

A satellite with a central gold-colored body and four large solar panel arrays is shown in space. The Earth's surface is visible below, showing a mix of blue oceans and brownish-green landmasses. The satellite's solar panels are dark blue with a grid pattern. The background is a deep black space.

**П.О. Сухий
В.І. Сабадаш
К.В. Дарчук**

Супутникова геодезія

УДК [528.5.621.38] (075,8)
С 912

Друкується за ухвалою вченої ради
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
(протокол № 5 від 22 квітня 2019 р.).

Рецензенти:

- Бондаренко Е. Л.** доктор географічних наук, професор кафедри геодезії та картографії (Київський національний університет ім. Т. Г. Шевченка);
- Перій С. С.** Доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії (Національний університет «Львівська політехніка»).

Сухий П. О.

С 912 Супутникова геодезія : навч.-метод. посібник / П. О. Сухий, В. І. Сабадаш, К. В. Дарчук. – Чернівці : Чернівецьк. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2020. 372 с.

ISBN 978-966-423-572-0

У пропонованому виданні розглянуто поняття про системи небесних і земних координат, системи виміру часу і зв'язки між ними, елементи та класифікацію орбіт штучних супутників Землі та основи теорії їх руху, технічні засоби та методи спостереження за ШСЗ, будову та принцип роботи глобальних і супутникових радіонавігаційних систем, структуру похибок GPS – спостережень, супутникові методи визначення координат, побудову та розвиток Державної геодезичної мережі з використанням супутникових радіонавігаційних систем, поняття про перманентні станції супутникових спостережень, методи визначення координат при GPS – спостереженнях, планування та проведення геодезичного знімання за допомогою GPS – приймачів, підготовку обладнання до польових супутникових спостережень та опрацювання даних GPS – спостережень.

У другій частині подано одинадцять лабораторних робіт, що доповнюють теоретичні відомості даного посібника.

Навчально-методичний посібник може використовуватися при вивченні курсів геодезичного спрямування студентами спеціальностей: «Геодезія та землеустрій», «Будівництво та цивільна інженерія», «Архітектура та містобудування», «Науки про Землю». Видання може бути корисним для спеціалістів у галузі геодезії, картографії, землеустрою та інших галузей.

УДК [528.5:621.38] (075.8)

ISBN 978-966-423-572-0

© П. О. Сухий, 2020
© В. І. Сабадаш, 2020
© К.В. Дарчук, 2020
© Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, 2020

ПЕРЕДМОВА

В останні півстоліття запуск штучних супутників якісно вплинув на хід наукових досліджень і вирішення практичних питань у галузі геодезії. Використання штучних супутників Землі привнесло в геодезію методи, що дозволяють вирішувати раніше нерозв'язні завдання, і надзвичайно розширило її можливості, причому супутникові методи збагатили як геометричну геодезію, так і фізичну - гравіметрію.

Одним із найважливіх і очевидних завдань була можливість створення єдиної геодезичної мережі, що охоплює всю земну кулю, а на перших кроках можливість геодезичного зв'язання континентів. Супутники, які рухаються на значних висотах, можуть спостерігатися одночасно з довгими віддалених пунктів, і таким чином можлива побудова триангуляції з дуже великими сторонами трикутників, у тисячу й більше кілометрів. Окрім того, спостерігаючи збурення (збурений рух) елементів орбіт супутників, можливим є визначення координат самого супутника, координат станцій спостереження й основних елементів гравітаційного поля. Відповідно виникли два методи супутникової геодезії: геометричний, в якому супутник використовується як пасивний елемент (супутник служить чимось на зразок сигналу в триангуляції) і орбітальний, або динамічний, в якому за збуренням елементів орбіти відшукуються сили, що призвели їх до збурення, тобто гравітаційне поле та відхилення його від норми, а за передобчисленими положеннями, що спостерігаються, уточнюються безпосередні координати самих станцій.

Так виникли методи тривимірної супутникової триангуляції, методи визначення центру мас Землі та координат з початком в ньому, з'явилася можливість зв'язку триангуляції окремих континентів і створення єдиної планетарної, а також побудови просторової геодезичної систем без необхідного раніше введення допоміжної відлікової поверхні у вигляді референц - еліпсоїда. Широкі перспективи відкрили супутники і в фізичній геодезії, яка вивчає гравітаційне поле і фігуру Землі. Вже перші спостереження збурення орбіт супутників дозволили уточнити стиснення Землі і визначити його значення на два порядки вище, ніж це дозволяли зробити гравіметричний або геометричний методи. Цей спосіб дає можливість також встановити головні виразні риси відхилення форми Землі від загального гравіметричного еліпсоїда; за його допомогою підтвердили і відкрили полярну і еквівалентну асиметрію Землі. Разом з тим надмірне захоплення супутниковою геодезією на перших порах, коли деякі фахівці вважали, що вона повністю замінить наземні методи, пройшло, і нині наука розвивається гармонійно, використовуючи і поєднує як наземні, так і супутникові методи.

В даний час методами супутникової геодезії розв'язують практичні задачі, пов'язані з побудовою на земній поверхні опорних геодезичних мереж, картографуванням земної поверхні, дослідженням гравітаційного поля Землі, вивченням фігури Землі і її динамічних характеристик.

Дисципліна «Супутникова геодезія» належить до професійно - орієнтованих предметів, і вивчає принципи визначення місцеположення точок

на поверхні Землі за допомогою глобальних радіонавігаційних супутникових систем, їх загальну будову та застосування. Зазвичай курс «Супутникова геодезія» вивчають на старших курсах. Вивченню курсу передують вивчення окремих теоретичних питань з фізики, вищої математики, електронних геодезичних приладів та GPS – технологій, радіоелектроніки та вищої геодезії.

Необхідність видання навчально - методичного посібника зумовлена тим, що у геодезичному виробництві останніми роками впроваджена достатня кількість супутникових комплексів приймачів різних фірм-виробників. Знання основних принципів роботи, технології виконання робіт із визначення координат точок є необхідною умовою якісного виконання геодезичних робіт, у тому числі і для вирішення землевпорядних задач.

Навчальний посібник складається із двох частин. Першої, що містить теоретичні відомості та другої - лабораторного практикуму.

У двох розділах теоретичної частини висвітлено мету, структуру, предмет та завдання курсу, поняття про системи координат і часу, закони руху штучних супутників Землі, технічні засоби та методи спостереження за ШСЗ, будову та принцип роботи супутникових радіонавігаційних систем, супутникові методи визначення координат, створення геодезичних мереж супутниковими методами, планування та проведення геодезичного знімання за допомогою GPS – приймачів, підготовку обладнання до польових супутникових спостережень та опрацювання даних GPS – спостережень. У кінці кожного із параграфів приведено питання для самоконтролю знань, завдання для самостійної роботи та рекомендовану літературу щодо підготовки до занять.

У другій частині подано одинадцять лабораторних робіт, що доповнюють теоретичні відомості першої частини даного посібника.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до навчальної програми дисципліни «Супутникова геодезія» спеціальності 193 – Геодезія та землеустрій. Разом із тим він може бути корисний спеціалістам-геодезістам при здійсненні виробничої діяльності.

Автори висловлюють вдячність рецензіям д. фізико-математичних наук, професору завідувачу кафедри аерокосмічної геодезії Національного авіаційного університету Железняку О. О. та завідувачу кафедри геодезії НУ «Львівська політехніка» к. тех. н., доценту Перію С. С.

Усі конструктивні та критичні зауваження автори приймають із вдячністю.

ЧАСТИНА I. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

РОЗДІЛ I. СИСТЕМИ КООРДИНАТ І ЧАСУ. ЗАКОНИ РУХУ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

§1. Предмет та завдання супутникової геодезії

1.1. Супутникова геодезія та її місце серед інших наук

Супутникова геодезія (англ. satellite geodesy; нім. Satellitengeodäsie) – розділ геодезії, який використовує результати спостережень штучних супутників Землі та інших космічних об'єктів для визначення координат точок земної поверхні, уточнення параметрів гравітаційного поля Землі, а також визначення взаємоположення віддалених островів та материків та для розв'язання наукових і науково-технічних задач геодезії. Спостереження супутників, а саме фотографування їх на тлі зірок спеціальними камерами або вимірювання дальності і швидкості супутника за допомогою радіотехнічних і лазерних пристроїв, дозволяють визначати координати пунктів і напрям хорд земної поверхні (геометричні задачі), уточнювати параметри, що характеризують гравітаційне поле Землі (динамічні задачі).

У 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, як зазначалося є розділом вищої геодезії, яка, в свою чергу, формує комплекс геодезичних наук. Вона також тісно пов'язана з окремими розділами фізики (механікою, оптикою, радіоелектронікою та іншими), математикою (надзвичайно широкий спектр розділів), астрономією, інформатикою, програмуванням, геоінформатикою, науками про Землю та іншими точними, технічними і природничими науками.

Супутникова геодезія має міждисциплінарні зв'язки з наступними дисциплінами (рис. 1.1)



Рис. 1. 1. Міждисциплінарні зв'язки предмету.

Результати отримані супутниковою геодезією нині активно використовуються для вирішення наукових завдань, в економіці, зокрема, при топографо - геодезичному зніманні територій, землевпорядкування, будівництва, створення ГІС тощо. Таким чином можна стверджувати про її прикладне значення.

До сучасних засобів супутникової геодезії належать:

- геодезичне використання існуючих глобальних супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo);
- лазерно-супутникова техніка (SLR, ICESat);
- радар InSAR, радари супутникових систем Seasat, Geosat, TOPEX/Poseidon, ERS-1, ERS-2, Jason -1, Envisat;
- орбітальна система CHAMP стеження для визначення гравітаційного поля Землі;
- системи для відстеження характеристик траєкторії власне супутника — GOCE, GRACE.

1.2. Предмет і завдання супутникової геодезії

Предметом супутникової геодезії є теорія використання, штучних супутників Землі (ШСЗ) та інших літальних космічних апаратів 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 в залежності 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. З-поміж основних завдань можна виокремити:

1. Визначення фундаментальних сталих, які характеризують форму, розміри та добовий рух Землі та зміну цих сталих у часі.

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

3. Координатно-часову прив'язку результатів космічного знімання Землі та планет для дослідження природних ресурсів і космічного картографування.

Похідними від вище зазначених завдань є:

- визначення взаємного положення пунктів у даній системі координат;
- визначення положення референс - 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 досягнення супутникової геодезії активно використовуються для вирішення прикладних інженерно-геодезичних завдань, із-поміж яких:

1. Побудова планових опорних геодезичних мереж.
2. Створення планової ущільненої мережі для вирішення різних геодезичних задач.
3. Використання супутникових спостережень при виконанні землепорядних та кадастрових робіт.
4. Вирішення низки задач за допомогою методів дистанційного зондування Землі.
5. Топографічне знімання для створення планів і карт різних масштабів.
6. Геодезичний моніторинг населених пунктів та унікальних об'єктів для визначення деформаційних процесів на їх територіях і в самих спорудах.

1.3. Етапи розвитку супутникової геодезії

Перші праці, що відносять до космічної геодезії, були опубліковані в другій половині XVIII століття. Так у 1768р. Йоганном Ейлером була видана праця, в якій вказувалось на можливість визначення параметрів земного еліпсоїда з використанням зенітних відстаней Місяця з пунктів, розташованих на одному меридіані. До середини XX століття були розроблені методи, засновані на використанні Місяця та планет Сонячної системи для визначення координат точок, що значно віддалені між собою, проте ці методи давали можливість визначати координати з точністю до 100 м. Така точність була на той час недостатньою для вирішення геодезичних задач.

У 1949 році фінським геодезистом Ю. Вайсялем було розроблено принципи побудови триангуляції шляхом фотографування спалахів світла на тлі зірок. Для цього джерело світла піднімали на значну висоту літаком, аеростатом або ракетою і за командою з Землі віно випромінювало 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 визначити 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 колишньому Радянському Союзі було запущено перший штучний супутник Землі. З цього моменту почалася не лише ера освоєння космосу людиною, але й бурхливий розвиток космічної геодезії. Так, уже 14 серпня 1959 року американським супутником " Explorer 6" було зроблено перший космічний знімок Землі, а на початку 60-х років XX століття в США почала створюватись навігаційна система першого покоління TRANSIT на базі низькоорбітальних супутників. Вона почала функціонувати вже з 1967 р. і дозволяла визначати координати об'єктів із субметровою точністю. В 1976 р. в СРСР була створена військова система "Циклон-Б", а у 1979 р. цивільна система "ЦИКАДА", які дозволяли визначати місцеположення з точністю 50 - 100 метрів. Справжню революцію в космічній геодезії здійснили супутникові

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
	5
ЧАСТИНА I. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.	
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ КООРДИНАТ І ЧАСУ. ЗАКОНИ РУХУ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ	5
§ 1. Предмет та завдання супутникової геодезії	5
1.1. Супутникова геодезія та її місце серед інших наук	5
1.2. Предмет та завдання супутникової геодезії	6
1.3. Етапи розвитку супутникової геодезії	7
1.4. Методи супутникової геодезії	8
§ 2. Системи небесних та земних координат	13
2.1. Поняття про небесну сферу	13
2.2. Поняття про системи координат та відліку	15
2.2.1. Сферичні системи координат	18
2.2.2. Системи координат для визначення положення точок на поверхні Землі	19
2.2.3. Земна геоцентрична система координат	20
2.2.4. Умовна інерціальна система координат	21
2.2.5. Перетворення координат різних систем координат	22
2.2.6. Геоцентрична система координат WGS -84	24
2.2.7. Система геодезичних параметрів Землі ПЗ-90	24
2.2.8. Системи координат, що використовуються в Україні	25
2.3. Системи висот	28
2.4. Перетворення деяких систем координат та висот	28
2.4.1. Перетворення систем координат	28
2.4.2. Перетворення висот	31
§ 3. Системи відліку часу і зв'язки між ними	32
3.1. Одиниці вимірювання часу	32
3.2. Системи вимірювання часу	33
3.3. Системи відліку часу: всесвітній, поясний, декретний, атомний часи	34
3.4. Динамічний та ефемеридний час. Календар	36

§ 4. Елементи, класифікація орбіт та основи теорії руху штучних супутників Землі	37
4.1. Поняття орбіти та ефемериди орбіти	37
4.2. Класифікація орбіт штучних супутників Землі	37
4.3. Елементи орбіти штучних супутників Землі	50
4.4. Обчислення координат супутника	51
4.5. Поняття про незбурений рух штучних супутників Землі. Закони Кеплера	52
4.6. Збурюючі фактори	55
4.7. Диференціальні рівняння збуреного руху штучних супутників Землі	56
4.8. Елементарний вивід рівняння руху супутника	57
4.9. Обчислення незбуреної ефемериди та визначення попередніх елементів орбіти за спостереженнями супутників	62
§ 5. Технічні засоби та методи спостереження за штучними супутниками Землі	64
5.1. Класифікація методів спостережень штучних супутників Землі	64
5.1.1. Оптичні методи спостережень	64
5.1.2. Радіотехнічні спостереження	70
5.1.3. Допплерівські спостереження	70
5.2. Умови радіовидимості супутників	72
РОЗДІЛ 2.	
СУПУТНИКОВІ РАДІОНАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ	
	74
§ 6. Глобальні радіонавігаційні системи	74
6.1. Поняття про супутникові радіонавігаційні системи	74
6.2. Відомості з будови глобальних позиційних супутникових систем	75
6.2.1. Космічний сегмент	76
6.2.2. Структурна схема супутникового передавача системи GPS	103
6.2.3. Контрольний сегмент (сегмент управління)	105
6.2.4. Сегмент користувача	113
6.3. Абсолютні та відносні методи координатних визначень.	120
§ 7. Структура похибок GPS - спостережень	123
7.1. Загальна характеристика похибок при GPS - вимірюваннях	123
7.1.1 Похибки обумовлені сузір'ям супутників, критерії їх оцінки	125
7.1.2. Похибки, обумовлені зовнішніми умовами	126
7.4. Похибки, обумовлені GPS – приймачем (інструментальні джерела похибок)	138

§ 8. Побудова та розвиток Державної геодезичної мережі України з використанням супутникових радіонавігаційних систем.	
Перманентні станції супутникових спостережень	141
8.1. Застосування супутникових радіонавігаційних систем для побудови геодезичних мереж	141
8.1.1. Планова і висотна геодезична основа для розвитку супутникових геодезичних мереж.	153
8.1.2. Схеми побудови супутникових мереж	155
8.2. Принципи побудови міської геодезичної мережі з використанням супутникових технологій	159
8.3. Особливості робіт при позацентровій установці супутникових приймачів	164
8.4. Поняття про мережі перманентних станцій та використання їх даних при супутникових спостереженнях	170
8.5. Укргеокосмосмережа, її основні компоненти	186
8.5.1. Мережа станцій лазерної локації супутників (ЛЛС - мережа)	187
8.5.2. Станція довгобазової радіоінтерферометрії (РНДБ - станція)	193
§ 9. Методи визначення координат при GPS - спостереженнях	197
9.1. Загальні принципи та класифікація технологій визначення координат точок за допомогою GPS – спостережень	197
9.2. Диференціальні методи GPS - спостережень	200
9.2.1. Статичний метод	200
9.2.2. Визначення координат методом швидкої статики	202
9.2.3. Кінематичний метод	203
9.2.4. Метод «стій-іди»	204
9.3. Кінематика в режимі реального часу (RTK – Real Time Kinematics)	207
9.4. Псевдостатична, псевдокінематична та реокупаційна технології	208
9.5. Знімання ситуації рельєфу із застосуванням супутникової технології	213
§ 10. Проектування та планування геодезичних робіт при супутникових спостереженнях	216
10.1. Загальний порядок та специфіка планування і організації робіт супутникових спостережень	216
10.2. Складання технічного проекту	216
10.2.1. Зміст технічних проектів, основні розділи.	216
10.2.2. Вимоги до складання технічного проекту із застосуванням GPS – технологій.	218
10.3. Передпольове планування в камеральних умовах	221
10.4. Рекогностування та обстеження пунктів, закладка центрів	222
10.5. Складання робочого проекту.	224

§ 11. Підготовка обладнання до польових супутникових спостережень.	227
11.1 Вимоги до супутникових приймачів.	227
11.2 Метрологічне забезпечення.	227
11.2.1 Визначення похибки вимірювання лінійних базисів залежно від тривалості спостережень при статичному методі	229
11.2.2. Визначення похибок вимірювання лінійних базисів в псевдокінематичному методі	230
11.2.3. Визначення похибок вимірювань збільшень координат у статичному методі за нев'язками в замкнених фігурах	230
11.2.4. Визначення похибок вимірювань координат методом «кінематика в режимі реального часу» (RTK)	230
11.3. Перевірка приймачів безпосередньо перед спостереженням	231
11.4. Організація базових станцій (в тому числі і отримання доступу до найближчої перманентної станції)	232
11.5. Закладання центрів (тимчасових роверних точок).	233
11.6. Ведення польового журналу.	234
11.7. Програми планування GPS– спостережень.	234
11.8. Складання технічного звіту та складання необхідної документації	236
§ 12. Опрацювання даних GPS - спостережень	238
12.1. Загальний порядок та завдання, що виникають при опрацюванні даних GPS - спостережень	238
12.2. Опрацювання даних GPS - спостережень із застосуванням спеціальних програмних продуктів	240
12.3. Оцінка точності GPS - спостережень	243
12.4. Практичні поради, щодо камеральної обробки даних GPS вимірювань	243
12.5. Загальні відомості про програмне забезпечення для обробки результатів супутникових вимірювань.	249
ЧАСТИНА II. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ	253
Вступ. Загальні методичні вказівки	253
Лабораторна робота № 1. Системи координат супутникової геодезії	254
Лабораторна робота № 2. Визначення координат супутника за елементами його орбіти	260
Лабораторна робота № 3. Визначення елементів незбуреної орбіти супутника	263
Лабораторна робота № 4. Підготовка даних для спостережень супутника	267

Лабораторна робота № 5. Визначення сферичних координат супутника за даними фотографічного методу спостережень	272
Лабораторна робота № 6. Визначення полярного стиснення Землі методами супутникової геодезії	278
Лабораторна робота № 7. Структура та призначення глобальної системи визначення місцеположення (GPS)	283
Лабораторна робота № 8. Планування геодезичного знімання GPS – методом	286
Лабораторна робота № 9. Вивчення будови та налаштування GNSS-приймача ProMark 100	293
Лабораторна робота № 10. Обробка навігаційних повідомлень GPS – спостережень для визначення геоцентричних координат супутника.	324
Лабораторна робота №11. Ознайомлення з програмним пакетом «GNSS Sollutions» та обробка в його середовищі результатів зйомки в статичному режимі	329
ГЛОСАРІЙ	346
АНГЛОМОВНІ ТЕРМІНИ І СКОРОЧЕННЯ	354
ДОДАТКИ	357
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	363

Навчальне видання

П.О. Сухий, В.І. Сабадаш, К.В. Дарчук

СУПУТНИКОВА ГЕОДЕЗІЯ

Навчально-методичний посібник

Літературний редактор *Лукул О.В.*

Технічний редактор
та дизайн обкладинки *Кудрінська О.М.*

Підписано до друку 08.09.2020. Формат 60 x 84/16.

Папір офсетний. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 20,4.

Обл.-вид. арк. 21,9. Тираж 50. Зам. Н-044.

Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету
58002, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 891 від 08.04.2002 р.