

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТЕЙ ЗМІНИ КООРДИНАТ ПОСТІЙНОДІЮЧИХ СТАНЦІЙ І ПЕРІОДИЧНО ДІЮЧИХ ПУНКТИВ УПМ ГНСС ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ СУПУТНИКОВИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 1995–2007 років

Р. Висотенко

Науково-дослідний інституту геодезії і картографії

Ключові слова: УПМ ГНСС, постійно діюча станція, ITRF2005, швидкості зміни координат.

Постановка проблеми

Упровадження на території України державної референсної системи координат УСК2000 вимагає подальшого розвитку мережі української постійнодіючої мережі глобальних навігаційних супутникових спостережень (УПМ ГНСС).

Станом на 1 січня 2008 року на території України функціонувало 12 постійно діючих станцій, переважна більшість яких входила до мереж IGS/EPN. Окрім того, починаючи з 1995 року силами Укргеодезкартографії на території України було побудовано 16 періодично діючих станцій, на яких з періодичністю приблизно 1 раз на 5 років виконувалися п'ятидобові супутникові геодезичні спостереження.

На жаль, до офіційного каталогу координат та швидкостей зміни координат останньої поточної реалізації ITRF2005 загальноземної системи відліку ITRS ввійшли лише три постійнодіючі станції, які розташовані на території України: GLSV (Київ/Голосіїв), POLV (Полтава), UZHL (Ужгород).

Тому подальший розвиток мережі УПМ ГНСС передбачає визначення координат станцій та швидкостей їх зміни в поточних реалізаціях загальноземної системи відліку ITRS, зокрема ITRF2005.

Також треба зазначити, що завдання подальшого розвитку мережі УПМ ГНСС входить до ключових завдань Державної науково-технічної програми розвитку топографо-геодезичної діяльності та національного картографування на 2003–2010 роки, оскільки мережа УПМ ГНСС є основою для впровадження на території України державної референсної системи координат УСК2000.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються цієї проблеми

Питання побудови на території України мережі постійно діючих станцій стосується велика кількість публікацій.

Перші спроби були зроблені наприкінці 90-х років ХХ ст. Так у працях [1, 2] наведено перші

результати опрацювання результатів супутникових геодезичних спостережень, виконаних на періодично діючих пунктах УПМ ГНСС. Однак залишилося відкритим питання щодо точності прив'язки побудованої мережі до загальноземних систем координат та обчислення швидкостей зміни координат.

Подальші дослідження у цьому напрямі були пов'язані із дослідженням програмно-методичних засобів оброблення супутникових геодезичних вимірів із наддовгими векторами-базами, оскільки використання таких засобів дало б змогу виконати прив'язку до загальноземних систем координат на адекватному рівні точності.

Дослідження програмних засобів які дають змогу з максимально можливою точністю виконати опрацювання результатів супутникових геодезичних спостережень з наддовгими базами, наведено в праці [3]. Базові алгоритми опрацювання результатів супутникових геодезичних спостережень із наддовгими базами подано в працях [4, 5]. Загальну методику опрацювання супутникових геодезичних спостережень із наддовгими векторами-базами наведено в працях [6, 7]. Адаптовану методику опрацювання супутникових спостережень, виконаних на пунктах УПМ ГНСС, а також результати опрацювання окремих GPS-кампаній подано в працях [8, 9].

Постановка завдання

Основною метою цієї роботи є удосконалення методики визначення швидкостей зміни координат постійно і періодично діючих станцій, розташованих на території України, а також власне визначення значень швидкостей зміни координат на основі комбінування розв'язків окремих GPS-кампаній в єдиний розв'язок.

Виклад основного матеріалу

Як вже зазначалося вище, УПМ ГНСС станом на 1 січня 2008 складалася з двох основних частин:

1. Періодично діючих пунктів.
2. Постійнодіючих станцій.

Мережа періодично діючих пунктів УПМ ГНСС створена в 1995 році силами Укргеодезкартографії в кількості 16 пунктів. Побудовані пункти рівномірно розташовані на території України з середніми відстанями між ними близько 200–300 км. Періодично діючі пункти здебільшого (окрім пунктів Вапнярка та Сімеїз) являють собою тури різної висоти з маркою для примусового центру-

вання. Надалі передбачалося поступове заміщення періодично діючих пунктів на постійно діючі станції.

Спостереження на періодично діючих пунктах виконувалися у межах окремих GPS-кампаній починаючи з 1995 року. Обсяги виконаних супутникових геодезичних спостережень на періодично діючих пунктах УПМ ГНСС наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Обсяги супутникових геодезичних спостережень на періодично діючих пунктах УПМ ГНСС за 1995–2007 роки

№ з/п	Назва пункту	Рік спостережень									Разом
		1995	1997	1999	2000	2001	2003	2004	2005	2007	
1	Алчевськ	5			4	6		1			16
2	Чернівці	5			15	6	1	5		5	37
3	Київ-ГУГК	5				6		18			29
4	Каховка	5			5	6		3		5	24
5	Кіровоград	2			19	5		3		5	34
6	Львів-Брюховичі	5			6	6			6	5	28
7	Маріуполь	4			6	6		3		5	24
8	Миколаїв		9	5	3	4					21
9	Одеса	4			9	5		6		5	29
10	Полтава	5			7	6				5	23
11	Шацьк	5			2	5		2		5	19
12	Шепетівка	5			9	6		4		5	29
13	Сімеїз	5	9	5	4	4		2			29
14	Суми	4			5	5		3		5	22
15	Ужгород-Деренівка	5	9	5	4	6	1	2	6	5	43
16	Вапнярка	5			7	6		11		5	34
Разом діб спостережень на періодично діючих пунктах											441

Мережа постійнодіючих станцій розпочала свою діяльність з 1997 року, коли було відкрито першу станцію Голосіїв. Станції Голосіїв (GLSV), Ужгород (UZHL), Полтава (POLV), Львів (SULP), Миколаїв (MIKL), Євпаторія (EVPA), Харків (KHAR), Алчевськ (ALCI) та Чернігів (CNIV) входять до складу мереж IGS/EPN. Станція Сімеїз (CRAO) – до складу Середземноморської GPS-мережі, а станції Дніпропетровськ (DNMU) та Шацьк (SHAZ) проходять процедуру реєстрації у мережах IGS/EPN.

Схема мережі УПМ ГНСС станом на 1 січня 2008 року наведена на рис. 1.

Для прив'язки мережі УПМ ГНСС до загальноземної системи координат до опрацювання було залучено 38 станцій, які більш-менш рівно-

мірно розташовані навколо території України і входять до складу мереж IGS/EPN. За вихідні станції було обрано п'ять постійнодіючих станцій IGS/EPN, а саме – JOZE (Jozefoslaw), MATE (Matera), METS (Metsahovi), MOBN (Obninsk), WTZR (Wettell). Координати перерахованих станцій увійшли не менше ніж в три поточні реалізації загальноземної системи відліку ITRS (окрім станції MOBN). Інші станції були використані для прив'язки мережі УПМ ГНСС до національних мереж сусідніх країн, а також як контрольні, оскільки 16 з них також внесені в офіційний каталог IERS. Отже, загальна кількість станцій (пунктів), координати та швидкості зміни координат яких було обчислено, становила 66 станцій (пунктів). Загальна схема станцій, які було залучено до опрацювання, наведена на рис. 2.



Рис. 1. Схема періодично діючих пунктів та постійно діючих станцій УПМ ГНСС станом на 1 січня 2008 року

Обчислення векторів-баз виконувалося за допомогою блока GAMIT і загалом відповідало методиці, наведеній в [8, 9]. Головною відмінністю було те, що процес опрацювання був пристосований під збільшення кількості станцій, залучених до опрацювання. Станції були згруповані в декілька регіональних мереж $urn1$, $urn2$ та $urn3$, які оброблялися паралельно. До складу мережі $urn1$ увійшли станції, які розташовані навколо території України та координати яких внесені до офіційного каталогу ITRF2005, а також постійнодіючі станції УПМ ГНСС. До складу мережі $urn2$ увійшли станції, які розташовані навколо території України та координати яких, з тих чи інших причин, не внесені до офіційного каталогу ITRF2005. До складу мережі $urn3$ увійшли вихідні станції та періодично діючі пункти УПМ ГНСС. До кожної з мереж увійшло не менше ніж 10 спільних станцій, що дало б змогу надалі згенерувати засобами GLOBK окремі регіональні добові розв'язки в єдиний добовий розв'язок. Максимальна кількість пунктів у кожній мережі не перевищувала 30. Отримані окремі добові

регіональні розв'язки потім комбінувалися в єдиний добовий розв'язок засобами GLOBK.

Ще однією відмінністю від методики, описаної в [8, 9], була процедура остаточного вибору вихідних пунктів для фіксації добових розв'язків. З метою мінімізації розходжень між координатами станцій вільних розв'язків і набором координат вихідних перманентних станцій було визначено набір вихідних перманентних станцій, які задають міжнародну референцну систему на території Центральної та Східної Європи. В процесі фіксування GLORG автоматично видаляв із списку такі перманентні станції, якщо їх апріорні координати не відповідали апостеріорним. Загалом виконувалося 4 ітерації з метою вилучення станцій зі списку перманентних станцій, які використовувалися для стабілізації референцної системи. Вихідні станції, для яких значення поправок у координати з попередньої ітерації перевищували допустимі значення, в поточній ітерації вилучалися зі списку вихідних станцій в автоматичному режимі. Такий підхід дав змогу забезпечити стабільність окремих добових розв'язків відносно загальноземної системи координат.



Рис. 2. Загальна схема станцій, які було залучено до опрацювання

В результаті виконання описаних вище процедур було отримано 4748 первинних добових розв'язків (з 1 січня 1995 року по 1 січня 2008 року) у загальноземній системі координат ITRS/ITRF2005 з мінімальним набором вихідних умов, на основі яких згодом було виконано побудову графіків часових рядів (time series).

Моделювання графіків часових рядів координат перманентних станцій виконувалося засобами GAMIT/GLOBK.

Локалізація лінійних зсувів даних здійснена в ручному режимі. Зсуви даних були визначені за допомогою детального аналізу поправок сумісно з вивченням історії перманентної

станції, зміни обладнання на ній і найближчих сейсмічних подій в цьому регіоні. Локалізація малих за величиною зсувів даних потребувала декількох ітерацій. Малі за величиною зсуви даних визначалися за поправками до моделі, після того, як були змодельовані великі зсуви даних, періодичні сигнали та тренди. Здебільшого зсуви даних пояснюються змінами в програмному забезпеченні станції, зміною антен або найближчими сейсмічними подіями, але виявлено декілька великих зсувів даних, для яких не вдалося знайти пояснення причин їх виникнення. Тому такі періоди обчислених даних були надалі виключені з процесу опрацювання (наприклад, станції LAMA та

ZECK). Після виконання першої ітерації, з усіма можливими параметрами, зсуви, зокрема всі підозрілі зсуви даних, аналізувалися на предмет їх значущості.

Остаточне вирівнювання мережі виконувалося в міжнародній референційній системі ITRS (реалізація ITRF2005) з урахуванням похибок вихідних даних.

Так під час опрацювання результатів супутникових геодезичних спостережень було визначено координати станцій ISG/EPN, постійнодіючих станцій та періодично діючих пунктів УПМ ГНСС, а також значення змін координат у системі координат ITRS (реалізація ITRF2005) на середню епоху спостережень для кожної окремої станції (пункту).

Аналіз отриманих результатів

Після виконання вирівнювання мережі було виконано порівняння обчислених значень координат та значень їх зміни зі значеннями, наведеними в офіційному каталозі IERS ITRF2005. Оскільки остаточне вирівнювання виконано на середню епоху спостережень для кожної окремої станції (пункту), а в офіційному каталозі ITRF2005 значення координат та значень їх зміни наведено на епоху 2000.0, було виконано перерахунок обчислених координат на епоху 2000.0 за обчисленими значеннями зміни координат.

Загалом обчислено координати та швидкості їх змін для 24 станцій, значення координат та швидкостей їх змін яких внесене до каталогу IERS ITRF2005. Саме за значеннями координат 24 станцій і було оцінено якість виконаного опрацювання та визначено реальну точність узгодження обчислених координат з ITRF2005.

Статистику обчислення реальної точності узгодження обчислених координат зі значеннями координат, наведеними в каталозі ITRF2005, подано в табл. 2.

Таблиця 2

Оцінка точності обчислених значень координат станцій

Назва параметра	Значення параметра		
	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
Різниці			
Кількість різниць значень координат станцій	40	40	40
Сума	-0,0063	0,0252	-0,0660
Мінімальне значення	-0,0076	-0,0101	-0,0124
Максимальне значення	0,0084	0,0087	0,0073
Середнє значення	-0,0002	0,0006	-0,0017
Середня квадратична похибка	0,0035	0,0034	0,0047

У табл. 2 кількість різниць координат станцій не відповідає кількості станцій, на основі яких виконувалося порівняння обчислених координат зі значеннями координат, наведеними в каталозі IERS. Це пояснюється тим, що будь-яка станція може мати кілька наборів координат, і здебільшого зміни в значеннях координат викликані або зміною супутникового обладнання, або ж зміною версій програмного забезпечення супутникових приймачів.

Сумарне значення реальної точності обчислених координат станцій в системі ITRF2005 становить 0,0068 м, а граничне відхилення $\pm 0,0170$ м.

Статистика обчислення реальної точності узгодження обчислених значень швидкостей змін координат зі значеннями швидкостей змін координат, наведеними в каталозі ITRF2005, подана в табл. 3.

Таблиця 3

Оцінка точності обчислених значень швидкостей зміни координат станцій

Назва параметра	Значення параметра		
	ΔV_x , м	ΔV_y , м	ΔV_z , м
Різниці			
Кількість різниць значень швидкостей змін координат станцій	24	24	24
Сума	-0,0075	0,0020	-0,0028
Мінімальне значення	-0,0016	-0,0006	-0,0012
Максимальне значення	0,0003	0,0010	0,0016
Середнє значення	-0,0003	0,0001	-0,0001
Середня квадратична похибка	0,0005	0,0004	0,0007

Як правило, для більшості станцій, які мають по кілька наборів координат, швидкості їх змін однакові, оскільки вони відображають довготривалі в часі зміни земної поверхні. Тому кількість різниць швидкостей зміни координат станцій відповідає кількості станцій, на основі яких виконувалося порівняння обчислених координат зі значеннями координат, наведеними в каталозі IERS.

Сумарне значення реальної точності обчислених значень зміни координат станцій в системі ITRF2005 становить 0,0009 м, а граничне відхилення $\pm 0,0023$ м.

Значення швидкостей зміни координат постійнодіючих станцій та періодично діючих пунктів УПМ ГНСС наведено в табл. 4.

Значення швидкостей зміни координат станцій (пунктів) УПМ ГНСС

№ з/п	GPS ID	Назва станції (пункту)	Швидкості зміни координат, м/рік			СКП швидкостей зміни координат, м		
			V_x	V_y	V_z	m_{V_x}	m_{V_y}	m_{V_z}
Періодично діючі пункти УПМ ГНСС								
1	ALCH	Алчевськ	-0,0218	0,0137	0,0079	0,0001	0,0001	0,0001
2	CHER	Чернівці	-0,0183	0,0160	0,0103	0,0003	0,0003	0,0002
3	GUGK	Київ (ГУГК)	-0,0194	0,0140	0,0086	0,0000	0,0000	0,0000
4	KACH	Каховка	-0,0202	0,0148	0,0086	0,0004	0,0004	0,0003
5	KIRO	Кіровоград	-0,0200	0,0141	0,0111	0,0003	0,0003	0,0002
6	LVIV	Львів (Брюховичі)	-0,0181	0,0154	0,0097	0,0004	0,0004	0,0002
7	MARI	Маріуполь	-0,0188	0,0150	0,0110	0,0003	0,0003	0,0002
8	MIKO	Миколаїв	-0,0181	0,0151	0,0083	0,0013	0,0013	0,0008
9	ODES	Одеса	-0,0188	0,0158	0,0111	0,0004	0,0004	0,0003
10	POLT	Полтава	-0,0216	0,0135	0,0074	0,0003	0,0003	0,0002
11	SHAT	Шацьк	-0,0190	0,0144	0,0078	0,0002	0,0002	0,0001
12	SHEP	Шепетівка	-0,0185	0,0151	0,0098	0,0003	0,0003	0,0002
13	SIME	Сімеїз	-0,0214	0,0162	0,0096	0,0006	0,0006	0,0005
14	SUMY	Суми	-0,0203	0,0137	0,0087	0,0004	0,0004	0,0003
15	UZHD	Ужгород(Деренівка)	-0,0171	0,0165	0,0104	0,0002	0,0002	0,0001
16	VAPN	Вапнярка	-0,0212	0,0155	0,0090	0,0003	0,0003	0,0002
Постійно діючі станції УПМ ГНСС								
1	ALCI	Алчевськ	-0,0218	0,0137	0,0079	0,0001	0,0001	0,0001
2	CNIV	Чернігів	-0,0189	0,0148	0,0102	0,0003	0,0003	0,0002
3	CRAO	Сімеїз (КрАО)	-0,0200	0,0151	0,0092	0,0001	0,0001	0,0000
4	DNMU	Дніпропетровськ	-0,0190	0,0154	0,0103	0,0003	0,0003	0,0002
5	EVPA	Євпаторія	-0,0198	0,0154	0,0099	0,0001	0,0001	0,0001
6	GLSV	Голосіїв	-0,0194	0,0140	0,0086	0,0000	0,0000	0,0000
7	KHAR	Харків	-0,0191	0,0144	0,0074	0,0001	0,0001	0,0001
8	MIKL	Миколаїв	-0,0196	0,0149	0,0089	0,0001	0,0001	0,0001
9	POLV	Полтава	-0,0211	0,0125	0,0073	0,0001	0,0001	0,0000
10	SHAZ	Шацьк	-0,0190	0,0144	0,0078	0,0002	0,0002	0,0001
11	SULP	Політехніка	-0,0181	0,0155	0,0096	0,0001	0,0001	0,0000
12	UZHL	Ужгород	-0,0172	0,0163	0,0099	0,0001	0,0001	0,0000

Висновки

Аналізуючи отримані якісні характеристики результатів обчислень, можна зробити висновок, що одержані результати повністю відповідають рівню точності, який декларують розробники програмно-методичного комплексу GAMIT/GLOBK, СКП якого, за умови дотримання рекомендованих технологічних вимог до опрацювання, для значень координат становить 0,0100 м, а для значень швидкостей змін координат – 0,0010 м.

Отже, можна зробити такі висновки:

1. Виконано опрацювання супутникових геодезичних спостережень, зібраних на пунктах УПМ ГНСС за 1995–2007 роки.

2. Обчислено координати 16 періодично діючих пунктів та 12 постійнодіючих станцій УПМ ГНСС.

3. Визначено середньорічні швидкості зміни координат станцій/пунктів мережі УПМ ГНСС.

Однак, незважаючи на доволі прийнятний отриманий результат, під час опрацювання результатів супутникових геодезичних спостережень за 1995–2007 роки, під час побудови графіків часових рядів практично всіх станцій, окрім загальнорічного тренду, було виявлено сезонну варіацію зміни координат станцій. Найбільше значення варіацій координат спостерігалося по висотній компоненті координат. Для деяких станцій значення сезонних коливань

сягають $\pm 0,01$ м. Отже, необхідне подальше вивчення швидкостей змін координат станцій з урахуванням сезонних змін. Це питання особливо актуальне для побудови висотної основи для території України, оскільки приведення результатів спостережень (нівелірних ліній) на єдину епоху є ключовим питанням для успішного розв'язання цієї задачі.

Література

1. Абрикосов О.А., Цюпак І.М., Зазуляк П.М., Бондар А.Л., Романишин П.О., Черемшинський М.Д., Заєць І.М. Застосування навігаційних систем для розв'язування основної задачі геодезії. // Вісник геодезії та картографії, 1997, № 1. – С. 47–55.
2. Кучер О.В., Абрикосов О.А., Марченко Д.А. Контроль качества фундаментальной GPS-сети Украины // “ГЕОМОНИТОРИНГ-99” Львів. – 1999. – С. 10–15.
3. Кучер О.В., Стопхай Ю.А.. Архітектура і дослідження програмних засобів для обробки матеріалів супутникових радіонавігаційних спостережень з довгими та наддовгими базами // Вісник геодезії та картографії. – 2002. – № 1. – С. 12–16.
4. Dong D., Herring T.A., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // Journal of Geodesy. – 1998. – № 72. – P. 200–214.
5. Thomas A. Herring, James L. Davis, Irwin I. Shapiro. Geodesy by Interferometry: The Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data // Journal of Geophysical Research. – Vol. 95, august 1990. – P.12,561–12,581.
6. Documentation for GAMIT GPS Analysis Software, release 10.0, December 2000.
7. Documentation for the GLOBK, Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, version 10.0, December 2000.
8. Стопхай Ю., Висотенко Р. Обробка GPS-спостережень, виконаних на пунктах фундаментальної геодезичної мережі України в 2000 році // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2003. – С. 48–54.
9. Стопхай Ю., Висотенко Р. Опрацювання супутникових радіонавігаційних спостережень, виконаних на пунктах УПМ ГНСС в 2001 році // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2006. – С. 102–108.

Визначення швидкостей зміни координат постійно діючих станцій і періодично діючих пунктів УПМ ГНСС за результатами супутникових геодезичних спостережень 1995–2007 років
Р. Висотенко

Наведено удосконалену методику визначення швидкостей зміни координат постійно діючих станцій і періодично діючих пунктів УПМ ГНСС, розташованих на території України, за результатами супутникових геодезичних спостережень.

Определение скоростей изменения координат постоянно действующих станций и периодически действующих пунктов УПС ГНСС по результатам спутниковых геодезических измерений 1995–2007 годов
Р. Висотенко

Приведена улучшенная методика определения скоростей изменения координат постоянно действующих станций и периодически действующих пунктов УПС ГНСС, расположенных на территории Украины, по результатам спутниковых геодезических измерений.

Determining the rate of velocities of permanent stations, and periodically existing settlements UPN GNSS based on satellite geodetic measurements 1995–2007 period
R. Vysotenko

Shows an improved method for determining the rate of velocities of permanent stations and periodically existing sites UPN GNSS, located on the territory of Ukraine, the results of satellite geodetic measurements.