

УДК 528.3

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТРОПОСФЕРНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗ СУМІСНИХ ДАНИХ GNSS І SLR СПОСТЕРЕЖЕНЬ

**А. Хоптар**

Національний університет “Львівська політехніка”

**Ключові слова:** космічна геодезія, глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), лазерна локація штучних супутників Землі (SLR), спільний розв’язок.

### Постановка проблеми

Вимоги до точності визначення геодезичних параметрів постійно зростають з розвитком прикладних і фундаментальних досліджень у різних сферах астрономії, геодинаміки, геофізики, а також багатьох практичних додатків у геодезії, космонавтиці, вивченні природних катаклізмів і в кліматології. На сучасному етапі дослідження системи Землі визначаються як комбінації багатьох глобальних і регіональних розв’язків, отриманих за допомогою різних методів космічної геодезії. Однак ці методи чутливі до різних глобальних параметрів Землі. Їх поєднання дає змогу отримати нові дані про явища і процеси за умови одержання спільного розв’язку, який враховує усі наявні дані спостережень кожного з окремих методів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Протягом останніх кількох десятиліть опубліковано чимало праць, в яких досліджується проблема комбінації різних методів космічної геодезії, а саме [1–3]. Зокрема, така інформація використовується для підвищення точності реалізації земної та небесної систем координат, оцінок параметрів обертання Землі (ПОЗ), отримання даних спостережень для аналізу змін геодинамічних параметрів, вивчення та моніторингу процесів, що відбуваються у тропосфері та іоносфері Землі, вивчення руху літосферних плит тощо.

### Виклад основного матеріалу

Космічна геодезія – це розділ геодезичної науки, який для вивчення поверхні Землі, її деформації, орієнтації, гравітаційного поля, а також атмосфери застосовує спостереження штучних і природних супутників Землі та інтерферометричні спостереження позагалактичних об’єктів [4].

Основні завдання космічної геодезії такі:

– високоточне визначення геометричних тривимірних координат і швидкостей (у глобальних, регіональних і місцевих системах відліку);

– визначення гравітаційного поля Землі та його тимчасових варіацій;

– моделювання геодинамічних явищ (рух тектонічних плит, деформації земної кори), зокрема параметрів обертання Землі (рух полюсів, обертання Землі, прецесія і нутація).

Основною умовою розв’язання цих задач є наявність загальної системи відліку, відносно якої і виконуються необхідні вимірювання.

Крім того, космічна геодезія робить істотний внесок у метеорологію, вивчаючи вплив атмосфери на земну поверхню.

Сьогодні космічна геодезія забезпечується такими основними методами спостережень:

– глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS);

– лазерна локація супутників (SLR) і Місяця (LLR);

– радіоінтерферометрія з наддовгою базою (VLBI);

– системи доплерівської орбітографії супутників (DORIS);

– супутникова альтиметрія;

– супутникова гравіметрія тощо.

Кожен з цих методів виконує певне коло завдань. На основі аналізу робіт [1–3] можемо узагальнити можливості кожного з вибраних методів. Табл. 1 дає загальне уявлення про чутливість кожного з них для визначення геодезичних параметрів.

У табл. 1 позначено: “+” – параметри, які потенційно можливо визначити цим вимірювальним засобом; “++” – параметри, регулярно одержувані у результаті оброблення відповідних вимірювань у центрах аналізу; “+++” – параметри, для яких вказаний метод є основним.

Револьюційну роль у розвитку геодезії, зокрема методів визначення місцеположення географічних об’єктів, відіграла поява глобальних супутникових радіонавігаційних систем координатно-часового забезпечення типу GPS (США) та ГЛОНАСС (Росія), що згодом отримали узагальнену назву GNSS. За їх допомогою уможливилось визначення з високою точністю і оперативністю координат пунктів спостережень, зокрема їхньої висотної складової.

GNSS – це комплексна електронно-технічна система, що складається із сукупності наземного та космічного обладнання та призначена для позиціонування, визначення точного часу та параметрів руху (швидкості та напрямку руху) для наземних, водних та повітряних об'єктів [5].

Використання GNSS для розв'язання геодезичних задач є найпоширенішим і масовим методом у геодезії.

До глобальних навігаційних супутникових систем належать: GPS, ГЛОНАСС, Galileo та система Compass.

Таблиця 1

## Застосування сучасних методів космічної геодезії

ICRF	№	Параметри, що визначаються	GNSS	SLR	LLR	VLBI	DORIS	Супутникова альтиметрія	Супутникова гравіметрія	Обертання Землі
ICRF	1	Координати звазрів				+++				Обертання Землі
	2	Параметри нутації	+	+	++	+++				
	3	Рух полюсів	+++	++	+	++				
ITRF	4	Всесвітній час			++	+++				Гравітаційне поле
	5	Тривалість доби	+++	+++	+	++	++			
	6	Координати та швидкості станцій	+++	+++	++					
Атмосфера	7	Положення геоцентра	++	+++	+		++		+	Гравітаційне поле
	8	Гравітаційне поле	++	+++	+		++	+	+++	
	9	Гравітаційна стала	+	+++	++		+			
	10	Орбіти супутників	+++	+++	+++		+++	++	++	
	11	Амплітуди океанічних хвиль	++	++		++		+++	++	
	12	Тропосферні параметри	+++	+	+	++	++	++		
	13	Іоносферні параметри	+++			++	++	++	++	
	14	Параметри годинників	+++	+++		++				

Принцип дії GNSS полягає у вимірюванні відстані від антени на об'єкті спостережень (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких в поточний проміжок часу відоме з високою точністю. На рис. 1 зображено схематично принцип реалізації цього методу.

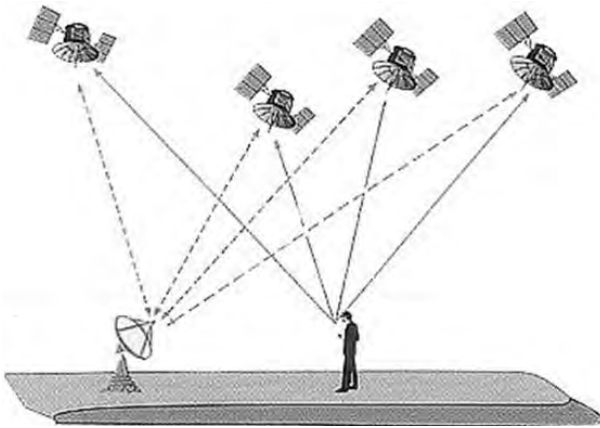


Рис. 1. Принцип роботи GNSS

Беручи до уваги всі поправки, необхідні для спостережень на станції A супутника S, загальне рівняння цього методу матиме такий вигляд:

$$\Delta\tau_R^{S,GNSS} = \left| r_i^S - R r_{e,R} \right| + c \cdot \delta t_R - c \cdot \delta t^S + \delta_{trop,R}^S + \delta_{ion,R}^S + \delta_{phas,R}^S + \delta_{rel,R}^S + \delta_{mult,R}^S + \epsilon_R^S \quad (1)$$

де  $Dt_R^{S,GNSS}$  – кодові чи фазові спостереження супутника S станцією R;  $c$  – швидкість світла;  $r_i^S$  – положення супутника S в інерціальній системі відліку (параметри орбіти, коефіцієнти гравітаційного поля);  $r_{e,R}$  – положення станції R у геоцентричній системі відліку (координати станції);  $R$  – матриця обертання Землі (параметри орієнтації Землі);  $dt_R$  – похибка годинника на станції R (параметри годинника на станції);  $d_{trop,R}^S$  – затримка сигналу за тропосферу (тропосферні параметри);  $d_{ion,R}^S$  – затримка сигналу за іоносферу (іоносферні параметри);  $d_{rel,R}^S$  – релятивістські поправки;  $d_{phas}^S$  – похибка зміщення фазового центра супутника та приймача;  $d_{mult}^S$  – вплив багатошляховості променя;  $e_R^S$  – похибка вимірювань.

Урахування усіх членів у рівнянні GNSS-спостережень дає змогу отримувати високоточні геодезичні параметри.

SLR спостереження полягають у вимірюванні відрізка часу, протягом якого надкороткий лазерний імпульс подорожує від наземної станції до супутника та у зворотному напрямі [6]. На рис. 2 зображено схематично принцип роботи системи SLR.

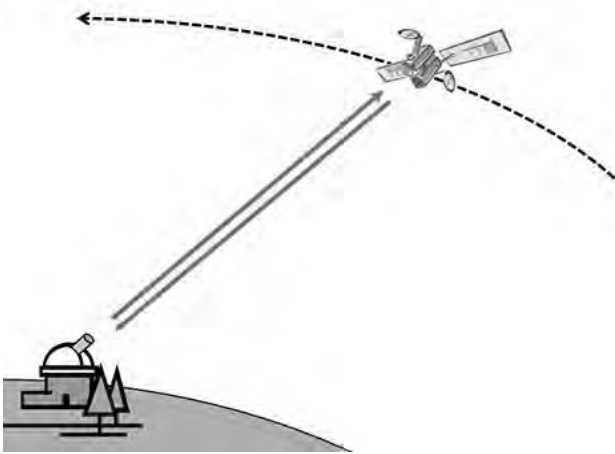


Рис. 2. Принцип роботи системи SLR

Основна спостережувана величина в SLR – виміряна різниця часу проходження лазерного імпульсу від станції R до супутника S і назад. Множення цього часового інтервалу на швидкість світла дає двосторонню відстань між станцією і супутником. Проте необхідно враховувати корекції за рахунок різних впливів на цей метод. В результаті загальне рівняння цього методу виглядатиме так:

$$\frac{1}{2}c\Delta t_R^{S,SLR} = \left| r_i^S - Rr_{e,R} \right| + d_{trop,R}^S + d_{rel,R}^S + d_{bias,R}^S + d_{CoM,R}^S + e_A^S \quad (2)$$

$Dt_R^{S,SLR}$  – час проходження імпульсом шляху станція R – супутник S – станція R;  $c$  – швидкість світла;

$r_i^S$  – положення супутника S в інерціальній системі відліку (параметри орбіти, коефіцієнти гравітаційного поля);  $r_{e,R}$  – положення станції R у геоцентричній системі відліку (координати станції);  $R$  – матриця обертання Землі (параметри орієнтації Землі);  $d_{trop,R}^S$  – затримка сигналу за тропосферу (тропосферні параметри);  $d_{rel,R}^S$  – релятивістські поправки;  $d_{bias,R}^S$  – систематична похибка лазерного віддалеміра;  $d_{CoM,R}^S$  – поправка за незбіг центра мас супутника і відбивача;  $e_R^S$  – похибка вимірювань.

Накопичивши достатню кількість різниць спостережуваної та обчисленої топоцентричних віддалей, можна розв’язати задачу про побудову внутрішньо узгоджених параметрів (системи елементів орбіт ШСЗ, ПОЗ, координат локаційних станцій тощо) за допомогою методу диференційних поправок.

З рівнянь (1) та (2) бачимо, що супутникові спостереження можна використовувати для дослідження гравітаційного поля Землі із аналізом змін положення геоцентра. Усі рівняння містять координати станцій та параметри орієнтації Землі, отже, обидва методи застосовні для реалізації земної системи координат та отримання рядів ПОЗ.

Зведену інформацію про параметри, що оцінюються методами GNSS та SLR, подано в табл. 2.

Таблиця 2

**Параметри, одержувані з опрацювання GNSS і SLR спостережень**

		GNSS	SLR
<i>Загальні параметри</i>			
Глобальні параметри	Параметри нутації	$\Delta y, \Delta e$	×
	Рух полюсів	$x_p, y_p$	×
	Всесвітній час	UT1	×
	Тривалість доби	LOD	×
	Положення геоцентра	$x_g, y_g$	×
	Гравітаційне поле	GM	×
Локальні параметри	Координати станцій	$r_{e,R}$	×
	Параметри тропосфери	$d_{trop,R}^S$	×
	Параметри іоносфери	$d_{ion,R}^S$	×
	Параметри антени	$d_{phas,R}^S, d_{mult,R}^S, d_{CoM,R}^S$	×
	Релятивістський ефект	$d_{rel,R}^S$	×
<i>Незалежні параметри</i>			
Параметри годинників		$dt_R, dt^S, d_{bias,R}^S$	×
Орбіти супутників		$r_i^S$	×

Можливість визначення спільного розв'язку за даними різних методів космічної геодезії зумовлена наявністю параметрів, спільних для кожного з методів спостережень. Можна виділити три випадки [7]:

1) ідентичні параметри (наприклад, ПОЗ, швидкості станцій);

2) неідентичні параметри (наприклад, положення станцій на пунктах колокації). В такому випадку, задля об'єднання, необхідно використовувати дані геодезичної прив'язки для зв'язку координат станцій різних методів спостережень на пунктах колокації;

3) унікальні параметри, характерні лише для одного типу спостереження (наприклад, положення квазарів для VLBI або постійні поправки для SLR).

Затримки за тропосферу неоднакові для різних методів внаслідок того, що спостереження проводяться в різних діапазонах [3]. З основних технологій космічної геодезії, SLR зазнає найменшого впливу від варіацій променя в атмосферному каналі. Порівняно із мікрохвильовими частотами, використовуваними в GNSS-техніках, SLR оптичні частоти нечутливі до двох найдинамічніших компонент затримки проходження через атмосферу, тобто іоносфери та розподілу водяної пари. Отже, так звана "суха компонента" атмосфери є головним внеском в похибки проходження SLR сигналу [8].

У результаті математичних маніпуляцій над рівняннями (1) та (2) можемо виразити величину затримки сигналу за тропосферу у такому вигляді:

$$\begin{aligned} d_{trp,R}^S = & \frac{1}{2}(c\Delta t_R^{S,GNSS} + \frac{1}{2}c\Delta t_R^{S,SLR} - \\ & - |r_i^{S,GNSS} - Rr_{e,R}| + cdt^{S,GNSS} - cdt_R - \\ & - d_{ion,R}^{S,GNSS} - d_{phas,R}^S + -d_{mult,R}^S - e_R^{S,GNSS} - \\ & - |r_i^{S,SLR} - Rr_{e,R}| - d_{bias,R}^S - d_{COM,R}^S - \\ & - d_{rel,R}^{S,SLR} - e_A^{S,SLR}). \end{aligned} \quad (3)$$

### Висновки

Переваги сучасних методів космічної геодезії розкриваються повною мірою за умови отримання спільних розв'язків за результатами одночасних спостережень.

У цій статті наведена загальна характеристика GNSS та SLR методів космічної геодезії. На основі рівнянь цих методів запропоновано методику комбінування GNSS і SLR задля визначення параметрів тропосфери. Багаторічний досвід аналізу спостережень і комбінацій дає змогу отримувати точні геодезичні продукти. Запропонований метод повинен бути оснований на використанні геодезичних даних для моделювання тропосферних параметрів, без втрати точності та з реалізацією, близькою до реальності.

### Література

1. Thaller D. Inter-technique combination based on homogeneous normal equation systems including

station coordinates, Earth orientation and troposphere parameters // Scientific Technical Report STR08/15, 2008. – 136 p.

- Seitz M. Kombination geodatischer Raumb Beobachtungsverfahren zur Realisierung eines terrestrischen Referenzsystems. Deutsche Geodätische Kommission, München, 2009. – 163 p.
- Литвин М. О. Спільна обробка GPS-, РНДБ- і лазерних спостережень для досліджень динаміки Землі: дис.... канд. фіз.-мат. наук : 01.03.01 / М. О. Литвин. – К., 2008. – 111 с.
- Seeber G. Satellite Geodesy, 2nd edn. de Gruyter, 2003.
- Beutler G. Die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG) und ihre Neuorganisation // Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 99(3):124–128, 2001.
- Суберляк В. П. Розробка та створення програмно-апаратного комплексу для високоточної локації ШСЗ: дис... канд. фіз.-мат. наук: 01.03.01 / В. П. Суберляк. – К., 2002. – 142 с.
- Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей / Е. Г. Бойко, Б. М. Кленицкий, И. М. Ландис, Г. А. Устинов. – М. : Недра, 1977. – 376 с.
- Degnan J. Millimeter accuracy satellite laser ranging: a review // Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, 1993. – P. 133–162.

### Методика визначення тропосферних параметрів із сумісних даних GNSS і SLR спостережень

А. Хоптар

У роботі наведено загальні характеристики двох методів космічної геодезії (GNSS і SLR), а також проаналізовано принципи створення спільних розв'язків задля визначення тропосферних параметрів.

### Методика определения тропосферных параметров с совместных данных GNSS и SLR наблюдений

А. Хоптарь

В работе приведены общие характеристики двух методов космической геодезии (GNSS и SLR), а также проанализированы принципы создания совместных решений для определения тропосферных параметров.

### Method of determining the tropospheric parameters from compatible data of SLR and GNSS observations

A. Khoptar

This paper presents the general characteristics of the two methods of space geodesy (GNSS and SLR), as well as analyzes the principles of creating common solutions in order to determine tropospheric parameters.