

УДК 528.21

АНАЛІЗ ЗМІНИ КООРДИНАТ ПУНКТІВ ЯВОРІВСЬКОГО НАУКОВОГО ГЕОДЕЗИЧНОГО ПОЛІГОНА

І. Тревого, І. Цюпак, С. Савчук, О. Денисов, Б. Паляниця, С. Лехман
Національний університет “Львівська політехніка”

Постановка задачі

На Яворівському еталонному науковому геодезичному полігоні (НГП) [1, 2] упродовж 2005–2008 рр. щорічно виконуються кількадобові сесії GPS-спостережень. На підставі опрацювання цих вимірювань визначені координати пунктів геодезичної мережі еталонного НГП на середні епохи спостережень. Причому у 2005–2006 рр. [2, 3] пункти визначені у системі координат ITRF-2000, а у 2007–2008 рр. [4] – в системі ITRF-2005. Для порівняння координати пунктів необхідно привести до однієї системи координат і на певну епоху. Трансформацію координат пунктів до єдиної системи координат можна здійснити за алгоритмом [5] і параметрами, поданими в роботі [6]. Для приведення координат до початкової епохи спостережень можна користуватися середніми швидкостями зміни координат, визначеними для території України [4]. Цими значеннями користувались для порівнювання координат пунктів НГП у попередні роки.

Нині маємо координати пунктів, визначені на чотири епохи з інтервалом приблизно в один рік, і можемо визначити швидкості зміни координат кожного пункту. Метою роботи є оцінювання швидкості зміни координат пунктів з аналізу їхніх координат.

Опис алгоритму

Для аналізу подамо функцію зміни координат з часом в такому вигляді:

$$\mathbf{X}(t_i) = \mathbf{X}(t_0) + \mathbf{V}(t_i - t_0), \quad (1)$$

де $\mathbf{X}(t_i)$ і $\mathbf{X}(t_0)$ – відповідно вектори координат пункту, визначені на епоху t_i і початкову епоху t_0 , \mathbf{V} – вектор швидкостей зміни координат. Із залежності (1) для кожної координати кожного пункту отримаємо систему параметричних рівнянь для оцінки швидкості зміни відповідної координати кожного з пунктів, які розв’яжемо методом найменших квадратів.

Виконання спостережень

Зазначимо, що у 2008 році, як і у попередні роки, для GPS-спостережень використовували двочастотні приймачі фірми Trimble, зокрема – Trimble-5700 і Trimble-5800. Записувались спостереження з інтервалом 15 с, починаючи з кута висоти над горизонтом пункту 5° . Центрування антени GPS-приймача на пунктах мережі – примусове. На пункті GOSH вели запис метеоданих. Опрацювання GPS-вимірів виконано програмою Trimble Geomatics Office.

Аналіз координат пунктів, визначених за GPS-спостереженнями 2008 р.

Координати пунктів геодезичної мережі отримані з двох добових сесій спостережень (185 і 186) та комбінованого (узагальненого) розв’язку. У табл. 1 і табл. 2 відповідно наведені відхилення координат пунктів, визначених у сесіях 185 і 186 від комбінованого розв’язку. Врівноваження координат пунктів мережі по сесіях і комбіноване були отримані за умови “вільної мережі”. Максимальне значення різниць відповідних координат пунктів між сесіями близько 4 мм.

Таблиця 1

Пункт	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
GOSH	0.0006	-0.0009	-0.0002
ANDR	-0.0009	0.0001	-0.0005
TZSU	-0.0009	-0.0011	-0.0020
VASL	0.0004	-0.0011	-0.0015

Таблиця 2

Пункт	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
GOSH	-0.0018	-0.0028	-0.0042
ANDR	0.0021	-0.0014	0.0011
TZSU	0.0021	-0.0017	0.0005
VASL	-0.0008	-0.0023	-0.0014

Підготовка вихідних даних для аналізу

Координати пунктів, визначені у 2007–2008 рр. були переобчислені у систему координат ITRF-2000. І, оскільки координати пунктів, що визначалися кожного року, віднесені до середніх епох спостережень ($t_0=2005.4767$, $t_1=2006.4918$, $t_2=2007.4685$, $t_3=2008.5082$), то можемо обчислити швидкість зміни координат кожного пункту між двома сусідніми епохами і знайти їхні середні значення. Ці величини, які наведені у табл. 3, приймемо за початкові значення швидкостей зміни координат при їхньому визначенні вищеописаним алгоритмом.

Таблиця 3

Середні швидкості

Пункт	$\frac{X_{i+1} - X_i}{t_{i+1} - t_i}$, м/рік	$\frac{Y_{i+1} - Y_i}{t_{i+1} - t_i}$, м/рік	$\frac{Z_{i+1} - Z_i}{t_{i+1} - t_i}$, м/рік
SULP	-0,0187	0,0151	0,0087
GOSH	-0,0185	0,0140	0,0078
ANDR	-0,0215	0,0149	0,0049
TZSU	-0,0201	0,0148	0,0081
VASL	-0,0204	0,0146	0,0076

Зазначимо, що у табл. 3 наведені відповідні значення також і для перманентного пункту SULP, бо вони визначаються стабільніше і відповідають середнім значенням для регіону України. Отже, за відхиленнями від цих значень можна зробити висновок про надійність визначення швидкостей зміни координат інших пунктів.

Результати визначення швидкостей зміни координат пунктів та їхній аналіз

З апроксимації координат пунктів, відомих на чотири епохи, оцінено швидкості зміни координат методом найменших квадратів. Отримані значення швидкостей зміни координат пунктів, що наведені у табл. 4, узгоджуються з прийнятими середніми значеннями швидкостей для цього регіону в межах їхніх середніх квадратичних похибок. Значення цих похибок переважно менші за 1 мм/рік, а максимальна похибка для координати Z пункту ANDR досягає ± 2.5 мм/рік. Середні квадратичні похибки визначення швидкостей за алгоритмом (1) характеризують ступінь “розкиду” чи узгодженості координат пунктів, визначених у різні епохи.

Таблиця 4

Визначені швидкості зміни координат пунктів з середніми квадратичними похибками

Назва пункту	V_x , м/рік	m_{V_x} , м/рік	V_y , м/рік	m_{V_y} , м/рік	V_z , м/рік	m_{V_z} , м/рік
SULP	-0,0186	0,0000	0,0151	0,0000	0,0087	0,0000
GOSH	-0,0181	0,0005	0,0138	0,0007	0,0080	0,0004
ANDR	-0,0181	0,0018	0,0143	0,0005	0,0106	0,0025
TZSU	-0,0193	0,0007	0,0147	0,0002	0,0088	0,0009
VASL	-0,0198	0,0005	0,0155	0,0009	0,0097	0,0018

Використовуючи результати з табл. 4, координати пунктів були приведені на початкову епоху $t_0=2005,4767$, якою є середня епоха спостережень GPS-кампанії 2005 р. Різниці цих координат пунктів, обчислені між розв'язками різних років, наведено у табл. 5. Враховуючи, що зміни координат пунктів з часом вже враховані (тільки за лінійним законом), то різниці координат, що наведені у табл. 5, викликані похибками їхнього визначення, які за природою повинні бути випадковими.

Таблиця 5

**Різниці координат пунктів, приведених на епоху 2005,4767 в ITRF2000,
за допомогою оцінених швидкостей координат**

Назва пункту	$X_{i+1} - X_i$, мм	$Y_{i+1} - Y_i$, мм	$Z_{i+1} - Z_i$, мм	Порівняні розв'язки
SULP	0,1	-0,2	0,0	2006–2005
GOSH	-1,4	-4,2	-1,3	
ANDR	-6,7	-2,5	-6,5	
TZSU	3,2	-0,9	5,9	
VASL	2,4	-1,3	5,5	
SULP	0,0	0,0	0,0	2007–2005
GOSH	2,6	1,5	2,0	
ANDR	-6,8	-1,5	-11,6	
TZSU	2,5	-0,1	-0,2	
VASL	1,6	5,0	7,9	
SULP	-0,1	0,0	0,0	2008–2005
GOSH	-1,2	0,4	-0,9	
ANDR	6,7	1,9	9,8	
TZSU	-2,7	0,4	-1,9	
VASL	-1,9	-2,9	-7,0	
SULP	-0,1	0,2	0,0	2007–2006
GOSH	4,0	5,7	3,3	
ANDR	-0,1	1,0	-5,1	
TZSU	-0,7	0,9	-6,1	
VASL	-0,8	6,3	2,3	
SULP	-0,2	0,2	0,1	2008–2006
GOSH	0,2	4,6	0,5	
ANDR	13,4	4,4	16,3	
TZSU	-5,8	1,3	-7,8	
VASL	-4,3	-1,6	-12,6	
SULP	-0,1	0,0	0,1	2008–2007
GOSH	-3,9	-1,1	-2,8	
ANDR	13,5	3,4	21,3	
TZSU	-5,2	0,4	-1,7	
VASL	-3,5	-7,9	-14,9	

Для зменшення похибок і отримання найімовірніших значень координат пунктів обчислимо їхні середні значення на епоху $t_0=2005,4767$, і за відхиленнями від середнього значення оцінимо середні квадратичні похибки координат кожного пункту. Значення середніх квадратичних похибок координат пунктів, показані у табл. 6, істотно менші за 1 см, крім координати Z пункту ANDR, де значення похибки досягло 1 см. Це пояснюється тим, що координати пункту ANDR, визначені з опрацювання спостережень 2008 року, мають дещо більші різниці з відповідними координатами, отриманими у попередні роки, про що свідчать і результати табл. 5.

Таблиця 6

Середні квадратичні похибки координат пунктів на епоху $t_0=2005.4767$

Пункт	m_x , м	m_y , м	m_z , м
GOSH	0,0020	0,0025	0,0017
ANDR	0,0068	0,0017	0,0104
TZSU	0,0030	0,0006	0,0034
VASL	0,0029	0,0034	0,0063

Отже, маючи найімовірніші значення координат пунктів та швидкості їхньої зміни, можемо обчислювати місцезнаходження пунктів на епохи спостережень, що необхідно для еталонування S-приймачів.

Аналіз відстаней між пунктами геодезичної мережі

За координатами пунктів, визначеними на середні епохи спостережень з опрацювання GPS-вимірів, обчислені відстані між пунктами. Результати аналізу відстаней наведено у табл. 7–9. Зазначимо, що середні квадратичні похибки відстаней коливаються в межах від 0,5 до 3 мм.

Таблиця 7

Аналіз довжин векторів між пунктами мережі за 2005–2008 рр.

Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм	Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм
	GOSH-ANDR			GOSH-TZSU	
2005	14623,1605	-2,3	2005	11764,6517	-2,5
2006	14623,1623	-0,5	2006	11764,6546	0,4
2007	14623,1625	-0,3	2007	11764,6533	-0,9
2008	14623,1658	3,0	2008	11764,6572	3,0
Середн.	14623,1628		Середн.	11764,6542	

Таблиця 8

Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм	Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм
	GOSH-VASL			ANDR-TZSU	
2005	14243,8596	-0,4	2005	13206,1513	-0,9
2006	14243,8599	-0,1	2006	13206,1502	-1,9
2007	14243,8608	0,8	2007	13206,1512	-0,9
2008	14243,8597	-0,3	2008	13206,1559	3,7
Середн.	14243,8600		Середн.	13206,1522	

Таблиця 9

Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм	Рік спостережень	Лінія, м	Відхил. від середн., мм
	ANDR-VASL			TZSU-VASL	
2005	9870,8143	2,5	2005	19819,2227	1,2
2006	9870,8147	3,0	2006	19819,2222	0,7
2007	9870,8070	-4,8	2007	19819,2182	-3,3
2008	9870,8110	-0,8	2008	19819,2229	1,4
Середн.	9870,8118		Середн.	19819,2215	

Висновки

1. Максимальне значення різниць відповідних координат пунктів між сесіями GPS-вимірів за результатами 2008 р. – близько 4 мм.
2. Швидкості зміни координат пунктів, оцінені з апроксимації координат методом найменших квадратів, узгоджуються з прийнятими середніми значеннями швидкостей для цього регіону в межах їхніх середніх квадратичних похибок.

3. Обчислені найімовірніші координати пунктів на початкову епоху GPS-спостережень з середніми квадратичними похибками від 0,6 до 6 мм.

4. Мережу пунктів Яворівського еталонного наукового геодезичного полігона можна використовувати для еталонування супутникових приймачів з максимально можливою сьогодною точністю (<1 см).

Література

1. Науковий геодезичний полігон для метрологічної атестації геодезичних приладів та технологій / І. Тревого, С. Савчук, О. Денисов та ін. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць – Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – 2005. – С.33–43.

2. Тревого І.С., Савчук С.Г., Віват А.Й., Віват О.М. Створення метрологічного полігона для атестації GPS-приймачів // Вісник геодезії та картографії. – 2006. – № 3. – С.16–19.

3. Тревого І., Віват А., Віват О. Застосування мережі фундаментальних пунктів наукового геодезичного полігона для метрологічної атестації і перевірки приймачів GNSS // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Нац. ун-т “Львівська політехніка”. Вип. I (13). – 2007. – С.64–70.

4. Тревого І., Савчук С., Цюпак І., Денисов О., Коленніков А., Волошин В. Еталонний геодезичний полігон для метрологічного контролю приймачів супутникових сигналів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва (Зб. наук. праць Західного геодезичного товариства). – Львів: Ліга-Прес. – 2008. – С.55–64.

5. Boucher C. and Altamimi Z. Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Version 5, 12.04.2001. – <http://www.docstoc.com/docs/2370279/>.

6. Transformation parameters between ITRF2005 and ITRF2000. – http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php

Аналіз зміни координат пунктів Яворівського науково-геодезичного полігона

І. Тревого, І. Цюпак, С. Савчук, О. Денисов, Б. Паляниця, С. Лехман

На Яворівському еталонному геодезичному полігоні виконано GPS-вимірювання під час чергової кампанії спостережень. Аналізується стабільність положення геодезичних пунктів, визначених під час чотирьох останніх кампаній GPS-спостережень (2005–2008 рр.). Для порівняння координат пунктів, що визначаються щорічно, оцінена швидкість зміни координат з часом за методом найменших квадратів.

На основі аналізу отриманих в роботі результатів зроблено висновки.

Анализ изменения координат пунктов Яворовского научного геодезического полигона

И. Тревого, И. Цюпак, С. Савчук, А. Денисов, Б. Паляныця, С. Лехман

На Яворовском еталонном геодезическом полигоне выполнены GPS-измерения в рамках очередной кампании наблюдений. Анализируется стабильность положения геодезических пунктов, определённых в четырех последних кампаниях GPS-наблюдений (2005–2008 гг.). Для сравнения координат пунктов, определяемых ежегодно, выполнена оценка скорости изменения координат со временем методом наименьших квадратов.

На основании анализа полученных в работе результатов сделаны выводы.

The analysis variations of points coordinate on Yavoriv scientific geodetic network

I. Trevoho, S. Savchuk, I. Tsyupak, A. Denisov, B. Palyanytsya, S. Lekhman

On Yavoriv scientific geodetic network are executed GPS-measurements within the framework of next observation companies. Analyse стабільність positions of geodetic points, determined in 4 last campaigns of GPS-observations. For the comparison of coordinates of points is executed evaluation of velocity of changing the coordinates with a time by the method of least squares.