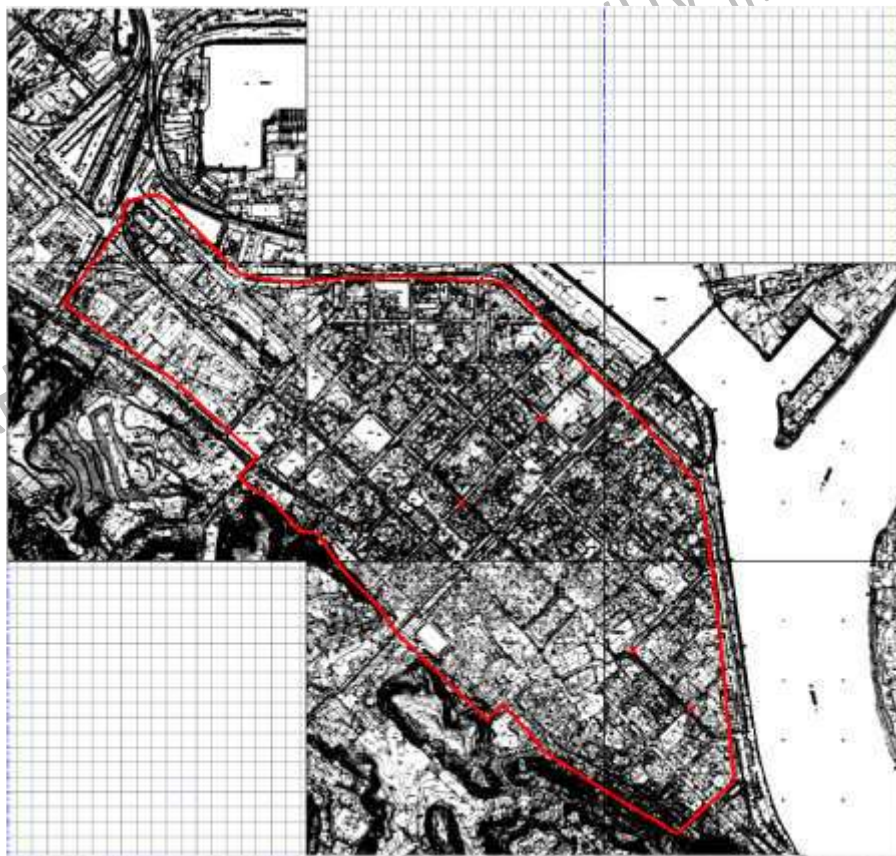


Рис. 4.2. Зразок результату виконання Етапу 3.

#### Етап 4. Проєктування пунктів ГНСС-мережі

4.1. Вибір вихідної геодезичної основи. Знайдіть та закріпіть на планшеті два наявних пункти полігонометрії, які слугуватимуть вихідною основою для прив'язки.

4.2. Проєктування нових пунктів ГНСС (Т1–Т4). Запроєктуйте 2 пари нових точок (загалом 4 нові пункти), рівномірно розмістивши їх на робочій ділянці.

Критерії вибору місць закладання:

- Пряма видимість між точками у кожній парі (наприклад, Т1–Т2 та Т3–Т4). Обов'язково має забезпечуватися оптична видимість як у плані, так і по висоті для подальшого прокладання лінійних вимірювань.

- Відкритість небосхилу – маска закриття горизонту не повинна перевищувати  $15^\circ$  (відсутність висотних забудов, щільних крон дерев, що перекривають супутникові сигнали).
- Безпека та доступність – категорично заборонено розміщувати пункти на проїжджій частині вулиць (обирайте тротуари, газони, роги кварталів).

4.3. *Складання паспорта-опису пунктів.* Наведіть текстове обґрунтування вибору кожної точки із зазначенням орієнтирів та аналізом можливих завад (багатопроменевість, кут маски).

### Етап 5. Визначення координат та зведення даних

5.1. Зчитайте з топографічного плану прямокутні геодезичні координати (X, Y) усіх 6 пунктів (2 вихідні + 4 запроєктовані) з точністю до 0,1 м (растри мають бути вже прив'язані).

5.2. Оформіть дані у вигляді зведеної таблиці:

| Назва пункту          | Координата X, м | Координата Y, м | Місце розташування                                                                      |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Запроєктована точка 1 | 54474,2         | 26790,0         | Тротуар вздовж вулиці Почайнинська. Відкрита місцевість                                 |
| Запроєктована точка 2 | 54193,3         | 26520,2         | Тротуар вздовж вулиці Межигірська. Відкрита ділянка для ГНСС-спостережень               |
| Запроєктована точка 3 | 53702,4         | 27097,0         | Тротуар поблизу перехрестя з вул. Іллінською. Забезпечується гарна видимість супутників |
| Запроєктована точка 4 | 53501,2         | 27290,9         | Тротуар вздовж вулиці Братська (біля буд. 6/13). Перешкоди відсутні                     |
| п.п. 30032 (Основа 1) | 53568,4         | 26985,1         | Ріг кварталу біля універмагу (вул. П. Сагайдачного).                                    |
| п.п. 7288 (Основа 2)  | 54516,2         | 27076,1         | Ріг кварталу, перехрестя вул. Набережно-Хрещатицької та Верхнього Валу                  |

Таблиця 4.1. Зразок оформлення зведеної таблиці пунктів.

### Етап 5. Проектування сеансів спостережень та розрахунок часу

Необхідно побудувати повний граф базових векторів ГНСС-мережі, що з'єднує всі 6 пунктів (кількість незалежних та повторних векторів має забезпечувати надійне замкнення фігур/полігонів).

*Вихідні параметри для розрахунку:*

- Тривалість одного сеансу спостереження вектора: 30 хвилин;
- Час на переміщення та центрування одного приймача: 15 хвилин.

*Варіант А (Робота 2-ма приймачами):*

- Обчисліть кількість сеансів для послідовного вимірювання всіх векторів мережі;
- Складіть графік робіт та обчисліть загальну тривалість польового етапу:

$$T_{\text{заг}} = (N_{\text{векторів}} \times 30 \text{ хв}) + ((N_{\text{векторів}} - 1) \times 15 \text{ хв}). \quad (4.1)$$

*Варіант Б (Робота 3-ма приймачами):*

- Розробіть схему одночасних сеансів (у кожному сеансі вимірюється 3 вектори між 3 станціями);
- Розрахуйте скорочення загального часу виконання робіт за рахунок застосування третього приймача.

#### **Вимоги до оформлення звіту**

До підсумкового звіту (у форматі PDF) додаються такі матеріали:

- *Скріншот з QGIS*. Картографічне вікно з видимим шаром OSM, півпрозорою кольоровою відмивкою ЦМР, горизонталями через 5 м та оцифрованим полігоном ділянки (без внутрішньої заливки).
- *Скріншот/схема з САПР*. Зведений планшет 1:2000 з межею ділянки, нанесеними вихідними та запроєктованими пунктами.
- *Великомасштабні вирізки*. Фрагменти топоплану з детальним показом розміщення точок Т1–Т4.
- *Текстовий опис*. Аналіз умов видимості та затінення горизонту для кожного пункту.
- *Зведена таблиця координат вихідних та запроєктованих пунктів*.
- *Схеми векторних мереж ГНСС*. Графічні схеми векторів для Варіанту А (2 приймачі) та Варіанту Б (3 приймачі).
- *Розрахунок часового бюджету* для обох варіантів з порівняльними висновками.

*Вимоги до оформлення – див. Методичні рекомендації щодо оформлення курсових робіт.*

## 6. ПИТАННЯ ДО ІСПИТУ

1. Предмет і завдання супутникової геодезії. Порівняльний аналіз геометричного та динамічного методів супутникових спостережень.
2. Класифікація систем координат у супутниковій геодезії: геоцентричні, референсні (квазігеоцентричні) та топоцентричні системи.
3. Математичні моделі перетворення координат: семипараметричне перетворення Гельмерта та зв'язок еліпсоїдальних і геоцентричних прямокутних координат.
4. Системи відліку часу в ГНСС. Всесвітній координований час (UTC), Міжнародний атомний час (TAI), системний час GPS/ГЛОНАСС та Юліанські дати (JD/MJD).
5. Історична еволюція супутникової навігації.
6. Сучасний стан та перспективи розвитку глобальних систем позиціонування (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).
7. Регіональні супутникові системи (QZSS, NavIC) та системи супутникового диференціального доповнення (SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN).
8. Концепція та переваги SBAS другого покоління (DFMC SBAS).
9. Закони Кеплера та елементи орбіти в теорії незбуреного руху штучних супутників Землі.
10. Класифікація та фізична природа збурюючих сил (гравітаційних і негравітаційних), що впливають на реальний рух ШСЗ.
11. Фундаментальне рівняння космічної геодезії та геометричний принцип трилатерації в ГНСС.
12. Архітектура ГНСС. Функціональне призначення та взаємодія сегментів.
13. Структура радіосигналів ГНСС. Несучі частоти (L1, L2, L5), кодове модулювання та склад навігаційного повідомлення.
14. Фізика та алгоритм кодового способу визначення псевдовіддалей (коди C/A, P/Y, L2C).
15. Фазовий спосіб вимірювання псевдовіддалей: математична модель, переваги точності та проблема розв'язання цілочисельної фазової неоднозначності (N).
16. Бюджет похибок ГНСС-спостережень.
17. Вплив земної атмосфери на швидкість поширення ГНСС-сигналу.
18. Ефект багатопроменевості (Multipath). Фізичний механізм виникнення, джерела перешкод та інструментальні методи зменшення.
19. Сумарна похибка бюджету спостережень ( $UERE / \sigma_0$ ): фізичний зміст та формула математичного розрахунку через незалежні джерела помилок.
20. Коефіцієнти зниження точності (DOP). Математичний зв'язок із коваріаційною матрицею  $Q = (A^T A)^{-1}$ . Фізичний зміст GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP.
21. Порівняльна характеристика автономного (абсолютного) та диференційного (DGNSS) режимів позиціонування.
22. Класифікація методів ГНСС-спостережень за характером руху ровера: Static, Rapid Static, Kinematic, Stop-and-Go, PPK та RTK.
23. Математична модель точності ГНСС-вимірювань: адитивна та мультиплікативна складові. Причини деградації висотної точності порівняно з плановою.
24. Принципи проектування ГНСС-мереж.
25. Принципова схема та внутрішня апаратна структура ГНСС-приймача.
26. Конструктивні типи виконання ГНСС-обладнання.
27. Канали зв'язку для передачі поправок у режимі реального часу. Архітектура протоколу NTRIP.

28. Мережі перманентних референціальних станцій (Network RTK). Еволюція від одиночних баз до розподілених мереж CORS.
29. Принцип роботи та математичне моделювання за технологією віртуальної референційної станції (VRS). Крайові ефекти екстраполяції.
30. Просторове планування ГНСС-спостережень. Вибір місць розташування пунктів.
31. Процес ініціалізації ГНСС-приймача. Математична різниця між рішеннями Single, Float та Fixed. Явище зриву фази (Cycle Slip).
32. Компенсація нахилу віхи на основі інерціальних модулів (IMU/MEMS). Геометрія поправки, переваги та недоліки.
33. Типи та характеристики орбітальних даних у пост-обробці.
34. Міжнародний стандарт обміну ГНСС-даними RINEX. Структура файлів, відмінності версій 2.xx від 3.xx/4.xx.
35. Особливості виконання ГНСС-вимірювань в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ): джемінг і спуфінг, діагностика та методи протидії.
36. Опишіть порядок розрахунку сумарної похибки бюджету ГНСС-спостережень ( $UERE / \sigma_0$ ) на основі окремих незалежних складових та подальшої оцінки просторової похибки  $\sigma_{3D}$  за відомим значенням PDOP. Наведіть відповідні формули.
37. Поясніть методику обчислення планової ( $\sigma_H$ ) та висотної ( $\sigma_V$ ) похибок позиціонування через коефіцієнти HDOP/VDOP і UERE. Фізично та геометрично обґрунтуйте, чому висотна похибка завжди перевищує планову.
38. Опишіть математичний зв'язок HDOP з елементами коваріаційної матриці вагових коефіцієнтів  $Q$ .
39. Викладіть покрокову послідовність математичних перетворень для переходу від геодезичних еліпсоїдальних координат  $(B, L, H)$  до просторових геоцентричних прямокутних координат  $(X, Y, Z)$ .
40. Поясніть алгоритм визначення номера 6-градусної зони  $n$  та довготи її осьового меридіана  $L_0$  за відомою довготою об'єкта  $L$ . Опишіть принцип формування умовної прямокутної координати  $Y$ .
41. Опишіть математичну модель та алгоритм виконання 7-параметричного перетворення Гельмерта для векторів у тривимірному просторі. Поясніть призначення кожного з 7 параметрів.
42. Наведіть формулу та поясніть методику обчислення просторового вектора базової лінії ( $D$ ) за відомими геоцентричними прямокутними координатами його кінцевих пунктів  $A(X_1, Y_1, Z_1)$  та  $B(X_2, Y_2, Z_2)$ .
43. Опишіть алгоритм трансформації геоцентричних приростів координат  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  у локальні топоцентричні прирости  $(\Delta n, \Delta e, \Delta u)$  за допомогою матриці повороту для заданої широти  $B$  та довготи  $L$ .
44. Поясніть порядок оцінки очікуваної середньої квадратичної похибки вимірювання базової лінії за паспортними коефіцієнтами приладу залежно від довжини бази  $D$ .
45. Розпишіть методику розрахунку часового бюджету та обґрунтування кількості сеансів при виконанні статичних вимірювань мережі з 6 пунктів за допомогою двох ГНСС-приймачів.
46. Поясніть алгоритм побудови схеми синхронних сеансів у мережі векторів при використанні трьох ГНСС-приймачів. Оцініть математичний виграш у часі порівняно з дводжерельною схемою.

47. Опишіть методику побудови графічного профілю маски закриття горизонту та математичного розрахунку кута затінення від висотної перешкоди для оцінки придатності пункту до ГНСС-вимірювань.
48. Поясніть порядок аналізу взаємної видимості між запроєктованими точками на топографічному плані (у плані та за висотою) з урахуванням горизонталей ЦМР рельєфу та характеру міської забудови.
49. Виведіть математичну залежність та поясніть порядок оцінки додаткової планової похибки координування пікета ровером з IMU залежно від кута нахилу віхи  $\alpha$  та її висоти  $h$ .
50. Поясніть використання емпіричних формул NGS США для розрахунку необхідної тривалості сеансу статичних спостережень  $T$  залежно від вимог до точності висотної компоненти  $m_z$ .
51. Опишіть структуру та порядок аналізу заголовка (Header) RINEX-файлу спостережень (версії 3.xx) для перевірки параметрів антени, зміщення фазового центру (PCC) та переліку відстежуваних сигналів.
52. Опишіть критерії вибору та порядок залучення точних ефемерид IGS (Ultra-Rapid, Rapid, Final) для вирішення високоточних інженерних задач (наприклад, моніторингу деформацій споруд).
53. Поясніть методику виявлення та алгоритм усунення аномалії "зриву фази" (Cycle Slip) у часових рядах фазових вимірювань під час камеральної пост-обробки.
54. Наведіть порядок дій геодезиста для діагностики та ідентифікації впливу спуфінгу за непрямыми індикаторами в контролері.
55. Обґрунтуйте вибір та схему організації каналу для передачі поправок RTK залежно від фізико-географічних умов об'єкта та наявності покриття мереж.
56. Поясніть покроковий порядок налаштування NTRIP-клієнта в польовому контролері для підключення до мережі CORS та отримання поправок VRS.
57. Опишіть причинно-наслідковий механізм тривалого утримання рішення в статусі Float поблизу перешкод та запропонуйте технологічні прийоми для досягнення фіксованого стану Fixed.
58. Викладіть покроковий алгоритм підготовки геопросторової основи у QGIS для проєктування ГНСС-спостережень.
59. Поясніть принцип обчислення загального коефіцієнта похибки вимірювання дальності (UERE) та його математичного масштабування у просторову похибку позиціонування  $\sigma_{3D}$  через коефіцієнт PDOP.
60. Опишіть математичну сутність та алгоритм технології PPP (Precise Point Positioning), перелік необхідних точних продуктів IGS та методику її застосування без використання базових станцій.
61. Викладіть принцип та математичну схему перерахунку календарної дати й часу (UTC) у внутрішні системні одиниці GPS (номер GPS-тижня та GPS-секунда).
62. Поясніть принцип та структуру проєктування дворангової ГНСС-мережі на об'єкті.
63. Поясніть фізико-математичні причини обмеження довжини базових ліній для одночастотних ( $L1$ ) приймачів та переваги використання двочастотних ( $\frac{L1}{L2}$ ) систем при роботі на довгих базах.
64. Проаналізуйте вплив помилки у введенні фізичної висоти віхи при використанні IMU-компенсатора на появу систематичних похибок у планових координатах  $X, Y$ .

65. Поясніть алгоритм оцінки якості та розрахунку векторних нев'язок ( $f_x, f_y, f_z$ ) у замкнених трикутних полігонах ГНСС-мережі та принцип їх порівняння з допустимими значеннями.
66. Опишіть методику перерахунку системного часу UTC у місцевий поясний час та поясніть роль і врахування секунд координації (Leap Seconds) при порівнянні часу GPST та UTC.
67. Викладіть технологічний порядок виконання аерофотознімальних робіт з БПЛА у режимі РРК з подальшою пост-обробкою даних та використанням точних ефемерид IGS (без базової станції в RTK).
68. Поясніть фізичний та математичний зміст "крайового ефекту" при виході ровера за межі геометричного контуру, утвореного референцними станціями VRS.
69. Визначте та обґрунтуйте мінімально необхідну кількість видимих супутників для розв'язання 3D-координат та поправок годинника приймача при одночасному прийомі сигналів від двох різних систем (GPS + GLONASS).
70. Складіть технологічну схему та порядок дій геодезиста при виконанні знімання в умовах радіоелектронного подавлення.

## 7. СЛОВНИК ОСНОВНИХ ТЕРМІНІВ

*C/A-код (Coarse/Acquisition)* — загальнодоступний псевдовипадковий цивільний код зі відносно низькою тактовою частотою (1,023 МГц) для послуги стандартного позиціонування (SPS).

*CORS (Continuous Operating Reference Stations)* — мережа стаціонарних перманентних референсних станцій, що працюють у режимі 24/7/365.

*DFMC SBAS (Dual-Frequency Multi-Constellation)* — друге покоління SBAS, що використовує дві частоти ( $L1 + L5$ ) та підтримку декількох ГНСС для прямого усунення іоносферної затримки.

*DOP (Dilution of Precision)* — безрозмірний коефіцієнт геометричного зниження точності, що виступає множником масштабування похибки UERE у похибку координат (GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP).

*IMU-компенсація (Inertial Measurement Unit)* — модуль на основі трьохосьових гіроскопів та акселерометрів (MEMS), що вимірює кути нахилу віхи для автоматичного коригування координат наконечника.

*Multi-GNSS* — концепція сумісного та одночасного використання супутникових сигналів кількох автономних орбітальних угруповань (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).

*NTRIP* — протокол передачі поточкових геодезичних даних RTCM/NMEA через Інтернет (архітектура: NTRIP Server → NTRIP Caster → NTRIP Client).

*P(Y)-код (Precision/Protected)* — високоточний захищений або зашифрований військовий код із тактовою частотою 10,23 МГц для послуги точного позиціонування (PPS).

*PPK (Post-Processing Kinematic)* — метод кінематичних вимірювань, що передбачає накопичення сирих даних у пам'яті приладів із подальшою камеральною математичною обробкою.

*RF Front-End (Радіочастотний блок)* — аналогово-цифровий вузол приймача, що здійснює фільтрацію, підсилення та зниження несучої частоти супутника до проміжної частоти (ПЧ).

*RINEX (Receiver Independent Exchange Format)* — уніфікований текстовий міжнародний стандарт обміну сирими ГНСС-даними (Observation, Navigation, Meteorology).

*RTK (Real-Time Kinematic)* — метод фазових ГНСС-вимірювань у режимі реального часу, що забезпечує сантиметрову точність за рахунок негайної передачі поправок через канал зв'язку.

*SBAS (Satellite-Based Augmentation System)* — широкозонна супутникова система диференціального доповнення (WAAS, EGNOS, GAGAN тощо), що транслює диференційні поправки та дані про цілісність через геостаціонарні супутники.

*Smart-антена (Моноблок)* — конструктивний тип геодезичного обладнання, де антенний елемент, супутниковий приймач та акумулятор батареї об'єднані в єдиному герметичному корпусі.

*UERE ( $\sigma_0$ , User Equivalent Range Error)* — результуюча середня квадратична похибка бюджету ГНСС-вимірювань, обчислена як корінь із суми квадратів окремих незалежних помилок.

*VRS (Virtual Reference Station)* — технологія мережевого RTK, що генерує математичний масив поправок для віртуальної базової станції, розташованої в кількох метрах від ровера.

*Автономне (абсолютне) позиціонування* — режим визначення координат поодиноким приймачем безпосередньо за сигналами супутників без використання диференціальних поправок.

*Альманах (Almanac)* — масив неоперативної навігаційної інформації про наближені параметри орбіт усіх супутників угруповання для швидкого пошуку сигналів та планування.

*Багатопроменевість (Multipath)* — явище виникнення хибних сигналів у результаті відбиття радіохвилі від навколишніх поверхонь (будівель, металоконструкцій, землі).

*Базова лінія (Просторовий вектор  $D$ )* — тривимірний вектор приростів геоцентричних координат  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  між двома приймачами, які виконували синхронні спостереження.

*Всесвітній координований час (UTC)* — скоригована шкала атомного часу, яка періодично узгоджується із сонячним Всесвітнім часом (UT1) шляхом додавання секунд координації (Leap Seconds).

*Геометричний метод супутникової геодезії* — спосіб визначення відносних просторових векторів між наземними пунктами шляхом синхронних спостережень ШСЗ без залучення теорії руху супутника.

*Геоцентрична система координат (ECEF)* — тривимірна прямокутна система координат  $(X, Y, Z)$ , початок якої суміщений із центром мас Землі, вісь  $Z$  спрямована вздовж осі обертання, а вісь  $X$  проходить через Гринвіцький меридіан.

*Джемінг (Jamming)* — навмисне радіоелектронне подавлення сигналів ГНСС потужним радіошумом, що призводить до падіння  $\frac{C}{N_0}$  та втрати супутників.

*Динамічний метод супутникової геодезії* — спосіб визначення геоцентричних координат пунктів та параметрів гравітаційного поля Землі на основі аналізу відхилень дійсної орбіти ШСЗ від ідеальної під дією збурюючих сил.

*Диференціальне позиціонування (DGNSS)* — режим підвищення точності вимірювань шляхом використання коригувальних поправок, отриманих від базової станції з відомими координатами.

*Ефемериди (Ephemeris)* — набір орбітальних параметрів та коефіцієнтів, що дозволяють обчислити точне просторове положення супутника та зсув його годинника на фіксований момент часу.

*Збурений рух ШСЗ* — реальний рух супутника під впливом гравітаційних (несферичність Землі, Місяць, Сонце) та негравітаційних (сонячний тиск, опір атмосфери) сил.

*Зрив фази (Cycle Slip)* — раптова втрата відстеження фази несучої хвилі через фізичні перешкоди, що призводить до втрати рішення Fixed та вимагає повторної ініціалізації.

*Ініціалізація (OTF — On-The-Fly)* — процес накопичення фазових даних та розв'язання цілочисельної неоднозначності безпосередньо в русі.

*Іоносферна затримка* — спотворення швидкості поширення ГНСС-сигналу в іоносфері через наявність вільних електронів; компенсується двочастотними комбінаціями.

*Кінематичний метод (Kinematic)* — спосіб вимірювань, при якому роверний приймач виконує фіксацію координат або фазових параметрів під час безперервного руху.

*Кодовий спосіб вимірювання* — обчислення псевдовіддалі за часовою затримкою співставлення псевдовипадкових кодових міток супутника та приймача (точність 0,3–1,0 м).

*Космічний, Управлінський та Користувацький сегменти* — три апаратні складові ГНСС: угруповання супутників, мережа наземних станцій контролю та приймальне обладнання споживачів.

*Міжнародний атомний час (TAI)* — безперервна та рівномірна шкала часу, заснована на еталонній тривалості атомної секунди (коливання атома цезію-133).

*Модель точності ГНСС-вимірювань* — двокомпонентний вираз  $\sigma = a + b \cdot D$ , де  $a$  — постійна інструментальна похибка (мм), а  $b$  — мультиплікативна складова (ppm), що масштабується від довжини бази  $D$ .

*Семипараметричне перетворення Гельмерта* — математична модель просторової трансформації координат між двома системами з використанням 3 лінійних зсувів ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ), 3 кутів повороту ( $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ ) та 1 масштабного коефіцієнта ( $m$ ).

*Системний час GPS (GPST)* — безперервна шкала часу системи GPS, яка збігалася з UTC на початок ініціалізації (6 січня 1980 року) і не містить секунд координації.

*Співвідношення «несуча/шум» ( $\frac{C}{N_0}$ )* — діагностичний індикатор якості прийому супутникового сигналу в контролері (вимірюється в dB-Hz).

*Спуфінг (Spoofing)* — вид РЕБ, що полягає в імітаційній підміні навігаційного поля хибними супутниковими сигналами з метою зміщення підсумкових координат.

*Статичний метод (Static / Rapid Static)* — спосіб ГНСС-вимірювань, при якому ровер залишається повністю нерухомим на точці протягом тривалого часу (від 10–15 хв до кількох годин).

*Статуси рішень (Single / Float / Fixed)* — градація якості обробки фазових вимірювань: автономне кодове (Single), плаваюче фазове з дробовим рішенням  $N$  (Float) та фіксоване із визначеним цілочисельним  $N$  (Fixed).

*Супутникова геодезія* — розділ геодезичної науки, що використовує результати вимірювань, виконаних за допомогою апаратури на борту штучних супутників Землі (ШСЗ), для визначення координат пунктів, вивчення фігури та гравітаційного поля Землі.

*Топоцентрична система координат (NEU)* — локальна система координат (North, East, Up), початок якої розташований у точці спостереження на поверхні Землі.

*Точні ефемериди IGS* — високопрецизійні орбітальні дані Міжнародної ГНСС-служби (Ultra-Rapid, Rapid, Final), що залучаються під час пост-обробки.

*Трилатерація в ГНСС* — геометричний метод визначення 3D-координат приймача шляхом вимірювання відстаней (псевдовіддалей) щонайменше до 3 (для координат) або 4 (із поправкою годинника) супутників.

*Тропосферна затримка* — викривлення та затримка радіохвилі під впливом вологості, тиску та температури в тропосфері; усувається математичним моделюванням.

*Фазовий спосіб вимірювання* — обчислення псевдовіддалі шляхом вимірювання зсуву фази несучої радіохвилі (довжина хвилі 19–25 см), що забезпечує міліметрову точність.

*Цілочисельна фазова неоднозначність ( $N$ )* — невідома ціла кількість повних довжин хвиль несучої частоти, що вклалися на відрізок від супутника до антени на момент захоплення сигналу.

*Юліанська дата (JD / MJD)* — безперервний відлік часу в середніх сонячних добах від 1 січня 4713 року до н. е. ( $MJD = JD - 2\,400\,000,5$ ).