

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Ю.В. Медведський

ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ

Конспект лекцій
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти спеціальності
193 «Геодезія та землеустрій»

Київ 2025

УДК 6339.5(075.8)

М42

Рецензент О. В. Адаменко, канд. техн. наук, доцент

*Затверджено на засіданні кафедри інженерної геодезії, протокол
№ 7 від 14 березня 2024 року.*

В авторській редакції.

Медведський Ю. В.

М42 Глобальні навігаційні супутникові системи [Електронний ресурс]:
конспект лекцій / Ю. В. Медведський. – Київ: КНУБА, 2025. – 112 с.

Розглянуто питання принципів функціонування ГНСС систем та їх структури, використання систем координат та зв'язку між ними, структури сигналів та фактори, що впливають на точність визначення координат. Приділено увагу питанням методики виконання геодезичних спостережень із використанням ГНСС.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій».

УДК 6 339.5 (075.8)

© Ю.В. Медведський, 2025

© КНУБА, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Компетентності здобувачів освітньої програми, що формуються в результаті засвоєння освітньої компоненти	4
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ РОБОТИ ГНСС	6
<i>Лекція 1. Основні принципи роботи ГНСС</i>	6
1. Принцип визначення місцеположення	6
2. Космічний сегмент; сегмент керування; сегмент користувача	10
<i>Лекція 2. Системи відліку</i>	15
1. Системи координат ГНСС та місцеві системи	15
2. Трансформування систем координат	20
3. Картографічні проєкції і координати на площині	23
<i>Лекція 3. Орбіти супутників</i>	28
1. Види орбіт	28
2. Параметри орбіт	31
3. Ефемериди та альманах	36
<i>Лекція 4. Сигнали з супутників</i>	39
1. Фізичні основи сигналу, фазові та кодові хвилі	39
2. Навігаційне повідомлення	44
3. Обробка сигналу, конструкція приймача	45
<i>Лекція 5. Класифікація основних факторів, що впливають на точність визначення координат</i>	56
ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2.	
МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТОДАМИ ГНС	64
<i>Лекція 6. Технологія виконання геодезичної зйомки за допомогою ГНСС</i>	64
2. Статичний, кінематичний та RTK режими зйомки	69
3. Методи побудови геодезичних мереж	75
<i>Лекція 7. Планування супутникових геодезичних спостережень</i>	80
1. Правила розташування ГНСС станції	80
2. Оцінка стану та місцеположення супутників	81
3. Визначення схеми перешкод та оптимального проміжку часу для спостережень	83
<i>Лекція 8. Створення опорних геодезичних мереж</i>	91
1. Вимоги до геометрії мережі та кількості пунктів	91
2. Надлишковість та незалежність вимірів	93
3. Етапи ГНСС спостережень	97
<i>Лекція 9. Вирішення прикладних задач ГНСС методами</i>	101
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	109

ВСТУП

Глобальні навігаційні супутникові системи – це дисципліна, яка базується на використанні елементів космічної геодезії та супутникових радіонавігаційних методів визначення місцеположень точок на поверхні землі та навколоземному просторі.

Мета освітньої компоненти – створення фундаменту знань для розуміння студентами основних принципів використання сучасної супутникової радіонавігаційної апаратури для вирішення задач по визначення місцеположень точок на поверхні Землі та навколоземному просторі.

Завдання освітньої компоненти полягає в проведенні польових спостережень за допомогою геодезичного ГНСС обладнання із застосуванням різних методик виконання польових робіт та опрацювання отриманих результатів в професійних програмних засобах.

Компетентності здобувачів освітньої програми, що формуються в результаті засвоєння освітньої компоненти

Код	Зміст компетентності
Інтегральна компетентність	
ІК	Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі геодезії та землеустрою
Загальні компетентності	
ЗК01	Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.
ЗК03	Здатність планувати та управляти часом.
ЗК05	Здатність спілкуватися іноземною мовою.
ЗК06	Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.
ЗК09	Здатність до міжособистісної взаємодії.
Фахові компетентності	
СК05	Здатність застосовувати сучасне інформаційне, технічне і технологічне забезпечення для вирішення складних питань геодезії та землеустрою, кадастру.
СК09	Здатність застосовувати інструменти, прилади, обладнання, устаткування при виконанні завдань геодезії та землеустрою.

Програмні результати здобувачів освітньої програми, що формуються в результаті засвоєння освітньої компоненти

Код	Програмні результати
PH01	Вільно спілкуватися в усній та письмовій формах державною та іноземною мовами з питань професійної діяльності.
PH06	Знати історію та особливості розвитку геодезії, землеустрою та кадастру, їх місце в загальній системі знань про природу і суспільство.
PH07	Виконувати обстеження і вишукувальні, топографо-геодезичні, картографічні, проєктні та проєктно-вишукувальні роботи при виконанні професійних завдань з геодезії та землеустрою.
PH08	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 проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів будівництва.
PH10	Обирати і застосовувати інструменти, обладнання, устаткування та програмне забезпечення, які необхідні для дистанційних, наземних, польових і камеральних досліджень у сфері геодезії та землеустрою.
PH11	Організовувати та виконувати дистанційні, наземні, польові і камеральні роботи в сфері геодезії та землеустрою, оформляти результати робіт, готувати відповідні звіти.
PH14	Планувати складну професійну діяльність, розробляти і реалізовувати проєкти у сфері геодезії та землеустрою за умов ресурсних та інших обмежень.
PH15	Розробляти і приймати ефективні рішення щодо професійної діяльності у сфері геодезії та землеустрою, у тому числі за умов невизначеності.

У рамках цього курсу виокремлюють два змістових модулі:

1. Основи роботи ГНСС.
2. Методика виконання спостережень методами ГНСС

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ РОБОТИ ГНСС

Лекція 1. Основні принципи роботи ГНСС

План

1. Принцип визначення місцеположення.
2. Космічний сегмент; сегмент керування; сегмент користувача.

1. Принцип визначення місцеположення

Що таке взагалі ГНСС? GNSS представляє собою систему супутникової навігації, створену з метою позиціонування (визначення місця розташування в просторі – тобто координат) об'єктів. Окрім визначення місця розташування об'єкта сучасні навігаційні системи дозволяють визначити напрямок його руху і швидкість.

На даний час близько 200 організацій, що займаються збором GNSS даних з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (International GNSS Service), яка, в свою чергу, входить до Міжнародної асоціації геодезії.

На сьогодні існує **6 діючих систем** глобального позиціонування: NAVSTAR/GPS (США), GLONASS (Росія), IRNSS /NAVIC (Індія), BEIDOU (Китай), GALILEO (Європа), QZSS (Японія) (рис. 1.1).

Кожна система має свої особливості. Окрім того, що їх розробники різні країни, супутники знаходяться на різній висоті орбіти. Як бачите значення відстаней коливаються в межах від 19 до 36 км. Відповідно в кожній системі свій період обертання супутника навколо Землі.

System	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	NAVIC
Owner	United States	Russian Federation	China	European Union	India
Orbital altitude	20, 180 km [12, 540 mi]	19, 130 km, [11, 890 mi]	21, 150 km, [13, 140 mi]	23,222 km, [14, 429 mi]	36, 000 km, [22,000mi]
Period	11.97 h, [11 h 58 min]	11.26 h, [11 h 16 min]	12.63 h, [12 h 38 min]	14.08 h, [14h 5min]	
Number of satellites	32 (at least 24 by design)	28 (at least 24 by design) including: 24 operational 2 under check by the satellite prime contractor 2 in flight tests phase	5 geostationary orbit (GEO) satellites, 30 medium Earth orbit (MEO) satellites	4 in-orbit validation satellites + 8 full operation capable satellites in orbit 22 operational satellites budgeted	Total: 7 In Orbit: 7
Frequency	1.57542 GHz [L1 signal] 1.2276 GHz [L2 signal]	Around 1.602 GHz (SP) Around 1.246 GHz (SP)	1.561098 GHz (B1) 1.589742GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)	1.164-1.215 GHz [E5a and E5b] 1.260-1.300 GHz [E6] 1.559-1.592 GHz [E2-L1-E11]	L5-band 1164.45-1188.45 MHz S-band 2483.5-2500 MHz
Status	Operational	Operational	22 satellites operational, 40 additional satellites 2016-2010	8 satellites operational, 22 additional satellites 2016-2020	Operational

Рис.1.1. Системи глобального позиціонування

Також різною у них є і кількість супутників на орбіті. Наприклад ЖПС система має 32 супутники, схожа ситуація у Глонас 28 супутників, а от

Байдоу використовує змішану конфігурацію орбіт супутників своєї системи, у них 5 супутників на геостаціонарній орбіті а 30 на близькоземній. Про орбіти супутників у нас буде окреме заняття і як бачите, вони грають важливу роль у формуванні самих систем (рис. 1.2).

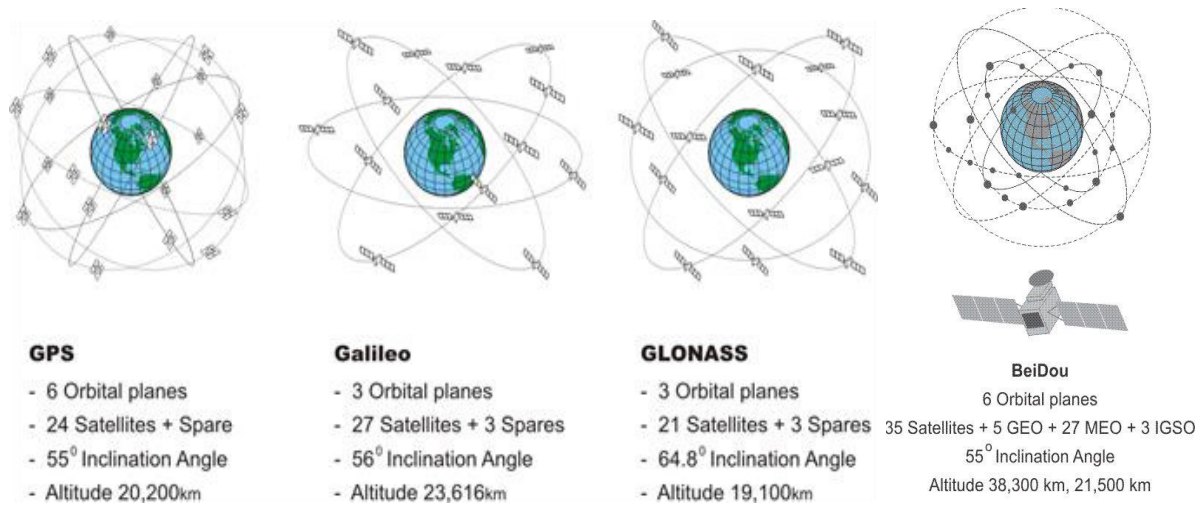


Рис.1.2. Схеми угруповань супутників у різних ГНСС систем

Всі супутники передають сигнали з так званим навігаційним повідомленням і використовують для цього окремі частоти. Для роботи з певною системою наше обладнання повинно вміти сприймати сигнали на цих частотах (рис. 1.3).

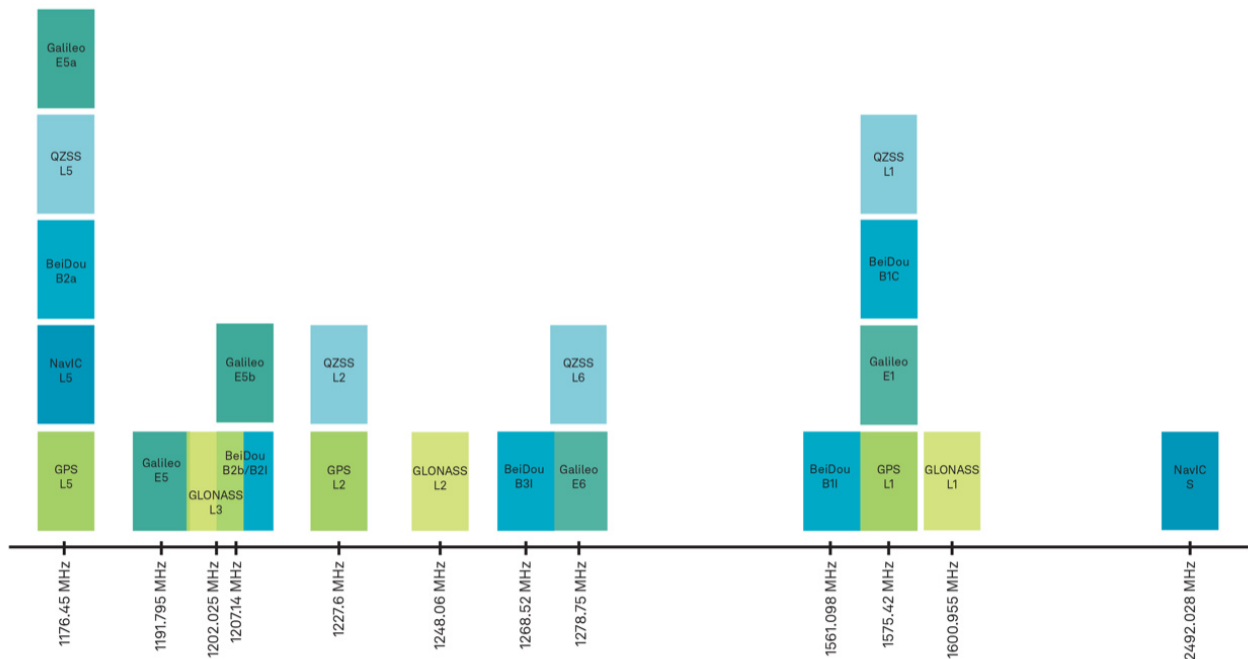


Рис.1.3. Частоти роботи ГНСС систем

На цьому рис.1.3 можна побачити наскільки відрізняються одні частоти певної системи від інших. Кожна система намагається покрити схожий діапазон частот і виділити собі 3 - 4 частоти. Передача сигналу на різних частотах грає важливу роль у зменшенні помилок та підвищенні стабільності розрахованих відстаней від супутника. Про це ми теж поговоримо під час розгляду факторів, що впливають на точність результатів спостережень.

В кожній з цих систем є відповідні сайти, які можна відвідати та дізнатись детальну інформацію про її склад, поточний стан системи, стан окремих супутників та наявність планових регламентних робіт. Це буває необхідно під час планування довготривалих спостережень.



Рис.1.4. Розвиток системи GPS

Особливою відмінністю між системами можна назвати взаємне розташування орбіт супутників один до одного, глобально це нахил орбіт та їх кількість. Перейдемо за посиланням і подивимось на ці системи.

На цьому сайті <https://ajmas.github.io/ThingsInSpace> ми можемо переглянути як виглядають ці системи. Який вони мають вигляд з космосу. Можна вибрати різні системи і подивитись на них.

Як супутник знає мої координати?

Загальний принцип визначення координат об'єкта на Землі (рис. 1.5) полягає в вимірюванні відстаней від супутника до антени приймача, знаючи декілька відстаней та координати супутника можна визначити координати

антени, знаючи висоту антени та її зміщення – координату точки пункту на землі. В основі лежить принцип прямої кутової засічки. Для однозначного позиціонування необхідно 4 супутники. Попередні координати супутників знаходяться в Альманаху, точні координати називаються *ефемеридами*.

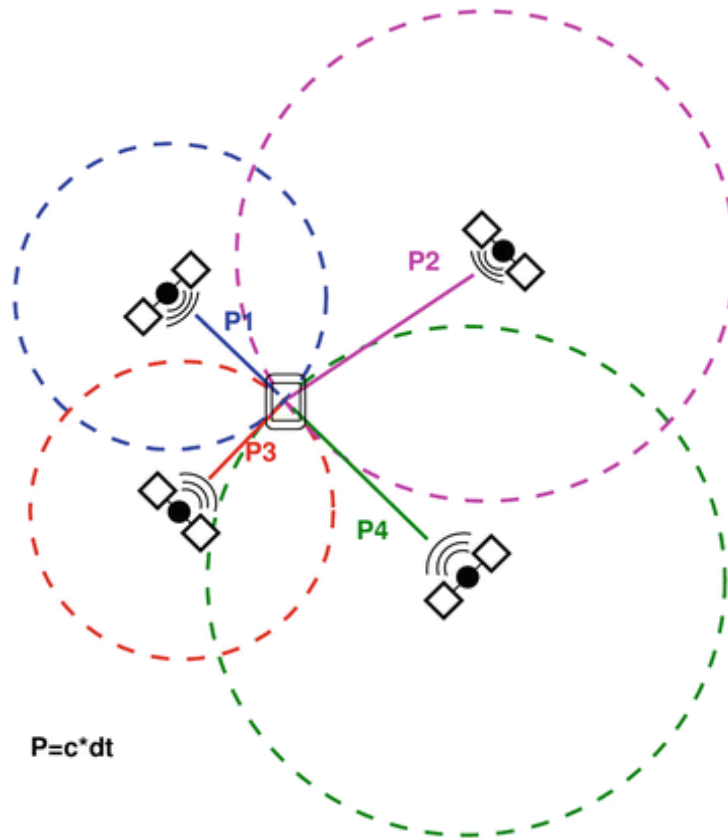
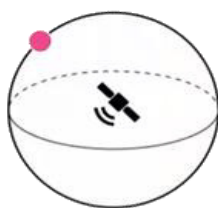


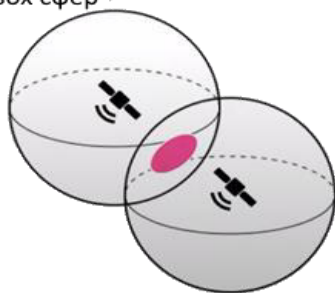
Рис.1.5. Принцип визначення місцеположення

Як пояснюється принцип визначення координат та чому саме 4 супутника. На рис.1.6 зображено принцип визначення координат від супутників. Від супутника ми в результаті обчислень та обробки сигналу отримуємо відстань. Ця відстань може бути в якомусь умовному радіусі. Спочатку точка на сфері, далі це перетин двох сфер в результаті якого утворюється площина. Якщо додати ще одну сферу, то ми перетнемо площину в двох точках. Четверта сфера дозволяє отримати одну точку перетину. Для коректного вирішення нашої задачі позиціонування за допомогою ГНСС систем потрібно мати зв'язок з 4 супутниками, отримати від них відстані та каталог координат цих супутників.

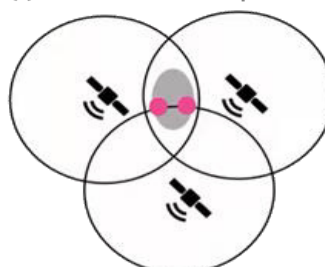
1. В будь-якій точці сфери



2. В площині перетину двох сфер



3. Є 2 точки з координатами, одна з яких на поверхні Землі



4. Однозначне визначення в одній точці

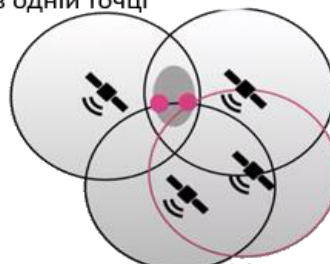


Рис.1.6. Пояснення принципу визначення місцеположення

2. Космічний сегмент; сегмент керування; сегмент користувача

Звідки ми знаємо координати супутника? Всі ці системи мають загальний принцип побудови в три сегменти (рис. 1.7):

- Космічний сегмент
- Сегмент управління
- Сегмент користувача.

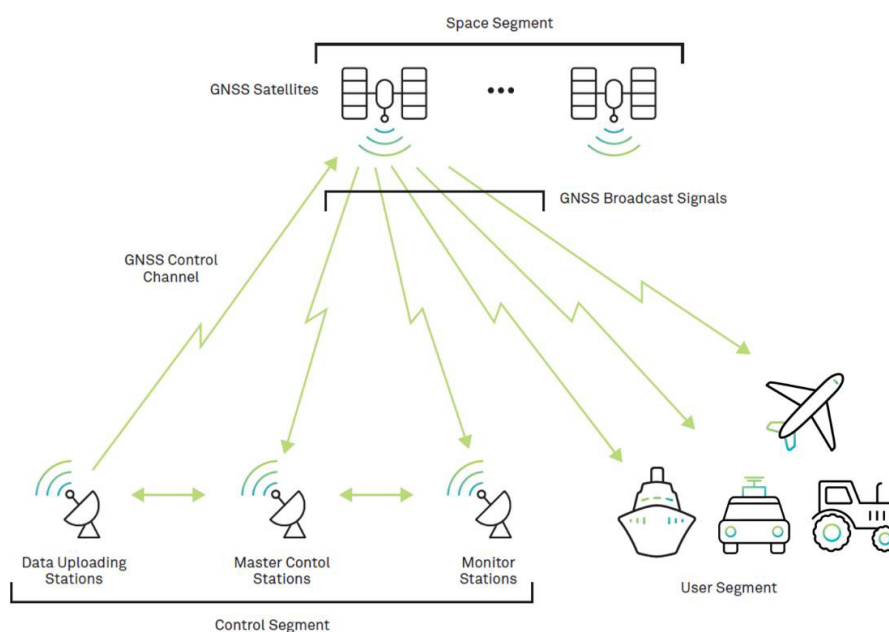


Рис.1.7. Сегменти роботи ГНСС системи

Сегмент управління (рис. 1.8) включає наземну мережу головних станцій управління, станцій завантаження даних і станцій моніторингу. Сегмент користувача складається з обладнання, яке обробляє отримані сигнали від супутників GNSS. Космічний сегмент складається із супутників GNSS, які обертаються на висоті близько 20 000 км над Землею.

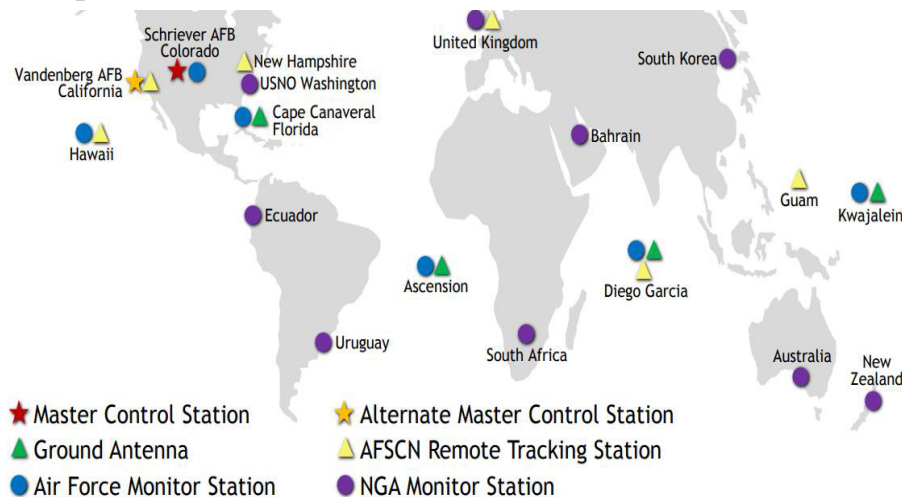


Рис.1.8. Сегмент управління

Сегмент управління, системи ЖПС виглядає таким чином. Є 2 головні, контрольні станції, основна і резервна. Є 4 станції завантаження даних і 16 станції моніторингу даних. Таким чином вони розташовані по всій планеті. Відповідно в кожній супутникової системи є свій сегмент управління, і свої станції по аналогічному принципу: головні, контрольні станції, станції завантаження даних і станції моніторингу.

Всі вони працюють разом для того, щоб отримати координати від супутників, ефемериди супутників, визначити й уточнити їх, передати назад точні актуальні ефемериди та поправки часу, щоб супутники вже могли подальшому передати ці дані на обладнання користувача.

Як відбувається сам процес:

- сегменті управління, уточнює координати та визначає ефемериди супутників
- обчислює актуальні точні орбіти руху самих супутників.
- визначає корекції в час.

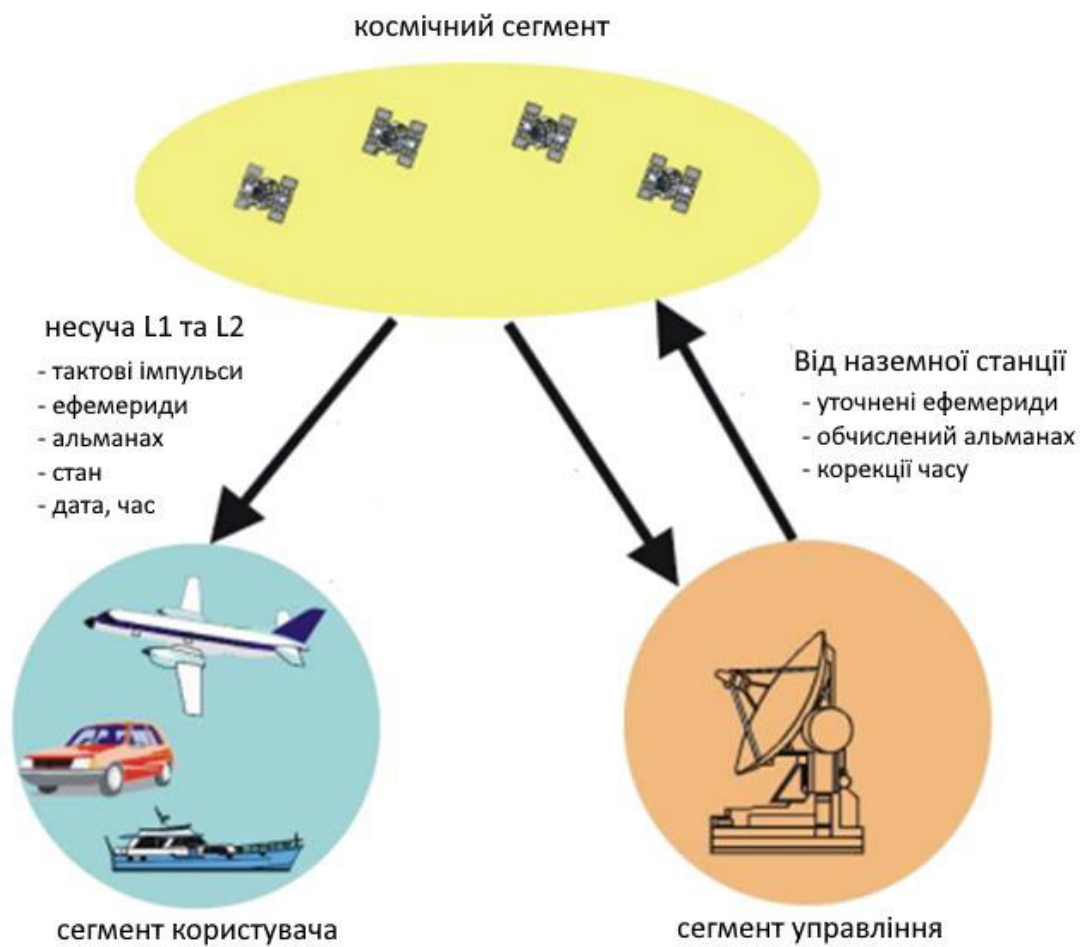


Рис.1.9. Взаємодія сегментів системи ГНСС

Ми знаємо про проблему вимірювання часу для об'єктів з різною швидкістю, які знаходяться в просторі. Нам синхронізувати потрібно час, і це є складною задачею. Загалом, вимірювання часу важко забезпечити з однаковою точністю. Для того, щоб виміряти дуже точно час, існують атомні годинники, але це не доступно кожному з нас. В мобільному телефоні нема атомного годинника, бо це дуже дорога річ. Наприклад геодезичне обладнання має більш точні годинники, ніж звичайні телефони чи смартфони, але все одно це не атомний годинник. Відповідно на космічних супутниках розташовані теж дуже точні годинники, і нам потрібна синхронізація годинників різної точності, яка виконується в сегменті управління.

Наземні станції перераховують і уточнюють поточні дані супутників, розраховують майбутні ефемериди на певний момент часу, тому альманах має координати супутника на якийсь момент часу. Дані руху супутника певним чином прогнозовані, це не кінцеві однозначні дані. Спочатку рух прогнозують, потім збирають уточнюючу інформацію про фактичний рух

супутника, можливо була зміна його траєкторії, вираховуються координати на певний момент часу і вже потім відправляють ці координати на супутник.

Ми, як сегмент користувача, отримуємо сигнали від супутника дані на двох частотах. Отримуємо інформацію про імпульс, ефемериди супутника від якого прийняли сигнал, альманах всієї системи, щоб зрозуміти де на небосхилі знаходяться сусідні супутники, яких ми ще в даний момент не бачимо, але умовно через пів години вони вже з'являться в зоні видимості. Це нам теж потрібно під час виконання вимірювань, тому що виміри на станції можуть проводитись не лише 2-3 хвилини, а вони бувають різної протяжності в часі, ми можемо стояти на станції 2 -3 години і за цей проміжок часу у на станції буде змінюватись конфігурація супутників на небосхилі. У нас буде однією з задач під час планування спостережень забезпечити видимість 4х супутників весь час вимірювань, тому нам буде корисно знати де вони будуть знаходитись. Під час виконання вимірів буде корисно знати коли в зоні дії обладнання з'являться нові супутники і підсилять нашу конфігурацію.

Отримуємо інформацію про стан супутника. Супутник може передати інформацію про те, що на певний момент часу його дані не коректні і він має певні технічні проблеми.

Дата та час. За рахунок цієї інформації, знаючи швидкість розповсюдження сигналу в просторі від супутника до приладу, зможемо розрахувати відстань, а знаючи відстань вирішити задачу визначення координат приладу.

Задачі, які виконують ГНСС системи можна розділити на 5 глобальних задач.

1. Розташування – визначення вашого положення у світі
2. Навігація – визначення найкращого маршруту з одного місця в інше.
3. Трекінг – моніторинг руху об'єкта в навколишньому світі. Це не лише визначення положення об'єкту що їде, транспорту, а й об'єктів інфраструктури. Наприклад, одна із геодезичних задач, це моніторинг стану споруд, мостів та мостових переходів. ГНСС системи дозволяють виконувати такі задачі, постійно фіксуючи положення та зміну цього положення за трьома координатами.

4. Картографування – створення карт певної території, фіксувати контури об'єктів в трьох координатах, використовуючи певні проєкції можна перейти до картографічного матеріалу.
5. Хронометраж – обчислення точного часу в межах мільярдних часток секунди. Задача часу для ГНСС систем дуже важливе питання від якого сильно залежить наша кінцева точність.

Запитання для самоперевірки

1. У чому полягає принцип визначення координат у ГНСС?
2. Які основні функції виконує космічний сегмент ГНСС?
3. Які елементи входять до сегмента керування ГНСС?
4. Які основні завдання виконує сегмент користувача?
5. Як визначається час у системі ГНСС?
6. Скільки супутників потрібно мінімально для 3D визначення координат?
7. Яку роль відіграє атомний годинник у супутниковій навігації?
8. Що таке диференціальна корекція та в якому сегменті вона реалізується?
9. Як визначають похибки в системі ГНСС?
10. Які функції виконує наземна станція керування супутниками?

Лекція 2. Системи відліку

План

1. Системи координат ГНСС та місцеві системи.
2. Трансформування систем координат.
3. Картографічні проєкції і координати на площині

1. Системи координат ГНСС та місцеві системи

Для чого потрібні системи координат?

Геодезичні, топографічні, кадастрові роботи, інженерні дослідження, розмічувальні роботи, винесення в натуру осей споруд та інші види робіт вимагають надання результатів у державних, місцевих, локальних та іноді міжнародних системах координат. Всі вимірювання в ГНСС виконуються в системі координат WGS-84 (рис. 2.1).

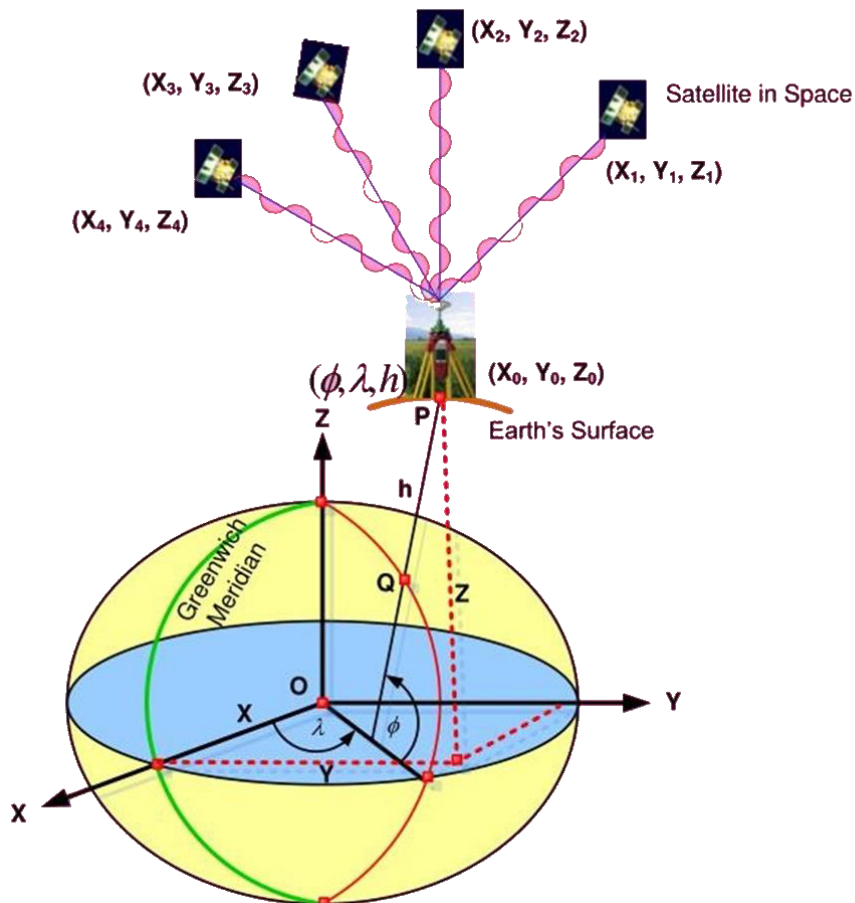


Рис. 2.1. Уявлення про зв'язок систем координат

При роботі з високоточною супутниковою геодезичною апаратурою, що працює за сигналами ГНСС систем, доводиться мати справу з декількома різними системами координат та знати, як перейти від однієї системи до іншої.

Які системи координат існують? Ми знаємо про плоскі прямокутні системи координат (рис. 2.2). Класична реалізація такої системи це математична, або Декартова система координат УХ. Також до плоских прямокутних відноситься перевернута математична, яку ми називаємо геодезичною системою ХУ.

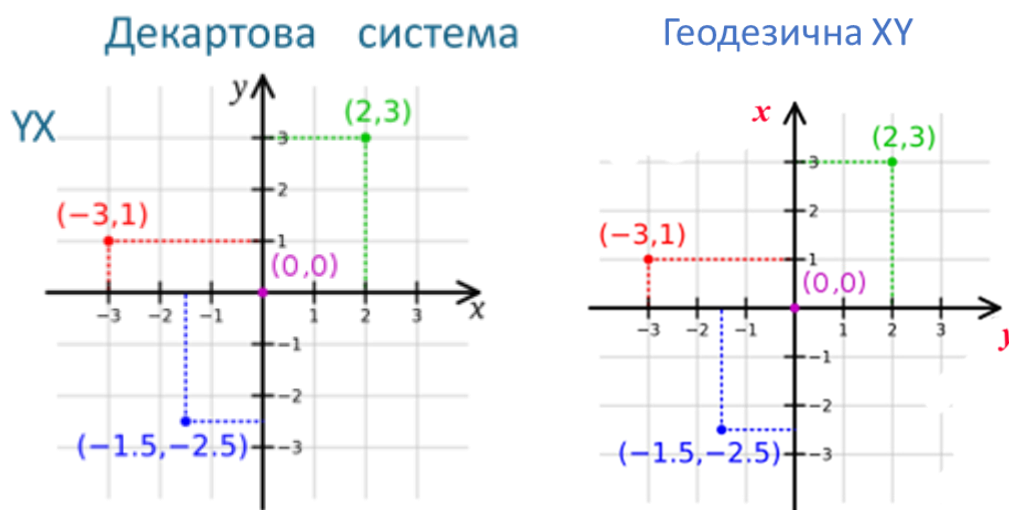


Рис. 2.2. Плоска прямокутна система координат

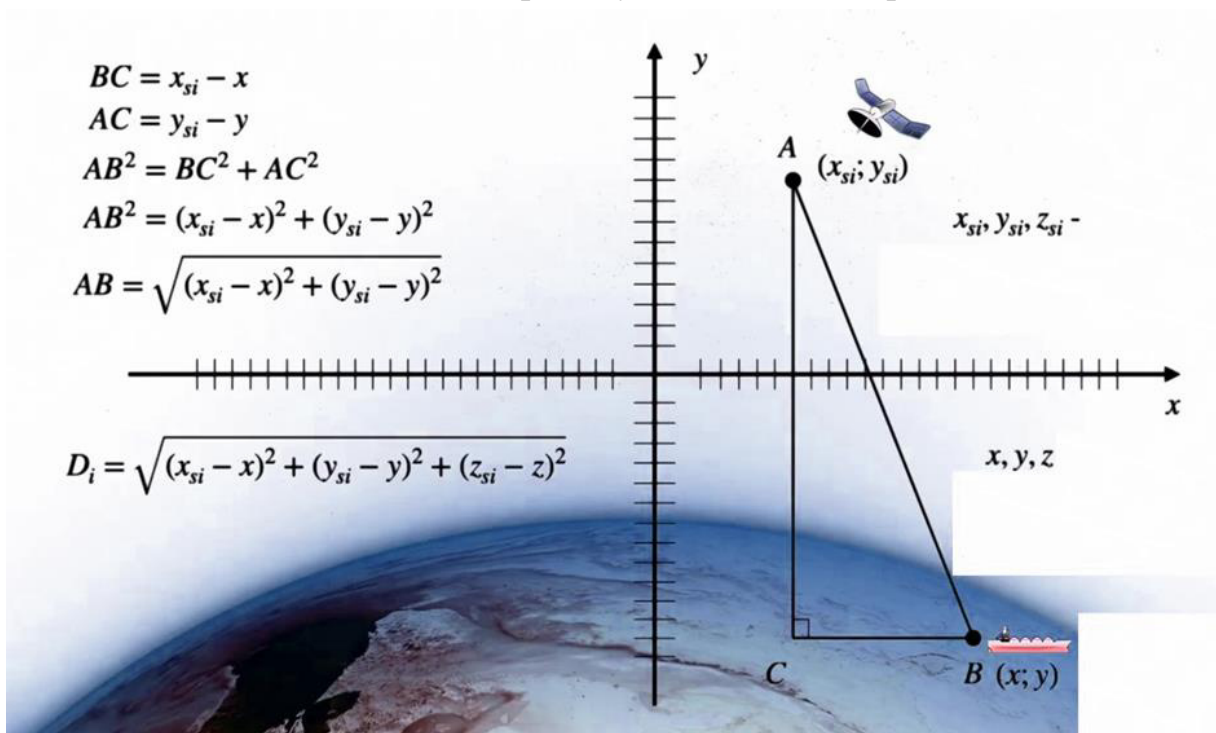
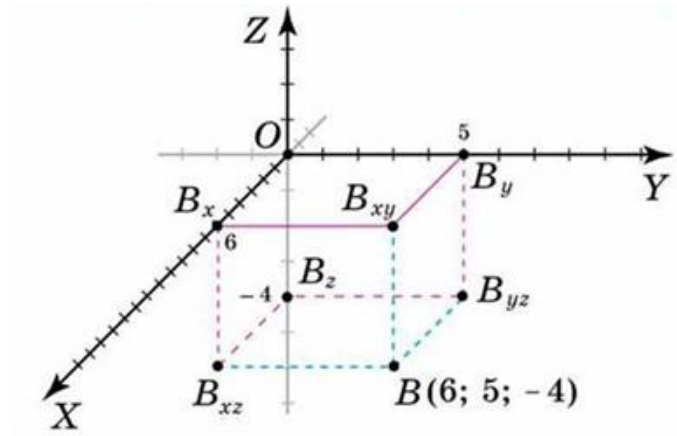


Рис. 2.3. Розрахунок в системі координат Х і У

Також є просторові прямокутні системи координат XYZ та просторові сферичні чи еліпсоїдальні системи координат (рис. 2.3). В просторових кутових системах точка на поверхні визначається широтою, довготою та висотою.

- Просторові прямокутні XYZ



Просторові кутові
(сферичні BLH та еліпсоїдальні $\lambda\phi h$)

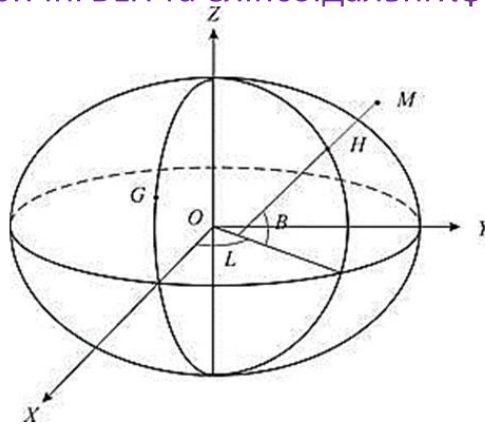


Рис.2.4. Просторові прямокутні та кутові системи координат

Залежно від масштабу застосування системи координат бувають загальноземні та локальні.

Загальноземні розповсюджуються для всієї території Землі. Вони так само бувають просторові та еліпсоїдальні. Але мають певні особливості:

- Початок співпадає з центром мас Землі
- Площина XU знаходиться в площині екватора
- Вісь X направлена в точку перетину грінвічського меридіану.

Така система координат має назву геоцентрична (рис. 2.5).

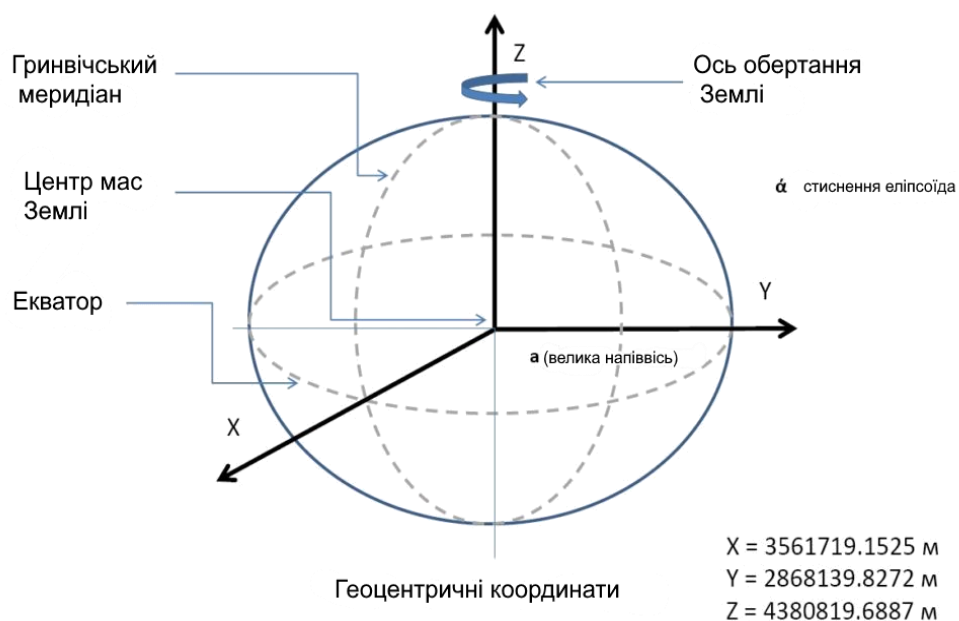


Рис.2.5. Геоцентрична система координат

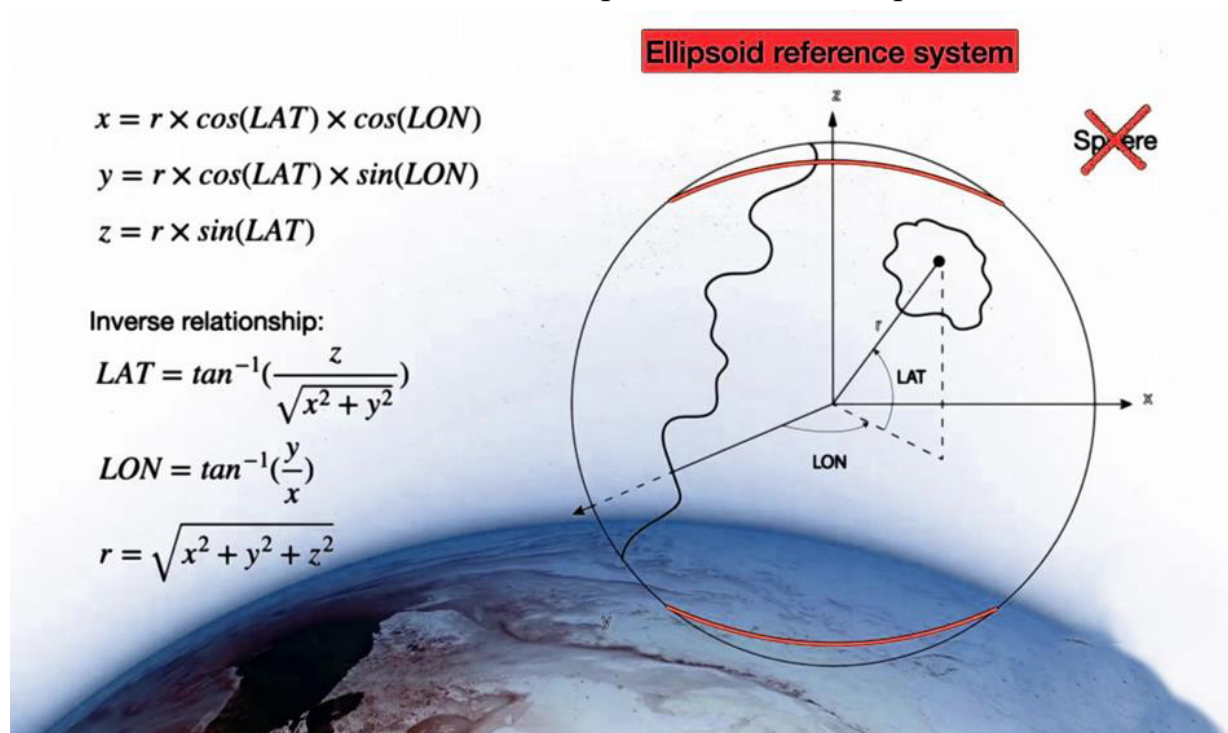


Рис. 2.6. Сферичні координати та їх візуалізація

Локальні (референсні) системи координат (рис. 2.6) створені з метою забезпечення геодезичних та картографічних робіт на конкретній території. Зазвичай використовується на територію країни чи декількох країн, до референційних відносяться системи координат СК-42, СК-63, УСК-2000. В нашій країні використовується еліпсоїд Красовського.

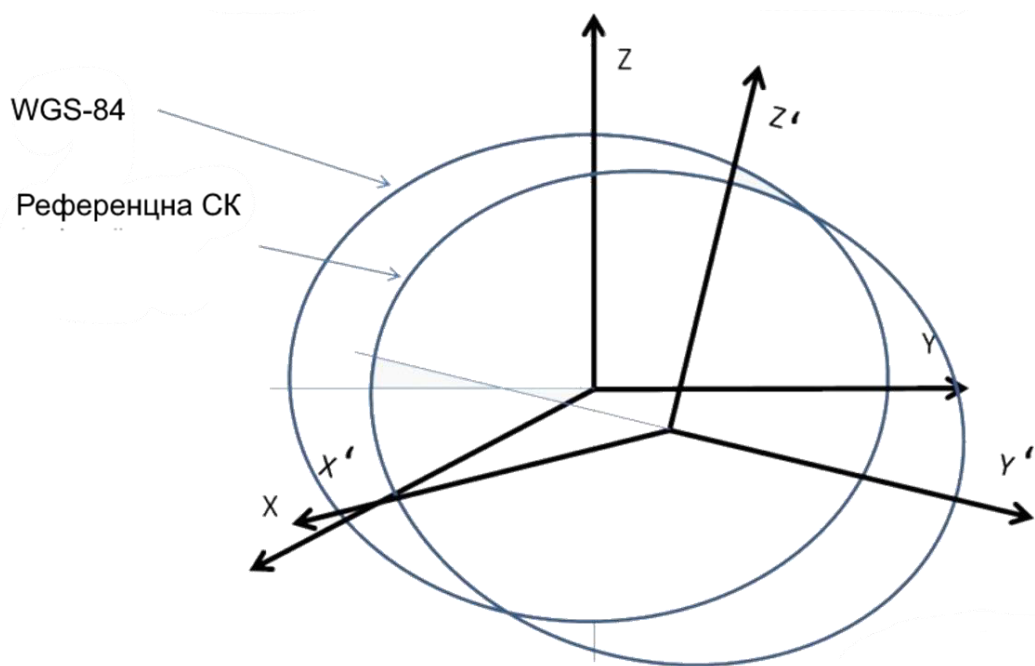


Рис. 2.7. Референцна система координат

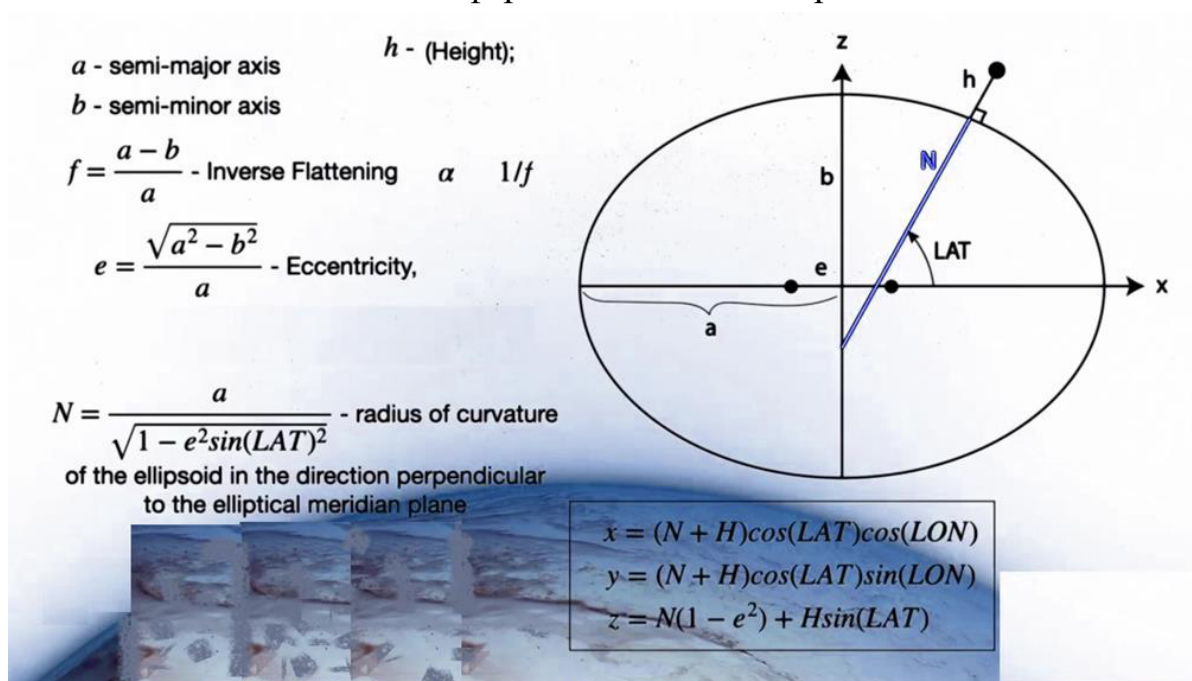


Рис. 2.8. Параметри референц-еліпсоїда

Для зв'язку між різними системами використовують процес перерахування координат з однієї системи координат в іншу систему координат, який називають перетворенням координат або трансформацією координат, а параметри, за якими виконується обчислення - параметри перетворення координат, параметри трансформації, параметри переходу. Один з популярних методів перетворення є 7ми параметричне перетворення Гельмерта (рис. 2.9).

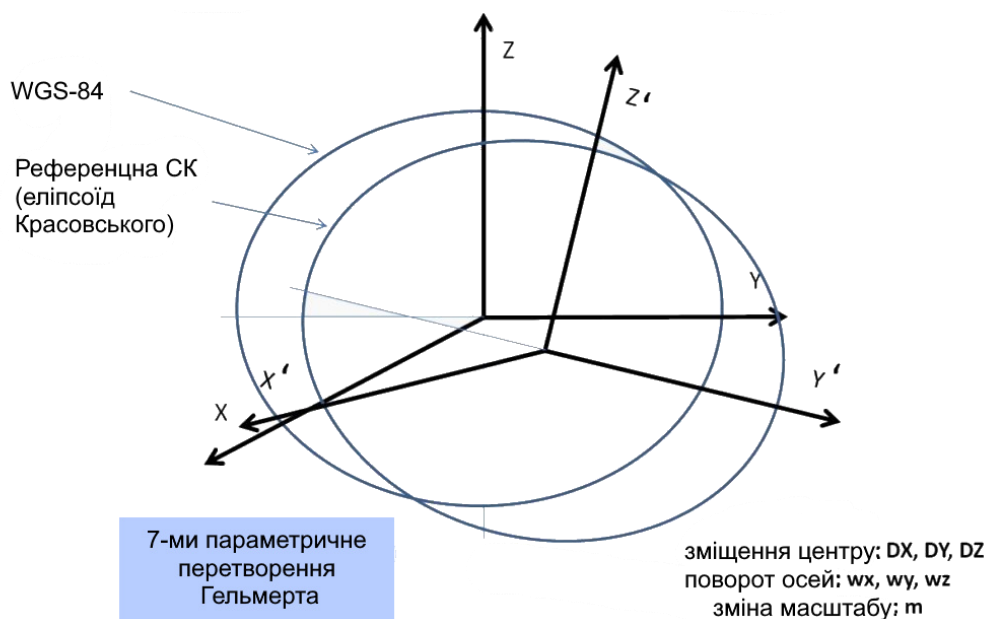


Рис. 2.9. Перетворення координат за Гельмертом

Чому саме 7ми параметричне? Бо використовується 3 зміщення по осям центру системи, 3 повороту навколо осей, та зміна масштабного коефіцієнта. Ще є, наприклад, 11 параметричне перетворення за Молоденським, але його використовують рідше.

2. Трансформування систем координат

Загальна схема перетворення координат виглядає наступним чином. Від загальноземної системи координат в просторових чи еліпсоїдальних координатах, це не важливо, переходять до референтної системи певної території. Для цього можна використати параметри переходу, наприклад Гельмерта.

Далі виконують перехід системи координат на площині державного рівня, для чого знадобляться параметри проєкції для цієї країни. Потім виконують перехід до місцевих чи умовних систем координат, використовуючи параметри переходу у вигляді зсувів по осям координат та повороту системи координат на певний кут.

Для переходу до плоскої системи координат державного рівня в нашій країні використовують циліндричну проєкцію Гауса-Крюгера. В результаті якої ми отримуємо відображення Земної поверхні у вигляді зон, обмежених меридіанами шириною б градусів. Початок такої системи розташовується на перетині лінії екватора та осьового меридіана, вісь X дивиться на північ та співпадає з осьовим меридіаном, вісь Y знаходиться на лінії екватора. Таку

проекцію використовують на всіх топографічних картах в нашій країні. Для виконання різного роду аналізу геопросторових даних використовують багато інших проекцій із своїми параметрами.

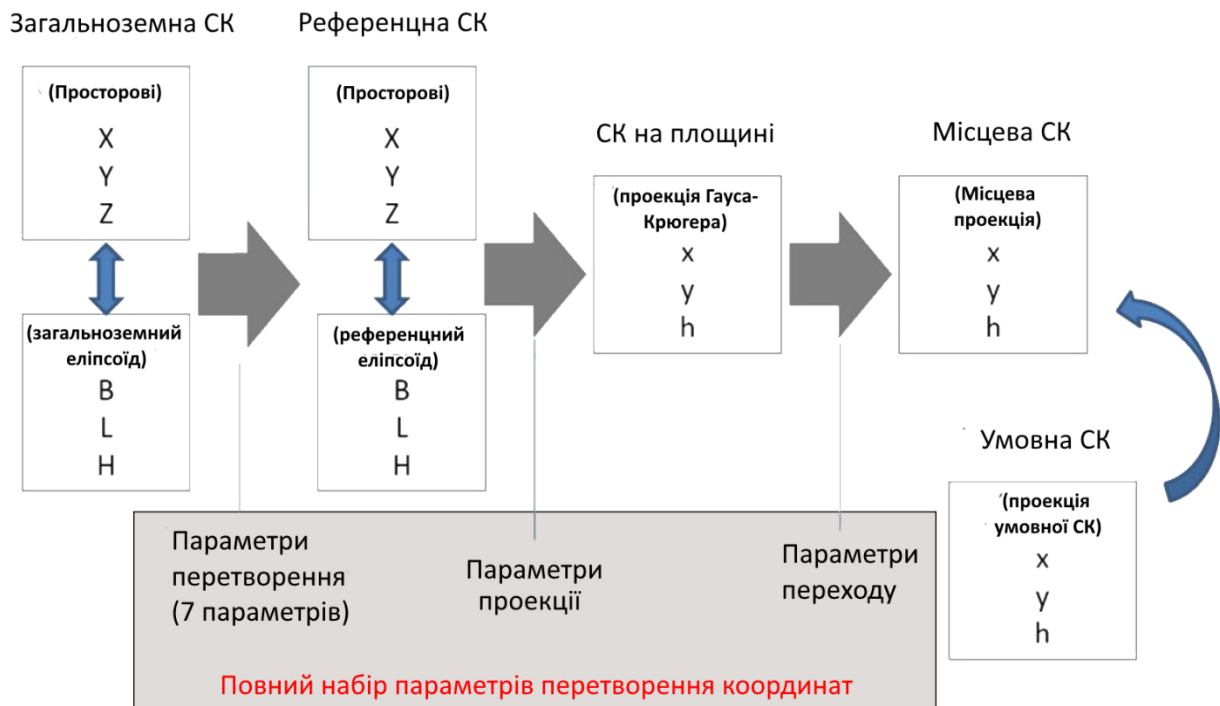


Рис. 2.10. Схема перетворення систем координат

Давайте подивимось на набори параметрів переходу на різних етапах перетворення систем координат. На першому етапі під час переходу від загальноземної системи координат WGS-84 до референцної системи координат для зазначеної території використовують 7 параметрів Гельмерта, які включають зміщення початку просторової системи координат, кути розвороту осей просторових систем координат і масштабний коефіцієнт. Просторові координати однозначно представляються як геодезичні координати на референц-елліпсоїді Красовського завданням параметрів референц-елліпсоїда. Це велика піввісь еліпсоїда, стиск еліпсоїда.

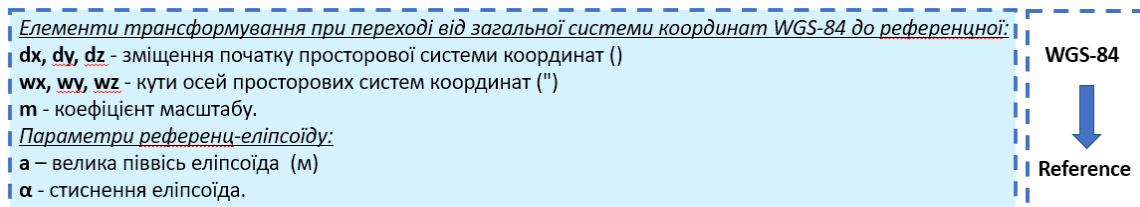


Рис. 2.11. Перший етап переходу між системами координат

На другому етапі (рис. 2.12) просторові координати перетворюються на плоскі прямокутні координати в заданій проекції на площину. Задавши

параметри державної системи координат (УСК-2000) у проєкції Гаусса-Крюгера, координати перетворюються на державну систему координат. Параметри проєкції включають довготу осьового меридіана, що проходить через початок місцевої системи координат, широту паралелі, що проходить через початок місцевої системи координат, масштабний коефіцієнт вздовж осьового меридіана попередньої системи координат, умовне зміщення початку попередньої системи координат по осях x і y .

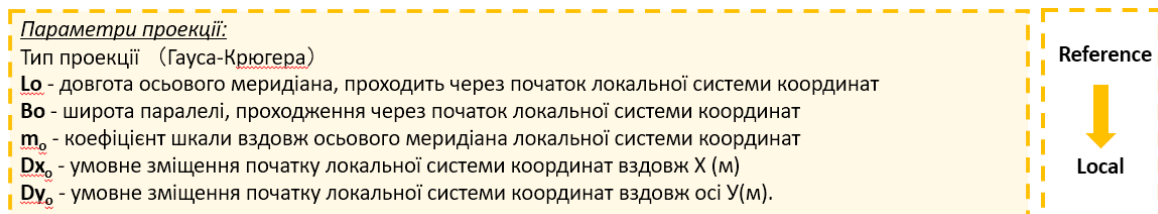


Рис. 2.12. Другий етап переходу між системами координат

На третьому етапі (рис. 2.13) з використанням параметрів переходу (ключів) на площині виконується перетворення координат із державної системи координат у МСК. Для цього застосовуються такі параметри: зміщення початку відліку координати в МСК щодо початку в попередній проєкції по осях x і y , кут розвороту осей МСК в точці початку МСК щодо осей попередньої проєкції (якщо є) і m - масштабний коефіцієнт вздовж осьового меридіана МСК.

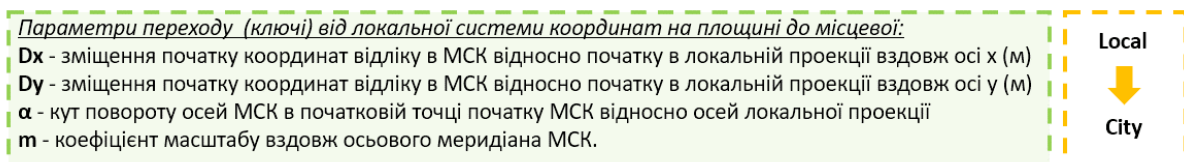


Рис. 2.13. Третій етап переходу між системами координат

Місцевою системою координат можна вважати будь-яку умовну систему відліку в межах обмеженої території з обов'язковою прив'язкою координатної сітки через параметри переходу, так звані «ключі». При невиконанні цієї вимоги така система вважається умовною. Дуже часто умовні системи використовують на невеликих одиночних об'єктах будівництва в межах міста. МСК передбачена для ведення топографічних робіт, межування земельних ділянок, веденні кадастрового обліку в регіонах.

3. Картографічні проєкції і координати на площині

Система координат УСК-2000 (Рис. 2.14). У зв'язку з впровадженням супутникових і комп'ютерних технологій геодезія стала наукою планетарного масштабу. Існуючі на той час національні геодезичні системи відліку перестали задовольняти потреби науки і практики. Замість них, розвитку набули загальноземні системи відліку та геодезичні референцні системи координат.

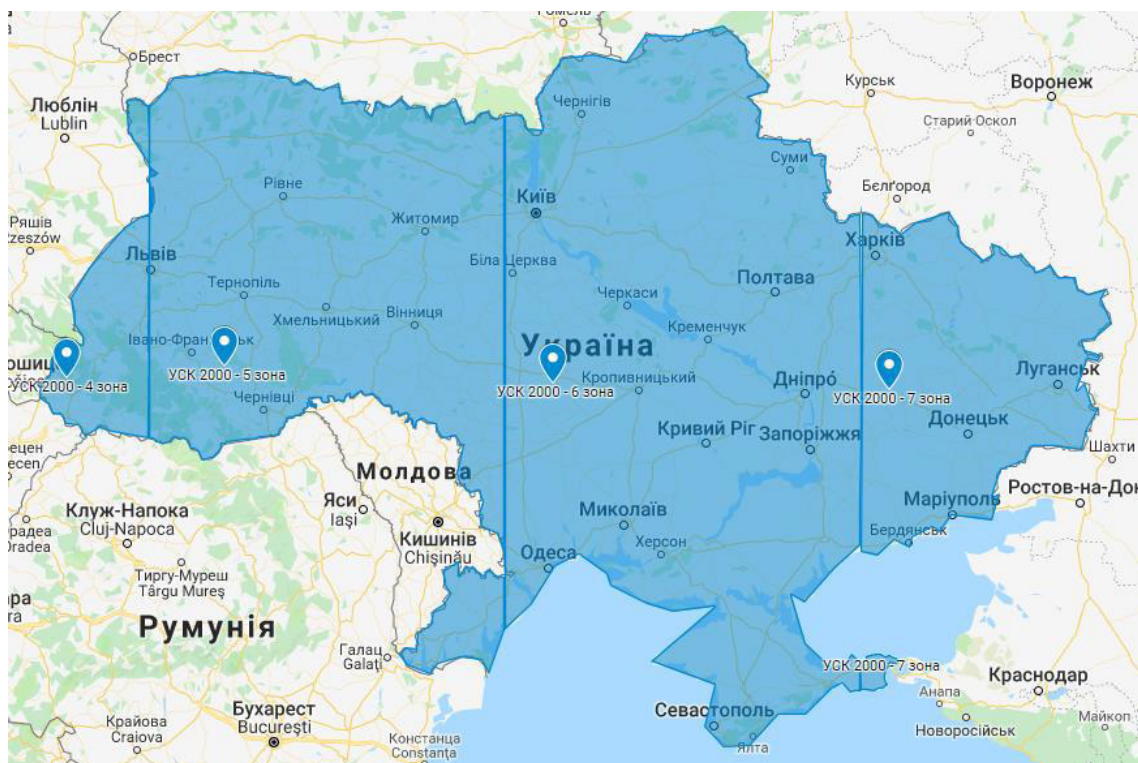


Рис. 2.14. Система координат УСК-2000

Система координат УСК-2000 встановлена за умови паралельності її осей просторовим осям Міжнародної загальноземної референцної системи координат ITRS. За поверхню відліку в системі координат УСК-2000 прийнятий референц-еліпсоїд Красовського. Система координат УСК-2000 чітко узгоджена з Міжнародною загальноземною референчною системою координат ITRS на епоху 2000 року — ITRF2000, яка закріплена пунктами космічної геодезичної мережі. УСК-2000 встановлена для виконання топографо-геодезичних та картографічних робіт на території України постановою Кабінету Міністрів України "Деякі питання застосування геодезичної системи координат" від 22 вересня 2004 р. № 1259. З моменту введення системи координат УСК-2000 року при виконанні нових робіт вона

замінила систему координат 1942 року, яка була введена постановою Ради Міністрів СРСР № 760 від 7 квітня 1946 року.

УСК-2000 отримана в результаті сумісного вирівнювання пунктів Української перманентної мережі спостережень глобальних навігаційних супутникових систем та Державної геодезичної мережі 1-4 класів на епоху 2005 року і закріплена пунктами Державної геодезичної мережі.

УСК-2000 змодельована відповідно системи ITRS/ITRF2000 за умов:

- масштаб референцної системи дорівнює масштабу системи ITRS/ITRF2000;
- осі координат референцної системи паралельні осям координат системи ITRS/ITRF2000;
- розміщення центру референцної системи координат (суміщене з центром референц-еліпсоїда) забезпечує оптимальне відхилення поверхні референц-еліпсоїда від реальної поверхні Землі на територію України.

Параметри системи УСК-2000.

За поверхню відліку в системі координат УСК-2000 прийнятий референц-еліпсоїд Красовського з параметрами:

- велика піввісь 6 378 245м;
- стиснення 1:298,3.

Положення пунктів в прийнятій системі координат визначається:

- просторовими прямокутними координатами X , Y , Z (вісь Z співпадає з віссю обертання еліпсоїда, вісь X лежить в площині нульового меридіану, а вісь Y доповнює систему до правої; початком системи координат є геометричний центр еліпсоїда);
- геодезичними (еліпсоїдальними) координатами: широтою — B , довготою — L , висотою — H ;
- плоскими прямокутними координатами x та y , які обчислюються в проекції Гаусса-Крюгера;
- геодезична висота H утворюється, як сума нормальної висоти та висоти квазігеоїда над еліпсоїдом Красовського. Нормальні висоти геодезичних пунктів визначаються в Балтійській системі висот 1977 року, вихідним початком якої є нуль Крондштадського футштоку, а висоти квазігеоїда обчислюються над еліпсоїдом Красовського.

Можна побачити два цікавих моменти, це прив'язку до системи ITRS та інформацію про висотну складову. Давайте по порядку.

ITRS - міжнародна наземна довідкова система, ITRF - міжнародна наземна система відліку. У світі існують геодезичні мережі, пункти яких визначені у Міжнародній земній системі відліку (ITRF) – реалізації Міжнародної земної системи координат (ITRS), побудованої на тих самих принципах, що WGS-84. Дані супутникових спостережень з пунктів мережі ITRF доступні і можуть бути використані для прив'язки диференціальних станцій. Міжнародний астрономічний союз (IAU) і Міжнародний союз геодезії та геофізики (IUGG) створили Міжнародну службу обертання Землі (IERS) у 1987 році. IERS розпочала офіційну роботу 1 січня 1988 року. Однією з основних цілей IERS є забезпечити міжнародну систему наземних відліків (ITRS).

Визначення ITRS відповідає таким умовам:

- Початок збігається з геоцентром мас Землі, включаючи океани та атмосферу,
- Одиницею довжини є метр (CI),
- Його орієнтація спочатку була дана орієнтацією Міжнародного бюро часу (BIH) у 1984.0.
- Еволюція орієнтації в часі забезпечується використанням умови відсутності чистого обертання щодо горизонтальних тектонічних рухів по всій Землі.

На практиці міжнародна наземна система відліку (ITRF) є реалізацією ITRS. Ця система відліку, безсумнівно, найточніша (кілька сантиметрів), яка використовується в усьому світі.

Існують різні реалізації ITRS, що називаються відповідно ITRF88, ITRF89,..., ITRF2000 і ITRF2005. Кожна з них є вдосконаленням порівняно з попередніми.

Друге питання, щодо системи висот. Якщо подивитись на рис.2.15, то висота точки в ГНСС вимірюваннях прив'язана до еліпсоїда. Усі висоти, виміряні за допомогою GNSS називаються еліпсоїдальними висотами. У існуючих каталогах зазвичай вказані ортометричні висоти, виміряні до середнього рівня моря. Середній рівень моря відповідає поверхні геоїда.

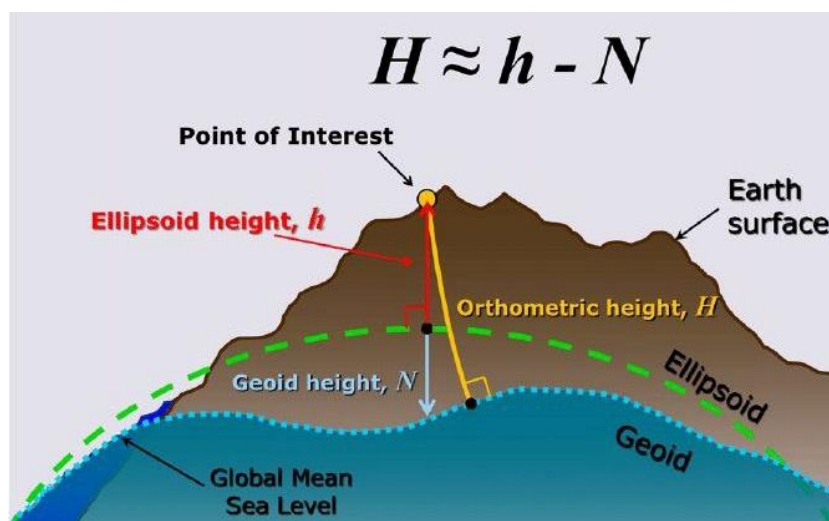


Рис. 2.15. Зв'язок систем відліку висоти

Геоїд може бути визначений як еквіпотенційна поверхня, тобто в будь-якій точці на поверхні геоїду сила тяжіння має постійне значення. Через те, що Земля має нерівномірну щільність та розташування земних мас, змінюється і сила тяжіння, викликаючи підвищення у більш щільних та зниження у менш щільних регіонах. Тому геоїд має складну форму і не відповідає еліпсоїду. Враховуючи, що сила тяжіння не пряма лінія, потрібно ще враховувати її відхилення і все стає дуже складно, але є просте рішення, яке допомагає в багатьох ситуаціях.

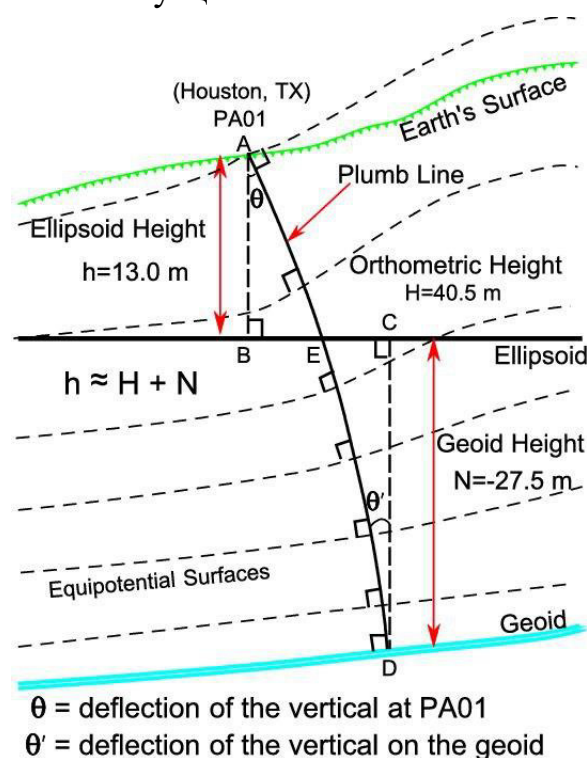


Рис. 2.16. Представлення відхилення прямовисної лінії

Для невеликих за площею ділянок можливо застосувати локальну трансформацію координат методом інтерполювання. Цей метод можна використовувати як для планових так і для висотних координат на територіях розміром до 15*15 км. Суть методу полягає в тому, що ви визначаєте координати точок в системі ГНСС на точках з уже відомими координатами та визначаєте різниці цих координат. На основі різниць в точках методом інтерполювання знаходяться значення різниць між цими точками. Таким чином формується поле трансформації (рис. 2.17).

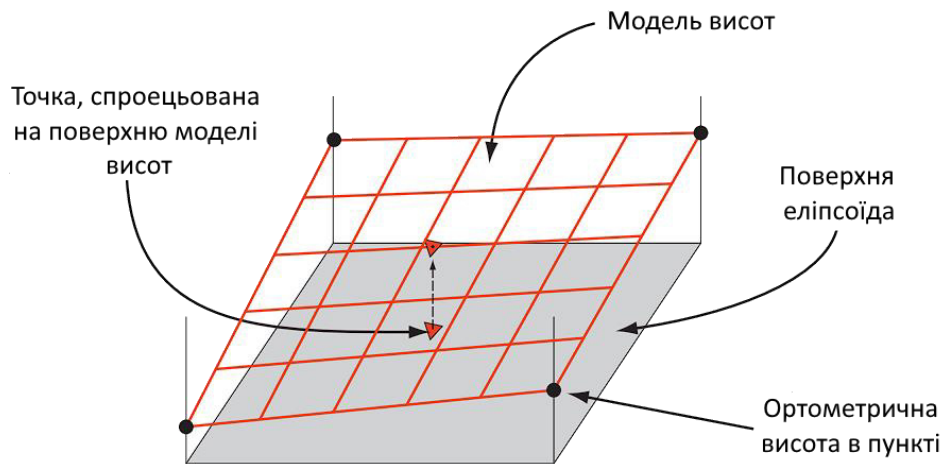


Рис. 2.17. Трансформація координат методом інтерполювання

Запитання для самоперевірки

1. Що таке геоцентрична система координат у ГНСС?
2. У чому різниця між глобальними і локальними системами координат?
3. Як відбувається трансформування між WGS-84 і місцевою системою координат?
4. Які параметри враховуються при трансформуванні координат?
5. Що таке геодезичний датум і як він використовується?
6. Як пов'язана еліпсоїдна висота з нормальними та ортометричними висотами?
7. Що таке картографічна проекція?
8. Які найпоширеніші проекції використовуються в Україні?
9. Як координати на площині відрізняються від просторових координат?
10. Що таке зона в проекції Гаусса-Крюгера?

Лекція 3. Орбіти супутників

План

1. Види орбіт.
2. Параметри орбіт.
3. Ефемериди та альманахи.

1. Види орбіт

Залежно від кута нахилу орбіти супутників поділяють на екваторіальні, полюсні та похилі (рис. 3.1). Розташування супутника на полюсній орбіті дозволяє виконувати дослідження всієї земної поверхні. Нахилені орбіти забезпечують смугове знімання земної поверхні. Чим більша висота ШСЗ та нахил орбіти, там ширшою є земна смуга знімання.

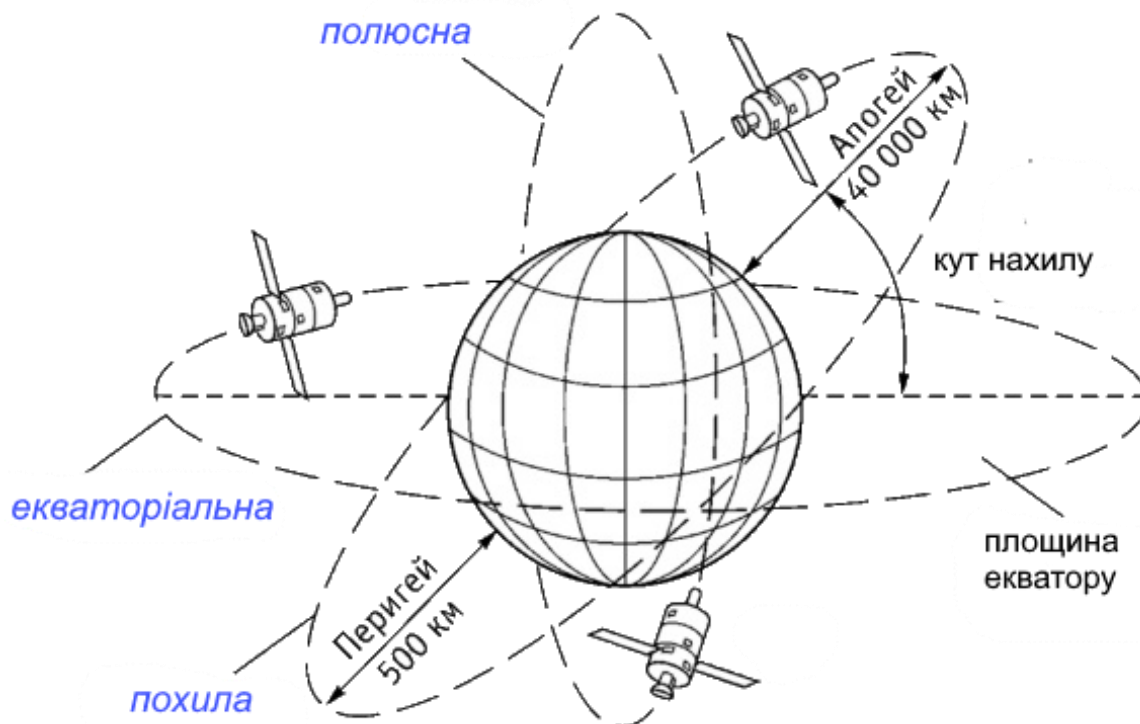


Рис. 3.1. Види орбіт залежно від кута нахилу

Також орбіта може бути Геосинхронною, коли ШСЗ має період обертання, що дорівнює середньому періоду обертання Землі. Якщо ексцентриситет орбіти та її нахил дорівнюють нулю, то така орбіта забезпечує фіксоване положення супутника на небосхилі відносно Землі і має назву Геостационарної (рис. 3.2). На такій орбіті супутник перебуватиме в одній точці над поверхні землі.

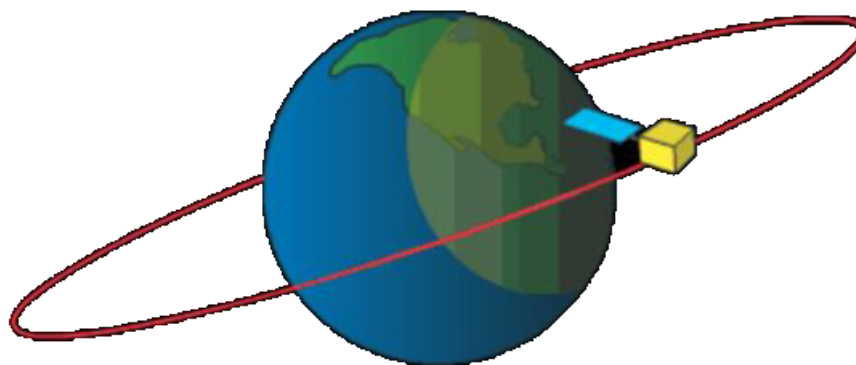


Рис. 3.2. Геосинхронна орбіта

Згадайте, в першому відео ми говорили про різні ГНСС системи, їх відмінності і ми бачили, що супутники знаходяться на різних висотах, але й у однієї з систем вони були на геостационарній орбіті. Про яку систему ми говоримо?

Супутники зазвичай знаходяться на висоті 36 000 км над екватором з таким самим періодом обертання, як у Землі. Така орбіта має свої недолі та переваги. Обмежене просторове охоплення – спостереження завжди ведуться на одній території, але для супутників погоди чи зв'язку це чудово підходить.

Низька навколосемна орбіта. Кругова орбіта (рис. 3.3), що рухається відносно Землі на 160-2000 км - може бути полярною або неполярною. Спостереження однієї й тієї ж території проводяться значно рідше, але по всій території Землі. Чудово використовується супутниками ДЗЗ Landsat або Terra.



Рис. 3.3. Кругова орбіта

Є варіація Полярна орбіта. Забезпечує глобальне покриття , а частота вимірювань може варіюватися від 1 вимірювання на день до 1 вимірювання на місяць.

Неполярна орбіта. Не забезпечує глобального покриття. Частота вимірювань може змінюватися кожні кілька годин до кількох тижнів

Орбіти GPS системи

Знаходяться на шести різних кругових орбітах, розташованих під кутом 60° один до одного таким чином, щоб з будь-якої точки земної поверхні було видно від чотирьох до дванадцяти таких супутників.

- На кожній орбіті знаходиться по 4 супутника
- Висота орбіт приблизно дорівнює 20200 км
- Період обертання кожного супутника навколо Землі становить 12 годин



Рис. 3.4. Загальна картина висот орбіт НСС систем

2. Параметри орбіт

Німецький астроном Йоганн Кеплер (1571 - 1630) використав результати власних спостережень та багаторічних спостережень Тихо Браге (1546 - 1601) за планетою Марс і відкрив три закони, які описують незбурений рух планет навколо Сонця. Ці закони є універсальними та використовуються також для опису руху штучних супутників навколо Землі.

Перший закон Кеплера для ШСЗ: супутники рухаються, в загальному випадку, по еліптичній орбіті, в одному з фокусів якої знаходиться Земля.

На рис. 3.5 зображено еліптичну орбіту штучного супутника Землі (ШСЗ) з центром в точці O . Центр мас Землі знаходиться в одному з фокусів еліптичної орбіти, в даному випадку - в точці F_1 . Найближча до Землі точка орбіти Π називається перигей, а найдальша A - апогей. Лінія, що сполучає ці точки – лінія апсид (лінія AP).

Закони Кеплера для ШСЗ справедливі у випадку, коли існує тільки взаємне притягання маси ШСЗ і маси Землі, на ці тіла не діють ніякі інші сторонні сили, наприклад. планети Сонячної системи та їх супутники, а маси ШСЗ та Землі сконцентровані в матеріальних точках, відповідно до рис. 3.5 – в точках C та F_1 , або ж допускають, що планета Земля має вигляд кулі з однорідним за густиною розподілом мас [6]. Рух супутника у цьому випадку називають незбуреним.

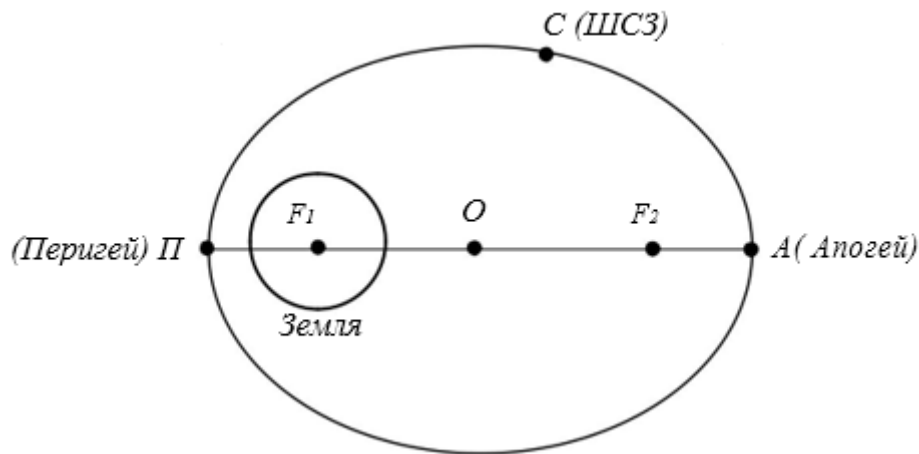


Рис. 3.5. Рух супутника по еліптичній орбіті

Сила взаємного притягання ШСЗ масою m та Землі масою M , центри мас яких знаходяться на відстані r один від одного, згідно з Законом Ньютона (1643 – 1727), дорівнює:

$$F = f \frac{M \cdot m}{r^2},$$

де f - універсальна гравітаційна стала, яка дорівнює $f = (6,672 \pm 0,041) \cdot 10^{-11} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$.

На рис. 3.6 зображено чотири положення ШСЗ: C_1 , C_2 , C_3 та C_4 та радіус-

Вектори супутника $FC_1 \square r_1$, $FC_2 \square r_2$, $FC_3 \square r_3$, $FC_4 \square r_4$.

Радіус-вектори r_1 та r_2 утворюють сектор FC_1PC_2 , а радіус-вектори r_3 та r_4 утворюють сектор FC_3AC_4 .

Другий закон Кеплера для ШСЗ: радіус-вектор супутника за рівні проміжки часу описує рівновеликі площі.

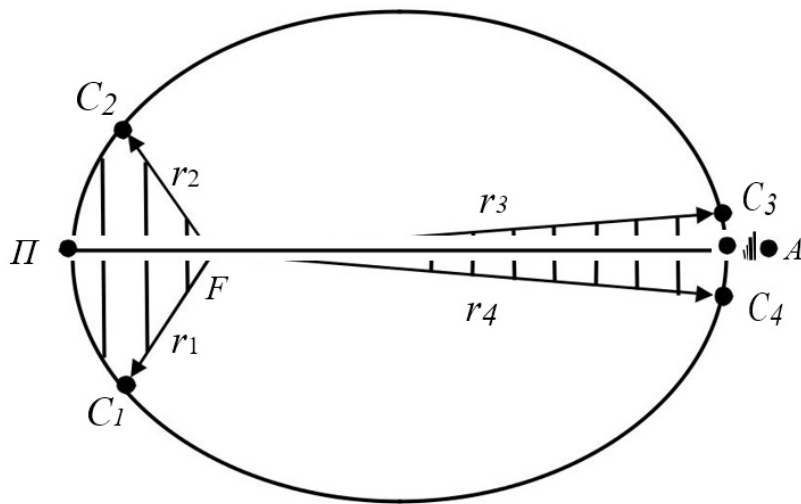


Рис. 3.6. До другого закону Кеплера

Це означає, що площі секторів FC_1PC_2 та FC_3AC_4 , які утворює супутник за один і той же проміжок часу Δt , мають рівні значення. В аналітичній формі другий закон Кеплера можна записати за допомогою формули

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{const},$$

де ΔS - приріст площі сектора, який описує радіус-вектор супутника за проміжок часу Δt

На рис. 3.7 зображено дві орбіти ШСЗ, великі півосі яких дорівнюють a_1 та a_2 , відповідно. Обидві орбіти мають спільний фокус F , в якому знаходиться центральне тіло – Земля. Кожний з супутників робить повний оберт за період T_1 та T_2 , відповідно.

Третій закон Кеплера для ШСЗ: супутників навколо Землі відносяться як квадрати періодів обертання двох кубів великих півосей їх орбіт.

Тобто:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

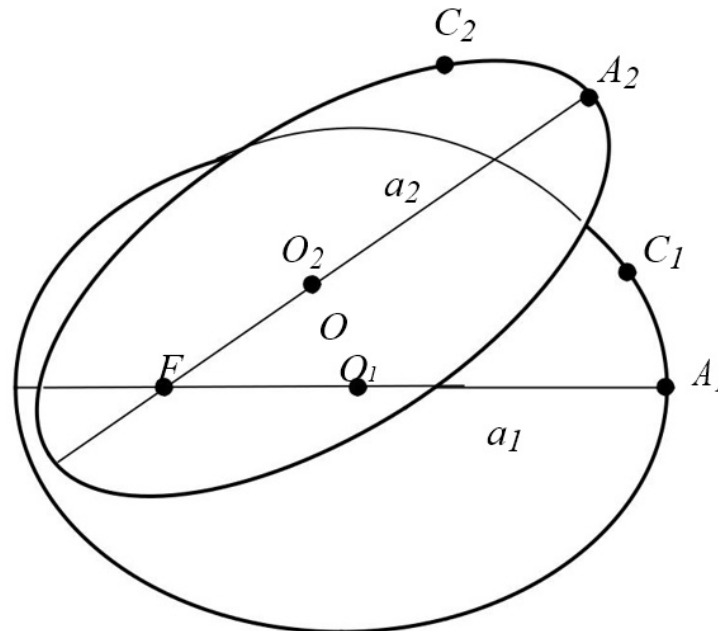


Рис. 3.7. Третій закон Кеплера

Третій закон Кеплера було отримано за умови, що під час руху матеріальної точки масою m по криволінійній траєкторії відносно центрального тіла масою M відцентрова сила повинна врівноважуватись силою гравітаційного притягання/

Таблиця 3.1

Висотні параметри орбіти ШСЗ

Назва орбіти	Абревіатура назви орбіти	Висота над поверхнею Землі, км
Низьковисотна	LEO	200 - 1200
Середньовисотна	MEO	1200 – 35790
Геосинхронна	GEO	35790
Геостационарна	GSO	35790
Висотна	HEO	вище 35790

Кеплерові елементи — шість елементів орбіти, що визначають положення небесного тіла в просторі у задачі двох тіл:

- велика піввісь (a),
- ексцентриситет (e),
- нахил (i),
- довгота висхідного вузла (Ω),
- аргумент перигелію (ω),
- середня аномалія (M_0).

Перші два визначають форму орбіти, третій, четвертий і п'ятий - орієнтацію площини орбіти по відношенню до базової системи координат, шостий - положення тіла на орбіті.

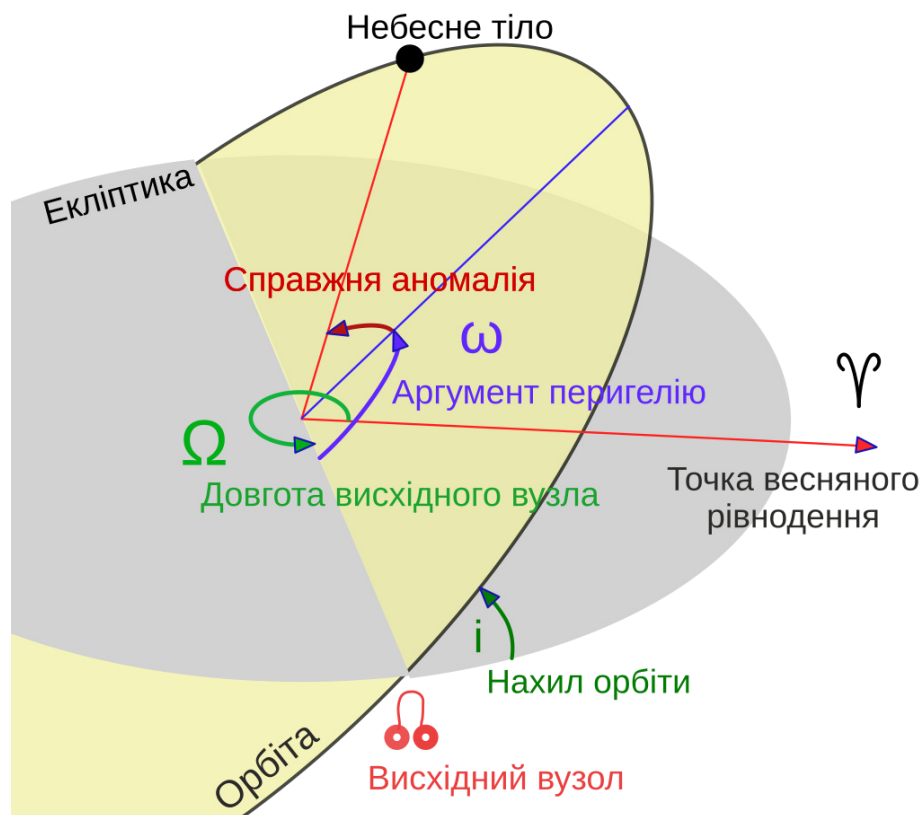


Рис. 3.7. Кеплерівські елементи орбіти включаючи аргумент перигелію

Велика піввісь — це половина головної осі еліпса $|AB|$. В астрономії характеризує максимальну відстань небесного тіла від центру еліптичної орбіти.

Ексцентриситет (позначається e) — числова характеристика конічного перетину. Ексцентриситет інваріантний щодо рухів площини і перетворень подібності. Ексцентриситет характеризує «стислість» орбіти. Він виражається за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}},$$

де b — мала піввісь

Можна розділити зовнішній вигляд орбіти на п'ять груп:

- — коло
- — еліпс
- — парабола
- — гіпербола
- — пряма

Нахил орбіти небесного тіла — це кут між площиною його орбіти і площиною відліку (базовою площиною).

Зазвичай позначається буквою i (від англ. Inclination). Нахил вимірюється в кутових градусах, мінутах і секундах.

Якщо $0 < i < 90^\circ$, то рух небесного тіла називається прямим.

Якщо $90^\circ < i < 180^\circ$, то рух небесного тіла називається зворотним.

Для штучних супутників Землі за площину відліку зазвичай вибирають площину екватора Землі. Знаючи нахил двох орбіт до однієї площини відліку і довготи їх висхідних вузлів, можна обчислити кут між площинами цих двох орбіт - їх взаємний нахил за формулою косинуса кута.

Довгота висхідного вузла - один з основних елементів орбіти, що використовується для математичного опису орієнтації площини орбіти відносно базової площини. Визначає кут в базовій площині, утворений між базовим напрямком на нульову точку і напрямком на точку висхідного вузла орбіти, в якій орбіта перетинає базову площину в напрямку з півдня на північ.

Аргумент перицентру — визначається як кут між напрямками з притягувального центру на висхідний вузол орбіти і на перицентр (найближчу до притягувального центру точку орбіти супутника), або кут між лінією вузлів і лінією апсид. Відраховується з притягувального центру в напрямку руху супутника звичайно вибирається в межах 0° - 360° .

Середня аномалія для тіла, що рухається по незбуреній орбіті - добуток його середнього руху та інтервалу часу після проходження перицентру. Таким чином, середня аномалія - кутова відстань від

періцентру гіпотетичного тіла, що рухається з постійною кутовою швидкістю, що дорівнює середньому руху.

Позначається буквою ММ.

3. Ефемериди та альманах

Слід розрізняти два види ефемерид:

- Broadcast - ефемериди, тобто передані сигналом супутника;
- уточнені ефемериди.

Broadcast - ефемериди представляють собою екстрапольовані (прогнозовані) значення параметрів орбіт супутників. Вони модулюються в блоці даних із супутниковим сигналом після чого представляються в розпорядження користувача вже під час спостережень. Вони дозволяють визначити місцезнаходження пункту в реальному часі, правда, з більш низькою точністю в порівнянні з точними ефемеридами. У вище згаданому блоці даних разом з ефемеридами для конкретного супутника передаються ще коректуючі параметри для бортового годинника і іоносфери, а також скорочена (за точністю) інформація про орбіти, решти супутників системи (альманах).

Необхідно підкреслити, що OCS, хоча і задовольняє потреби навігації і вимоги щодо точності розв'язку багатьох задач геодезичної практики, однак, в таких роботах, як, наприклад, створення фундаментальних опорних геодезичних мереж, геодинамічні дослідження і т.п., бажано отримувати результати з вищою, максимально можливою точністю. В методі GPS цього можна досягти, але вже в неоперативному (або в пост-оперативному) режимі, шляхом використання, замість прогнозованих - "бортових ефемерид", "уточнених ефемерид" - тобто координат космічних апаратів, визначених за результатами спостережень моніторингових станцій і проінтерпольованих безпосередньо на моменти GPS-спостережень в геодезичних пунктах. Так, Військове картографічне управління США створило додатково шість перманентних GPS-станцій, рознесених по планеті, результати спостережень яких використовує в комбінації з даними станцій OCS для обчислення уточнених ефемерид. В зв'язку з тим, що ці уточнені ефемериди доступні тільки військовим користувачам, цілий ряд цивільних організацій створили власні мережі перманентних GPS-станцій і центрів для обчислення таких ефемерид і забезпечення ними своїх користувачів. Наприклад, CIGNET (Cooperative International GPS Network),

IGS (International GPS service for Geodynamics), CODE (Centre of Orbit Determination for Europe). Зрозуміло, що ці установи не мають доступу до контролю і керування самою системою GPS.

Календар - система обчислення довготривалих проміжків часу. Подібні обчислення виникли ще в прадавні часи, оскільки від циклічних проміжків часу (рік, місяць, доба) залежать життєво необхідні для людей явища природи, наприклад, погода, ріст культурних рослин, поведінка тварин, тощо. Саме ці циклічні проміжки часу і використовуються в основному в календарях.

З розвитком і накопиченням даних про рух Сонця, Місяця і Землі календар постійно вдосконалювався і уточнювався, що призвело до заплутаної ситуації в визначенні календарних дат. За основу сонячного календаря прийнято тропічний рік.

GPS-календар є своєрідною системою відліку часу, яка використовується для виконання та обробки супутникових радіовіддалемірних спостережень. За початкову епоху відліку часу для цієї системи прийнято початок доби за шкалою координованого всесвітнього часу UTC 6 січня 1980 р. В системі часу GPS опорною є шкала атомного часу TAI із сталим зсувом 19 с. Одиницями відліку GPS-часу є секунда, година, доба, тиждень. Починаючи із моменту часу 6 січня 1980 р. виконується суцільна нумерація GPS -тижнів. Нумерація діб виконується двома способами. У першому способі виконується прив'язка до днів тижня (неділя - 0, понеділок - 1, вівторок - 2, середа - 3, четвер - 4, п'ятниця - 5, субота - 6). У другому способі закладена суцільна нумерація діб (починаючи з одиниці) від початку поточного року. Система нумерації GPS- тижнів та діб є опорною для кодування всіх файлів, які містять необхідну інформацію про супутникові виміри. Інформація про GPS-календарі на найближчі роки міститься на Web-сторінці <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/calendr.php?locale=en>.

березень 2022 року							
Тиждень GPS	неділя 0	понеділок 1	вівторок 2	середа 3	четвер 4	п'ятниця 5	субота 6
2199			1 60 59639	2 61 59640	3 62 59641	4 63 59642	5 64 59643
2200	6 65 59644	7 66 59645	8 67 59646	9 68 59647	10 69 59648	11 70 59649	12 71 59650
2201	13 72 59651	14 73 59652	15 74 59653	16 75 59654	17 76 59655	18 77 59656	19 78 59657
2202	20 79 59658	21 80 59659	22 81 59660	23 82 59661	24 83 59662	25 84 59663	26 85 59664
2203	27 86 59665	28 87 59666	29 88 59667	30 89 59668	31 90 59669		

Рис. 3.8. ГНСС календар

Запитання для самоперевірки

1. Які типи орбіт використовуються у супутникових навігаційних системах?
2. У чому різниця між геостаціонарною та круговою орбітою?
3. Що таке параметри орбіти супутника?
4. Які параметри входять до шестиелементного опису орбіти?
5. Що таке афелій і перигей орбіти?
6. Як впливає ексцентриситет орбіти на її форму?
7. Що таке ефемеріди і яка їх роль у навігації?
8. У чому полягає різниця між ефемерідами та альманахом?
9. Яким чином оновлюється інформація про орбіти у приймачах?
10. Як часто супутники надсилають навігаційне повідомлення про орбіти?

Лекція 4. Сигнали з супутників

План

1. Фізичні основи сигналу, фазові та кодові хвилі.
2. Навігаційне повідомлення.
3. Обробка сигналу, конструкція приймача.

1. Фізичні основи сигналу, фазові та кодові хвилі

Давайте розберемось із визначенням дальності. Супутникове визначення дальності є основним принципом роботи GPS. Основний підхід можна записати простим виразом $D=V \cdot t$. Де D – це відстань від супутника до приладу на Землі, V – швидкість розповсюдження сигналу, T – час за який цей сигнал пройшов від супутника до приладу.

У випадку GPS ми вимірюємо радіосигнал, швидкість якого приблизно рівна швидкості світла, або майже 300 000 км на секунду. Отже, якщо ми можемо виміряти час подорожі, ми можемо обчислити відстань. Припустимо, що ми можемо поставити будильник на нашому приладі та супутнику на один і той же час. В результаті мелодія від супутника буде з невеликою затримкою, бо їй потрібно пройти понад 20 000 км. Затримка становитиме приблизно 0,07 секунди (70 мілісекунд).

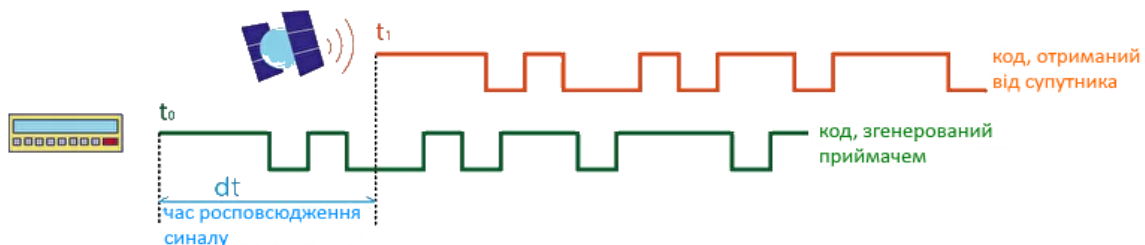


Рис. 4.1. Принцип визначення відстані по коду сигналу від супутника

Щоб точно визначити, на скільки була затримана версія супутника, ми починаємо відкладати версію одержувача, поки дві версії не будуть точно синхронізовані. Кількість часу, яку ми маємо перенести дорівнює часу подорожі версії супутника. Тепер ми знаємо дві складові для визначення відстані.

Замість мелодії супутники та ваш приймач використовують сигнал, який називається код псевдовипадкового числа (PRN) для визначення часу в дорозі і відповідно відстані. Ваш приймач ідентифікує кожен супутник за його кодом PRN і генерує той самий код PRN. Потім, використовуючи

процес, який називається кореляцією, він буде точно синхронізований (корельований) з відповідним кодом супутника. Тому щоб визначити відстань до кожного супутника, нам потрібно знати лише коли супутник почав передавати поточний «вірш» свого коду.

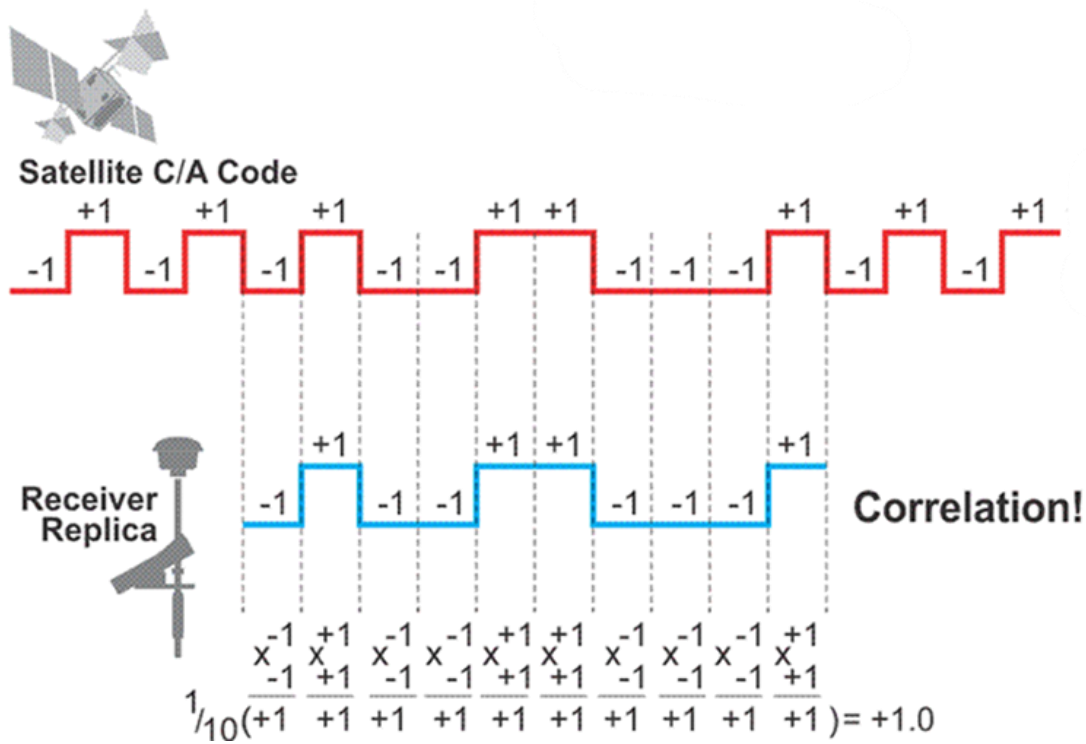


Рис. 4.2. Кореляція коду сигналу від супутника

Кожен супутник генерує свій власний унікальний код PRN (рис. 4.3). Код PRN це дуже складний цифровий код — послідовність імпульсів «включення» і «вимкнення», як показано тут. Послідовність не є справді випадковою, вона повторюється після 1 мілісекунди, звідси й назва «псевдовипадковий». Дещо схоже на випадковий шум.

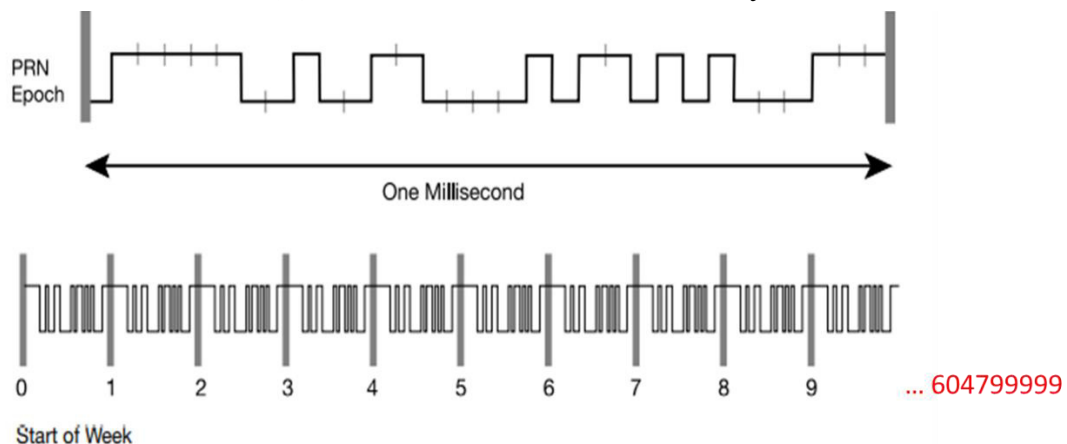


Рис. 4.3. PRN код

Цей PRN код, повторюється кожен мілісекунду і кожен цикл коду має унікальну тимчасову мітку. По суті час GPS починається з нуля на початку кожного тижня. Після цього кожна мілісекунда має унікальний послідовний ідентифікатор (від 0 до 604799999 протягом тижня). Це тегування часу забезпечує важливу можливість. Коли ваш приймач перевіряє певну отриману епоху (початок коду), він може сказати, коли саме ту епоху надіслав із супутника:

- унікальна ідентифікація кожного супутника
- забезпечує координацію часу для системи
- дає можливість «підсилити» малопотужний сигнал GPS, тому приймачі не потребують великих супутникових антен.

Незважаючи на те, що «пісня» кожного супутника, або PRN-код, є складною, ваш прилад теж це знає. Ваш приймач був запрограмований на код PRN кожного супутника в сузір'ї. Це ніби є цілий хор із принаймні 24 голосів співає там у космосі, і ваш приймач може вибрати окремі голоси і співати разом з ними.

По-перше, давайте трохи розглянемо базову геометрію, що стосується Землі та супутників. . Супутник безпосередньо над головою знаходиться на висоті приблизно 20 200 км від земної поверхні, супутник на горизонті знаходиться на 5600 км далі. Всі відстані між супутниками коливаються між цими двома крайнощами, коли вони знаходяться в полі зору вашого приймача. Сигнали супутників поширюються приблизно зі швидкістю світла та приймають між 67 і 86 мсек, щоб досягти землі. Сигнали, що надходять від різних супутників будуть мати різну затримку між їх значеннями, в основному залежно від того, де в небі знаходяться супутники.

У якийсь конкретний момент (зазвичай узгоджений із внутрішньою частиною приймача мілісекундний годинник), ми визначаємо, скільки залишилося до наступної епохи PRN на кожен отриманий сигнал. Це дає нам часткове вимірювання діапазону від 0 до 1,0 мс. Коли ми поєднуємо це значення з фактичною кількістю епох і множимо за швидкістю світла ми отримуємо псевдодальність до кожного супутника.

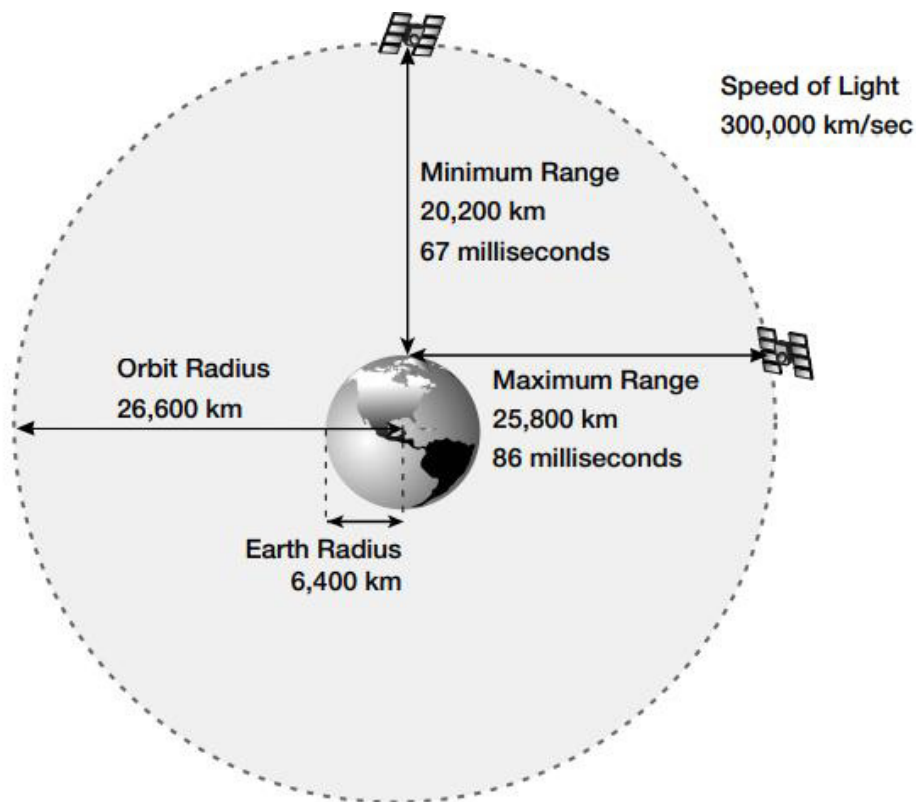


Рис. 4.4. Змінна відстань від супутника до точки на Землі

Наприклад, на рис. XX псевдодальність 1 становить 22 030,2 км ($73,434\text{мс} \times 300\text{ км/мс}$); псевдодальність 2 становить 20967,3 км; і псевдодальність 3 становить 23765,1 км.

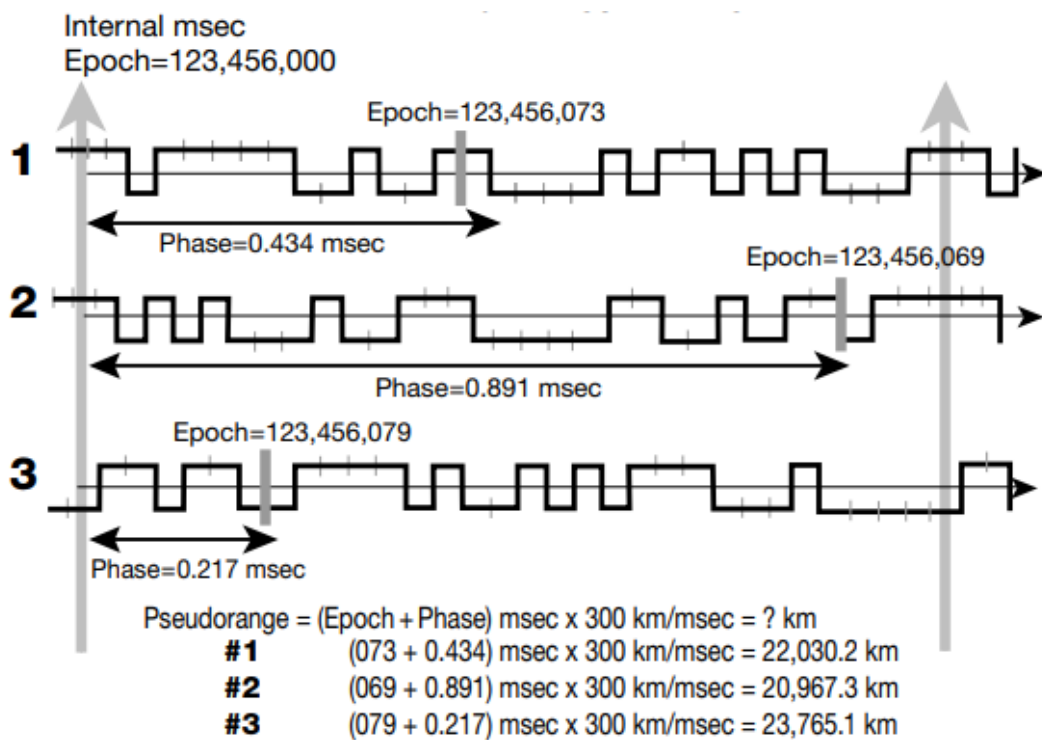


Рис. 4.5. Розрахунок псевдодальності по коду

Залежно від типу цього радіосигналу використовують 2 способи визначення дальності: за вимірюванням коду або фази несучої, які відрізняються за своєю природою та за точністю обчисленого рішення.

Точність суміщення псевдовипадкових послідовностей приймача і супутника дорівнює довжині символу, а це 3 м для цивільного C/A - коду та 0,3 м для захищеного P-коду, тому розрахувати псевдодальність точніше за ці величини не вийде.

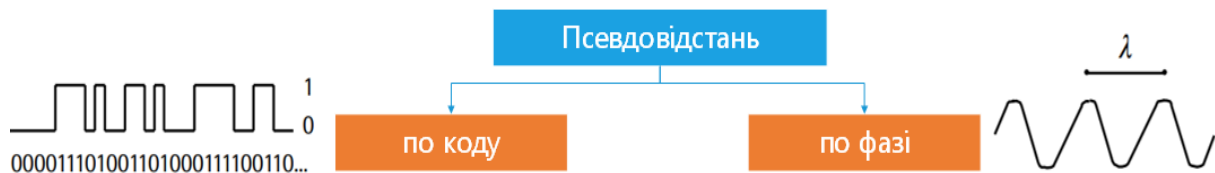


Рис. 4.6. Способи визначення псевдовідстані

Набагато вищої точності можна досягти, вимірюючи фазу радіосигналу із супутника (т.зв. «фаза несучої»). Довжина хвилі на частоті L1 = 19 см, а фаза цієї хвилі коливається в межах 360° , виходить, що математично можливо вирахувати псевдодальність із субміліметровою точністю. За аналогією з кодовим сигналом на супутнику та приймачі генеруються фазомодульовані сигнали, тільки вони ніяк не синхронізовані. Обчисленням усунення фазомодульованого сигналу, переданого зі супутника на приймач, визначається дрібна частина фази.

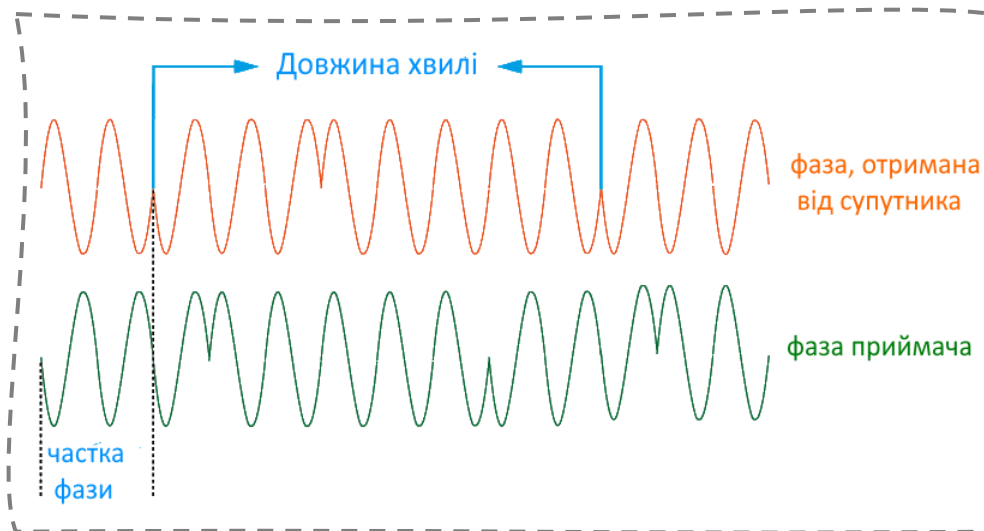


Рис. 4.7. Рішення фазової неоднозначності

Основна проблема – знайти ціле число довжин хвиль, оскільки хвилі не відрізняються одна від одної. Завдання з пошуку числа цілих фаз називається рішенням фазової неоднозначності і вирішується через системи

рівнянь. Приблизне рішення дозволяє перейти в плаваючий режим, а однозначне рішення – фіксований. Саме при фіксованому рішенні рекомендується проводити вимірювання.

На наступних заняттях ми ще поговоримо про застосування цих методів визначення псевдовідстані.

2. Навігаційне повідомлення

Оскільки всі супутники синхронізовані один з одним (пам'ятайте про атомні годинники та сегмент наземного керування), усі вони запускають епохи одночасно. Будь-які відмінності, які ми бачимо між отриманими сигналами зумовлені відмінностями у відстанях. Чим більше псевдодальність, тим далі цей супутник відносно інших.

Кожен супутник транслює два коди PRN, які ідентифікують конкретний супутник і надають посилення на системний час:

- Код Coarse Acquisition (C/A) для цивільних користувачів на частоті L1.
- Точний код (P) для військових користувачів на частоті L1 і L2.

Супутники також безперервно транслюють навігаційне повідомлення що накладається як на код C/A, так і на код P. Навігаційне повідомлення дозволяє вашому приймачу визначати положення супутників, їх «здоров'я», час GPS та інші фактори; він містить таку інформацію:

- Альманах: інформація про приблизну орбіту всіх супутників у сузір'ї.

Приймач використовує ці дані, щоб визначити, які супутники йому слід відстежувати (які знаходяться «в полі зору» і пропонують найкращу супутникову геометрію для найточнішої фіксації позиції). Дані альманаху зберігаються в пам'яті вашого приймача, навіть якщо приймач вимкнено на кілька місяців. При увімкненні приймача знову, як правило, він може повторно обчислити розташування супутника менш ніж за хвилину («теплий» старт).

Однак якщо пам'ять вашого приймача стерта і не містить альманаху, коли ви його вмикаєте, це може зайняти відносно багато часу (до 15 хвилин), щоб повторно отримати достатню кількість супутників для визначення місцезнаходження («холодний» старт).

- Ефемериди: передбачення поточного положення супутника-передавача та швидкість, визначену головною станцією керування та

завантажену в супутники. Ваш приймач використовує ці дані для обчислення положення супутника у будь-який момент часу.

- Параметри корекції супутникового годинника.
- Дані про стан супутника, які визначають, чи супутник працює належним чином.

Повне навігаційне повідомлення передається за 12,5 хвилин, а потім повторюється. У межах кожного циклу повторення супутниковий годинник і дані ефемерид для передачі повторюються кожні 30 секунд.

Типи інформації навігаційного повідомлення:

1. Ефемеридна інформація, необхідна для обчислення координат супутника з достатньою точністю

2. Похибка розбіжності бортової шкали часу щодо системної шкали часу для обліку зміщення часу космічного апарату при навігаційних вимірах

3. Розбіжність між шкалою часу навігаційної системи і національною шкалою часу, для вирішення завдання синхронізації споживачів

4. Ознаки придатності з інформацією про стан супутника для оперативного виключення супутників з виявленими відмовами з навігаційного рішення

5. Альманах з інформацією про орбітах і стан всіх апаратів в угрупованні для довгострокового грубого прогнозу руху супутників і планування вимірювань

6. Параметри моделі іоносфери, необхідні одночастотним приймачів для компенсації похибок навігаційних вимірювань, пов'язаних з затримкою поширення сигналів в іоносфері

7. Параметри обертання Землі для точного перерахунку координат споживача в різних системах координат

Ознаки придатності оновлюються протягом декількох секунд при виявленні відмови параметри ефемерид і часу, як правило, оновлюються не частіше ніж раз в півгодини. При цьому період оновлення для різних систем сильно відрізняється і може досягати чотирьох годин, в той час як альманах оновлюється не частіше ніж раз в день.

3. Обробка сигналу, конструкція приймача

На останок давайте подивимось на конструкцію ГНСС обладнання (рис. 4.8). Класична схема обладнання складається з приймача, контролера, та антени. Антена слугує засобом фіксації сигналу від супутника, цей сигнал

вона передає в приймач, який обробляє отриманий сигнал. По суті саме приймач «читає» навігаційне повідомлення. Контролер виступає в ролі інструменту управління даними, вибору налаштувань роботи приймача, параметрів обробки навігаційних повідомлень.



Рис. 4.8. Набір ГНСС обладнання Leica 1200

Але ці три компоненти можуть бути представлені не окремими приладами, наприклад антену та приймач часто об'єднують в одному корпусі, особливо коли мова йде про польове ГНСС обладнання. Роль контролера може на себе взяти телефон із встановленим відповідним ПЗ.

За складністю технічних рішень і обсягом апаратних витрат супутникові приймачі поділяють на:

Одноканальні - дозволяє в поточний момент часу вести прийом і обробку сигналу тільки одного супутника;

Багатоканальний - дозволяє одночасно приймати та обробляти сигнали декількох супутників.

В даний час в основному випускаються багатоканальні приймачі.

Крім того, приймачі можна розділити на два типи:

Односистемний - приймає сигнали GPS

Багатосистемний - приймає сигнали ГЛОНАСС і GPS, Galileo, Бейдоу, IRNSS, QZSS .

Типи і групи геодезичних супутникових приймачів:

Залежно від виду прийнятих і оброблюваних сигналів приймачі діляться на:

- кодові, одночастотні, що працюють по C / A-кодом;
- кодові двочастотні, орієнтовані насамперед на роботу з P-кодом;
- кодово-фазові одночастотні, які застосовують дальномерний C / A-код і фазові вимірювання тільки на частоті L1;

- кодово-фазові двочастотні, що використовують дальномірні коди і фазові вимірювання на частотах L1 і L2.

Класифікація прийомних систем за призначенням: навігація - автомобільний, морський, авіаційний транспорт; геодезія - геодезичні мережі, топографічні зйомки, прикладні роботи; ГІС - збір і аналіз даних для географічних інформаційних систем; телекомунікація - мобільний зв'язок; диспетчерська робота - служба пожежних, поліції, швидкої медичної допомоги; військове призначення.

За точністю супутникові приймачі діляться на три класи:

1. Навігаційний клас - точність визначення координат 10-200 м.
2. Клас картографії та гіс - 1-10 м.
3. Геодезичний клас - до 1 см (1-3 см в кінематичному режимі, до 1 см при статичних вимірах).

До навігаційного класу GNSS обладнання відносяться кодові приймачі (як правило GPS приймачі), що забезпечують точність позиціонування до 15 метрів. Більшість приймачів цього класу мають убудовані цифрові карти місцевості, бази даних населених пунктів, автозаправок, ресторанів тощо. У навігаційних GPS приймачах використовується навігаційне програмне забезпечення, що дозволяє шукати пункти, прокладати маршрути, записувати траєкторії під час руху.

Клас картографії та гіс це GNSS обладнання призначене для збирання просторової та атрибутивної інформації для створення цифрових карт та наповнення геоінформаційних систем. Воно може забезпечити точність позиціонування від кількох дециметрів до кількох метрів. Для завдань ГІС використовуються зазвичай кодові або фазові одночастотні приймачі, які можуть працювати як в автономному режимі, так і в режимі DGPS, приймаючи диференціальні поправки від супутникових систем EGNOS і OmniStar або від довгохвильових морських радіомаяків (MSK).

Геодезичний клас - GNSS приймачі, що забезпечують сантиметрову точність визначення координат пунктів. До цієї категорії відносяться приймачі, що вимірюють псевдодальність до супутника та фазу несучої хвилі. Майже всі сучасні геодезичні приймачі мають можливість приймати диференціальні поправки SBAS, що використовуються для задач навігації. Програмне забезпечення, що входить до комплекту геодезичних GNSS приймачів, дозволяє попередньо планувати зйомку, експортувати дані з приймача на комп'ютер для подальшої обробки (обчислення векторів та

вирівнювання мережі), створювати цифрові карти з атрибутивною інформацією, експортувати дані до різних ГІС пакетів для подальшої обробки.

Антенa – це саме та частина обладнання, яка фіксує нашу псевдовідстань до супутника. І для коректного переходу до відмітки на пункті стояння нам потрібно врахувати відстань від місця, де ми зафіксували сигнал до фізичної точки на землі. Тут важливо пам'ятати, що конструктивно фізичний центр антени, її геометрична середина не співпадає з так званим фазовим центром антени, де саме відбувається фіксація сигналу від супутника.

Фазовий центр ідеальної антени - це умовна точка в просторі, в якій всі сигнали приймаються або передаються незалежно від частоти, кута піднесення або радіосигналу азимуту (рис. 4.9). Фазові центри реальних антен менш постійні, і параметри PCV визначають зміни положення «нульової» точки фазового центру залежно від частоти, кута піднесення та азимуту сигналу, що приймається.

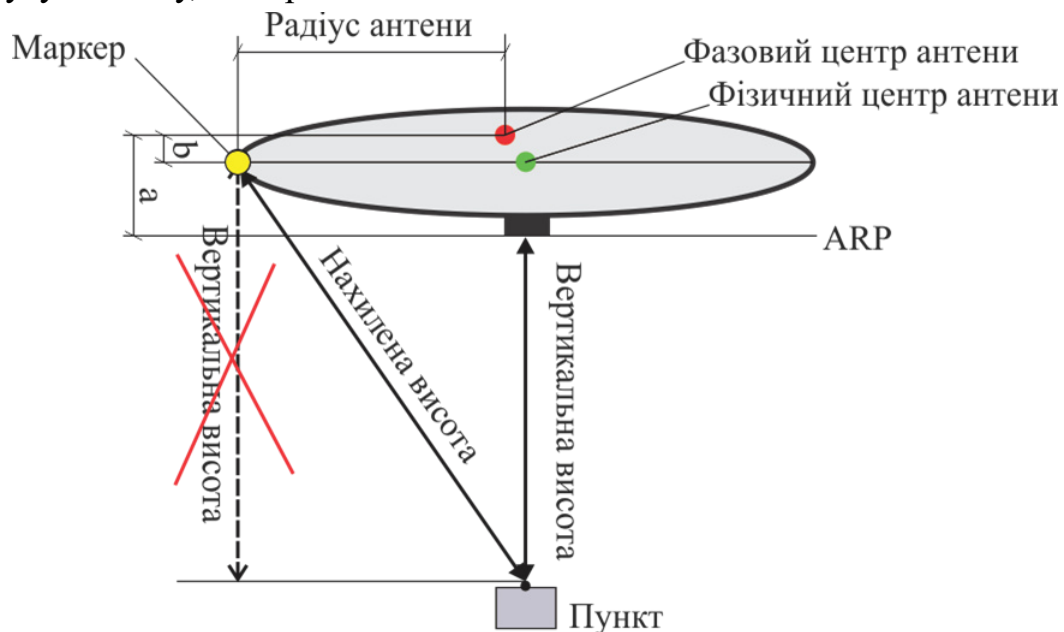


Рис. 4.9. Фазовий та фізичний центр антени

Тому вимірювання відстані до точки на землі від краю антени є неправильним. В кожній антені її виробником визначено зміщення фазового та фізичного центрів. Нам потрібно лише не забувати вибирати конкретну модель антени і зробити виміри висоти від низу антени, так званої точки Antena Reference Point.

Справжня картина із фазовим центром виглядає трохи складніше. Адже сам фронт хвилі сигналу є нерівномірним і очікуване положення сигналу може зміщуватись. Враховуючи, що сигнал у нас працює на декількох частотах, і спотворення у кожного фронту хвилі буде різне, то ми отримаємо ще різні фазові центри для кожної із них.

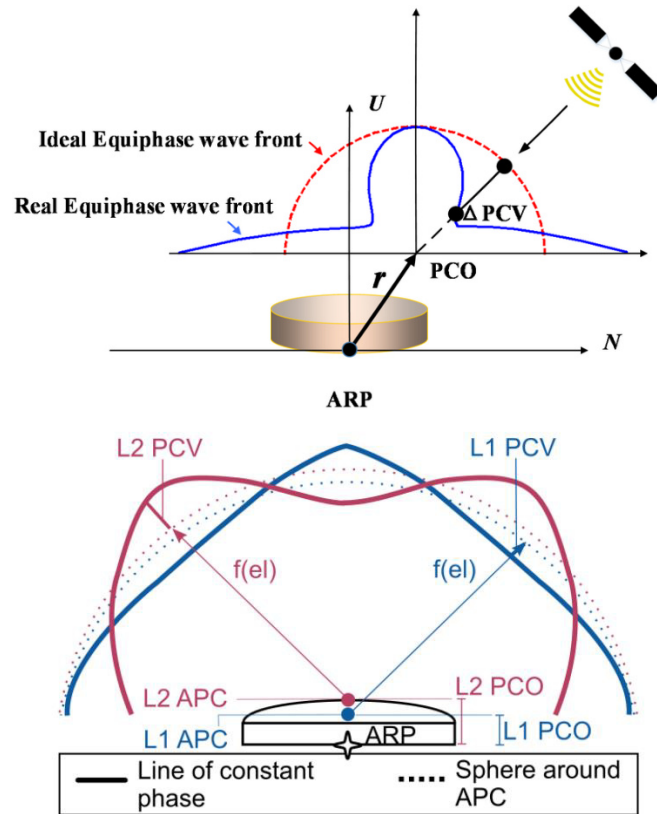


Рис. 4.10 Фазові центри антени для різних частот

Ці різниці між тим, що ми знаємо й очікуємо і тим, що по факту відбувається під час вимірювань дають нам помилки при наших вимірюваннях.

Дані варіацій фазового центру PCV заносяться у файл стандартизованому форматі ANTEX, який може бути використаний при високоточних вимірюваннях. Азимутальна орієнтація антени ровера зазвичай невідома, тому поправки кожному за положення антени в горизонтальній площині неможливо знайти враховані. Дані варіації PCV у файлі ANTEX зазвичай надаються як функція кута піднесення та частоти, але з усередненими даними азимуту для кожного кута піднесення та частоти (поправки без урахування азимуту).

Таким чином, поправки можуть застосовуватися для кожної частоти та кута підвищення, але помилки, пов'язані зі зміною азимутального параметра

PCV, не можуть бути виправлені в ГНСС-приймачі. При вимірах в режимі «кінематика реального часу» (RTK) системна помилка є середньою квадратичною помилкою PCV антен базового і рухомого приймача.

Геодезичні антени можна поділити на декілька видів:

Геодезична антена для стандартного застосування. Класичні геодезичні супутникові антени застосовується для роботи з мобільними та базовими приймачами. Вони також можуть застосовуватися під час створення локальних та регіональних мереж референцних станцій. Це компактна антена із вбудованим захистом від перевідбитих сигналів.

Кільцева безвідбивна антена (choke ring). Однією з дуже поширених форм антен стали антени типу choke ring - «дросельне кільце». Такі антени особливо ефективні в боротьбі з багатоканальністю сигналів. Особливістю в їх конструкції є наявність кондуктивних кілець. Дані кільця не впливають на прямий сигнал, за винятком деякого зменшення посилення сигналу на малих висотах; для великих висот кондуктивні кільця працюють як плоска екрануюча площа. Дана антена має високу точність, чудові можливості для придушення ефекту багатопроменевої супутникового сигналу і високою стабільністю положення фазового центру (<1мм) і стійкістю до RF спотворень.

Choke ring антена відповідає вимогам створення мереж базових GNSS станцій у всьому світі. Антени даного типу дообладнуються спеціальними ковпаками для захисту від опадів та інших зовнішніх дій.

Нове покоління високоточних супутникових антен кільцевих безвідбивних антен має нову конструкцію у вигляді 3D конуса, яка має низку істотних переваг у порівнянні зі стандартною 2D антеною. Така супутникова антена розроблена для вимірювань із використанням сигналів систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo та Compass. Антенні елементи даного типу є галузевим стандартом у галузі високоточних геодезичних вимірів.

Ринок ГНСС приймачів.

AG-Dream II: інноваційна серія приймачів GNSS для використання у сільському господарстві. AG-Dream має вбудований високоточний OEM приймач супутникових сигналів та антенний пристрій в одному міцному корпусі для практичного використання в жорстких умовах навколишнього середовища. Надзвичайна ефективність прийому та обробки кодових та фазових сигналів L1 GPS, G1 GLONASS, B1 Beidou та E1 Galileo разом зі спеціальним фільтром Pass-To-Pass (з англ. – «колія в колію») забезпечують

високоточне відносне визначення координат від епохи до епохи на субсантиметровому рівні. Це гарантує похибку менше 10 см у перекритті сільськогосподарської техніки на інтервалі до 15 хвилин (тобто: відхилення від заданого курсу протягом 15 хвилин становитиме менше 10 см).



Рис. 4.11. Антена AG-Dream II

AG-Dream: Вимірювання контурів полів з розрахунком площі. Точний і контрольований рух вздовж паралельних прямих або квазіпрямих: після першого проходу по полю задається трек від точки А до точки В з подальшою розміткою всього поля з урахуванням ширини робочого інструмента. Повне відображення необхідної основної та допоміжної інформації на екрані Android пристрою, включаючи зчитувану швидкість. Можливість збереження треків в пам'яті пристрою з можливістю їх передачі для зберігання в зовнішньому сервері. Можливість розрахунку оброблених площ. Звуковий супровід роботи. Відображення якості визначення координат GPS приймача з видачею попереджувальних повідомлень.



Рис. 4.12. Антена AG-Dream

EPSSKit-7 – це багаточастотний мультисистемний приймач з темпом реєстрації сирих GNSS вимірювань (кодових і фазових псевдодальностей) до 20 Гц, призначений для роботи з цифровими фотокамерами та іншими зовнішніми пристроями.

EPSSKit разом з антеною має надлегку вагу та малі габарити з метою використання на борту БПЛА. У пристроях EPSSKit закладений принцип

реєстрації сирих GNSS вимірювань з наперед заданим темпом і фіксацією, так званих, EVENT-маркерів або маркерів подій від однієї або декількох цифрових камер. Приладом фіксується момент часу надходження маркера з похибкою до 20 нс (СКП) і поточні (навігаційні) координати приймальної антени, відповідні даному моменту часу. Координати фіксуються в автономному режимі роботи приладу і мають похибку до 1.2 м (СКП). У режимі післясеансної обробки з похибкою до 1 см може бути відновлено як координати центрів знімків, так і вся траєкторія БПЛА в цілому.



Рис. 4.13. EPSKit-7: багаточастотний GNSS приймач

EPSKit-STAR – це GNSS приймач на базі OEM модуля NovAtel OEMSTAR, який призначений для забезпечення (підтримки) аерофотозйомки в режимі Post-Processing Kinematic (PPK). Пристрій приймає сигнали та реєструє виміри від супутників систем GPS та ГЛОНАСС в частотному діапазоні L1 з темпом 10 Гц (10 разів за 1 секунду). Має вхід для підключення цифрової камери з метою отримання та реєстрації маркерів подій (моментів спрацьовування затвора камери) в загальному потоці сирих GNSS даних для подальшої обробки. Обробка зареєстрованих даних пристрою EPSKit сумісно з вимірами базової станції дозволяє отримати координати центрів знімків з похибкою, що не перевищує 1.5 – 2 см. Пристрій має вбудовану пам'ять (флеш-накопичувач) до 8 Гб. Компактні габарити та мала вага пристрою забезпечує ефективне його використання навіть на малих коптерах – типу Phantom 4 або Mavic Pro.



Рис. 4.14. EPSKit-STAR

Антенa обладнана надійним підсилювачем з низьким рівнем шуму (LNA) і попереднім фільтром і забезпечує високий коефіцієнт посилення по всьому спектру корисних GNSS сигналів. Виробник мінімізував можливість прийому позасмугових сигналів високого рівня, включаючи 700 МГц LTE. VC6150 ідеально підходить для використання з постійно діючими GNSS станціями, володіючи унікальними характеристиками прийому корисного сигналу і стабільності фазового центру по всьому діапазону азимута і кута місця візування на GNSS супутники (PCV і PCO) для всіх робочих частот GNSS.



Рис. 4.15. VC6150 VeraChoke високоточна GNSS антена

Двухантенний GNSS приймач «КУТОМІР-Д» призначений для визначення в реальному масштабі часу: поточних географічних координат, висоти (еліпсоїдальної і ортометричної), складових вектора швидкості, параметрів стану шкали часу, а також азимута істинного і кута місця базової лінії, сформованої антенами. Визначення всіх параметрів здійснюється за сигналами глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS) GPS і GLONASS в частотних діапазонах L1 і L2 (опціонально доступні сигнали Beidou і Galileo).



Рис. 4.16. Кутомір-Д: двохантений GNSS приймач для визначення кутової орієнтації

Compass 3 – мініатюрний GNSS приймач з однією кнопкою та декількома «лампочками», модулем 4G, Wi-Fi та Bluetooth, має підключення до RTK може отримувати сантиметрову точність. При підключенні до планшета або смартфона відображає отримані координати і може уміститися в кишені піджака.



Рис. 4.17. Compass 3

INSIGHT V1 – це GNSS-приймач (використовується стандартний GALAXY G6) і фотокамеру, прилад також має підключення до RTK і дозволяє координувати розпізнані цілі за отриманим фотозображенням. Цікаве рішення для координування недоступних чи небезпечних життєвих об'єктів.



Рис. 4.18. ГНСС приймач INSIGHT V1

Запитання для самоперевірки

1. Які частоти використовуються в ГНСС системах?
2. У чому полягає різниця між кодовими та фазовими вимірами?
3. Який фізичний принцип лежить в основі формування сигналу?
4. Що таке псевдовідстань і як вона вимірюється?
5. Які компоненти входять до навігаційного повідомлення?
6. Яке значення має несуча хвиля у фазових вимірах?
7. Як побудований ГНСС-приймач і які його основні блоки?
8. Що таке мультиплексування сигналу?
9. Які методи використовуються для обробки сигналу в приймачі?
10. Як виконується демодуляція навігаційного повідомлення?

Лекція 5. Класифікація основних факторів, що впливають на точність визначення координат

Під час планування GNSS спостережень, необхідно звернути увагу на такі аспекти:

- визначення необхідної точності виконання геодезичних робіт
- врахування впливу факторів, що впливають на точність позиціонування та передачі координат на монтажний горизонт (затримки іоносфери, багатошляховість, геометричний фактор, розташування приймача).
- вибір принципу позиціонування приймачів (відносні, абсолютні, статичні, динамічні)
- визначення методу перетворення систем координат.
- оптимізація вибору технічного забезпечення проведення робіт.

Фактори, що впливають на точність та якість передачі координат на монтажний горизонт супутниковими методами можна розділити на два типи:

1. Вплив на точність визначення відстані
 - похибки навколишнього середовища
 - похибки приладу
 - похибки викликані геометрією мережі та сузір'я супутників
2. Вплив на точність обчислення координат точок
 - похибки методу перетворення систем координат
 - похибки вихідних даних (опорної мережі)

Загальна похибка визначення координат GNSS методом має наступний вигляд:

$$m_{GNSS} = \sqrt{m_{НС}^2 + m_{ПРИЛ}^2 + m_{ГФ}^2 + m_{ГП}^2}, \quad (5.1)$$

де $m_{НС}^2$ – СКП навколишнього середовища,

$m_{ПРИЛ}^2$ – СКП приладу,

$m_{ГФ}^2$ – СКП геометричного фактору,

$m_{ГП}^2$ – СКП геодезичної прив'язки (вихідних даних).

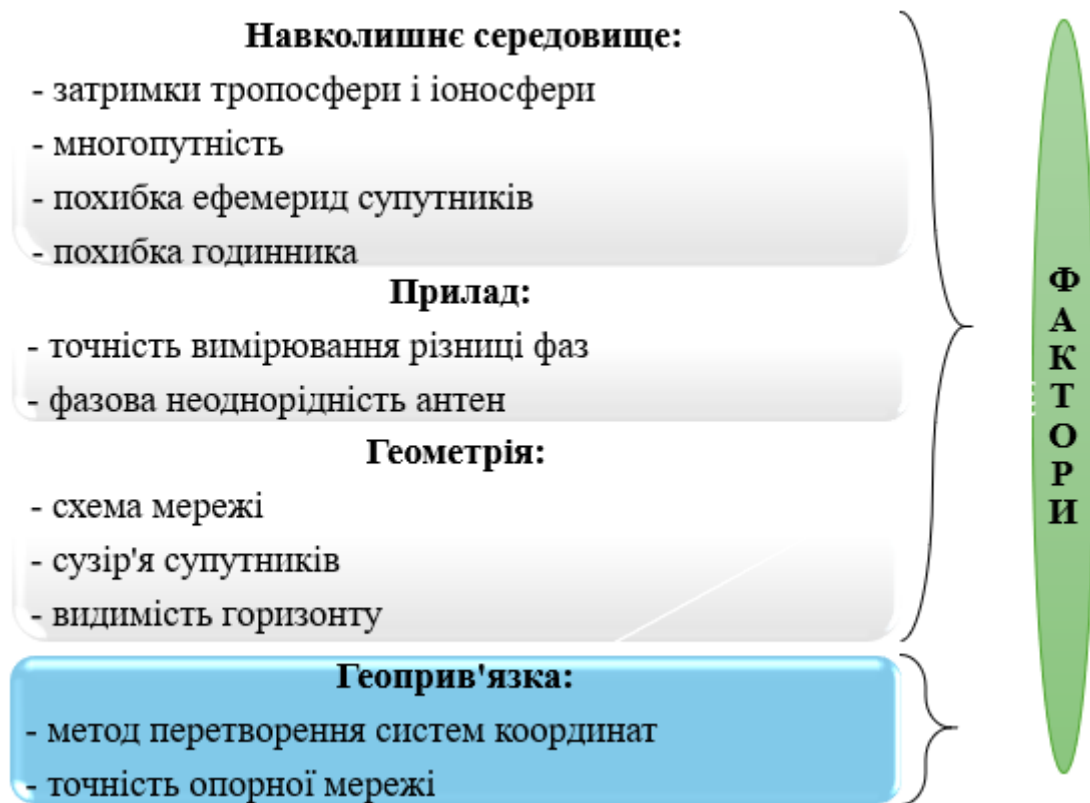


Рис. 5.1. фактори впливу на точність GNSS – позиціонування

Фактори впливу навколишнього середовища, геометрії та похибок приладу об'єднаємо в загальну похибку визначення відстані:

$$m_D = \sqrt{m_{\text{НС}}^2 + m_{\text{ГФ}}^2 + m_{\text{ПРИЛ}}^2} . \quad (5.2)$$

Тоді похибку визначення координат пункту з GNSS спостережень напишемо в наступному вигляді:

$$m_{\text{GNSS}} = \sqrt{m_D^2 + m_{\text{ГП}}^2} . \quad (5.3)$$

1. Похибки викликані впливом навколишнього середовища

$$m_{\text{НС}}^2 = m_{\text{троп.}}^2 + m_{\text{іон.}}^2 + m_{\text{еф.}}^2 + m_{\text{год.}}^2 + m_{\text{мп}}^2 , \quad (5.4)$$

де $m_{\text{троп.}}$ — похибка викликана тропосферною затримкою,

$m_{\text{іон.}}$ — похибка викликана іоносферною затримкою,

$m_{\text{еф.}}$ — похибка визначення ефемерид супутників,

$m_{\text{год.}}$ — похибка годинників,

$m_{\text{мп}}$ — похибка за багатошляховість сигналу

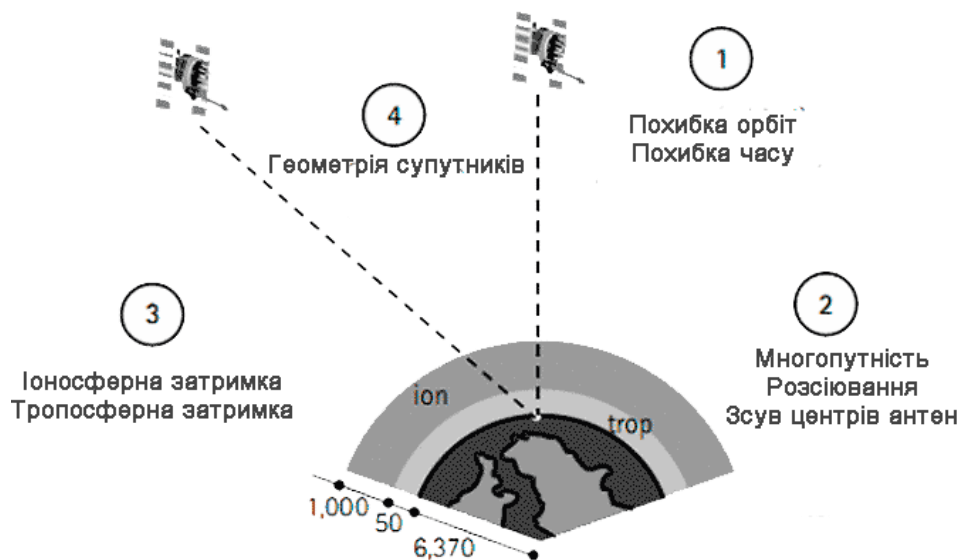


Рис. 5.2. Фактори впливу на точність визначення відстані

Похибки вимірювань, обумовлені різними чинниками, можуть бути оцінені в наступних межах.

а) Похибка викликана тропосферною і іоносферною затримкою:

$$m_{\text{троп.}}^2 = \left(\frac{m_{nT}}{n}\right)^2 \cdot D^2 ; m_{\text{іон.}}^2 = \left(\frac{m_{ni}}{n}\right)^2 \cdot D^2 , \quad (5.5)$$

де m_{nT} — похибка визначення показника заломлення в тропосфері;

m_{ni} — похибка визначення показника заломлення в іоносфері;

n — показник заломлення атмосфери для електромагнітних хвиль.

Вплив іоносфери знижується при фазових вимірюваннях на двох несучих частотах. Відносна похибка за вплив іоносфери доведена до значення [70]

$$\frac{m_n}{n} = 1 \cdot 10^{-8}; \quad (5.6)$$

б) Похибка визначення ефемерид супутників:

Існує 4 типи ефемерид: передані (бортові), швидкі, ультра швидкі і точні.

Таблиця 1

Характеристики ефемерид

Характеристики	Тип ефемерид			
	Бортові	Ультра швидкі	Швидкі	Точні
точність	~ 260 см і ~ 7 нс.	25 см і ~ 5 нс.	5 см і 0.2 нс.	5 см і 0.1 нс.
доступність	момент спостережень	через 12 год.	через 2 дні	через 2 тижні

$$m_{\text{еф}}^2 = \left(\frac{m_o}{H}\right)^2 \cdot D^2, \quad (5.7)$$

де m_o – похибка визначення елементів орбіти;

H - висота супутника.

Встановимо зв'язок між точністю ефемерид і точністю вирішення GNSS вектору для коротких баз. Прийнемо довжину базової лінії 200 метрів. Ми обробляємо лінію, використовуючи при цьому передані ефемериди (точність 2.60 м). У цьому випадку, очікувана точність дорівнює $(0,2 \text{ км} / 20000 \text{ км}) \cdot 2.60 \text{ м} = 0,026 \text{ мм}$. Ці цифри дозволяють зробити висновок про те, що на коротких базових лініях використання переданих ефемерид є більш ніж достатнім

в) Похибка годинників:

$$m_{\text{год.}}^2 = \left(\frac{m_c}{c}\right)^2 \cdot D^2, \quad (5.8)$$

де m_c – похибка визначення швидкості світла у вакуумі;

m_f – похибка визначення частоти;

Похибка формування частот становить

$$\frac{m_f}{f} = 1 \cdot 10^{-6}; \quad (5.9)$$

г) Похибка за багатошляховість сигналу:

В у мовах міської забудови особливу увагу слід звернути на погіршення точності позиціонування за рахунок спотворення довжини хвилі сигналу при відбиванні від великої кількості поверхонь.

Ефект багатошляховості можна розділити на два типи:

1. Статичні (при довготривалих спостережень за рахунок незначної зміни геометрії супутників, значення похибки багатошляховості на деякий час стають незмінними)

2. Динамічні (при миттєвих спостереженнях)

Враховуючи, що ми маємо справу з постійними спостереженнями, надалі розгляд методів послаблення впливу ефекту багатошляховості будемо виконувати для статичного типу похибки.

Похибка через багатошляховості в приймачах повинна розглядатися як відповідний внесок у вимір фази або псевдовідстані від відбитих сигналів

Багатошляховості важко охарактеризувати в цілому, оскільки її амплітуда і фаза залежать від багатьох параметрів, хоча частина з них досить постійна. Це дає можливість спостерігати багатошляховості, повторювану щодня, відповідно з повторюваністю орбіт СРНС. Загалом, будь-який об'єкт близько антени приймача, поверхня якого є гладкою для радіохвиль з

довжиною 19 або 24 см, діятиме як джерело багатошляховості. Це і будівлі, і дерева, і поверхня Землі. Земна поверхня є сильним джерелом багатошляховості, і, якщо Земля розглядається як деяка рівнева поверхня, то різниця між фазами сигналу супутника і відбитого сигналу визначається як

$$\Delta\Phi = 2h_{\alpha} \cdot \sin\gamma, \quad (5.10)$$

де h_{α} - висота антени в довжинах хвиль;

γ - zenітний кут супутника.

Радіохвилі, що надходять в антену приймача від навігаційного супутника, діляться на два типи: прямі хвилі E_P , що надходять в антену приймача безпосередньо від НІСЗ; відбиті хвилі від земної поверхні E_{RG} і навколишніх об'єктів E_{RO} . Шлях надходження цих хвиль в антену показаний на рис. 5.3.

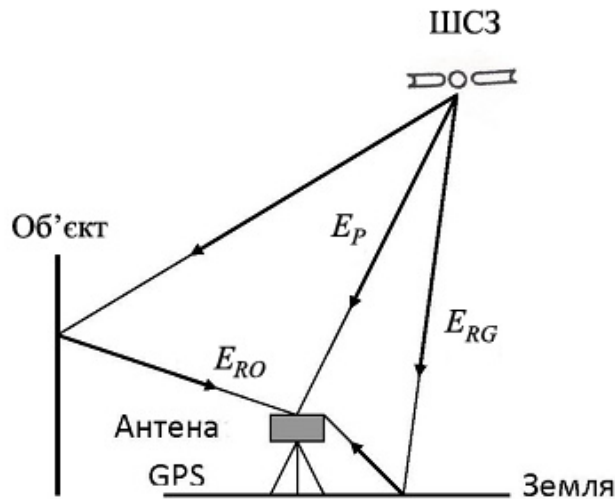


Рис. 5.3. Шлях проходження прямої E_P і відбитої E_R хвиль до антени приймача

Електричне поле прямої хвилі від НІСЗ визначається співвідношенням

$$E_P = E_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (5.11)$$

де E_0 - амплітуда електромагнітної хвилі (ЕМХ), що надходить у приймач;
 $\omega = 2\pi f_1$ - кругова частота несучого сигналу; t - час; φ - вимірювана фаза.

Остаточна формула для оцінки впливу багатошляховості матиме вигляд:

$$\delta D = \frac{\lambda}{2\pi} \delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \langle K \rangle \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta D\right), \quad (5.12)$$

де λ - довжина хвилі;

$\langle K \rangle$ - модуль векторної суми коефіцієнтів відбиття радіохвиль;

ΔD - різниця ходу між прямої і відбитої хвилею.

Формула 5.12 показує, що якщо змінювати різниця ходу ΔD між прямої і відбитої хвилею в межах довжини хвилі λ , то похибка, внаслідок багатошляховості, буде змінюватися за законом, близькому до синусоїдальної. Середнє значення з отриманих результатів буде в значній мірі вільно від впливу багатошляховості.

Як впливає з досліджень, представлених в роботах [69, 72], зменшення впливу багатошляховості може бути досягнуто зміною висоти антени. Пропонується змінювати висоту антени приймача через рівні інтервали (мінімально чотири). Отриманий результат буде, значною мірою, вільний від впливу багатошляховості.

2. Похибка викликана точністю роботи вимірювальної апаратури (похибка приладу)

$$m_{\text{ПРИЛ}}^2 = \frac{V^2}{(2\pi f)^2} (m_{\varphi}^2 + m_{\varphi\text{ш}}^2) + m_A^2, \quad (5.13)$$

де V - швидкість поширення ЕМХ;

m_{φ} – інструментальна похибка вимірювання різниці фаз;

$m_{\varphi\text{ш}}$ – похибка вимірювання різниці фаз, викликана впливом шумів;

m_A – залишкова похибка фазової неоднорідності антен;

Інструментальна похибка вимірювання різниць фаз визначається в межах 1% фазового циклу, тобто становить $3,6^\circ$.

Похибка вимірювання різниці фаз, викликана впливом шумів, визначається по залежності:

$$m_{\varphi\text{ш}} = \left[\frac{P_{\text{ш}}}{P_c} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \rho^\circ, \quad (5.14)$$

де ΔF - смуга пропускання частот фазометра, що має значення 1Гц;

Δf - смуга пропускання частот, що надходять на вхід фазометра (оцінюється в 50 Гц);

$\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$ - відношення потужностей корисного сигналу до потужності шуму (в приймачах GNSS або GLONASS) визначається в діапазоні від 26 до 40 дБ; $\rho^\circ = 57,8^\circ$.

З урахуванням вищенаведених значень параметрів, шумова складова різниці фаз має величину $0,26^\circ$.

Похибка, зумовлена розбіжністю фазових факторів електромагнітних хвиль, що надходять на антену приймача (фазова неоднорідність антени), становить, за різними джерелами, ± 2 мм.

3. Похибка викликана геометрією супутників (геометричний фактор)

Для інтегральної оцінки вибору того або іншого сузір'я космічних апаратів (супутників) використовується геометричний фактор GDOP.

$$GDOP = \sqrt{\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2}{\delta_R^2} + \frac{\delta_{\Delta ts}^2}{\delta_{\Delta tП}^2}}, \quad (5.15)$$

де δ_R^2 - середньоквадратична похибка дальності; $\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2$ - СКП складових координат місцеположення; $\delta_{\Delta tП}^2$ - СКП визначення поправки бортової шкали часу; $\delta_{\Delta ts}^2$ - СКП шкали часу споживача;

Аналіз GDOP показує, що цей коефіцієнт приймає найменше значення при оптимальному виборі сузір'я навігаційних супутників, при якому один із супутників перебуває в зеніті, а три інших розташовуються якомога ближче до горизонту, утворюючи рівносторонній трикутник, як показано на рис. 5.4.

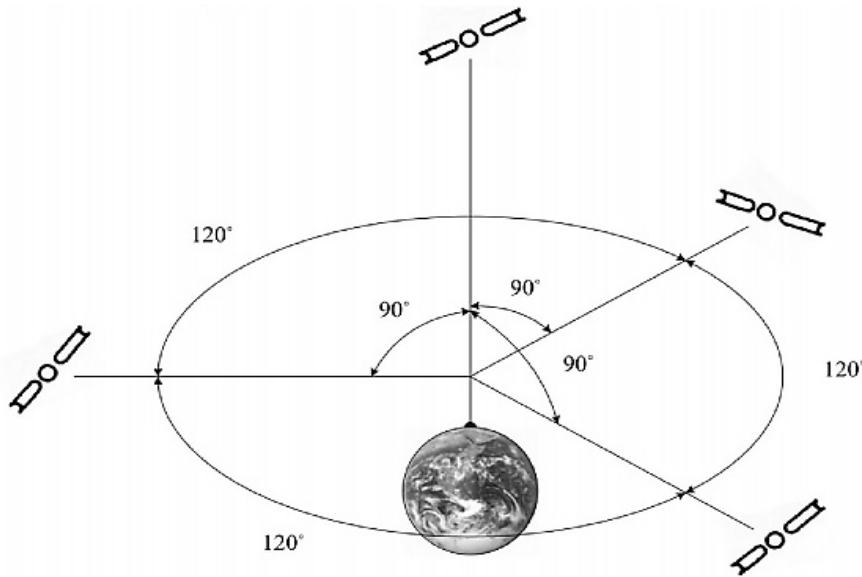


Рис. 5.4. Оптимальне розташування супутників для отримання вищої точності визначення координат

Знаючи всі складові похибки визначення відстані, напишемо її в загальному вигляді:

$$m_D^2 = \left\{ \frac{V^2}{(2\pi f)^2} (m_\varphi^2 + m_{\varphi_{ш}}^2) + m_A^2 + m_{мп}^2 + \left[\left(\frac{m_c}{c} \right)^2 + \left(\frac{m_f}{f} \right)^2 + \left(\frac{m_n}{n} \right)^2 + \left(\frac{m_o}{H} \right)^2 \right] \cdot D^2 \right\} \cdot (GDOP)^2, \quad (5.16)$$

де GDOP - геометричний фактор;

$m_{\text{мп}}$ – похибка, зумовлена багатошляховістю радіохвиль;

З урахуванням вищенаведених похибок, без урахування впливу багатошляховості, точність лінійних вимірювань визначається співвідношенням

$$M_D = 3 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} D \quad (5.17)$$

Таблиця 2

Розрахунок похибки визначення відстані при GNSS вимірюваннях

S, м	16	25	40	60	100	160	220	280	340
M_D	3,016	3,025	3,04	3,06	3,1	3,16	3,22	3,28	3,34

Отримані результати підтверджують заявлені виробниками GNSS – обладнання мінімальні СКП позиціонування GNSS - приймачів.

Запитання для самоперевірки

1. Які основні групи похибок впливають на точність ГНСС-визначень?
2. Що таке іоносферна затримка і як вона компенсується?
3. Що таке тропосферна похибка і в яких умовах вона зростає?
4. Як впливає багатопробіжність (multipath) на вимірювання?
5. Як кількість супутників впливає на точність?
6. Що таке геометрія супутників (PDOP) і як вона враховується?
7. У чому різниця між похибками ефемерид і годинника супутника?
8. Як компенсуються похибки користувацького приймача?
9. Яку роль відіграють базові станції в покращенні точності?
10. Як впливають перешкоди (висотні будівлі, ліс) на точність визначень?

ЗМІСТОВНИЙ МОДУЛЬ 2. МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕТОДАМИ ГНСС

Лекція 6. Технологія виконання геодезичної зйомки за допомогою ГНСС

План

1. Абсолютний та відносний методи супутникових вимірювань.
2. Статичний, кінематичний та RTK режими зйомки.
3. Методи побудови геодезичних мереж.

1. Абсолютний та відносний методи супутникових вимірювань

Розрізняють 2 методи спостережень: абсолютний та відносний (рис. 6.1). Кожен з них може визначати координати точки за результатами визначення псевдовідстаней на основі коду чи фази сигналу від супутника.

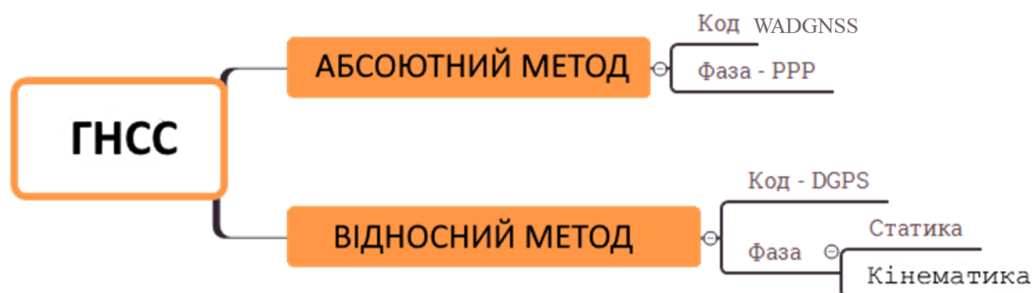


Рис. 6.1. Методи виконання ГНСС спостережень

Абсолютний метод характеризується самостійним визначенням положення приймача за просторовою засічкою. Щоб її реалізувати необхідно знати величину псевдодальності та координати як мінімум 4-х супутників. Псевдодальність обчислюється за кодом чи фазою, а координати супутників передаються в навігаційному повідомленні від кожного їх. Таким чином розраховуються невідомі координати X , Y , Z та поправка годинника dt приймача (рис. 6. 2).

Немає сумніву, що це найпоширеніше рішення GPS за межами геодезії та топографічних дисциплін, і це в певному сенсі виконання початкової ідеї GPS. Однак його недоліком є те, що приймач повинен покладатися на інформацію, яку він збирає з навігаційного повідомлення супутника, щоб дізнатися про положення супутників, зміщення супутникового годинника, іоносферну поправку тощо. Ці дані містять значні помилки. За таких обставин типове положення однієї точки псевдодальності або фази несучої не може бути дуже точним.

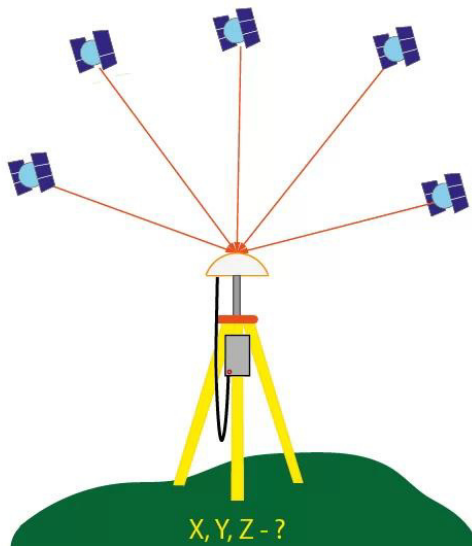


Рис. 6.2. Абсолютний метод виконання ГНСС спостережень

В абсолютному методі, що заснований на вимірюваннях за кодом, точність залежить від якості кварцового генератора часу приймача і становить 5-10 м. Застосовується цей метод у низькоточній навігації (моніторингу транспорту, суден тощо).

Але його точність можна підвищити використовуючи поправки до ефемеридної та часової інформації, як до кодової так і до фазової складової. Поправки в кодові визначення реалізуються з використанням широкозонних систем диференціальної корекції (**Wide area differential GNSS**), таких як WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN та дозволяють зменшити помилки визначення координат до 0,5 - 2 метрів. Це використання поправок до ефемеридної та часової інформації, поправок для виключення атмосферних спотворень сигналу, поправок до навігаційних параметрів, що вимірюються споживачем (кодові вимірювання).

Для уточнення фазових даних можна використовувати різні диференціальні послуги, що працюють за технологією PPP (Precise Point Positioning). Такі сервіси (RTX, Atlas, TerraStar) передають розраховану коригуючу інформацію (точні ефемериди та поправки годинника), щоб приймач зміг обчислити своє місцезнаходження з субдециметровою точністю. Тут як канал доставки коригуючої інформації можуть використовуватися геостаціонарні супутники або Інтернет. Проте існує низка обмежень: приймач обов'язково багаточастотний, спостереження мають проводитися щонайменше години і послуга коштує грошей.

Системи диференціальної корекції в основному мають прив'язку до країни розробника, проте за рахунок охоплення великих територій,

наприклад в Європі створена спільна система EGNOS, що охоплює більшу частину Європейського Союзу (ЄС), а також деякі сусідні країни та регіони:

- **США:** Система розширеного простору (WAAS)
- **Японія:** система супутникового доповнення Michibiki (MSAS)
- **Індія:** доповнена географічна навігація за допомогою GPS (GAGAN)
- **Китай:** BeiDou SBAS (BDSBAS) (у розробці)
- **Південна Корея:** Корейська супутникова система посилення (KASS) (у розробці)
- **Росія:** Система диференціальних поправок і моніторингу (SDCM) (у розробці)
- **ASECNA:** Розширена навігація для Африки (ANGA) (у розробці)
- **Австралія та Нова Зеландія:** Southern Positioning Augmentation Network (SouthPAN) (у розробці)

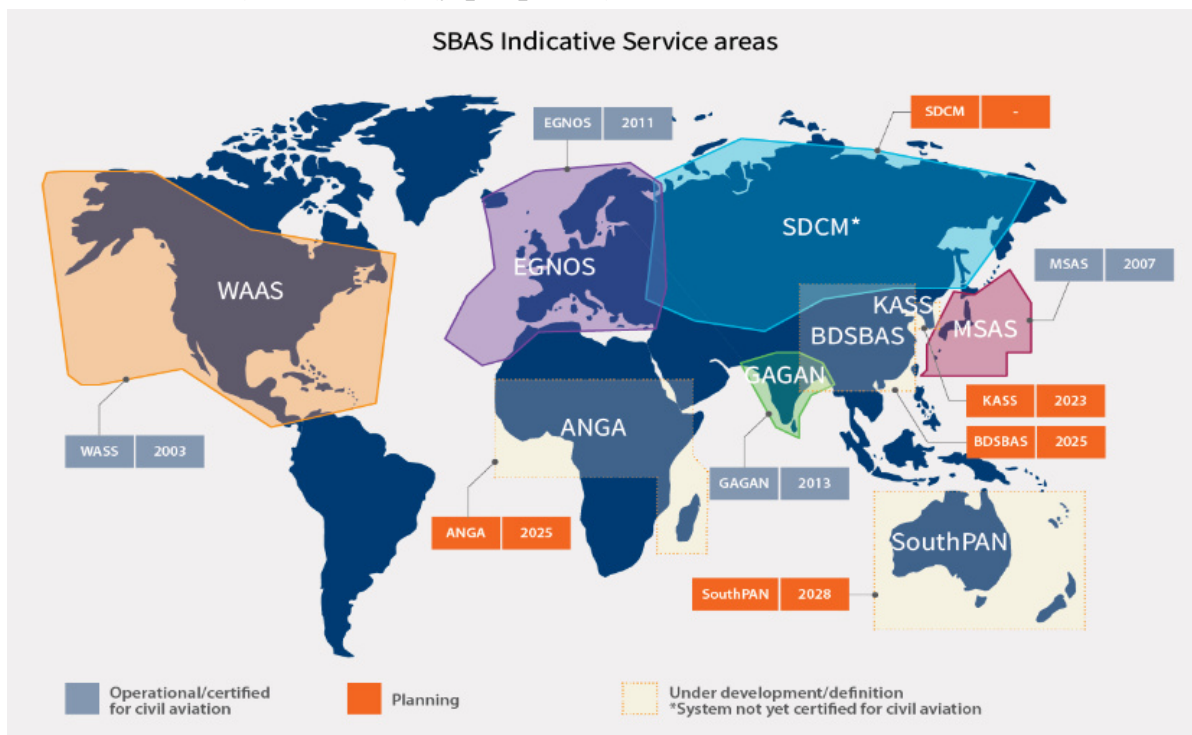


Рис. 6.3. Існуючі системи диференціальної корекції

Метод PPP є на сьогодні одним з найперспективніших методів позиціонування в сантиметровому діапазоні точності. Зараз ми зупинимось на класичному його виді виконання, а з його модифікацією познайомимось ближче до закінчення заняття. Загальний принцип полягає в отриманні поправок за час та ефемериди супутників в результаті наших спостережень. Вони можуть бути отримані як від комерційних систем так і від відкритих, наприклад IGS, які надаються користувачу через інтернет або супутник.

Можете бачити назви деяких комерційних систем, відповідно кожна з них має свою область роботи сервісу поправок, свої тарифи та максимальну досяжну точність в цих тарифах, тобто можна обрати тариф з різною якістю та швидкістю отримання цих поправок.

На рис. 6.4 наведено приклад отриманих координат під час вимірювання на станції абсолютним методом, а на малюнку поряд показані дані для тієї самої станції після додавання до спостережень PPP корекцій. Видно зменшення помилок з декількох метрів до пари сантиметрів, а також можна побачити, що дані з PPP корекцією виглядають наче лінії, а не сукупність окремих точок.

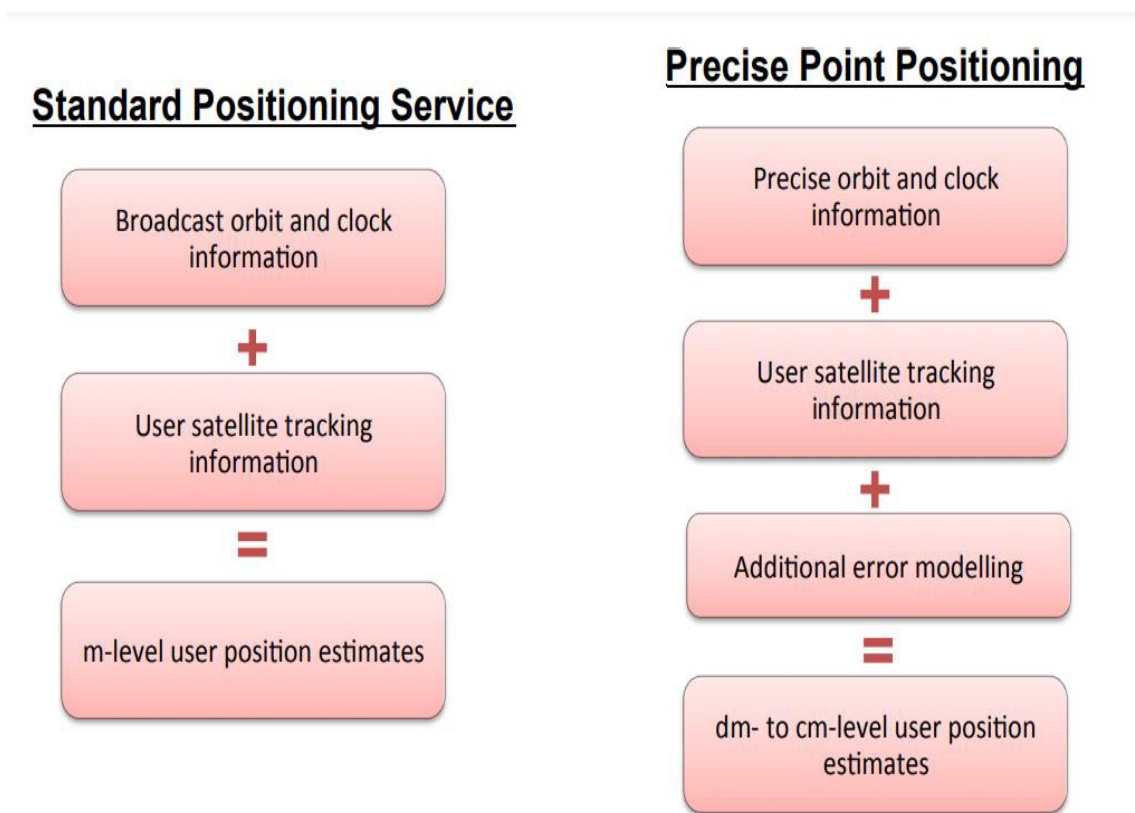


Рис. 6.4. Схема роботи системи PPP

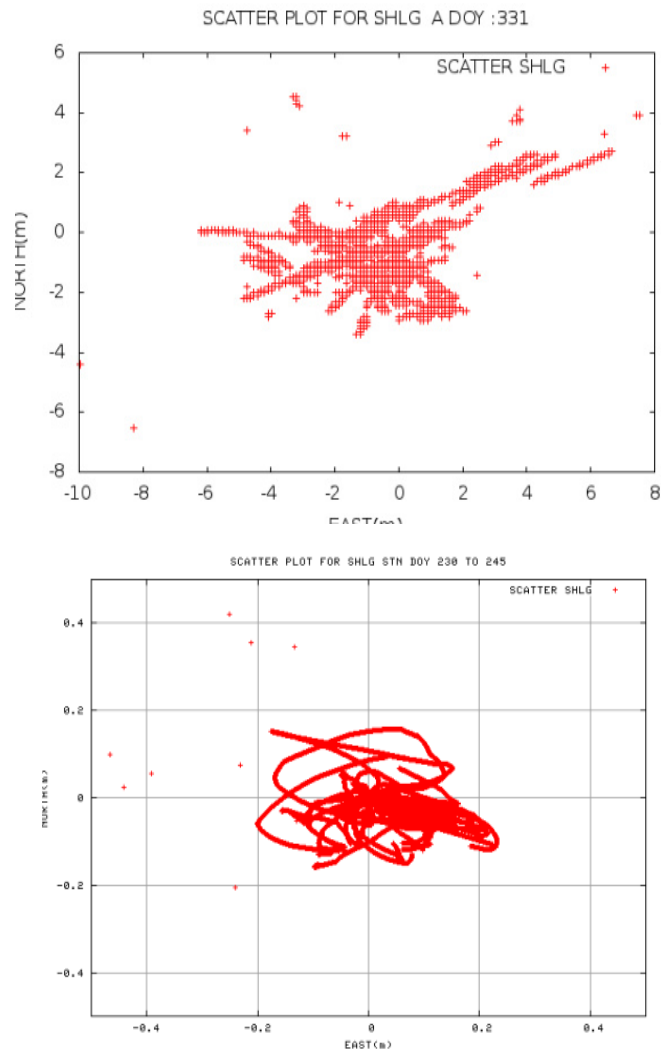


Рис. 6.5. Схема роботи системи PPP

У відносному методі (рис. 6.6) задіяно мінімум два приймачі, один із яких знаходиться на пункті з відомими координатами (База), а другий на шуканому (Ровер). В даному випадку за різницею координат, визначених Базовим приймачем по супутниках та введених вручну відомих координат цього пункту, розраховуються поправки до псевдодальностей $dD1, dD2, dDn$. Ці поправки передаються на Ровер (на визначеному пункті) та коригують його виміряні псевдодальності D для уточнення позиціонування.

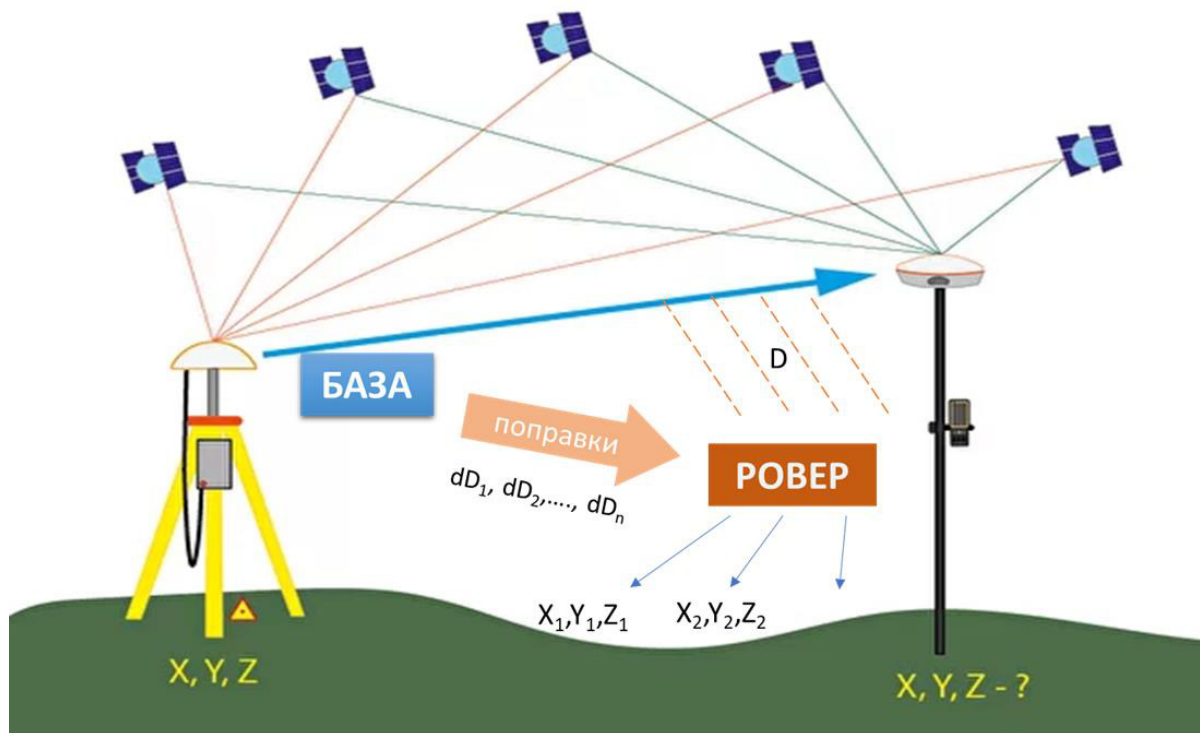


Рис. 6.6. Відносний метод виконання ГНСС спостережень

Відносний метод, що реалізується за кодovими вимірами, називають також диференціальним або **DGNSS**. Точність такого методу є субметровою (50-80 см), проте поправка в псевдодальність може бути передана на відстані 200-300 км. Тому метод **DGPS** активно використовується в морській навігації, сільському господарстві та залізничному моніторингу.

До диференціальних також належить метод **RTK**. Цей метод використовує локальні диференціальні системи поправок в фазу сигналу режимі реального часу і дозволяє отримати точність координат порядку 1-5 сантиметрів.

Використання відносного методу вимірювань фази несучої при постобробці даних синхронних сеансів супутникових спостережень дозволяє досягати міліметрової точності. Саме цей метод підходить для вирішення більшості геодезичних завдань. За характером руху це може бути і статика, і кінематика.

2. Статичний, кінематичний та RTK режими зйомки

Статика реалізується у вимірі конкретної точки, коли на пункті протягом кількох епох збирають і усереднюють дані з супутників. Кінематика ж - створення траєкторії руху приймача. Причому відповідно до

Дуже популярний Метод RTK (рис. 6.7) – коли ровер отримує сигнал від супутників та диференційну поправку від мережі або однієї базової станції. Обробка спостережень виконується в реальному часі, а поправки надсилаються через мобільний інтернет, радіо, при чому поправки в такому варіанті йдуть в координати станції ровера, а не в псевдовідстані. Алгоритм реалізації цього методу наступний:

-
- The diagram illustrates a Real Time Kinematic (RTK) system. It features a **Base Station (Known Position)** and a **User (Rover (Project Point))**. The Base Station is equipped with a **Transmission Antenna**, a **Transmitter**, and a **GPS Receiver**. The User is equipped with a **GPS Receiver**. The Base Station and User are connected via **UHF Radio** signals, represented by red wavy lines. The distance between them is labeled as **10 to 20 km**. Blue lines represent GPS signals from satellites to both the Base Station and the User. The Base Station's GPS Receiver is connected to the Transmitter, which sends the correction data to the User's GPS Receiver via the UHF Radio link.

70

Тому координати точки в різних системах координат, визначаються безпосередньо в полі. Даний метод дозволяє зручно виконувати винос точок внатуру, наприклад, винос поворотних точок земельних ділянок. Для роботи в РТК необхідно придбати підписку для доступу до сервера та забезпечити постійний зв'язок мобільний інтернет, радіо або інше.

На сьогодні в Україні існує декілька РТК мереж що працюють по всій території держави:

System Solutions. Мережа базових станцій має найбільше покриття в Україні (рис. 6.8). Налічує 111 базових станцій та покриває всю територію держави. Також встановлено 6 базових станцій на території Молдови. Що дає змогу забезпечити покриття сигналом 2 держави в одну мережу. Працює на основі програмного забезпечення Leica GNSS Spider.

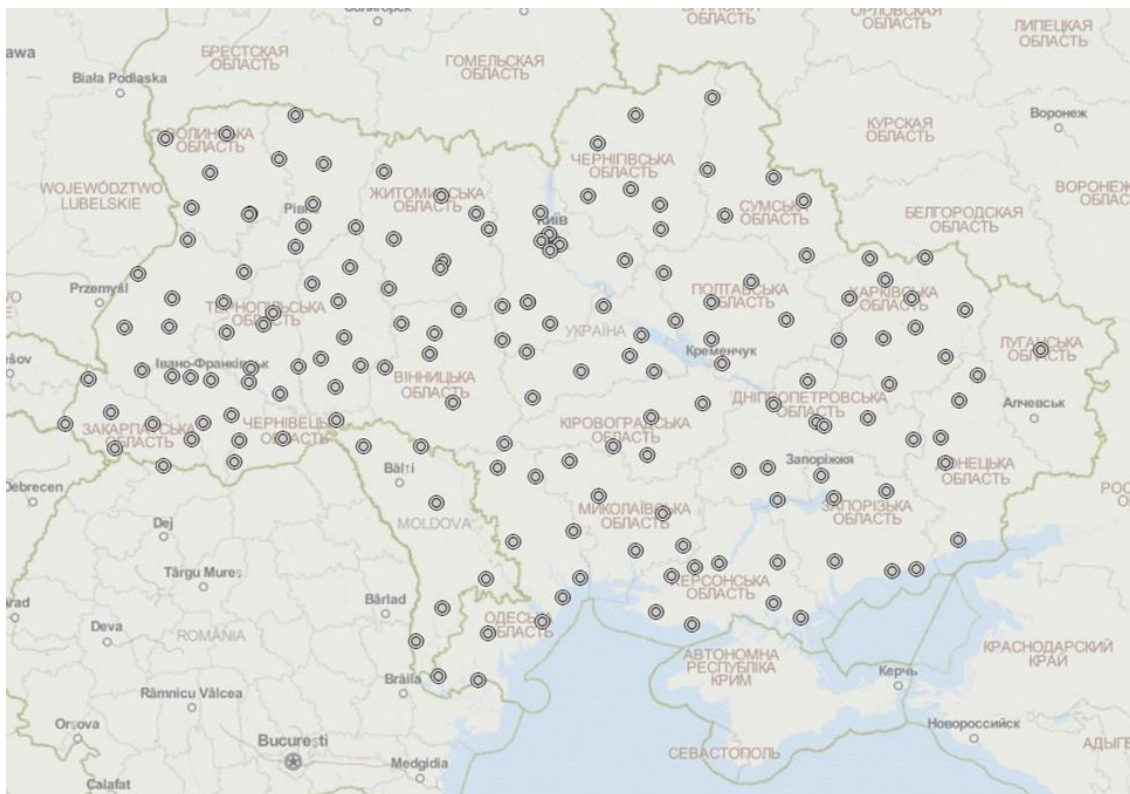


Рис. 6.8. Схема мережі System Solutions

TNT TPI На сьогодні мережа має назву RTKHub (рис. 6.9). Мережа складається з 71 базової станції. Зосереджена на західній Україні, Київській області та південно-східній Україні. Використовує програмне забезпечення від Topcon.

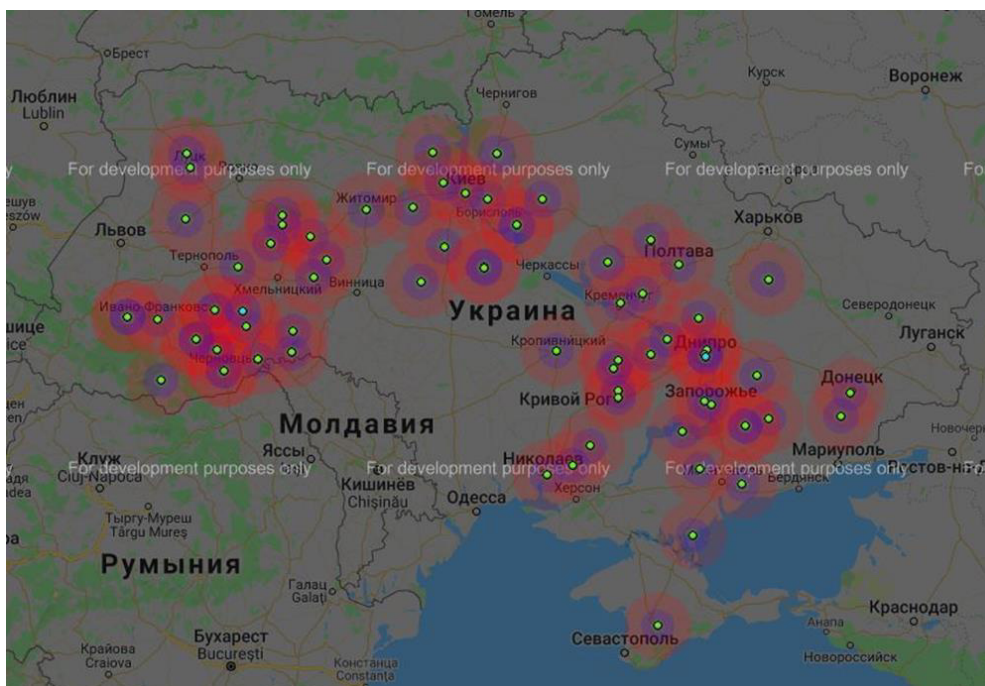


Рис. 6.9. Схема мережі RTKHub

ZAKPOS. Перша та найбільша в Україні ртк мережа (рис. 6.10) . Створена у 2008 році. Налічує 173 станції в Україні, 5 станцій у Польщі, 3 бази в Словаччині, 6 станцій у Румунії, 6 станцій у Молдові та 1 базову станцію в Угорщині. Всього налічує 194 Базові станції . Це означає що мережа зрівняна з мережами сусідній країн Європейського Союзу. Працює на програмному забезпеченні Trimble

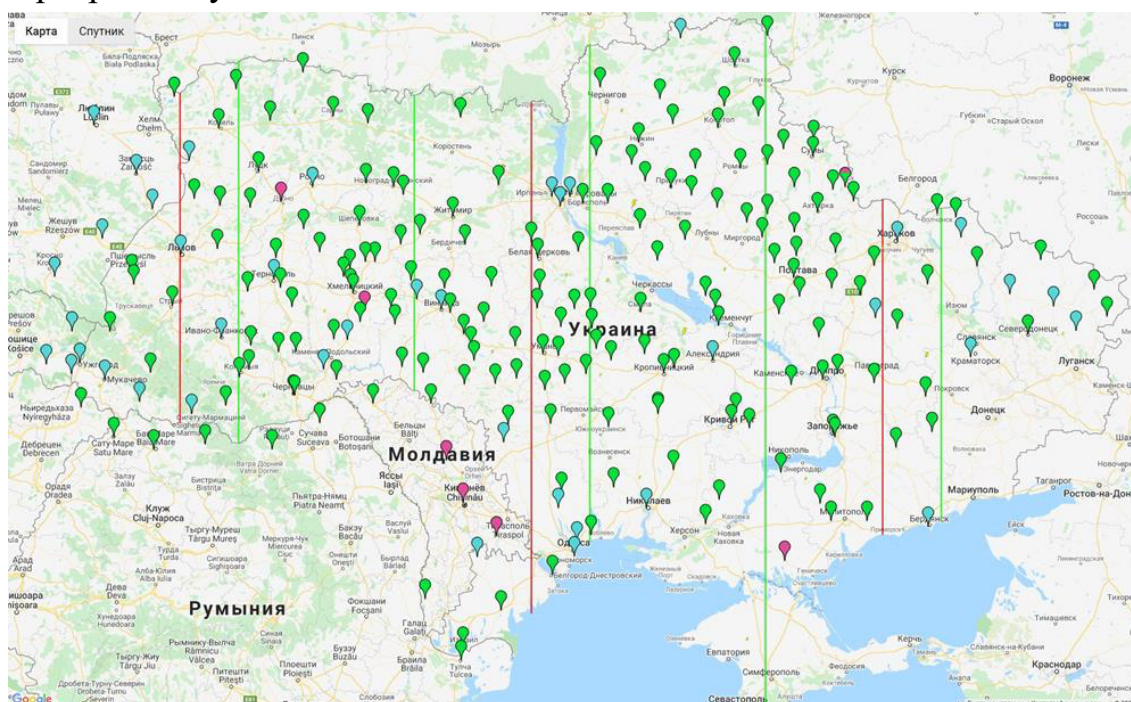


Рис. 6.10. Схема мережі ZAKPOS

Spacescenter (рис. 6.11). RTK мережа Національного Центру управління та випробувань космічних засобів. Налічує 49 базових станцій по території України. Працює на програмному забезпеченні від CHCNAV. Зона покриття дозволяє працювати в великих містах та їх околицях.

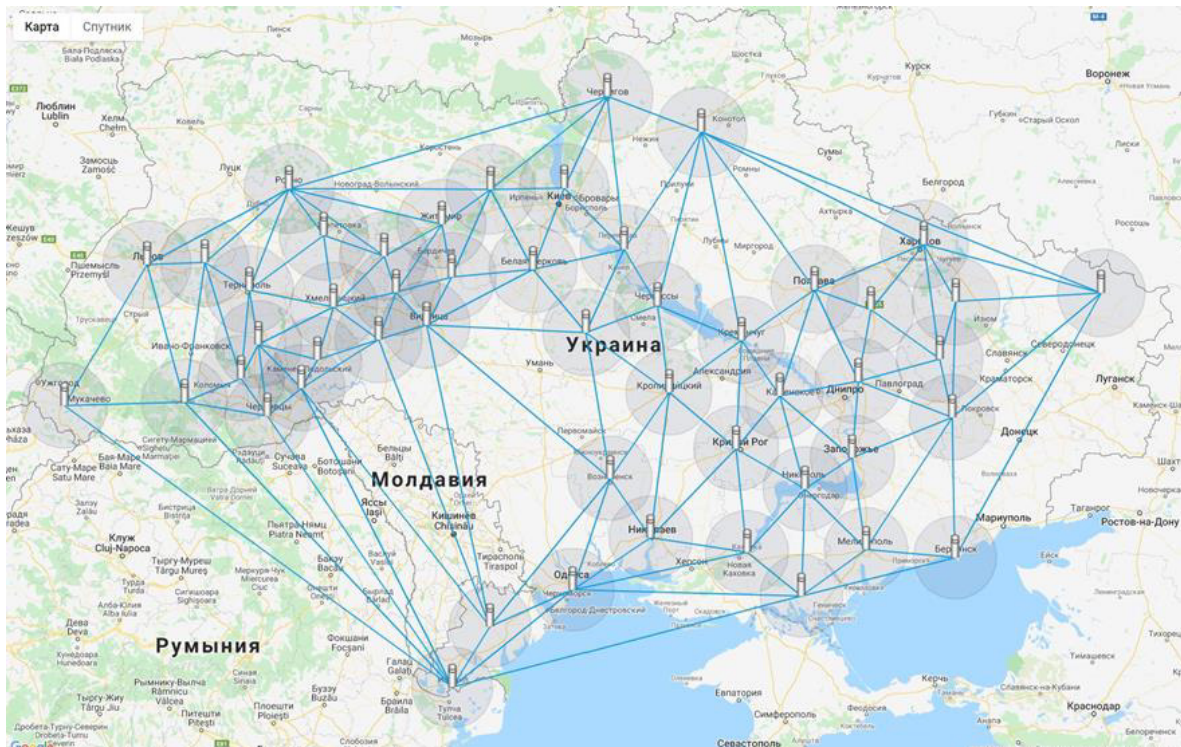


Рис. 6.11. Схема мережі Spacescenter

Мережа від Київстар має назву mAgri_RTK. Її запущено в 2024, в основному для агросектору та бізнесу, карти станцій в загальному доступі не надано.

Тепер, коли ми вже знаємо про RTK, саме час повернутись до абсолютного методу визначення координат PPP, а точніше його варіації Real-time PPP System. В порівнянні з RTK та мережевим RTK такий метод дозволяє отримати оцінку майже всіх похибок під час спостережень та зробити корекцій в координати приладу користувача з їх врахуванням. PPP-RTK розширює концепцію PPP, надаючи користувачам з одним приймачем, разом з позицією передавача та часом, також інформацію про фазові зсуви передавача. Ця інформація, за умови її належного опрацювання, дозволяє відновити цілісність неоднозначностей користувача, тим самим забезпечуючи вирішення неоднозначності для одного приймача з відповідним скороченням часу сходження до сантиметрової точності позиціонування.

Method	What is transmitted?	Initialisation time	Accuracy (horiz)
RTK/NRTK	Corrections per satellite and per (virtual) reference station	< 20 s	~ 2 cm
PPP	- Orbits - Clocks	> 40 min for float	a few cm
PPP-AR	- Orbits - Clocks - Phase biases	~ 30 min	a few cm
PPP-RTK	- Clocks - Orbits - Phase biases Troposphere Ionosphere	< 1 min	a few cm

Рис. 6.12. Метод PPP-RTK

Це дозволяє отримувати сантиметрову точність за досить швидкий час, менше хвилини. В порівнянні класичний PPP метод потребує більше 40 хвилин ініціалізації на станції спостережень (рис. 6.13).

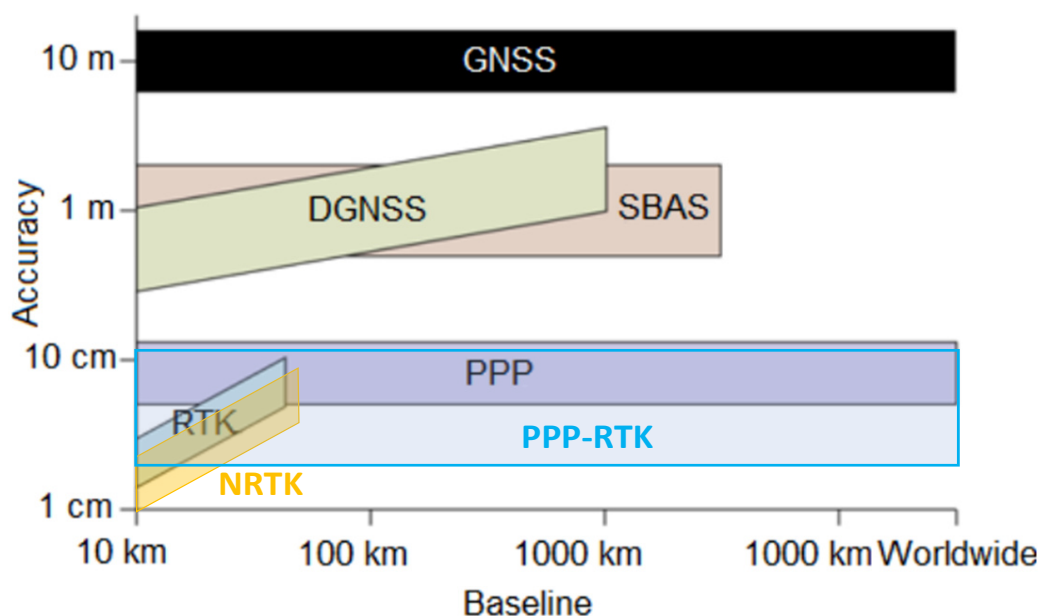


Рис. 6.13. Порівняння різних методів ГНСС спостережень по точності та діапазону роботи

Другою важливою перевагою є робота цього методу на великих базових лініях. На малюнку наведено порівняння різних методів

позиціонування в розрізі точності та можливої довжини базової лінії. На відміну від РТК методу довжина базової лінії досить велика. Всі методи, про які ми з вами говорили сьогодні, можна відобразити на такій схемі.

Супутникові методи визначення місцеположення					
Методи визначення абсолютних координат			Методи визначення відносних координат		
Автономний метод 5-10м	Абсолютні визначення координат з поправками до ефемерідно-часової інформації		Диференціальні методи (Differential mode)		Відносні постобробки (Postprocessing mode)
	Метод широкозонавої диференціальної корекції (WADGNSS) 0.5-2м	Метод точного позиціонування PPP (Precise Point Positioning) Float PPP 0.1 - 0.2 м PPP-AR 0.04 - 0.1 м PPP-RTK 0.02 - 0.04 м	Метод визначення псевдовідстаней по коду (DGPS, DGNSS) 0,05 – 0,5 м	Метод визначення різниць координат з постобробки по коду 0,2 – 0,5 м	Метод визначення різниць координат з постобробки по фазі несучої 0,001 – 0,1 м
			Метод визначення псевдовідстаней по фазі (Real Time Kinematic (RTK)) 0,01 – 0,05 м		
			Мережевий метод визначення псевдовідстаней по фазі (Network RTK) 0,01 – 0,05 м		

Рис. 6.14. Порівняння різних методів ГНСС

3. Методи побудови геодезичних мереж

Тепер давайте поговоримо про схеми або методи побудови ГНСС мереж з точки зору геометричної форми. При створенні і реконструкції геодезичних мереж з використанням супутникових приймачів в більшості публікацій рекомендовані наступні методи вимірювання:

- **променевий метод** - пункти мережі, що визначають, координуються з одного із опорних пунктів;
- **мережевий метод** - виміри виконуються на кожній лінії або на кожному пункті мережі.

До недоліків променевого методу побудови мережі слід віднести недостатню надійність критеріїв оцінки точності визначуваних координат. В зв'язку з цим відмітимо, що на практиці інколи до таких побудов застосовують оцінювання, що базуються на аналізі замкнутих геометричних побудов. Таке оцінювання не завжди виявляються коректним. Так, наприклад, в трикутнику, утвореному пунктами, на яких виконувалися одночасні супутникові спостереження, нев'язки різниць координат між пунктами, за визначенням, незалежно від потенційних точностних

супутникових методів мають бути рівними нулю. Якщо ж в окремих випадках при обчисленнях і спостереженнях нев'язки, що відрізняються від нульових, то ці відмінності обумовлені, як правило, несприятливими умовами спостережень супутників і недосконалістю методів обробки результатів спостережень. Такі критерії недостатньо об'єктивно відображають реальну точність координат визначуваних пунктів.

Реальним контролем при променевому методі є незалежний контроль вимірювання на визначуваних пунктах, наприклад, іншими засобами вимірювання, від інших вихідних пунктів, між визначуваними пунктами і ін.

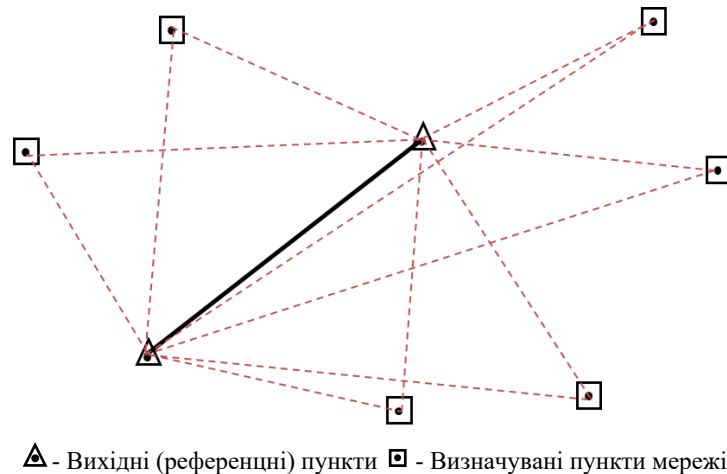
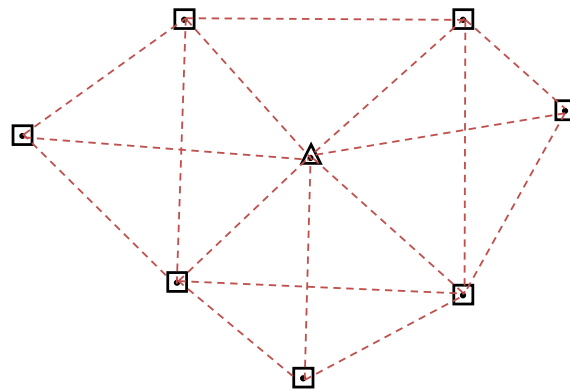


Рис. 6.15. Променевий метод вимірювання з контролем

Критерії точності і надійності спроектованої мережі збільшуються в разі організації мережових вимірювань першим або другим способом - виконання вимірів на кожній лінії або на кожному пункті мережі. Проте використання одного незалежного референцного пункту обумовлює необхідність додаткових контролів незалежними методами, які по точності можуть виявитися недостатніми.

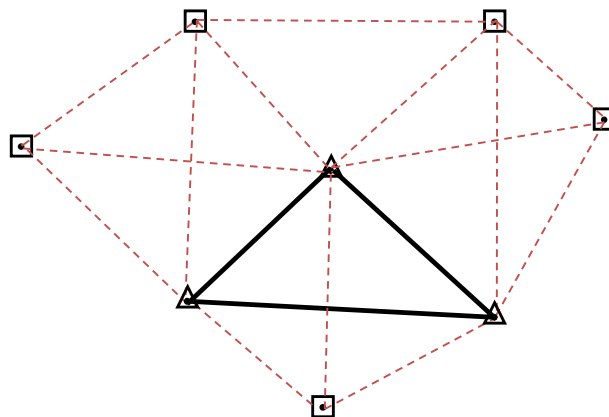
Суттєво підвищуються критерії точності і надійності спроектованої мережі у випадку організації мережових або повторних вимірювань при використанні в мережі не одного, а декількох референцних пунктів. Однак безпосереднє включення в мережу декількох незалежних референцних пунктів обумовлює необхідність того, щоб різниця координат між ними була точніше за ту, яка характерна для різниці координат визначуваних пунктів.



▲ - Вихідні (референсні) пункти □ - Визначувані пункти мережі

Рис. 6.16. Мережевий метод вимірювання (однорангова мережа)

Для вирішення виявлених проблем існує компромісне рішення, що зводиться до побудови двох рангової (а в загальному випадку і багато рангової) мережі. При цьому на першому етапі вибирається лише один вихідний референсний пункт, навколо якого створюється за посиленою програмою декілька взаємопов'язаних між собою другорядних референсних пунктів (каркасна мережа). На другому і подальших етапах побудови такої мережі визначається решта всіх пунктів, причому в кожному сеансі спостережень супутникові приймачі встановлюються як на декількох рядових пунктах мережі, так і не менше чим на двох взаємопов'язаних референсних пунктах.



▲ - Вихідні (референсні) пункти □ - Визначувані пункти мережі

Рис. 6.17. Мережевий метод вимірювання (багаторангова мережа)

Окрім геометричних параметрів побудови мережі і рекомендованих методів виконання вимірювання існують і технологічні особливості створення супутникових геодезичних мереж. Оскільки супутникові геодезичні приймачі є одночасно і віддалемірами з паспортною точністю

3-5 мм+0,5-2 мм ·Z, і системами визначення координат, точність яких фірмами виробниками не регламентується, то залежно від технології вимірювання може бути отримана різна кінцева точність мережі.

На практиці застосовують дві основні технології:

1. Повторних вимірювань на пунктах, при якій задається кількість обов'язкових повторних вимірювань на кожному пункті мережі.

$$N = \frac{M \times S}{R},$$

де N - кількість сеансів спостережень, S - кількістю пунктів, R - кількість приймачів.

2. Обов'язкового виміру кожної лінії мережі.

$$N' = \frac{S - O}{R - O'},$$

де O' - попередній сеанс, O - подальший сеанс.

На практиці можуть виникати ситуації, що істотно відрізняються від стандартних рекомендацій. З врахуванням цього нижче приведені основані на практичному досвіді узагальнені рекомендації:

- з метою виявлення грубих похибок на кожному визначуваному пункті спостереження слід виконувати двічі;
- одночасні спостереження бажано передбачати на сусідніх пунктах, оскільки вирішення невизначеностей на коротких відстанях виконується точніше;
- для забезпечення високої точності на кожній станції має бути передбачений досить тривалий період спостережень, конкретна тривалість якого залежить від віддаленості пунктів і вимог до поточного вимірювання;
- для підвищення надійності кожен пункт повинен визначатись на основі двох повністю незалежних вимірів з використанням прив'язки до різних взаємозв'язаних референціальних пунктів.

Знаходження кількості сеансів

$$s = (m \cdot n)r + (m \cdot n)(p - 1)r + k \cdot m,$$

де s = кількість сеансів спостереження,

r = кількість приймачів,

m = загальна кількість задіяних станцій

Запитання для самоперевірки

1. Що таке абсолютне та відносне позиціювання?
2. У чому різниця між статичним, кінематичним і RTK режимами?
3. Коли доцільно застосовувати RTK зйомку?
4. Яка тривалість вимірів рекомендована для статичного режиму?
5. Як передаються поправки в режимі RTK?
6. Що таке базова станція і як вона функціонує?
7. Як виконується побудова геодезичної мережі методом "мережі тріангуляції"?
8. Що таке вектор базової лінії в ГНСС зйомці?
9. Як організовується польова ГНСС-зйомка?
10. Які інструменти використовують для постобробки результатів ГНСС вимірювань?

Лекція 7. Планування супутникових геодезичних спостережень.

План

1. Правила розташування ГНСС станції.
2. Оцінка стану та місцеположення супутників
3. Визначення схеми перешкод та оптимального проміжку часу для спостережень.

1. Правила розташування ГНСС станції

Загальний підхід до розташування станції знімання складається з оцінки поточного стану угруповання ГНСС системи, визначення місця розташування цих супутників, визначення далі наближених координат місця майбутніх ГНСС спостережень, потім визначення схеми перешкод ГНСС вимірювань, визначення часу, дати і оцінка параметра, зниження точності по якості параметра PDOP. Також останній етап це передбачення космічної погоди на дату планування вимірювань, тому що пам'ятаємо всі про іоносферу затримку.



Рис. 7.1. Алгоритм визначення місця розташування станції ГНСС

Оцінка поточного стану угруповань ГНСС. Ми можемо знайти інформацію про кожен систему навігаційну на офіційних сайтах цієї системи або це ГЛОНАСС, GPS, GALILEO або Baudou.

Інформацію про поточний стан і майбутні регламентні роботи з ГНСС GPS можна отримати на сайті Навігаційного центру Берегової охорони США (<http://www.navcen.uscg.gov>)

На цьому сайті <http://www.esa.int> можна підписатися на регулярну розсилку бюлетенів про стан системи GPS. Інформацію про систему GALILEO можна отримати на сайті Європейського космічного агентства. Офіційну інформацію про угруповання BEIDOU (Китай) можна отримати на офіційному сайті системи (<http://en.beidou.gov.cn>). Також на сайті Міжнародної служби GNSS <https://igs.org/products/#about>

2. Оцінка стану та місцезнаходження супутників

Цей етап тісно зв'язаний з попереднім, тому що ми повинні подивитися, які супутники ми будемо бачити під час спостережень, де ми будемо ставити нашу станцію, які ми будемо бачити супутники на небосхилі. Відповідно від цього ми дізнаємось, які потрібно передивитися, чи працюватимуть вони на певний етап наших вимірювань, на певний день певний час. Щоб знайти цю інформацію, можна скачати альманах (<https://www.navcen.uscg.gov/gps-nanus-almanacs-opsadvisories-sof>), або візуалізувати дані на сайтах. Для візуалізації даних з альманаху рекомендується використовувати програми планування супутникових вимірювань типу Trimble Planning Software <https://www.gnssplanning.com>, на якому можна подивитися, ось справа зображення, інформацію у вигляді траєкторії руху супутників (рис. 7.2).

Ви вставляєте точку на місцевості, де вона повинна бути попередньо розташована і плануєте скільки часу ви будете вимірювати та яку систему ви хочете використовувати. Сервіс відобразить траєкторію і руху, які супутники буде видно на вашу територію. Так само є онлайн сервіс ГНСС-радар (<http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>) в якому є схожа інформація (рис. 7.3).

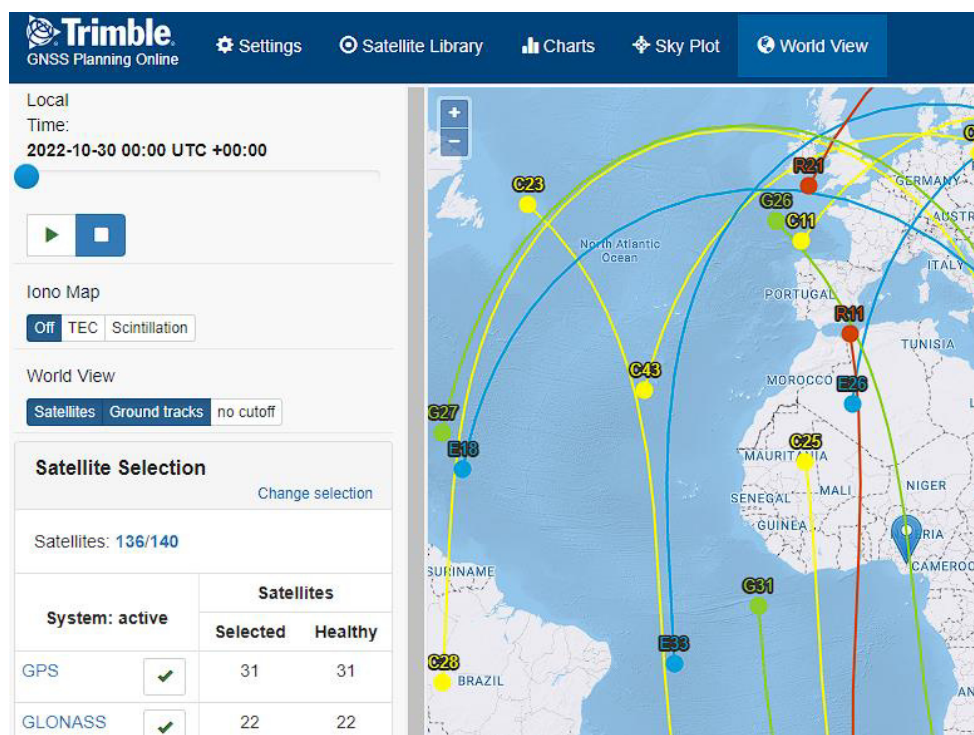


Рис.7.2. Сервіс планування спостережень Trimble Planning Software

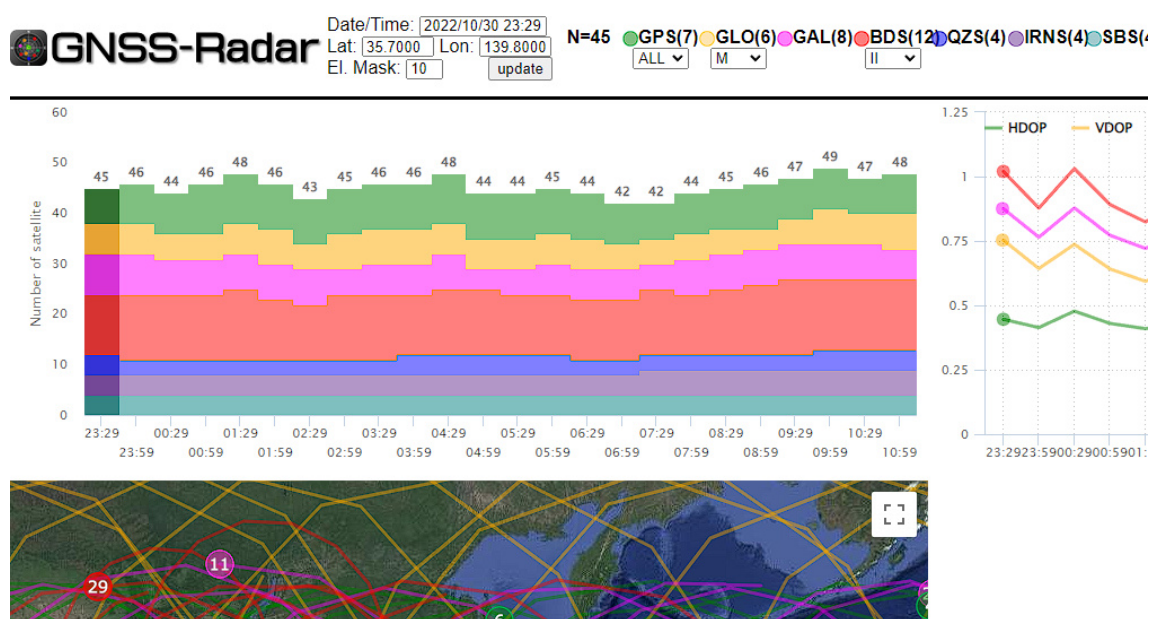


Рис.7.3. Сервіс планування спостережень GNSS-radar

Наступний етап це визначення наближених координат в місті майбутніх ГНСС спостережень. Для планування потрібно знати наближені координати з точністю до 10-15 секунд, а визначені координати ми будемо використовувати якраз для точного планування на попередніх етапах. Географічні координати можна отримати за допомогою карт або онлайн сервісу, наприклад Google Earth (<http://www.google.com/earth/index.html>)

(рис. 7.4). На електронній карті можна вибрати потрібне місце, там поставити точки, отримати координату у широті і довготі, тобто сферичних координатах.

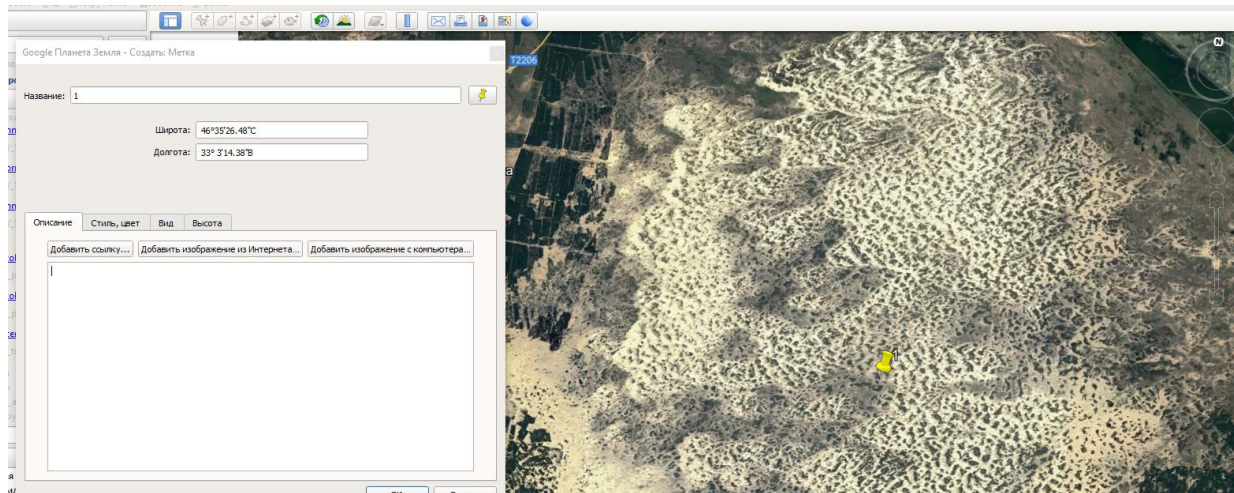


Рис.7.4. Сервіс Google Earth

Крім того, практично всі сучасні комунікатори мають будовано функцію GPS позиціонування, що дозволяє визначити координати точки з точністю у 5-10 метрів, тобто це 2-3 секунди. Можна теж використовувати це при плануванні, хоча доведеться прийти на територію, де ви плануєте ставити вашу станцію, і визначити їх координати таким чином.

3. Визначення схеми перешкод та оптимального проміжку часу для спостережень

Для визначення системи перешкод під час ГНСС вимірювань можна використовувати так само знімки на гугл картах, щоб зрозуміти, чи є у вас в полі видимості будинки, якісь розташовані високі споруди (рис. 7.5). Можна використовувати панорами з місця розташування, щоб побачити, чи є у вас десь області, які будуть перекривати ваш небосхил. Тому що під час вимірювань ваша задача забезпечити максимально широку видимість вашого небосхилу, у такому варіанті забезпечуватиметься максимальна кількість супутників з вашої точки спостережень.

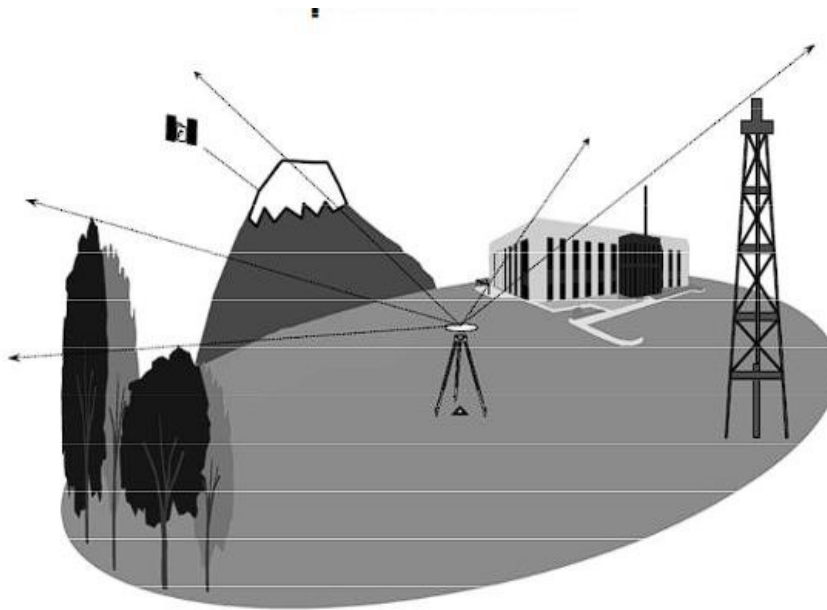


Рис.7.5. Визначення перешкод

Ви можете проаналізувати, що на цей момент все чудово, є необхідна кількість супутників, вони всі повинні працювати, нема ніяких проблем в системі ГНСС, яку ви використовуєте, але ви можете так розташувати ваш супутник, що не побачите половину супутників увесь весь ваш період спостережень. Або буде погана геометрія цих супутників, бачитимете тільки ті супутники, що знаходяться умовно справа від вас, а зліва у вас буде перекривати небосхил якийсь будинок. Відповідно, у вас постійно геометричний параметр буде невисокий, тобто низька геометрична засічка. Тому визначення системи перешкод дуже важливий етап. Плюс потрібно враховувати розташування лінії електропередачі, тому що вони безпосередньо впливають на сигнал, як електромагнітне зашумлення наших спостережень. Плюс пам'ятаємо про наявність поблизу великих відбиваючих поверхонь, які в нас збільшують помилку за багатошляховість сигналу. Це все ми можемо планувати за допомогою картографічних сервісів.



Рис.7.6. Визначення схеми перешкод по Гугл картах

Вибір дати часу і оцінка параметра PDOP. Ми можемо прорахувати ймовірне значення цього параметра для території так само з врахуванням геометрії супутників. Саме видимості супутників ми не зможемо побачити на цьому сервісі, але для оцінки значення PDOP за умови використання всіх супутники, які ми бачимо на цій території, які є над цією територією є в наявності, пролітають над нею, ми можемо використовувати ось ці сервіси, що я вже називав.

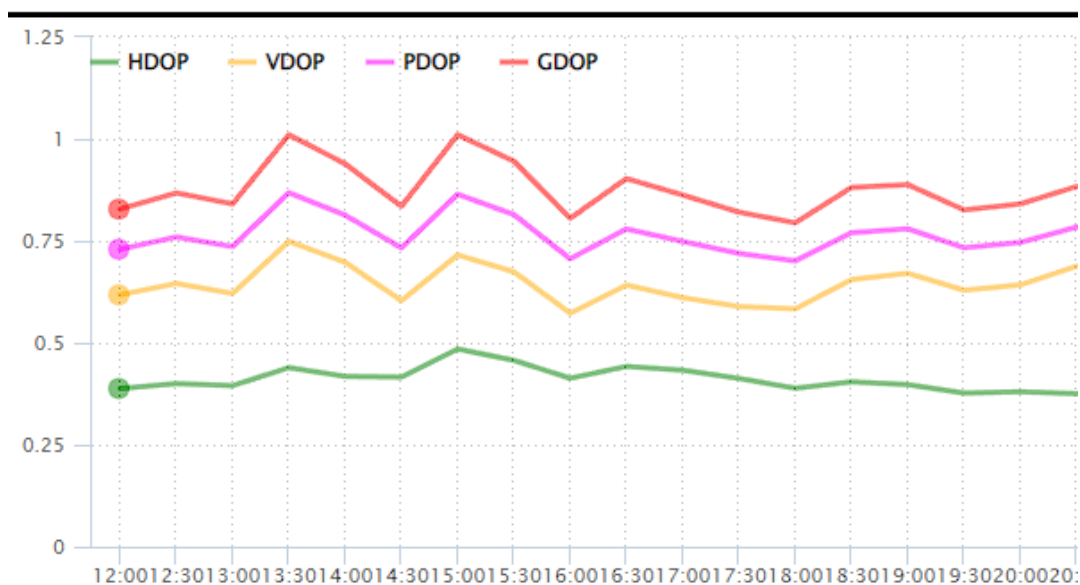


Рис. 7.7. Графік зміни геометрії засічки з часом

PDOP = Позиційне зниження точності – показник миттєвої геометрії НІСЗ;

RDOP = Відносне зниження точності - показник зміни в геометрії НІСЗ за період спостережень.

Для оцінки цього параметра чим менше наше значення або горизонтальне PDOP, або висотне HDOP то ми можемо подивитися і оцінити, що він корелюється з кількістю супутників, які ми використовуємо. Тому попередній етап планування і врахування перешкод він дуже важливий, адже ми можемо оцінити якість лише за умови того, що ми будемо бачити небо без перешкод.

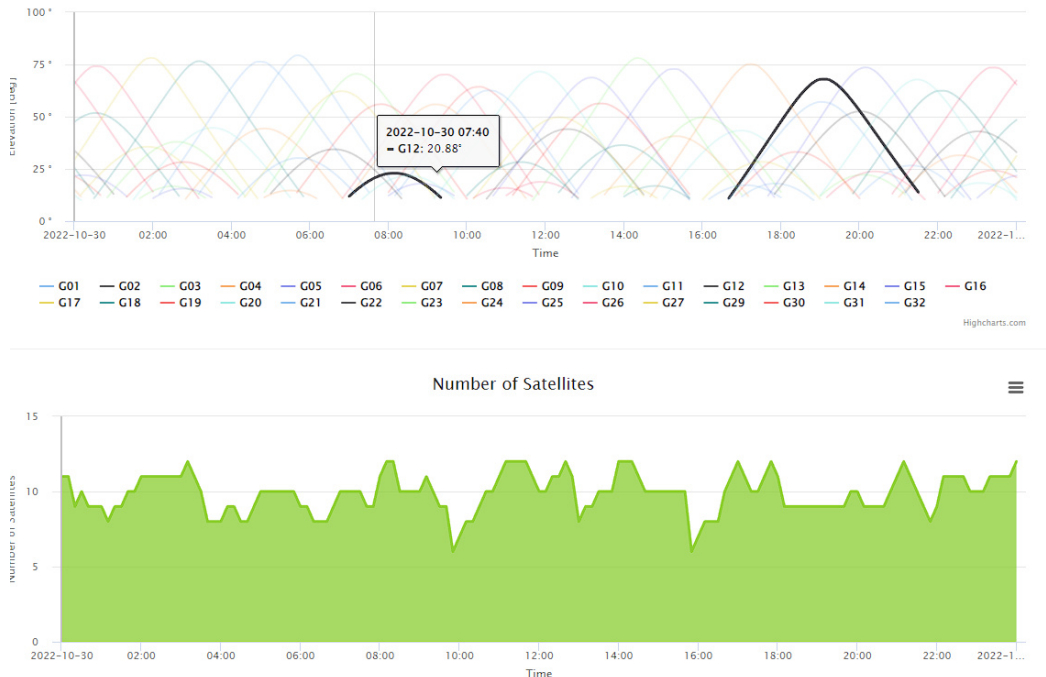


Рис. 7.8. Залежність PDOP від кількості супутників

Про геометричний фактор ми вже говорили на минулих лекціях, але додатково ми закріпимо цей питання. Якість засічки висока або геометрія гарна, коли в нас широко розташовані супутники є один в zenіті. Якщо всі вони розташовані зверху, купчуються - це погана геометрія. Теж погана геометрія, коли вони всі розташовані в одній стороні, цього треба уникати.

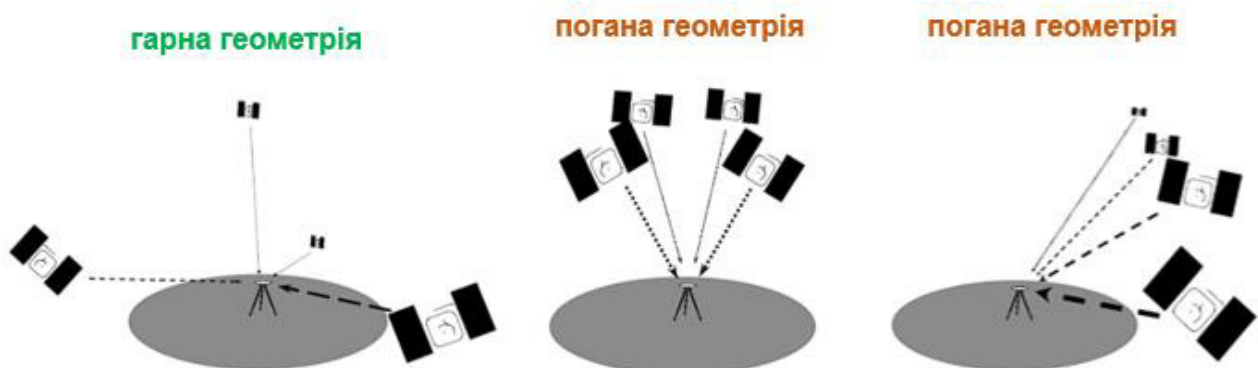


Рис.7.9. Геометрія засічки

Важливим параметром під час планування спостережень є кут відсічки. Його можна встановити різними, це налаштовується в приладі. Але в чому особливість? При сильно низькому куті відсічки горизонту ми будемо бачити супутники, які будуть постійно перериватися якимись об'єктами, що їх закривають. Це дерева, тополі, якісь труби, частини будинків. Якщо розташовуємо нашу станцію на земній поверхні, особливо в умовах міста, то в нас дуже багато таких об'єктів. Такий супутник буде видимий в певний проміжок часу, але сигнал від нього буде постійно втрачатись й перериватись і це в результаті дасть нам гірші результати, ніж взагалі його не бачити. Тому під час планування треба зрозуміти де на цій території з'являється гарна видимість, на якій висоті, і змінити кут відсічки.

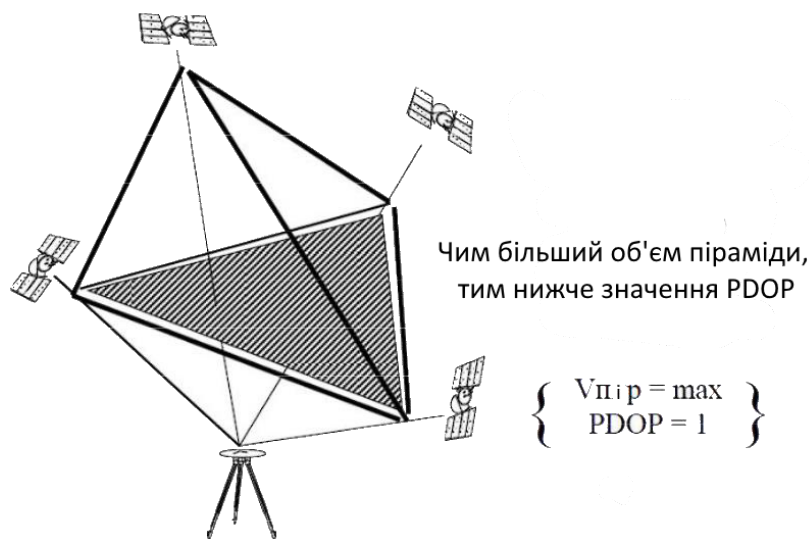


Рис.7.10. Геометрична інтерпретація якості засічки

Одним із чинників, що впливає на геометрію засічки та враховуються при плануванні супутників, є параметр «Кут відсічення».

Спостереження ГНСС супутників на низьких кутах відсічення може істотно поліпшити геометрію сузір'я, проте сигнали від супутників на низьких кутах піднесення істотно деградують при проходженні протяжних шарів іоносфери і тропосфери, тому їх аналіз і обробка часто бувають трудомісткими, а результати з великими похибками.

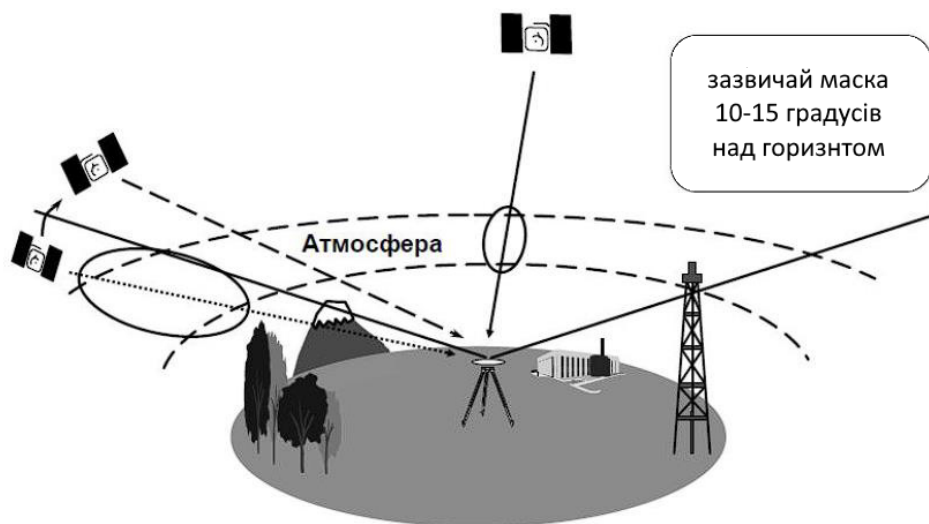


Рис.7.11. Кут відсічки

Останнім параметром, який потрібно враховувати при підготовці до ГНСС спостережень є планування погоди. Зазвичай якість вимірювань погіршується зі збільшенням в іоносфері параметра повної концентрації вільних електронів (ТЕС - Total Electron Content).

Параметр ТЕС має яскраво виражену добову і 11-річну періодичності. Якщо перша пов'язана з добовим обертанням Землі навколо осі і відповідно до кількості потрапляють на Землю ультрафіолетових променів, то 11 річний цикл залежить від числа плям на Сонці. У періоди максимуму сонячної активності число плям може істотно зрости.

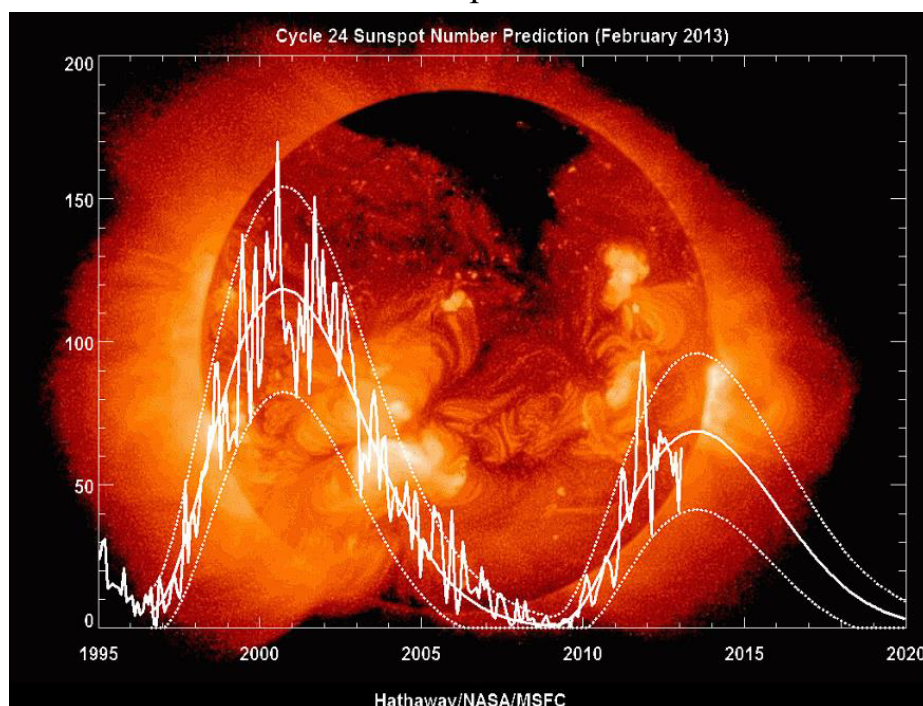


Рис.7.12. Цикл сонячної активності

На сервісі <http://www.swpc.noaa.gov> можна подивитися сонячну активність, дізнатись про так званий К індекс, тобто індекс сонячної активності. Наскільки в результаті сонячної активності є відповідь нашої іоносфери, Тобто будь які дії на сонці, будь-які сплески впливають в подальшому на реакцію іоносфери нашої Землі. Ми всі знаємо це явище як полярне сяйво. Чим ближче ми до півночі, тим більше в нас цей індекс і тим сильніше відчувається вплив і реагує наша планета на сонячну активність. Відповідно стають гірше ГНСС вимірювання, тому що вони зашумлюються іоносферою. Під час планування спостережень потрібно зважати, що якщо присутня висока сонячна активність і дуже висока ймовірність високого індексу, то потрібно на цей день не планувати ваші спостереження.

Для передбачення активності в іоносфері зазвичай використовується аналіз К-індексу, значення якого можна отримати на сайті <http://www.swpc.noaa.gov>

Рекомендується виконувати високоточні геодезичні ГНСС вимірювання в періоди з низькими значеннями К-індексу. Якщо ж можливості вибору часу вимірювання немає, то слід збільшити сеанси ГНСС вимірювань в періоди великих значень К-індексу.

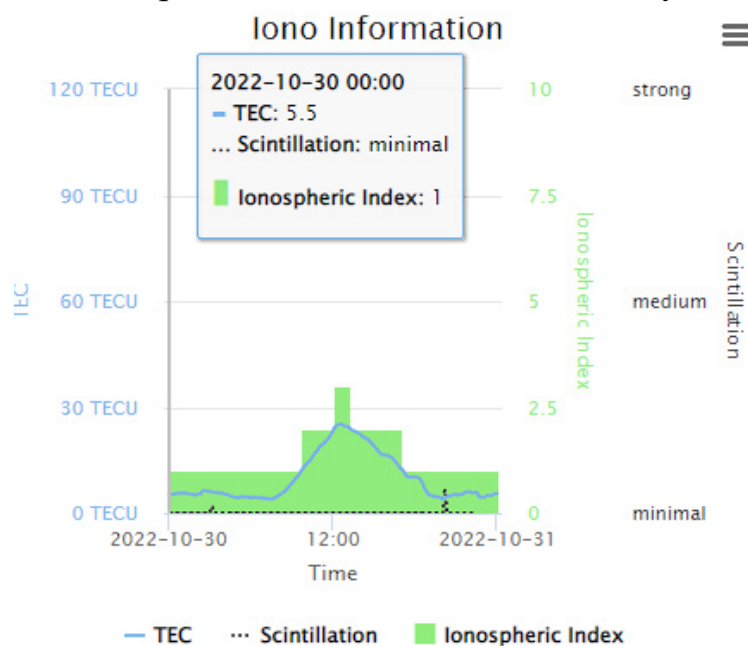


Рис. 7.13. Добовий розподіл Total Electron Content

Запитання для самоперевірки

1. Які вимоги до вибору місця встановлення ГНСС станції?
2. Як оцінюють придатність об'єкта до спостереження?
3. Що таке ефемериди і як вони впливають на планування?

4. Як визначити оптимальний проміжок часу для спостережень?
5. Що таке кут маскування і як він використовується?
6. Як виявити і уникнути перешкод для ГНСС сигналу?
7. Яку роль відіграють програми планування ГНСС-спостережень?
8. Як враховуються атмосферні умови при плануванні?
9. Що таке інтервал вимірів і як його обрати?
10. Як забезпечити стабільність ГНСС-станції під час тривалих спостережень?

Лекція 8. Створення опорних геодезичних мереж

План

1. Вимоги до геометрії мережі та кількості пунктів.
2. Надлишковість та незалежність вимірів.
3. Етапи ГНСС спостережень.

1. Вимоги до геометрії мережі та кількості пунктів

Створення опорних (знімальних) геодезичних мереж є одним з основних видів геодезичних робіт, які проводяться з метою отримання каталогів високоточних геодезичних координат пунктів з оцінкою їх точності. Каталоги координат пунктів потрібні при проведенні практичних всіх видів топо-геодезичних знімальних робіт, прив'язці матеріалів аерофотозйомки та багатьох інших геодезичних та розвідувальних робіт. Першим етапом створення таких мереж є їхнє проектування.

Давайте спочатку окреслимо цілі створення ГНСС мереж:

- Створена ГНСС мережа повинна відповідати вимогам виконання польових робіт на території її створення.
- Повинна забезпечити оптимізацію трудозатрат по виконанню польових робіт.
- Повинна надавати можливість контролювати зібрані дані незалежно від методу виконання знімальних робіт.
- Повинна мати високий ступінь довіри до свої координат.

Основні принципи та поради проектування геодезичних мереж:
Знайдіть достатнє число опорних пунктів у області проекту.

1. Забезпечте гарну геометрію мережі.
2. Використовуйте незалежні базові лінії.
3. Забезпечте надлишковість вимірів мережі.
4. Майте 2 незалежних спостереження (сеансу) кожної станції.
5. Використовуйте станції з гарною видимістю ШСЗ та низькою багатопроменевістю.

Розглянемо докладніше ці принципи. Додатне число опорних пунктів.

Згідно з інструкцією в якості вихідних пунктів, від яких розвивається знімальне обґрунтування слід використовувати всі пункти геодезичної основи, що знаходяться в межах об'єкта та найближчі до об'єкта поза його межами, але не менше 4 пунктів з відомими плановими координатами та не

менше 5 пунктів з відомими висотами, так щоб забезпечити приведення знімального обґрунтування в систему координат та висот пунктів геодезичної основи». Проте, з практичного досвіду досить мати щонайменше 3 пунктів із відомими плановими координатами і щонайменше 4 пунктів із відомими висотами.

На рис. 8.1 показано приклад розташування опорних пунктів, вони позначені жовтим кольором, квадратом позначено пункти з відомою відміткою, трикутником з плановими координатами. Тобто, зручно використовувати пункти на яким є і планова і висотна відмітка, бо таким чином зменшується загальна кількість спостережень.

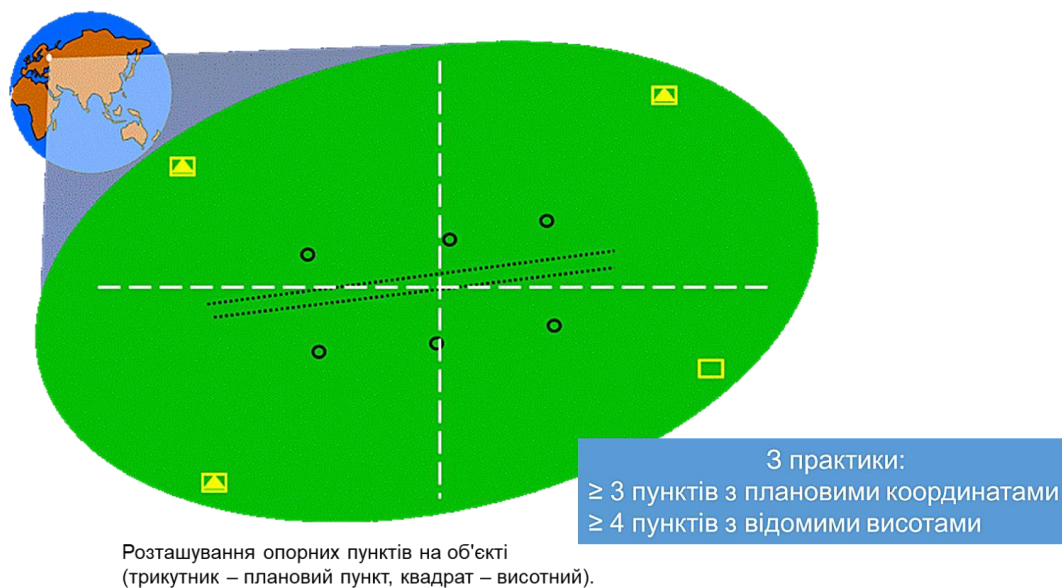


Рис. 8.1. Розташування опорних пунктів на об'єкті

Геометрія мережі. На відміну від методу триангуляції, опорні мережі, побудовані за допомогою методів ГНСС, менш чутливі до геометрії опорної мережі, однак і в цьому випадку потрібно прагнути до побудови опорних мереж з «хорошою» геометрією. «Хороша» геометрія мережі має на увазі як розумне поєднання прив'язки нових і опорних пунктів, і наявність достатньої кількості вузлових точок і надмірних вимірів. При побудові опорних мереж із малим числом вузлових точок та (або) малим числом зв'язків опорних та визначених точок геометрія мережі може стати «поганою» (рис. 8. 2). У наведеному прикладі очевидно, що наявність всього однієї вузлової точки може призвести до суттєвих деформацій і помилок в мережі за наявності грубих вимірювальних помилок на цій точці. Додаткові вимірювання між опорними пунктами необхідні контролю якості самої опорної мережі.

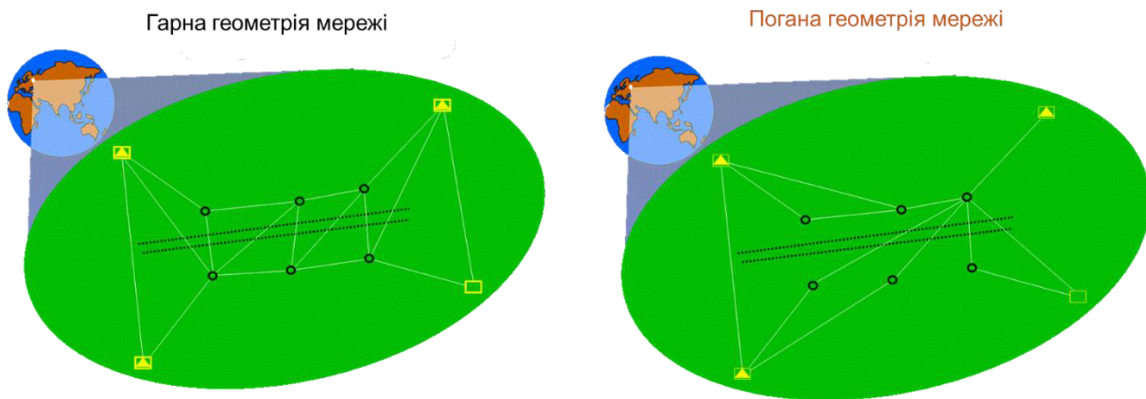


Рис. 8.2. Геометрія мережі, створеної ГНСС методами

2. Надлишковість та незалежність вимірів

Використання незалежних базових ліній (рис. 8.2). При проєктуванні розвитку знімального обґрунтування методом побудови мережі програма польових робіт на об'єкті повинна бути складена так, щоб усі лінії мережі були визначені незалежно одна від одної, включаючи лінії, що спираються на геодезичні пункти. Якщо більше двох приймачів, то необхідно намічати для кожного сеансу такі лінії, ламана з'єднання яких не перетинає сама себе в точках з'єднання ліній і не замикається.

При цьому необхідно запроектувати визначення ліній від кожного пункту знімального обґрунтування, що знову визначається, не менше ніж до 3 пунктів. Приклад схеми розвитку знімального обґрунтування шляхом побудови мережі ми вже бачили на рис. 8.2.

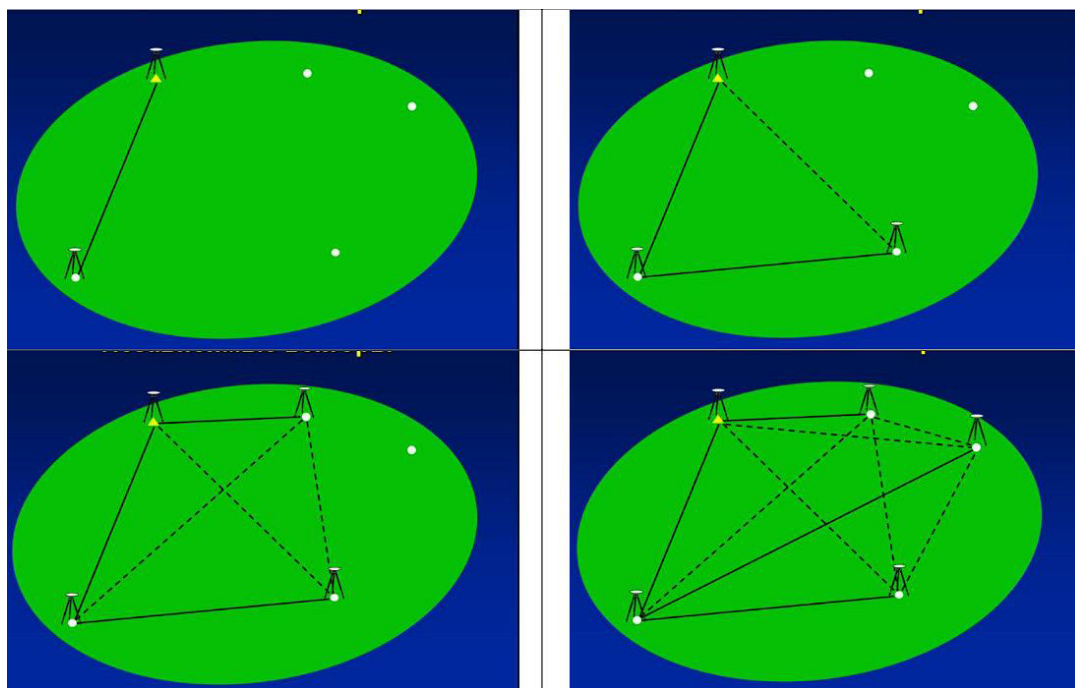


Рис.8.3. Використання незалежних базових ліній

У разі проєктування застосування двох приймачів для спостережень супутників виконання наведених вище вказівок не викликає труднощів. Однак, якщо на об'єкті планують використання більше ніж два приймача, і проєктують ведення робіт сеансами, що включають спостереження на трьох і більше пунктах, то при складанні програми польових робіт необхідно намічати для кожного сеансу в якості ліній, що визначаються, такі лінії, ламана з з'єднання яких не перетинає сама себе в точках з'єднання ліній і не замикається. Приклади проєктування мереж, що складаються з незалежних векторів при одночасному використанні різної кількості ГНСС приймачів, представлені на рис. 8.4

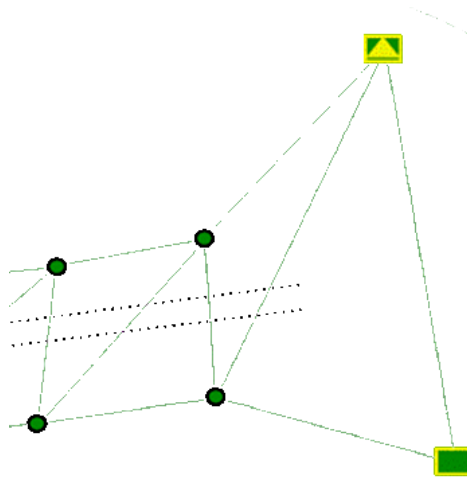


Рис.8.4. Сеанси спостережень

Як виглядатиме загальна формула підрахунку загальної кількості векторів і підрахунку незалежних векторів? Якщо загальна кількість приймачів дорівнює N , то: Загальна кількість векторів = $N(N - 1) / 2$
Кількість незалежних векторів = $N - 1$

Надмірність при побудові знімальної ГНСС мережі забезпечується двома методами:

- Повторні базові лінії
- Додаткові базові лінії (понад мінімально необхідні)

Хороший приклад опорної мережі з достатньою кількістю надлишкових вимірів представлений на рисунку. Але надлишкові виміри бувають різні і потрібно розуміти, що саме вони нам дадуть. Розглянемо приклад мережі з трьома надлишковими векторами різного типу. 3 вектори зв'язують нову та опорну мережу, 3 вектори добре зв'язують між собою лише точки нової частини мережі і надлишковий зв'язок лише для двох точок (рис. 8.5).

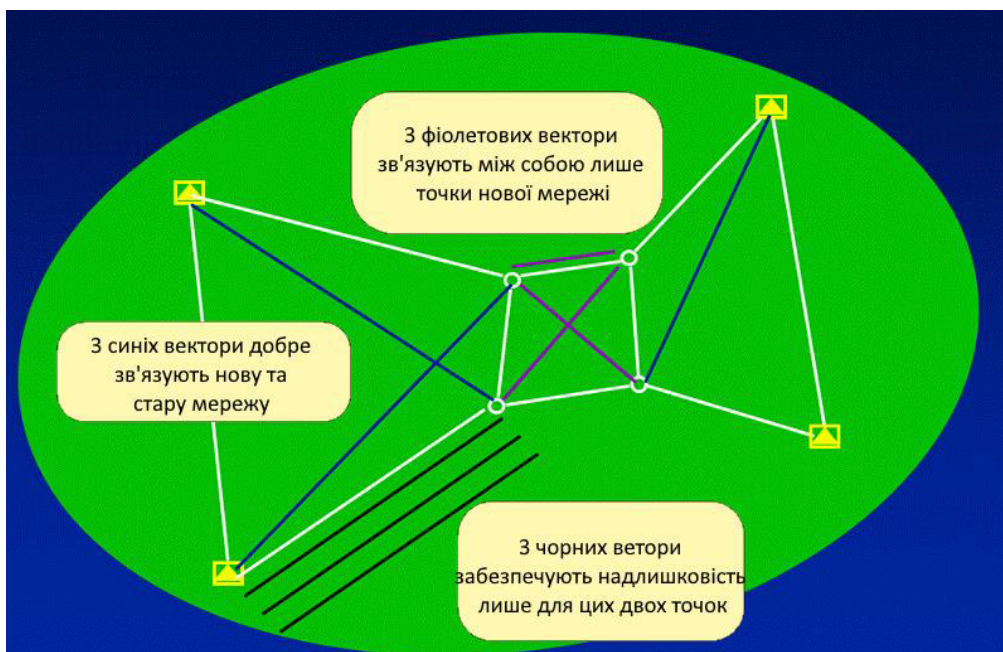


Рис. 8.5. Приклад мережі з трьома надлишковими векторами різного типу

Під час проведення ГНСС вимірювань на пунктах мережі слід проводити щонайменше два сеанси (сесії) вимірювань кожної станції. Сесією називається певний період часу, обраний для спостереження. Перший такий період протягом дня позначається буквою "a" або цифрою "1". Друга сесія протягом того ж дня позначається буквою "b" або цифрою "2". Позначення цифрами має той недолік, що при числі сесій, більшому дев'яти, потрібні два розряду для позначення. День спостережень позначається його наступним номером у календарному році (від 1 до 365). Наприклад, сесія 235d позначає четверту сесію 235-го дня.

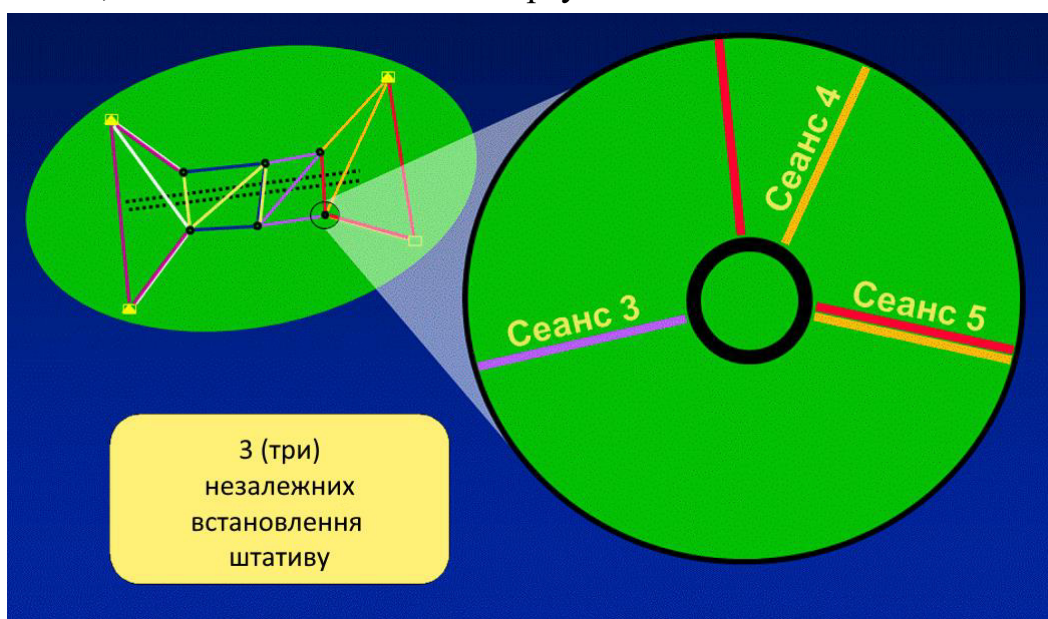


Рис.8.6. Незалежні встановлення штативу в різних сеансах спостережень

Між сесіями слід заново провести центрування антени ДПС приймача над пунктом та провести повторний вимір висоти антени над пунктом. Ця процедура дозволить уникнути грубих і систематичних помилок при побудові опорної мережі та підвищить достовірність кінцевих результатів.

Чотири фактори, що визначають довжину сесії, такі:

1. Відносна геометрія розташування супутника і її зміна.
2. Число супутників (впливає на геометрію).
3. Ступінь збурення іоносфери (для одночастотних приймачів), більший для більш високої широти і в денний час.
4. Кількість перешкод на місцевості.
5. Довжина бази.

Всі ці фактори, окрім останнього, довжини бази, ми вже розглядали під час аналізу помилок під час ГНСС спостережень. Довжина бази – це відстань від базового приймача до ровера і чим вона менше, тим в більш однакових умовах перебувають обидва приймачі, а відповідно швидше визначаються необхідні корекції часу, іоносфери і т. п.

Таблиця 3

Залежність часу спостережень від довжини лінії

Довжина бази [км]	Сесія [хв]
0.1 - 1.0	10 - 30
1.1 - 5.0	30 - 60
5.1 - 10.0	60 - 90
10.1 - 30.0	90 - 120

Для досягнення якісного результату спостережень бажано проводити ГНСС вимірювання на пунктах, що мають мінімальну кількість перешкод для поширення ГНСС сигналів, а також уникати присутності джерел багатопроменевості поблизу пунктів (металеві поверхні, стіни будівель, радіовежі, дерева та ін) Якщо пункт близький до металевої будівлі, єдиним практичним рішенням має бути зміщення пункту до іншого місця. Багатопроменевість не є проблемою для пунктів, розміщених серед швидкісних трас, де великі вантажівки їдуть з високою швидкістю. Багатопроменевість, викликана наявністю вантажівки поблизу антени, занадто коротка за тривалістю, щоб викликати серйозні проблеми. Однак слід уникати паркування великих металевих транспортних засобів поблизу антени.

Якщо можливість вибору місця вимірів відсутня (пункт закладено давно, до епохи ДПСС вимірів), рекомендується провести ретельне планування вимірів і за необхідності збільшити їх тривалість.

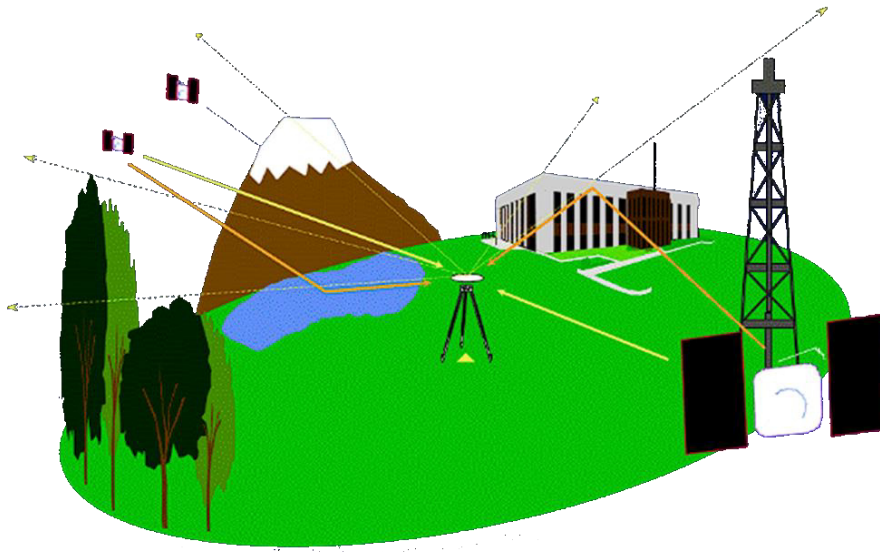


Рис.8.7. Перешкоди, що впливають на багатопроменевість

3. Етапи ГНСС спостережень

Тепер розглянемо всі етапи виконання ГНСС спостережень від проектування польових геодезичних робіт до камерального опрацювання результатів спостережень (рис. 8.8).

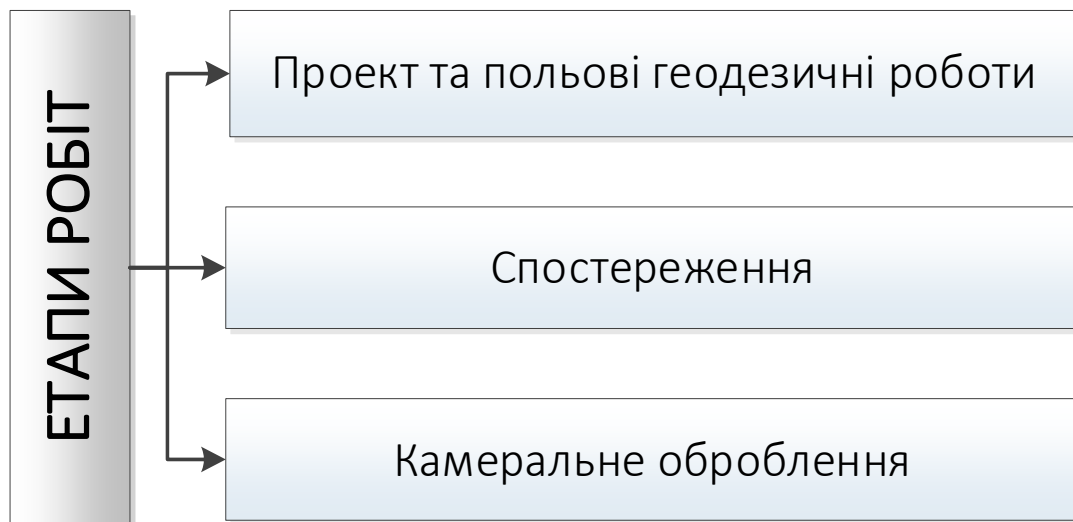


Рис. 8.8. Етапи виконання ГНСС спостережень

Спочатку ми проводимо рекогностування існуючих пунктів ДГМ, до яких ми будемо прив'язувати наші спостереження. Далі плануємо розташування ГНСС станцій. Це і геометрія мережі, оцінка стану

угруповань супутників, врахування схеми перешкод ітп. Потім ми переходимо до закладки пунктів на місцевості необхідним типом знаків. Далі складаємо програму спостережень на основі розглянутих сьогодні 6 принципів. Виконуємо попередній розрахунок точності мережі і дивимось, чи задовольняє він нас у відповідності до вимог виконання робіт. Якщо м не досягаємо допустимої точності, то потрібно збільшити тривалість спостережень на станції чи змінити режим позиціонування. Далі залишається лише підібрати необхідне технічне обладнання, у відповідності до розрахованої точності.

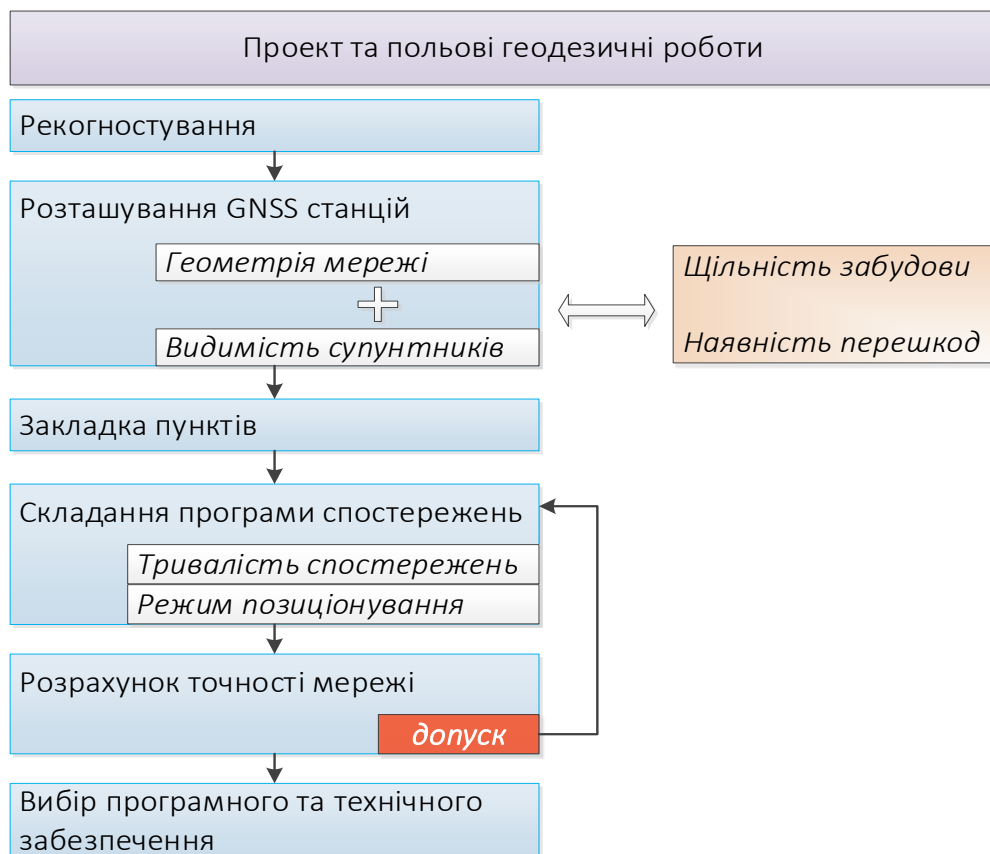


Рис. 8.9. Польові та геодезичні роботи

Безпосередньо спостереження не потребують особливих навичок та технічних знань при ГНСС спостереженнях на станції. Потрібно лише переїжджати між станціями, запускати роботу приймачів і правильно іменувати сесії спостережень. Залежно від необхідної точності мережі може знадобитись виконання нівелювання по її пунктах за відповідною програмою.

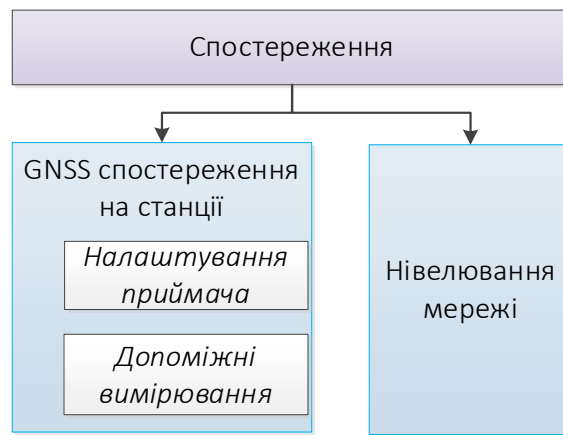


Рис. 8.10. Етап виконання ГНСС спостережень

Останній етап це камеральне оброблення результатів спостережень (рис. 8.11). Спочатку опрацьовуються базові лінії виміряні в кожній сесії та виконується зрівнювання нев'язок в мережі. Далі йде об'єднання супутникових і наземних систем координат, через просторове 7 параметричне перетворення для планових координат та поля поправок для висотної основи. Наступним етапом виконується оцінка точності отриманих координат та формується каталог координат та схеми мережі.

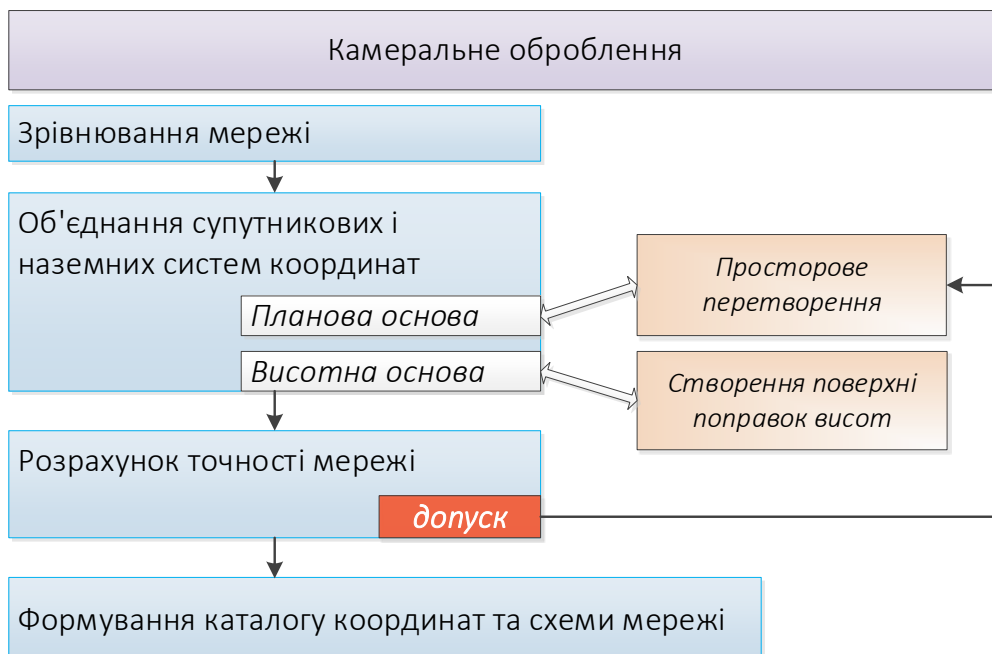


Рис. 8.11. Камеральна обробка результатів ГНСС спостережень

Але ГНСС спостереження це не лише про створення мереж різного рівня, це один з основних і складних видів робіт, які потребують максимальної точності та врахування багатьох моментів. Існує багато різних підходів до використання ГНСС обладнання. Наприклад з їх допомогою

можна виконати передачу відмітки на монтажний горизонт. Для цього від референцної (базової) - станції визначаємо координати GNSS – приймачів на монтажному горизонті на період виконання розмічувальних робіт. За допомогою тахеометра, використовуючи отримані координати GNSS – приймачів, вирішуємо обернену лінійно-кутову геодезичну задачу і визначаємо просторові координати точки стояння приладу (метод вільної станції). Далі виконуємо розмічувальні роботи методом полярних координат (рис. 8.12).

Більш складну схему такого варіанту використовували під час будівництва Бурдж Халіфа в Дубаї. Про це та інші можливості застосування ГНСС технологій ми поговоримо на наступному занятті.

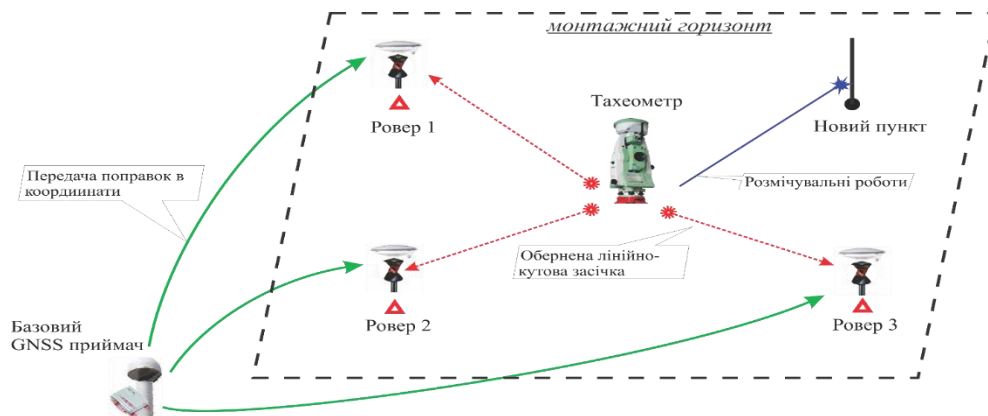


Рис. 8.12. Схема виконання розмічувальних робіт на монтажному горизонті

Запитання для самоперевірки

1. Які вимоги до кількості і розташування пунктів у ГНСС-мережі?
2. Що таке надлишковість вимірювань і чому вона важлива?
3. Як перевірити незалежність вимірів у мережі?
4. Які етапи виконання ГНСС-спостережень передбачені методикою?
5. Як обрати конфігурацію опорної мережі?
6. Які критерії точності задаються для створення мережі?
7. Як виконати оцінку надійності отриманих координат?
8. Які методи використовуються для вирівнювання геодезичної мережі?
9. У чому полягає відмінність локальної і регіональної опорної мережі?
10. Яке обладнання застосовується при створенні опорних мереж?

Лекція 9. Вирішення прикладних задач ГНСС методами

Однією із початкових задач створення ще GPS системи була задача навігації. Саме вона охоплює найбільшу частину аудиторії користувачів ГНСС систем. В першу чергу всім добре відома навігація автомобільного транспорту. На ряду з багатьма іншими системами контролю ГНСС система є центром навігаційної системи. Сучасні системи автомобільної навігації працюють з використанням РТК методів для визначення координат антени автомобіля в сантиметровому діапазоні.

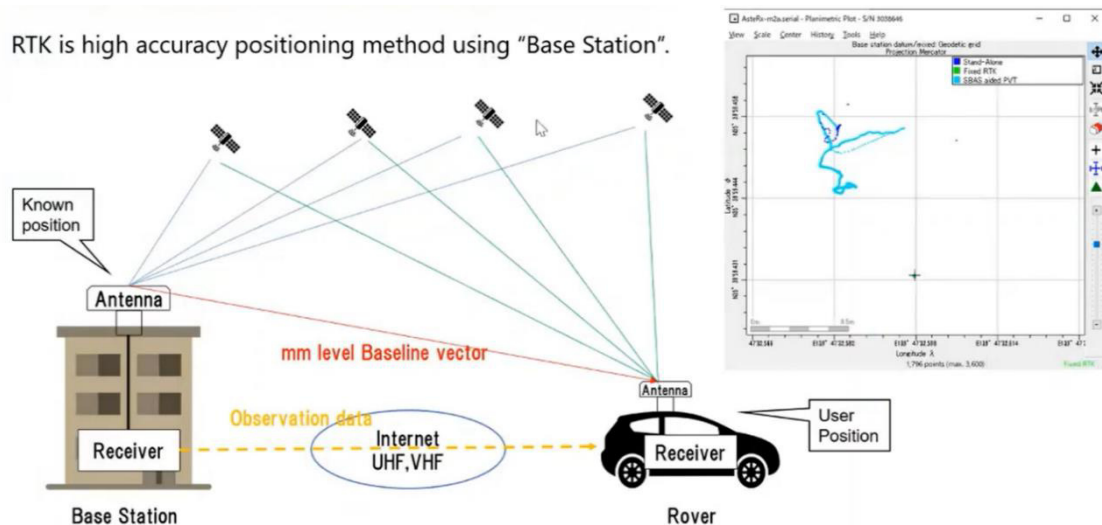


Рис. 9.1. Автономне водіння

Існують розробки технічних рішень, які дозволяють визначати орієнтацію транспорту в просторі і вирішувати задачу його позиціонування навіть в плаваючому режимі, без наявності фіксованого рішення на базовій станції.

If "Base station" is not fixed → Moving-base RTK
You can get precise relative position, angle between 2 antenna.

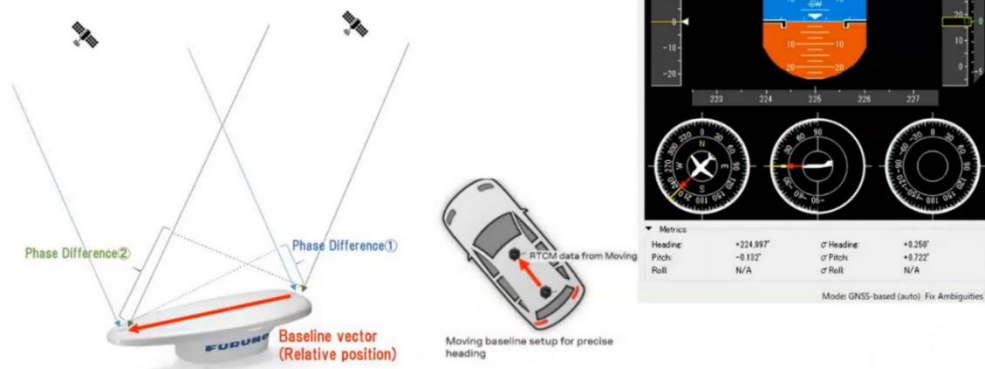


Рис. 9.2. Орієнтування атомобілів

Велика частина питань навігації відходить до позиціонування морських суден. Це і класичні задачі відстежування маршрутів та утримання курсу, а також контроль та автоматизація причалування, дослідження морського дна, буріння скважин та видобуток нафти і газу, взагалі підводне будівництво, наприклад, газопроводів чи обчислювальних центрів.

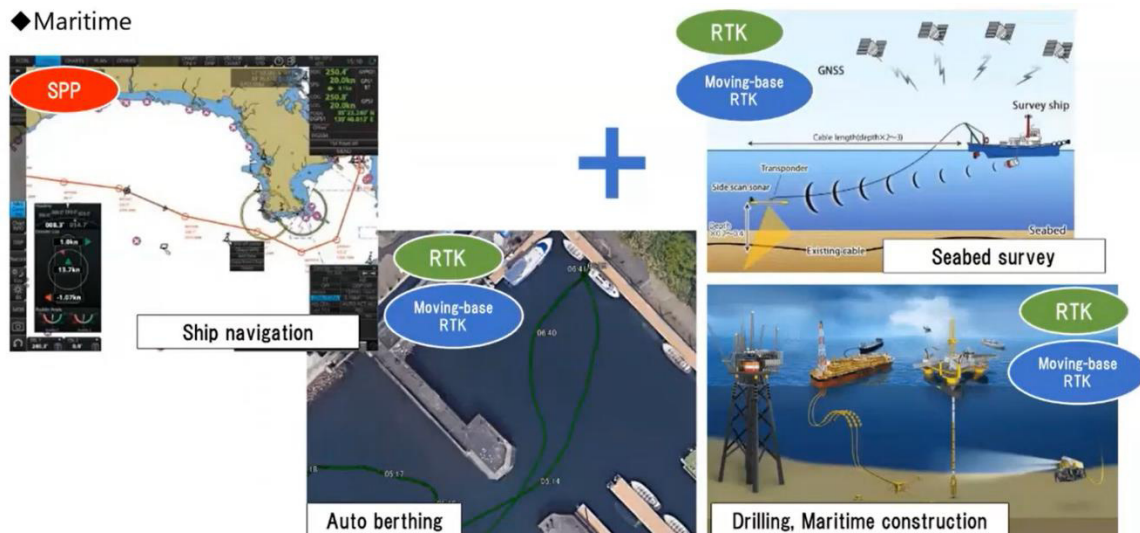


Рис. 9.3. Позиціонування морських суден

Якщо говорити про автоматичну систему причалування. В ній потрібна висока точність для швартування і відшвартування судна, яку забезпечують РТК або ППП методами позиціонування

ГНСС система в комплексі з транспондерами, що встановлено на морському дні, створюють систему динамічного позиціонування бурових платформ DPS. Ця система використовує РТК, ППП або СБАС методи позиціонування для забезпечення 50 см точності визначення координат.



Рис.9.4. Позиціонування бурових платформ

Точне позиціонування морських суден в об'єднанні з ехолотами дозволяє вирішувати задачі побудови карти дна річок та морів. На даному прикладі зліва показано трек руху човна за результатами ГНСС спостережень, а справа визначені глибини дна в точках цього треку.

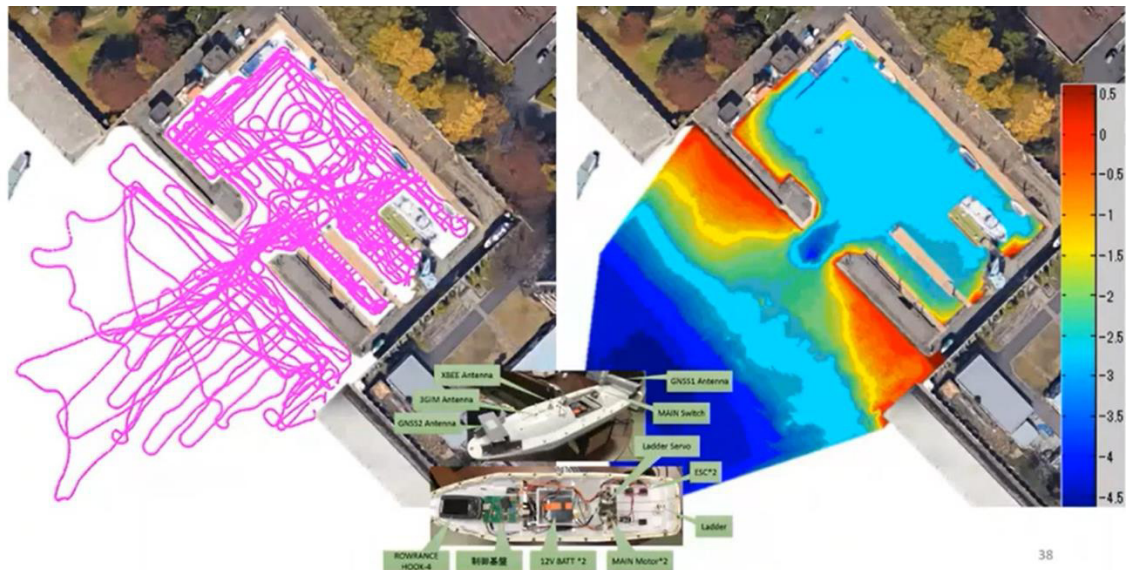


Рис. 9.5. Побудова карт глибин припортової інфраструктури

Цікавим рішенням використання ГНСС спостережень є система виявлення цунамі (рис. 9.6). В Японії, де проблема цунамі є досить гострою, розробили буй з системою автономного живлення, на якому розмістили ГНСС антену і визначають її координати РТК або ППП методами. Відслідковування динаміки зміни відмітки антени дає можливість побачити хвилю.

Tsunami Detection

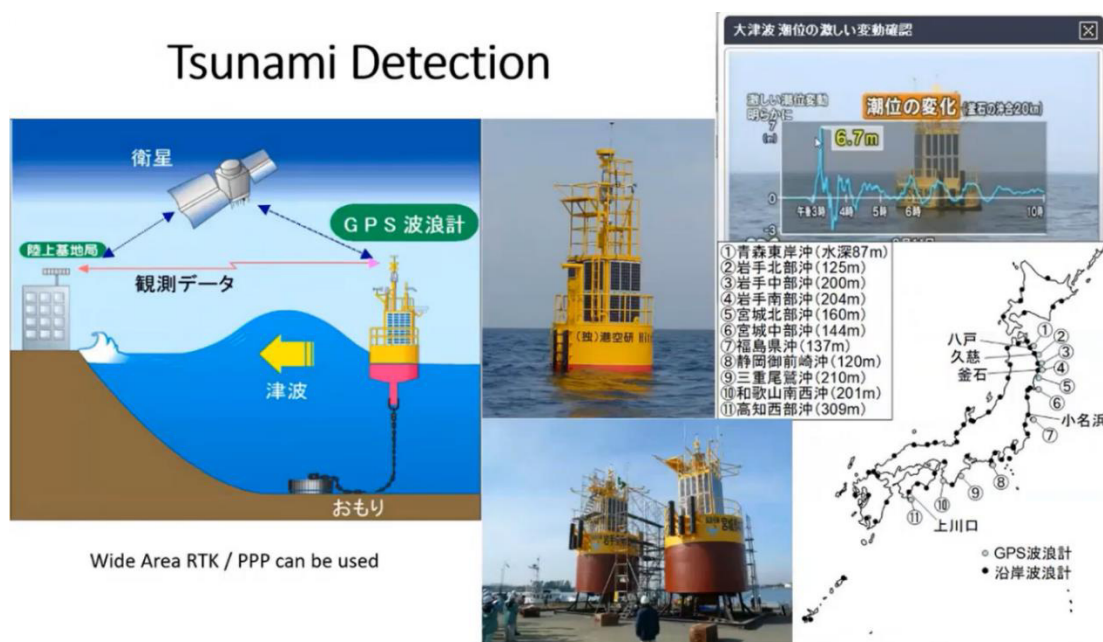


Рис. 9.6. Система виявлення цунамі

Більш звичайне для нас з вами застосування ГНСС технологій, це забезпечення будівництва. Тут ми можемо поєднати ГНСС приймач та звичайні оптичні прилади для роботи без пошуку фізично закріплених в землі пунктів геодезичної мережі, адже координати станції стояння ми отримуємо ГНСС методами. Звісно від точності отриманих координат ми можемо говорити про виконання знімальних чи розмічувальних робіт. Чисте використання ГНСС обладнання у вигляді роверної антени встановленої на віху, для виконання знімальних та розмічувальних робіт. Можливе використання як базової станції для визначення точних координат дрону чи позиціонування будівельної техніки.

◆ Construction

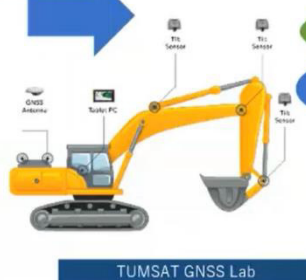
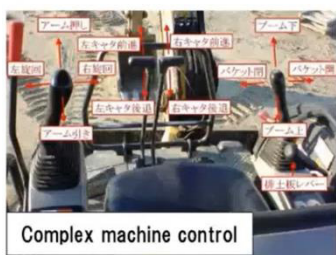


Рис. 9.7. Забезпечення будівництва

Наприклад використання ГНСС технології під будівництва тунелю для моніторингу за осіданням ґрунту дозволяє зменшити кількість виконавців з 2 до одного в порівнянні з класичним тахеометричним зніманням.



Рис. 9.8. Оптимізація трудозатрат

Контроль позиціонування важкої техніки в агропромисловості дозволяє оптимізувати витрати на збір урожаю та обробку земель. На малюнку показано наскільки більш точний маршрут техніки можна отримати завдяки впровадженню РТК технології.

◆ Agriculture

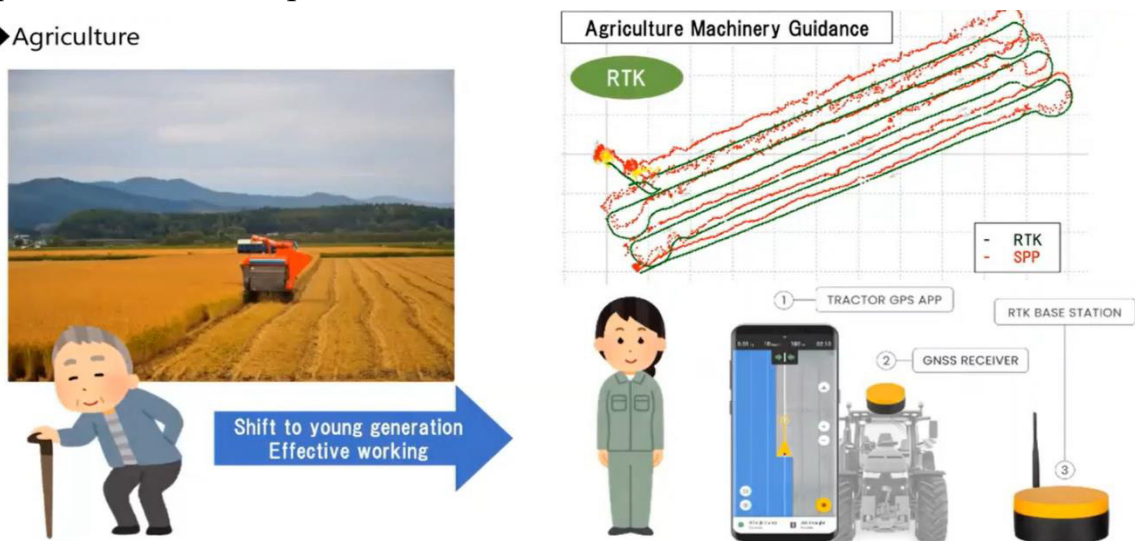


Рис. 9.9. ГНСС в агропромисловості

Точне позиціонування дронів дозволяє отримати високоякісні матеріали за результатами фотограмметричної обробки, які мають прив'язку до системи координат місцевості. Це і ортофотоплани і моделі рельєфу. По-перше знання точних координат дрону дає нам менші помилки центрів фотографування і тим самим пришвидшує обробку наших матеріалів, по-друге дозволяє зменшити кількість опорних точок або взагалі їх не використовувати, що дає змогу не виконувати частину польових робіт особливо в труднодоступних місцевостях.

◆ UAV

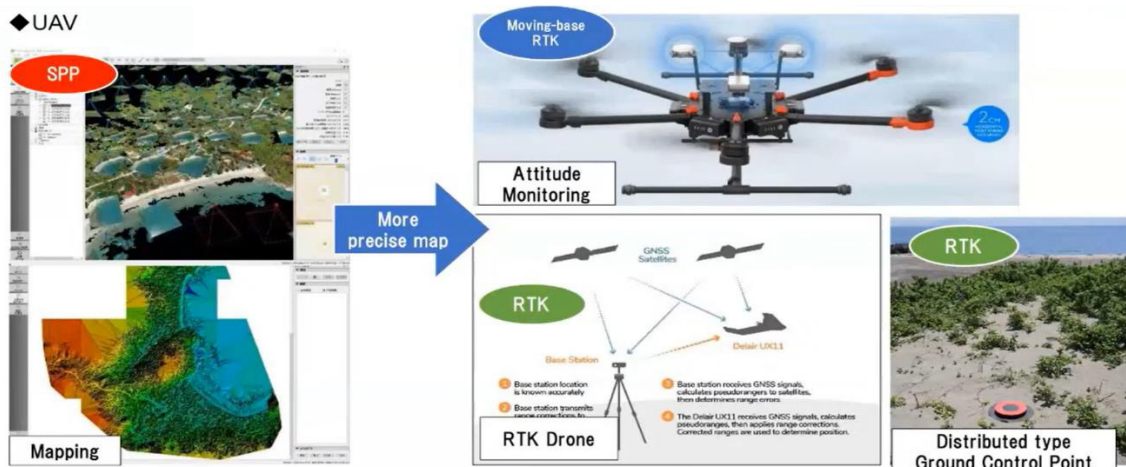


Рис. 9.10. Точне позиціонування БПЛА

Також ГНСС методи застосовують в задачах геодезичного моніторингу споруд, як окремий метод, так і в комплексі з іншими. Наприклад спостереження за зсувами монтажного горизонту. Координати визначають від пари опорних пунктів геодезичної мережі, на яких розташовані приймачі GNSS або від віртуальних станцій у разі застосування мережного режиму. Наприклад система може бути застосована до моніторингу коливання висотної споруди в наслідок вітрового навантаження, або при спостереженні за коливаннями мосту.

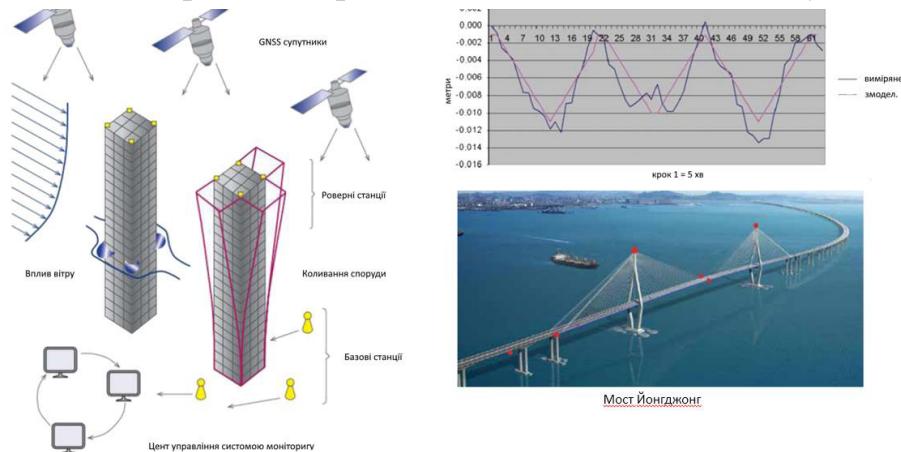


Рис. 9.11. ГНСС в в задачах геодезичного моніторингу

Одним з прикладів комплексного застосування в системі моніторингу є система геодезичного моніторингу Leica, яка заснована на спільному використанні тахеометра, GNSS приймачів, інклінометрів та програмного забезпечення для обробки результатів вимірювань та побудови прогнозної моделі.

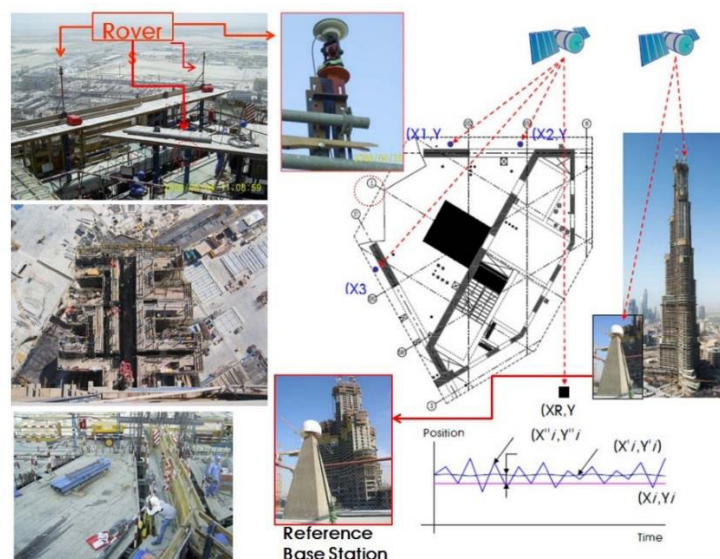


Рис.9.12. Система геодезичного моніторингу Leica

Вздовж споруди розміщували датчики нахилу, які надавали інформацію про нахил по двом осям. На монтажному горизонті встановлювали ГНСС приймачі, координати яких визначали від базової станції. Сумісна обробка координат точок на монтажному горизонті та даних інклінометра давали інформацію про крен та кручення споруди і відповідно поточний нахил монтажного горизонту.

Система геодезичного моніторингу GOCA та Trimble заснована на спільній роботі роботизованих тахеометрів та GNSS приймачів, також має своє програмне забезпечення. Застосовується для контролю положення гребель та мостів.

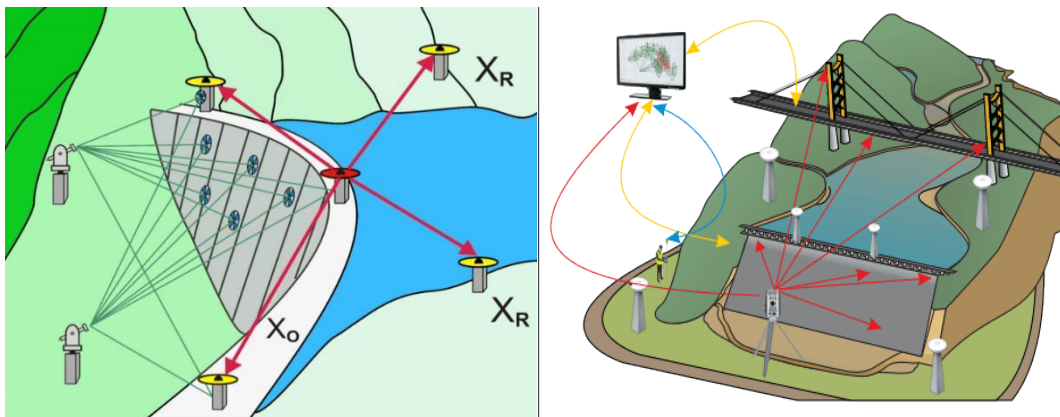


Рис. 9.13. Система геодезичного моніторингу GOCA та Trimble

Схожа система від Лейки, так само в комбінації тахеометричних та ГНСС спостережень отримують інформацію про стан греблі. Результати ГНСС спостережень використовують для визначання процесу осідання, а результати тахеометричного знімання для контролю планового зміщення. Як приклад реалізація такої схеми моніторингу ГЕС.

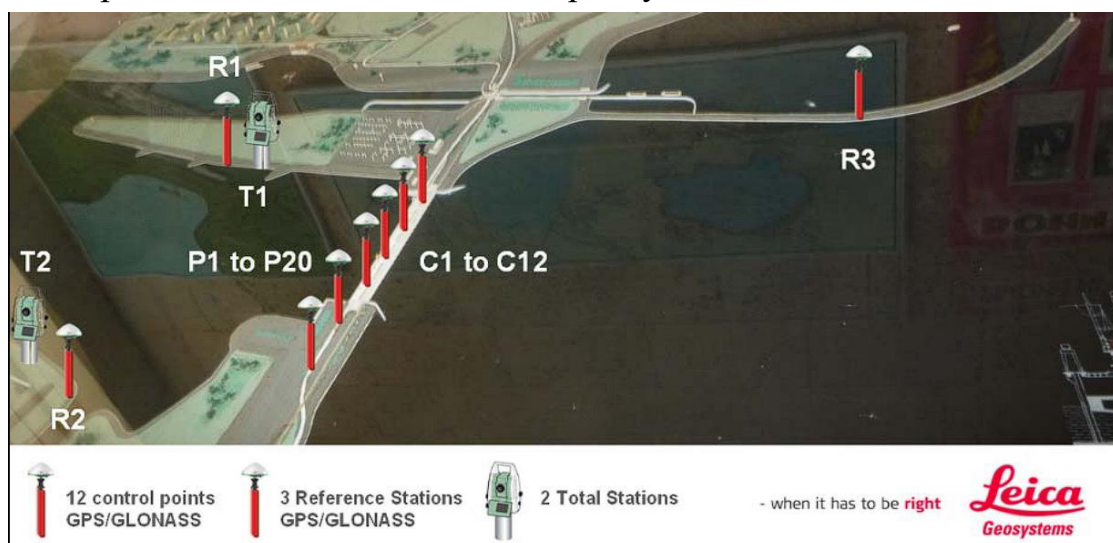


Рис. 9.14. Система геодезичного моніторингу GOCA та Trimble

Запитання для самоперевірки

1. Які задачі вирішуються ГНСС у кадастрі?
2. Як використовуються ГНСС у моніторингу інженерних споруд?
3. Які особливості мають ГНСС-вимірювання при зйомці кар'єрів?
4. Як ГНСС застосовується у будівництві?
5. У чому полягає перевага ГНСС у сільському господарстві?
6. Які задачі навігації вирішуються за допомогою ГНСС?
7. Як ГНСС інтегрується в безпілотні транспортні системи?
8. Як використовуються ГНСС-дані в геоінформаційних системах (ГІС)?
9. Які можливості відкриває мобільне картографування на базі ГНСС?
10. Як забезпечити точність у прикладних задачах при використанні ГНСС?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Б. Гофман-Веленгоф, Г. Ліхтенегер, Д. Колінз. «Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика». – Київ : Наукова думка, 1995 – 380 с.
2. Parkinson B.W. «Global position System: Theory and Applications Volume I. – American Institute os Aeronautics and Astronautics» / B.W. Parkinson. J.J.Jr. Spilker. – Washington: 1996. – p. 798. Volume II. – American Institute os Aeronautics and Astronautics. Washington. 1996. – p. 652
3. Mohinder S. «Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration» / Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews , John Wiley & Sons, Inc. 2001- p. 392
4. А.Л. Островський, О.І. Мороз, В.Л. Тарнавський. «Геодезія». – Ч II : підручник. – Львів : Львівська політехніка, 2007 – 508 с.
5. Марков В.І. «Основи космічної геодезії»: підручник. – Кіровоград: ДЛІАУ, 2002. – 236 с.
6. Subirana, J. S., Hernández-Pajares, M., Zornoza, J. M. (2013). GNSS Data Processing. Volume I: Fundamentals and Algorithms. https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf
7. Кучер О., Ренкевич О., Лепетюк Б. Дослідження референціальних систем координат для території України : навч. посіб. – Київ: Геоіздат. – 2016. – 186 с.
8. <http://library.knuba.edu.ua/> - Офіційний сайт наукової бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури.
9. <https://gage.upc.edu/glab-download/> - Ресурс від GAGE Lab, який надає інструменти для аналізу даних GNSS, включаючи GLab (GNSS data analysis software).
10. <https://geodesy.noaa.gov/UFCORS/> - сервіс для завантаження даних супутникових спостережень в форматі RINEX від мережі безперервно діючих опорних станцій (CORS).
11. <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss> - архів спостережень станцій ГНСС.
12. <https://noaa.maps.arcgis.com/apps/webappviewer> - мапа мережі безперервно діючих опорних станцій (CORS).
13. <https://igs.org/network> - Глобальна мережа станцій GNSS, що надає високоточні дані для геодезії, геофізики та кліматології.
14. <https://www.epncb.oma.be> - Європейська мережа постійних станцій GNSS для геодезичних і геофізичних досліджень

15. <https://www.gnssplanning.com/#/settings> - Інструмент для планування супутникових спостережень GNSS.
16. <http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html#> - Онлайн-інструмент для аналізу супутників GNSS у реальному часі.
17. <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/software/leica-infinity/leica-infinity-30-day-free-trial> - Програмне забезпечення Leica Infinity
18. https://www.cropos.hr/files/docs/manuals/leica_gps1200_user_en.pdf - інструкція користувача GNSS leica 1200.

Навчальне видання

МЕДВЕДСЬКИЙ Юрій Вікторович

ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня

вищої освіти спеціальності

193 «Геодезія та землеустрій»

Комп'ютерне верстання *А.П. Селівестрової*

Ум. друк. арк. 6,51. Обл.-вид. арк. 7,0

Електронний документ. Вид № 92/V-25

Виконавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідectво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.