

АНАЛІЗ ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ З ОБРОБКИ ЛАЗЕРНИХ ВІДДАЛЕЙ ДО ШСЗ ЛАГЕОС

Цюпак І.М.

(Державний університет "Львівська політехніка")

Міжнародна програма MERIT мала на меті порівняння точності визначення параметрів обертання Землі всіма можливими способами спостережень [5]. Параметри обертання Землі (ПОЗ), визначені за результатами лазерних спостережень ШСЗ Лагос виявилися одними з найточніших. Досягнення такої точності визначення ПОЗ зумовлено як високою точністю лазерних вимірів, так і точністю моделі руху супутника Лагос [8]. Виходячи з цього можна ставити питання про оцінку часових варіацій ПОЗ - швидкостей та прискорень їх зміни - за результатами лазерних спостережень ШСЗ Лагос. Визначення таких варіацій є можливим, якщо значення швидкостей і прискорень ПОЗ безпосередньо використовуються в моделях перетворень координат та руху супутника.

Алгоритм визначення ПОЗ з обробки лазерних спостережень ШСЗ Лагос, запропонований у роботах [2, 3], передбачає повне врахування збурень від неточності початкового наближення значень ПОЗ в моделі руху ШСЗ. Відповідний алгоритм для визначення швидкостей і прискорень ПОЗ наведено в роботі [4], який також реалізований на базі програмного пакету ГЕОРАН [1].

Спостереження основної кампанії MERIT тривали 14 місяців. На цьому проміжку часові варіації ПОЗ визначалися з обробки 49506-ти нормальних точок лазерних спостережень супутника Лагос, отриманих з 30-ти станцій. Набір координат станцій, якими фіксувалися осі земної системи координат, запозичено з роботи

Монтага та інш. [10].

З обробки вищезгаданого масиву спостережень було отримано декілька розв'язків для часових варіацій ПОЗ у різних варіантах. Комбінації параметрів у розв'язках наведено в таблиці 1 (x_p, y_p - координати полюса, через t позначено різницю ($UTIR - UTC$)). У назві розв'язків, наприклад LPI86L06, позначено: LPI - Lviv Polytechnical Institut; 86 - рік отримання розв'язку; L (Satellite Laser Ranging) - спосіб спостережень, за якими отримано розв'язок; 06 - номер розв'язку. Зазначимо, що результати розв'язку LPI86L07 були представлені на Всесоюзній нараді "Алгоритмическое и программное обеспечение теории движения ИСЗ" в Ленінграді у 1990 р. [4].

За даними вимірів, виконаних в рамках програми MERIT, лише в обсерваторії в Шанхаї (Китай) було зроблено оцінку швидкості координат полюса за лазерними віддальми до супутника Лагос [9]. Тому для аналізу і порівняння розв'язків, наведених у таблиці 1, обчислені швидкості та прискорення ПОЗ за допомогою інтерполяційних сплайн-функцій за даними координат полюса та різниць часу ($UTIR - UTC$) міжнародного бюро часу (BIH) [6, 7].

Аналіз, здійснений у даній роботі, полягає у порівнянні:

- 1) середніх значень швидкостей та прискорень ПОЗ для розв'язків, наведених у таблиці 1, розв'язку SHA85L01 та обчислених за даними BIH (табл. 2);
- 2) середніх та середніх квадратичних відхилень

Таблиця 1.

Розв'язки ПОЗ та їх часових варіацій

Розв'язок	x_p	y_p	t	$\dot{x}_p$	$\dot{y}_p$	DR	$\ddot{x}_p$	$\ddot{y}_p$	$\ddot{t}$
LPI86L06	+	+	+	+	+	+			
LPI86L07				+	+	+			
LPI86L08				+	+				
LPI86L09							+	+	+
LPI86L10							+	+	
LPI86L11	+	+		+	+		+	+	
LPI86L12				+	+	+	+	+	+

Таблиця 2.

Середні значення часових варіацій ПОЗ на період основної кампанії MERIT.

Розв'язок	$(\dot{x}_p)_{cp}$	$(\dot{y}_p)_{cp}$	$(DR)_{cp}$	$(\ddot{x}_p)_{cp}$	$(\ddot{y}_p)_{cp}$	$(\ddot{i})_{cp}$
	$1'' \cdot 10^{-3} / \text{добу}$		мс	$1'' \cdot 10^{-3} / (\text{добу})^2$		мс / $(\text{добу})^2$
ВІН	-0.129	-0.112	1.673	-0.002	0.003	-0.0007
SHA85L01	-0.686	1.269	-	-	-	-
LPI86L06	-0.096	-0.033	1.684	-	-	-
LPI86L07	-0.078	-0.059	1.684	-	-	-
LPI86L08	-0.078	-0.059	-	-	-	-
LPI86L09	-	-	-	-0.033	0.097	0.0030
LPI86L10	-	-	-	-0.029	0.114	-
LPI86L11	-0.031	-0.202	-	-0.018	0.271	-
LPI86L12	-0.024	-0.087	1.691	-0.043	0.157	-0.0014

Таблиця 3.

Середні та середні квадратичні відхилення швидкостей ПОЗ від даних ВІН на період основної кампанії MERIT (в мілісекундах за добу).

Розв'язок	$\dot{x}_p - \dot{x}_{ВІН}$	$\dot{y}_p - \dot{y}_{ВІН}$	$DR - DR_{ВІН}$	$m_{\dot{x} - \dot{x}_{ВІН}}$	$m_{\dot{y} - \dot{y}_{ВІН}}$	$m_{DR - DR_{ВІН}}$
SHA85L01	0.044	0.085	-	1.729	1.345	-
LPI86L06	0.034	0.079	0.0112	0.696	0.770	0.1037
LPI86L07	0.051	0.053	0.0107	0.641	0.697	0.0996
LPI86L08	0.052	0.053	-	0.630	0.686	-
LPI86L11	0.098	-0.090	-	0.795	0.954	-
LPI86L12	0.105	0.025	0.0172	0.735	0.895	0.1130

Таблиця 4.

Середні та середні квадратичні відхилення прискорень ПОЗ від даних ВІН на період основної кампанії MERIT (мілісекунди / $(\text{добу})^2$).

Розв'язок	$\ddot{x} - \ddot{x}_{ВІН}$	$\ddot{y} - \ddot{y}_{ВІН}$	$\ddot{i} - \ddot{i}_{ВІН}$	$m_{\ddot{x} - \ddot{x}_{ВІН}}$	$m_{\ddot{y} - \ddot{y}_{ВІН}}$	$m_{\ddot{i} - \ddot{i}_{ВІН}}$
LPI86L09	-0.033	0.094	0.0037	0.430	0.509	0.0819
LPI86L10	-0.027	0.111	-	0.468	0.562	-
LPI86L11	-0.017	0.268	-	0.932	1.167	-
LPI86L12	-0.041	0.154	-0.0007	0.662	0.726	0.0712

розв'язків, отриманих на основі спостережень, від відповідних їм значень, обчислених за даними ВІН (табл. 3 і 4).

- середньої квадратичної похибки σ апроксимації розв'язків для швидкостей ПОЗ та коефіцієнтів рядів Фур'є для чандлерового та річного періодів коливань (табл. 6, 7, 10);
- амплітуд варіацій $\dot{x}_p$, $\dot{y}_p$ та DR (табл. 8 та 11).

Графіки коливань швидкостей координат полюса (рис 1) на чандлеровому періоді, за

формою, подібні до графіків зміни самих координат x_p , y_p . Середні значення швидкостей координат полюса та їх прискорень свідчать про місцезнаходження центру коливань на певному періоді, а середні та середні квадратичні відхилення між значеннями розв'язків – про їх близькість і величину коливання окремих значень одного розв'язку відносно іншого.

За основу взято ряди швидкостей та прискорень ПОЗ обчислені за даними ВІН. З аналізу видно (табл. 2), що центри коливань розв'язків для швидкостей ПОЗ, представлених в

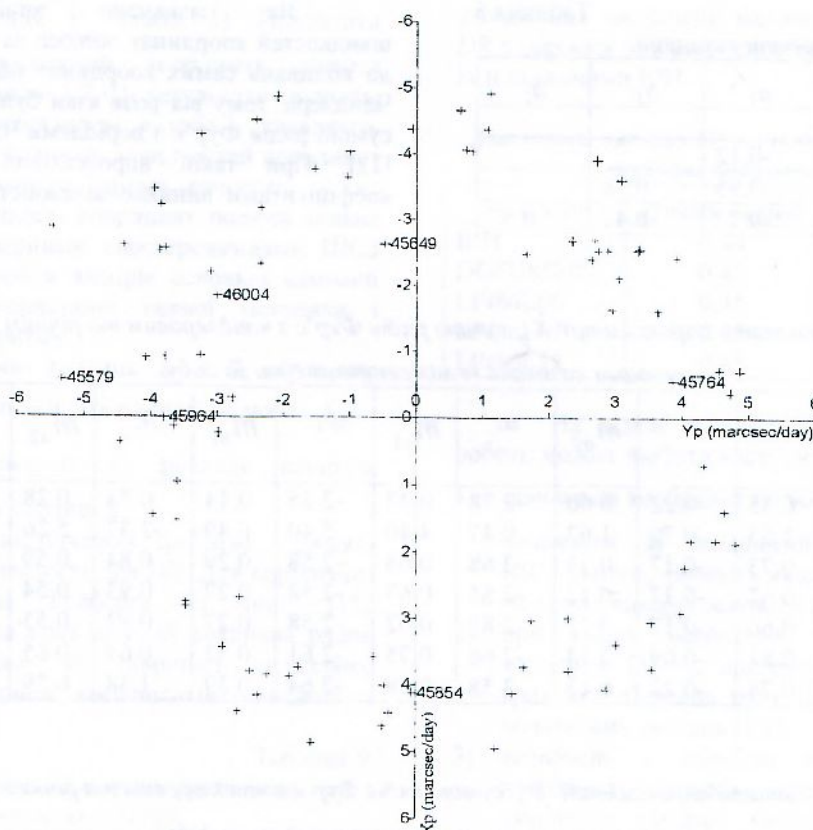


Рис. 1 Швидкості координат полюса з розв'язку LPI86L07

табл. 1, близькі між собою і добре узгоджуються з даними ВІН. Середні відхилення швидкостей ПОЗ з розв'язків таблиці 1 від відповідних даних ВІН (табл. 3) також добре узгоджуються між собою і з розв'язком обсерваторії у Шанхаї. Хоч середні квадратичні відхилення $m_{\dot{x}-\dot{x}_{ВІН}}$ і $m_{\dot{y}-\dot{y}_{ВІН}}$ останнього свідчать про великі коливання швидкостей координат полюса, визначених у Шанхаї відносно даних ВІН. Зазначимо, що коливання розв'язків з табл.1 відносно даних ВІН в середньому квадратичному значенні майже у 2 – 3 рази менші від таких з розв'язку SHA85L01. На наш погляд таку властивість представленим у даній статті розв'язкам (табл. 1) забезпечує алгоритм, запропонований в роботах [2, 3, 4].

Додатні значення середніх відхилень $(\dot{x}_p - \dot{x}_{ВІН})$ і $(\dot{y}_p - \dot{y}_{ВІН})$ розв'язків, крім LPI86L11, свідчать про деяке середнє зміщення визначених швидкостей координат полюса від обчислених значень за згладженими даними ВІН. Відразу ж зазначимо, що цей зсув є меншим від

середніх квадратичних похибок визначення швидкостей $\dot{x}_p$, $\dot{y}_p$ з обробки лазерних спостережень, які для розв'язків, наведених у табл. 1, коливаються в межах 0.07–0.41 мілісекунди дуги за добу (лише на першій 5-ти добовій орбітальній дузі, яка є неповною і має 167 вимірів, середня квадратична похибка сягає до 1.5 - 4 мілісекунд дуги за добу).

Значення прискорень координат полюса, обчислені за згладженими даними ВІН на період основної кампанії MERIT, коливаються відносно нуля до ± 0.08 мілісекунди дуги. Ця обставина пов'язана з моделлю отримання згладжених даних координат полюса ВІН. Тому середні відхилення визначених прискорень (для розв'язків з табл.1) від прискорень ВІН приблизно рівні значенням середніх прискорень (див. табл. 2 і табл. 4). Це означає, що середні квадратичні відхилення визначених прискорень ПОЗ від відповідних їм значень ВІН можна вважати мірою величини коливань перших.

Таблиця 5.

Коефіцієнти кореляції

	a_0	a_1	b_1	a_2
a_1	0.77			
b_1	-0.12	-0.12		
a_2	-0.76	-0.95	0.38	
b_2	-0.60	-0.77	-0.47	0.57

Як зазначено вище, коливання швидкостей координат полюса за формою подібні до коливань самих координат полюса на періоді Чандлера, тому всі розв'язки були апроксимовані сумою рядів Фур'є з періодами Чандлера і річним [12]. При такій апроксимації між деякими коефіцієнтами виникає залежність - однакова як

Таблиця 6.

Результати апроксимації $\dot{X}_p$ сумою рядів Фур'є з чандлеровим та річним періодами коливань (в мілісекундах дуги за добу).

Розв'язок для швидкостей	σ	a_0	m_{a0}	a_1	m_{a1}	b_1	m_{b1}	a_2	m_{a2}	b_2	m_{b2}
ВІН	0.35	-0.22	0.06	-2.78	0.32	-2.85	0.14	0.73	0.28	-0.41	0.20
SHA85L01	1.65	0.70	1.62	0.47	4.40	-5.40	6.49	-2.37	5.26	-0.14	3.88
LPI86L06	0.73	-0.17	0.13	-2.68	0.68	-2.58	0.29	0.84	0.59	-0.80	0.42
LPI86L07	0.67	-0.17	0.12	-2.85	0.63	-2.58	0.27	0.93	0.54	-0.64	0.39
LPI86L08	0.66	-0.17	0.12	-2.83	0.62	-2.58	0.27	0.92	0.53	-0.65	0.38
LPI86L11	0.81	-0.09	0.14	-2.66	0.75	-2.61	0.32	0.69	0.65	-0.67	0.46
LPI86L12	0.74	-0.22	0.13	-3.58	0.68	-2.64	0.29	1.38	0.59	-0.14	0.42

Таблиця 7

Результати апроксимації $\dot{Y}_p$ сумою рядів Фур'є з чандлеровим та річним періодами коливань (в мілісекундах дуги за добу).

Розв'язок для швидкостей	σ	a_0	m_{a0}	a_1	m_{a1}	b_1	m_{b1}	a_2	m_{a2}	b_2	m_{b2}
ВІН	0.27	-0.04	0.05	-2.78	0.25	1.53	0.11	-0.93	0.21	0.31	0.15
SHA85L01	1.37	-2.41	1.35	-10.19	3.65	10.90	5.39	7.77	4.37	-4.08	3.22
LPI86L06	0.76	0.01	0.13	-3.21	0.71	0.73	0.30	-1.27	0.61	1.15	0.44
LPI86L07	0.69	0.02	0.12	-2.99	0.64	0.78	0.28	-1.38	0.56	0.98	0.40
LPI86L08	0.68	0.02	0.12	-2.99	0.63	0.78	0.27	-1.38	0.55	0.99	0.39
LPI86L11	0.96	-0.20	0.17	-3.54	0.90	0.50	0.39	-1.12	0.78	1.51	0.55

Таблиця 8.

Амплітуди варіацій $\dot{X}_p$ і $\dot{Y}_p$ на чандлеровому та річному періодах коливань (в мілісекундах дуги за добу)

Розв'язок для швидкостей	Чандлеровий період		Річний період	
	$\dot{X}_p$	$\dot{Y}_p$	$\dot{X}_p$	$\dot{Y}_p$
ВІН	3.98	3.17	0.84	0.84
SHA85L01	5.42	14.92	2.37	8.78
LPI86L06	3.72	3.29	1.16	1.71
LPI86L07	3.84	3.09	1.13	1.69
LPI86L08	3.83	3.09	1.13	1.69
LPI86L11	3.73	3.58	0.96	1.88
LPI86L12	4.45	2.63	1.39	1.86

для $\dot{x}_p$, так і для $\dot{y}_p$ (табл. 5). Результати апроксимації швидкостей координат полюса наведені в таблицях 6 і 7. Ці результати свідчать, що розв'язки, представлені в табл.1, виявляють реальні величини коливань швидкостей координат полюса з врахуванням оцінки точності. А це означає, що швидкості координат полюса можна визначати за лазерними спостереженнями ШСЗ Лагеос уже з обробки вимірів основної кампанії MERIT при використанні певної методики і відповідного алгоритму.

За даними таблиць 6 і 7 обчислені амплітуди швидкостей координат полюса $\dot{x}_p$ і $\dot{y}_p$ на чандлеровому та річному періодах коливань зведені у таблиці 8.

Подібні дослідження зроблені з рядами для надлишків тривалості дня DR. Для порівняння взято визначення Рейберга та інш. [11]. Апроксимація розв'язків для DR виконана рядом Фур'є для річної та піврічної складових. Кореляційна матриця коефіцієнтів наведена у таблиці 9.

Таблиця 9.

Коефіцієнти кореляції між коефіцієнтами при апроксимації DR.

	a_0	a_1	b_1	a_2
a_1	-0.14			
b_1	-0.07	-0.08		
a_2	-0.07	-0.11	0.00	
b_2	-0.11	-0.12	-0.10	-0.02

Зсув розв'язку DGF185L03 відносно даних ВІН та вказаних у табл. 1 (коефіцієнт a_0 у табл. 10) може свідчити про похибки у початкових наближеннях при визначенні надлишку тривалості дня DR, оскільки інші коефіцієнти відображають його варіації. Амплітуди цих варіацій у таблиці 11. Результати в таблицях 10 і 11 демонструють добре

узгодження визначень надлишка тривалості дня DR з обробки лазерних спостережень ШСЗ Лагеос із згладженими ВІН.

Таблиця 11.

Амплітуди варіації DR на річному та піврічному періодах коливань (в мс)

Розв'язок	Річний період	Піврічний період
ВІН	0.44	0.44
DGF185L03	0.46	0.41
LPI86L06	0.45	0.41
LPI86L07	0.45	0.41
LPI86L12	0.45	0.43

На основі аналізу, здійсненого у даній роботі, можна зробити наступні висновки:

- 1) швидкості координат полюса $\dot{x}_p$ і $\dot{y}_p$ можна визначати за лазерними спостереженнями ШСЗ Лагеос, точність яких не гірше точності лазерних вимірів основної кампанії MERIT;
- 2) при цьому необхідно застосувати певну методику [1] та алгоритм [2, 3, 4], який враховує збурення руху ШСЗ від неточності початкових значень ПОЗ;
- 3) визначені з обробки вимірів швидкості координат полюса дозволяють виявити амплітуди варіацій чандлерового і річного періодів коливань;
- 4) враховуючи п. 2), з обробки лазерних вимірів ШСЗ Лагеос можна виконувати оцінку прискорень ПОЗ, оскільки середні квадратичні похибки визначених прискорень ПОЗ за абсолютною величиною, як правило, менші від їх значень.

Література

1. Марченко А.Н., Абрикосов О.А., Цюпак И.М. Результаты определения некоторых геодинимических параметров по данным лазерных наблюдений Международной кампании

Таблиця 10.

Результати апроксимації DR рядом Фур'є з річним періодом коливань (в мс).

Розв'язок для DR	σ	a_0	m_{a0}	a_1	m_{a1}	b_1	m_{b1}	a_2	m_{a2}	b_2	m_{b2}
ВІН	0.18	1.64	0.02	-0.24	0.03	0.37	0.03	-0.07	0.03	0.43	0.03
DGF185L03	0.18	1.81	0.02	-0.20	0.03	0.41	0.03	0.01	0.03	0.41	0.03
LPI86L06	0.18	1.65	0.02	-0.24	0.03	0.38	0.03	-0.06	0.03	0.41	0.03
LPI86L07	0.18	1.64	0.02	-0.24	0.03	0.38	0.03	-0.06	0.03	0.41	0.03
LPI86L12	0.18	1.65	0.02	-0.25	0.03	0.38	0.03	-0.07	0.03	0.42	0.03

- МЕРИТ.- В кн.. Динамика механических систем (Труды Всесоюзной школы-семинара. Томск, 22.06-4.07.1986г.).- Томск, 1987
2. Цюпак И.М. К вопросу определения параметров вращения Земли по лазерным наблюдениям ИСЗ//Кинематика и физика небесных тел.- Киев- 1987, том 3, № 1.- С 78-83
3. Цюпак И.М. Об определении вращения Земли по лазерным наблюдениям ИСЗ "Лагос" (На период основной кампании МЕРИТ //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.- М.: МИИГАиК.- 1987, № 3.- С. 75-82.
4. Цюпак И.М. Об определении ПВЗ и их временных изменений динамическим методом космической геодезии.- В зб.: Всесоюзное совещание "Алгоритмическое и программное обеспечение теории движения ИСЗ" (Программа и тезисы докладов).- Ленинград, 1990.- С. 69.
5. Яцкив Я.С. Международный проект МЕРИТ.- Киев, 1981.- (Препр. / АН УССР ИТФ; 81-124).
6. BIH Annual Report for 1983.- Paris, 1984.
7. BIH Annual Report for 1984.- Paris, 1985.
8. MERIT Standards.- Washington, 1983.-85 p. (Circular U.S. Naval Observatory; N 167).
9. Miaofu H., Cheng H., Chugong F., Shengyuan S. A series of ERP from LAGEOS during the MERIT campaign: ERP(SHA)85L01.- Reports on the MERIT-COTES Campaign on Earth Rotation and Reference Systems.- Part III. Observational results on Earth rotation and reference systems.- Paris, 1986 - Pp. B103-B110.
10. Montag H., Gendt G., Dietrich R., Kurtz K. Investigation of polar motion and the length of day by means of SLR data of the MERIT campaign.- Proc. Int. Symp. on MERIT Campaign.- Columbus, 1985. IAU, Ohio State Univ., Spec Rep.
11. Reiberg et al. Reports on the MERIT-COTES Campaign on Earth Rotation and Reference Systems.- Part III. Observational results on Earth rotation and reference systems.- Paris, 1986.
12. Tsyupak I.M. The empirical model of variations of polar motion.- Earth Rotation, Reference Systems, in Geodynamics and Solar System (Journée 1995).- Warsaw, 1995, pp. 21-22.

I. Tsyupak

ANALYSIS OF TEMPORAL VARIATIONS OF THE EARTH ROTATION PARAMETERS FROM LAGEOS SLR DATA

Abstract

The solutions of the Earth rotation parameters, which include velocity and acceleration of polar motion and $t=(UT-UTC)$ with 5-day arcs solutions from the analysis of the satellite laser range (SLR) data to LAGEOS during the MERIT Campaign has been compared with the combined solution of BIH. The RMS of the differences between these solutions, $\Delta \dot{x}_p$, $\Delta \dot{y}_p$, $\Delta \dot{t}$ and $\Delta \ddot{x}_p$, $\Delta \ddot{y}_p$, $\Delta \ddot{t}$, are of 0.68 miliarcseconds per day (mas/day), 0.70 mas/day, 0.10 ms/day and $0.4 \text{ mas}/(\text{day})^2$, $0.5 \text{ mas}/(\text{day})^2$, $0.08 \text{ ms}/(\text{day})^2$, respectively. These solutions of polar motion velocity have been approximated by Furier's series. The amplitudes of wobbles for Chandler and annual periods, $\dot{x}_p$, $\dot{y}_p$ are of 3.8 mas, 3.1 mas and 1.2 mas, 1.7 mas, respectively The polar motion velocity from the analysis of SLR data to LAGEOS can be detected.

И Цюпак

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫХ РАССТОЯНИЙ ИСЗ ЛАГЕОС

Резюме

Выполнен сравнительный анализ скоростей и ускорений параметров вращения Земли (ПВЗ), определенных из обработки данных лазерной локации ИСЗ Лагос, полученных во время основной наблюдательной кампании МЕРИТ. Результаты определений сравниваются со скоростями и ускорениями ПВЗ, вычисленными по сглаженным данным ПВЗ Международного бюро времени и со скоростями координат полюса, полученными в Шанхайской обсерватории (Китай). С целью анализа скорости координат полюса аппроксимированы суммой рядов Фурье с чандлеровым и годовым периодами. Вычислены амплитуды вариации скоростей координат полюса для чандлеровой и годовой составляющих. По результатам анализа сделан вывод о возможности определения скоростей координат полюса при использовании определенной методики и алгоритма для обработки лазерных наблюдений ИСЗ Лагос.