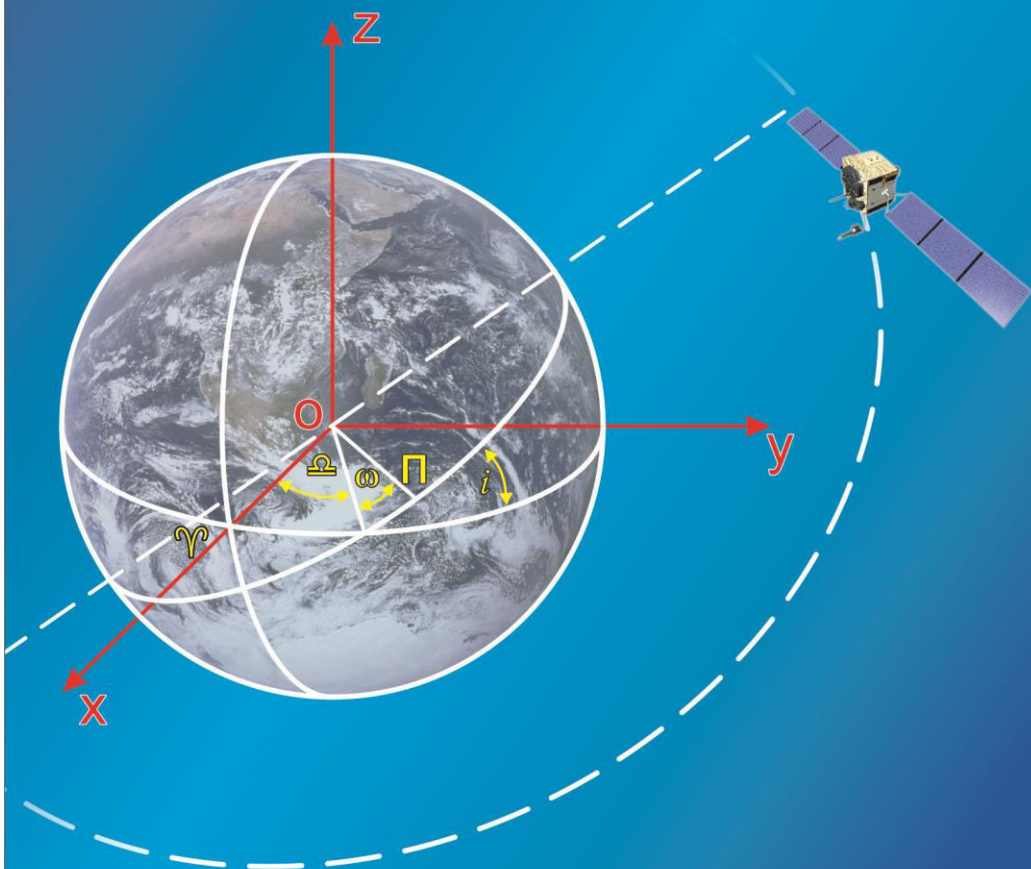


Черняга П.Г. Бялик І.М. Янчук Р.М.

# СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ





Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування

**П.Г. Черняга, І.М. Бялик, Р.М. Янчук**

# **СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ**

*За загальною редакцією  
доктора технічних наук,  
професора П.Г. Черняги*

***Навчальний посібник***

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та  
спорту України як навчальний посібник для студентів на-  
прямую підготовки «Геодезія, картографія та землеустрій»  
вищих навчальних закладів*

Рівне – 2013

УДК 528.344(075)

ББК 26.11я7

Ч-49

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки,  
молоді та спорту України  
(Лист № 1/11 - 18612 від 03.12.2012 р. )*

**Рецензенти:**

**Заблоцький Ф.Д.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка»;

**Третяк К.Р.**, доктор технічних наук, професор, директор інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка»;

**Перій С.С.**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії і геоінформатики Львівського національного аграрного університету.

**Черняга П.Г., Бялик І.М., Янчук Р.М.**

**Ч-49** Супутникова геодезія. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 222 с.

**ISBN 978-966-327-244-3**

Навчальний посібник «Супутникова геодезія» містить теоретичний матеріал до окремих змістових модулів, методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, програму навчальної практики, зразок тесту і критерії оцінювання знань студентів, список рекомендованої літератури. Таким чином в посібнику комплексно висвітлюються використання глобальних навігаційних супутникових систем в геодезичних вимірюваннях. Він поєднує теоретичні матеріали та практичні рекомендації, що дозволять найбільш повно закріпити знання, навички та вміння майбутніх фахівців галузі.

Навчальний посібник «Супутникова геодезія» може бути корисним при вивченні дисципліни в умовах Європейської кредитно-трансферної системи для студентів і викладачів напрямку 6.080101 “Геодезія, картографія та землеустрій”.

**УДК 528.344(075)**

**ББК 26.11я7**

**ISBN 978-966-327-244-3**

© Черняга П.Г., Бялик І.М.,  
Янчук Р.М., 2013

© Національний університет  
водного господарства та  
природокористування, 2013

# ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	8
<b>I. Теоретичний матеріал до вивчення окремих змістових модулів</b> .....	11
<b>Змістовий модуль 1. Системи координат і часу. Закони руху штучних супутників Землі...</b> .....	11
<b>Тема 1. Предмет та завдання супутникової геодезії...</b>	11
1.1. <i>Супутникова геодезія та її місце серед інших наук</i> .....	11
1.2. <i>Предмет та завдання супутникової геодезії</i> .....	11
1.3. <i>Етапи розвитку супутникової геодезії</i> .....	13
1.4. <i>Методи супутникової геодезії</i> .....	16
1.4.1. <i>Геометричний метод</i> .....	16
1.4.2. <i>Динамічний метод</i> .....	19
<b>Тема 2. Системи небесних та земних координат.....</b>	21
2.1. <i>Поняття про небесну сферу</i> .....	21
2.2. <i>Класифікація систем координат</i> .....	25
2.3. <i>Сферичні системи координат</i> .....	26
2.4. <i>Геодезична система координат</i> .....	27
2.5. <i>Астрономічна система координат</i> .....	28
2.6. <i>Географічна система координат</i> .....	28
2.7. <i>Умовна Земна система координат</i> .....	29
2.8. <i>Умовна інерціальна система координат</i> .....	30
2.9. <i>Взаємне перетворення координат точки різних систем</i> .....	31
2.10. <i>Геоцентрична система координат WGS-84</i> .....	34
2.11. <i>Система геодезичних параметрів Землі ПЗ-90</i> . .....	35
2.12. <i>Системи координат, що використовуються в Україні</i> .....	36
2.13. <i>Системи висот</i> .....	37
<b>Тема 3. Системи відліку часу і зв'язки між ними.....</b>	38
3.1. <i>Одиниці вимірювання часу</i> .....	38
3.2. <i>Системи відліку часу</i> .....	40
3.3. <i>Зоряний та сонячний час</i> .....	40

3.4.	<i>Всесвітній, поясний, декретний, атомний час..</i>	41
3.5.	<i>Динамічний та ефемеридний час.....</i>	42
3.6.	<i>Системи відліку часу в космічних системах.....</i>	43
3.7.	<i>Календар.....</i>	43
<b>Тема 4. Елементи та класифікація орбіт ШСЗ.</b>		
<b>Основи теорії руху ШСЗ.....</b>		
4.1.	<i>Поняття орбіти. Ефемериди орбіти.....</i>	44
4.2.	<i>Класифікація орбіт ШСЗ.....</i>	44
4.3.	<i>Елементи орбіти ШСЗ.....</i>	45
4.4.	<i>Поняття про незбурений рух ШСЗ. Закони Кеплера.....</i>	46
4.5.	<i>Збурюючі фактори.....</i>	48
4.6.	<i>Диференціальні рівняння збуреного руху ШСЗ...</i>	48
4.7.	<i>Елементарний вивід рівняння руху супутника...</i>	49
4.8.	<i>Обчислення незбурених ефемерид.....</i>	52
4.9.	<i>Визначення елементів орбіти за спостереженнями супутників.....</i>	52
<b>Тема 5. Технічні засоби та методи спостереження за ШСЗ.....</b>		
5.1.	<i>Активні та пасивні ШСЗ.....</i>	53
5.2.	<i>Класифікація методів спостережень ШСЗ.....</i>	54
5.3.	<i>Оптичні методи спостережень.....</i>	54
5.4.	<i>Радіотехнічні спостереження.....</i>	55
5.5.	<i>Доплерівські спостереження.....</i>	56
5.6.	<i>Умови радіовидимості супутників.....</i>	58
<b>Змістовий модуль 2. Глобальні навігаційні супутникові системи.....</b>		
<b>Тема 6. Глобальні навігаційні супутникові системи.....</b>		
6.1.	<i>Поняття про глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС).....</i>	61
6.2.	<i>Архітектура ГНСС.....</i>	63
6.3.	<i>Космічний сегмент.....</i>	64
6.4.	<i>Контрольний сегмент.....</i>	69
6.5.	<i>Сегмент користувача.....</i>	72

<b>Тема 7. Структура похибок GPS-вимірювань.....</b>	<b>75</b>
7.1. <i>Загальна характеристика похибок при GPS-вимірюваннях.....</i>	75
7.2. <i>Похибки, обумовлені сузір'ям супутників, критерії їх оцінки.....</i>	76
7.3. <i>Похибки, обумовлені зовнішніми умовами.....</i>	78
7.4. <i>Похибки, обумовлені GPS-приймачем.....</i>	82
<b>Тема 8. Побудова та розвиток державної геодезичної мережі з використанням ГНСС. Перманентні станції....</b>	<b>83</b>
8.1. <i>Застосування GPS для побудови геодезичних мереж.....</i>	83
8.2. <i>Поняття про мережі перманентних станцій та використання їх даних при супутникових спостереженнях.....</i>	87
<b>Тема 9. Методи визначення координат при GPS-вимірюваннях.....</b>	<b>93</b>
9.1. <i>Загальний принцип визначення координат точки за допомогою GPS-вимірювань.....</i>	93
9.2. <i>Класифікація методів та технологій визначення координат за допомогою GPS-вимірювань.....</i>	94
9.3. <i>Диференціальні (відносні) методи GPS-вимірювань.....</i>	98
9.4. <i>Статичний метод.....</i>	99
9.5. <i>Визначення координат методом «Швидкої статистики».....</i>	99
9.6. <i>Кінематичний метод.....</i>	100
9.7. <i>Метод «стій-іди».....</i>	101
9.8. <i>Псевдостатична, псевдокінематична та реокупційна технології.....</i>	102
<b>Тема 10. Планування та проведення геодезичних вимірювань з використанням GPS-приймачів.....</b>	<b>102</b>
10.1. <i>Загальний порядок, специфіка планування і організація робіт при супутникових вимірюваннях.....</i>	102
10.2. <i>Складання технічного проекту.....</i>	103

10.3.	<i>Передпольове планування в камеральних умовах.</i>	105
10.4.	<i>Підготовка обладнання до польових вимірювань</i>	106
10.4.1	<i>Вимоги до GPS-приймачів.....</i>	106
10.4.2	<i>Метрологічне забезпечення.....</i>	107
10.4.3	<i>Перевірка працездатності безпосередньо перед вимірюваннями.....</i>	108
10.4.4	<i>Організація базових станцій (в т.ч. і отримання доступу до найближчої перманентної станції)..</i>	109
10.4.5	<i>Закладання центрів (тимчасових роверних точок).....</i>	110
10.4.6	<i>Ведення польового журналу.....</i>	111
10.5.	<i>Програми планування GPS-вимірювань.....</i>	112
10.6.	<i>Складання технічного звіту та необхідної документації.....</i>	113
<b>Тема 11.</b>	<b>Опрацювання даних GPS-вимірювань.....</b>	<b>113</b>
11.1.	<i>Загальний порядок та завдання, що виникають при опрацюванні даних GPS-вимірювань.....</i>	113
11.2.	<i>Опрацювання даних GPS-вимірювань із застосуванням спеціальних програмних продуктів.....</i>	114
11.3.	<i>Оцінка точності GPS-вимірювань.....</i>	118
<b>II.</b>	<b>Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт.....</b>	<b>121</b>
	<i>Лабораторна робота № 1</i>	
	<i>Перетворення координат точки в різних системах координат.....</i>	121
	<i>Лабораторна робота № 2</i>	
	<i>Визначення основних параметрів незбуреного руху ШСЗ.....</i>	126
	<i>Лабораторна робота № 3</i>	
	<i>Обчислення незбурених ефемерид ШСЗ.....</i>	130
	<i>Лабораторна робота № 4</i>	
	<i>Будова та призначення комплексу GPS-приймачів Trimble4800 та Leica GPS1200.....</i>	133



Лабораторна робота № 5 <i>Будова і технічні характеристики контролерів TSC-1 та RX1210T</i> .....	141
Лабораторна робота № 6 <i>Планування супутникових спостережень</i> .....	151
Лабораторна робота № 7 <i>GPS-вимірювання методом швидкої статистики</i> .....	158
Лабораторна робота № 8 <i>GPS-вимірювання методом «Стій-іди»</i> .....	165
Лабораторна робота № 9 <i>GPS-вимірювання в режимі реального часу RT</i> .....	168
Лабораторна робота № 10 <i>Вивчення структури GPS-сигналу та файлу спостережень у форматі RINEX</i> .....	171
Лабораторна робота № 11 <i>Опрацювання даних GPS-вимірювань в програмних продуктах Trimble Geomatics Office (TGO) і Leica Geo Office (LGO)</i> .....	181
Лабораторна робота № 12 <i>Створення планових матеріалів на основі опрацьованих даних GPS-вимірювань</i> .....	191
<b>III. Навчальна практика із «Супутникової геодезії».</b>	<b>195</b>
Програма навчальної практики.....	195
Техніка безпеки при проходженні навчальної практики	196
Оформлення звіту.....	199
<b>IV. Контроль знань та критерії оцінювання.....</b>	<b>200</b>
Зразок екзаменаційного тесту для оцінювання знань студентів (має 40 балів).....	200
Відповіді для самоконтролю.....	205
Критерії оцінювання знань студентів.....	207
<b>Предметний покажчик .....</b>	<b>208</b>
<b>Література .....</b>	<b>220</b>

## Вступ

За останні десятиліття геодезичні вимірювання за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) пройшли шлях від перших невпевнених кроків до масового використання для створення опорних геодезичних мереж, обслуговування землевпорядної і будівельної галузей, створення планів та карт різних масштабів тощо. Ще донедавна невідома аббревіатура GPS тепер визначає окрему галузь зі своїми керівними органами, міжнародними угодами, технічним та технологічним забезпеченням.

Такий бурхливий розвиток цієї галузі призвів до нестачі кваліфікованих спеціалістів, що не просто можуть користуватися конкретним приладом та програмним продуктом, але й вирішувати складні та комплексні завдання, з використанням GPS-вимірювання, поєднуючи їх з іншими геодезичними методами.

Цей посібник підготовлено для студентів напряму підготовки 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій». Він містить теоретичний матеріал дисципліни «Супутникова геодезія», вказівки до проведення лабораторних робіт, програму навчальної практики та критерії оцінювання знань студентів.

Розділ «Теоретичний матеріал до вивчення окремих змістових модулів» логічно поділений на два модулі. В першому модулі висвітлюються загальні поняття супутникової геодезії в цілому, не торкаючись власне глобальних навігаційних супутникових систем. Зокрема описуються системи координат та часу, теорія руху штучних супутників Землі (ШСЗ), технічні засоби та методи спостережень за ШСЗ. Цей матеріал допоможе краще зрозуміти принцип роботи та методи ГНСС.

В другому модулі вивчаються власне ГНСС: як вже розгорнуті (GPS Navstar (США) та ГЛОНАСС (Росія), також і ті, що тільки розбудовуються (Compass або Бейдоу (Китай),

GALILEO (Європа), IRNSS (Індія) та QZSS (Японія). Описано їх загальну архітектуру, принципи вимірювання, класифіковано та описано методи вимірювань і джерела похибок. Також розглянуто принципи роботи перманентних станцій, планування, проведення та опрацювання результатів вимірювань. Таким чином, висвітлено всі аспекти роботи ГНСС та закладено теоретичне підґрунтя для практичного використання цих систем в геодезичних вимірюваннях.

В розділі «Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт» описано структуру, наведено теоретичні відомості та розроблено завдання дванадцяти лабораторних робіт. Основна увага приділяється практичним навичкам роботи з приладами, виконанню вимірювань різними методами та опрацюванню результатів вимірювань. В лабораторних роботах розглянуто комплекти геодезичних приймачів та програмне забезпечення двох провідних світових виробників Trimble та Leica. При цьому увага загострюється не стільки на відмінностях, скільки на спільних рисах роботи з цим обладнанням.

Для закріплення практичних знань і навичок студенти проходять навчальну практику. Мета, завдання, програма практики, правила техніки безпеки при її проходженні та вимоги до оформлення звіту описано в розділі «Навчальна практика із супутникової геодезії».

В розділі «Контроль знань та критерії оцінювання» наведено тестове завдання, відповіді для самоперевірки та критерії оцінювання знань студентів.

Таким чином, в посібнику комплексно висвітлюються використання ГНСС в геодезичних вимірюваннях. Він поєднує теоретичні матеріали та практичні рекомендації, що дозволять найбільш повно закріпити знання, навички та вміння в майбутніх фахівців напряму підготовки 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій».

В даному посібнику теми 1,4-6 теоретичного матеріалу, лабораторні роботи 1,2,4 та розділ «Контроль знань та кри-

терії оцінювання» написані д.т.н., професором Чернягою П.Г.; теми 2,3,10,11 лабораторні роботи 3,5-9, а також розділ «Навчальна практика з «Супутникової геодезії» написані к.т.н., доцентом Бяликом І.М.; теми 7,8,9, лабораторні роботи 10-12 написані к.т.н., доцентом Янчуком Р.М. Загальну редакцію здійснено д.т.н., професором Чернягою П.Г.

# **I. ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ВИВЧЕННЯ ОКРЕМИХ ЗМІСТОВИХ МОДУЛІВ**

## **Змістовий модуль 1 Системи координат і часу. Закони руху ШСЗ**

### **Тема 1. Предмет та завдання супутникової геодезії**

#### ***1.1. Супутникова геодезія та її місце серед інших наук***

Супутникова геодезія – розділ геодезичної науки, що використовує спостереження штучних супутників Землі та інших космічних об'єктів для розв'язання наукових, науково-технічних і практичних задач геодезії.

В супутниковій геодезії використовуються як результати спостережень супутників з поверхні Землі, так і результати спостережень безпосередньо із супутників на Землю та для вирішення глобальних задач із супутника на супутник.

Супутникова геодезія – це розділ вищої геодезії, який, в свою чергу, входить до сім'ї геодезичних наук. Вона тісно пов'язана з фізикою, математикою, астрономією, інформатикою, геоінформатикою, науками про Землю та іншими технічними і природничими науками.

Супутникова геодезія почала активно використовуватись для вирішення задач народного господарства, зокрема, топографічного знімання, землевпорядкування, будівництва, створення ГІС (геоінформаційних систем) тощо. Таким чином вона набуває прикладного значення та посідає чільне місце в різних галузях народного господарства.

#### ***1.2. Предмет та завдання супутникової геодезії***

Предметом супутникової геодезії є теорія використання штучних супутників Землі (ШСЗ), космічних апаратів (КА) та їх систем, а також Місяця й інших природних космічних об'єктів для розв'язання задач геодезії, геодинаміки та геофізики.

При цьому виникає необхідність уточнення та визначення орбіт супутників, обчислення ефемерид (значення координат супутників в певний період часу), визначення вимог до геодезичних супутників залежно від параметрів орбіти і складу бортової апаратури, розташування наземних станцій спостережень, використання приладів і методів спостережень супутників, питання опрацювання та інтерпретації отриманих результатів, що також є предметом вивчення супутникової геодезії.

Супутникова геодезія розв'язує цілий ряд завдань, притаманних вищій геодезії.

До основних завдань можна віднести:

1) уточнення фундаментальних сталих, які характеризують форму, розміри та добовий рух Землі і зміну цих сталих в часі;

2) створення геоцентричної та планетоцентричної систем координат, використання яких приведе до побудови мереж опорних пунктів в єдиній для Землі системі координат з початком координат в центрі мас і визначення напрямку осей відносно різних епох;

3) координатно-часова прив'язка результатів космічного знімання Землі та планет для дослідження природних ресурсів та космічного картографування.

Похідними від них є завдання:

- визначення взаємного положення пунктів в даній системі координат;

- визначення положення референц-еліпсоїда відносно центра мас Землі;

- встановлення зв'язку з різними геодезичними системами координат;

- розповсюдження методів супутникової геодезії на роботи, які спрямовані в майбутньому на створення опорних мереж на Місяці та планетах з визначенням їх форми та розмірів.

- розв'язання геодезичних задач.

Крім того, в останні десятиліття супутникова геодезія активно використовується для вирішення інженерно-геодезичних завдань, а саме:

1. побудови опорних геодезичних мереж;
2. створення мереж згущення для різноманітних задач геодезії;
3. використання супутникових спостережень при виконанні землепорядних та кадастрових робіт;
4. вирішення різноманітних задач методами дистанційного зондування Землі;
5. топографічного знімання для створення планів і карт різних масштабів;
6. геодезичного моніторингу населених пунктів та унікальних об'єктів для визначення деформаційних процесів на їх територіях і спорудах.

### ***1.3. Етапи розвитку супутникової геодезії***

Перші праці, що відносять до космічної геодезії, були опубліковані в другій половині 18 століття. Так, у 1768 р. Йоганн Ейлер написав роботу, де вказував на можливість визначення параметрів земного еліпсоїда, використовуючи zenітні відстані Місяця з пунктів, розташованих на одному меридіані. До середини 20 століття були розроблені методи, засновані на використанні Місяця та планет сонячної системи для визначення координат точок, що значно віддалені між собою. Ці методи давали можливість визначати координати з точністю до 100 м.

У 1949 році фінський геодезист Ю. Вяйсяля розробив принципи побудови триангуляції шляхом фотографування спалахів світла на тлі зірок. Для цього джерело світла піднімали на значну висоту літаком, газовим балоном або ракетою і по команді із Землі він випромінював короткі спалахи. З двох пунктів на Землі відбувалося фотографування двох і більше спалахів світла в різних вертикальних площинах, за результатами якого можна було з високою точністю визна-

чити хорди, а на основі них і координати віддалених пунктів. Точність становила 0,5-1,5 м на 100-300 км.

Проте по-справжньому значного розвитку космічна геодезія набула з початком космічної ери. 4 жовтня 1957 р. в СРСР було запущено перший штучний супутник Землі. З цього моменту почалася не тільки ера освоєння космосу людиною, але й бурхливий розвиток космічної геодезії. Так, уже 14 серпня 1959 року американським супутником «Explorer 6» було зроблено перший знімок Землі. А на початку 60-х років 20 століття в США почала створюватись навігаційна система першого покоління TRANSIT на базі низькоорбітальних супутників. Вона працювала вже з 1967 р. і дозволяла визначати координати із субметровою точністю.

В СРСР у 1976 р. була створена військова система "Циклон-Б", а у 1979 р. – цивільна система ЦИКАДА, що дозволяли визначати місцеположення з точністю 50-100 метрів.

Справжню революцію в космічній геодезії здійснили глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) наступного покоління – GPS в США і ГЛОНАСС в СРСР.

GPS (Global Positioning System) – глобальна система визначення місцеположення, відома також під назвою NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging). Розробка системи почалась у 1973 році. У 1978 році виведено перший супутник цієї системи. Повністю готовою GPS визнана лише у 1995 році, проте активно використовується з середини 80-х. На даний час на навколосеземній орбіті існує 31 робочий супутник (планується 36), хоча для повноцінної роботи достатньо 24-х. Додаткові супутники виведено з метою підвищення точності та зменшення «мертвих зон», що з'являються внаслідок перекривання частини небосхилу перешкодами.

ГЛОНАСС (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система) – офіційно почала розроблятися в СРСР у 1979 (насправді з середини 70-х) і у 1993 р. була офіційно прийнята в експлуатацію МО РФ (Міністерством оборони Російської



Федерації). Для роботи системи достатньо 18 супутників, але на початку 80-х було заявлено про необхідність виведення на орбіту 24-х супутників, що (за офіційними заявами) було здійснено у 1987 р. Проте на кінець 90-х існувало лише 9 робочих супутників. На даний час на орбіті знаходиться 24 робочі супутники і система продовжує активно розвиватись.

Кількість видимих супутників суттєво підвищує точність GPS-вимірювань та дає можливість використовувати ГНСС в умовах перекриття частини небосхилу перешкодами, наприклад, в населених пунктах. Це значно розширює галузь їх застосування в геодезії.

Саме з початком експлуатації ГНСС нового покоління та досягнення ними в середині 80-х років субсантиметрової, а пізніше і субміліметрової точності і виник термін «супутникова геодезія».

Супутникова геодезія розвивається найбільш активно серед інших геодезичних наук. Наприклад, в середині 80-х років минулого століття почалися перші спроби використання GPS-вимірювань для розв'язання прикладних інженерних задач, а вже на початку 90-х провідні країни світу на їх основі проводили повне топографічне знімання своєї території.

В 2000-му році в Україні було лише близько десяти організацій, що використовували GPS-приймачі геодезичного призначення. На сьогоднішній день більшість геодезичних та землепорядних організацій використовують такі приймачі.

Зрозуміло, що розвиток супутникової геодезії не вичерпався. Завдяки кропіткій роботі вчених різних країн системи GPS і ГЛОНАСС постійно розвиваються і вдосконалюються. Крім того, впроваджуються європейська система Galileo та китайська Compass, запуски перших супутників яких вже відбулися, плануються до впровадження індійська система IRNSS та японська QZSS.

## 1.4. Методи супутникової геодезії

В супутниковій геодезії використовуються два методи спостережень за ШСЗ, а саме: геометричний та динамічний.

### 1.4.1. Геометричний метод

Геометричний метод супутникової геодезії використовувався ще до запуску першого супутника фінським вченим Ю. Вяйсяля, але із запуском ШСЗ набув більш широкого поширення.

Найпростішою геометричною побудовою з використанням ШСЗ є трикутник, що утворюється в результаті одночасного (синхронного) спостереження супутника з двох станцій. Даний трикутник (наприклад, P1-S1-A, див. рис. 1.1) є основним елементом всіх супутникових геометричних побудов. Це, по суті трикутник, одна з вершин якого піднята в космічний простір.

Спочатку метод засновувався лише на фотографічних спостереженнях. Пізніше почали використовувати лазерні, віддалемірні та радіотехнічні способи.

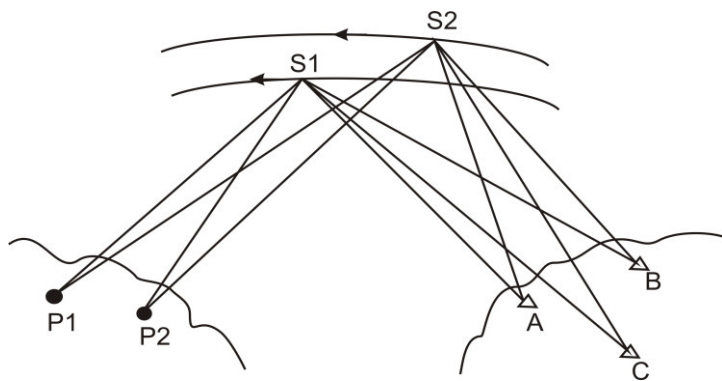


Рис. 1.1. Схема застосування геометричного методу

На рисунку: А, В, С – опорні пункти; S1, S2 – супутники; P1, P2 – пункти спостереження

Геометричний метод ґрунтується на синхронному фотографуванні ШСЗ на фоні зоряного неба мінімально з двох

пунктів поверхні Землі. Такі спостереження дають можливість визначати напрям вектора, який з'єднує ці пункти.

Множина таких векторів утворює векторну просторову мережу, яка називається космічною триангуляцією. Таким методом можна будувати мережі зі сторонами порядку 1500 – 2000 км, а також зв'язати материки та острови в єдиній системі координат.

Крім супутникової триангуляції, що ґрунтується лише на основі кутових вимірювань, використовуються також супутникова трилатерація (просторова побудова з використанням лише відстаней), а також поєднання цих методів, коли одночасно вимірюється відстань до супутника і напрямом на нього. Це стало можливим з використанням лазерних віддалемірів.

Для використання радіотехнічних способів був розроблений метод трисферації – визначення координат станції за одночасними спостереженнями з чотирьох станцій, три з яких – опорні, тобто мають відомі координати (рис. 1.1). Назва методу відображає його суть: вимірювання віддалей до ШСЗ з трьох опорних станцій дає можливість визначити його положення в просторі як точку пересічення трьох сфер із заданим радіусом, з центрами в опорних станціях. Якщо одночасно вимірювати з четвертої станції віддаль, то можемо отримати її координати.

Переваги геометричного методу:

- виключається необхідність використання знання теорії руху супутників;
- відсутність необхідності врахування складних у визначенні факторів (коливання орбіти, гравітаційні аномалії, опір верхніх шарів атмосфери);
- можливість використання пасивних та активних супутників;
- використання відносно нескладного обладнання для спостереження і опрацювання даних спостережень.

Недоліки геометричного методу:

- при цьому методі визначаються лише відносні положення нових пунктів в системі вихідних координат;
- неможливо прив'язати мережу космічної триангуляції до центру мас Землі.

В основі геометричного методу лежить фундаментальне рівняння супутникової геодезії. По суті, воно пов'язує три вектори  $\vec{r}$ ,  $\vec{r}'$ ,  $\vec{R}$  (рис. 1.2).

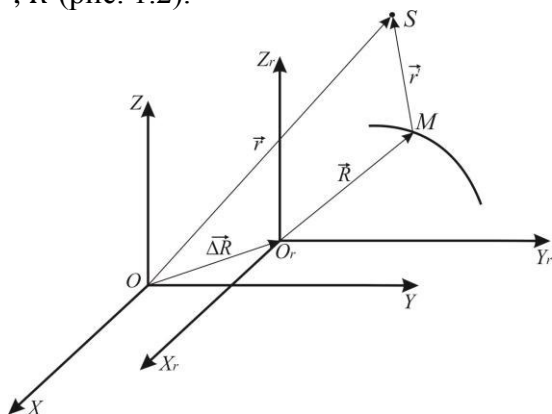


Рис. 1.2. Виведення фундаментального рівняння супутникової геодезії

На рис. 1.2:  $OXYZ$  – геоцентрична система координат, початок якої в центрі мас землі  $O$ ;  $O_rX_rY_rZ_r$  – референцна система координат;  $M$  – точка, яка знаходиться на поверхні референц-еліпсоїда;  $S$  – супутник;  $\vec{R}$  – радіус-вектор пункту  $M$ , який віднесений до центра  $O_r$  референт-еліпсоїда;  $\vec{r}$  – геоцентричний радіус-вектор супутника;  $\vec{r}'$  – топоцентричний радіус-вектор супутника.

Згідно правила додавання векторів фундаментальне рівняння супутникової геодезії має вигляд:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{R} + \overrightarrow{\Delta R}. \quad (1.1)$$

Звідси:

$$\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}' - \overrightarrow{\Delta R} \quad (1.2)$$

і

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{R} - \overrightarrow{\Delta R}. \quad (1.3)$$

Нехай маємо дві точки на земній поверхні –  $M_1$  і  $M_2$ . З рівняння (1.3) впливає:

$$\begin{cases} \vec{r}'_1 = \vec{r} - \vec{R}_1 - \vec{\Delta R} \\ \vec{r}'_2 = \vec{r} - \vec{R}_2 - \vec{\Delta R} \end{cases} \quad (1.4)$$

Віднявши рівняння системи (1.4), отримаємо:

$$\vec{r}'_2 - \vec{r}'_1 = \vec{R}_1 - \vec{R}_2. \quad (1.5)$$

Якщо координати точки  $M_1$  відомі, то рівняння (1.5) дає змогу визначити координати точки  $M_2$  відносно координат точки  $M_1$ .

З розвитком динамічних методів, роль геометричних методів в побудові геодезичних сіток і визначенні координат пунктів суттєво знизилась. В даний час геометричні методи використовуються разом з динамічними для спільного опрацювання вже існуючих супутникових і наземних триангуляційних мереж.

#### *1.4.2. Динамічний метод*

Найбільш поширеним методом для вирішення задач супутникової геодезії є динамічний (рис. 1.3), який ґрунтується на вивченні змін орбіти ШСЗ з часом.

Математична модель руху супутника в інерціальній системі прямокутних координат являє собою систему трьох диференціальних рівнянь другого порядку.

Таким чином, точність результатів, одержаних за допомогою динамічного методу, залежить від точності врахування збурюючих сил, які діють на супутники. До них відносяться: аномалії сили тяжіння Землі, опір верхніх шарів атмосфери, притягання супутника Місяцем, Сонцем, планетами, тиском сонячного випромінювання, тощо.

В загальному, за допомогою динамічного методу можна сумісно визначати координати земних пунктів, елементи орбіт супутників та уточнити параметри збурюючих сил, що впливають на рух супутника. Такі задачі вирішуються методами послідовних наближень.

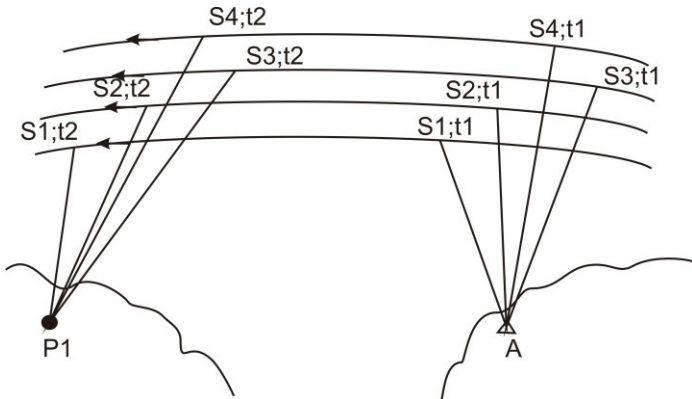


Рис. 1.3 Схема динамічного методу

На рисунку: А – опорний пункт; S1, S2, S3, S4 – супутники; P1, – пункт спостереження; t1, t2 – моменти спостереження з опорного пункту і пункту спостереження відповідно

Перевагою методу є можливість одержання положення пунктів в єдиній для всієї планети системі координат з початком в центрі мас Землі. Він не вимагає синхронних спостережень з усіх пунктів.

При цьому для застосування методу повинні використовуватись лише активні супутники, більш досконале обладнання для спостереження і спеціальне програмне забезпечення для обчислень.

Використання динамічного методу дає можливість розв’язувати головні задачі геодезії та геодинаміки.

Фундаментальне рівняння для динамічного методу має складніший вигляд. В даному випадку геоцентричний радіус  $\vec{r}$  є складною функцією від елементів орбіти  $E_i$ , параметрів гравітаційного поля  $\psi_k$  і часу  $t$ :

$$\vec{r} = \vec{r}(E_i, \psi_k, t). \quad (1.6)$$

Тоді

$$\vec{r}' = \vec{r}(E_i, \psi_k, t) - \vec{R}, \quad (1.7)$$

при цьому будемо вважати, що

$$t = const. \quad (1.8)$$

Для визначення рівняння і поправок у вимірюванні топоцентричної віддалі необхідно перейти до лінійного представлення рівняння (1.7):

$$\frac{\partial r'}{\partial r} \frac{r}{E_S} \Delta E_S + \frac{r'}{r} \frac{r}{\psi_k} \Delta \psi_k + \frac{r'}{R} \Delta R + (r'_o - r'_{\text{вим}}) = v_r, \quad (1.9)$$

де  $r'_{\text{вим}}$  – вимірюваний топоцентричний радіус,  $\Delta E_s, \Delta \psi_k, \Delta R$  – поправки до відповідних величин,  $r'_o$  – наближене значення топоцентричного радіус-вектора до супутника,  $v_r$  – ймовірна поправка до вимірюваної величини.

Коли елементи орбіти і параметри гравітації відомі, то рівняння (1.9) набуває спрощеного вигляду:

$$\frac{\partial r}{\partial R} \Delta R + (r'_o - r'_{\text{вим}}) = v_r, \quad (1.10)$$

і тоді, маючи певну кількість вимірювань  $r'_{\text{вим}}$ , можна знайти поправки до  $\Delta R$  та достовірне значення вимірюваної величини.

## Тема 2. Системи небесних та земних координат

В супутниковій геодезії використовується значна кількість систем координат. Це пояснюється тим, що для обчислення орбіт супутників використовуються одні системи координат, для визначення координат пунктів в процесі спостережень використовуються інші, а для використання отриманих координат в прикладних задачах необхідні ще інші системи. Крім того, необхідна адекватна система відліку часу, оскільки вирішення задач супутникової геодезії відбувається на основі спостережень об'єктів, що рухаються з великими швидкостями. Тож детально розглянемо основні системи координат і відліку часу.

### 2.1. Поняття про небесну сферу

*Небесна сфера* – це сфера довільного радіусу з центром у будь-якій точці простору, на яку проектуються спостережувані небесні світила.

Розташування небесних тіл, таких як зірки, планети і галактики, визначається за їх координатами на небесній сфері, тому її використовують в астрономії, а отже, і для вирішення задач супутникової геодезії, математичних обчислень та побудов.

Уявлення про небесну сферу виникло в глибокій давнині. В основу його лягло враження про існування куполоподібного небосхилу. Це враження виникло в результаті величезної віддаленості небесних світил. Людське око не в змозі оцінити відмінності у відстанях до них, і вони уявляються однаково віддаленими. Закладена в давнину геометрія небесної сфери в результаті розвитку і вдосконалення отримала сучасний вигляд, в якому і використовується в астрономії. Кожному світилу на небесній сфері відповідає точка, в якій її перетинає пряма, що сполучає центр небесної сфери зі світилом.

Залежно від того, де міститься центр небесної сфери, її називають:

*топоцентрична* – якщо центр знаходиться на поверхні Землі;

*геоцентрична* – якщо в центрі мас Землі;

*геліоцентрична* – якщо в центрі Сонця.

Розглянемо основні поняття та точки небесної сфери.

Для побудови небесної сфери її центр розміщують у точці спостережень або довільній точці і користуються дійсними площинами та напрямками або паралельними до них цими ж елементами.

Основним напрямом до поверхні Землі є напрям лінії виска, яку називають *прямовисною (вертикальною) лінією*. Цей напрям зручно прийняти за вихідний при побудові системи координат для визначення положень світил на небесній сфері.



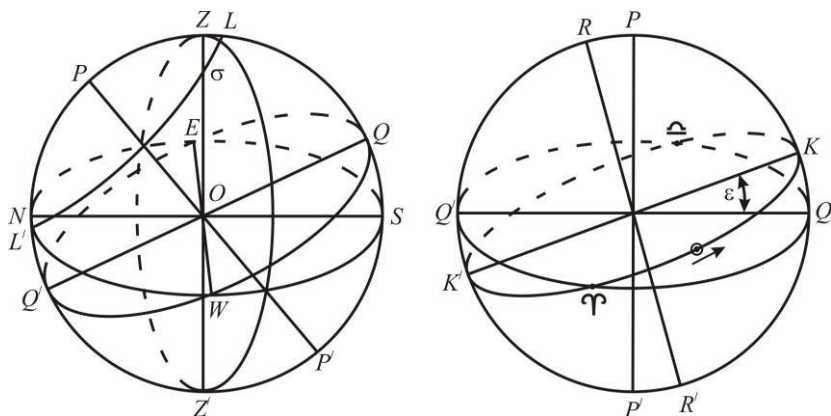


Рис. 2.1. Елементи небесної сфери

Нехай центром небесної сфери є точка  $O$  (рис. 2.1), яка співпадає з місцем спостережень (топоцентрична). В цьому випадку вертикальна лінія  $ZZ'$  співпадає з лінією виска в даній точці земної поверхні, вона перетне небесну сферу в двох діаметрально протилежних точках.

Одна із них, розташована над точкою спостереження, називається *зенітом* ( $Z$ ), протилежна – *надиром* ( $Z'$ ). Велике коло  $NESW$ , площина якого перпендикулярна до  $ZZ'$ , називається *небесним астрономічним горизонтом*.

Зауважимо, що небесний горизонт не збігається з видимим (за рахунок атмосфери).

Площиною небесного горизонту небесна сфера розділяється на 2 півкулі: *видиму*, яка має зеніт, і *невидиму* з надиром.

Через центр небесної сфери проведемо вісь  $PP'$ , паралельну до осі обертання Землі – *вісь Світу*. Точки  $P$  і  $P'$  є *полюсами Світу*.  $P$  – *північний*,  $P'$  – *південний полюси*.

Вісь Світу поділяє небесну сферу на 2 половини: верхню  $PZP'$ , яка має зеніт, і нижню  $P'Z'P$ .

Велике коло  $QWQ'E$ , площина якого перпендикулярна до осі світу  $PP'$ , називається *небесним екватором*.

Небесний екватор і горизонт перетинаються в точках *заходу*  $W$  і *сходу*  $E$ .

Пряма  $NS$ , за якою площина горизонту перетинається з площиною меридіану, називається *полуденною лінією*.

Велике коло  $PZP'Z'$ , яке проходить через полюси Світу і точки zenіту та надира, називається *небесним меридіаном*. Площина його перпендикулярна до площин екватора і горизонту.

Площина орбіти Землі, що рухається навколо Сонця, називається *площиною екліптики*.

Велике коло  $K\gamma K'\Omega$  (рис. 2.1), за яким площина екліптики перетинає небесну сферу, називається *екліптичною*.  $RR'$  – *вісь екліптики*.

Великі кола екватора і екліптики перетинаються в точках рівнодення:

$\gamma$  – *точка весняного рівнодення* (та, в якій Сонце в результаті свого річного руху переходить з південної півкулі небесної сфери в північну),

$\Omega$  – *точка осіннього рівнодення* (та, в якій Сонце в результаті свого річного руху переходить з північної півкулі небесної сфери в південну).

Екліптика нахилена до площини екватора під кутом  $\varepsilon=23^{\circ}27'$ . Точки екліптики  $K$  і  $K'$  віддалені від точок рівнодень  $\gamma$ ,  $\Omega$  на  $90^{\circ}$  і називаються *точками сонцестоянь літнього*  $K$  і *зимового*  $K'$ .

Видиме Сонце рухається за екліптикою впродовж року. Момент проходження Сонця через сузір'я Овна 21 березня – день весняного рівнодення. Рухаючись по екліптиці, Сонце переміщується в північну півкулю і 22 червня проходить точку літнього сонцестояння. Потім Сонце знову рухається до екватора і 23 вересня проходить через точку осіннього рівнодення в сузір'ї Терезів. Далі Сонце переміщується в південну півкулю і 22 грудня досягає точки зимового сонцестояння  $K'$ .

## 2.2. Класифікація систем координат

*Система координат* – це система, яка дозволяє визначити положення точки на площині чи в просторі.

*Система відліку* – це сукупність системи координат, пов'язаної з тілом відліку, та способу вимірювання часу (годинник).

Вивчення руху супутників вимагає зручної системи відліку. При цьому поняття часу приймає простий геометричний зміст як кут повороту Землі відносно початкового напрямку.

На даний час існує багато систем координат, які можна класифікувати за різними ознаками.

Системи координат можна поділити за формою їх задання на *прямолінійні* і *криволінійні*.

До *прямолінійних* відносять прямокутні системи.

До *криволінійних* належать сферичні, сфероїдальні, еліпсоїдальні, циліндричні тощо.

За положенням початку координат системи можна поділити на:

- *планетоцентричні* – початок координат знаходиться в центрі мас планети;
- *геліоцентричні* – початок координат знаходиться в центрі мас Сонця;
- *геоцентричні* – початок координат знаходиться в центрі мас Землі;
- *квасігеоцентричні (референцні)* – початок координат знаходиться в центрі референц-еліпсоїда;
- *топоцентричні* – початок координат знаходиться на поверхні Землі в місці спостереження;
- *супутникоцентричні* – початок координат знаходиться в центрі супутника (супутник розглядається як матеріальна точка), тощо.

За орієнтацією основної площини системи поділяють на *екваторіальні*, *екліптичні*, *горизонтальні* (площина місцевого горизонту), *орбітальні*.

За орієнтацією початкової площини – на *гринвіцькі* (земні),

неінерціальні) та *рівноденні* (умовно інерціальні).

Необхідно відмітити, що для розв'язання багатьох задач супутникової геодезії зручно використовувати інерціальні (такі, що не рухаються, або рухаються прямолінійно і рівномірно) або неінерціальні системи координат, залежно від умов. Орієнтація системи координат в просторі може бути задана залежно від характерних точок небесної сфери або поверхні Землі, і тому слід розрізняти системи, які обертаються з тілом Землі і не обертаються відносно поверхні Землі.

Слід також задавати епоху (момент часу), на яку фіксується система координат, тому що точки, які визначають напрям осей, можуть зазнавати з часом змін.

За характеристикою часу системи можуть бути:

- *миттєвими* – положення осей зафіксоване на початковий момент спостереження;
- *середніми* – положення осей зафіксоване на певну епоху;
- *істинні* – віднесені до істинних положень точок, що визначають напрям осей.

### **2.3. Сферичні системи координат**

В астрономії та супутниковій геодезії дуже зручно користуватись сферичними системами координат для визначення положення світила на небесній сфері.

Для визначення координат довільної точки сфери, на ній беруть два взаємно перпендикулярних великих кола, одне з них називають *основним*, а друге - *початковим колом системи* (рис. 2.2).

Одна із точок перетину основного і початкового кіл називається *початковою точкою системи*.

В основному, системи сферичних координат характеризуються вибором початкової точки і напрямком відліку координат.

Суть довільної системи координат така: через точку на сфері  $M$  будують велике коло, яке проходить через точку  $B$ ,  $M$  і  $B'$  це велике коло перетинає основне в точці  $t$ . Якщо

взяти за початок системи точку  $F$ , то дуга великого основного кола  $Fm$  буде однією із координат, а  $mM$  – другою координатою.

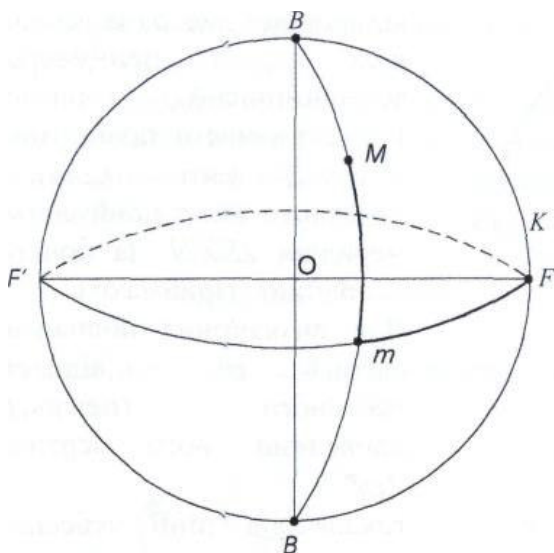


Рис. 2.2. Сферичні системи координат

Кожна система має свої переваги і недоліки. Будемо розглядати основні системи, які використовуються в астрономії: *горизонтальна*, *перша екваторіальна*, *друга екваторіальна* та *екліптична*, і є небесними системами координат, що використовуються для визначення положення світил на небесній сфері. Їх назви відповідають назві великого кола, яке прийнято за основне в даній системі координат.

#### **2.4. Геодезична система координат**

Для визначення положення точки на поверхні Землі використовують декілька систем координат, основні з яких ми розглянемо.

Основним колом геодезичної системи координат є *площина екватора*, а початковим напрямком – *гринвіцький меридіан*. Початок координат знаходиться в центрі референт-еліпсоїда. Ця система має три координати:

*Геодезична широта* – кут утворений площиною екватора та нормаллю до поверхні еліпсоїда в даній точці. Змінюється від  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$ . Знак «+» – в північному напрямку, знак «-» – в південному.

*Геодезична довгота* – двогранний кут між площиною гринвіцького меридіану, та меридіана, що проходить через дану точку. Довгота змінюється від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  в східному та західному напрямку.

Третьою координатою є геодезична висота, описана в параграфі 2.13.

### **2.5. *Астрономічна система координат.***

Основним колом астрономічної системи координат також є *площина небесного екватора*, а початковим напрямком – *початковий астрономічний меридіан*. Початок координат знаходиться в центрі мас Землі.

*Астрономічна широта* – кут утворений площиною небесного екватора та лінією виска в даній точці.

*Астрономічна довгота* – двогранний кут між площиною початкового астрономічного меридіана та астрономічного меридіана, що проходить через дану точку.

*Астрономічний азимут напрямку* – це двогранний кут від північної частини площини астрономічного меридіана даної точки за годинниковою стрілкою до прямовисної площини, що проходить через даний напрямок.

### **2.6. *Географічна система координат***

Кут між лінією виска та нормаллю до еліпсоїда в даній точці називається *відхиленням прямовисної лінії*. Він є досить малим і при вирішенні більшості прикладних задач ним нехтують. В такому випадку говорять про систему географічних координат.

Основним колом географічної системи координат є *площина екватора*, а початковим напрямком – *гринвіцький меридіан*. Початок координат знаходиться в центрі референц-еліпсоїда. Координати прийнято визначати як:

*Географічна широта* – кут утворений площиною екватора та лінією виска до даної точки. Змінюється від  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$ . Знак «+» - в північному напрямку, знак «-» – в південному.

*Географічна довгота* – двограний кут між площиною гринвіцького меридіану, та меридіана, що проходить через дану точку. Довгота змінюється від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  в східному та західному напрямку.

Третьою координатою є абсолютна висота, описана в параграфі 2.13.

## 2.7. Умовна Земна система координат

Часто в супутниковій геодезії використовують прямокутні координати, однією з яких є земна геоцентрична система координат. Загальноприйняті геоцентричні системи координат відтворюються мережею супутникових перманентних станцій.

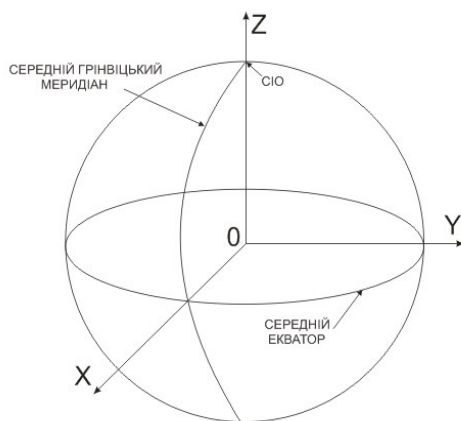


Рис. 2.3. Умовна Земна система координат

Для вирішення проблем геодезії та геодинаміки використовується умовна земна система СТС – це геоцентрична просторова ортогональна система координат. Початок координат системи знаходиться в центрі мас Землі (рис. 2.3).

Оскільки положення осі обертання неперервно змінюється за рахунок різних геофізичних явищ, то за вісь  $Z$  приймається вісь, яка орієнтована вздовж середньої осі обертання Землі за певний період часу. Відповідне положення полюса Землі називається міжнародним умовним початком СЮ.

Відповідно СЮ визначає миттєве положення полюсу Землі, яке публікується у бюлетені Міжнародної служби обертання Землі (IERS).

Вісь  $X$  співпадає з лінією, яка утворюється перетином середнього екватора Землі та середнього Грінвіцького меридіану.

Вісь  $Y$  знаходиться у площині середнього екватора, перпендикулярна до осей  $X$  і  $Z$  і утворює з ними правосторонню ортогональну систему координат.

## **2.8. Умовна інерціальна система координат**

Умовна інерціальна система координат (CIS) є нерухомою або рухається у просторі прямолінійно і рівномірно, зберігаючи паралельність осей координат в початковому положенні. Її називають умовною інерціальною, оскільки вона відповідає вимогам для інерціальних систем, а саме – прямолінійному і рівномірному руху, лише в першому наближенні.

Початком інерціальної системи координат є центр мас Землі (рис. 2.4).

Вісь  $X$  спрямована в точку весняного рівнодення і співпадає з перетином площин земного екватора та екліптики. Вісь  $Z$  перпендикулярна до осі  $X$  і збігається із віссю моменту імпульсу Землі, яка має незначне відхилення від осі обертання Землі (в межах  $0,001'$ ). Перетин осі моменту імпульсу Землі із небесною сферою утворює точку небесного ефемеридного полюсу (СЕР). Вісь  $Y$  перпендикулярна до осей  $X$  і  $Z$  і утворює з ними правосторонню ортогональну систему координат.



Практично положення точки весняного рівнодення визначається за результатами спостережень зірок, які вибрані з фундаментального каталогу, тому положення інерціальної системи визначають з деякою похибкою.

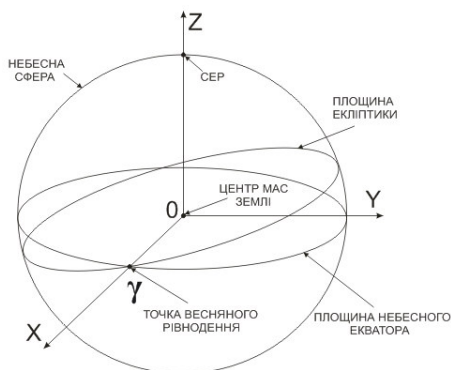


Рис. 2.4. Умовна інерціальна система координат

Оскільки положення СЕР і точки весняного рівнодення визначають в змінному полі, то систему CIS фіксують на певну епоху. Розглянута система координат є інерціальною, а отже, для розв'язування задач в ній можна користуватись законами Ньютона.

### **2.9. Взаємне перетворення координат точки різних систем**

Перетворення координат з географічної системи координат в прямокутну просторову референцну, а також прямокутних референцної та геоцентричної детально розглянуто в практичній частині, тому розглянемо лише перетворення координат від умовної інерціальної системи (CIS) до умовної Земної системи (CTS).

Він виконується за наступною залежністю:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{CTS} = R^M R^S R^N R^P \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{CIS}, \quad (2.1)$$

де  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{CTS}$ ,  $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{CIS}$  - координати точки відповідно у системах ко-

ординат CTS і CIS.

$R^M R^S R^N R^P$  – матриці повороту в системі координат CIS, які обумовлені відповідно рухом полюсу, зоряним часом, нутацією та прецесією.

З 1988 року визначення параметрів перетворення координат цих систем покладено на Міжнародну Службу Обертання Землі і опорних систем координат IERS (International Earth Rotation Service). Вона була організована спільно Міжнародним астрономічним союзом IAU (International Astronomical Union) і Міжнародним Союзом Геодезії і Геофізики IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics).

За результатами вимірів методами VLBI (інтерферометрія з наддовгою базою), SLR (супутникова лазерна локація), DORIS (доплерівська орбітографія), лазерної локації Місяця (LLR), та GPS спостережень у мережі міжнародної геодинамічної служби (IGS) визначається рух полюса та початкового меридіану, уточнюються геоцентричні координати фундаментальних геодезичних обсерваторій і контролюються їх взаємні зміщення, обумовлені тектонічними рухами.

З 1991 року система координат CTS узагальнена під назвою International Terrestrial Reference System (Міжнародна земна референсна система) – ITRS, що включає теоретичні положення та практичні реалізації загальноземної системи координат International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

У рамках Європейського континенту існує аналогічна до IERS служба European Terrestrial Reference System (ETRS) і, відповідно, практичні реалізації земної системи координат European Terrestrial Reference Frame (ETRF), які використовують результати спостережень геодезичних обсерваторій, розташованих виключно у Європі.

У зв'язку із безперервним зростанням кількості геодезичних обсерваторій і результатів спостережень та динамічними процесами, які відбуваються у земній корі, виникає постійна необхідність удосконалення систем координат ITRS. Нові реалізації систем координат мають назви ITRS-YY, ETRS-YY. Існують наступні їх реалізації ITRS-88, -89, -90, -91, -92, -93, -94, -96, -97, -2000, -2005, ITRS-2008 і аналогічні ETRS – реалізації на відповідні роки.

Кожна наступна реалізація є більш удосконаленою, оскільки використовує більш тривалий обсяг спостережень, виконаних на більшій кількості станцій з використанням остаточних результатів, отриманих у різних центрах опрацювання вимірів.

*Таблиця 2.1*

**Вихідні дані при встановленні ITRS**

Реалізація системи координат	Кількість станцій	Кількість розв'язків				Загальна кількість розв'язків
		VLBI	SLR	GPS	DORIS	
ITRF-88	120	5	6	-	-	11
ITRF-89	113	6	8	-	-	14
ITRF-90	120	4	7	-	-	11
ITRF-91	131	5	7	1	-	13
ITRF-92	155	5	6	6	-	17
ITRF-93	160	6	4	5	-	15
ITRF-94	209	6	1	5	3	15
ITRF-96	209	4	2	7	3	16
ITRF-97	309	4	5	6	3	18
ITRF-2000	477	3	9	6+8*	3	21+8*

\*- Розв'язки регіональних центрів обробки даних

Для прикладу наведемо динаміку вихідних даних при встановленні реалізацій систем координат ITRS від -88 до -2000 (див. табл. 2.1).

Трансформація координат із однієї ITRS – реалізації в іншу проводиться із використанням 7-ми параметрів перетворення Гельмерта:

$$\begin{pmatrix} X_{xx} \\ Y_{xx} \\ Z_{xx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{yy} \\ Y_{yy} \\ Z_{yy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \\ \Delta_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 + \Delta m & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 + \Delta m & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 + \Delta m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{yy} \\ Y_{yy} \\ Z_{yy} \end{pmatrix},$$

(2.2)

де  $X_{xx}, Y_{xx}, Z_{xx}, X_{yy}, Y_{yy}, Z_{yy}$  - координати пункту у системах координат ITRS-XX і ITRS-YY;  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  - координати початку системи ITRS-YY у системі ITRS-XX;  $\alpha, \beta, \gamma$  - кути повороту Ейлера систем координат ITRS-XX і ITRS-YY;  $\Delta m$  - масштабний множник.

Системи координат GPS та ГЛОНАСС вважаються ідентичними (WGS-84 і ПЗ-90.02 відповідно), оскільки система координат ГЛОНАСС - ПЗ-90.02 трансформується в міжнародну земну систему координат ITRS-2008 (система WGS-84 співпадає з нею із субсантиметровою точністю) шляхом паралельного переносу початку координат приблизно на півметра. Це значно спрощує роботу комбінованих приймачів, які приймають сигнали супутників обох систем.

### **2.10. Геоцентрична система координат WGS-84**

Система GPS, починаючи з 1987 року, використовує систему координат WGS-84 (World Geodetic System – Всесвітня геодезична референцна система). Вона була визначена за допомогою попередньої супутникової системи TRANSIT.

Початок координат – центр мас Землі.

Вісь  $Z$  – направлена на міжнародний умовний початок СЮ.

Вісь  $X$  - направлена на перетин площини початкового меридіана WGS-84 і площини екватора.

Вісь  $Y$  – доповнює систему до правої.

В системі WGS-84 поверхнею відносності є геоцентричний екіпотенціальний еліпсоїд обертання, визначений чотирма параметрами (табл. 2.2). Крім того, коефіцієнт стиснення ( $f=1/298,2572221$ ) і малу піввісь ( $b=6356752,314$  м)

можна отримати з теорії еквіпотенціальних еліпсоїдів. Значення цих параметрів збережені такі ж, як у Геодезичній референційній системі 1980р. (GRS-80). Однак, у системі GRS-80 зональна гармоніка  $J_2$  була означена за допомогою чисельного значення  $J_2 = 108263 \cdot 10^{-8}$ .

Таблиця 2.2

Параметри еліпсоїда WGS-84

Параметр, числове значення та розмірність	Фізичний та геометричний зміст
$a = 6378137$ м	Велика піввісь
$\bar{C}_{2,0} = -484.16685 \cdot 10^{-6}$	Зональна гармоніка другого ступеня
$\omega_E = 7292115 \cdot 10^{-11}$ рад*с <sup>-1</sup>	Кутова швидкість обертання Землі
$\mu = 3986005 \cdot 10^8$ м <sup>3</sup> с <sup>-2</sup>	Гравітаційна стала Землі

Спочатку параметр зональної гармоніки містив шість цифр, а зараз – вісім. Коефіцієнти стиснення відрізняються на величину  $\Delta f = f_{GRS} - f_{WGS} = 16 \cdot 10^{-12}$ .

Система WGS-84 постійно уточнюється за результатами супутникових вимірів. Наприклад, у 1994 і 1996 роках системи отримали позначення WGS-84 (G730) і WGS-84 (G873) відповідно, а версія системи WGS-84, сумісна з ITRF-94, дала результати з точністю 2 см. На даний час використовують найновіші версії системи ITRS на основі еліпсоїда WGS-84.

### 2.11. Система геодезичних параметрів Землі ПЗ-90

Геодезичні параметри Землі 1990 р. (ПЗ-90) включають фундаментальні астрономічні постійні, єдину геоцентричну систему координат (ЕСК), моделі гравітаційного поля Землі, каталоги висот квазігеоїда над загальноземним еліпсоїдом, параметри зв'язку ЕСК та СК-42 (системи координат 1942-го року). Система ПЗ-90 отримана на основі комплексних супутникових спостережень різними методами (в тому

числі і системи ГЛОНАСС) в СРСР. В табл. 2.3 наведені основні параметри.

Початок координат системи ПЗ-90 – центр мас Землі.

Вісь  $Z$  – направлена на міжнародний умовний початок СЮ.

Вісь  $X$  – направлена на перетин площини початкового меридіана і площини екватора.

Вісь  $Y$  – доповнює систему до правої.

Таблиця 2.3

Основні параметри системи ПЗ-90

Параметри	Позначення	Значення
Велика піввісь	$A$	6378136 м
Полярне стиснення	$1/f$	1/298,257839303
Кутова швидкість	$\Omega$	$7,292115 \times 10^{-5}$ рад/с <sup>-1</sup>
Швидкість світла	$C$	299792458 м/с
Геоцентрична гравітаційна стала	$GM$ ( $fm$ )	$398600,44 \times 10^9$ м <sup>3</sup> /с <sup>-2</sup>
Нормальний потенціал	$U_0$	$62636861,074$ м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Коефіцієнт гармоніки другого порядку	$C_{20}$	$-484164,953 \times 10^{-9}$

Система ПЗ-90 закріплена на поверхні Землі координатами 33 пунктів Супутникової геодезичної мережі.

Система ПЗ-90 була уточнена і зараз користуються системою ПЗ-90.02. Зокрема, цю систему використовує супутникова система ГЛОНАСС.

## 2.12. Системи координат, що використовуються в Україні

Система координат 1942 року (СК-42) – це референсна система прямокутних координат на площині, яка базується на використанні проєкції Гаусса-Крюгера на основі референц-еліпсоїда Красовського (велика піввісь 6 378 245 м, стиснення 1/298,3)

*Умовна система координат 1963 року (СК-63).* Умовна система координат СК-63 ґрунтується на триградусних зонах, є відкритою системою і відповідно до діючих нормативних документів використовується для кадастрових зніманих. Проте при використанні СК-63 року виникають проблеми. Наприклад крупні об'єкти можуть попадати в декілька зон, параметри переходу від зони до зони не відкриті для широкого загалу (хоча це не стосується самих координат), а також зрівнювання пунктів в ДГМ по точності не відповідають вимогам сучасності. Ця система базується на проекції Гауса-Крюгера і системі координат СК-42.

*Державна геодезична референтна система координат УСК-2000.* Система координат УСК-2000 чітко узгоджена із системою ITRF-2000, що закріплена пунктами космічної геодезичної мережі. Вона отримана в результаті сумісного зрівнювання пунктів української мережі перманентних станцій та Державної геодезичної мережі (ДГМ) 1-4 класів і закріплена пунктами ДГМ.

На даний час при кадастрових роботах використовується система СК-63, а це ускладнює використання супутникових методів, оскільки немає єдиних для всієї території країни параметрів перетворення координат.

### ***2.13. Системи висот***

Висотою точки називають відстань від відлікової поверхні по нормалі до даної точки. Залежно від того, яку поверхню вибрано за відлікову, існують різні системи висот.

*Геодезична висота* – відстань по нормалі від рівневої поверхні референц-еліпсоїда до даної точки на земній поверхні.

*Ортометрична висота* – відстань від земного геоїда до даної точки, що відлічується вздовж лінії виска (прямовисної лінії).

Складна структура гравітаційного поля Землі викликана

неправильністю її форми та нерівномірним розподілом мас призводить також до складності обчислення числової оцінки потенціалу сили тяжіння. Ця проблема значно спрощується, якщо побудувати модель гравітаційного поля Землі, яку ще називають нормальним гравітаційним полем Землі. Відмінність реального і нормального гравітаційних полів і призводить до появи поняття квазігеоїда.

*Квазігеоїд* – уявна поверхня, близька до геоїда, що враховує аномалію висоти на поверхні земного еліпсоїда.

*Нормальна висота* – відстань по нормалі від рівневої поверхні квазігеоїда до даної точки на земній поверхні.

Оскільки різниця між ортометричною і нормальною висотами надзвичайно мала, то на деяких картах узагальнюють ці висоти та називають таку висоту – *абсолютною*.

Існує також поняття *відносної висоти* – перевищення однієї точки земної поверхні відносно іншої.

Крім того, існують:

*Барометрична висота* – висота точки, що знаходиться високо над земною поверхнею (як правило літаки), виміряна від деякої ізобаричної поверхні, яка прийнята за початкову. Цю висоту вимірюють на основі закономірності зміни тиску атмосфери з висотою.

*Істинна висота* – відстань по напрямку лінії виска від літального апарату до земної поверхні. Також використовується в авіації та при визначенні висоти супутників на низьких орбітах.

### **Тема 3. Системи відліку часу і зв'язки між ними**

#### **3.1. Одиниці вимірювання часу**

Час – одне з основних понять фізики і філософії. Як фізична величина він є однією з координат простору-часу і визначає послідовність подій. Час здебільшого позначається літерою  $t$ , проміжок часу - літерою  $\tau$  або  $\Delta t$ .



Одиницею вимірювання часу в системі СІ є секунда, проте на практиці для його вимірювання використовуються також інші одиниці.

Найзручнішими одиницями вимірювання часу є періоди обертання Землі навколо осі, обертання Землі навколо Сонця та електромагнітних коливань, які випромінюють атоми деяких речовин.

*Атомна секунда* дорівнює інтервалу часу, за який здійснюється 9 192 631 770 коливань, що відповідають резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію при відсутності зовнішнього впливу.

Від секунди утворюються:

*Хвилина* 1 хв. = 60 с.,

*Година* 1 год. = 60 хв. = 3600 с.

*Добою* називають тривалість одного оберту Землі навколо осі. Але обертання Землі залежить від цілого ряду факторів, тому тривалість часу, протягом якого Земля здійснює оберт навколо осі, неоднакова.

Послідовне проходження відповідної точки небесної сфери через даний меридіан (тривалість одного оберту Землі навколо своєї осі) називається *сонячною добою*, яка є одиницею виміру *всесвітнього часу*.

*Зоряною добою* називається проміжок часу між двома послідовними проходженнями точки весняного рівнодення  $\gamma$  через даний меридіан. Тривалість зоряної доби стабільна і дорівнює 23 год. 56 хв. 03,44 с. Зоряна доба менша від сонячної на 3 хв. 56 с. внаслідок того, що, рухаючись по екліптиці, Сонце за добу зміщується відносно  $\gamma$  на  $1^\circ$ .

Для вимірювання великих проміжків часу використовують *рік* – період обертання Землі навколо Сонця. Відображенням цього є видимий рух Сонця за екліптикою.

Проміжок часу між послідовними проходженнями центра Сонця через точку весняного рівнодення  $\gamma$  називають *тропічним роком*.

Проміжок часу, протягом якого центр Сонця у своєму видимому річному русі робить повний оберт навколо Землі і повертається в попереднє положення відносно зірок, називають *зоряним роком*.

Тропічний рік – 365.24221 середніх сонячних діб;

Зоряний рік – 365.2564 середніх сонячних діб.

### **3.2. Системи відліку часу**

В супутниковій геодезії використовуються достатньо багато систем відліку часу: зоряний, сонячний, всесвітній, полярний, декретний, динамічний, ефемеридний, атомний. Розглянемо детальніше кожний з них.

### **3.3. Зоряний та сонячний час**

При зоряному часі початковим відліком є точка весняного рівнодення  $\gamma$ , а одиниця часу, яку при цьому використовують називають, зоряною добою. Ми не відчуваємо обертання Землі, а спостерігаємо його відображення, тобто видимий добовий рух небесної сфери.

За початок зоряної доби приймається момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення і зоряна доба може бути визначена, як проміжок часу між двома послідовними верхніми кульмінаціями цієї точки.

В момент верхньої кульмінації точки весняного рівнодення її часовий кут дорівнює нулю і виражається в годинах, хвилинах і секундах. Час, який пройшов від початку зоряної доби до даного моменту, виражається в зоряних годинах, хвилинах, секундах і називається *зоряним часом*.

Зоряним часом користуватися незручно і тому людство користується часом, що пов'язаний з видимим рухом Сонця.

*Істинний сонячний час.*

*Істинним Сонцем* називають точку відліку, що знаходиться в центрі сонячного диску. Проміжок часу між двома послідовними проходженнями через небесний меридіан істинного Сонця називається *істинною добою*.

За початок істинної доби прийнято момент нижньої кульмінації істинного Сонця на меридіані даного пункту. Мо-

мент верхньої кульмінації даного Сонця називається *істинним півднем*.

Отже, *істинна доба* – це проміжок часу між істинними півднями. Час, який пройшов від істинної півночі, істинного сонячного часу до будь-якого іншого моменту в годинах, хвилинах і секундах називається *місцевим істинним сонячним часом*. Але істинний сонячний час протікає нерівномірно за рахунок впливу різних факторів, тобто такий час не є постійним.

#### *Середній сонячний час*

Для вдосконалення системи вимірювання часу за Сонцем була введена така система, що відповідає середньому екваторіальному Сонцю. Вона представляє фіктивну точку, яка рівномірно рухається за екватором. Момент верхньої кульмінації середнього екваторіального Сонця на момент даного спостереження називається *середнім півднем*, а момент нижньої – *середньою північчю*. Проміжок часу між двома нижніми послідовними кульмінаціями середнього екваторіального Сонця на меридіані даного пункту називається *середньою сонячною добою*.

Час, який пройшов від початку середньої сонячної доби до даного моменту спостереження, називається *середнім сонячним часом*.

### **3.4. Всесвітній, поясний, декретний, атомний час**

*Всесвітнім часом* називають грінвіцький годинний кут умовного Сонця, який рівномірно переміщається за екватором. Оскільки полюси Землі рухаються, то кутова швидкість обертання Землі не є сталою, а тому і всесвітній час не є рівномірною шкалою часу.

Є три системи всесвітнього часу:

- всесвітній час, який відповідає миттєвому положенню полюса і грінвіцького меридіану, називається UT0;
- час UT0, який приведений відповідною поправкою до середнього полюса та середнього грінвіцького меридіану, називається часом UT1;
- час UT1, який скоригований поправкою за сезонні ва-

ріації кутової швидкості землі, називається UT2.

Основною опорною системою для сучасних високоточних систем є *міжнародний атомний час* ТАІ, в якому відлік ведеться в секундах.

З метою максимального суміщення шкал *всесвітнього часу* UT1 і атомного часу ТАІ введено *всесвітній координований час* UTC. В основі UTC лежить атомна шкала часу.

Всесвітнім істинним UT0, середнім UT1 і корегованим UT2 часами користуються при розв'язанні відповідних задач геодезії та геодинаміки. Також зручно користуватись *всесвітнім координованим часом* UTC для міжнародних відносин, але використовувати його на різних меридіанах недоцільно. Тому на всій Землі використовується система *поясного часу*.

В цій системі земна куля поділена на 24 часових пояси за розмірами  $15^\circ$ . Таким чином поясний час обчислюється:

$$T_n = UTC + n, \quad (3.1)$$

де  $n$  – номер поясу. Україна знаходиться в другому часовому поясі.

Для регулювання економіки країни ввели *декретний час*:

$$T_d = T_n + c, \quad (3.2)$$

$$T_d = UT1 + n + c, \quad (3.3)$$

де  $c$  – коефіцієнт, який приймають рівним для літа – 1 год., для зими – 0 год.

### 3.5. Динамічний та ефемеридний час

Існують поняття нерівномірного та рівномірного часу:

- 1) Нерівномірний, який визначається дійсним обертанням Землі;
- 2) Рівномірний, який служить аргументом при обчисленнях.

Рівномірний час є ефемеридним часом. Обчислення координати світил є функціями ефемеридного часу.

Динамічний час є рівномірною шкалою часу, відповідно до якої відбувається рух тіл у гравітаційному полі. Це незалежний аргумент у рівняннях барицентричного руху тіл со-

нячної системи, які складаються на основі законів Ньютона та релятивістської механіки.

### **3.6. Системи відліку часу в космічних системах**

Супутникові радіонавігаційні системи (ГНСС) GPS і ГЛОНАСС застосовують незалежні динамічні системи часу, які визначають різними атомними годинниками. Час GPS (GPST) також належить до цієї системи. Одиниця вимірювання часу в системі – атомна секунда, проте, щоб утримати GPST близьким до UT, в окремі моменти виконується його корекція на цілочислову кількість додаткових секунд. GPST має незмінний зсув – 19 с.:

$$GPST = TAI - 19с. \quad (3.4)$$

### **3.7. Календар**

*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. Нуме-

рація 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 <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format> мережі Інтернет.

## **Тема 4. Елементи та класифікація орбіт ШСЗ. Основи теорії руху ШСЗ**

### **4.1. Поняття орбіти. Ефемериди орбіти**

*Орбіта* – умовна лінія в космічному просторі, вздовж якої рухається небесне тіло навколо іншого небесного тіла. ШСЗ обертаються навколо Землі за коловою, а здебільшого – за еліптичною орбітою. Якщо ШСЗ обертається разом із Землею навколо її осі (тобто, робить один оберт за добу), то він знаходиться постійно над однією точкою земної поверхні і називається *геостаціонарним*.

Каталог координат та параметрів, який дозволяє визначити положення ШСЗ на орбіті в будь-який момент часу, називається *ефемеридами*.

### **4.2. Класифікація орбіт ШСЗ**

Орбіти ШСЗ можна класифікувати за такими ознаками:

1. За формою, яка залежить від параметрів великої півові та ексцентриситету:

- колова;
- еліптична;
- параболічна;
- гіперболічна.

2. За нахилом орбіти:

- екваторіальна ( $i = 0^\circ$  або  $i = 180^\circ$ );

- полярна ( $i = 90^\circ$ );
  - нахилена ( $i$  набуває всіх інших значень).
3. За висотою орбіти:
- високі;
  - середні;
  - низькі.
4. По співвідношенню періоду обертання навколо земної кулі із земною або сонячною добою на:
- несинхронні;
  - квазісинхронні;
  - синхроннодобові (геосинхронні);
  - сонячносинхронні (геліосинхронні).

### 4.3. Елементи орбіти ШСЗ

Положення ШСЗ на орбіті повністю описується за її шістьма елементами. Розглянемо їх детальніше. На рис. 4.1 представлена інерціальна система координат  $OZXY$ .

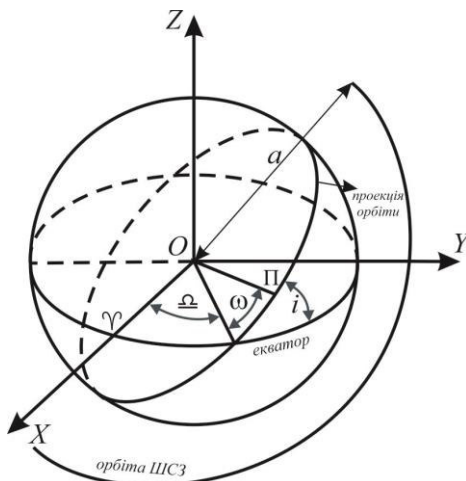


Рис. 4.1. Елементи орбіти

На рисунку зображені основна лінія та точки положення орбіти:

- пряма, за якою перетинаються площини екватора та орбіти, називається *лінією вузлів*;

- точка перетину лінії вузлів та орбіти називається *точкою висхідного вузла  $\Omega$* ;
- точка найбільшого зближення ШСЗ з центром мас Землі називається *перигеєм  $P$* ;
- $\Upsilon$  – точка весняного рівнодення.

Тепер після необхідних додаткових пояснень можна визначити елементи орбіти. Отже, три кутові елементи орбіти визначають її положення в просторі відносно інерціальної системи координат та площини екватора. Ці кутові елементи також називають кутами Ейлера:

$\Omega$  – *довгота висхідного вузла* – дуга, що відлічується від точки весняного рівнодення до точки висхідного вузла;

$\omega$  – *аргумент перигею* – дуга, що відлічується від точки висхідного вузла до перигею;

$i$  – *кут нахилу* площини орбіти до площини екватора;

Розміри та форму орбіти визначають відповідно – велика піввісь орбіти  $a$  та її ексцентриситет  $e$ .

Шостий елемент орбіти  $\tau$  характеризує епоху проходження ШСЗ через точку перигею.

#### **4.4. Поняття про незбурений рух ШСЗ. Закони Кеплера**

*Незбуреним рухом* ШСЗ називають рух супутника, під час якого на нього діє лише гравітаційне поле Землі і не діють інші сили, що називають збурюючими. При цьому Земля розглядається як матеріальна точка.

Незбурений рух ШСЗ підпорядковується трьома законами Кеплера:

1. Орбіта супутника є еліпсом, в одному із фокусів якого знаходиться Земля (при цьому Земля розглядається як матеріальна точка);

2. Радіус-вектор супутника описує за рівні проміжки часу рівні площі;

3. Квадрати періодів обертання двох супутників відносяться як куби великих півосей їх орбіт.



Збурюючі сили поділяються на:

- гравітаційні;
- негравітаційні.

Для більшості супутників головними є гравітаційні сили, тому спочатку розглядаються задачі про рух супутника в полі гравітаційних сил, які створені Землею та іншими тілами сонячної системи. При цьому виходять з наступних умов:

1. Супутник вважається матеріальною точкою, масою якого можна знехтувати в порівнянні з масою Землі;
2. Всі тіла, які збурюють рух супутника, а саме Сонце, Місяць і планети, можна вважати матеріальними точками;
3. Гравітаційним впливом тіл, які не входять в сонячну систему, а також гравітаційним впливом міжзоряного середовища можна знехтувати.

Приведені умови дозволяють звести задачу про рух супутника до відомої в небесній механіці проблеми  $n$  тіл і при цьому тільки одне тіло – Земля – створює гравітаційне поле, яке відмінне від гравітаційного поля маси матеріальної точки. При означенні елементарного руху супутника необхідно використовувати розв'язок задачі з небесної механіки щодо двох матеріальних точок. Такий розв'язок є в першому наближенні, тому за орбіту супутника в цьому випадку приймають орбіту руху матеріальної точки (супутника), яка притягується до іншої точки (Земля). Цей рух називається незбуреним і він підкорюється законам Ньютона:

1. Будь-яка матеріальна точка зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху до тих пір, доки на неї не подіють сторонні сили.

2. Прискорення матеріальної точки прямо пропорційне силі, яка діє на неї, направлене в сторону дії цієї сили і обернено пропорційна масі тіла  $\vec{w} = \frac{\vec{F}}{m}$ .

3. Дві матеріальні точки діють одна на одну з силами, однаковими за величиною і протилежними за напрямком.

#### **4.5. Збурюючі фактори**

На рух супутника також здійснюють вплив різні сили, що називають *збурюючими*, а орбіту, за якою відбувається реальний рух супутника, відповідно називається *збуреною*.

Серед збурюючих сил найбільший вплив мають:

1. Гравітаційне збурення, викликане відмінностями поля притягання Землі від притягання матеріальної точки (сплюснутість Землі);

2. Аномалії гравітаційного поля Землі;

3. Гравітаційні збурення, викликані притяганням інших небесних тіл (Сонця і Місяця);

4. Атмосферний тиск та атмосферне тертя для супутників, які рухаються на висоті до 2000 км;

5. Негравітаційні збурення викликані тиском сонячних променів.

Вплив цих факторів залежить від елементів орбіти, маси та площі поперечного перерізу супутника, а також коефіцієнта відбиття світла від поверхні супутника.

Менший збурюючий вплив на рух ШСЗ мають:

1. Приливні явища під дією Місяця і Сонця, які викликають деформації геопотенціалу;

2. Прецесійно-нутаційні переміщення осі обертання Землі;

3. Гравітаційний вплив інших об'єктів сонячної системи.

Сучасні вимірювальні прилади вимагають врахування цих факторів.

Ще менший вплив мають:

1. Ефекти теорії відносності;

2. Обертання та перерозподіл атмосферних мас;

3. Інші елементи збурення.

#### **4.6. Диференціальні рівняння збуреного руху ШСЗ**

За результатами вимірювань, отриманих від супутників, стає можливим розв'язок основної задачі небесної механіки. Нехай в деякий початковий момент часу в заданій системі

координат відомі координати супутника і компоненти його швидкості. Необхідно знайти його координати, а також компоненти швидкості в будь-який момент часу.

Для цього необхідно скласти диференціальні рівняння руху супутника, в яких враховується вплив основних збурюючих факторів та проінтегрувати їх. В результаті отримаємо лінійні залежності для обчислення координат і швидкостей супутника у вигляді функцій часу та сталих інтегрування.

В загальному ця задача не має точного розв'язку, тому спочатку інтегрують диференціальні рівняння незбуреного руху. На наступних етапах наближеними методами виконують інтегрування рівнянь, де поетапно враховується вплив збурюючих факторів з необхідним ступенем точності. Така задача є предметом досліджень теорії збурень.

#### **4.7. Елементарний вивід рівняння руху супутника**

При виведенні рівняння руху супутника його вважають матеріальною точкою масою  $m$ .

При вивченні незбуреного руху супутника Землю також приймають за матеріальну точку масою  $M$ . Оскільки  $m \ll M$ , то можна вважати, що центр мас Землі нерухомий в умовно інерціальній системі координат.

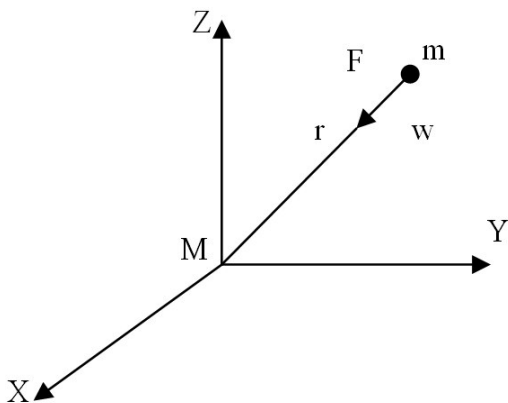


Рис. 4.2. Схема взаємодії супутника та Землі

Систему координат виберемо так, щоб початок координат знаходився в центрі мас Землі. Вісь  $X$  спрямована в точку весняного рівнодення для деякої епохи, вісь  $Z$  співпадає з середньою віссю обертання Землі на ту ж епоху, а вісь  $Y$  розташована в площині середнього екватора під прямим кутом до осі  $X$  і доповнює її до правої системи координат (рис. 4.1).

За другим законом Ньютона маємо:

$$F = mw, \quad (4.1)$$

де  $w$  – прискорення ШСЗ.

Згідно із законом всесвітнього тяжіння сила визначається за формулою:

$$F = -\frac{f \cdot M \cdot m}{r^2}, \quad (4.2)$$

де  $f$  – стала тяжіння;  $r$  – віддаль від супутника  $m$  до Землі  $M$ .

Якщо прирівняти (4.1) і (4.2), то одержимо:

$$w = -\frac{f \cdot M}{r^2}. \quad (4.3)$$

Далі розглянемо проекції прискорення  $w$  супутника на осі координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  і, враховуючи напрямні косинуси  $X/r$ ,  $Y/r$ ,  $Z/r$ , отримаємо диференціальні рівняння наступного виду:

$$X'' = -\frac{\mu X}{r^3}, \quad Y'' = -\frac{\mu Y}{r^3}, \quad Z'' = -\frac{\mu Z}{r^3}, \quad (4.4)$$

або

$$\left. \begin{aligned} X'' + \frac{\mu X}{r^3} &= 0 \\ Y'' + \frac{\mu Y}{r^3} &= 0 \\ Z'' + \frac{\mu Z}{r^3} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (4.5)$$

де  $\mu = f \cdot M$  – гравітаційний параметр.

Інтегрування системи трьох рівнянь (4.5) другого порядку

дає наступний загальний результат:

$$\begin{aligned}x' &= x'(t, c_1, c_2, c_3), \\y' &= y'(t, c_1, c_2, c_3), \\z' &= z'(t, c_1, c_2, c_3), \\x &= x(t, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6), \\y &= y(t, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6), \\z &= z(t, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6),\end{aligned}\tag{4.6}$$

де  $t$  – час;  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  – сталі інтегрування, які визначаються початковими умовами руху, тобто:  $x'_0, z'_0, y'_0, x_0, z_0, y_0$  на момент часу  $t_0$ .

Інтегрування рівнянь (4.6) виконується методом відокремлення змінних. В результаті інтегрування отримують три інтеграли площ, інтеграл енергії та три інтеграли Лапласа.

Інтеграли площ характеризують те, що незбурена орбіта супутника лежить в площині, яка проходить через центр мас Землі. Секторальна швидкість, яка описується поворотом радіус-вектора за одиницю часу, є величина стала, що підтверджується другим законом Кеплера.

Інтеграл енергії являє собою закон збереження енергії двох матеріальних точок (Земля-супутник). Він рівний алгебраїчній сумі кінетичної і потенціальної енергії для даної системи і є величиною сталою.

Інтеграли Лапласа представлені інтегралами руху.

В результаті інтегрування рівнянь незбуреного руху отримуємо 6 сталих інтегрування, сталі площі, сталу енергію, початкову фазу і момент проходження через перигей. В практиці використовують не сталі інтегрування, а елементи орбіти, які характеризують орієнтацію, форму і місце положення супутника. Елементи, які характеризують орієнтацію орбіти, пов'язані зі сталими площ. Початкова фаза ідентифікується справжньою аномалією.

#### **4.8. Обчислення незбурених ефемерид**

Під ефемеридами в астрономії розуміють таблицю значень координат та параметрів небесного тіла на заданий момент часу. Вихідними даними для обчислення ефемерид є:

1. Елементи орбіти;
2. Координати деякого пункту на земній поверхні в геоцентричній інерціальній системі координат;
3. Момент часу  $t_0$  в системі всесвітнього часу.

Необхідно знайти для даного пункту на заданий момент часу  $t$  топоцентричне пряме сходження, схилення і топоцентричний радіус-вектор.

На практиці необхідно, щоб при обчисленні координат супутника були враховані збурення, тому елементи орбіти приводять на заданий момент часу  $t_0$ . За формулами теорії збурень обчислюють величини збурень для кожного елемента орбіти за період часу  $t-t_0$ .

Система збурюючих елементів враховується шляхом додавання до заданих елементів значень величин їх збурень. Одночасно розраховуються умови видимості супутника для даного пункту.

Порядок обчислення ефемерид:

1. Знаходимо середню аномалію на заданий момент часу;
2. Знаходимо справжню аномалію;
3. Обчислюємо геоцентричний радіус-вектор;
4. Знаходимо геоцентричні прямокутні координати і, при необхідності, компоненти швидкості;
5. Обчислюємо прямокутні топоцентричні координати;
6. Обчислюємо топоцентричний радіус-вектор, пряме сходження і схилення.

#### **4.9. Визначення елементів орбіти за спостереженнями супутників**

Кожна визначена координата супутника є функцією елементів орбіти і часу, тому для визначення елементів орбіти необхідно виміряти як мінімум шість значень координат. Це

можуть бути:

- топоцентричні напрямки на супутник;
- топоцентричні відстані до супутника;
- швидкості або прискорення супутників в заданий момент часу.

Як правило, для визначення елементів орбіти використовують більше значень координат. Обчислення елементів орбіти поділяються на 2 етапи:

1. За мінімальним числом даних визначають попередню орбіту;
2. Уточнюють попередню орбіту за всіма вимірами.

## **Тема 5. Технічні засоби та методи спостереження за ШСЗ**

### **5.1. Активні та пасивні ШСЗ**

Штучні супутники Землі, як об'єкти спостережень, мають особливості, що вимагають відповідних методів і апаратури виконання таких спостережень.

Супутники, що використовуються для розв'язання геодезичних задач можуть бути *пасивними* та *активними*.

Якщо супутник виконує роль пасивного відбивача сигналу, наприклад, Сонця або лазерного променя, то його називають *пасивним*.

На *активних* супутниках є бортова апаратура, що випромінює сигнали або ретранслює сигнали наземних передавачів, може проводити самостійні операції та перетворення з сигналом та інформацією.

На даному етапі розвитку супутникової геодезії пасивні супутники практично не використовуються.

Супутники також можна класифікувати за призначенням. Зокрема їх можна поділити на супутники зв'язку, метеорологічні, навігаційні, геодезичні, океанографічні, ресурсні (призначені для досліджень природних ресурсів), астрономічні, військові тощо.

## **5.2. Класифікація методів спостережень ШСЗ**

Залежно від прийомів спостережень, вимірювальних засобів і сукупності фізичних явищ, які лежать в основі спостережень, виділяють різні методи спостережень в супутникової геодезії.

При спостереженні супутників фіксуються, реєструються або вимірюються величини, які в подальшому використовують для визначення положення супутників або їх швидкості в момент спостереження. Процес вимірювання або реєстрації виконують за допомогою спеціальних технічних засобів, які дозволяють визначити параметри сигналів, що надходять на станцію спостереження від супутників.

Методи спостережень ШСЗ поділяють на *оптичні* і *радіотехнічні (радіоелектронні)* залежно від діапазону довжин електромагнітних хвиль, які використовуються в процесі спостережень.

До оптичних відносяться *візуальні, фотографічні, телевізійні і лазерні*.

До найбільш поширених радіотехнічних відносяться *імпульсні, фазові, а також диференціальні та інтегральні доплерівські* методи.

Варто відмітити, що в даний час все частіше використовуються комбіновані методи радіотехнічних і оптичних спостережень.

## **5.3. Оптичні методи спостережень**

Оптичні методи використовують при наявності безпосередньої видимості в напрямку станція – супутник, і це є головним їх недоліком. Розглянемо більш детально основні оптичні методи.

*Візуальні* методи для геодезичних цілей є недостатньо точними, проте можуть використовуватись як доповнення до інших оптичних методів.

Особливе значення мають *фотографічні* методи спостереження супутників. Ці методи засновані на фотографуванні



супутника на тлі так званих опорних зірок (небесні координати відомі) та визначенні напрямку на ШСЗ. При цьому найбільшу незручність складає наявність кутової швидкості руху супутника відносно спостерігача. Через це виникає необхідність, крім напрямку на об'єкт, отримувати з дуже високою точністю і момент часу, який відповідає зафіксованому на знімку положенню ШСЗ.

Фотографічні методи дозволяють визначити напрям одиничного топоцентричного вектора від станції спостереження до миттєвого положення супутника з точністю в межах  $\pm 0,5-2'$ .

*Телевізійна* техніка дає можливість повністю автоматизувати процес спостережень за ШСЗ і одержання координат.

*Лазерна локація.* Принцип вимірювання відстані за допомогою лазера надзвичайно простий. В напрямку на ШСЗ напрямляється короткий світловий імпульс, який відбивається від супутника та повертається назад. Відстань до супутника обчислюється як половина добутку швидкості світла на величину інтервалу часу.

Проте простота методу не означає простоту його виконання. Надзвичайно багато праці було покладено для досягнення цими методами точності 10-20 см. Основними факторами, що впливають на точність, є вплив атмосфери, спотворення на шляху променя та часові затримки, пов'язані з обладнанням.

Оптичні методи, хоча і є менш поширеними порівняно з радіотехнічними, продовжують активно використовуватись в супутниковій геодезії.

#### ***5.4. Радіотехнічні спостереження***

Радіотехнічні методи спостережень вимагають оснащення як наземних станцій (приймачів), так і супутників спеціальною радіотехнічною апаратурою. Радіотехнічні методи дали можливість створити радіонавігаційні супутникові системи, які складаються із станцій спостереження, що розміщені в

різних точках земної кулі, серій супутників із спеціальною апаратурою, станцій вводу інформації, служби часу та єдиного обчислювального центру.

При вимірюванні віддалей до супутників можливе застосування як *імпульсних*, так і *фазових* методів спостереження.

Часові методи реалізовані в імпульсних системах вимірювання віддалей. В їх основі лежить вимірювання часу проходження імпульсним радіосигналом невідомої віддалі. При цьому, на приймачі розташованому на земній поверхні, повинна відбуватися фіксація сигналу в момент випромінювання його передавачем супутника.

Фазовий метод використовують у віддалемірних та різницево-віддалемірних системах. Величиною, яка вимірюється в даному методі, є фазовий зсув, що утворюється різницею фаз сигналів на шляху «супутник – станція», або відносна фазова затримка двох сигналів, які пройшли віддалі різної величини.

### ***5.5. Доплерівські спостереження***

Серед радіотехнічних методів спостереження супутників застосовується метод, заснований на використанні ефекту Доплера. Він полягає в тому, що частота радіосигналу, який приймається, змінюється при русі джерела сигналу відносно приймача. Така зміна частот називається доплерівським ефектом (доплерівським зсувом). Визначення віддалі відбувається при врахуванні різниці частот електромагнітних коливань, які випромінює джерело що рухається, в заданий та початковий момент часу.

При доплерівських спостереженнях розрізняють *запитний* і *беззапитний* способи, а також спосіб, який базується на роботі за відбитим від поверхні супутника сигналом.

При запитному методі порівнюються частоти, що випромінюються наземним передавачем і перевипромінюються прийомно-передавальною апаратурою супутника.

При спостереженні супутників, як правило, застосовують

беззапитний спосіб, який полягає в наступному. Передавач, розташований на супутнику, випромінює високостабільні коливання  $f_1$  і вони приймаються в пункті спостережень з частотою  $f_2$ .

Залежність  $f_2$  від  $f_1$  визначається співвідношенням:

$$f_2 = \sqrt{\frac{f_1 \cdot (1 - v_r^2)}{(1 + \frac{v_r}{c})}}, \quad (5.1)$$

$$v_r = \frac{dv}{dt}, \quad v_r = v \cdot \cos \psi, \quad (5.2)$$

де  $c$  – швидкість світла;  $v_r$  – радіальна швидкість супутника;  $v$  – швидкість супутника відносно пункту спостережень.

Оскільки ця швидкість є нерівномірною, то необхідно  $f_2$  виправити поправкою за різницю гравітаційних потенціалів на наземному пункті та супутнику. Вони вводяться при високоточних вимірюваннях. Величина  $\frac{v_r}{c}$  є малою. Якщо

розкласти в ряд вирази  $(1 - \frac{v_r^2}{c^2})^{\frac{1}{2}}$ ,  $(1 + \frac{v_r}{c})^{-1}$  і обмежитись

двома членами розкладу, то одержимо

$$\Delta f = f_2 - f_1 = -f_1 \cdot \frac{v_r}{c}. \quad (5.3)$$

Практичне значення мають два способи вимірювання у беззапитному методі – *диференціальний* (рис. 5.1) та *інтегральний*.

В диференціальному способі вимірюють різницю частот впродовж всього часу знаходження супутника в зоні радіовидимості пункту спостережень.

Інтегральний спосіб спостережень реалізований за такою ж схемою. Різниця тільки в тому, що вимірювач частоти замінений інтегратором, який виконує підрахунок числа биття

сигналу за певний інтервал часу. Це дозволяє визначити різницю віддалей «станція-супутник» за певний інтервал часу.

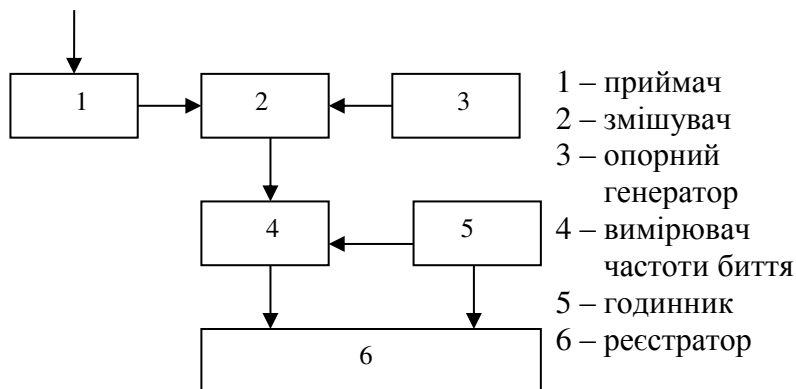


Рис. 5.1. Схема диференціального способу

### 5.6. Умови радіовидимості супутників

Зона видимості супутника ототожнюється із зоною видимості пункту. Зона видимості – це область небесної сфери, в якій можна спостерігати супутник з наземного пункту. При цьому розміри зони видимості, придатні для спостереження, обмежуються мінімальним кутом над горизонтом. Він називається кутом відсічки.

Знаючи довжину  $L$  - віддаль, яку пройде супутник за певний час, і його швидкість, можна знайти час, протягом якого буде спостерігатись радіовидимість даного супутника.

З трикутника POA (рис. 5.2) за теоремою синусів можна записати:

$$\frac{R + H}{\sin(90^\circ + \alpha)} = \frac{R}{\sin \gamma}, \quad (5.4)$$

З рис 5.2 з трикутника BOA одержимо:

$$\gamma = 180^\circ - (90^\circ + \alpha) - \beta, \quad (5.5)$$

або

$$\gamma = 90^\circ - (\alpha + \beta). \quad (5.6)$$

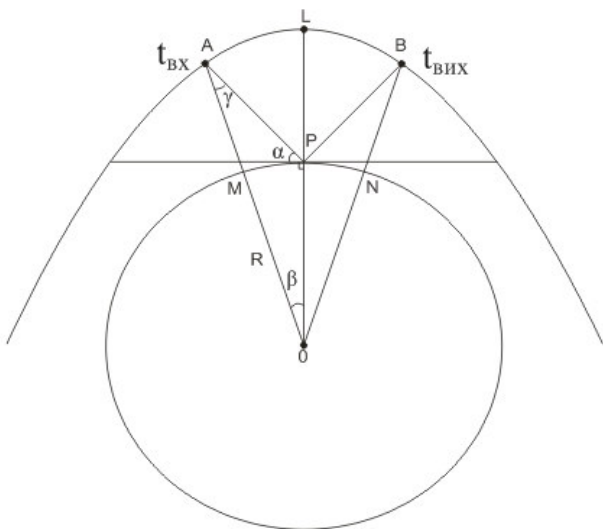


Рис. 5.2. Умови радіовидимості супутників

Підставимо (5.6) в (5.4) і одержимо:

$$\frac{R+H}{\cos \alpha} = \frac{R}{\cos(\alpha + \beta)}, \quad (5.7)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{R}{R+H} \cdot \cos \alpha, \quad (5.8)$$

$$\alpha + \beta = \arccos\left(\frac{R}{R+H} \cdot \cos \alpha\right) \quad (5.9)$$

Центральний кут:

$$\beta = \arccos\left(\frac{R}{R+H} \cdot \cos \alpha\right) - \alpha. \quad (5.10)$$

Використавши відношення:

$$2\beta = \frac{L}{(R+H)} \quad (5.11)$$

Визначимо довжину L:

$$L = 2\beta(R+H) \quad (5.12)$$

де кут  $\beta$  виражений в радіанах.

Якщо кут  $\beta$  вимірювати в градусах, то формула (5.12) набуває вигляду:

$$L = \frac{2\pi 2\beta(R+H)}{360^{\circ}} = \frac{\pi\beta(R+H)}{90^{\circ}}. \quad (5.13)$$

При спостереженні супутника з різних точок земної поверхні можна знайти періоди видимості даного супутника з цих точок і при цьому виконувати синхронні спостереження з майбутнім обчисленням координат точок.

## Змістовий модуль 2

### Глобальні навігаційні супутникові системи

#### Тема 6. Глобальні навігаційні супутникові системи

##### *6.1. Поняття про глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС)*

На сьогоднішній день існує дві діючі глобальні навігаційні супутникові системи – система NAVSTAR (США) та ГЛОНАСС (Росія). Крім того, створюється ще декілька ГНСС. Так, Європейське співтовариство створює свою навігаційну систему GALILEO, Китай – Compass (друга назва Бэйдоу).

Крім того ряд країн оголосили про створення регіональних супутникових систем (що згодом можуть стати глобальними). Так Японія планує створити систему QZSS, яка буде доповнювати та покращувати роботу GPS NAVSTAR. Індія оголосила про створення автономної регіональної супутникової системи IRNSS. Обидві системи будуть охоплювати лише певну частину земної кулі.

Глобальна система визначення місцеположення (GPS) NAVSTAR є всепогодною космічною системою, яка розвивається Міністерством оборони США для неперервного забезпечення користувачів, розташованих у будь-якому місці на Землі або поблизу неї, високоточними даними про їх положення, швидкість та час у єдиній системі відліку.

Як бачимо, використання системи не залежить ні від погодних умов, ні від пори року, ні від часу доби. Обмеження використання ГНСС можуть виникнути лише при перекриванні частини небосхилу перешкодою (зникненню прямої видимості супутника). Таке саме визначення можна дати і системі ГЛОНАСС, оскільки вона конструктивно ідентична до системи GPS NAVSTAR (далі GPS). Єдиною відмінністю є те, що власником ГЛОНАСС є Міністерство оборони Російської Федерації.

В даний час обидві системи повністю відкриті для цивільного користувача. Глобальні навігаційні супутникові системи мають дуже великі можливості і широке використання: морська та повітряна навігація, сухопутний транспорт, геодезичні вимірювання, картографія, екологічний, промисловий і сільськогосподарський моніторинг, всесвітня служба точного часу тощо. Перевагами ГНСС є можливість їх цілодобового використання в будь-якій точці поверхні Землі чи навколишнього простору, її всепогодність та доступність.

Геодезичне застосування системи GPS полягає насамперед у розвитку високоточних геодезичних мереж та проведення знімачів різних масштабів. Її можна також використовувати для виконання будь-яких видів знімачів та розв'язання інженерно-геодезичних задач. Геодезичні GPS-приймачі забезпечують точність визначення координат точок від 1м до 1мм залежно від застосованого методу вимірювань. Створені системи виявилася надійними і ефективними в роботі.

Основну увагу ми будемо приділяти повністю розгорнутим на даний час системам GPS і ГЛОНАСС. Паралельно будемо також наводити дані і про системи, що розвиваються, – GALILEO і Compass. Варто відмітити, що в літературі аббревіатура GPS без інших застережень стосується лише відносно системи NAVSTAR.

GPS NAVSTAR, вже починаючи з 1983 року, почала активно використовуватись цивільними користувачами навіть не дивлячись на те, що повністю розгорнута вона була лише в 1995 р. Першого травня 2000 р. розпорядженням Президента США GPS була повністю відкрита для цивільних користувачів. Це призвело до різкого збільшення кількості цивільних користувачів, особливо при використанні приймачів в геодезичному і топографічному зніманні.

Російська глобальна навігаційна супутникова система ГЛОНАСС (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система) також розроблена Міністерством оборони колишнього



СРСР. Впроваджена для використання з 1990 року, проте повністю була розгорнута лише нещодавно. ГЛОНАСС також повністю відкрита для цивільного користувача.

Визначення координат приймачем засновано на динамічній просторовій засічці при отриманні ним сигналів від щонайменше чотирьох супутників. При цьому GPS-приймач дозволяє визначити координати об'єкта, швидкість його руху і точний час.

Для використання динамічної просторової засічки необхідно постійно знати координати супутників. Радіопередавачі ШСЗ неперервно передають сигнали в напрямку Землі. Ці сигнали несуть інформацію про миттєві координати супутників і миттєвий час надсилання сигналу. Сигнали, надіслані від різних супутників одночасно, приймаються відповідними приймачами, що розташовані на земній поверхні у точках із шуканими координатами. Приймачі фіксують час приходу сигналу на антену приймача і, використовуючи швидкість поширення радіосигналу у просторі, визначають миттєву віддаль до супутника. За визначеними віддальми до 4-х супутників та їх миттєвими координатами, розв'язується пряма просторова засічка, з якої знаходять геоцентричні координати пункту спостереження і точний час.

## **6.2. Архітектура ГНСС**

Системи GPS і ГЛОНАСС мають подібну архітектуру та принципи дії і складаються з 3 сегментів (рис. 6.1):

1. Космічного сегмента, який складається зі штучних супутників Землі, що передають радіосигнали на Землю;
2. Контрольного сегмента (сегмент управління), який стежить за функціонуванням всієї системи;
3. Сегмента користувачів, який включає приймачі різних типів.

Кожен із сегментів виконує дуже важливі функції і чітка робота ГНСС можлива лише при правильній роботі та взаємодії всіх сегментів.

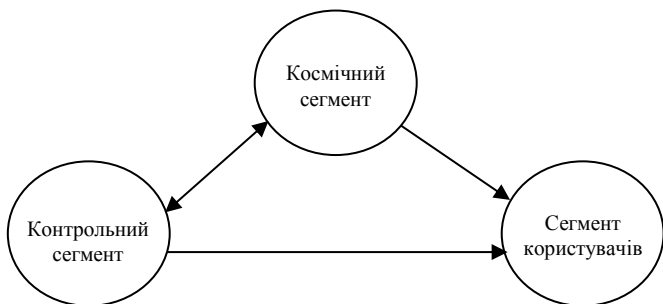


Рис. 6.1. Взаємозв'язок сегментів ГНСС

### 6.3. Космічний сегмент

Космічний сегмент ГНСС – це вся сукупність ШСЗ, що входять до системи (рис. 6.2).

В системі GPS космічний сегмент являє собою систему з 24 ШСЗ (на даний час на орбіті присутні 31 робочий супутник), розподілених по шести майже колових орбітах (з ексцентриситетом  $e < 0,01$ ) з висотою біля 20200 км.

За проектом на кожній орбіті планувалося розмістити по 4 супутники, проте зараз ця кількість більша. Середня кутова відстань між вузлами орбіт супутників складає  $60^\circ$ , а нахил орбіт до площини екватора –  $55^\circ$ . ШСЗ обертаються навколо Землі як одне ціле, не змінюючи своїх взаємних положень. Період обертання супутників близько 12 годин.

Існують сім класів супутників GPS: Block I, Block II, Block IIА, Block IIR, Block IIR-M, Block IIF, Block IIIА. Деякі дані про супутники наведено в табл. 6.1 та 6.2.

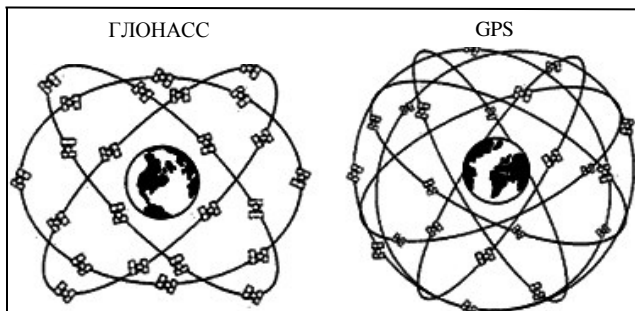


Рис. 6.2. Космічний сегмент систем ГЛОНАСС і GPS

Таблиця 6.1

Дані про запуск супутників GPS станом на 08.09.2010

Блок супутників	Періоди запуску	Запуски супутників				В даний час має статус – «робочий»
		запущено	не успішно	готується	заплановано	
I	1978–1985	10	1	0	0	0
II	1989–1990	9	0	0	0	0
IIA	1990–1997	19	0	0	0	11 із 19 запущених
IIIR	1997–2004	12	1	0	0	12 із 13 запущених
IIIR-M	2005–2009	8	0	0	0	7 із 8 запущених
IIIF	2010–2011	1	0	11	0	1 із 1 запущених
IIIA	з 2014	0	0	0	12	0
<b>Всього</b>		59	2	11	12	31

Таблиця 6.2

Деякі характеристики GPS-супутників

Тип супутника	Block-II	Block-IIA	Block-IIIR	Block-IIIRM	Block-IIIF
Маса, кг	885	1500	2000	2000	2170
Тривалість роботи (рік)	7.5	7.5	10	10	15
Бортовий час (стандарт частоти)	Cs	Cs	Rb	Rb	Rb+Cs
Міжсупутниковий зв'язок	-	+	+	+	+
Автономна робота, днів	14	180	180	180	>60
Антирадіаційний захист	-	-	+	+	+
Антенa	-	-	покращ.	покращ.	покращ.
Можливість налаштування на орбіті та потужність бортового передавача	+	+	++	+++	++++
Навігаційний сигнал	L1:C/A+P, L2:P	L1:C/A+P, L2:P	L1:C/A+P, L2:P	L1:C/A+P+M, L2:C/A+P+M	L1:C/A+P+M, L2:C/A+P+M, L5:C

Космічний сегмент системи ГЛОНАСС також складається з 24 супутників, що рухаються на 3 орбітах (рис. 6.2). Перший супутник ГЛОНАСС був запущений в СРСР 12 жовтня 1982 р. 24 вересня 1993 р. система була офіційно прийнята в експлуатацію з космічним сегментом із 12-ти супутників, а в грудні 1995-го було виведено на орбіту 24 супутники. Проте до кінця 90-х кількість супутників різко зменшилась (був момент, коли лишалось 3 робочі супутники). В останні роки їхня кількість постійно зростала. Так в 2005 р. їх вже було 9. В 2008 р. – 18. На сьогодні система ГЛОНАСС розгорнута в повному обсязі.

Орбіти нахилені до площини екватора під кутом  $64,8^\circ$ . Період обертання супутників близько 11,26 годин, висота орбіти 19100 км. На орбіту виводились супутники кількох поколінь: Глонасс, Глонасс-М, Глонасс-К.

Супутники Глонасс виводились до 2005 року, та мали короткий (2-3 роки) термін експлуатації. Їм на зміну прийшли супутники нового покоління Глонасс-М. Термін їх експлуатації – 7 років. Крім того, ці супутники випромінюють 2 сигнали для цивільних користувачів, що суттєво підвищує точність визначення координат.

Головною відмінністю супутників третього покоління Глонасс-К є термін гарантованої роботи, що складає 10 років.

Системи GALILEO і Compass перебувають на етапі розгортання. Інформація про стан та кількість супутників в системах доступна на спеціалізованих електронних ресурсах.

В системі GALILEO в 2005 і 2008 роках було запущено відповідно 2 супутники - GIOVE-A та GIOVE-B. Обидва супутники були призначені для тестування апаратури і дослідження характеристик сигналів. В 2011 р. запущено 4 робочих супутники Galileo, що створили перше міні-сузір'я системи. На відміну від попередніх систем, супутники знаходяться на геостационарних орбітах на висоті 23000 км. До 2014-2015 року планується запустити 18 супутників, а в

2019 році повністю робоча система буде складатися з 24 супутників.

В системі Compass (Бейдоу) запущено 5 супутників. Повністю розгорнуте сузір'я супутників буде складатись з 35 супутників і планується завершити його розгортання в 2020 р. Орбіти як і в GALILEO – геостаціонарні. Дані про супутники системи наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Дані про супутники Compass станом на 10.12.2010 р.

Дата запуску	Супутник	Орбіта	Статус	Система
30.10.2000	Бэйдоу-1А	ГСО*, 140° Сх. д.	Нема даних	Бейдоу-1
20.12.2000	Бэйдоу-1В	ГСО, 80° Сх. д.	Нема даних	
24.05.2003	Бэйдоу-1С	ГСО, 110,5° Сх. д.	Діючий	
02.02.2007	Бэйдоу-1D	Виведений з орбіти	Не використовується	
13.04.2007	Компас-М1	Кругова, 21 500 км	Тільки тестування	Бейдоу-2 (Компас)
14.04.2009	Компас-Г2	Неконтрольована	Не використовується	
16.01.2010	Компас-Г1	ГСО, 144,5° Сх. д.	Діючий	
02.06.2010	Компас-Г3	ГСО, 84,7° Сх. д.	Діючий	
31.07.2010	Компас-IGSO-1	ГСО, 55,1° Сх. д.	Діючий	

\*ГСО – геостаціонарна орбіта.

Розв'язання однієї з основних задач – визначення часу поширення сигналу від супутника до приймача з метою наступного визначення псевдовідстані засноване на синхронізації апаратури супутника і приймача в єдиній системі часу.

Для такої синхронізації використовується наступний принцип. Всіма супутниками і приймачем одночасно генерується бінарний код. При цьому в кожного ШСЗ свій код, а в приймачі ці коди опрацьовуються в окремих каналах реєстрації сигналів. Після цього відбувається порівняння коду отриманого від супутника та коду, що генерується приймачем (такий самий, як і в супутника у відповідний момент часу).

Різниця між моментом часу, коли був переданий сигнал із відповідним кодом супутника (рис. 6.3) і моментом часу, коли такий код був сформований приймачем, визначає час поширення сигналу. Псевдовіддаль визначається як добуток часу на швидкість поширення сигналу.

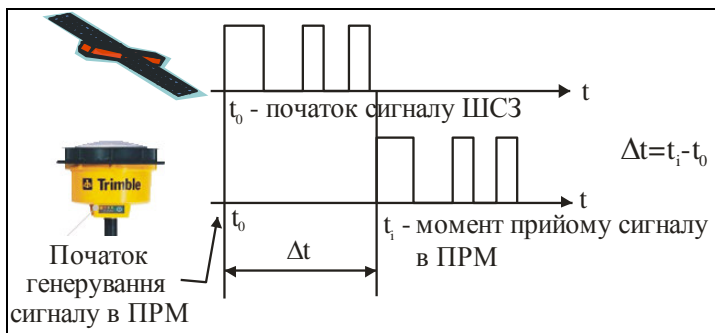


Рис. 6.3. Час розповсюдження сигналу

Чи не найбільше значення має структура сигналу GPS-системи, тому розглянемо його більш детально.

Основа точності системи становлять атомні годинники або стандарти точного часу. Супутники типу BlockII обладнані чотирма стандартами точного часу: двома рубідієвими та двома цезієвими. Довгострокова відносна стабільність частоти цих стандартів становить  $10^{-14}$  і  $10^{-15}$ .

Високоточні стандарти частоти, які можна назвати серцем усієї електронної системи, застосовуються для генерації коливань на робочій частоті 10,23 МГц. Шляхом множення цієї частоти на 154 та 120 відповідно отримують дві частоти  $L_1$  і  $L_2$ . Двохчастотний характер сигналу важливий для усунення похибки під час визначення псевдовідстані, яка виникає через вплив іоносфери.

Кожен супутник системи GPS випромінює радіосигнали на робочих частотах  $L_1=1575,42$  МГц і  $L_2=1227,60$  МГц. Сигнал на частоті  $L_1$  модульовано P, C/A-кодами, а на частоті  $L_2$  – виключно P-кодом.

Із запуском супутників Block-III вводиться нова частота L5 (1176.45 МГц). Сигнал на частоті L5 потужніший на

3 децибелі, ніж цивільний сигнал, і має в 10 разів ширшу смугу пропускання. Сигнал буде використовуватись з 2014 р.

Код вільного доступу C/A (Coarse Acquisition) має частоту проходження імпульсів 1,023 МГц і період повторення 0,001 сек. Точність автономних вимірів відстаней від приймача до супутника за допомогою цього коду є невисокою.

Захищений код P (Protected) характеризується частотою проходження імпульсів 10,23 МГц і періодом повторення 7 дБ. Американське оборонне відомство вжило заходів додаткового захисту P-коду: у будь-який момент без попередження може бути включений режим AS (Anti Spoofing). При цьому виконується додаткове кодування P-коду, і він перетворюється в Y-код. Розшифровка Y-коду можлива тільки апаратно, з використанням спеціальної мікросхеми, що встановлюється в GPS-приймачах військового призначення.

З метою зниження точності визначення координат несанкціонованими користувачами передбачений так званий “режим вибіркового доступу” SA (Selective Availability). При включенні цього режиму в навігаційне повідомлення навмишно вводиться помилкова інформація про похибки атомних годинників і елементи орбіти супутників, що призводить до суттєвого зниження точності навігаційних визначень.

#### ***6.4. Контрольний сегмент***

Контрольний сегмент, або сегмент управління ГНСС – це комплекс наземних засобів, які забезпечують функціонування космічного сегмента, контролюють його роботу та здійснюють безпосереднє керування всією системою.

Цей сегмент в системі GPS включає контрольно-спостережувальні станції – головну і додаткові станції безперервного спостереження за ШСЗ. Головним завданням цих станцій є спостереження за супутниками з метою визначення траєкторій ШСЗ та похибок бортових атомних годин-

ників. Крім того, через систему управління здійснюються синхронізація годинників та оновлення даних.

В склад системи контрольних станцій GPS входять:

- головна контрольна станція;
- п'ять станцій стеження (моніторингових);
- три контрольні станції.

Місцем базування головної станції є об'єднаний космічний Центр управління на авіабазі Фалькон, Колорадо-Спрінгз (США). В цьому центрі збираються результати спостережень з усіх станцій спостережень, обчислюються уточнені орбіти навігаційних супутників та оцінюється стан кожного з них і системи в цілому.

Станції спостереження розташовані в місті Колорадо-Спрінгз та на островах Гаваї, Вознесіння, Дієго-Гарсія, Кваджалейн (рис. 6.4).

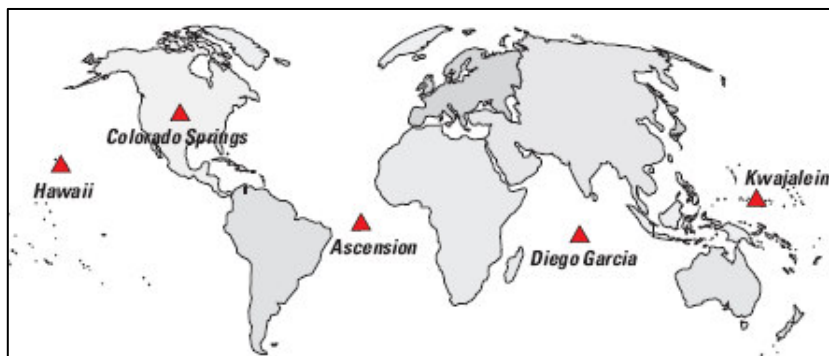


Рис. 6.4. Розташування контрольної станції та станцій спостереження GPS

Станції обладнані цезієвими стандартами частоти і часу та Р-кодovими приймачами і можуть одночасно відслідковувати до 11 супутників. Положення станцій відоме з високою точністю в геоцентричній системі координат WGS-84. На станціях кожні півтори секунди вимірюють псевдовідстані до всіх ШСЗ NAVSTAR, коли ті проходять над горизонтом, визначають вплив атмосфери і пересилають на головну станцію згладжені, виправлені за іоносферну і тропосферну рефракції дані, усереднені за 15 хв.



Додаткові станції управління розташовані на тих же пунктах, що і станції стеження. Вони служать для передачі повідомлень на супутники. Ефемериди супутників та поправки годинників, визначені на головній станції управління, з додаткових станцій передаються на ШСЗ по радіоканалу.

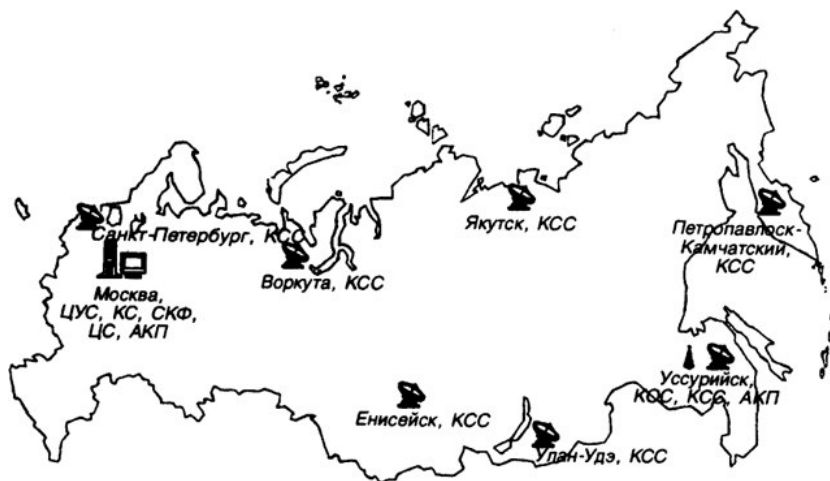


Рис. 6.5. Розташування складових контрольного сегмента ГЛОНАСС

На рисунку (аббревіатура залишена російською): ЦУС - центр керування системою ГЛОНАСС; ЦС - центральний синхронізатор; КС - контрольна станція; СКФ - система контролю фаз; КОС - квантово-оптична станція; АКП - апаратура контролю поля; КСС - контрольна станція стеження

Подібну структуру і функції має контрольний сегмент ГЛОНАСС (рис. 6.5), який складається з:

- головного наземного командного пункту (Москва);
- семи командно-вимірювальних пунктів;
- двох квантово-оптичних вимірювальних пунктів.

Сегмент управління системою GALILEO складається з трьох центрів управління (GCC), п'яти станцій контролю за сузір'ям супутників (TTC), 30-ти контрольних приймальних станцій (GSS) та 9 Uplink станцій (ULS) для актуалізації сигналів.

Даних про сегмент управління системою Compass немає. Крім того, існує ще багато приватних мереж станцій сте-

ження. Вони не беруть участі в керуванні роботою системи, а лише визначають орбіти супутників.

### **6.5. Сегмент користувачів**

Сегмент користувачів являє собою всю множину GPS-приймачів. Приймачі мають різну будову, функції та призначення, тому їх розрізняють за різними ознаками.

Оскільки власником системи GPS є МО США, то в першу чергу приймачі поділяються на дві групи:

- PPS (Precise Positioning Service) – для точного визначення місцеположення. До цієї групи відносяться військові користувачі НАТО, приймачі яких здатні приймати Y-код, позбавлений AS та SA-кодування.

- SPS (Standard Positioning Service) – для стандартного визначення місцеположення. До другої групи відносяться усі цивільні користувачі, приймачі яких приймають сигнали, кодовані функціями AS та SA.

Залежно від призначення приймачі поділяють на три групи:

- Навігаційні. Приймачі цієї групи миттєво визначають своє місцеположення. Середня квадратична похибка визначення координат навігаційними приймачами при відсутності перешкод та виключеному SA-кодуванні супутникових сигналів не перевищує 10 м, а при включеному SA-кодуванні може досягати 200-300 м.

- Геодезичні. Ці приймачі призначені для диференційних вимірювань (одночасно вимірювання проводяться мінімум двома приймачами) і визначення приростів координат між статично закріпленими приймачами. Точність визначення приростів координат може досягати 1 мм.

- Спеціальні. Вони можуть мати різне призначення, зокрема, визначення точного часу.

Залежно від принципу вимірювання віддалей до супутника приймачі поділяються на кодові та фазові. Деякі приймачі додатково вимірюють доплерівський зсув частоти сигналу.



Рис. 6.6. Обладнання сегмента GPS-користувачів

На рисунку: 1) геодезичний приймач; 2) морський навігаційний приймач; 3) автомобільний GPS-навігатор; 4) картографічний GPS-приймач; 5) засіб персональної навігації; 6) прилад моніторингу

Кодові приймачі визначають положення опрацьовуючи інформацію, що міститься в коді, який передається супутником. Перевага таких приймачів в їх низькій вартості. Недоліком є низька точність.

Фазові приймачі визначають положення шляхом опрацювання вимірювань фази несучої хвилі, яка спостерігається впродовж деякого часу. Такі приймачі значно точніші за кодові і можуть визначати положення із субсантиметровою точністю.

Приймачі також розділяють на чотири групи за принципом вимірювання віддалей до супутника і типу сигналу, який приймається до опрацювання. Це:

- кодові приймачі;
- фазові приймачі із C/A-кодом;
- кодові приймачі із C/A та P-кодом;
- фазові приймачі із C/A та P-кодом.

Найчастіше цей поділ спрощують і ділять приймачі на одночастотні (приймають C/A-код), та двочастотні (приймають C/A та P-код).

GPS-приймач складається з шести головних блоків (рис. 6.7).

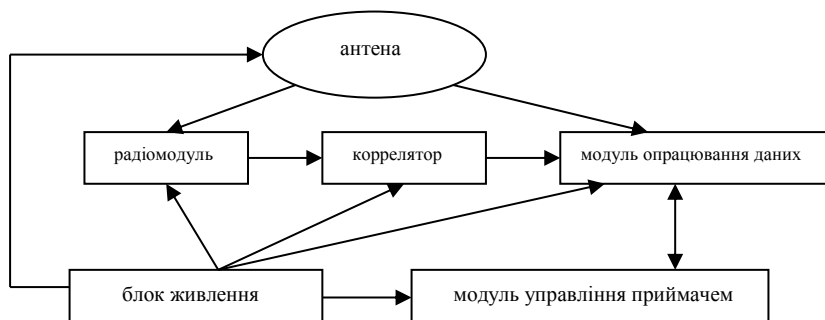


Рис. 6.7. Схематична будова GPS-приймача

Антенa приймає GPS-сигнали і передає їх у радіомодуль. У цьому модулі виконується підсилення сигналів та їх конвертація на низькі частоти.

Корелятор призначений для синхронізації затримки фази сигналу приймача із параметрами прийнятого радіомодулем GPS-сигналу. Сигнали всіх GPS-супутників опрацьовуються одночасно по окремих каналах. На вихід корелятора подаються дані, необхідні для пошуку і визначення супутникового сигналу, здійснення приблизних обчислень і визначення місцеположення приймача.

Модуль опрацювання даних виконує опрацювання прийнятих сигналів, оцінює параметри цього сигналу та розраховує місцеположення приймача.

Через модуль управління оператор задає відповідні режими роботи приймача, контролює процес вимірювань і їх накопичення у пам'яті приймача. Автономний блок живлення забезпечує роботу усіх блоків.

Варто зауважити, що існують приймачі, які здатні отримувати і опрацьовувати сигнали систем GPS та ГЛОНАСС одночасно. Завдяки цьому вони швидше визначають координати точок з необхідною точністю.

## Тема 7. Структура похибок GPS-вимірювань

### 7.1. Загальна характеристика похибок при GPS-вимірюваннях

Точність GPS-вимірювань обумовлена цілим рядом джерел похибок як випадкового, так і систематичного походження.



Рис. 7.1 Структура похибок, що виникають при GPS-спостереженнях

Ці джерела похибок можна поділити на три групи (рис. 7.1), пов'язані із:

- сузір'ям супутників;
- зовнішніми умовами;
- GPS-приймачем.

Розглянемо більш детально кожну з груп похибок.

## **7.2. Похибки обумовлені сузір'ям супутників, критерії їх оцінки**

До похибок, обумовлених сузір'ям супутників, відносяться:

1. *Випадкова похибка, обумовлена геометрією сузір'я супутників.*

На визначення координат місцеположення приймача суттєвий вплив має конфігурація сузір'я супутників, від яких одночасно приймаються сигнали, та їх кількість.

Утворена одиничними векторами від антени до супутників просторова засічка має пірамідальну форму і точність визначення координат антени є найвищою при утворенні нею максимального об'єму. Цьому випадку не завжди відповідає максимальна кількість супутників, від яких приймаються сигнали (рис. 7.2). Максимальний „об'єм” засічки дає більш вагомий внесок у точність визначення координат, ніж кількість супутників.

Для оцінки конфігурації сузір'я супутників введено спеціальні критерії, які визначаються коефіцієнтами погіршення точності Dilution of Precision (DOP). Вони є функціями кореляційної матриці вимірів, яка описує засічку антени приймача.

Серед критеріїв погіршення точності розрізняють наступні:

GDOP – Geometric DOP (просторово-часовий параметр);

PDOP – Position DOP (просторове (координатне) положення);

HDOP – Horizontal DOP (планове положення);

VDOP – Vertical DOP (висотне положення);

TDOP – Time DOP (одномірний часовий параметр).

Прийнято, що між відповідними критеріями має місце таке співвідношення:

$$GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2. \quad (8.1)$$

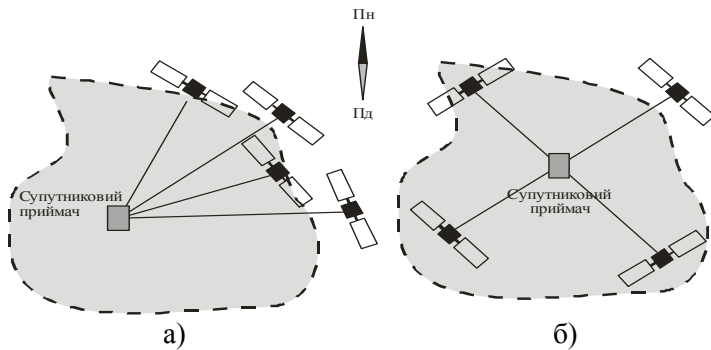


Рис. 7.2. Варіанти геометричного розташування супутників:  
а) – невдалий, б) – вдалий

Найбільш поширеним є критерій GDOP, який може змінюватись у межах від одиниці до нескінченності. Для отримання якісних результатів, GPS-вимірювання рекомендують проводити при значенні GDOP у межах до 8-ми одиниць.

2. Систематична похибка визначення часу атомним годинником GPS-супутника.

Похибка атомного годинника супутника визначається станціями контрольного сегменту і передається на бортовий комп'ютер супутника. Інформація про цю похибку передається із супутниковим сигналом у вигляді коефіцієнтів поліному:  $af_0$  – поправка годинника (с);  $af_1$  – швидкість зміни  $af_0$  (с/с);  $af_2$  – прискорення зміни  $af_0$  (с/с<sup>2</sup>).

3. Систематична похибка визначення ефемерид і координат супутника.

Похибка ефемерид та координат супутника також визначається контрольним сегментом і передається на супутник. Точність переданих у реальному часі координат супутника в складі супутникового сигналу складає  $\pm 2$  м, а за остаточними ефемеридами IGS складає  $\pm 5$  см.

### **7.3. Похибки, обумовлені зовнішніми умовами**

#### **1. Випадкова похибка, обумовлена впливом іоносфери.**

Іоносфера – це іонізований атмосферний шар в діапазоні висот 50-1000 км, що містить іони та вільні електрони. Наявність цих електронів викликає зменшення кодової швидкості сигналу та випередження фазової швидкості. В результаті неспівпадання швидкостей виникають групова затримка та фазове випередження. Тому виміряні кодові псевдовідстані довші, а фазові коротші, ніж геометрична відстань між супутником та приймачем. Величина такої похибки може коливатись в межах 0,15-50 м.

Затримка (для фази випередження) поширення сигналу супутника прямо пропорційна концентрації електронів і обернено пропорційна квадратові частоти радіосигналу. Концентрація електронів залежить від багатьох факторів (інтенсивність сонячної радіації, сезонні та добові варіації, кут та азимут супутника, місце проведення вимірювань тощо) і не є сталою. Тому для компенсації цієї похибки у визначенні віддалі між супутником і приймачем виконуються двочастотні вимірювання на частотах  $L_1$  і  $L_2$ . На основі використання цих двох частот розроблено методики для практично повного врахування похибки за іоносферу.

#### **2. Випадкова похибка, обумовлена впливом тропосфери.**

Тропосфера – нижній від земної поверхні шар атмосфери (приблизно до 12 км). Тропосфера також обумовлює затримку поширення радіосигналу від супутника. Розглянемо причини такої затримки.

Згідно законів оптики, радіохвиля на межі двох прозорих середовищ з різною густиною заломлюється і змінює напрям свого руху. А в тропосфері густина атмосферного повітря змінюється в залежності від висоти супутника над горизонтом та метеопараметрів (тиску, температури, вологості



тощо). Тому зрозуміло, що величина затримки залежить від цих параметрів. Тропосферні затримки викликають похибки вимірювань псевдовіддалей.

Тропосфера, на відміну від іоносфери, є недисперсним середовищем для радіохвиль аж до частоти 15 ГГц і тому швидкість поширення сигналу від частоти майже не залежить. Отже, немає можливості усунути тропосферну рефракцію шляхом застосування двочастотних методів. Компенсація тропосферних затримок забезпечується шляхом розрахунку математичної моделі цього шару атмосфери. Необхідні для цього коефіцієнти отримуються в навігаційному повідомленні супутника.

На сьогодні існує достатньо багато математичних моделей, які розроблені як для планети в цілому, так і для окремих регіонів. Перевагою загальноземних є їх глобальність (можливість використати на всій території земної кулі), а перевагою регіональних – більша точність в межах окремого регіону.

*3. Випадкова похибка, обумовлена багатошляховістю поширення сигналу.*

Багатошляховість поширення сигналу з'являється в результаті відбивання сигналу супутника від відбиваючих поверхонь (стіни будинків, огорожі, водні поверхні), розташованих безпосередньо біля приймача. Для кращого розуміння можна навести аналогію з відбиванням телесигналу на антену телевізора. В результаті ми спостерігаємо подвійне зображення. Так само і приймач може отримати сигнал від супутника як напряму, так і відбитий від перешкоди (рис. 7.3.). Відбитий сигнал проходить більшу відстань.

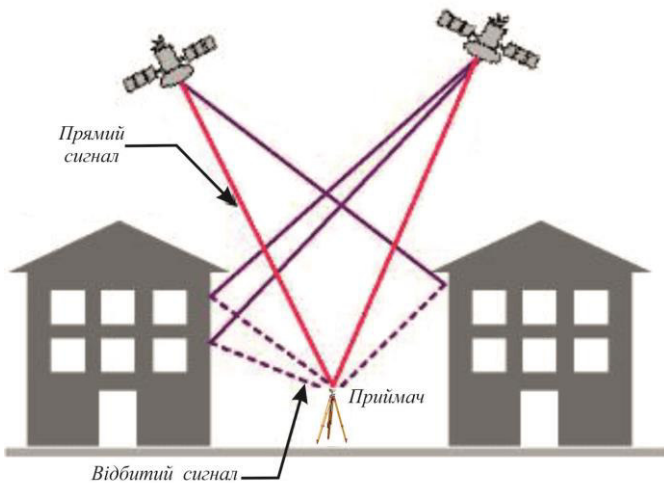


Рис. 7.3. Можливі напрямки поширення сигналу

Похибки, викликані багатошляховістю поширення сигналу, поділяють на три групи:

- дифузне пряме розсіювання (проходження сигналу повз хаотично розташовані предмети), яке спричиняє похибки псевдовідстаней до 10 м;
- дзеркальне відбиття від близько розташованих від антени поверхонь, що дає похибки визначення псевдовідстаней до 6 м;
- флуктації дуже низької частоти, як правило, пов'язані з відбиванням від поверхні води, що спричиняє похибки визначення псевдовідстаней до 10 м.

При GPS-зніманні рекомендується встановлювати антену приймача на відкритій місцевості. А для усунення G?-PS-сигналів, відбитих від водних і підстилаючих поверхонь, нижню частину антени оснащують спеціальними кільцями, які перешкоджають проходженню цих сигналів.

При диференціальних вимірюваннях протягом тривалого часу величина похибки за багатошляховість поширення сигналів не перевищує 1 см.

#### 4. Систематичні похибки, обумовлені релятивістськими ефектами.

Розглянемо глобальну навігаційну супутникову систему в цілому з точки зору теорії відносності. Супутник, обертаючись навколо Землі, знаходиться на значній відстані від станцій спостереження та приймачів і рухається відносно них з великою швидкістю. Внаслідок цього сигнал, що випромінюється із станції спостереження в момент часу  $t_1$ , містить інформацію про час  $t_1$ , але прибуває на супутник вже в момент часу  $t_2$ .

Таким чином, з'являється затримка часу  $\Delta t$ . Крім того, оскільки супутник під час обміну сигналами рухається, то і псевдовідстань за цей час також змінюється на величину  $\Delta l$ . Подібні похибки виникають і при передачі сигналу від супутника до приймача.

Гравітаційні поля Землі, Місяця, Сонця та інших космічних об'єктів, впливаючи на сигнал, також впливають на час і псевдовідстань. А якщо врахувати, що ті ж ефекти впливають також на сам супутник і частоту електромагнітної хвилі сигналу, що система супутник-Земля є обертовою, тобто неінерціальною та й Земля також здійснює обертовий рух, а всі ефекти мають взаємний вплив, стає зрозумілою складність врахування релятивістських ефектів.

Варто відзначити, що вплив релятивістських ефектів має систематичний характер, тобто, за суттю вони є поправками. Створено достатньо багато математичних моделей, які враховують кожен релятивістський ефект окремо, або об'єднують дію кількох ефектів разом, проте всі вони не виключають вплив релятивістських ефектів повністю. Крім того, існують релятивістські ефекти, неточність врахування яких дещо більша порівняно з іншими.

До них відносяться ефекти:

- Доплера другого порядку – величина частотного зсуву сигналу, що проходить між двома рухомими об'єктами;
- гравітаційний зсув частоти;

- використання обертових систем відліку. Будь-який обертовий рух відбувається з кутовим прискоренням, а, отже, і обертова система координат – неінерціальна. Вибір умовної інерціальної системи для врахування релятивістських ефектів також впливає на величину похибки.

Максимальна похибка визначення псевдовіддалей, обумовлених релятивістськими та гравітаційними ефектами, на даний час (після врахування основних поправок за релятивістські ефекти) не перевищує 19 мм. При відносних вимірах ця похибка зменшується до порядку  $10^{-9}$ .

#### **7.4. Похибки, обумовлені GPS-приймачем**

1. *Інструментальна похибка приймача* обумовлена наявністю шумів в електронному тракті приймача. Відношення сигнал/шум (SNR) приймача визначає точність процедури порівняння опорного і прийнятого від ШСЗ сигналів, тобто, похибку обчислення псевдовіддалі. Наявність даної помилки може приводити у абсолютному методі до виникнення координатної похибки у межах до 1-2 м.

2. *Зсув та варіації фазового центру антени GPS приймача* приводять до похибок визначення псевдовіддалей у межах 1 см. Фазовий центр антени – це точка, від якої відраховується псевдовіддаль до центра антени супутника. Розрізняють зміщення фазового центру (ексцентриситет) та його варіації відносно осі обертання антени та відлікової точки.

Крім цього, існує два фазові центри, які відносяться до частот  $L_1$  і  $L_2$ . Вони, відповідно, мають різні ексцентриситети. Ексцентриситет фазового центру може бути викликаний неточним юстируванням комплектуючих антени або непаралельністю осі круглого рівня до осі обертання антени. Ексцентриситет фазового центру  $\epsilon$ , як правило, сталою величиною. Причиною зміни його параметрів можуть бути порушення умов експлуатації приймача (сильне струшування) або ремонт антени. Варіації положення фазового центру за-

лежать від геометрії сузір'я видимих супутників та їх висоти над горизонтом.

Ексцентриситет фазового центру антени можна частково вилучати із результатів вимірювань, або його враховувати. В першу чергу це стосується горизонтальної складової. Інструкції з експлуатації GPS-приймачів рекомендують при вимірюваннях орієнтувати у північному напрямку відповідну мітку антен приймачів.

*3. Похибка, пов'язана з центруванням антени.* Вона виникає внаслідок неточного встановлення центра антени приймача (безпосередньо на точку за допомогою штанги, штативу або іншого пристрою) над точкою. Ця похибка цілком залежить від спостерігача та його роботи з обладнанням. Неакуратна робота, особливо зі штангою, може призвести до значної похибки, яку складно врахувати.

## **Тема 8. Побудова та розвиток державної геодезичної мережі з використанням ГНСС. Перманентні станції**

### ***8.1. Застосування ГНСС для побудови геодезичних мереж***

Державна геодезична мережа ДГМ – це сукупність пунктів, які рівномірно розміщуються на території країни і закріплені на місцевості спеціальними знаками, що забезпечує їх збереження та стійкість у плані і за висотою протягом тривалого часу. ДГМ є єдиним носієм геодезичної системи координат та висот в межах України.

Просторова геодезична мережа має наступні складові:

- астрономо-геодезичні мережі 1-го класу (АГМ-1);
- геодезичні мережі 2-го класу;
- геодезичні мережі згущення 3-го класу;

Висотна геодезична мережа складається з:

- нівелірної мережі 1-2-го класів;
- нівелірної мережі 3-4-го класів.

ДГМ створюється в інтересах господарської діяльності, науки та оборони країни для вирішення наступних задач:

1. Встановлення єдиної геодезичної системи координат і висот на території України;
2. Геодезичне забезпечення картографування території країни, акваторії морів та внутрішніх водойм;
3. Геодезичне забезпечення вивчення природних ресурсів та ведення державних податків;
4. Забезпечення вихідними геодезичними даними засобів наземної, морської і аерокосмічної навігації для моніторингу навколишнього середовища;
5. Вивчення фігури, гравітаційного поля Землі та їх зміни у часі;
6. Вивчення геодинамічних явищ та сучасних вертикальних рухів земної поверхні;
7. Створення бази геопросторових даних в єдиній системі координат;
8. Вивчення зон деформації земної поверхні для уточнення карт загального сейсмічного районування;
9. Вивчення рухів полюсів та нерівномірностей обертання Землі;
10. Метрологічне забезпечення високоточних технічних засобів визначення місцеположення та орієнтування.

Згідно «Основних положень створення Державної геодезичної мережі України», затверджених Постановою КМУ від 08.06.1998р. за №844, передбачається побудова ДГМ із застосуванням сучасних глобальних навігаційних супутникових систем, строгих математичних методів оброблення даних та інформаційних технологій, а також допускають використання традиційних геодезичних методів.

Середня щільність ДГМ має бути не менше одного пункту на 30 км<sup>2</sup>. Подальше збільшення щільності пунктів ДГМ обґрунтовується розрахунками, виходячи з конкретних завдань топографо-геодезичного забезпечення території.

Для геодезичного забезпечення топографічного знімання встановлюються такі норми щільності пунктів та реперів ДГМ:

- для знімачь у масштабі 1:25 000 та 1:10 000 – 1 пункт на 30 км<sup>2</sup> і 1 репер на трапецію масштабу 1:10 000;
- для знімачь у масштабі 1: 5 000 – 1 пункт на 20-30 км<sup>2</sup> і 1 репер на 10-15 км<sup>2</sup>;
- для знімачь у масштабі 1: 2 000 і більше – 1 пункт на 5-15 км<sup>2</sup> та 1 репер на 5-7 км<sup>2</sup>.

Для топографічного та кадастрового знімання в масштабі 1:2000 і більше на доповнення до пунктів ДГМ визначаються пункти геодезичних мереж згущення та знімальних геодезичних мереж.

У разі використання супутникових геодезичних методів для визначення пунктів знімальних мереж можливе обґрунтоване зменшення щільності пунктів ДГМ.

Геодезична мережа з необхідною точністю і щільністю пунктів мережі поширює на територію держави світову геодезичну систему WGS-84, міжнародну земну референцну систему ITRS та європейську земну референцну систему 1989 року ETRS89 з відліковим еліпсоїдом GRS -80.

За загальноземну систему координат приймається система ITRS, що реалізується організацією IERS (International Earth Rotation Service) – з присвоєнням їй відповідної назви – ITRF, тобто реалізація ITRS на відповідну епоху.

За європейську систему координат приймається система ETRS89, що реалізується організацією EUREF, з присвоєнням їй відповідної назви – ETRF на відповідну епоху.

Для побудови ДГМ використовують атомний час.

На даний час на території України існують:

- пункти державної геодезичної мережі, систем координат СК-42, СК-63, УСК-2000;
- нові пункти в системі ETRF – 2000;
- пункти в місцевій системі координат.

Астрономічно-геодезична мережа 1-го класу будується у вигляді однорідної за точністю просторової геодезичної мережі, яка складається із системи рівномірно розміщених геодезичних пунктів, які віддалені один від одного на

50-150 км. Астрономо-геодезична мережа є вихідною основою для побудови нових геодезичних мереж, а також підвищення точності існуючих мереж з використанням методів супутникової геодезії.

Таблиця 8.1

Використання приймачів залежно від класу ДГМ

Клас ДГМ	Характеристика приймача	Примітка
1-ий	Двочастотні	З прецизійною антеною
2-ий	Двочастотні Одночастотні	За спеціальною програмою спостереження
3-ій	Двочастотні або одночастотні	

Таблиця 8.2

Тривалість супутникових спостережень на пунктах ДГМ

Клас ДГМ	Відстань між пунктами, км	Тривалість спостережень	Примітка
1-ий	150-300	5-6 діб	Пункти фундаментальної мережі
	50-150	1-3 діб	Пропорційно довжині вектора
2-ий	10-20	2,5 год.	Двочастотний приймач
	5-10	30 хв. - 1 год.	Двочастотний приймач (пропорційно довжині вектора)
	5-10	1-1,5 год.	Одночастотний приймач (пропорційно довжині вектора)
3-ій	2-10	15-30 хв.	Двочастотний приймач (пропорційно довжині вектора)
	2-10	20 хв. – 1 год.	Одночастотний приймач (пропорційно довжині вектора)

Геодезична мережа 2-го класу будується у вигляді однорідної за точністю просторово-геодезичної мережі, яка складається з рівномірно розміщених геодезичних пунктів існуючої геодезичної мережі 1-го та 2-го класів, які побудовані згідно положень «Про державну геодезичну мережу». Геоде-



зична мережа 2-го класу є вихідною для побудови геодезичної мережі згущення 3-го класу, а також геодезичних мереж спеціального призначення з використанням методів супутникової геодезії і традиційних класичних методів. Пункти геодезичної мережі 2-го класу розміщені на відстані 10 - 12 км. один від одного, а на території міських населених пунктів і великих промислових об'єктів 5 - 8 км.

Залежно від класу ДГМ використовуються різні типи супутникових приймачів геодезичного призначення (табл. 8.1), а спостереження тривають різний час (табл. 8.2).

## ***8.2. Поняття про мережі перманентних станцій та використання їх даних при супутникових спостереженнях***

Перманентна супутникова станція – станція, обладнана комплектом відповідного обладнання, що цілодобово веде спостереження супутників. Використання даних з перманентних станцій дозволяє збільшити точність проведених раніше супутникових спостережень, а перманентна станція, яка знаходиться достатньо близько до місця GPS-спостережень, може використовуватись як опорна (базова) точка при відносних методах визначення координат.

Перманентна GPS-станція має бути обладнана: GPS-приймачем, GPS-антенною, блоком безперервного живлення, персональним комп'ютером, що підключений до Інтернету в режимі on-line, метеорологічними інструментами (бажано).

Станція має задовольняти стандартним вимогам до геодезичних пунктів першого класу по стабільності, стійкості, довготерміновій підтримки, доступності тощо. Перешкоди видимості супутників з кутами більше  $15^\circ$  мають бути мінімальними. Місце розташування антени не повинне мати поруч джерел радіовипромінювання. Антена має бути захищена від проявів вандалізму. Бажано мати громовідвід.

Перманентні станції, що обслуговуються окремою органі-

зацією або дані з яких надходять в єдиний центр обробки даних супутникових спостережень, утворюють мережу перманентних станцій.

Так, наприклад, міжнародна GPS служба IGS, яка була заснована у 1991 році Міжнародним геодезичним та геофізичним союзом (IUGG) як наукова організація для уніфікації міжнародних стандартів баз даних GPS вимірювань і їх аналізу та опрацювання має глобальну мережу перманентних GPS-станцій. Особливо щільною ця мережа є на території Європи (рис. 8.1).

Першочергова мета IGS полягає в тому, щоб зробити результати спостережень зі своїх станцій загальнодоступними для всіх користувачів, які використовують їх для високоточних геодезичних та геофізичних робіт. Вся необхідна інформація розміщена на веб-сторінці Центрального Бюро IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov>). Тут розміщено у заархівованому виді бази даних результатів вимірів систем GPS і GLONASS.

Ці бази даних включають:

- результати спостережень на всіх перманентних станціях;
- ефемериди GPS і GLONASS супутників;
- параметри обертання Землі і руху полюса;
- координати та швидкості руху перманентних станцій;
- інформацію про поправки атомних годинників супутників і перманентних станцій;
- оцінку зенітної тропосферної затримки;
- глобальні іоносферні карти.

Бази даних IGS підтримують наукові дослідження, спрямовані на:

- удосконалення та поширення систем координат ITRF;
- контроль деформацій Земної кори;
- дослідження змін топографії світового океану;
- вивчення обертового руху Землі;
- уточнення орбіт ШСЗ;
- контроль стану тропосфери та іоносфери.



Рис. 8.1. Мережа станцій IGS в Європі

В Україні також існує ряд проектів, що розвиваються різними організаціями і мають на меті забезпечення користувачів даними супутникових спостережень як в режимі реального часу, так і в режимі постопрацювання.

Першим науково-технічним проектом в Україні, направленим на побудову локальної мережі активних референцних станцій, стала розробка науковців Головної астрономічної обсерваторії з реалізації регіональної системи геодинамічного та екологічного моніторингу Криму ще у 2002 р. Нажаль, він мав лише теоретичне значення. Потім був ще цілий ряд інноваційних проектів у цьому руслі від Академії наук України та інших наукових центрів. Їхня доля аналогічна - до практичних реалізацій справа не дійшла.

Перші практичні результати у цьому напрямі були отримані науковцями акціонерного товариства «АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань» у рамках проектування системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України. Ними, на основі розроблених контрольно-коректувальних станцій, були проведені експериментальні роботи з формування та передачі користувачам широкозонної диференційної коректувальної інформації у режимі реального часу.

Основною метою цих робіт було забезпечення, при створенні мережі зазначених станцій на всій території України, точності координатних визначень у межах 1-3 м. У подальших планах було досягнення і геодезичної точності як для післясеансного опрацювання (post-processing) даних супутникових спостережень, так і для режиму реального часу RT. На теперішній час розгорнуто вже 17 контрольно-коректувальних станцій із 57 запланованих «Концепцією створення та експлуатації системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України з застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем на період 2006-2011 рр.

Ще одним проектом у галузі побудови локальної мережі

активних референціальних станцій є Регіональна система високоточних супутникових геодезичних вимірювань від компанії "Навігаційно-геодезичний центр" (м. Харків). Ця система має виражену практичну направленість і є поки що лише сукупністю постійно діючих базових GPS-станцій, розташованих на території Харківської та Київської областей, але не мережею у її теперішньому розумінні.

Аналогічні сукупності станцій чи окремі станції створені чи плануються створити і на території інших областей.

Закарпатська служба визначення положення – ZAKPOS (Transcarpathian Positioning Service) розпочиналася у вигляді проекту встановлення однорідної базової інфраструктури диференційного GNSS (Global Navigation Satellite System – глобальна навігаційна супутникова система, ще одна абревіатура, яка на відміну від GPS означає будь-яку систему) – DGNSS на території Закарпатської області, але в подальшому зусиллями зацікавлених організацій об'єднала в собі ряд інших перманентних станцій Західної України (рис. 8.2).

*Таблиця 8.3*

Можливості роботи станцій мережі ZAKPOS

Послуга ZAKPOS	Метод	Передача даних	Точність	Обладнання
NAW	DGPS	GPRS Internet	0,5-1м	L1, DGPS, GSM-модем
RTK	RTK	GPRS Internet	0,03- 0,05м	L1+L2, RTK, GSM-модем
GEO	Статика	Internet/CD	мм-см см-дм	L1+L2, L1

За своєю суттю це регіональна GNSS система наземного базування, що повністю створювалася за європейськими стандартами EUPOS і направлена на забезпечення GNSS даними спостережень та поправками до них в реальному часі (RTK) для високоточного визначення місцеположення. Дані з цієї мережі доступні за адресою <http://82.207.45.245/>.

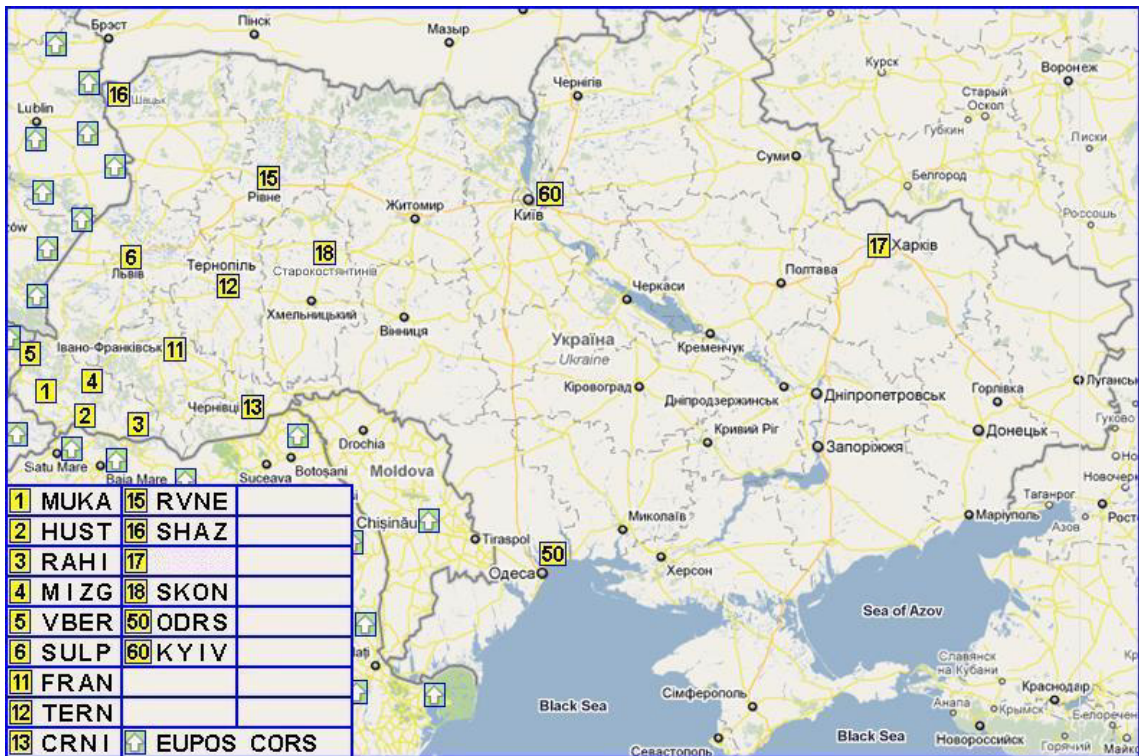


Рис. 8.2. Мережа активних перманентних станцій ZAKPOS

На кінець 2009 р. мережа референцних станцій ZAKPOS повністю ввійшла у робочий режим (7 днів/24 год.) із всіма можливими сервісами. У табл. 8.3 наведено різні варіанти роботи від мережі ZAKPOS.

## Тема 9. Методи визначення координат при GPS-вимірюваннях

### 9.1. Загальний принцип визначення координат точки за допомогою GPS-вимірювань

Розглянемо загальний принцип визначення координат точки з використанням GPS-вимірювань (рис. 9.1).

Нехай ми вимірюємо віддалі від трьох супутників до точки  $P$  на земній поверхні в певний момент часу. Тоді використовуючи систему рівнянь

$$D_{pi} = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2}, \quad (9.1)$$

$$i = \overline{1,3}$$

де  $i = 1 \dots 3$ .

Знаючи координати супутників  $x_i, y_i, z_i$  та псевдовіддалі  $D_{pi}$  можна визначити координати точки  $P$ .

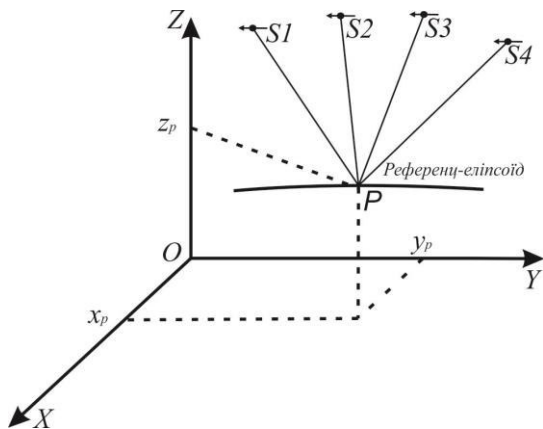


Рис. 9.1. Визначення координат точки при GPS-вимірюваннях

При передачі радіосигналу із супутника до приймача фіксується час: початку сигналу на супутнику та отримання

його приймачем на земній поверхні. Якби годинники були синхронізовані, то для визначення координат достатньо було лише три супутники. Проте насправді синхронізувати їх неможливо, тому необхідно враховувати і четверту координату – часову. Розв’язок системи з чотирма невідомими потребує чотири рівняння, а, отже, і спостереження чотирьох супутників.

Використовуючи рівняння (9.1), запишемо значення псевдовіддалі у вигляді рівняння, в якому є чотири невідомі:  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  та  $\Delta t_\omega$

$$\rho_i^2 = (D_i + v\overline{\Delta t_\omega})^2, \quad (9.2)$$
$$i = 1, 4$$

де  $v$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі. Для розв’язання такої системи необхідно виміряти мінімум чотири псевдовіддалі до чотирьох супутників. Але на практиці є більша кількість виміряних псевдовіддалей (5, 6 і більше супутників), що призводить до отримання більш точного результату за менший проміжок часу.

Тривалість спостережень відіграє важливу роль для підвищення точності GPS-вимірювань. Більша кількість розв’язаних рівнянь впродовж часу виконання спостережень дає можливість отримати середнє значення та зменшити величину похибки. З розвитком ГНСС з’явилися інші технічні та математичні методи, а також прийоми, які дозволяють отримати бажаний результат за більш короткий період спостереження.

## ***9.2. Класифікація методів та технологій визначення координат за допомогою GPS-вимірювань***

За призначенням супутникові вимірювання діляться на:

- навігаційні (використовуються, як правило, на кораблях, літаках, автомобілях, інших видах транспорту та рухомих об’єктах). Вони не відрізняються великою точністю (субметрова точність), але безперервно визначають положення



транспорту, швидкість та напрямок його руху;

- геодезичні – використовуються для визначення координат фіксованої точки або лінії (пункти опорних мереж, меж земельної ділянки, інженерних споруд тощо) на місцевості з необхідною точністю.

Надалі ми будемо розглядати тільки геодезичні вимірювання.

Ці вимірювання за способом реалізації поділяються на абсолютний та відносні (диференціальні).

У абсолютному методі приймач визначає координати і час, отримуючи сигнали супутників, незалежно від інших приймачів. Оскільки при абсолютному методі точність вимірювань має субметрову точність, то в геодезичних вимірюваннях він практично не використовується.

В відносних (диференціальних) методах використовуються не менше двох приймачів, які вимірюють псевдовіддалі. При цьому один приймач, як правило, знаходиться на точці з відомими координатами. Його прийнято називати «базовим», а точку «базовою». Другий приймач знаходиться на точці, координати якої необхідно визначити. Такий приймач називають «роверним», а точку «роверною», або точкою знімання.

Диференціальні і відносні методи часто ототожнюють, оскільки виконуються вони однаково. Проте між цими методами є ряд відмінностей. У відносних методах базова точка встановлюється на пункті з відомими координатами (пункт ДГМ, перманентна станція тощо), а у диференціальних методах базовий приймач встановлюється на точку з невідомими координатами. Таким чином відрізняється і опрацювання даних. В відносних методах на основі базової точки з відомими координатами визначаються поправки, що враховуються при підвищенні точності роверних. А у диференціальних як базова, так і роверні точки обчислюються одночасно, взаємно підвищуючи точність визначення координат. Диференціальні методи використовуються рідше в основно-

му для створення пунктів ДГМ 1-го класу, наукових спостережень та при відсутності поблизу пунктів з відомими координатами. При визначенні координат точок диференціальні методи потребують більше часу ніж відносні (Насправді ці терміни не відображають повністю розмежування методів і потребують удосконалення).

До абсолютного методу належить «Статика» (за умови використання одного приймача).

До відносних (диференціальних) знімачь відносяться: «Статика», коли використовуються два і більше приймачі одночасно, «Швидка статика», «Кінематика», «Стій-іди», «Псевдостатика» та «Псевдокінематика» (рис. 9.2).



Рис. 9.2. Класифікація методів GPS-вимірювань

Відносні (диференціальні) методи за опрацюванням даних можуть бути реалізовані двома способами – з постопрацюванням та в режимі реального часу RT (стара назва RTK – Real Time Kinematic, оскільки спочатку він реалізовувався лише для кінематичного методу).

При постопрацюванні результати GPS-вимірювань опрацьовуються після завершення вимірювань, коли дані імпортуються з обох приймачів у спеціальні програмні продукти.

Диференціальні методи в реальному часі – це методи, коли координати визначаються безпосередньо під час спостережень. При цьому суттєво скорочуються затрати і час знімання, а також з'являється можливість виконувати інженерно-геодезичні задачі, що недоступні в режимах з постопрацюванням. Наприклад, виносити точки в натуру, визначати відстані, перевищення, тощо.

Порівняно з методами постопрацювання, RT вимагає додаткового обладнання. Роверний та базовий приймачі повинні бути обладнані радіомодемами або GSM-модемами. Також існує можливість результати спостережень базового приймача безперервно транслювати в мережу Internet.

Технологія вимірювання RT схожа до методів з постопрацюванням.

Розв'язання задачі з визначення координат з геодезичною точністю відбувається в контролері роверного приймача. При цьому диференційні поправки з базового приймача на роверний передаються наявними засобами зв'язку. На екрані контролера відображаються опрацьовані координати і таким чином в реальному часі геодезист отримує точні координати.

Для спрощення будемо ототожнювати диференціальні методи з відносними, оскільки за виконанням вони ідентичні. Тож розглянемо детальніше диференціальні (відносні) методи GPS-вимірювань.

### **9.3. Диференціальні (відносні) методи GPS-вимірювань**

Диференціальний режим GPS-вимірювання є найбільш ефективним для максимального врахування похибок. Він заснований на використанні як мінімум двох приймачів – базового та роверного. Оскільки відстань від ШСЗ до приймачів набагато більша за відстань між самими приймачами, то вважають, що умови приймання сигналів обома приймачами практично однакові.

Тому в диференціальному режимі визначають не абсолютні координати роверного приймача, а його положення відносно базового (вектор бази, або базової лінії).

Одна з особливостей диференціального режиму – це необхідність передачі диференціальних поправок від базового приймача до роверного.

При цьому розрізняють два методи коригування інформації:

1. Метод корекції координат, коли на базовій і роверній точках спостерігаються одні і ті ж ШСЗ, а потім в якості диференціальних поправок передаються з базової точки на роверну. Недоліком цього методу є необхідність спостереження обома приймачами однакових супутників.

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

При використанні диференціальних методів замість базового приймача (або доповнення до нього) можуть використовуватись дані з перманентних станцій.

Диференціальні методи прийнято поділяти на статичні і кінематичні.

#### 9.4. Статичний метод

Статичний метод (Static) – це класичний метод GPS-вимірювань. Приймачі проводять вимірювання на точках впродовж часу, який залежить від заданої точності та віддалі між пунктами (табл. 9.1). Статичний метод дозволяє проводити вимірювання на лініях довжиною більше 20 км. При цьому забезпечується міліметрова точність. Цей метод використовується при високоточних геодезичних вимірюваннях.

Таблиця 9.1

Орієнтовна тривалість вимірювань в статичному режимі

Кількість супутників GDOP < 8	Наближена довжина базових ліній	Приблизний час вимірювань	
		вдень	вночі
4 і більше	15-20 км.	1-2 год.	1 год.
4 і більше	Більше 30 км.	2-3 год.	2 год.

Тривалість вимірювань при високоточних вимірюваннях також залежить від задач, які розв'язуються. Наприклад: 30-90 хв. – для локальних територій; 1-2 доби – для пунктів, які віднесені до державної або геодинамічної мережі; 4-6 діб – для континентальних і основних геодинамічних вимірювань.

Статичний метод застосовується при геодезичному контролі національних і континентальних мереж, моніторингу тектонічних рухів, вимірюванні деформацій дамб та інших структур, побудові геодезичних мереж. Його перевагою є те, що він більш ефективний і економічний порівняно з традиційними геодезичними методами, а недоліком – тривалий час спостережень на пункті.

#### 9.5. Визначення координат методом «Швидкої статика»

«Швидка статика» (Fast Static) – похідний від статичного метод вимірювань. Він використовується на коротких базових лініях (бажано до 20 км). При нормальних умовах спо-

стереження час роботи роверного приймача може бути зменшений до 5-20 хв. Звідси і назва «Швидка статика».

При цьому базовий приймач має працювати безперервно протягом всієї сесії вимірювань, а також приймачі повинні отримувати сигнали однакових супутників.

Варто відзначити, що базовий приймач безпосередньо в зніманні місцевості участі не бере, а використовується лише для визначення диференціальних поправок і передачі їх для обчислення координат роверних точок.

«Швидка статика» використовується для топографічного знімання. Якщо порівнювати «Швидку статистику» із методом «Стій-іди», то вимірювання відбуваються в 1,5-2 рази повільніше, проте дають більш точні результати.

### **9.6. Кінематичний метод**

Кінематичний метод (Kinematic) застосовується для визначення траєкторій рухомих об'єктів. Для виконання вимірювань цим методом також використовуються мінімум два приймачі – базовий та роверний. Базовий приймач проводить вимірювання безперервно на одній точці, а рухомий приймач знаходиться на транспортному засобі, платформі, або ручній штанзі. При цьому визначаються не координати точки, а вектори руху приймача.

Метод застосовується при визначенні траєкторій рухомих об'єктів; зніманні ліній доріг; меж, гідрографічному зніманні, тощо. Перевага методу полягає у швидкості та економічності безперервних вимірювань. Проте приймачі повинні безперервно отримувати сигнали супутників, а точність вимірювань є на порядок меншою від статичних методів.

Робота роверного приймача ділиться на 2 етапи:

1. Етап ініціалізації, який необхідний для того, щоб розв'язати початкові невизначеності;
2. Мобільний етап, в рамках якого і виконуються спостереження.

Ініціалізація та наступна за нею мобільна частина називається

ваються ланками режиму «Кінематика». Ініціалізація може виконуватись в режимі «Швидка статика», або встановленням приймача на точці з відомими координатами.

Під час вимірювань повинно спостерігатися не менше, ніж 4 супутники.

Таблиця 9.2

Умови для спостереження методом кінематики

Можливість використання методу	К-сть супутників, їх висота над горизонтом, GDOP
Добрі умови	5 і більше супутників, підняття над горизонтом, за можливістю, більше $20^0$ , GDOP < 5
Не рекомендується використовувати	4 супутники, GDOP > 8
Використовувати неможливо	3 супутники або менше

### 9.7. Метод «Стій-іди»

Метод «Стій-іди» (Stop&Go) є похідним від кінематичного методу. Як і при кінематичному методі, базовий приймач постійно знаходиться на одній точці, а роверний зупиняється на кожній точці знімання на декілька хвилин (1-5 хв.) і рухається до наступної, не втрачаючи сигналів супутників. Саме тому цей метод є найшвидшим для детального знімання місцевості.

На відміну від кінематичного методу, в режимі «Стій-іди» вимірюються не траєкторія руху, а точки місцевості.

Метод застосовується при детальному зніманні місцевості, інженерних зніманнях, зніманні доріг, шляхопроводів, меж, зніманні точок, які знаходяться близько одна від одної.

Перевагами методу є те, що він швидкий та економічний. Недоліки: при зніманні даним методом горизонт повинен бути завжди відкритим; сигнал супутника не повинен втрачатися при переході між знімальними точками, точність вимірювань менша, ніж при швидкому статичному методі. Цей метод складно застосовувати на забудованих територіях та у лісах.

## **9.8. Псевдостатична, псевдокінематична та реокупаційна технології**

Ці методи усувають деякі недоліки класичних методів («Швидка статика», «Стій-іди»), проте є більш складними у технології виконання та опрацювання даних.

Вони базуються на подвійному GPS-вимірюванні на кожному пункті, координати якого визначаються, і не вимагають постійного неперервного зв'язку із супутниками під час транспортування приймачів із пункту до пункту. Під час вимірювань беруть участь щонайменше 2 приймачі, одночасно може працювати декілька рухомих приймачів. При цьому необхідно розрахувати маршрути так, щоб усі приймачі переміщались одночасно і всі рухомі приймачі повинні починати спостереження на нових пунктах одночасно. Вимірювання на кожному пункті триває 10-15 хв.

На останньому пункті маршруту, координати якого визначаються, чекають 1-2 години на зміну конфігурації супутників і заново виконують GPS-вимірювання на пунктах маршруту в оберненій послідовності. Це подвійне вимірювання замінює процес ініціалізації.

Цими методами, при застосуванні високоточних двочастотних приймачів, досягається точність визначення вектора до 10 мм, а точність визначення координат становить 3 см в плані і 4 см для висот.

## **Тема 10. Планування та проведення геодезичних вимірювань з використанням GPS-приймачів**

### **10.1. Загальний порядок, специфіка планування і організація робіт при супутникових вимірюваннях**

GPS-вимірювання значно відрізняються від геодезичного знімання класичними методами внаслідок того, що вони не залежать від погодних умов та вимоги прямої видимості між пунктами. Але GPS-вимірювання залежать від інших факторів, не притаманних класичним методам: конфігурації та кількості супутників на небосхилі, наявності перешкод, що перебивають сигнали супутників, тощо.



Технологія виконання геодезичних робіт із застосуванням GPS-технологій включає наступні етапи (залежно від завдання та складності робіт деякі етапи можуть виконуватись не в повному обсязі, або взагалі не виконуватись):

- складання проекту геодезичних робіт на об'єкті на основі технічного завдання;
- отримання дозволів на роботу на режимних, приватних об'єктах та на роботу радіостанцій (при потребі);
- передпольове планування робіт в камеральних умовах та польове рекогностування;
- підготовка обладнання до польових вимірювань;
- організація базових станцій (в тому числі і отримання доступу до найближчої перманентної станції);
- закладання центрів (тимчасових точок);
- польові вимірювання;
- камеральне опрацювання результатів вимірювань;
- складання технічного звіту, та оформлення необхідної документації.

Далі детальніше розглянемо основні пункти.

### ***10.2. Складання технічного проекту***

Технічний проект складається на підставі технічного завдання. Робота над технічним проектом розпочинається зі збору матеріалів про раніше виконані на об'єкті геодезичні роботи. У процесі збору матеріалів повинні бути отримані наступні відомості:

- виписки з каталогів координат і висот пунктів, які можуть бути використані в якості вихідних в проектній мережі;
- абриси і картки закладки існуючих пунктів;
- витяги зі звітів раніше виконаних робіт, особливо що стосуються оцінки точності вихідних пунктів;
- детальна інформація про системи координат і висот, які застосовуються на об'єкті робіт.

Також проводиться збір та систематизація картографічних (топографічних) матеріалів відповідного масштабу на об'єкті робіт. На карти наносяться розташування всіх існуючих пунктів, які передбачається включити в процес вимірювань.

При цьому необхідно оцінити ці пункти відповідно до нормальних умов супутникових вимірювань.

При виборі методу побудови мережі необхідно враховувати можливість досягнення необхідної точності вимірювань, технологічні можливості використання саме цього методу при даних умовах, оптимізацію затрат часу, обладнання та людських ресурсів.

При виборі місця розташування базової станції або запроєктованого пункту для супутникових вимірювань необхідним є дотримання наступних вимог:

- 1) Забезпечення оптимальних умов вимірювань;
- 2) Відсутність поблизу пункту (до 1-2 км) потужних джерел електромагнітного випромінювання (теле- і радіопередавачі і т. п.);
- 3) Більша частина горизонту навколо пункту не повинна мати перешкод вище  $15^\circ$ ;
- 4) Забезпечення довготривалого збереження центру;
- 5) Забезпечення зручного під'їзду, доступу до пункту в будь-який час, незалежно від погодних умов.

При можливості необхідно використовувати існуючі пункти ДГМ, якщо вони відповідають вищенаведеним вимогам. Остаточне рішення про вибір місця розташування базової точки (пункту) приймається після виконання польового рекогносрування.

У проекті визначається орієнтовне місце розташування роверних точок. До роверних станцій висуваються підвищені вимоги у забезпеченні оптимальних умов вимірювань та переміщень між станціями (в кінематичних методах), оскільки точність вимірювань найбільше залежить від роботи роверного приймача (за умови правильності встановлення базового).

Графічна частина проекту складається на картах із зазначенням місця розташування вихідних пунктів, зв'язків між пунктами, місця розташування роверних точок.

Заключним етапом розробки технічного проекту є складання пояснювальної записки, яка повинна містити такі відомості:

1) Обґрунтування технічного проекту (на основі технічного завдання):

- нормативні документи, що використовуються;
- геодезична вивченість об'єкта робіт;
- фізико-географічна характеристика об'єкта робіт;

2) Раніше виконані роботи:

- найменування пунктів геодезичного обґрунтування, назви робіт;

- найменування організацій, які виконували роботи;
- рік виконання;
- оцінка точності;
- системи координат і висот;

3) Запроектвані роботи:

- системи координат і висот, що використовуються в процесі робіт;

- програма виконання робіт з обґрунтуванням обраної схеми і методів вимірювань;

- технологія виконання робіт з детальним викладом порядку і часу виконання та здачі робіт;

4) Кошторис витрат на запроектвані роботи та терміни їх виконання.

Складання технічного проекту неможливе без передпольового планування в камеральних умовах та рекогностування на місцевості.

### ***10.3. Передпольове планування в камеральних умовах***

Визначальним фактором при проведенні планування є необхідність досягнення заданої точності визначення місцеположення. Для високоточних вимірювань першого та другого класу планування GPS-вимірювань є обов'язковим. Для вимірювань 3-4 класу бажано проводити планування, особливо якщо територія вимірювань характеризується значною забудовою, лісистістю або наявністю перешкод іншого характеру. Для вимірювань технічного класу планування, як правило, не проводять.

При оптимальному плануванні GPS-вимірювань обов'язково слід враховувати такі параметри, як: конфігурація та кількість

пунктів, конфігурація та кількість супутників, кількість та тип приймачів, економічні фактори, підготовку обладнання до вимірювань.

Планування також має включати в себе врахування (або вибір) методу вимірювань та можливості опрацювання даних вимірювань. Коротко переглянемо кожний з перелічених параметрів.

Від конфігурації та кількості пунктів, а також типу приймача залежить тривалість вимірювань. Для вирахування положення пунктів на місцевості вимірювань використовують дрібномасштабні карти.

На основі цих даних оцінюють можливості використання транспорту, маршрут вимірювань, вибір методу вимірювань, вибір місця для базової станції, можливу кількість роверних точок, наявність та відносне розташування перешкод та інші фактори, які дадуть можливість оцінити час, затрати, необхідне обладнання та точність вимірювань.

Конфігурація та кількість супутників є визначальними для оцінки точності та можливості проведення вимірювань в даний момент часу на даній території.

Економічні фактори впливають на собівартість геодезичних робіт. Їх аналіз дозволяє одночасно здешевити і спростити ці роботи, не впливаючи на досягнення необхідної точності.

Підготовка обладнання для вимірювань також має важливе значення, оскільки воно є основним засобом виробництва при виконанні геодезичних робіт. Значення мають не тільки його метрологічна справність, наявність необхідної документації, тощо, але й такі елементарні речі, як заряд акумуляторних батарей, наявність вільної пам'яті для запису даних вимірювань, нормальна робота засобів зв'язку і т.д.

#### ***10.4. Підготовка обладнання до польових вимірювань***

##### ***10.4.1. Вимоги до GPS-приймачів***

Загальною вимогою до приймачів, що застосовуються в топографо-геодезичному виробництві, є можливість виконання як кодових, так і фазових вимірювань.

При виконанні високоточних робіт необхідно використовувати двочастотні приймачі, що дозволяють за рахунок вимірювань на двох частотах підвищити надійність і точність визначення векторів. На коротких лініях (до 15 км) допускається використання одночастотних приймачів, адже вплив іоносфери на кінцях вектора однаковий і враховується в процесі опрацювання.

Число незалежних приймальних каналів приймача має бути не менше чотирьох.

Об'єм пам'яті для запису супутникових вимірювань та можливості акумуляторних батарей підтримувати обладнання в робочому стані повинні відповідати вимогам обраного методу вимірювань.

#### ***10.4.2. Метрологічне забезпечення***

Перед застосуванням в геодезичних вимірюваннях супутникові приймачі повинні пройти метрологічну атестацію та отримати «Свідоцтво про метрологічну перевірку вимірювального засобу».

Виконання метрологічних робіт для атестації GPS-спостережень здійснюється відповідно до Закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність", основними стандартами за видами робіт яких є:

1. ДСТУ 3215-95 "Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація й порядок проведення";
2. ДСТУ 2708:2006 "Метрологія. Перевірка засобів вимірювальної техніки. Організація й порядок проведення";
3. ДСТУ 3989-2000 "Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів";
4. ДСТУ 3400-2005 "Метрологія. Державні випробування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення і розгляду результатів".

Також використовуються наступні інструкції для метрологічної атестації приймачів:

МПУ 053/01-2003 Інструкція. Метрологія. Приймачі GPS одночастотні геодезичного призначення. Методика повірки.

МПУ 053/02-2003 Інструкція. Метрологія. Приймачі GPS на дві частоти геодезичного призначення. Методика повірки.

Приймачі під час проведення державної атестації проходять випробування з метою встановлення придатності для виконання відносних координатних визначень. Повіряються комплект приймачів та додане програмне забезпечення. Методика повірки базується на використанні еталонного базису.

Повірку виконують в такому порядку

1. Виконують зовнішній огляд, перевіряють комплектність і працездатність приладу (перевіряють справність перемикачів і кнопок, збереження пояснювальних написів, цілісність зовнішніх оболонок кабелів, чистоту контактів на роз'ємах, стан штатних акумуляторів та зарядних пристроїв).

2. Визначають похибки вимірювання лінійних базисів залежно від тривалості вимірювань у статичному методі.

3. Визначають похибки вимірювань лінійних базисів в кінематичному методі.

4. Визначають похибки вимірювання приростів координат у статичному методі за нев'язкою в замкнутих фігурах.

5. Визначають похибки вимірювань координат в режимі реального часу (RT).

Перед початком перевірки необхідно вивчити Інструкцію користувача приймача, що перевіряється, правила експлуатації, технологію виконання геодезичних робіт, рекомендовану фірмою-виробником.

#### ***10.4.3. Перевірка працездатності приймачів безпосередньо перед вимірюваннями***

Перед виїздом на польові роботи необхідно перевірити комплектність станцій (базової та роверної) і працездатність окремих вузлів. В комплект станції повинні входити:

- GPS-приймач з антеною;
- контролер;
- штатив (для роверного приймача - штанга);
- акумулятори та зарядний пристрій;

- флеш-пам'ять;
- сполучні кабелі;
- перехідники;
- підставка;
- становий гвинт;
- мірна стрічка або рейка;

Особливу увагу необхідно звернути на заряд акумуляторних батарей та обсяг вільної пам'яті на відповідних носіях.

Крім самого комплекту GPS-приймачів, необхідно мати:

- комплект для вимірювання метеорологічних параметрів: термометр, барометр, психрометри (при необхідності, якщо того вимагає програма вимірювань);
- радіостанції (при необхідності).
- карти, абрисы, схеми маршрутів;
- розклад вимірювань і маршрути пересування між пунктами, а при наявності власного транспорту перед від'їздом необхідно пройти щоденний ТО автомобіля;
- польові журнали встановленого зразка;
- олівці, ручки, папір;
- прапорці, фарбу, кілки, молоток, попереджувальні сигнали.

Якщо програмою робіт передбачається польове опрацювання даних в режимі RT, до складу обладнання повинні входити:

- радіомодеми або інші засоби зв'язку базового, роверного приймачів та комп'ютера;
- комп'ютер з програмним забезпеченням для опрацювання супутникових вимірювань;
- комплект необхідних сполучних кабелів;
- блок живлення від стаціонарної мережі;
- ключова дискета до програмного забезпечення (або електронний ключ).

#### ***10.4.4. Організація базових станцій (в т.ч. отримання доступу до найближчої перманентної станції)***

Після складання технічного проекту, але перед початком польових робіт проводять польове рекогностування з метою уточнення окремих положень технічного проекту. В результаті рекогностування остаточно вибираються місця розташування

станцій – базової та роверних, узгоджується схема мережі і вирішуються організаційно-технічні питання.

Отже, основні вимоги до базової та роверних станцій:

1. Під час GPS-вимірювань повинна забезпечуватись одночасність спостереження всіма приймачами.

2. Доступ до станцій та розміщення апаратури на ній мають бути максимально зручними.

3. На місці встановлення штатива повинна забезпечуватись його стійкість на період часу вимірювань, крім того, повинна забезпечуватись достатня якість центрування антени над точкою вимірювань.

4. Необхідно, щоб біля станції спостереження були відсутні перешкоди, що перекривають небосхил на кут понад  $20^\circ$ .

5. Необхідно, щоб поряд були відсутні відбиваючі поверхні: водні поверхні, дерев'яні та металеві конструкції, стіни будинків тощо.

6. При використанні кінематичних методів вимірювань необхідно ретельно перевірити станції і маршрути пересування між ними для забезпечення постійного захоплення сигналу від 4-х супутників і відсутності перешкод. При наявних на шляху руху непереборних перешкод (мости, тунелі), по обидва боки перешкоди повинні бути запроектовані пункти для повторної ініціалізації мобільного приймача.

Якщо є можливість, то в якості базової станції використовують дані спостережень перманентної станції за даний період часу.

Дані спостережень перманентних станцій зберігаються на спеціальних серверах і, як правило, в кількох форматах (в тому числі у форматі RINEX). Дані спостережень перманентних станцій отримують через мережу Інтернет. Інформація може бути відкритою для будь-якого користувача і платною. Однак навіть отримання платної інформації може бути більш економічно вигідним, ніж використання власної базової станції.

#### ***10.4.5. Закладання центрів (тимчасових роверних точок)***

При неможливості встановлення приймача безпосередньо на пункті (велика кількість перешкод, відбиваючих поверхонь



тощо) необхідно вибрати місце розташування станції (або декількох станцій) з оптимальними умовами вимірювань для виконання позацентрового встановлення приймача. Обраний спосіб виконання позацентрового встановлення повинен забезпечувати точність проекрованої мережі.

В цьому випадку поряд із супутниковими використовуються також наземні вимірювання, а також використовуються додаткові прилади та матеріали. В результаті виконують зрівноваження спільних спостережень.

#### ***10.4.6. Ведення польового журналу***

Журнал спостережень повинен містити наступну інформацію:

- назву пункту спостереження і його умовне позначення;
- прізвище оператора;
- серійні номери і марки основних видів апаратури;
- висота антени над пунктом;
- час початку і кінця спостережень;
- номери супутників і їх положення;
- приблизні координати положення станції;
- примітки.

В більшості GPS-приймачів всю інформацію можна вводити безпосередньо з контролера.

Під час виконання вимірювань приймач здійснює не тільки реєстрацію виміряних величин та іншої допоміжної інформації, але й виконує цілий комплекс обчислень. Ці обчислення виконуються відповідним програмним забезпеченням приймача.

Проте деяку інформацію записують також на папері (комп'ютері), та (або) фотографують. Для кожної станції на місцевості рисується абрис з описом місця розташування і прив'язкою його до місцевих предметів, кожній станції присвоюється індивідуальний номер (назву) та код. Якщо на пункті є перешкоди для вимірювань, проводиться їх знімання зі складанням схеми перекриття горизонту.

## 10.5. Програми планування GPS-вимірювань

Одним із найважливіших факторів при плануванні є визначення кількості та конфігурації супутників у чітко визначений проміжок часу на певній території. Такий розрахунок стає можливим при застосуванні теорії руху супутників. Для полегшення розрахунків створені відповідні програмні продукти. Вихідними даними для такого розрахунку є дата, час і наближені координати об'єкта вимірювань.

При введенні часу (часового проміжку) вимірювань необхідно обов'язково враховувати часовий пояс, в якому відбудуться вимірювання, а також поправку для декретного часу. Для виконання обчислень необхідно ввести координати точки спостережень з точністю до 1'. Якщо координати невідомі, то їх можна визначити з дрібномасштабних карт, або, при наявності доступу до Інтернету, за допомогою безкоштовної програми Google Earth.

В програмних засобах планування спостережень положення супутників на орбітах вираховується за параметрами орбіт, які містяться у файлах ефемерид (файлах альманахів). Важливо отримувати найновіші файли, оскільки параметри орбіт постійно змінюються.

Такі файли можна отримувати як безпосередньо з GPS-приймачів (наприклад, файл \*.eph в приймачах Trimble), так і з мережі Інтернет. В мережі Інтернет на серверах центрів обробки даних (наприклад, IGS) можна отримати файли ефемерид у різних форматах: \*.alm, \*.eph, \*.\*\*n, тощо.

Для зручності користувачів всі виробники включають в склад своїх пакетів програм спеціальну програму або модуль з планування GPS-спостережень. Наприклад, відомий виробник Trimble в пакеті Trimble Geomatics Office містить програму Planning; у виробника Leica модуль Satellite Availability; у Topcon Positioning Systems – Occupation Planning; в Thales Navigation в складі пакета програм Ashtech Solutions і т.д.

В результаті застосування таких програм ми можемо отримати всю необхідну інформацію про супутники: їх кіль-

кість, конфігурацію, висоту їх підняття над горизонтом, азимути, значення параметрів DOP, тощо. Така інформація може подаватись користувачу як в графічній, так і в табличній формі.

Таким чином, подібні програми допомагають ефективно, якісно і швидко провести планування GPS-спостережень.

## ***10.6. Складання технічного звіту та необхідної документації***

Після закінчення робіт замовнику готуються та здаються наступні документи:

- файл (файли) з результатами польових спостережень;
- польові журнали;
- абриси прив'язки станцій та перешкод;
- схема спостережень;
- список втрачених пунктів і реперів;
- пояснювальна записка.

Матеріали до здачі готуються відповідно до вимог нормативно-технічних документів.

## **Тема 11. Опрацювання даних GPS-вимірювань**

### ***11.1. Загальний порядок та завдання, що виникають при опрацюванні даних GPS-вимірювань***

Частково дані супутникових вимірювань опрацьовуються в контролері в польових умовах, проте подальше опрацювання виконується в комп'ютері із застосуванням спеціальних програмних продуктів.

Кожний виробник GPS-приймачів розробляє своє програмне забезпечення для опрацювання даних вимірювань та виконання прикладних задач. Проте всі програмні продукти мають спільні етапи опрацювання даних. Крім того, існує можливість опрацювання даних програмами різних виробників, використовуючи уніфікований формат файла – RINEX (Receiver Independent Exchange).

Основними етапами опрацювання даних GPS-вимірювань є:

1. Імпорт файлів з даними. Він можливий безпосередньо з приймача, або з раніше імпортованих даних вимірювань в сумісних форматах, або у форматі RINEX.

2. Опрацювання базових ліній. Базові лінії – це вектори, які утворені в результаті спільних синхронних супутникових спостережень на базовій та роверних точках. Опрацювання базових ліній – це процес врахування диференціальних поправок, що дає можливість при подальшому зрівноваженні покращити точність точок знімань. Диференціальні поправки залежать від методу спостережень та умов знімання (видимості супутників, їх кількості, неперервності їх спостереження обома приймачами та ще багатьма іншими факторами).

3. Після опрацювання базових ліній проводять зрівноваження. Зрівноваження спрямоване на отримання більш достовірних значень координат точок знімання на основі масивів вимірювань.

4. Перетворення координат точок в місцеву систему координат. В результаті такого перетворення встановлюється залежність між координатами точок в системі координат WGS-84, отриманими за допомогою GPS-приймачів, та місцевими координатами в обраній картографічній проекції. Вирахувані залежності (ключі перетворення) можуть використовуватись повторно.

5. Створення планів та карт на основі точок GPS-вимірювання або виготовлення інших моделей земної поверхні (наприклад, тривимірної), залежно від потреби, та виконання інших задач.

6. Експорт у формати інших програмних продуктів.

## ***11.2. Опрацювання даних GPS-вимірювань із застосуванням спеціальних програмних продуктів***

Опрацювання даних супутникових вимірювань, як правило, ведеться в рамках окремо створеного проекту. Він об'єднує в собі результати вимірювань на об'єкті, як супут-

никовими методами, так і класичними при їх наявності. В цьому проекті проходить повний цикл опрацювання даних – від імпорту до отримання кінцевих результатів для яких і виконувались геодезичні роботи на даному об'єкті.

При створенні проекту обов'язково вказують його параметри, характеристики та властивості, такі як одиниці вимірювання довжин, кутів, метеопараметрів, часовий пояс, референц-еліпсоїд, параметри перетворення систем координат, модель геоїда та багато інших.

Імпорт файлів з даними GPS-вимірювань виконується безпосередньо з приймача. Для імпорту даних GPS-вимірювань використовується спеціальний кабель, що з'єднує комп'ютер з приймачем (комп'ютер повинен бути оснащений відповідними портами або оснащенням), або карти пам'яті, які зчитуються комп'ютером. Будь-яке програмне забезпечення зчитує результати спостережень, як правило, тільки у двох форматах. Це спеціальний формат приймача фірми виробника і RINEX-формат.

При імпорті результатів вимірювань необхідно перевірити за польовими журналами спостережень наявність усіх вимірів, назви пунктів спостережень, висоти антени та фазового центру, елементи приведення фазового центру антени. При виявленні помилок їх виправляють.

При виконанні високоточних вимірювань існує можливість імпорту файлів точних (precise) ефемерид через мережу Інтернет. Слід пам'ятати, що такі точні ефемериди з'являються на серверах центрів опрацювання інформації через 1-6 діб після дня спостереження.

Опрацювання базових ліній ґрунтується на сумісному опрацюванні відкоригованих результатів спостережень на окремих станціях і визначенні приростів координат усіх можливих векторів базових ліній.

Опрацювання векторів може виконуватись наступними способами:

- визначення окремих базових ліній і їх об'єднання в ме-

режі;

- обчислення односеансних спостережень, проведених на багатьох станціях;

- сумісне опрацювання даних декількох сеансів спостережень.

Розв'язок векторів базових ліній отримують об'єднанням всієї одержаної у результаті вимірювань інформації (двочастотні, фазові, кодові та доплерівські спостереження). При цьому необхідно врахувати тропосферну та іоносферну затримки поширення супутникового сигналу. При розв'язку векторів програмним забезпеченням фірм виробників супутникової радіонавігаційної апаратури для врахування тропосферної та іоносферної затримок використовують стандартні моделі. Для тропосфери приймається модель Hopfield, для іоносфери – стандартна модель.

Розв'язок невизначеностей (врахування диференційних поправок) на векторах до 20 км виконується стандартними методами. Для векторів більшої довжини використовуються спеціальні методи (наприклад, Fara). Якщо програмний продукт не вибирає автоматично оптимальний метод розв'язку невизначеностей за вказаною наближеною довжиною вектора, то необхідно користувачеві вибрати його самостійно.

Критерієм достовірного визначення компонент вектора є розв'язок фазової невизначеності. У випадку нерозв'язання фазової невизначеності виконується детальний аналіз кількості супутників, до яких проводились виміри, та зміни величини GDOP. Якщо на початку або у кінці інтервала вимірювань кількість супутників, до яких проводились виміри, була недостатньою або параметр GDOP перевершував шість одиниць, то допускається коригування обсерваційного файла RINEX-формату шляхом вилучення початкових або кінцевих епох, які не задовольняють умовам вимірювань.

Якщо повторне опрацювання відкоригованого файла не дозволяє розв'язати фазову невизначеність, то точки підлягають повторним вимірюванням.

На основі опрацювання базових ліній відбувається зрівноваження мережі. Перед зрівноваженням мереж необхідно виконати перевірку розв'язаних векторів базових ліній на наявність недопустимих похибок. Для цього необхідно всі вектори включити в окремі трикутники і визначити нев'язки цих трикутників за приростами усіх координат. За нев'язками приростів координат визначається загальна нев'язка кожного трикутника за наступним виразом

$$\delta S = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2}, \quad (11.1)$$

де  $\delta x, \delta y, \delta z$  – нев'язки трикутника за відповідними координатами.

Загальноземні системи координат і моделі геоїда часто не враховують параметри регіональних систем при переході до прямокутної системи координат. Для вирахування цих параметрів програмні продукти можуть виконувати перетворення координат точок в місцеву систему координат.

Програмні продукти можуть виконувати перетворення координат пунктів з однієї геодезичної системи в іншу за відомими параметрами переходу між ними. Для цього у відповідному вікні програмного забезпечення необхідно ввести сім параметрів перетворення між системами координат і записати їх в окремий файл. Допускається визначення локальних параметрів перетворення із системи ETRS-89 у систему СК-42 (СК-63) на територію, охоплену мережею, і визначення за ними координат пунктів у системі СК-42 (СК-63).

Для визначення параметрів перетворення між системами координат ETRS-89 і СК-42 (СК-63) необхідно ввести координати як мінімум чотирьох вихідних пунктів у системі СК-42 (СК-63) у відповідне вікно програмного забезпечення. Як мінімум три пункти повинні охоплювати по периметру створену мережу, а четвертий пункт повинен знаходитись на території, покритій мережею. У відповідному вікні проводиться введення координат пунктів у системах координат ETRS-89 і СК-42 (СК-63) і проводиться обчислення параме-

трів перетворення та оцінка точності моделі трансформації. Обчислені параметри перетворення записують в окремий файл.

Подальше опрацювання даних проходить в тих межах, які необхідні для розв'язання поставлених задач. Це може бути опрацювання кодів елементів місцевості, інтерполяція, створення тривимірної моделі та виконання інших локальних задач.

Використання топокодів під час GPS-вимірювань може полегшити нанесення ситуації. Під час вимірювання на кожній точці присвоюється топокод, який відповідає за певний об'єкт або за межу на місцевості. В програмному продукті, використовуючи спеціальні бібліотеки, можна досить легко і швидко їх розшифрувати та нанести ситуацію. Теоретично топокоди (а також назви точок, що доповнюють їх) можуть замінити традиційний абрис, проте під час GPS-вимірювань виконувати його необхідно.

Крім того, існує можливість імпортувати окремі об'єкти до проекту та використати їх при створенні плану.

На будь-якій стадії опрацювання даних GPS-вимірювань існує можливість їх експорту в інші програмні продукти для подальшого використання.

Таким чином, використання автоматизації при опрацюванні даних GPS-вимірювань значно економить час працівників.

### ***11.3. Оцінка точності GPS-вимірювань***

Основними факторами, що впливають на точність визначення координат точок при GPS-вимірюваннях та причинами виникнення похибок є:

1. Кількість супутників, які спостерігає приймач під час знімання;
2. Геометрія супутників;
3. Тривалість спостереження;
4. Співвідношення "сигнал/шум" (SNR);



## 5. Вплив іоносфери (для одночастотних приймачів).

В основному ці фактори враховуються, проте повністю їх усунути не вдається.

Оцінка точності відбувається в програмних продуктах при опрацюванні базових ліній. При цьому інформацію про точність визначення базових ліній і точок можна переглянути, а при недостатній точності для користувача з'являється повідомлення. Оцінку точності можна провести і в ручному режимі.

Для досягнення необхідної точності при вимірюванні методами з подальшим опрацюванням рекомендується під час спостережень дотримуватись рекомендацій виробника щодо тривалості спостереження, максимального значення PDOP і SNR, маски відсічення супутників, місця встановлення базового та роверного приймачів тощо.

Для перевірки надійності визначення базових ліній в програмних продуктах використовуються стандартні характеристики оцінки точності, а саме:

1. Коефіцієнт дисперсії (reference variance – RV) або по-іншому дисперсія одиниці ваги (variance of unit weight) – безрозмірна величина, яка являє собою відношення апостеріорної  $\sigma_{apost}$  та апіорної  $\sigma_{apr}$  дисперсій, тобто отриманого значення дисперсії та очікуваного на основі зроблених припущень про рівень шуму. Ця величина характеризує, як процесор базових ліній оцінює очікувану похибку. Якби припущення про величину похибки були б точними, то коефіцієнт дорівнював би одиниці. Якщо він більший одиниці, то точність польових спостережень гірша від очікуваної, якщо менший одиниці – то краща:

$$RV = \frac{\sigma_{apost}^2}{\sigma_{apr}^2}; \quad (11.2)$$

2. Відношення дисперсій (ratio) – відношення дисперсії  $\sigma_2$  другого кращого фіксованого рішення до дисперсії  $\sigma_1$  першого кращого фіксованого рішення. Ця величина характери-

зує, наскільки добре процесор базових ліній визначає фіксоване рішення. У процесі вирішення невизначеності процесор отримує велику кількість можливих розв'язків та оцінює дисперсію кожного з них, за значенням якої виконується ранжування результатів. Щоб рішення приймалося фіксованим, необхідно, щоб найкраще рішення було принаймні у 1,5 рази краще від наступного кращого рішення. У загальному – чим більше значення відношення, тим краще:

$$Ratio = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}; \quad (11.3)$$

3. Середньоквадратична похибка СКП (Root Mean Square – RMS) – характеризує рівень шуму у вимірюваннях. Чим менше її значення, тим краще.

Рішення вважається успішним, якщо базова лінія опрацьована і стандартні характеристики оцінки точності знаходяться в наступних межах: відношення (ratio) більше 3, коефіцієнт дисперсії (RV) менше 5 та СКП (RMS) менше 0,02 м. Якщо хоча б одна із перерахованих умов не виконується – вважається, що рішення отримане з недостатньою точністю і отримане значення не використовується.

## II. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Метою лабораторних робіт є закріплення студентами теоретичного матеріалу з дисципліни, який висвітлюється в теоретичній частині та при самостійному опрацюванні інформації з інших джерел.

В даному курсі лабораторні роботи охоплюють теоретичний матеріал з питань застосування систем координат та часу, орбітального руху і параметрів орбіти, а також практичного застосування глобальної позиційної системи GPS при визначенні координат точок земної поверхні різними методами для забезпечення землепорядних та кадастрових робіт.

### Лабораторна робота № 1

**Тема: Перетворення координат точки в різних системах координат**

**Мета:** Вивчити основні системи координат, що використовуються в супутниковій геодезії, та навчитися перетворювати координати точки з геодезичної в прямокутну референцну систему координат і навпаки.

*Теоретичний матеріал*

Положення точок на фізичній поверхні Землі щодо референц-еліпсоїда задаються просторовими геодезичними координатами  $B, L, H$ .

Для довільної точки  $M$  на фізичній поверхні Землі геодезична широта  $B$  – кут між площиною екватора і нормаллю до еліпсоїда в точці  $M$ ; геодезична довгота  $L$  – двограний кут між площинами початкового геодезичного (грінвіцького) меридіана і геодезичного меридіана точки  $M$ . Геодезична висота  $H$  точки  $M$  над еліпсоїдом відраховується вздовж нормалі від поверхні еліпсоїда до фізичної поверхні Землі (Рис. 13.1).

Початок референцної прямокутної системи координат  $Or$ , суміщений з центром прийнятого референц-еліпсоїда. Вісь  $OrXr$  збігається або паралельна до середньої осі обертання Землі в напрямку північного полюса; вісь  $OrZr$  лежить в площині екватора і спрямована в точку перетину екватора з грінвіцьким меридіаном; вісь  $OrYr$  доповнює систему до правої прямокутної.

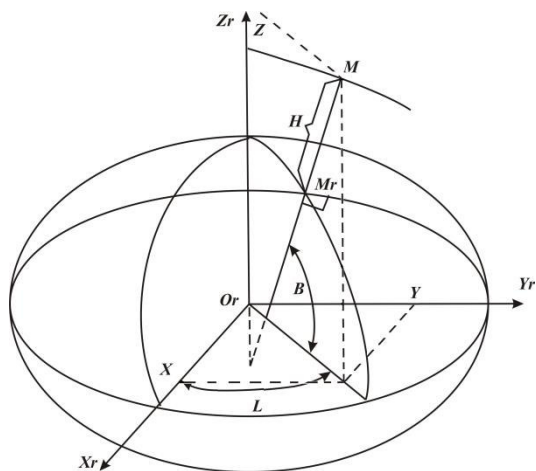


Рис. 13.1. Зв'язок геодезичної та прямокутної референцної систем координат

Спостереження ШСЗ виконують з поверхні Землі. У топоцентричних системах початок координат збігається з точкою фізичної поверхні Землі, якою є пункт спостереження ШСЗ, а осі паралельні до відповідних осей для заданої геоцентричної системи (зоряної або грінвіцької).

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

1. Вивчити визначення географічної, геодезичної, астрономічної, умовної Земної, умовної інерціальної систем координат;
2. Вивчити класифікації небесних сфер та систем координат;
3. Самостійно вивести робочі формули перетворення

між геодезичними  $B, L, H$  і прямокутними референсними  $X_r, Y_r, Z_r$  координатами;

*Завдання, що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Перетворити геодезичні координати довільної точки, що обчислюється за варіантом.

Геодезичні координати обчислюються за формулами згідно варіанта:

$$L = 27^{\circ}33'35'' + n \cdot 1'30''$$

$$B = 51^{\circ}12'26'' - n \cdot 1'30''$$

$$H = 2000\text{м} + 10\text{м} \cdot n,$$

де  $n$  – номер варіанту.

*Робочі формули:*

$$\begin{aligned} X_r &= (N + H) \cos B \cos L; \\ Y_r &= (N + H) \cos B \sin L; \\ Z_r &= (N(1 - e^2) + H) \sin B; \end{aligned} \quad (13.1)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} = \frac{a}{W}, \quad (13.2)$$

де  $N$  – радіус кривини першого вертикала,  $W$  – функція геодезичної широти. Обчислення можна проконтролювати, використовуючи формулу:

$$\sqrt{X_r^2 + Y_r^2 + Z_r^2 (1 + e'^2)} = a + \frac{H}{W}. \quad (13.3)$$

Обидві частини рівнянь мають збігатись з точністю до цілих.

Для референц-еліпсоїда Красовського;

$$a = 6378245\text{м}; e'^2 = 0,006738525; e^2 = 0,006693422.$$

*Завдання 2.* Перетворити прямокутні референсні координати довільної точки в геодезичні.

*Робочі формули*

Геодезична довгота знаходиться за формулою:

$$\operatorname{tg} L = \frac{Y_r}{X_r}; \quad (13.4)$$

Проекція геодезичної нормалі на площину екватора обчислюється за формулою:

$$D = X_r \sec L = Y_r \operatorname{cosec} L. \quad (13.5)$$

Геодезичну широту знаходять за допомогою послідовних наближень. Початкове наближення знаходять за формулою:

$$\operatorname{tg} B_0 = \frac{Z_r(1+e'^2)}{D}; \quad (13.6)$$

а кожне наступне – за попереднім:

$$\operatorname{tg} B' = \frac{Z_r + Ne^2 \sin B_0}{D}; \quad (13.7)$$

Наближення виконують з точністю до  $1''$ . Для останнього значення широти  $B$  обчислюють також значення  $N$  (формула 13.3) і, використовуючи це значення, обчислюють геодезичну висоту:

$$H = \frac{D}{\cos B'} - N = \frac{Z_r}{\sin B'} - N(1-e^2). \quad (13.8)$$

Після знаходження висоти  $H$  за двома формулами знаходиться її середнє значення.

*Завдання 3.* Перетворити координати просторової референційної системи координат в прямокутні геоцентричні (рис. 13.2).

*Вихідні дані*

1. Лінійні параметри зміщення початку систем координат:

$$\delta_x = 11m \cdot n$$

$$\delta_y = -5m \cdot n$$

$$\delta_z = 2m \cdot n$$

Кутові параметри повороту осей систем координат:

$$\omega = -0,2'' \cdot n$$

$$\psi = 0,5'' \cdot n$$

$$\nu = 0,3'' \cdot n$$

При виконанні обчислень значення кутових параметрів необхідно перевести в одиниці системи СІ (радіан).

$m$  – масштабний коефіцієнт. В роботі приймаємо  $m = 0$ .

*Робочі формули*

$$(XYZ)_p \rightarrow (XYZ)_z$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_z = (1+m) \begin{pmatrix} 1 & \psi & -\omega \\ -\psi & 1 & \nu \\ \omega & -\nu & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_p + \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}. \quad (13.9)$$

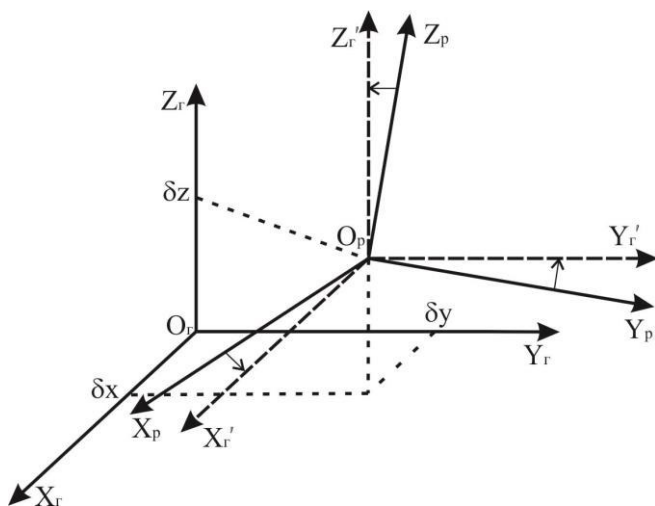


Рис. 13.2. Зв'язок прямокутних референційної та геоцентричної систем координат

На рисунку 13.2:  $O_z X_z Y_z Z_z$  – прямокутна геоцентрична система координат;  $O_p X_p Y_p Z_p$  – прямокутна референційна система координат;  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$  – лінійні параметри зміщення початку систем координат;  $O_p X_z' Y_z' Z_z'$  – зміщення осей референційної системи внаслідок врахування кутових параметрів повороту осей систем координат.

## Лабораторна робота № 2

### *Тема: Визначення основних параметрів незбуреного руху ШСЗ*

*Мета:* Вивчити основи теорії руху ШСЗ та навчитися визначати параметри незбуреного руху ШСЗ.

#### *Теоретичний матеріал*

При використанні динамічного методу в супутниковій геодезії для визначення координат спостережуваної точки необхідно знати параметри руху ШСЗ та їх ефемериди. Рух супутника навколо Землі у спрощеному вигляді розглядають як незбурений, тобто такий, коли на супутник діє лише гравітаційне поле Землі (Земля і супутник розглядаються як матеріальні точки) і не діють інші сили, що називаються збурюючими.

Збурюючі сили мають незначний вплив на рух ШСЗ, тому першочергово визначення параметрів руху ШСЗ зводиться до розв'язання задачі незбуреного руху. Такий рух ґрунтується на законах Ньютона і Кеплера і його ще називають кеплеровим. Теорія незбуреного руху складається з таких частин: виведення диференціального рівняння руху, пошук методів його розв'язання, аналіз розв'язків і отримання системи рівнянь для обчислень елементів орбіти.

Для обчислення параметрів орбіти ми будемо використовувати полярну систему координат. В ній радіус  $r$  орбіти знаходимо за формулою:

$$r = \frac{c^2 / \mu}{1 + \left(\frac{f}{\mu}\right) \cos \nu}, \quad (14.1)$$

де  $c$  – інтеграл площ;  $\mu$  – гравітаційна стала Землі (гравіметричний параметр Землі);  $f$  – універсальна гравітаційна стала;  $\nu$  – кут повороту радіус-вектора супутника.



Якщо ввести позначення

$$\frac{c^2}{\mu} = p, \frac{f}{\mu} = e, \quad (14.2)$$

то отримаємо рівняння кривої другого порядку у полярних координатах:

$$r = \frac{p}{1+e \cdot \cos v}, \quad (14.3)$$

де  $p$  - фокальний параметр кривої,  $e$  - ексцентриситет. Фокальний параметр орбіти виражають через велику піввісь орбіти  $a$ :

$$p = a \cdot (1 - e^2). \quad (14.4)$$

Інтеграл енергії незбуреного руху ШСЗ має вигляд

$$h = V^2 - \frac{2\mu}{r}, \quad (14.5)$$

де  $V$  - швидкість руху супутника,  $h$  - стала інтегрування.

Залежно від ексцентриситету  $e$  плоска крива другого порядку може набирати різні форми, тому значення параметрів  $c$ ,  $f$  і  $h$  також змінюються. Дослідимо, яких значень набуває вираз (14.5) при різних ексцентриситетах  $e$ . Для цього використаємо рівняння зв'язку перших семи параметрів:

$$f^2 = \mu^2 + hc^2, \quad (14.6)$$

в результаті отримаємо:

$$e^2 - 1 = h \left( \frac{c}{\mu} \right)^2. \quad (14.7)$$

При русі по еліптичній траєкторії  $0 < e < 1$ . Тоді на основі  $h = -\frac{\mu}{\alpha}$ , із інтеграла енергії визначаємо квадрат швидкості ШСЗ:

$$V^2 < \frac{2\mu}{r}. \quad (14.8)$$

Це означає, що кінетична енергія руху супутника менша за його потенціальну енергію. Якщо  $e=0$ , маємо

$$h = -\frac{\mu}{p}. \quad (14.9)$$

Під час колового руху радіус орбіти дорівнює великій півосі:

$$r=a. \quad (14.10)$$

Враховуючи (14.10) і підставляючи (14.9) в інтеграл енергії, отримуємо

$$V = \sqrt{\frac{\mu}{r}}. \quad (14.11)$$

При цьому прийнемо, що Земля має сферичну форму з радіусом  $r_0=6371,1$  км і  $\mu=398600,5\text{км}^3/\text{с}^2$ .

Висота супутника знаходиться за формулою

$$H = r - r_0. \quad (14.12)$$

Нехай супутник має період обертання  $T$ . Тоді при повному оберті ШСЗ отримуємо  $360^\circ = \omega T$ , звідки

$$\omega = \frac{360^\circ}{T}, \quad (14.13)$$

якщо  $\omega$  – вимірюється в градусах/с і

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (14.14)$$

якщо  $\omega$  – вимірюється в рад/с.

Величина  $\omega$  – середня кутова швидкість рухомої точки. У небесній механіці її називають середнім рухом.

Використовуючи формули (14.14), (14.10), (14.11) після відповідних перетворень отримуємо:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mu} = \text{const}. \quad (14.15)$$

Цей вираз відображає третій закон Кеплера, згідно з яким в еліптичному незбуреному русі квадрати періодів обертання  $T$  супутників по орбіті відносяться як куби її великих півосей.

Має місце також співвідношення:

$$T = \frac{T_{30P}^*}{n}, \quad (14.16)$$

де  $n$  – кількість обертів супутника навколо Землі за добу.

Для геостационарного супутника  $n=1$ , при цьому

$$T_{\text{зор}}^* = 23^{\text{h}}56^{\text{m}}04.5^{\text{s}} - \text{зоряна доба.}$$

Рух ШСЗ за законами Кеплера є найпростішою моделлю орбітального руху супутника і називається незбуреним. При цьому вважається, що Земля і супутник – дві матеріальні точки. При такому припущенні супутник рухається за інерцією під дією наданого йому початкового імпульсу в гравітаційному полі Землі.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити визначення незбуреного руху ШСЗ, закони Кеплера, збурюючі фактори, диференціальні рівняння незбуреного руху ШСЗ, елементарний вивід рівняння руху супутника.

*Завдання, що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Визначити радіус орбіти ( $r$ ) і швидкість обертання ( $V$ ), якщо відома висота ШСЗ ( $H$ ) згідно заданого варіанту. Використовуються формули (14.11), (14.12).

$$H = 6000 \text{ км} + N \cdot 64 \text{ км.}$$

*Завдання 2.* Визначити радіус орбіти ( $r$ ), швидкість обертання ( $V$ ) і висоту ШСЗ ( $H$ ), якщо відомо кількість обертів ШСЗ за добу навколо Землі ( $n$ ) згідно заданого варіанта. Використовуються формули (14.10), (14.11), (14.12), (14.15), (14.16).

$$n = 4,93 + 0,04 \cdot N.$$

*Завдання 3.* Визначити радіус орбіти ( $r$ ), швидкість обертання ( $V$ ) і висоту ШСЗ ( $H$ ) для геостационарного супутника ( $n=1$ ). Використовуються формули (14.10), (14.11), (14.12), (14.15), (14.16).

При цьому  $N$  – номер варіанта.

### Лабораторна робота № 3

#### Тема: Обчислення незбурених ефемерид ШСЗ

Мета: Навчитись обчислювати незбурені ефемериди ШСЗ.

#### Теоретичний матеріал

Ефемериди – це каталог координат та параметрів, який дозволяє визначити положення ШСЗ на орбіті в будь-який момент часу. Вони представлені у вигляді таблиці топоцентричних координат та інших необхідних параметрів.

Вихідними даними для їх обчислення є:

Координати пункту спостереження:

$$L = 25^{\circ}33'40'' + N',$$

$$B = 32^{\circ}23'17'' + N',$$

$$H = 400m + Nm;$$

Елементи орбіти ШСЗ:

- велика піввісь орбіти:  $a = 6378245m$ ;

- квадрат ексцентриситету орбіти:  $e^2 = 0,00669342$ ;

- довгота висхідного вузла:  $\Omega = 60^{\circ}07'30'' + N'$ ;

- аргумент перицентра:  $\omega = 21^{\circ}44'11'' + N'$ ;

- нахил площини орбіти:  $i = 57^{\circ}13'30'' + N'$ ;

- час проходження ШСЗ через перигей:  $\tau = 11^h 32^m 51^s + N^m$ ;

Ефемериди обчислюються на певний, заданий спостерігачем момент часу. В лабораторній роботі обчислюємо на момент часу:  $t = 11^h 35^m 00^s + N^m$ .

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

При цьому  $N$  – номер варіанта.

Обчислення ефемерид проводять в такій послідовності. Обчислюють збурені елементи орбіти (в лабораторній роботі їх задано у вихідних даних згідно варіанта) та використовуючи їх обчислюють координати ШСЗ в умовно інерціальній геоцентричній системі координат  $(X_b, Y_b, Z_b)$ . Далі послідовно перетворюють їх в прямокутні гринвіцькі геоцентричні  $(X_g, Y_g, Z_g)$ ; прямокутні топоцентричні  $(X_t, Y_t, Z_t)$  та сферичні (полярні) екваторіальні системи координат.

*Робочі формули.*

Спочатку обчислюють середній рух  $n$ , середню аномалію  $M$  та ексцентричну аномалію  $E$  за формулами:

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}}, \quad (15.1)$$

$$M = n(t - \tau), \quad (15.2)$$

$$E_i = M + e \cdot \sin E_{i-1}. \quad (15.3)$$

Рівняння (15.3) називають рівнянням Кеплера. Воно пов'язує між собою допоміжну змінну, якою є ексцентрична аномалія  $E$ , середню аномалію  $M$ , момент проходження супутника через перигей  $\tau$  і поточний час  $t$ .

При обчисленні ексцентричної аномалії  $E_i$  повторюють ітерацію до співпадання 6-го знаку після коми  $i$  разів. При цьому:

$$E_0 = M. \quad (15.4)$$

Згідно з (15.3) середня аномалія  $M$  зростає прямо пропорційно до часу і визначає положення деякого фіктивного супутника, що рухається рівномірно по колу радіуса, рівного великій півосі  $a$ , з періодом  $T$ . Реальний же супутник рухається по еліпсу і відповідно до другого закону Кеплера має максимальну швидкість в перигеї і мінімальну в апогеї.

Далі визначають фокальний параметр за формулою:

$$p = a(1 - e^2). \quad (15.5)$$

Оскільки радіус орбіти супутника

$$r = a, \quad (15.6)$$

то

$$r = p/(1 + e \cos v), \quad (15.7)$$

де кут повороту радіус-вектора супутника

$$v = 2 \arctg \left( \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2} \right). \quad (15.8)$$

Орбітальні координати ШСЗ обчислюють в інерціальній геоцентричній системі координат за формулами:

$$\begin{cases} X_i = r(\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i), \\ Y_i = r(\cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i), \\ Z_i = r(\sin u \sin i), \end{cases} \quad (15.8)$$

де  $u = \omega + v$  - наближений аргумент.

Перетворюють координати ШСЗ з інерціальної геоцентричної системи координат  $(X_i, Y_i, Z_i)$  в гринвіцьку геоцентричну  $(X_z, Y_z, Z_z)$ ;

$$\begin{cases} X_r = X_i \cos S_0 + Y_i \sin S_0, \\ Y_r = Y_i \cos S_0 - X_i \sin S_0, \\ Z_r = Z_i. \end{cases} \quad (15.9)$$

Перетворюють координати пункту спостереження з геодезичних координат  $L, B, H$ , до прямокутних  $X, Y, Z$ , використовуючи формули (13.1)-(13.3) з лабораторної роботи №1.

Знаходять топоцентричні координати супутника відносно пункту спостереження:

$$\begin{cases} x_T = X_r - X, \\ y_T = Y_r - Y, \\ z_T = Z_r - Z. \end{cases} \quad (15.10)$$

Обчислюють горизонтальні прямокутні координати  $n_j, e_j, u_j$  відповідно на північ, на схід та у зеніт пункту спостереження по нормалі до еліпсоїда:

$$\begin{pmatrix} n_j \\ e_j \\ u_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{pmatrix}. \quad (15.11)$$

Знаходимо горизонтальні сферичні координати ШСЗ: пряме сходження, схилення та топоцентричний радіус.

Пряме сходження (Пряме сходження змінюється в межах  $0-24^h$ . Оскільки внаслідок обчислень отримуємо його градусне значення, то використовуючи відповідність  $360^\circ = 24^h$  обчислюють його в годинах, хвилинах, секундах):

$$\alpha_j = \arctg \frac{e_j}{n_j}; \quad (15.12)$$

Схилення (змінюється в межах від  $-90^0$  на південь до  $+90^0$  на північ від небесного екватора):

$$\delta_j = \arctg \frac{u_j}{\sqrt{n_j^2 + e_j^2}} ; \quad (15.13)$$

Топоцентричний радіус:

$$r_j = \sqrt{n_j^2 + e_j^2 + u_j^2} . \quad (15.14)$$

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити основи теорії руху ШСЗ та системи координат і часу;

*Завдання, що виконуються в лабораторній роботі*

Використовуючи робочі формули, наведені в теоретичному матеріалі, згідно варіанта обчислити сферичні топоцентричні координати ШСЗ  $\alpha_j$ ,  $\delta_j$ ,  $r_j$  на певний момент часу  $t$ .

#### Лабораторна робота № 4

**Тема: Будова та призначення комплекту GPS-приймачів Trimble 4800 та Leica GPS 1200**

**Мета:** Вивчити комплектацію GPS-приймачів Trimble 4800 та LeicaGPS1200, а також навчитись складати та приводити в робоче положення базовий і роверний приймачі.

*Теоретичний матеріал*

*Склад та технічні характеристики комплекту приймачів Trimble 4800*

В комплект Trimble 4800 входять два монолітні двочастотні приймачі геодезичного призначення.



Рис. 16.1. Зображення приймача Trimble 4800 (вигляд зі сторони портів під'єднання)

За конструктивною будовою антена, корелятор, приймач та модуль пам'яті об'єднані в одному протиударному та герметичному корпусі. Схематично це зображено на рис. 16.1.

Зі сторони спостерігача розміщено панель з трьома світлодіодними індикаторами станів та кнопкою «вмик./вимк.». Вигляд цієї панелі наведено на рис. 16.2.

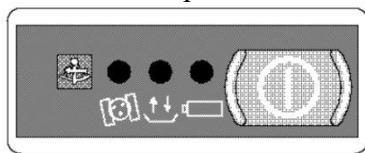


Рис. 16.2. Панель індикаторів приймача Trimble 4800



- кнопка вмикання/вимикання приймача;



- індикатор зеленого кольору ємності батареї. Коли зелений індикатор батареї світить постійно – живлення надходить нормально; не світить – прилад вимкнений; коли блимає – потребує заряджання;



- індикатор жовтого кольору запису інформації. Коли він не світить – запис не ведеться; блимає з великою частотою – проходить процес ініціалізації (підготовки до запису); рівномірно блимає – недостатньо місця для запису вимірювань; світить постійно – відбувається процес запису вимірювань.



- індикатор червоного кольору наявності супутників. Коли індикатор не світить – приймач не веде прийом сигналу від супутників; блимає з великою частотою – супутників недостатньо для спостережень; блимає рівномірно – супутників достатньо для виконання процесу вимірювання.



Нормальний режим роботи приймача: зелений і жовтий індикатори світять постійно, а червоний індикатор рівномірно блимає.

На зворотній стороні 3 порти для під'єднання зовнішніх пристроїв:



1. – до контролера;
2. – до ПЕОМ або стаціонарної акумуляторної батареї;
3. – до радіомодема.

В комплект входять два однакові приймачі. Один з них використовується як базовий, а інший – роверний. Базовий приймач встановлюється на штативі за допомогою підставки з трегером та круглим рівнем. Роверний приймач встановлюється на спеціальній силовій штанзі PowerLITE (рис. 16.3).

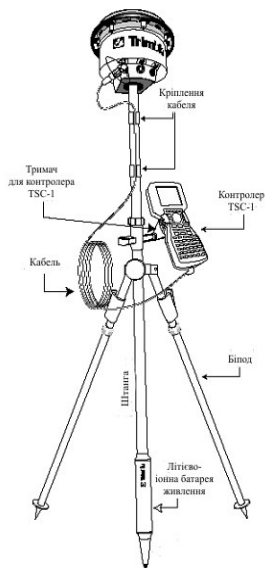


Рис. 16.3. Роверний приймач Trimble 4800, встановлений на штанзі Power LITE

Довжина штанги разом з циліндричною батареєю в нижній частині та конусоподібною опорою на точку складає 1,80 м. На штанзі містяться: кріплення для стаціонарної батареї та контролера, круглий рівень та дві розсувні опори з кнопками фіксаторами зверху (біпод). Зверху до штанги кріпиться приймач. Штанга є силовою, тобто, проводить струм від циліндричної батареї до приймача.

Для живлення базового приймача використовується стаціонарна акумуляторна батарея, здатна підтримувати пристрій в робочому стані протягом доби. Циліндрична батарея здатна підтримувати пристрій в робочому стані впродовж 4 годин.

Для контролю та управління GPS-приймачем під час підготовки безпосередньо до спостережень або інших робіт, а також опрацювання, перенесення, використання даних після спостережень, контролю процесу знімання використовується контролер TSC1. Його будову та функціонування розглянемо в наступній лабораторній роботі.

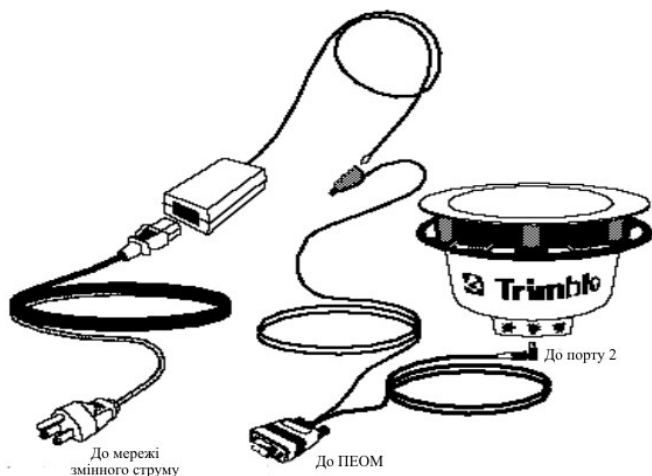


Рис. 16.4. Схема забезпечення живлення приймача Trimble 4800 від мережі змінного струму

Крім того, в комплект входять:

- зарядний пристрій для циліндричних батарей з випростувачем змінного струму;
- зарядний пристрій для стаціонарної акумуляторної батареї;
- кабель для під'єднання приймача до контролера;
- кабель для під'єднання приймача до ПК та/або живлення від сітки змінного струму (використовуючи зарядний пристрій з випростувачем змінного струму), як зображено на рис. 16.4;
- перехідник для під'єднання циліндричної батареї до другого гнізда приймача;
- рулетка;
- інструкція.

*Склад та технічні характеристики комплекту приймачів Leica GPS1200*

До комплекту Leica GPS1200 входять два двочастотні GPS-приймачі геодезичного призначення в комплектації, що розміщується в компактному контейнері. Розглянемо комплектацію контейнера (рис. 16.5).

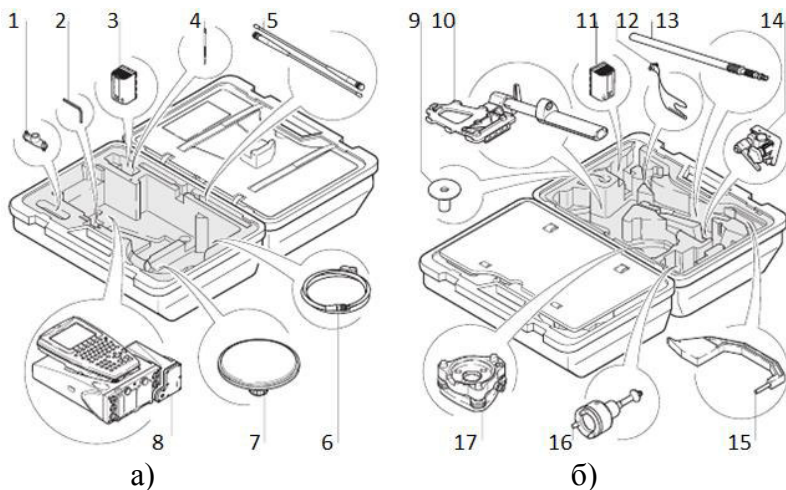


Рис. 16.5. Комплектація Leica GPS1200:

а) перше відділення контейнера; б) друге відділення контейнера

На рисунку:

1. Адаптер для антенних пристроїв;
2. Шестигранний ключ;
3. Запасний акумулятор GEB221;
4. Дисплейна пластмасова указка;
5. Елементи антени;
6. Кабелі (обов'язково входять кабелі для з'єднання антени і приймача GEV120; для з'єднання приймача і контролера, якщо він не приєднаний напряму GEV164; для приєднання до комп'ютера через СОМ-порт, і живлення через зарядний пристрій GEV160; а також може входити кабель для зарядки акумуляторів приймача від акумулятора автомобіля GEV71);
7. Антена AX1202GG;
8. Приймач GX1230GG, з приєднаним до нього контролером RX1210T, модемом, розрахованим на sim-картку GFU24, вставленими двома акумуляторними батареями та картою пам'яті MCF256;
9. Опора для телескопічної штанги;
10. Тримач для кріплення контролера на штанзі, із зажимом для штанги GHT63;
11. Запасний акумулятор;
12. Кронштейн для антенних пристроїв;
13. Телескопічна штанга GAT3;
14. Тримач для кріплення приймача на штанзі GHT40;
15. Спеціальна рулетка для вимірювання висоти антени над точкою GZS4-1;
16. Тримач антени GRT146;
17. Трегер GDF112.

Повністю комплект LeicaGPS1200 складається з двох контейнерів з приведеною вище комплектацією, зарядного пристрою для акумуляторних батарей GKL221, стандартного штативу та штанги для роверного приймача GLS11, інструкції.

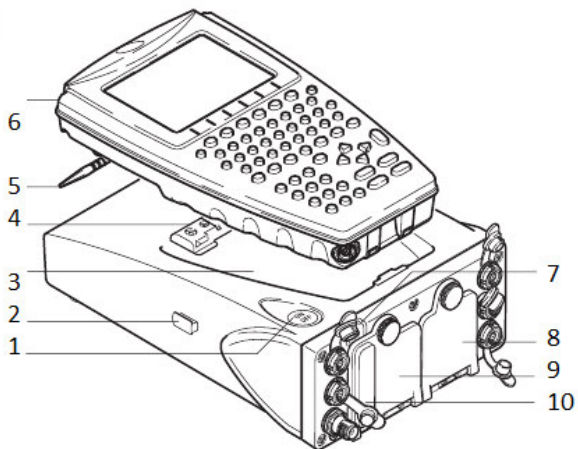


Рис. 16.6. Загальний вигляд приймача GX1230GG

Розглянемо більш детально приймач (рис. 16.6).

1. Кнопка **вмик./вимик.**;
2. Направляюча для встановлення зовнішнього пристрою, що підключається;
3. Ніша для безкабельного встановлення контролера;
4. Зажими для безкабельного встановлення контролера;
5. Дисплейна указка;
6. Контролер RX1210T;
7. Індикатори;
8. Батарейний відсік № 2;
9. Батарейний відсік № 1;
10. Гніздо для карти пам'яті.

Нижня частина приймача містить функціональні порти та індикатори.

На рисунку 16.7:

1. Порт E2 – реєстрації зовнішніх подій;
2. Порт E1 – реєстрації зовнішніх подій;
3. Батарейний відсік № 1 з гніздом для CF-карти пам'яті;
4. LED-індикатори;

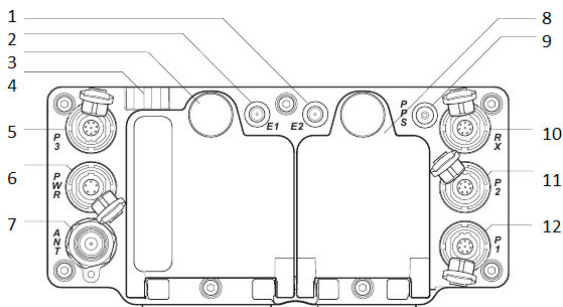


Рис. 16.7. Нижня частина приймача GX1230GG

5. Порт P3 – виведення живлення, введення/виведення даних або інтерфейс для дистанційного управління;

6. Порт PWR – для підключення зовнішнього джерела живлення;

7. Порт ANT – для підключення GPS-антени;

8. Батарейний відсік № 2;

9. Порт PPS – для виводу PPS;

10. Порт RX – виведення живлення, введення/виведення даних або інтерфейс для дистанційного управління;

11. Порт P2 – виведення живлення, введення/виведення даних або інтерфейс для дистанційного управління;

12. Порт P1 – виведення живлення, введення/виведення даних або інтерфейс для дистанційного управління.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити призначення і будову системи GPS, сегменти GPS.

*Завдання що, виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Вивчити комплектацію та технічні характеристики приладів та матеріалів, що входять в комплекти GPS-приймачів Trimble 4800 і LeicaGPS1200; зробити порівняльну характеристику обох комплектів.

*Завдання 2.* Навчитись складати та приводити в робоче положення базовий і роверний приймачі обох комплектів.

## Лабораторна робота № 5

### **Тема: Будова і технічні характеристики контролерів TSC-1 та RX1210T**

*Мета:* Вивчити будову, технічні характеристики та меню контролерів TSC-1 і RX1210T, а також навчитись виконувати технологічні операції, необхідні під час GPS-спостережень.

#### *Теоретичний матеріал*

#### *Будова та технічні характеристики контролера TSC-1*

Контролери TSC-1 і RX1210T – це спеціальні пристрої, які призначені для контролю та управління GPS-приймачем під час підготовки до спостережень, самих спостережень та інших робіт, а також опрацювання, перенесення, використання даних після спостережень. Контролер може використовуватись разом з іншими геодезичними приладами, наприклад, тахеометрами, сумісними з ним.

Розглянемо по порядку кожен з контролерів.

На рис. 17.1 зображено вигляд контролера зі сторони дисплея. Як видно з рисунка, у верхній частині контролера знаходиться екран, збоку може встановлюватись PC-карта пам'яті, знизу знаходиться клавіатура, яка ділиться на функціональні клавіші, клавіші управління курсором, клавіші набору цифр та клавіші набору букв (латиниці) або вторинних функцій. Знизу і ззаду приймач оснащений двома портами RS232 для підключення живлення та/або приймача (ПК). Зі зворотної сторони є відсік, який містить власну акумуляторну батарею.

#### *Основні технічні характеристики:*

Вага приладу – 800 г, споживана потужність – менше 1 Вт, корпус протиударний. Прилад може працювати при температурах  $-30^{\circ}\text{C}$  -  $+65^{\circ}\text{C}$  при відносній вологості 100%.



Рис. 17.1. Контролер TSC-1: вигляд зі сторони дисплею

TSC-1 має рідкокристалічний графічний чорно-білий дисплей розмірами 240x200. Він чутливий до нагрівання та дії прямих сонячних променів, від яких дисплей необхідно оберегти. TSC-1 має 2 Мб пам'яті, з яких вільними є 1,9 Мб. Такий обсяг пам'яті дозволяє записувати дані від 6-ти супутників з інтервалом запису 5 с протягом 9 годин. Акумуляторна батарея розрахована на 7,4 В та 1,3 А-год. Вона використовується лише при відсутності зовнішнього живлення, а при наявності такого живлення автоматично заряджається.

#### *Клавіатура:*

Контролер вмикається натисканням зеленої клавіші.

Функціональні клавіші запускають виконання команд, які зображені безпосередньо над ними.

Клавіші управління курсором призначені для переміщення курсору по екрану та по пунктах меню.





Рис. 17.2. Вигляд екрана контролера TSC-1 після завантаження

За допомогою клавіш набору цифр та літер можна набрати будь-який текст (в латиниці) або цифри, відредагувати його, тощо.

Клавіші альтернативних функцій, підписані жовтим кольором, вмикаються клавішею [Fn].

Після завантаження контролера на екрані з'явиться наступне зображення (рис. 17.2) з відображенням поточного стану обладнання та меню контролера.

Меню складається з 6-ти вікон: Files; Key in; Configuration; Survey; Cogo; Instrument. Розглянемо детальніше кожне з них.

1. **Файли.** Меню призначене для роботи з файлами. Воно має наступні підменю:

- 1.1 Управління робочими файлами;
- 1.2 Огляд поточного робочого файлу;
- 1.3 План розташування точок за даними робочого файлу;
- 1.4 Стан поточного робочого файлу;
- 1.5 Копіювання даних з іншого робочого файлу;
- 1.6 Імпорт/експорт (передача/приймання файлів з PC-карти, відправка або отримання даних із зовнішнього пристрою);
- 1.7 Диспетчер файлів.

2. **Введення з клавіатури.** Дане меню призначене для введення за допомогою клавіатури в пам'ять контролера:

- 2.1 Точок;
- 2.2 Ліній;
- 2.3 Дуг;
- 2.4 Доріг;
- 2.5 Шаблонів;
- 2.6 Приміток.

3. **Вимірювання (знімання).** Це меню призначене для управління процесом вимірювань. Воно може змінюватись залежно від приладу, до якого він під'єднаний, типу GPS-приймача або тахеометра. Для приймача Trimble 4800 воно має такі підпункти:

- 3.1 Запуск базового приймача;
- 3.2 Спостереження в режимі швидкої статики;
- 3.3 Спостереження в режимі PPP кінематики (Стій-іди);
- 3.4 Спостереження в режимі RTK швидкої статики;
- 3.5 Спостереження в режимі RTK PPP кінематики (Стій-іди).

4. **Налаштування.** Меню призначене для введення налаштувань, даних, параметрів для приладів, що використовуються під час спостережень:

- 4.1 Робочого файлу (Системи координат, одиниці вимірювань, параметри Sogo);
- 4.2 Контролера (Час, дата, мова, апаратні засоби);
- 4.3 Бібліотеки атрибутів і кодів;
- 4.4 Стилів вимірювання (Параметри роверного та базового приймача, родіомодемів роверного та базового приймача, періоду PPP ініціалізації при кожному із видів вимірювання, параметри вимірювання топоточки, точки швидкої статики, кінематичного вихідного пункту, швидкої точки, безперервної лінії (точки) тощо).

5. **Sogo.** Дане меню призначене для виконання деяких прикладних геодезичних задач під час спостережень (всі вони доступні лише в режимі RTK):

- 5.1 Обернена геодезична задача;
- 5.2 Знаходження перетину;

- 5.3 Лінійно-кутовий хід;
- 5.4 Елементи ліній;
- 5.5 Елементи кривих;
- 5.6 Обчислення площі;
- 5.7 Обчислення азимута;
- 5.8 Обчислення відстані.

6. **Інструмент.** В цьому меню можна отримати всю інформацію про стан обладнання, яке підключене або з яким працює контролер. Це меню може змінюватись залежно від обладнання, яке підключене до контролера. Для приймача Trimble 4800 воно має такі підпункти:

6.1 Супутники (інформація про розподіл супутників на небесній сфері, таблицька-інформація про положення супутників і деяка додаткова інформація);

6.2 Координати (координати точки на, якій знаходиться приймач в даний момент часу (координати визначаються з навігаційною точністю);

6.3 Копіювання файлів приймача (перегляд та деякі операції з файлами, такі як видалення, відновлення тощо);

6.4 Стан приймача (інформація про заряд батареї, наявність вільної пам'яті в приймачі, час, тиждень вимірювання);

6.5 Навігація до точки;

6.6 Налаштування станції;

6.7 Візирна ціль.

#### *Будова та технічні характеристики контролера RX1210T*

Польовий контролер Leica RX1210T застосовується в комплекті з приймачем GX1230GG, антеною AX 1202GG, тахеометрами Leica 1200 в інженерній геодезії, лінійних вишукуваннях, в геофізиці, кадастрі, під час спостережень за деформаціями, при топографічній зйомці.

Leica RX1210T - польовий контролер, який виконує роботи в польових умовах, захищений від ударів, пилу, води за стандартом IP67. Польовий контролер Leica RX1210T має процесор, операційну систему, клавіатуру QWERTY, сенсорний дисплей, інтерфейс передачі даних.

Технічні характеристики контролера можна переглянути в таблиці 17.1.

*Таблиця 17.1*

Технічні характеристики контролера

<b>Технічні характеристики</b>	<b>Leica RX1210T</b>
Поєднується з приладом	Leica GX1200
Інтерфейс	Контакти приєднання до корпусу GPS1200 без кабелю, 8 pin Lemo для живлення і передачі даних;
Екран	Сенсорний, 1 / 4 VGA (320 x 240 пікселів), монохромний, з підтримкою LCD-графіки, з підсвіткою;
Клавіатура	Функціональні і налаштовані користувачем клавіші, всього 62 шт. (12 функціональних, 40 алфавітно-цифрових), з підсвіткою;
Живлення	Живлення від приймача
Діапазон робочих температур	від -30 до +65 ° C
Вологозахищеність	100%, повністю герметичний корпус, витримує занурення на глибину близько 1 метра (IP67)
Розміри, мм	218 x 123 x 47
Вага, кг	0,480

Клавіатуру контролерів RX1210T та RX1250 можна умовно розділити на групи клавіш за спільним призначенням (див. рис. 17.3).

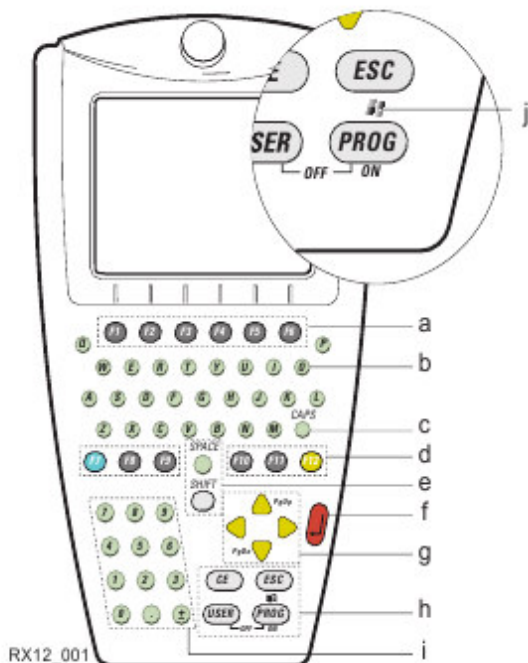


Рис. 17.3. Розміщення клавіатури контролерів RX1210T та RX1250

На рисунку:

а) Функціональні клавіші F1-F6 відповідають шести екранним кнопкам, які з'являються в нижній частині активного вікна;

б) Літерні клавіші – введення алфавітних символів.

с) CAPS – перемикання між верхнім і нижнім регістром буквених символів;

д) "Гарячі" клавіші F7-F12 визначаються користувачем. Це клавіші для виконання потрібних операцій або для доступу до необхідних вікон;

е) Пробіл, SHIFT: пробіл – введення пропусків; перемикання між першим і другим рівнем доступу до функціональних клавіш; SHIFT – перемикання між першим і другим рівнем доступу до функціональних клавіш;

f) ENTER- вибір виділеного рядка і перехід в наступне вікно або розділ меню; запуск режиму редагування для полів вводу; відкриття списку вибору;

g) Клавiші-стрілки – пересування курсора по екрану;

h) CE, ESC, USER, PROG: CE – очищення поля для користувача, введення, стирання останнього введенного символу; ESC – вихід з поточного меню або вікна без збереження зроблених в ньому змін; USER – виклик меню користувача, PROG – використовується в комбінаціях клавiш для включення і виключення приймача;

i) Цифрові клавiші – введення числових символів;

j) RX1250: клавiша з символом Windows. Логотип Windows розташований між клавiшами PROG і ESC – в моделі RX1210T – відсутня.

Крім того, використовуються комбінації клавiш:

PROG + USER – вимкнення приймача. Приймач вимикається при утриманні цих клавiш протягом двох секунд.



Рис. 17.4. Вигляд дисплея контролера RX1210T у ввімкненому стані

PROG (ON) - якщо апарат вимкнений, то його вмикають утриманням кнопки протягом 2 секунд, а якщо приймач

ввімкнений, на цю клавішу можна натиснути в будь-який час для доступу в меню необхідного додатка.

SHIFT + ↑ – перегортання дисплея вгору.

SHIFT + ↓ – перегортання дисплея вниз.

### **Дисплей**

На рисунку 17.4:

a) Час – поточний місцевий час;

b) Назва обладнання;

c) Назва вікна – висвітлюється назва відкритого в даний момент вікна;

d) Поле екрану – це робоче поле екрану;

e) Рядок повідомлень – повідомлення показуються на дисплеї протягом 10 секунд;

f) Піктограми – ці піктограми ідентифікують поточний статус приймача, нижче розглянемо їх детальніше;

g), h), i), j) – Відповідно піктограми ESC, CAPS, SHIFT, швидкого кодування, дисплейні клавіші – можна використовувати при сенсорному керуванні дисплеєм. Виконують ті ж функції, що і відповідні клавіші клавіатури.

**Піктограми на дисплеї** відображають поточний статус роботи приймача (див. рис. 17.5).

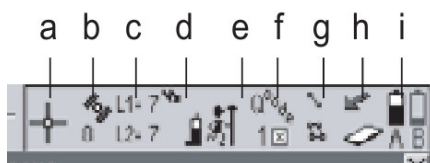


Рис. 17.5. Піктограми, що показують поточний статус приймача

a) Статус позиціонування.



- означають відповідно можливість отримати: автономне рішення за кодovими даними; диференціальне рішення за кодovими даними; фіксоване рішення за фазовими даними (Якщо піктограма блимає, то відбувається рішення неоднозначності, тобто проходить ініціалізація);



b) – число доступних супутників, висота над горизонтом яких більша від величини, заданої в полі «Кут відсічки» в налаштуваннях;



c) – супутники, що використовуються в процесі вимірювання. Тут:  $\Sigma$  – загальна сума супутників; G, R, E – кількість супутників систем GPS Navstar, ГЛОНАСС, Galileo; L1, L2, L5 – сигнали на відповідних частотах.

d) Пристрої режиму реального часу, їх статус та статус доступу до Інтернету :



– підключення, прийом та передача інформації засобами мобільного зв'язку;



– передача та прийом інформації по радіоканалу;



– передача та прийом інформації через порт RS232;



– обмін інформації через Bluetooth-пристрій;



– приймач приєднаний до Інтернету.

e) Режим позиціонування



1, 2) Статика (відповідно без запису та з записом даних);

3, 4) Кінематика (відповідно без запису та з записом даних);

5, 6, 7) Кінематика (з автоматичною фіксацією точок відповідно по часу, за відстанню або за висотою та «Стій-іди»).



f)  Bluetooth.

g)  Лінія / Полігон.

h)  Флеш-карта/Внутрішня пам'ять.

i)  Акумулятор.

**Меню контролера об'єднує в себе логічні блоки:**

1. Вимірювання;
2. Програми;
3. Менеджер проектів, даних та їх налаштувань;
4. Перетворення даних в інші формати, операції імпорту/експорту;
5. Налаштування вимірювань та приймача;
6. Інструменти – додаткові функції, можливості та дані, що дозволяють виконувати різні прикладні задачі.

*Завдання, що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Вивчити будову, технічні характеристики та меню контролерів TSC-1 і RX1210T; зробити їх порівняльний аналіз.

*Завдання 2.* Навчитись виконувати основні дії в меню контролерів, необхідні під час GPS-вимірювань.

## Лабораторна робота № 6

**Тема:** *Планування супутникових спостережень*

**Мета:** Навчитися планувати сесію GPS-вимірювань.

*Теоретичні матеріали*

З метою проведення якісних вимірювань, а також гарантованого отримання даних з необхідною точністю проводять планування сесії GPS-вимірювань. Для планування будемо використовувати такі програмні продукти, як Google Earth, TGO Planning та LGO Satellite Availability і дрібномасштабні карти.

Програмний продукт Google Earth – це оглядова програма

земної поверхні, зображення якої ґрунтується на супутникових знімках. Вони мають координатну прив'язку, можливість пошуку як за координатами, так і за географічною назвою. Ця програма є безкоштовною і її можна скачати з офіційного сайту пошукового серверу за посиланням <http://earth.google.com/intl/ru/>.

Даною програмою зручно користуватись для отримання необхідної для розрахунків інформації:

1. За географічною назвою (координатами або поступовим збільшенням зображення поверхні Землі) можна визначити наближені координати розташування об'єкту спостережень;

2. Намітити маршрут руху роверного приймача, кількість точок знімання, метод вимірювання, місце для базового приймача, можливі перешкоди при русі з роверним приймачем, перешкоди для сигналу супутника, їх розташування та ймовірну висоту тощо.

3. Намітити можливий маршрут і найзручніший транспорт з місця розташування до об'єкта вимірювань, що дасть можливість визначити затрати коштів і часу.

Ця інформація допоможе ефективно розрахувати час та фінансові затрати, які необхідні для виконання GPS-вимірювань в цілому.

З цією ж метою можна використовувати і дрібномасштабні карти, проте програма Google Earth має ряд переваг по відношенню до них. Зокрема, знімки в цій програмі є новішими, тому і містять достовірнішу інформацію, пошук майбутнього місця зйомки швидший. Але є і недолік – необхідно мати швидкий доступ до мережі «Інтернет».

Програми планування (TGO Planning і модулі LGO Satellite Availability) призначені для визначення кількості видимих GPS-супутників та їх взаємного розташування в будь-якій точці Землі в будь-який момент часу.

*Робота в програмі TGO Planning.*

Після інсталяції програмного продукту Trimble Office,

крім основної програми Trimble Geomatics Office, автоматично інсталується ще ряд прикладних програм, в тому числі і Planning.

Після запуску відкривається вікно програми представлене на рис. 18.1.

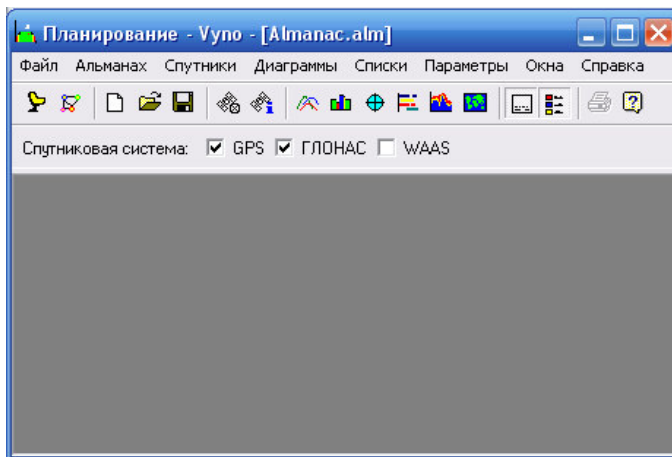


Рис. 18.1. Вигляд програми TGO Planning

Перед початком роботи необхідно імпортувати ефемеридний файл (наприклад у форматах \*.alm, \*.eph, \*.\*\*n) з оновленими даними про орбіти супутників.

Такі файли можна отримати через мережу «Інтернет» з сервера обчислювального центру, або імпортувати з приймача, який вів перед цим спостереження. Завантаження файла відбувається через меню: «Альманах/Загрузить».

Після завантаження ефемеридного файлу планування виконують в такій послідовності:

1. У вікні «Станция» (рис. 18.2) вводять назву станції, її наближені координати та висоту, кут відсічки супутників.

2. Далі вводять дату майбутніх вимірювань, час початку вимірювань, їх тривалість, інтервал, з яким програма буде рахувати положення супутників та часовий пояс.

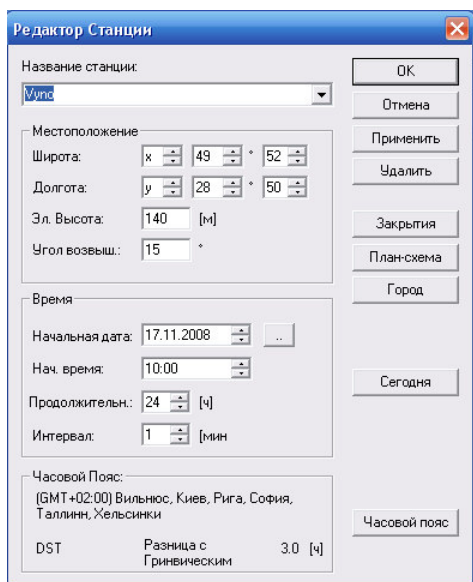


Рис. 18.2. Вікно «Станція»

3. Обирають відповідну ГНСС під панеллю інструментів.

На основі введених користувачем даних програма автоматично і оперативно проводить обчислення, тому можна відразу отримати необхідну для планування інформацію. Вона може бути представлена у вигляді 6-ти різних графіків або 3-ох таблиць. Для цього використовують відповідні меню «Диаграммы» і «Списки», або, для графіків, кнопки панелі інструментів «Возвышение», «Количество спутников», «График небесной сферы», «Обзор», «DOP» і «Карта мира».

За допомогою графіків і таблиць надається у зручній для користувача формі наступна інформація:

1. Кількість супутників, яку можна спостерігати на даній точці протягом всього часу вимірювань.
2. Висоту кожного супутника над горизонтом та азимут. Ця інформація дає можливість врахувати вплив перешкод.
3. Значення параметрів DOP.

### *Робота в модулі LGO Satellite Availability.*

Satellite Availability – модуль програмного продукту Leica Geo Office (LGO), що має схоже призначення і функції до програми TGO Planning. Він відкривається безпосередньо в програмі LGO і його піктограма знаходиться на боковій панелі інструментів.

Вікно має дві закладки «Management» і «Availability» (рис. 18.3)

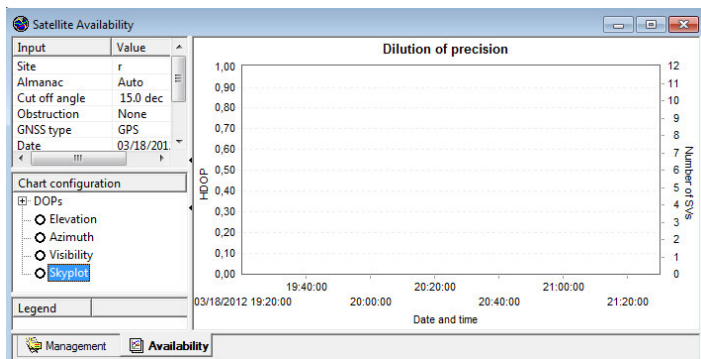


Рис. 18.3. Вигляд вікна модуля LGO Satellite Availability

В закладці «Management» (рис. 18.4) зліва є 3 меню «Sites» (Станції), «Almanacs» (Альманахи), «Obstructions» (Перешкоди).

Для роботи з ними викликають контекстне меню правою клавішею миші. В меню «Sites» можна створити нову станцію для якої виконується планування спостережень. Для цього відкривають вікно «New Site» (рис. 18.4), та почергово вводять:

- назву станції;
- опис станції;
- регіон;
- широту;
- довготу;
- висоту;

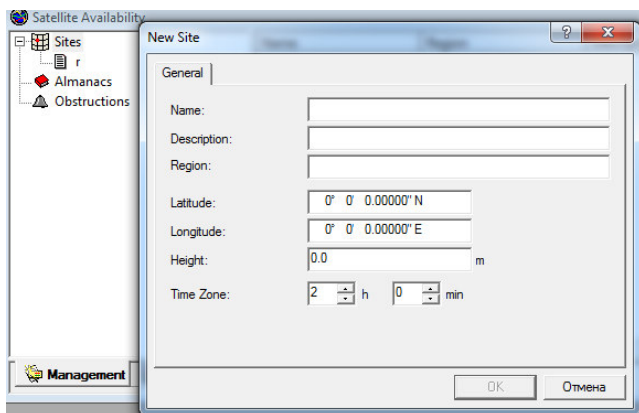


Рис. 18.4. Вигляд вікна «NewSite»

В меню «Almanacs» проводять імпорт ефемеридних файлів, а в меню «Obstructions» описують наявні перешкоди сигналам супутників на станції спостереження.

В закладці «Availability» вибирають назву станції та параметри, за якими нам необхідно провести планування: альманах (ефемеридний файл), кут відсічки, перешкоди, вид супутникової системи, дату, початок та тривалість спостережень.

Після введення необхідної інформації, програма проводить обчислення і користувач може отримати наступну інформацію: коефіцієнти DOP, висоту над горизонтом, азимут, загальну кількість та положення на небесній сфері всіх наявних на даний момент супутників.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити теоретичні основи планування GPS-спостережень.

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Навчитися працювати в програмі TGO Planning, використовуючи різні можливості введення даних та отримання необхідної інформації. Опис всіх пунктів меню (кнопок панелі інструментів) виконати в зошиті.

*Завдання 2.* Спланувати час виїзду на об'єкт спостережень, тривалість спостережень, час обідньої перерви та орієнтовний час повернення при проведенні GPS-сесії згідно варіанту в такій послідовності:

1. Використовуючи програму Google Earth, знайти місце спостережень.

2. Порахувати час, необхідний для виїзду на місцевість та повернення автомобілем з розрахунку середньої швидкості 40 км/год.

3. Вибрати місцеположення базового приймача та врахувати час на його встановлення і запуск, а також вимикання та збирання (по 20 хв.). Врахувати час, необхідний для переходу від базового приймача до об'єкту спостережень і назад (40 км/год. для автомобіля і 3 км/год. для пішого ходу).

4. Визначити кількість необхідних роверних точок та маршрут проведення спостережень.

5. Обчислити час, необхідний для вимірювань роверним приймачем враховуючи:

5.1 Час на підготовку приймача до роботи та його збирання після завершення спостережень - 20 хв.;

5.2 Метод знімання – швидка статика з такими параметрами: при наявності 4-ох супутників спостереження тривають 20хв.; при наявності 5-ти – 15 хв.; при 6 і більше – 8 хв. В разі сумнівів, про кількість супутників в певний проміжок часу вибирають менше значення;

5.3 Врахувати час на підготовку до знімання точки роверним приймачем – по 2 хв. на кожную точку;

5.4 Врахувати час необхідний для проходження по маршруту спостережень (Обрати середню швидкість 3 км/год.).

6. Враховуючи кількість супутників та значення PDOP, вибрати час і тривалість обідньої перерви.

7. Виключити з часу спостережень періоди (крім обідньої перерви), коли кількість супутників менша від 4-ох, або значення GDOP менше 8.

## Лабораторна робота № 7

### **Тема: GPS-вимірювання методом швидкої статики**

*Мета:* Навчитися виконувати GPS-вимірювання методом швидкої статики.

#### *Теоретичний матеріал*

##### *1. Запуск базового приймача*

Вимірювання методами швидкої статики та кінематики починається із запуску базового приймача, а закінчується з його вимкненням.

Базовий приймач бажано встановлювати на точці з відомими координатами, наприклад, на пункті ДГМ. Проте, якщо поблизу таких точок немає (допускається відстань між базовим і роверним приймачем до 20 км), необхідно вибрати найбільш підвищене, відкрите місце, бажано в центрі вимірюваної ділянки. При цьому базовий приймач має знаходитись на точці не менше 1-1,5 год.

##### *Встановлення та запуск базового приймача Trimble 4800.*

Базовий приймач встановлюється на штатив і за допомогою оптичного центра встановлюється над точкою. До базового приймача під'єднується акумуляторна батарея і контролер. Потім вимірюється за допомогою рулетки відстань від точки до нижньої поверхні приймача (при наявності фірмової рулетки нею міряють відстань до фазового центра антени). Після встановлення включається послідовно приймач і контролер та вичікується час завантаження операційної системи контролера. Перевіряється правильна робота приймача за допомогою індикаторів на ньому.

Після завантаження операційної системи на контролері заходять в меню «Survey» (Вимірювання), де з'явиться перелік режимів знімань. Вибираємо режим знімання, в якому будемо проводити спостереження «Fast Static» чи «PP Kinematic». Знову з'явиться меню, де першою командою стоїть «Start Base Survey» (запуск базового вимірювання). Після вибору цього пункту з'являється вікно для запуску



базового приймача.

В даному вікні необхідно ввести назву точки, висоту антени, яка виміряна рулеткою, і місце на приймачі до якого виміряна висота антени (це може бути низ приймача, фазовий центр антени або висота, виміряна спеціальною рулеткою). Після введення цієї інформації натискаємо «Start» за допомогою [F1]. З'являється запит про відключення контролера. Підтверджуємо цей запит, вимикаємо контролер та, не вимикаючи приймач від'єднуємо його.

Ще один спосіб запуску базового приймача – це просто його включення за допомогою зеленої кнопки. Але при цьому обов'язково необхідно записати в нотатник висоту приймача та назву точки, щоб потім внести ці дані при опрацюванні на ПК.

Відключення базового приймача виконується шляхом його виключення. Розбирається та складається базовий приймач в зворотному порядку.

*Встановлення та запуск базового приймача Leica 1200.*

Встановлюється штатив, на ньому закріплюється трегер і центрується над точкою. Потім на трегері встановлюється перехідник та антена.

На штативі збоку кріпиться приймач, а на приймачі (або окремо від нього за допомогою відповідного кабеля) кріпиться та приєднується контролер. Після чого приймач за допомогою кабеля також приєднується до антени. Антена повторно центрується над точкою (рис 19.1).

На рисунку 19.1:

1. GPS-антена;
2. Акумулятор до антени;
3. Скоба для вимірювання висоти антени;
4. Підставка;
5. Трегер;
6. Штатив;

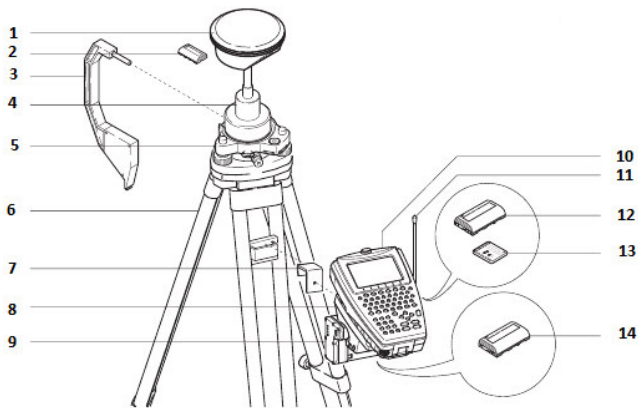


Рис. 19.1. Базова станція приймача Leica 1200

7. Кріплення приймача до штатива;
8. Приймач;
9. Радіомодем;
10. Контролер;
11. Радіоантена;
12. Акумулятор до приймача;
13. Карта пам'яті;
14. Акумулятор радіомодему.

Після того, як базовий приймач встановлено над точкою, його включають та приступають до запуску спостереження. Після включення на екрані контролера з'являється вікно, в якому вибирають меню «Съемка». З'являється вікно для знімання, представлено на рис. 19.2.

Рядок «Проект» – назва активного проекту, в якому проводяться вимірювання;

Рядок «Системы координат» – в цьому рядку вказується система координат проекту знімань;

Рядок «Списки кодів» – тут вибираються будь-які доступні списки кодів;

Рядок «Конфиг. набор:» – вибирається назва активного набору налаштувань. Для кожного виду вимірювань (вимірювання базового приймача, роверного приймача різними

методами) попередньо в меню «Менеджер/Набори настро-ек» вибираються і записуються параметри знімань згідно рекомендацій виробника.

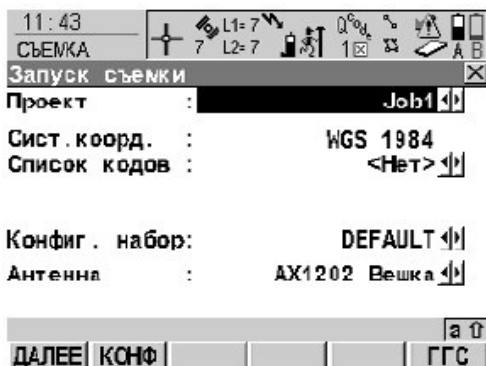


Рис. 19.2. Вигляд вікна «Съемка»

Рядок «Антенна:» – ідентифікується антена, що використовується для спостережень.

Отже для запуску базового приймача заходять у вікно «Съемка», вибирають проект, набір налаштувань для базового приймача та натискають «ДАЛЕЕ» (F1).

В наступному вікні вводять назву точки та висоту встановлення антени у відповідні поля вікна і натискають «ІЗМ» (F1).

Після завершення спостережень натискають «СТОП» (F1) та «ЗАП» (F1).

Під час спостережень необхідно контролювати процес за допомогою піктограм та індикаторів.

Розбирання базового приймача виконується в зворотному порядку до збирання після його вимкнення.

*2. Знімання роверним приймачем методом швидкої статки.*

*Знімання роверним приймачем Trimble 4800 в режимі «FastStatic».*

*Підготовка до роботи*

Приймач збирається в такому порядку: знизу до силової

штанги приєднується батарея чи подовжувач; зверху на штанзі встановлюється приймач; контролер надійно кріпиться до штанги та під'єднується до приймача (при потребі до приймача під'єднується акумулятор і радіомодем).

Після збирання прилад встановлюється на точку знімання та приводиться в вертикальне положення круглим рівнем штанги. Включається приймач, а потім контролер.

*Порядок знімання точки роверним приймачем .*

Роверний приймач включається тільки після запуску базового приймача, а виключається перед відключенням бази.

Щоб почати знімання роверним приймачем в режимі швидкої статички після встановлення його на точці в меню контролера «Survey» вибираємо підменю «Fast Static». Налаштування для цього методу, як і інших, виконують в меню «Налаштування/Стилі знімання» згідно рекомендацій виробника.

На екрані з'являється ряд підменю:

Start Base Survey;

Start Survey;

Measure point;

End Survey.

Для початку знімання роверним приймачем вибираємо підменю «Start Survey», після чого з'являється вікно, в якому необхідно ввести наступну інформацію:

- Назву точки;
- Код точки;
- Висоту приймача (антени);
- Точку на приймачі, до якого виміряно його висоту.

Використовуючи назву і код точки можна коротко її описати та ввести код умовного позначення (топокод).

Знімання розпочинаємо натиснувши «Start», [F1].

Час спостережень може тривати від 20 хв. до 8 хв., в залежності від кількості супутників та їх конфігурації.

На екран також виведено рівень заряду батареї та значення коефіцієнту PDOP.

Після закінчення знімання точку записують, натискаючи «Store» [F1]. Виміряна точка записується в пам'ять приймача (контролера, PC-карти), а на екрані автоматично з'являється вікно для наступної точки.

*Закінчення спостереження роверним приймачем в режимі швидкої статyki*

Щоб припинити вимірювання, натискаємо [Esc] та «End Survey». Потім відключаємо контролер, приймач та розбираємо обладнання в зворотному до збирання порядку. Лише після виключення роверного приймача можна вимкнути і базовий.

*Знімання роверним приймачем Leica 1200*

*Підготовка до роботи*

Роверний приймач збирається в такому порядку: на штангу приєднують антену, за допомогою спеціального кріплення на передбачені місця встановлюють приймач та контролер і з'єднують їх між собою за допомогою кабелів (контролер може бути приєднаний як окремо, так і безпосередньо на приймачі) (рис 19.3).

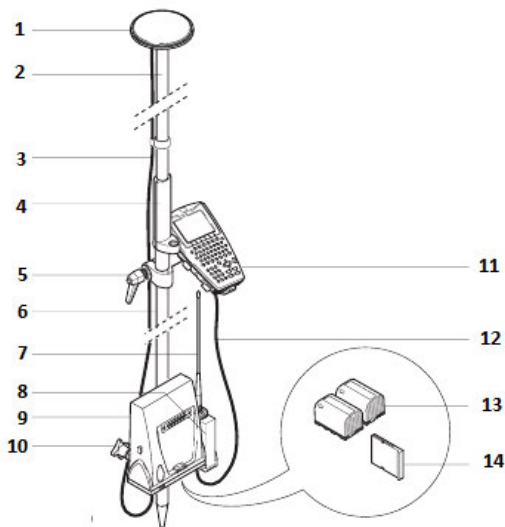


Рис. 19.3. Роверна станція приймача Leica 1200

На рисунку відповідно:

1. GPS-антена;
2. Верхня частина штанги;
3. Кабель для під'єднання приймача до антени;
4. Цанга для штанги;
5. Кріплення для контролера;
6. Нижня частина штанги;
7. Радіоантена;
8. Радіомодем в корпусі;
9. Приймач;
10. Кріплення для приймача;
11. Контролер;
12. Кабель для під'єднання приймача до контролера;
13. Акумулятори;
14. Карта пам'яті.

#### *Порядок знімання точки роверним приймачем*

Роверний приймач включається тільки після запуску базового приймача, а виключається перед відключенням бази.

Запуск роверного приймача подібний до запуску базового. Для цього заходять у вікно «Съемка», вибирають проект, набір налаштувань для роверного приймача методом швидкої статики та натискають «ДАЛЕЕ» (F1).

В наступному вікні вводять назву точки та висоту встановлення антени у відповідні поля вікна і натискають «ИЗМ» (F1).

Точність знімання контролюється в рядку «3D-качество».

Після завершення спостережень натискають «СТОП» (F1) та «ЗАП» (F1) і переходять на наступну точку.

Під час спостережень необхідно контролювати процес за допомогою піктограм, індикаторів та контролера.

Розбирання роверного приймача виконується в зворотному порядку до збирання після його вимкнення.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити методи GPS-спостережень, вивчити теоретичні

основи спостереження методом швидкої статички.

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

Провести вимірювання методом швидкої статички під наглядом викладача обома комплектами приймачів по черзі. Порівняти зручність, швидкість та якість роботи приймачів Trimble 4800 і Leica 1200.

## **Лабораторна робота № 8**

***Тема: GPS-вимірювання методом «Стій-іди»***

*Мета:* Навчитись виконувати GPS-вимірювання методом «Стій-іди.»

*Теоретичний матеріал*

### *1. Запуск базового приймача*

Базовий приймач для обох комплектів встановлюється і запускається так само, як і при методі швидкої статички для обох марок приймачів.

*2. Знімання роверним приймачем Trimble 4800 в режимі «PP Kinematic» («Стій-іди»)*

*Підготовка до роботи*

Перед початком роботи переконайтесь, що базовий приймач працює.

Підготовка до роботи повністю співпадає з підготовкою в режимі швидкої статички.

*Порядок знімання точки роверним приймачем*

Для початку вимірювань входимо в меню «Survey» і вибираємо режим «PP Kinematic/Start survey».

Необхідно пам'ятати, що перед початком вимірювань обов'язково необхідно провести ініціалізацію. Вона також починається автоматично при перериванні процесу знімання – коли тимчасово кількість супутників стала менша чотирьох. Всі налаштування для методу виконують згідно рекомендацій виробника.

Тому перед початком вимірювань проводять ініціалізацію довільної точки об'єкту вимірювань. Для цього після «Start survey» вибираємо «Initialization».

Ініціалізація проводиться 14 - 8 хв. відповідно при 5-ти або 6-ти і більше супутниках. При 4-ох видимих супутниках вона не починається. Ініціалізація безпосередньо до процесу знімання точок не відноситься, а потрібна для розв'язання фазової цілочисельної невизначеності.

Після проведення ініціалізації приступають до знімання точок. Вибирають в меню, що з'явилося, «Measure Point».

На екрані з'являється вікно, де вводять:

- Назву точки;
- Код точки;
- Висоту приймача (антени);
- Точку на приймачі, до якого виміряно його висоту.

Після введення інформації натискаємо «Start».

У вікні з'явиться інформація про кількість епох, які залишилось виміряти, і час вимірювання.

Як тільки вимірювання завершено, натискають «Store», [F1] для запису. Автоматично з'являється вікно для вимірювання наступної точки, для початку вимірювань якої достатньо натиснути «Start», [F1]

Під час всього процесу вимірювань необхідно слідкувати за початком процесу повторної ініціалізації. Про це на екрані з'явиться повідомлення. При появі такого повідомлення необхідно зупинитись, встановити прилад та зачекати до її завершення.

Щоб припинити знімання натискають [Esc] та «End Survey».

Розбирання роверного приймача відбувається так як і в методі швидкої статики.

Лише після виключення роверного приймача можна приступати до розбирання базового приймача. Його розбирання проводиться так як і в методі швидкої статики.

*3. Знімання роверним приймачем Leica 1200 в режимі «Статика-Динамика» («Стій-іди»)*

*Підготовка до роботи*



Перед початком роботи переконайтесь, що базовий приймач працює.

Підготовка до роботи повністю співпадає з підготовкою в режимі швидкої статики.

#### *Порядок знімання точки роверним приймачем*

Роверний приймач включається тільки після запуску базового приймача, а виключається тільки перед відключенням бази.

Запуск роверного приймача подібний до запуску базового, та до роверного приймача методом статики. Всі налаштування для методу виконують згідно рекомендацій виробника. У вікні «Съемка» вибирають проект, набір налаштувань для роверного приймача методом «Статика-Динамика» (при цьому «Режим RT» має бути «Нет») та натискають «ДАЛЕЕ» (F1).

В наступному вікні вводять назву точки та висоту встановлення антени у відповідні поля вікна і натискають «ИЗМ» (F1).

Точність знімання контролюється в рядку «3D-качество».

Початкові невизначеності розв'язуються при вимірюванні в режимі статики, після чого приймач автоматично починає міряти в режимі кінематики. Ці зміни відображаються на контролері у вигляді відповідних піктограм.

Після завершення вимірювань натискають «СТОП» (F1) та «ЗАП» (F1) і переходять на наступну точку.

Під час вимірювань необхідно контролювати процес за допомогою піктограм, індикаторів та контролера.

Розбирання роверного приймача виконується в зворотному порядку до збирання після його вимкнення.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити методи GPS-вимірювань, вивчити теоретичні основи вимірювань методом «Стій-іди».

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

Провести вимірювання методом «Стій-іди» під наглядом

викладача обома комплектами приймачів по черзі. Порівняти зручність, швидкість та якість роботи приймачів Trimble 4800 і Leica 1200.

## Лабораторна робота № 9

### Тема: GPS-вимірювання в режимі реального часу RT

**Мета:** Навчитися виконувати GPS-вимірювання в режимі реального часу RT.

*Теоретичний матеріал*

*Додаткове обладнання для режиму RT.*

Для забезпечення вимірювання в режимі реального часу до комплекту GPS-приймачів, описаних в попередніх лабораторних роботах необхідне додаткове обладнання, що забезпечує безперебійний і надійний зв'язок між базовим (а при можливості перманентною станцією) та роверним приймачами.

Для цього можуть використовуватись різні пристрої: радіомодеми, модеми GSM, високошвидкісні бездротові пристрої та TDMA модулі, поміщені у вологонепроникні корпуси, що приєднуються до приймача. Тому на практиці використовується той вид зв'язку, який є найбільш зручним.

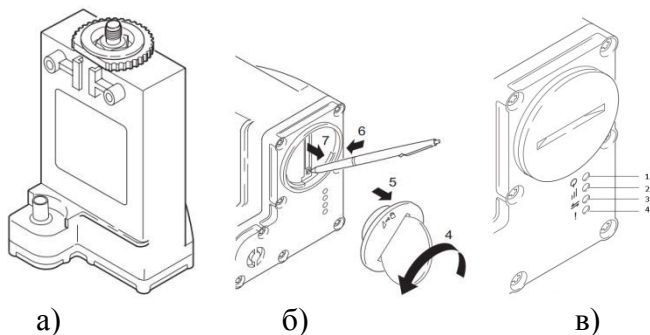


Рис. 21.1. Модем марки GFU24. а) загальний вигляд; б) приєднання s-іт-картки до модему; в) індикатори, що контролюють роботу модему.

Для організації вимірювань в режимі RTK під час проведення лабораторної роботи використовуємо комплект прийма-

чів Leica 1200. Оскільки в комплект входять модеми, що розраховані на sim-картку, то ми скористаємося зв'язком GSM через ці модеми (рис 21.1). Модеми безпроводно кріпляться на корпус приймача.

На рис 21.1 в) індикатори:

1. – попередження;
2. – обміну даними;
3. – рівня сигналу;
4. – живлення.

*Встановлення та запуск базового приймача Leica 1200.*

Порядок підготовки базового приймача такий же, як і при методах швидкої статики та «Стій-іди». Відмінність в тому, що перед початком збирання станції до приймача прикріплюється модем із встановленою sim-карткою.

Перед запуском базового приймача необхідно переконавшись, що у вікні «Конфігурація/ Режим реального часу RT» вибрано «Режим RT: Референц», інтерфейс реального часу правильно налаштований, а модем працює і забезпечує передачу даних.

У вікні «Съемка/Запуск съемки» перевіряють інформацію та вибирають стандартний набір налаштувань для роботи в режимі реального часу базовим приймачем.

В вікні «Настройки референц-станции» вводять назву точки, висоту антени та координати базової точки. Всі інші дії подібні до запуску приймача в режимі постоопрацювання.

*Вимірювання роверним приймачем в режимі RT.*

Збирається роверний приймач так само, як і при методах швидкої статики та «Стій-іди». Подібно до базового приймача він обладнується модемом із встановленою sim-карткою.

Перед запуском базового приймача необхідно переконавшись, що у вікні «Конфігурація/ Режим реального часу RT» вибрано «Режим RT: Ровер», інтерфейс реального часу правильно налаштований, а модем працює і забезпечує передачу даних.

У вікні «Съемка/запуск съемки» перевіряють інформацію та вибирають стандартний набір налаштувань для роботи в режимі реального часу роверним приймачем.

При цьому піктограма на екрані контролера буде показувати, що вимірювання виконуються в режимі реального часу, а також почнеться процес визначення початкових невідзначеностей – ініціалізація.

В наступному вікні «Съемка/Съемка: имя проекта» вводять назву точки та висоту встановлення антени у відповідні поля вікна.

В рядку «3D-качество» буде вказуватись точність вже опрацьованих роверних точок.

Після завершення спостережень натискають «СТОП» (F1) та «ЗАП» (F1), та переходять на наступну точку.

Під час спостережень необхідно контролювати процес за допомогою піктограм, індикаторів та контролера. Розбирання роверного приймача виконується в зворотному порядку до збирання після його вимкнення.

*Опрацювання даних в режимі реального часу на комп'ютері в програмному продукті Leica Geo Office (LGO)*

Досить часто для вирішення інженерних задач в режимі RT необхідно не тільки відразу отримувати координати точок, але й проводити подальші опрацювання даних. Для цього використовують комп'ютер з спеціальним програмним продуктом (в даному випадку LGO), що отримує дані спостережень з усіх приймачів через засоби зв'язку.

Опрацювання даних в режимі реального часу в програмному продукті LGO можна поділити на три етапи:

1. Створення нового проекту та імпорт даних GPS-вимірювань. Оскільки в лабораторній роботі №11 детально розглянуто опрацювання даних в режимі постопрацювання, то розглянемо лише особливості роботи в режимі реального часу.

При імпорті даних, у вікні «Import GPS Raw Data» у вікні вибору файлів необхідно вибрати «RT-Sample». При цьому

каталог «RT-Sample» буде автоматично добавлено в шлях доступу.

У вікні «Assing» необхідно задати місцеву (СК-63, УКС-2000) систему координат, в якій необхідно отримати координати точок та автоматично підключаємо до проекту, в який надходять дані вимірювань. Така система повинна бути попередньо створена в LGO. В цьому ж вікні можна переглянути польовий журнал, натиснувши кнопку «Preview». В цьому журналі буде міститись вся інформація про польові роботи.

2. Перегляд і редагування даних GPS-вимірювань відбувається в модулі «ViewEdite». Під час роботи для полегшення перегляду та редагування рекомендують забрати зображення базових ліній. В модулі можна ідентифікувати точки, визначити базову та роверні точки, визначити повторно виміряні точки, тощо.

3. Експорт координат в зручному для подальшого використання форматі.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити методи GPS-вимірювань, вивчити теоретичні основи GPS-вимірювань в режимі реального часу RT.

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

Провести знімання частини території поблизу навчального корпусу в режимі реального часу RT під наглядом викладача комплектом приймачів Leica 1200. Порівняти режим реального часу з методами, що використовувались в режимі постопрацювання.

## **Лабораторна робота № 10**

***Тема: Вивчення структури GPS-сигналу та файлу спостережень у форматі RINEX***

***Мета:*** Вивчити структуру та навчитися працювати з файлами GPS-спостережень у форматі RINEX.

### *Теоретичний матеріал.*

Дані вимірювань, а також навігаційне повідомлення та додаткова інформація, отримані із сигналом з супутника GPS, зберігаються в бінарному (залежно від типу приймача) форматі. Хоча бінарні дані приймача можна під час пересилання перевести у незалежний від типу комп'ютера формат ASCII, вони все ще залежатимуть від типу приймача. Крім того, кожний програмний продукт при обробці GPS-спостережень має свій власний формат. Це потребує перетворення певних даних до незалежного від програми формату, якщо ці дані обробляються за допомогою програм іншого типу.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок, що обміну GPS-даних сприяв би формат, незалежний від типу приймача. Це досягнуто за допомогою формату обміну RINEX (Receiver Independent Exchange Format). Перша версія цього формату була розроблена Астрономічним Інститутом Бернського Університету для простого обміну GPS-даними, які повинні були збиратися під час EUREF 89 – великої Європейської кампанії по збору GPS-даних, яка включала більше ніж 60 GPS-приймачів чотирьох різних виробників. При розробці враховувалось, що переважна більшість програмного забезпечення для опрацювання GPS-даних використовує чіткий набір спостережень:

- фазові вимірювання на одній або двох несучих частотах.
- виміряні псевдовіддалі, які відповідають різниці часу прийому (вираженому в часовому інтервалі спостерігача) і часу передачі (вираженому в часовому інтервалі супутника) супутникового сигналу.
- час спостереження, який береться з годинника приймача для фазових та/або кодових вимірів.

Отже, таким програмним продуктам не потрібна більшість інформації, яка, звичайно, зберігається приймачем. Їм потрібні фазові та кодові вимірювання, момент часу, до якого відносяться ці вимірювання, та деяка інформація,

пов'язана безпосередньо зі станцією, така як назва станції, висота антени тощо.

Формат версії 2.10, згідно офіційного опису складається з таких типів ASCII-файлів:

1. Файл даних спостережень (\*.o-файли).
2. Файл навігаційного повідомлення (\*.n-файли).
3. Файл метеорологічних даних (\*.m-файли).
4. Файл навігаційного повідомлення ГЛОНАСС.
5. Файл навігаційного повідомлення GEO.

Формат було оптимізовано для мінімального використання пам'яті, незалежно від кількості типів спостережень, які проводить приймач, вказуючи в заголовку типи спостережень, які зберігаються. В комп'ютерних системах, які допускають опрацювання записів змінної довжини, записи спостережень можна ще більше скоротити.

Кожний файл даних спостережень і кожний файл метеорологічних даних в основному містить інформацію по одному пункту і за один сеанс. Друга версія RINEX дозволяє включати дані спостережень з більш ніж однієї точки, які займав приймач при швидких статичних або кінематичних вимірюваннях. Файл навігаційного повідомлення не залежить від пункту.

На сьогодні RINEX є найбільш вдалим форматом. Як наслідок, деякі виробники приймачів розробляють програми для перетворення залежних від їх приймача форматів на RINEX. Координатором цих зусиль виступає Національна геодезична служба (NSG).

Рекомендовано формувати назви файлів за наступною схемою, яку фактично прийнято за стандартну:

ssssdddf.yyt , де:

ssss: 4-символи назви станції;

ddd: день за GPS-календарем початку спостереження;

f: номер окремого спостереження в цей день (якщо приймач вмикався і вимикався);

0: файл містить всі спостереження за цей день;

уу: рік;  
 t: тип файлу;  
 о: файл спостережень;  
 п: навігаційний файл;  
 m: файл метеорологічних даних;  
 g: навігаційний файл ГЛОНАСС;  
 h: навігаційний файл окремих геостационарних супутників.

Так, наприклад, файл „RVNE318A.11o” містить результати вимірювань до супутників, які виконувалися на перманентній станції RVNE (станція Національного університету водного господарства та природокористування) в 318 день 2011 року, а файл „RVNE318A.11n” буде містити дані про Кеплерові параметри орбіт всіх супутників системи GPS на протязі цього ж дня.

Файли формату RINEX можуть бути легко відкриті, і навіть редаговані в будь-якому текстовому редакторі.

Кожний тип файлів складається із заголовку і секції даних. Заголовок містить інформацію про умови отримання даних і розміщується на початку файлу. Заголовок в стовпцях 61-80 містить короткі примітки для кожної лінії заголовку. Ці примітки є обов'язковими. Опис основних записів файлів даних спостережень, навігаційних файлів і файлів метеорологічних даних наведено в табл. 22.1-22.6.

2.10	NAVIGATION DATA	RINEX VERSION / TYPE
GPSBase 2.60 3062		PGM / RUN BY / DATE
3.0734d-08 0.0000d+00 -1.1921d-07 1.7881d-07		ION ALPHA
1.4131d+05 -9.8304d+04 6.5536d+04 -3.9322d+05		ION BETA
0.000000000000d+00-8.881784197001d-16 233472	1662	DELTA-UTC: A0,A1,T,W
15		LEAP SECONDS
		END OF HEADER
② 11 11 13 21 59 44.0 3.654877655208d-04 1.818989403546d-12 0.000000000000d+00		
2.000000000000d+01-1.415625000000d+01 5.514872573722d-09-5.913973667827d-01		
-6.556510925293d-07 1.061739760917d-02 5.751848220825d-06 5.153589281082d+03		
7.918400000000d+04 1.918524503708d-07 2.265123124773d+00 1.862645149231d-08		
9.386390633417d-01 2.555937500000d+02-2.914166639492d+00-8.478924609815d-09		
-1.792931825664d-10 0.000000000000d+00 1.662000000000d+03 0.000000000000d+00		
2.000000000000d+00 0.000000000000d+00-1.769512891769d-08 2.000000000000d+01		
7.801800000000d+04 0.000000000000d+00 0.000000000000d+00 0.000000000000d+00		

Рис. 21.1 Фрагмент навігаційного файлу RVNE318A.11n



## Файл даних спостережень формату RINEX (заголовок)

Мітка запису	Опис
RINEX VERSION / TYPE	- Версія формату (2.10) - Тип файлу ("O" для даних спостереження) - Супутникова система: "G": GPS; "R"–GLONASS; "S"– геостационарна; "T" – NNSS; "M" – змішана
PGM / RUN BY / DATE	- Назва програми, за допомогою якої створено файл - Назва організації, якою створено файл - Дата створення файлу
COMMENT	Рядок коментарів
MARKER NAME	Назва станції
MARKER NUMBER	Номер станції
OBSERVER / AGENCY	Ім'я спостерігача та назва організації
REC # / TYPE / VERS	Номер приймача тип і версія внутрішнього програмного забезпечення приймача
ANT # / TYPE	Номер антени і тип
APPROX POSITION XYZ	Наближені координати точки спостереження (WGS-84)
ANTENNA: DELTA H/E/N	- Висота антени: відстань від точки до нижньої поверхні антени - Ексцентриситет антени відносно точки на схід і на північ (всі величини в метрах)
WAVELENGTH FACT L1/2	- коефіцієнти стандартної довжини хвилі для частот L1 і L2: 1 – повний цикл невизначеності; 2 – половина циклу невизначеності; 0 (для L2) – одночастотний інструмент Запис коефіцієнту стандартної довжини хвилі є обов'язковим і повинен йти перед записом, специфічним для супутника. Список номерів супутників з ідентифікатором супутникової системи (PRN)
# / TYPES OF OBSERV	- Кількість типів спостережень збережених в цьому файлі - Типи спостережень Якщо типів спостереження більше 9: використовуються додаткові рядки

Мітка запису	Опис
	В RINEX версії 2.10 визначені наступні типи спостережень: L1, L2 – фазові вимірювання для частот L1 і L2 (повні цикли); C1 – псевдовіддаль з використанням C/A-коду для частоти L1 (м); P1, P2 – псевдовіддалі з використанням P-коду для частот L1 і L2 (м); D1, D2 – доплерівські дані для частот L1 і L2 (Гц); T1, T2 – інтегральні доплерівські дані для частоти 150 МГц (T1) і 400 МГц (T2) (цикли); S1, S2 – потужність необробленого сигналу або величина SNR (відношення сигнал/шум), які визначаються приймачем для частот L1 і L2 при фазових вимірюваннях Послідовність типів в цьому записі повинна відповідати послідовності спостережень для записів спостережень
INTERVAL	Інтервал спостережень в секундах
TIME OF FIRST OBS	- Час першого запису спостереження (рік – чотири цифри, місяць, доба, година, хвилина, секунда) - Система відліку часу: GPS: час GPS GLO: Всесвітній час координований (UTC)
TIME OF LAST OBS	- Час останнього запису спостереження (рік – чотири цифри, місяць, доба, година, хвилина, секунда) - Система відліку часу: Таке ж значення як і в рядку TIME OF FIRST OBS
RCV CLOCK OFFS APPL	Ознака коригування епохи, коду і фази із застосуванням зміщення годинника приймача, отриманого в реальному часі: 1 – так, 0 – ні, по замовчуванню 0
LEAP SECONDS	Кількість додаткових секунд починаючи з 6 січня 1980 року Рекомендовано для змішаних GPS/GLONASS файлів
# OF SATELLITES	Кількість супутників, спостереження для яких зберігаються в файлі
PRN / # OF OBS	Номер супутника, кількість спостережень кожного типу, який вказано в рядку “# / TYPES OF OBSERV” Якщо типів спостереження більше 9 використовуються додаткові рядки Цей рядок (ці рядки) повторюється для кожного супутника представленого в секції даних
END OF HEADER	Ознака закінчення заголовку

## Файл даних спостережень формату RINEX (підрозділ даних)

Запис спостереження	Опис
ВІДОМОСТІ ПРО ЕПОХУ /СУПУТНИКИ АБО ЗНАК ПОДІЇ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Епоха: рік (2 цифри, з ведучим нулем); місяць, доба, година, хвилина; секунда.</li> <li>- Знак епохи: 0 – події немає; 1 – збій живлення між попередньою і поточною епохами; &gt;1 – знак події</li> <li>- Кількість супутників на дану епоху</li> <li>- Перелік PRN (номер супутника з ідентифікатором супутникової системи) на дану епоху</li> <li>- Зсув годинника приймача в секундах (необов'язково)</li> </ul> <p>Якщо супутників більше 12: використовуються додаткові рядки</p> <p>Якщо знак епохи 2-5: 2 – початок руху антени; 3 – нова позиція точки спостереження (завершення кінематичної зйомки); 4 – далі йде інформація заголовку; 5 – зовнішня подія (епоха неоднозначна); 6 – стрибок фази</p>
СПОСТЕРЕЖЕННЯ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Спостереження</li> <li>- Індикатор втрати блокування (LLI)</li> <li>- Рівень сигналу</li> </ul> <p>Цей запис (записи) повторюється для кожного супутника вказаного в записі ВІДОМОСТІ ПРО ЕПОХУ/СУПУТНИКИ АБО ЗНАК ПОДІЇ</p>

## Файл навігаційного повідомлення (опис секції заголовку)

Мітка запису	Опис
RINEX VERSION / TYPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Версія формату (2.10)</li> <li>- Тип файлу ("N" для навігаційних даних)</li> </ul>
PGM / RUN BY / DATE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Назва програми, за допомогою якої створено файл</li> <li>- Назва організації, якою створено файл</li> <li>- Дата створення файлу</li> </ul>
COMMENT	Рядок коментарів
ION ALPHA	Параметри іоносфери $\alpha_0 - \alpha_3$
ION BETA	Параметри іоносфери $\beta_0 - \beta_3$
DELTA-UTC: A0, A1, T, W	Значення поліноміальних коефіцієнтів для введення поправки в UTC: A0, A1 – поліноміальні коефіцієнти; T – початок відліку для UTC; W – номер початкового тижня UTC.
END OF HEADER	Ознака закінчення заголовку

## Файл навігаційного повідомлення (опис записів даних)

Запис спостереження	Опис
PRN / EPOCH / SV CLK	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Номер супутника, епоха (рік – дві цифри, місяць, доба, година, хвилина, секунда)</li> <li>- Зсув супутникового годинника (с), дрейф, швидкість зміни дрейфа (с<sup>-1</sup>)</li> </ul>
BROAD-CAST ORBIT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Час від моменту останнього оновлення ефемеридних даних</li> <li>- Синусний член для <math>I'</math> поправки (м)</li> <li>- Швидкість зміни середнього руху (рад/с)</li> <li>- Середня аномалія (рад)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Косинусний член для <math>u</math> поправки (рад)</li> <li>- Ексцентриситет</li> <li>- Синусний член для <math>u</math> поправки (рад)</li> <li>- Квадратний корінь від величини великої півосі (м<sup>1/2</sup>)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Момент часу, на який дається ефемерида з початком відліку від початку даного GPS-тижня</li> <li>- Косинусний член для <math>i</math> поправки (рад)</li> <li>- Довгота вузла (рад)</li> <li>- Синусний член для <math>i</math> поправки (рад)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Нахил площини орбіти (рад)</li> <li>- Косинусний член для <math>r'</math> поправки (м)</li> <li>- Аргумент перигея (рад)</li> <li>- Швидкість руху довготи вузла (рад/с)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Швидкість зміни нахилу орбіти (рад/с)</li> <li>- Коди для каналу частоти L2</li> <li>- GPS тиждень</li> <li>- Показчик стану вимірювання P-коду на частоті L2</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Точність орбіти супутника (м)</li> <li>- Стан супутника</li> <li>- Групова затримка обумовлена іоносферою (с)</li> <li>- Час після останнього оновлення коефіцієнтів полінома для супутникових годинників</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Момент часу передачі повідомлення</li> <li>- Три запасні позиції під дані</li> </ul>

Таблиця 21.5

## Файл метеорологічних даних (опис секції заголовку)

Мітка запису	Опис
RINEX VERSION / TYPE	- Версія формату (2.10) - Тип файлу ("M" для метеорологічних даних)
PGM / RUN BY / DATE	- Назва програми, за допомогою якої створено файл - Назва організації, якою створено файл - Дата створення файлу
COMMENT	Рядок коментарів
MARKER NAME	Назва станції
MARKER NUMBER	Номер станції
# / TYPES OF OBSERV	- Кількість типів спостережень збережених в цьому файлі - Типи спостережень: PR – тиск (мБар); TD – температура сухого повітря (°C); HR – відносна вологість (%); ZW – волога зенітна затримка (мм) (для даних WVR); ZD – суха складова зенітної затримки (мм); ZT – загальна зенітна затримка (мм)
SENSOR MOD/TYP/ACC	Опис метеорологічних сенсорів: модель (виробник); тип; точність (в тих же одиницях, що і відповідне спостереження); тип спостереження Запис повторюється для кожного типу спостереження, вказаного в записі # / TYPES OF OBSERV
SENSOR POS XYZ/H	Наближене місцеположення метеорологічного сенсора: геоцентричні координати X, Y, Z; еліпсоїдальна висота H
END OF HEADER	Ознака закінчення заголовку

Таблиця 22.6

## Файл метеорологічних даних (опис записів даних)

Мітка запису	Опис
EPOCH / MET	- Епоха (рік – дві цифри, місяць, доба, година, хвилинка, секунда) - Метеорологічні дані, в тій же послідовності, що подано у заголовку

На рис. 22.1 наведено фрагмент ефемеридного повідомлення (навігаційного файлу) у форматі RINEX (файл RVNE318A.11n) для супутника з номером 2.

Параметри, які описують рух супутника з номером 2, вказано на момент часу 21 год. 59 хв. 44 с 13.11.2011р. Значення параметрів орбіти супутника, приведені в цьому фрагменті, розшифровуються у відповідності з описом, наведеним у таблицях 22.3, 22.4.

Фрагмент файлу спостережень на станції RVNE на 318-й GPS-день (13.11. 2011 р.) на момент часу 22 год. 00 хв. 00 с в форматі RINEX приведений на рис. 22.2.

У даному фрагменті наведено інформацію про геоцентричні координати пункту, типи вимірювань на станції (фазові на частотах L1 та L2, кодові C1 та P2, доплерівські D1 та D2).

2.1		OBSERVATION DATA					G (GPS)		RINEX VERSION / TYPE	
GPSBase 2.60	3062						14-Nov-11 00:09:10		PGM / RUN BY / DATE	
RVNE									MARKER NAME	
15									MARKER NUMBER	
admin		nuwm							OBSERVER / AGENCY	
0220413470		TRIMBLE 5700					Nav 2.32 / Boot 2		REC # / TYPE / VERS	
0									RCV CLOCK OFFS APPL	
60205768		TRM41249.00							ANT # / TYPE	
3637572.4155	1794769.0682	4905978.7410							APPROX POSITION XYZ	
0.0000	0.0000	0.0000							ANTENNA: DELTA H/E/N	
1	1	0						WAVELENGTH FACT L1/L2		
6	C1	P2	L1	L2	D1	D2		# / TYPES OF OBSERV		
5.000								INTERVAL		
2011	11	13	22	0	0.0000000	GPS		TIME OF FIRST OBS		
								END OF HEADER		
11 11 13 22 0	0.0000000	0	12G02G04G05G07G08G10G13G16G23G03G06G26							
23486898.800	23486894.668		2239822.87206		1724449.02346				-2228.665	
-1736.622										
25324314.601	25324313.734		3889228.83404		3001104.18245				-3350.950	
-2611.130										
22508399.934	22508397.075		-3436821.44107		-2660903.85447				2484.079	
1935.646										
20267936.460	20267932.763		-594709.72007		-464783.50448				63.361	
49.372										
21280343.226	21280340.066		-2979744.82407		-2307499.02747				2110.421	
1644.484										
20779939.148	20779936.864		1285903.73607		988236.80447				-1532.342	
-1194.033										
21379877.800	21379874.437		2408119.49407		1855812.21147				-2289.281	
-1783.855										
23853179.484	23853175.611		2618603.88905		2017298.25846				-2577.362	
-2008.334										
23436566.433	23436561.289		3521456.23306		2712918.30446				-3121.492	
-2432.332										
24323188.018	24323185.341		-2147077.33204		-1663125.14345				1741.330	
1356.880										
25108322.661	25108320.924		-1364738.79203		-1059893.59245				1102.160	
858.826										
24771856.859	24771857.982		-11737.99402		8623.59245				3728.537	
2905.354										

Рис. 22.2. Фрагмент файлу спостережень RVNE318A.11o

Фрагмент містить результати супутникових спостережень 12-ти супутників системи GPS (номери 02, 04, 05, 07, 08, 10, 13, 16, 23, 03, 06, 26) Розмірності: для L – повні цикли, для величин C та P – метри.

*Завдання, що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Ознайомитись із обладнанням, технічними характеристиками та принципом роботи перманентної станції RVNE.

*Завдання 2.* Отримати навігаційний файл та файл спостережень з однієї з перманентних станцій, вказаних викладачем.

*Завдання 3.* Описати, вимірювання яких типів проводяться на заданій станції, інтервал запису даних, час початку спостережень та номери супутників, які спостерігалися станом на 04<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> 00<sup>s</sup> київського часу.

*Завдання 4.* З навігаційного файла виписати Кеплерові параметри орбіти супутника PRN26 станом на 04<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> 00<sup>s</sup> та 16<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> 00<sup>s</sup> київського часу.

*Завдання 5.* Зробити висновки про зміну Кеплерових параметрів орбіти супутника за заданий проміжок часу.

## **Лабораторна робота № 11**

***Тема: Опрацювання даних GPS-вимірювань в програмних продуктах Trimble Geomatics Office (TGO) і Leica Geo Office (LGO)***

***Мета:*** Навчитись імпортувати дані GPS-вимірювань з приймача в ПК та опрацьовувати їх в TGO і LGO.

*Теоретичний матеріал*

Trimble Office і Leica Geo Office – це пакети програм відповідно виробників Trimble і Leica, що призначені для опрацювання даних вимірювань як GPS-приймачами, так і іншими геодезичними приладами виробництва цих фірм, та створення кінцевого продукту (плану, 3D-моделі, профілю тощо).

Основними програмами даних пакетів є Trimble Geomatics Office (TGO) та Leica Geo Office. В лабораторній роботі розглянуто основні можливості програм для опрацювання даних GPS-вимірювання.

### *Опрацювання даних GPS-вимірювань в TGO*

Після запуску на екрані монітору з'явиться вікно з TGO (рис. 23.1). Це вікно має таку структуру: зверху знаходиться рядок меню. Безпосередньо під ним знаходиться верхня панель інструментів. Зліва знаходиться бокова панель інструментів. Всю іншу частину займає робоче поле.

Робота в TGO при обробці GPS-спостережень складається з трьох основних частин: створення нового проекту та імпорт даних; робота в режимі «Знімання»; робота в режимі «План».

### *Створення нового проекту та імпорт даних з приймача*

Після запуску програми на боковій панелі інструментів натискаємо кнопку «Новий проект». У вікні, що з'явилося під написом «Проект», пишемо його назву (Для зручності називають за об'єктом знімання або прізвиськом замовника). Після натиску кнопки «Папка» пишуть адресу запису проекту, вибирають «Шаблон» - «Metric» - під словом «Новый» - «Проект», натискають [OK].

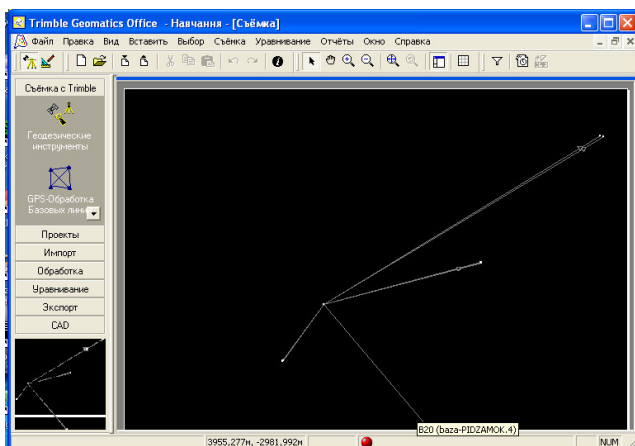


Рис. 23.1. Видяк вікна TGO



Далі послідовно з'являється повідомлення про вибір стилів зрівноваження сітки та необхідність виділення нових. Ми вибираємо «95-доверительный стиль» та «Trimble по умалчанию».

На останньому етапі з'являється вікно «Свойства проекта», де його описують, задають характеристику та параметри. Зокрема, можна встановити: Формати і одиниці виміру; топокоди; створення звіту; переобчислення; параметри проекту; системи координат. Необхідно дуже уважно переглянути всі властивості та змінити (заповнити) ті, які не задовільняють нас при опрацюванні даного конкретного вимірювання.

Імпорт інформації з приймача до ПК відбувається в наступній послідовності - спочатку приєднують один з приймачів до комп'ютера та живлення (послідовність підключення базового чи роверного приймача не важлива) та натискаємо кнопку на боковій панелі інструментів «Геодезические приборы». З'являється вікно «Открыть» з переліком приладів. Вибираємо марку приймача і натискаємо [OK]. Якщо навіть прилад і не був включений, то ПК, звертаючись до приймача, включає його.

Якщо в переліку такої марки приймача немає, то його спочатку необхідно створити. Для цього натискаємо кнопку «Создать новое устройство» і потім послідовно вибираємо тип приймача, порт комп'ютера, до якого він буде підключений, та інші параметри. Обов'язково має бути відсутня галочка напроти «объединить файлы».

Після натискання [OK] ПК звертається до пам'яті приймача і в результаті з'являється вікно з переліком файлів. Вибираємо потрібні файли та натискаємо [OK]. Виконується передача даних і з'являється вікно з переліком точок зняття та їх характеристиками.

Під час спостережень з моменту включення приймача він починає безперервно проводити вимірювання і записувати їх в свою пам'ять аж до моменту його виключення. При цьому

необхідно чітко розрізняти поняття файлу і точки. При включенні, але до моменту початку знімання, приймач автоматично створює файл і записує в нього точку, на якій знаходиться, назву якої також встановлює самостійно. При натисканні на контролері «Start Survey» приймач завершує запис попереднього файлу і розпочинає новий. При цьому у файлі може бути записано багато точок. Після припинення сесії знімань знову створюється новий файл, запис якого припиняється з виключенням приймача. Таким чином, у базовому приймачі, як правило, створюється два файли (якщо запустили без контролера – то один), а в роверному – мінімум 3 (при завершенні одного знімання і початку іншого, не виключаючи прилад, додатково з'являється 2 файли, а при повторному його виключенні та включенні - 3). Вибрати потрібні файли допоможе також їх назва, де зашифрований GPS-час з початку GPS-року. Використовуючи елементарні розрахунки, можна встановити дату і час знімання у зручній для нас формі і встановити приналежність файлу до конкретної потрібної нам GPS-сесії.

В зв'язку з тим що приймач записує інформацію неперервно, точки бувають 3-ох видів:

1. Побічні точки. Назва цих точок складається з цифр, що автоматично присвоєні приймачем. Ці точки з'являються, коли приймач включений і знаходиться на місці, але не веде знімання точок об'єкта спостережень.

2. Точки об'єкта спостережень (топоточки). Мають назву, присвоєну спостерігачем за допомогою контролера (виключення – точка бази, запущеної без контролера, її назва присвоюється контролером).

3. Рухомий сегмент – рух від точки до точки (швидку зміну координат) приймач розрізняє як лінію, тобто рухомий сегмент.

В таблиці з переліком точок знімання є наступні колонки: колонка включення/виключення точки з проекту (за допомогою галочки); назва точки; назва файлу; початок знімання;

кінець знімання; тип приймача; серійний номер приймача; висота антени; тип антени; висота антени, виміряна до; топокод.

За допомогою галочок вибирають, як правило, лише точки знімання, а побічні точки та рухомий сегмент не враховують (при виконанні окремих задач може бути потрібний рухомий сегмент та побічні точки). Крім того, саме в цій таблиці можна змінити назву точки, висоту антени, місце, до якого виміряна висота антени, та топокод. Це особливо актуально для базової точки, що запущена без контролера.

Після імпорту файлів з першого приймача повторюємо операцію для другого. В результаті отримуємо базову точку і базові лінії, що простягаються до роверних точок (рис. 23.1). І точки, і базові лінії сірого кольору.

Для кращого орієнтування в проєкті необхідно вивести на екран назву точок та їх топокоди. Для цього заходимо в меню: «Вид/Метки» точок та відмічаємо галочками «Імя точки» і «Топокод». На цьому імпорту даних з приймачів завершено.

Робота в режимі «Знімання» - це опрацювання даних спостережень з метою збільшення точності точок знімання та встановлення їх координат в потрібній нам системі. Це опрацювання проводиться в 3 етапи – опрацювання базових ліній, зрівноваження та калібрування (перетворення координат точок в місцеву систему координат).

#### *Опрацювання базових ліній*

Щоб почати опрацювання базових ліній, натискаємо на боковій панелі інструментів кнопку «GPS-обработка базовых линий». З'являється таблиця з переліком базових ліній, які були опрацьовані, та їх характеристик. В цій таблиці є такі колонки: вибір базової лінії (за допомогою галочки можна або прийняти, або відхилити опрацювання); номер базової лінії ( $B$  та номер за порядком); від якої точки (базова); до якої точки (роверна); довжина лінії; стиль опрацювання та три колонки з коефіцієнтами точності – коефіцієнт диспер-

сії, квадрат середньоквадратичної похибки, середньої ваги та середньоквадратична похибка. Якщо результати опрацювання задовольняють, то натискають кнопку [OK]. На екрані базові лінії змінюють свій колір в залежності від стилю GPS-спостереження та якості опрацювання. Необроблені мають сіре зображення, оброблені з недостатньою точністю – червоне, оброблені з достатньою точністю методом статистики (швидкої в тому числі) – жовте, а методом кінематики («Стій-іди» в тому числі) – синє.

Щоб зрівноважити точки натискають швидку клавішу [F10] або заходять в меню «Уравнивание» і вибирають пункт «Уравнивание». Точки, зрівноважені з достатньою точністю, залиті білим кольором, а з недостатньою точністю – лише обведені білим кружечком та позначені червоним прапорцем. При якісних спостереженнях, виконаних згідно рекомендацій виробника щодо роботи з приладами та матеріалами, кількість опрацьованих базових ліній та зрівноважених точок з недостатньою точністю зводиться до нуля. Проте навіть у випадку наявності таких точок після опрацювання існують методи подальшого підвищення точності вимірювань, використовуючи уточнені ефемериди.

Для проведення калібрування заходять в меню «Съемка» та вибирають пункт «GPS-калибровка». У вікні, що з'явилося на екрані, вводять нові координати місцевої системи координат для чотирьох точок (якщо не потрібно калібрувати по висоті – то трьох точок) і натискають клавішу «Калибровать». В результаті калібрування відбувається перерахунок координат всіх точок знімання в місцеву систему координат.

*За схожою схемою виконується опрацювання GPS-даних в програмі LGO.* Так само після інсталяції програми згідно інструкції виробника, її відкривають за шляхом: «Пуск/Програми/LGO/Leica Geo Office», або натискають відповідній ярличок на робочому столі.

На екрані монітору з'явиться вікно з LGO (рис. 23.2). Це

вікно має таку структуру: з самого верху знаходиться рядок меню. Безпосередньо під ним знаходиться верхня панель інструментів. Зліва знаходиться бокова панель інструментів. Всю іншу частину займає робоче поле. Крім того при натисканні правої клавіші миші з'являється контекстне меню, а при роботі з багатьма вікнами знизу розміщуються відповідні закладки.

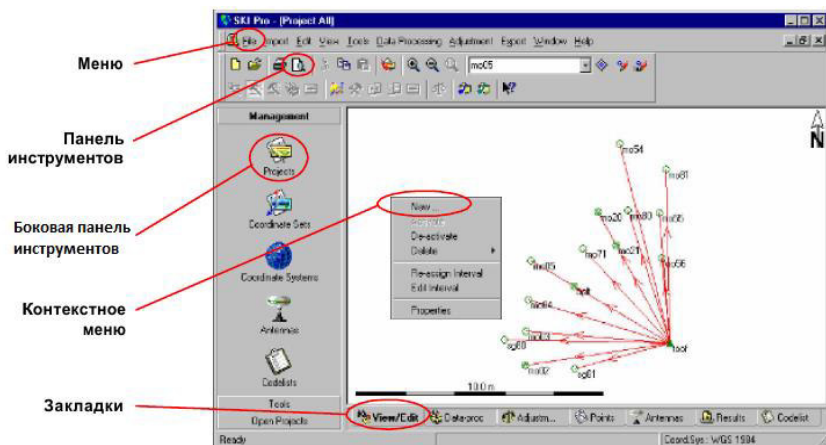


Рис. 23.2. Вигляд вікна LGO

Далі проводимо *імпорт* неопрацьованих *GPS-даних* та створення проекту.

Імпорт неопрацьованих даних та створення проекту в LGO відбувається одночасно та виконується в такому порядку: В меню «Import», або на панелі інструментів вибирають «GPSRawData». У вікні, що з'явилося вибирають тип файлу, шлях запису проекту (необхідно перевірити, щоб галочкою була помічена функція «включити підкаталоги») та натискають «OK».

З'являється наступне вікно характеристик (Assign). В цьому вікні можна змінити безпосередні GPS-спостереження (наприклад зміну значення висоти інструменту або ідентифікатори точок). В цьому ж вікні створюється новий проект. Для цього правою клавішею миші натискають на «Projects»

та в контекстному меню вибирають «New». Не виходячи з процесу імпорту вводяться назва, шлях запису та деякі інші характеристики проекту. Після натискання «OK» створюється і автоматично відкривається новий проект. (У вікні «Assign» в закладці «Settings»)

#### *Опрацювання базових ліній.*

Вікно проекту дозволяє познайомитись із змістом проекту через закладки. Так вікно «View/Edit» графічно показує кожну точку проекту. Точка позначена прозорим квадратом з точкою в середині є неопрацьованою (точність приблизно  $\pm 100$  м)

Перш ніж опрацювати базові лінії необхідно переконатися, що базові точки визначені з достатньою для диференціального методу точністю ( $\pm 20$  мм), або замінити координати на відомі для відносного за допомогою функції «Single Point Processing». При цьому клас точки (Point Class) необхідно замінити на варіант «Control» (Геодезична основа). Точка після цього позначається зафарбованим трикутником.

Після цього приступають до опрацювання базових ліній. Відкривають вікно «Data-proc» і на екрані з'являється вікно зі списком всіх часових періодів спостережень для точок в графічному вигляді (Рис. 23.3).

В графічному вікні вибираються базова та роверні точки відповідно до періоду спостереження. Кількість етапів опрацювання базових ліній співпадає з кількістю базових точок, що використовувались в даній серії знімів. Кожний етап опрацювань виконується окремо. Для його ініціації натискають кнопку «Process».

Після опрацювання з'являється вікно «Result-View», де відображаються результати опрацювання. При цьому будуть вказані роверні точки з координатами та статусом визначення неоднозначності (yes – достатня точність; yes\* - до результатів необхідно відноситись обережно; no – неоднозначність не вдалося визначити). Точки з достатньою точністю записують, виділивши їх та натиснувши «Store».

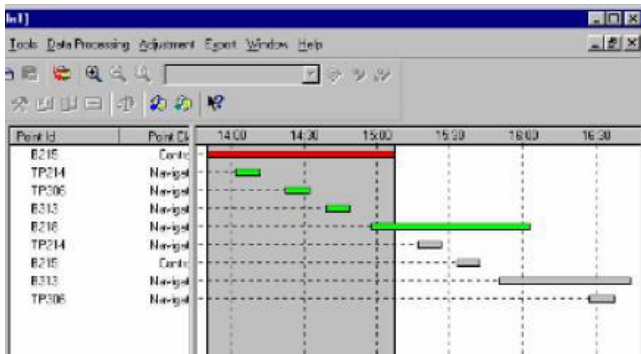


Рис. 23.3. Вікно для опрацювання базових ліній LGO (графічне вікно)

Точки у вікні «View/Edit» змінюють статус на базові (прозорий трикутник) та роверні (прозоре коло).

Зрівноваження відбудеться автоматично.

*Перетворення координат точок в місцеву (державну) систему координат.*

Перетворення координат виконується в кілька етапів. Так спочатку створюють нову систему координат, потім обчислюють параметри перетворення координат із системи WGS-84 в шукану, використовуючи точки з відомими координатами в обох системах. Створивши систему та визначивши параметри перетворення один раз, можна потім використовувати їх в подальшому.

Останнім етапом власне і є перетворення координат на основі створеної системи координат та обчислених параметрів перетворення. Розглянемо ці етапи детальніше.

Для створення нової системи координат вибираємо в меню «Tools» або опції бокового меню «Management» відкривають вікно «Coordinate System Management». В ньому вибирають картографічну проекцію – на контекстному меню «Projection» (права клавіша миші) вибирають «New», заповнюють відповідні поля та натискають «OK». Знову викликають контекстне меню розділу «Coordinate System» вибирають «New», заповнюють відповідні поля та підтверджують. Таким чином нова система координат створена.

Для визначення параметрів перетворення імпортують ASCII-файл з координатами в щойно створеній системі. В меню «Import» або «Tools» вибирають розділ «ASCIIData». У вікні вибирають відповідний файл (формат txt) і натискають «Import». Далі вибирають «Local» та натискають «Next», вибирають «Space» та знову натискають «Next». У вікні, що з'явилося міняють назви колонок через контекстне меню: 1-шу колонку називають «PointId», 2-гу – «Coordinates» - «Easting», 3-тю «Coordinates» - «Northing», і 4-ту «Coordinates» - «Height» та натискають «Finish». Тепер можна прописати точки в координатний набір – виводять контекстне меню для «CoordinateSest» і вибирають «New». Далі вводять назву координатного набору і вибирають із списку систему координат та підтверджують вибір «OK». Координатний набір буде створений та вибраний автоматично. Після цього натискають «Assign» та «Close».

Тепер можна приступити до *обчислення параметрів перетворення координат*.

В меню «Tools» вибирають «Datum/Map». У вікні, що відкрилося, в верхній частині відкривають папку «Projects» і вибирають нашу систему координат, а в нижній в папці «CoordinateSest» відповідний координатний набір та натискаючи «Match» продовжують роботу. Наступним етапом в розділі «Configuration» задають тип перетворення (наприклад Classical 3D) Спільні точки в обох системах вибираються або вручну, або за допомогою команди «Auto Match», та натискають «Results». На останньому етапі з'являється вікно з похибками, які визначають якість обчислення параметрів перетворення координат.

*Перетворення координат точок* із системи WGS-84 в місцеву (державну) систему координат. Із списку на панелі «Management» вибираємо «Project Management». Правою клавішею миші натискають на проєкті і вибирають «Properties». Далі вибирають закладку «Coordinates». У вікні, що з'явилося, перевіряють чи підключена нова система ко-



ординат до проекту і її параметри (розділ «Transformation»). Для продовження роботи натискають «ОК»

Далі на проекті викликають контекстне меню та вибирають «Open». У вікні, що з'явилося натискають закладку «Points». З'являються точки з координатами в системі WGS-84. Після цього на інструментальній панелі натискають кнопки Local, а потім Grid і в робочому вікні з'являються точки в місцевій системі координат.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити теоретичні основи опрацювання даних GPS-спостережень.

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Ознайомитись з програмними продуктами TGO та LGO.

*Завдання 2.* Імпортувати дані GPS-спостережень з приймача в ПК в програмних продуктах TGO і LGO в новий проект.

*Завдання 3.* Опрацювати базові ліній, зрівноважити точки та провести їх або перетворити координати для отримання точок в державній системі координат в програмних продуктах TGO і LGO.

## **Лабораторна робота № 12**

***Тема: Створення планових матеріалів на основі опрацьованих даних GPS-вимірювань***

*Мета:* Навчитись створювати плани на основі опрацьованих даних GPS-вимірювань в TGO і LGO.

*Теоретичний матеріал*

Створення плану в програмах TGO і LGO відрізняються, тому розглянемо їх окремо.

*Основні можливості в програмі TGO.*

Після завершення роботи в режимі «Знімання» приступають до роботи в режимі «План». В цьому режимі основні можливості можна поділити на:

1. Опрацювання топокодів елементів місцевості;
2. Управління шарами;
3. Управління стилями;
4. Звернення до утиліти DTMLink;
5. Звернення до утиліти Roadlink

Розглянемо детальніше кожен з можливостей.

Опрацювання кодів елементів місцевості дозволяє створити топографічні плани або назначити стилі точкам перед їх експортом. В залежності від кодів, які використовуються, TGO автоматично може призначити стилі точкам, з'єднати точки прямими або кривими лініями, використовуючи стиль ліній, розставити підписи об'єктів за допомогою відповідних стилів, додати точки, що створені за допомогою керованих кодів.

Процес використання та опрацювання кодів включає декілька етапів:

1. Створюється файл топокодів та атрибутів (\*.fcl). Цей файл містить інформацію про те, як кожний код повинен бути опрацьований. Він створюється в утиліті Feature and Attribute Editor.

2. Необхідно передати цей файл в операційну систему контролера (Щоб потім вибирати топокоди зі списку, а не вводити вручну), а також в TGO у вікні «Властивості». Це дозволить оптимізувати процес знімання точок та гарантує безпомилкове їх використання.

3. Опрацювання топокодів за допомогою створеного раніше файлу. Для цього заходять в меню «Інструменти/Обробка топокодів».

#### *Управління шарами*

Шар складається з назви, стиля точки, стиля лінії і стиля тексту. Шари використовуються для фільтрації і організації даних з метою ознайомлення з різними категоріями даних в проекті. Для прикладу можна організувати в шари окремо всі точки з назвою «Дерева», «Межа», «Річка» тощо.

Створити новий шар можна в меню: «Правка/Слои». В цьому ж меню можна їх редагувати і видаляти. Вибір об'єктів на потрібному шарі виконується в меню: «Вибір/По слою».

*Стили CAD* складаються з стилю точки, стилю лінії та стилю тексту, які відображаються на екрані як «точка», «пряма/крива/дуга» і «текст/підпис» відповідно. Стили визначають, в якому вигляді будуть відображатись точки, лінії та текст на екрані. Стили проекту визначаються в шаблоні проекту, за допомогою якого цей проект було створено. Створення нових, редагування та видалення стилів відбувається в меню «Правка/Стили».

*Запуск утиліту DTMLink* автоматично проводить інтерполяцію між всіма точками. DTMLink можна запустити в меню «Инструменты/DTMLink». При цьому з'являється вікно з точками спостережень та горизонталями. Відразу можна провести редагування горизонталей, виключаючи/включаючи окремі точки в процес інтерполяції та змінюючи їх властивості (меню «Свойства»), такі як крок горизонталей, тип лінії, колір, ступінь згладжування тощо.

#### *Експорт даних в AutoCAD з програми LGO*

При експорті даних в середовище CAD (формат файлу dxf або dwg) при відкритому проекті натискають закладку «Point». Тоді в меню «Export» вибирають «GIS/CAD» і у відкритому вікні створюють нову пошукову таблицю «Lookup Table».

Ця таблиця дає можливість узгодити коди тематичного класифікатора, що вводились при виконанні польових вимірювань. Таким чином кожний код може бути пов'язаний з необхідним символом в програмі «GIS/CAD». (після одноразового створення таблиці, вона може використовуватись в подальшому).

Для створення натискають на пошуковій таблиці праву клавішу і вибирають «New». На екрані з'являється вікно з характеристиками. Вибираємо закладку «AutoCAD Settings».

В цій закладці вибирають формат та шлях запису і підтверджують вибір. На екрані знову з'явиться вікно експорту файла з уже доступною кнопкою «Lookup».

В наступному вікні характеристик в правій частині можна відкрити поля для шарів «AutoCAD» відповідно до того, як вони визначені у файлі dxf. Крім того можна узгодити атрибути кожного коду «Leica» з атрибутами «AutoCAD».

В наступному вікні характеристик встановлюють наступні характеристики: клас координат - «Main»; а Coordype - «Grid» і «Local». Після внесення всіх параметрів підтверджують експорт, і відкривають файл в «AutoCAD».

### *Створення плану в AutoCAD*

Виконавши основні опрацювання в TGO та LGO, сам план зручно виконувати в програмі AutoCAD. Для цього експортують опрацьовані дані GPS-спостережень та використовують бібліотеки умовних позначень, рамок та позарамкового оформлення.

*Завдання на самостійне опрацювання перед виконанням лабораторної роботи*

Вивчити теоретичні основи обробки даних GPS-спостережень. Повторити порядок роботи та з'ясувати можливості програмного продукту AutoCAD.

*Завдання що виконуються на лабораторній роботі*

*Завдання 1.* Навчитися працювати в програмному продукті TGO в режимі «План».

*Завдання 2.* В програмному продукті TGO підписати назви точок і їх топокоди в режимі CAD та експортувати їх середовище CAD.

*Завдання 3.* В програмному продукті TGO створити і редагувати горизонталі та експортувати їх в середовище CAD.

*Завдання 4.* В програмному продукті LGO експортувати проект в середовище CAD.

*Завдання 5.* Створити план масштабу 1:500 в програмному продукті AutoCAD на основі опрацьованих в TGO і LGO та експортованих даних GPS-спостережень.

### III. НАВЧАЛЬНА ПРАКТИКА ІЗ СУПУТНИКОВОЇ ГЕОДЕЗІЇ

**Метою** проведення навчальної практики із супутникової геодезії є набуття студентами напряму 6.080101 “Геодезія, картографія та землевпорядкування” практичних навичок використання приймачів глобальних навігаційних супутникових систем та подальшого опрацювання даних спостережень на комп’ютері у спеціальних програмних продуктах при проведенні геодезичних та землевпорядних знімачів.

Навчальна практика із супутникової геодезії **ставить за мету** навчити студентів напряму 6.080101 “Геодезія, картографія та землевпорядкування” простих методів супутникової геодезії, які застосовуються при визначенні координат точок земної поверхні та пунктів геодезичних мереж.

В результаті виконання навчальної практики студенти повинні:

**знати:** відповідні системи земних координат і виміру часу, основні закономірності руху космічних апаратів та параметрів їх орбіт, будову та технічні характеристики приймачів, їх класифікацію, задачі, що розв’язує супутникова геодезія, суть і можливість її основних методів.

**уміти:** визначати координати точок земної поверхні за допомогою GPS-приймачів; проводити опрацювання даних спостережень на комп’ютерах в спеціальних програмних продуктах; виконувати перетворення координат точок різних систем координат, визначати необхідні величини при проектуванні вимірювань GPS-приймачами, створювати картографічні матеріали на основі даних GPS-вимірювань.

#### Програма навчальної практики

Навчальна практика розрахована на 6 днів (36 годин).

*Перший день.* Організаційний збір. Інструктаж з техніки безпеки. Ознайомлення з GPS-приймачами Trimble 4800 і Leica 1200.

*Другий день.* На ділянці проведення практики закладання тимчасових точок мережі згущення. Знімання цих точок методом швидкої статики.

*Третій день.* Знімання частини ділянки проведення практики методом «Стій-іди».

*Четвертий день.* Остаточне знімання ділянки проведення практики в режимі реального часу RT. Виконання окремих інженерних задач за допомогою GPS-приймачів.

*П'ятий день.* Опрацювання даних знімання в програмних продуктах Trimble Geomatics Office і Leica Geo Office та створення плану в AutoCAD. Оформлення звіту з навчальної практики.

*Шостий день.* Перевірка та захист звітів з навчальної практики. Задача заліку.

## **Техніка безпеки при проходженні навчальної практики**

*Правила внутрішнього розпорядку:*

Проходячи практику з супутникової геодезії студенти зобов'язані:

1. Виконувати розпорядок дня;
2. Протягом робочого часу практики знаходитись на місці проходження практики;
3. Не залишати місце практики без дозволу керівника;
4. Виконувати правила техніки безпеки, санітарії і гігієни;
5. Дбайливо ставитись до майна і геодезичних приладів;
6. Підтримувати чистоту на території, де проходить практика.

При виконанні польових геодезичних робіт заборонено рубати, або ламати дерева та кущі, нищити с/г посіви, городи, клумби, речі та споруди. Всі роботи ведуться з тротуарів без виходу на проїжджу частину вулиці.

Перед початком дощу (особливо грози) студенти повинні зібрати інструменти і перейти в укриття. Деревя, геодезичні знаки, інші високі предмети, що стоять окремо, не є укриттям, оскільки можуть служити мішенню для попадання блискавок. Металеві предмети скласти осторонь від людей.

*При виконанні правил санітарії, та гігієни студенти зобов'язані:*

- суворо дотримуватись правил санітарії і особистої гігієни;
- одягатись відповідно до погоди, носити головні убори;
- не можна сидіти, або лежати на вогкій землі;
- воду пити тільки із спеціально пристосованих для цих цілей джерел;
- про нещасні випадки та порушення правил техніки безпеки необхідно негайно повідомляти керівника практики.

*Основні правила техніки безпеки при виконанні геодезичних робіт:*

1. Всі студенти під час навчальної практики зобов'язані виконувати правила техніки безпеки;
2. Всі види геодезичних робіт повинні виконуватись відповідно до діючих технічних інструкцій;
3. Під час грому всі види польових робіт повинні бути зупинені;
4. Студент, при виявленні небезпеки, псування приладів та матеріалів, повинен негайно повідомити про це викладача;
5. При перенесенні приладу на штативі (штанзі) потрібно тримати його в вертикальному положенні;
6. Студент повинен слідкувати, щоб шнури, що з'єднують різні частини приладу, не перекручувались та не натягувались у процесі роботи;
7. Передача приладів і матеріалів повинна виконуватись чітко із рук в руки;

8. Ні в якому разі не можна залишати прилад без нагляду;

9. Переходити вулиці (дороги) необхідно лише після того, як впевнитесь у повній безпеці переходу. Переходити вулиці лише під прямим кутом.

#### *Правила поведінки в комп'ютерному класі:*

Комп'ютерний клас є приміщенням підвищеної небезпеки і вимагає особливих правил поведінки:

- практичні заняття на комп'ютерах проводяться тільки у присутності і під керівництвом викладача;

- заходити в комп'ютерний клас потрібно спокійно, не штовхатись, не бігати;

- сідати тільки за закріпленій за студентом комп'ютер;

- із собою на робоче місце брати лише зошити, конспект, підручники, диски (флеш пам'ять) і ручку;

- портфелі і сумки не можна складати біля виходу, їх потрібно розміщувати у спеціально відведеному місці. Верхній одяг необхідно здавати в гардероб;

- вмикання і вимикання комп'ютерів проводиться тільки з дозволу викладача;

- категорично забороняється студентам робити будь-який, навіть дрібний, ремонт електрообладнання;

- виконуючи завдання, студенти не повинні залишати поза увагою технічний стан комп'ютерів, за якими вони працюють;

- про недоліки в роботі комп'ютерів та аварійні ситуації необхідно повідомляти викладача.

#### *Прилади та матеріали, що використовуються:*

Комплекти GPS-приймачів геодезичного призначення (Trimble 4800 і Leica 1200). Комп'ютер з встановленими



програмними продуктами Trimble Geomatics Office, Leica Geo Office та AutoCAD.

### **Оформлення звіту**

Звіт має містити:

- вступ;
- завдання на практику;
- пояснювальну записку щодо: знімання місцевості двома методами постопрацювання та в режимі реального часу RT; процесу опрацювання даних знімань (звіти процесів опрацювання даних обов'язково мають бути пояснені) в середовищі TGO і LGO; опис створення плану в середовищі AutoCAD.

- файл (файли) з результатами польових спостережень;
- польові журнали;
- абриси прив'язки станцій та перешкод;
- схему спостережень;
- план знятої ділянки місцевості.

Матеріали до задачі готуються у відповідності до вимог нормативно-технічних документів.

Звіт готується один на бригаду. Опрацювання даних знімання місцевості та створення плану місцевості виконується кожним студентом окремо, та перевіряється викладачем на комп'ютері. У звіт вставляється опрацювання даних знімання та план одного зі студентів бригади.

## IV. КОНТРОЛЬ ЗНАТЬ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

**Зразок екзаменаційного тесту для оцінювання знань  
студентів (має 40 балів)**

*Перший рівень складності (12 питань)*

Серед варіантів відповіді необхідно вибрати лише один  
варіант. Кожна правильна відповідь оцінюється в 1 бал.

**1. Початок відліку умовної інерціальної системи відліку  
знаходиться в:**

- а) центрі референц-еліпсоїда;
- б) центрі Землі;
- в) центрі мас Землі;
- г) на поверхні Землі.

**2. Дуга великого півкола між точкою весняного рівно-  
дення та точкою висхідного вузла це:**

- а) кут нахилу орбіти;
- б) кут повороту орбіти;
- в) аргумент перигею;
- г) довгота висхідного вузла.

**3. До збурюючих орбіту ШСЗ факторів належить:**

- а) тиск Сонячних променів;
- б) вплив гравітаційного поля Землі, коли Земля розгляда-  
ється як матеріальна точка;
- в) неправильне розташування базового приймача під час  
спостережень;
- г) радіоперешкоди від наземних станцій.

**4. Грінвіцький годинниковий кут умовного Сонця, який  
рівномірно переміщується за екватором відносно серед-  
нього полюсу та грінвіцького меридіану, це:**

- а) зоряний час;
- б) всесвітній миттєвий час UT0;
- в) всесвітній середній час UT1;
- г) всесвітній корегований час UT2.

**5. Доповніть третій закон Кеплера: квадрати періодів обертання двох супутників відносяться як...**

- а) великі півосі їх орбіт;
- б) квадрати великих півосей їх орбіт;
- в) куби великих півосей їх орбіт;
- г) малі півосі їх орбіт.

**6. Який метод GPS-вимірювання може застосовуватись для створення високоточної геодезичної мережі?**

- а) «Статика»;
- б) «Швидка статика»;
- в) «Кінематика»;
- г) всі методи.

**7. Розміри зони видимості супутника придатного для спостереження обмежуються мінімальним кутом над горизонтом, який називається:**

- а) кутом засічки;
- б) кутом відсічки;
- в) кутом нахилу орбіти;
- г) аргументом перигею.

**8. Між відповідними коефіцієнтами погіршення точності DOP має місце таке співвідношення:**

- а)  $GDOP = PDOP + TDOP = HDOP + VDOP + TDOP$ ;
- б)  $GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2$ ;
- в)  $PDOP^2 = GDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2$ ;
- г)  $HDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = GDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2$ .

**9. Який сегмент GPS-системи Navstar не існує?**

- а) космічний;
- б) користувачів;
- в) контрольний (управління);
- г) комбінований.

**10. Який GPS-приймач (при інших однакових параметрах) є точнішим?**

- а) одночастотний;
- б) двочастотний;
- в) однаково точні;
- г) точність приладів відрізняється незначно.

**11. Яку інформацію дозволяє отримати програмний продукт TGO Planning?**

- а) вибрати оптимальний маршрут до об'єкту спостережень;
- б) намітити маршрут роверного приймача;
- в) визначити кількість видимих GPS-супутників над точкою спостережень;
- г) намітити місце для базового приймача.

**12. Яка операція з перелічених виконуються раніше при опрацюванні даних GPS-вимірювань в програмних продуктах TGO і LGO?**

- а) опрацювання базових ліній;
- б) перетворення координат точок в державну систему координат;
- в) зрівноваження точок;
- г) експорт даних в середовище CAD.

*Другий рівень складності (6 питань)*

Серед варіантів відповіді може бути правильним один, декілька, всі, або жодного. Правильною вважається відповідь лише в повному обсязі. Кожна правильна відповідь оцінюється в 3 бали.

**1. За якими критеріями проводиться класифікація просторових систем координат?**

- а) за положенням початку координат;
- б) за орієнтацією основної площини;
- в) за кількістю координат;
- г) за орієнтацією початкової площини;
- д) за способом визначення ефемерид супутника;
- е) за формою їх задання.

**2. Які елементи орбіти існують?**

- а) широта перигею;
- б) довгота перигею;
- в) широта висхідного вузла;
- г) довгота висхідного вузла;
- д) точка весняного рівнодення;
- е) ексцентриситет.

**3. Які з перелічених методів спостереження за ШСЗ не існують?**

- а) кеплереві;
- б) ньютоніві;
- в) доплерівські;
- г) візуальні;
- д) фотографічні;
- е) астрономічні.

**4. При використанні скількох GPS-приймачів можливо виконати вимірювання методом «Швидка статика»?**

- а) одного;
- б) двох;
- в) трьох;
- г) чотирьох;
- д) менше двох;
- е) не менше двох.

**5. При скількох супутниках на небосхилі неможливо провести GPS-спостереження?**

- а) два;
- б) три;
- в) чотири;
- г) п'ять.
- д) шість;
- е) сім.

**6. У якому випадку проводиться ініціалізація при GPS-спостереженнях методом «Стій-іди»:**

- а) перед початком спостережень;
- б) як тільки роверний приймач втрачає сигнал одного із супутників;
- в) якщо роверний приймач отримує сигнал лише від 4-ох супутників;
- г) коли роверний приймач тимчасово отримував сигнал від 3-ох супутників;
- д) періодично (кожну годину) для ініціалізації нових супутників, що з'явилися на небосхилі;
- е) ініціалізація при виконанні спостережень цим методом не проводиться.

*Третій рівень складності (1 задача)*

Правильна відповідь оцінюється в 5 балів. Наведений знизу правильний розв'язок оцінюється ще в 5 балів.

Визначити радіус орбіти ( $r$ ), швидкість обертання ( $V$ ) і висоту ШСЗ ( $H$ ) для геостационарного супутника ( $n=1$ ) (правильну відповідь вибрати заокругливши розрахунки до відповідного знаку)

При цьому:

Тривалість зоряної доби  $T_{зор}^* = 23^h 56^m 04.5^s$ ;

Радіус Землі  $r_0 = 6371,1$  км;

Гравітаційна стала Землі  $\mu = 398600,5$  км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>.

Варіанти відповіді:

- |                     |                  |                   |
|---------------------|------------------|-------------------|
| а) $r = 42100$ км   | $V = 3,5$ км/с   | $H = 35000$ км;   |
| б) $r = 42461,5$ км | $V = 5,176$ км/с | $H = 36733,1$ км; |
| в) $r = 42164,3$ км | $V = 3,075$ км/с | $H = 35793,2$ ;   |
| г) $r = 20100$ км   | $V = 3,122$ км/с | $H = 13788,9$ км; |
| д) $r = 62678,2$ км | $V = 10,3$ км/с  | $H = 56307,1$ км; |
| е) $r = 42150,3$ км | $V = 3,075$ км/с | $H = 35779,2$ км. |

## **Відповіді для самоконтролю:**

### *Перший рівень складності*

- |       |        |
|-------|--------|
| 1. в) | 7. б)  |
| 2. г) | 8. б)  |
| 3. а) | 9. г)  |
| 4. в) | 10. б) |
| 5. в) | 11. в) |
| 6. а) | 12. а) |

### *Другий рівень складності*

1. а) б) г) е)
2. г) е)
3. а) б) е)
4. б) в) г) е)
5. а) б)
6. а) г)

### *Третій рівень складності.*

в)

#### Розв'язок:

Використовуючи вираз, що відображає третій закон Кеплера

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mu} = \text{const},$$

( $T$  – період обертання супутника;  $a$  – велика піввісь орбіти ШСЗ;  $\mu$  – гравітаційна стала Землі (гравіметричний параметр Землі) знайдемо велику піввісь орбіти

$$a = \sqrt[3]{\frac{T^2 \mu}{4\pi^2}}.$$

Оскільки супутник геостационарний, і кількість обертів супутника навколо Землі  $n=1$ , то

$$T = T_{\text{зор}}^* = 23^{\text{h}}56^{\text{m}}04.5^{\text{s}} = 86164,5 \text{ с},$$

де  $T_{\text{зор}}^*$  - тривалість зоряної доби.

А отже велику піввісь можна знайти за формулою

$$a = \sqrt[3]{\frac{T_{\text{зор}}^{*2} \mu}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{86164,5^2 \times 398600,5}{4 \times 3,1416^2}} = 42164,3 \text{ км}.$$

Таким чином, оскільки орбіту супутника вважаємо коловою, можна знайти радіус обертання супутника

$$r = a = 42164,3 \text{ км},$$

а також висоту обертання супутника:

$$H = r - r_0 = 42164,3 - 6371,1 = 35793,2 \text{ км},$$

де  $r_0$  – радіус Землі.

Знайдемо також швидкість обертання супутника

$$V = \sqrt{\frac{\mu}{r}} = \sqrt{\frac{398600,5}{42164,3}} = 3,075 \text{ км/с}.$$

Таким чином відповідь

$$r = 42164,3 \text{ км} \quad V = 3,075 \text{ км/с} \quad H = 35793,2.$$



## Критерії оцінювання знань студентів

Оцінювання студентів з навчальної дисципліни «Супутникова геодезія» здійснюється на основі результатів поточного модульного та підсумкового контролю знань з врахуванням результатів самостійної роботи.

Підсумковий контроль знань студентів відповідно до навчального плану здійснюється у вигляді екзамену.

### Критерії та аналіз загальної оцінки

Блоки змістових модулів	Види робіт	Кількість балів	Примітка
Системи координат і часу. Закони руху ШСЗ	Лабораторні роботи	<b>3</b>	Оцінка 1-ї роботи: 1 бал
	Самостійна робота	<b>3</b>	
	Тести	<b>18</b>	
Супутникові радіонавігаційні системи	Лабораторні роботи	<b>9</b>	Оцінка 1-ї роботи: 1 бал
	Самостійна робота	<b>9</b>	
	Тести	<b>18</b>	
	Екзамен	<b>40</b>	
<b>Всього за курс</b>		<b>100</b>	

Оцінювання студентів з навчальної практики «Супутникова геодезія» здійснюється за наступними критеріями:

### Критерії та аналіз загальної оцінки з практики

Вид діяльності	Поточний контроль	Підсумковий контроль	Всього
Польові роботи	30	0	30
Камеральні роботи	20	0	20
Захист звіту	50	0	50
<b>Всього за курс</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>

## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

### **A**

AS-режим (Anti Spoofing) **69**

### **B**

Block I; II; ПА; ПІР; ПІР-М; ПІФ; ПІА **64**

### **C**

C/A (Coarse Acquisition) – код вільного доступу **69**

СЕР – Точка небесного ефемеридного полюсу **30**

СІО – Міжнародний умовний початок **30**

СІС – Умовна інерціальна система координат **30**

Compass **15, 61**

СТС – Умовна Земна система координат **29**

### **D**

DOP (Dilution of Precision) – коефіцієнт погіршення точності **76**

DORIS – доплерівська орбітографія **32**

### **E**

ETRF (International Terrestrial Reference Frame)– реалізація європейської системи координат **32, 85**

ETRS (European Terrestrial Reference System) – європейська референсна система координат **32, 85**

### **G**

Galileo **15, 61**

GDOP (Geometric DOP) – просторово-часовий коефіцієнт погіршення точності **76**

GNSS (Global Navigation Satellite System) – глобальна навігаційна супутникова система **91**

GPS (Global Positioning System) – глобальна система визначення місцеположення **14, 61**

GPST – Час GPS **43**

GPS-календар **43**

GRS -80 – відліковий еліпсоїд системи ETRS **85**

## **I**

IAU (International Astronomical Union) – Міжнародний астрономічний союз **32**

IERS (International Earth Rotation Service) – Міжнародна служба обертання Землі і опорних систем координат **32, 85**

IGS – Міжнародна геодинамічна служба **32, 88**

IRNSS **15, 61**

ITRF (International Terrestrial Reference Frame) – Реалізація загальноземної системи координат **32, 85**

ITRS (International Terrestrial Reference System) – Міжнародна земна референсна система координат **32, 85**

IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) – Міжнародний союз геодезії і геофізики **32, 88**

## **H**

HDOP (Horizontal DOP) – плановий коефіцієнт погіршення точності **76**

## **L**

Leica GPS1200 **137**

Leica Geo Office (LGO) **181, 191**

LLR – лазерна локація Місяця **32**

## **N**

NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) **13 61**

## **P**

P-код (Protected) – захищений код **69**

PDOP (Position DOP) – просторовий (координатний) коефіцієнт погіршення точності **76**

PPS (Precise Positioning Service) – приймачі для точного визначення місцеположення **72**

## **R**

RINEX-формат **171**

RT (Real Time) – режим реального часу **97, 168**

## **S**

SA (Selective Availability) – режим вибіркового доступу **69**

SLR – супутникова лазерна локація **32**

SNR - відношення сигнал/шум **82**

SPS (Standard Positioning Service) – приймачі для стандартного визначення місцеположення **72**

## **T**

TAI – міжнародний атомний час **41**

TDOP (Time DOP) – одномірний часовий коефіцієнт погіршення точності **76**

TRANSIT **14**

Trimble 4800 **133**

Trimble Geomatics Office (TGO) **181, 191**

## **V**

VDOP (Vertical DOP) – коефіцієнт погіршення точності висотного положення **76**

VLBI – інтерферометрія з наддовгою базою) **32**

## **Q**

QZSS **15, 61**

## **U**

UT0 – миттєвий всесвітній час **41**

UT1 – середній всесвітній час **41**

UT2 – скорегований всесвітній час **41**

UTC – всесвітній координований час **41**

**W**

WGS-84 (World Geodetic System) – Всесвітня геодезична референцна система **34**

**Y**

Y-код **69**

**Z**

ZAKPOS – Закарпатська служба визначення положення **91**

**A**

Абсолютна висота **38**

Абсолютний метод визначення місцеположення **95**

Активні ШСЗ **53**

Антенa **74**

Аргумент перигею **46**

Астрономічний азимут **28**

Астрономічна широта **28**

Астрономічна довгота **28**

АГМ-1 астрономо-геодезична мережа 1-го класу **83**

Атомна секунда **39**

**Б**

Базова лінія (вектор бази) **98**

Базова точка (станція) **95**

Базовий приймач **95, 158**

Барометрична висота **38**

**В**

Відносна висота **38**

Відносні методи визначення місцеположення **95**

Відношення дисперсій **120**

Відхилення прямовисної лінії. **28**

Візуальні спостереження ШСЗ **54**

Вісь світу **23**

Висока орбіта **44**

Висотна геодезична мережа **83**

Всесвітній час **41**

Вяйсяля Ю. **13**

## **Г**

Геліоцентрична небесна сфера **22**

Геліоцентрична система координат **25**

Географічна широта **29**

Географічна довгота **29**

Геодезична висота **37**

Геодезична широта **28**

Геодезична довгота **28**

Геодезична мережа згущення **83**

Геодезичні GPS-вимірювання **95**

Геодезичні приймачі **72**

Геометричний метод супутникової геодезії **16**

Геостационарний супутник **44**

Геоцентрична небесна сфера **22**

Геоцентрична система координат **25**

Гіперболічна орбіта **44**

ГЛОНАСС (ГЛОбальна НАвігаційна Супутникова Система) **14, 61**

Глонасс-М; -К **66**

Горизонтальна система координат **25, 27**

Гринвіцька система координат **25**

## **Д**

Декретний час **42**

Державна геодезична мережа ДГМ **83**

Динамічний метод супутникової геодезії **19**

Динамічний час **42**

Диференціальне рівняння збуреного руху ШСЗ **48**

Диференціальні методи визначення місцеположення **95**

Довгота висхідного вузла **46**

Доплерівські спостереження **56**

Друга екваторіальна система координат **27**

## **Е**

Екліптика **24**

Екліптична система координат **25**

Екваторіальна орбіта **44**

Екваторіальна система координат **25**

Експорт даних GPS-вимірювань **115**

Елементи орбіти **44**

Еліптична орбіта **44**

Ефемериди **44, 52, 129**

Ефемеридний час **42**

## **З**

Закони Кеплера **46**

Збурюючі фактори **47**

Збурена орбіта **47**

Зеніт **23**

Земна геоцентрична система координат **29**

Зоряна доба **39**

Зоряний рік **39**

**Зоряний час 40**

**Зрівноваження 114**

## **I**

**Імпульсні спостереження ШСЗ 55**

**Імпорт даних GPS-вимірювань 114**

**Інтеграл площ 51, 126**

**Інтеграл енергії 51, 127**

**Інтеграл Лапласа 51**

**Істинна висота 38**

**Істинна доба 40**

**Істинна система координат 26**

**Істинний південь 40**

**Істинний сонячний час 40**

## **K**

**Календар 43**

**Квазігеоїд 38**

**Квазігеоцентрична (референсна) система координат 25**

**Квазісинхронна орбіта 45**

**Кінематичний метод 100**

**Класифікація приймачів 72**

**Кодові приймачі 73**

**Коефіцієнт дисперсії 119**

**Комплект GPS-приймачів 109, 133**

**Контроллер 141**

**Контрольний сегмент 69**

**Корелятор 74**

**Космічний сегмент ГНСС 64**



Криволінійна система координат **25**

Кругова орбіта **44**

Кут нахилу площини орбіти **46**

## **Л**

Лазерна локація (лазерні спостереження ШСЗ) **55**

Лінія вузлів **45**

## **М**

Метод корекції координат **98**

Метод корекції навігаційних параметрів **98**

Метрологічне забезпечення **107**

Миттєва система координат **26**

Місцевий істинний сонячний час **40**

Модуль опрацювання даних **74**

## **Н**

Навігаційні GPS-вимірювання **94**

Навігаційні приймачі **72**

Надир **23**

Нахилена орбіта **44**

Небесна сфера **21**

Небесний астрономічний горизонт **23**

Небесний екватор **24**

Небесний меридіан **24**

Незбурений рух **46, 126**

Несинхронна орбіта **45**

Низька орбіта **44**

Нормальна висота **38**

## **О**

Опрацювання базових ліній **114**

Опрацювання даних GPS-вимірювань **114**  
Оптичні методи спостережень ШСЗ **54**  
Орбіта **44**  
Орбітальна система координат **25**  
Ортометрична висота **37**  
Основне коло системи координат **26**

## **П**

Параболічна орбіта **44**  
Параметри Гельмерта **34**  
Пасивні ШСЗ **52**  
Перигей **46**  
Перманентна супутникова станція **87**  
Перша екваторіальна система координат **27**  
ПЗ-90 – Система геодезичних параметрів Землі **35**  
Планетоцентрична система координат **25**  
Планування спостережень **106, 112, 151**  
Польовий журнал **111**  
Полуденна лінія **24**  
Полюси Світу **23**  
Полярна орбіта **44**  
Постопрацювання **97**  
Початкова точка системи координат **26**  
Початкове коло системи координат **26**  
Поясний час **42**  
Пояснювальна записка **105**  
Прямовисна (вертикальна) лінія **22**  
Прямолінійна система координат **25**

Псевдостатика **102**

Псевдокінематика **102**

## **Р**

Радіотехнічні (радіоелектронні) спостереження ШСЗ **55**

Рекогностування **110**

Реокупаційна технологія **102**

Рівноденна система координат **26**

Роверна точка (станція) **95**

Роверний приймач **95, 161**

## **С**

Система відліку **25**

Система координат **25, 121**

Сегмент користувачів **72**

Середній сонячний час **41**

Середній південь **41**

Середня орбіта **44**

Середня система координат **26**

Середня північ **41**

Середня сонячна доба **41**

Середньоквадратична похибка **120**

Синхронно добова (геосинхронна) орбіта **45**

СК-42 – Система координат 1942 року **36**

СК-63 – Умовна система координат 1963 року **37**

Сонячна доба **39**

Сонячний час **40**

Сонячно синхронна (геліосинхронна) орбіта **45**

Спеціальні приймачі **72**

Статичний метод **99**

«Стій-іди» - метод вимірювання координат **101, 165**

Структура похибок GPS-вимірювань **75**

Супутникова геодезія **11**

Супутникоцентрична система координат **25**

Сферична система координат **26**

## **Т**

Телевізійні спостереження ШСЗ **55**

Технічний звіт **113**

Технічний проект **103**

Топоцентрична небесна сфера **22**

Топоцентрична система координат **25**

Точка висхідного вузла **45**

Точка весняного рівнодення **24**

Точка осіннього рівнодення **24**

Точки сонцестоянь **24**

Трилатерація **17**

Трисферація **17**

Триангуляція **17**

Тропічний рік **39**

## **У**

Умовна інерціальна система координат **30**

УСК-2000 – Державна геодезична референтна система координат **37**

## **Ф**

Фазові приймачі **73**

Фазові спостереження ШСЗ **55**

Фотографічні спостереження ШСЗ **54**

Фундаментальне рівняння супутникової геодезії **18**

## **Ц**

Циклон-Б **14**

ЦИКАДА **14**

## **Ш**

«Швидка статика» **99, 158**

Штанга **136**

Штучний супутник Землі (ШСЗ) **53**

## **Ч**

Частота L1, L2, L5 **68**

## ЛІТЕРАТУРА

1. Черняга Петро Гервазієвич. Супутникова геодезія: навч. посіб. / Черняга П.Г., Бялик І.М., Янчук Р.М. – Рівне: НУВГП, 2009. – 150 с.

2. Гофманн-Велленгоф Бернارد, Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. Переклад з англ. мови за ред. Акад. НАНУ Я.С. Яцківа, - К. : Наукова думка, 1996. - 380 с. - ISBN 5-12-004818-8 (укр.). - ISBN 3-211-82591-6 (англ.)

3. Геодезичний енциклопедичний словник. / За ред. Володимира Літинського – Львів: Євросвіт, 2001. – 668 с.: - ISBN 966 7343-23-5

4. Марков В.І. Основи космічної геодезії / В. Марков // Кіровоград-Москва:, 2002. – 235 с. - ISBN 966-95716-9-3

5. Неумывакин Ю.К. Геодезическое обеспечение землеустроительных и кадастровых работ. Справочное пособие / Ю.К. Неумывакин, М.И. Перский - М.: Картеоцентр, 1996. – 342 с. - ISBN 5-86066-024-3

6. Третьяк Корнелій Романович. Побудова геодезичних мереж супутниковими радіонавігаційними технологіями. / К.Р. Третьяк, О.В.Кучер, І.Б. Романишин. Рукопис, 2006. – 162 с.

7. Соловьев Юрий.Аарсеньевич. Системы спутниковой навигации. Издание для специалистов / Ю.А. Соловьев – М.: Эко-трендз, 2000. – 268 с. ISBN 5-88405-026-7

8. Курт Арнольд. Методы спутниковой геодезии / Ар-

нольд Курт; пер. с немец. ред. А.Н.Кузнецова - М.: «Надра», 1973. – 224 с.

9. Александров, Юрий Владимирович. Небесна механіка: підруч. для студ. ун-тів, які навч. за спец. "Астрономія" / Ю. В. Александров ; Харківський національний ун-т ім. В.Н.Каразіна. - Х.: ХНУ, 2004. - 236 - ISBN 966-623-261-8

10. Микиша Анатолий Михайлович. Космические методы в геодезии / Анатолий Микиша - М.: Знание., 1983. – 64с.

11. Генике Аркадій Александрович. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А.А. Генике, Г.Г. Побединский - М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с. - ISBN 5-86066-063-4

12. Шумаков Федір Терентійович. Супутникова геодезія. Конспект лекцій / Федір Шумаков – Харків: Хнамг., 2009. – 88 с.

13. Trimble 4800. Operation manual., Part number 33899-00, 1997 – 138 с.

14. Leica GPS1200. User manual., Version 6.0, English, - 148 с.

15. Leica GPS1200. System field manual., Version 5.0, English, - 212 с.

16. Trimble Geomatics Office. Руководство пользователя., Версия 1.50, Номер 39685-10-RUS, 2001. – 84 с.

17. Руководство пользователя программного обеспечения Leica Geo Office., Версия 1.0, Русская, 2004. – 76 с.

Навчальне видання

*Черняга Петро Гервазійович  
Бялик Ігор Миколайович  
Янчук Руслан Миколайович*

## **СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ**

*Навчальний посібник*

*Друкується в авторській редакції*

*Редакційно-видавничий відділ  
Національного університету  
водного господарства та природокористування  
33028, Рівне, вул. Соборна, 11*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного Реєстру видавців, виготівників і розповсюджу-  
вачів видавничої продукції РВ №31 від 26.04.2005р.*