

ДО ПИТАННЯ ПРО ОПРАЦЮВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ДОВГОТРИВАЛИХ БЕЗПЕРЕРВНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

О. Терещук

Чернігівський державний інститут економіки і управління

Ключові слова: GNSS-спостереження, часові ряди, перманентні станції.

Постановка проблеми

GNSS-спостереження, що здійснюються на фізичній поверхні Землі, пов'язані безпосередньо з локальними рухами земної кори. Ці рухи можуть бути викликані як тектонічним рухом плити загалом, так і місцевими ефектами. Теоретично для одержання часових рядів координат, за якими потім буде обчислена швидкість руху станції, можна використовувати всі координати станції, починаючи з того моменту, коли вона почала вести регулярні спостереження. За умови відсутності яких-небудь сторонніх впливів ця швидкість являє собою фактично рух геологічної структури [10]. На жаль, насправді деякі ефекти порушують геофізичний сигнал. Спотворення можуть викликатися недоліками діючої земної референтної системи, методом опрацювання спостережень, впливом конфігурації мережі станцій, змінами обладнання на станції і сезонними ефектами, такими як навантаження від снігу, льоду, води, атмосфери тощо. Звичайно, під час переопрацювання тижневих EUREF-розв'язків можна вилучити з часових рядів координат станцій "стрибки", зумовлені послідовною зміною реалізацій земної системи координат. Однак "стрибки" координат, викликані зміною обладнання на станції, повинні бути оцінені й вилучені перед визначенням лінійних швидкостей станцій мережі. Сезонні варіації згладжуються і не впливають на оцінку швидкості станції, якщо дані доступні на досить тривалому інтервалі часу (не менше від трьох років) [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Європейська GNSS-мережа EPN (European Permanent GPS Network) – це мережа, яка об'єднує постійнодіючі станції, і організована переважно для реалізації європейської системи координат (European Reference System ETRS89 [6]). Мережа EPN координується підкомісією

EUREF Міжнародної асоціації геодезії. Вона також є регіональним згущенням глобальної мережі станцій IGS (Міжнародна GNSS служба). Нині у мережу EPN входить близько 200 активних станцій. Станції мережі EPN умовно розділені на підібрані у певний спосіб підмережі так, що кожна станція наявна як мінімум у трьох підмережах. Спостереження з кожної окремої підмережі обробляються одним центром аналізу. Фактично із часу заснування мережі EPN працюють 16 центрів аналізу [6].

Зведені тижневі розв'язки для координат станцій (так звані "ITRS time series") є одним з офіційних продуктів, які створює Центральне бюро EPN. Сьогодні вони обчислюються в BKG (Німеччина), а до 1020 GPS-тижня ці розв'язки обчислювалися в європейському центрі визначення орбіт (Астрономічний інститут університету Берна, Швейцарія), і надають тижневі координати станцій в SINEX (Solution/Software Independent Exchange)-форматі. Цей офіційний розв'язок EUREF для координат станцій є результатом комбінації окремих розв'язків усіх центрів аналізу з подальшим приведенням у систему ITRF (Міжнародна земна система координат) [9].

Про важливість проблеми репрезентативного представлення сучасних рухів земної кори у регіональному масштабі свідчить і те, що нещодавно (2008) у Міжнародній геодезичній спілці IAG створено Робочу групу "Регіональне згущення полів швидкостей" (*Regional Dense Velocity Fields*). Метою цієї Робочої групи є згущення останньої реалізації ITRF і надання регіонам з достатньою густиною інформації про швидкості зміни координат в загальній глобальній системі відліку. Для розв'язання цієї задачі члени Робочої групи повинні об'єднати зусилля з регіональними представниками, що займаються опрацюванням та аналізом даних з місцевих/регіональних перманентних (CORS) й епізодично діючих GNSS станцій. У таблиці наведено інформацію про регіональні мережі та їхню діяльність на території Європи.

Регіональні геодинамічні GNSS-мережі на території Європи

| Назва мережі | Регіон | Кількість станцій | Досліджуваний період | Тип спостережень | Вихідний формат |
|--------------|------------------------------|-------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| AGNES | Центральна Європа/Альпи | 102 | – | CORS | SINEX |
| AMON | Центральна Європа | 82 | 2001–тепер | CORS | SINEX |
| ASI | Середземномор'я | 153 | 1998–тепер | CORS | SINEX |
| BEL | Бельгія | ~60 | 1996–тепер | CORS | SINEX |
| BIFROST | Скандинавія | ~75 | – | CORS | SINEX |
| BKG | Центральна Європа/Німеччина | ~114 | 1996–тепер | CORS | SINEX |
| CEGRN | Південно-Східна Європа | 78 | 1994–тепер | Епізодично+CORS | SINEX |
| EUREF | Європа | ~ 200 | 1996–тепер | CORS | SINEX |
| EMED | Східне Середземномор'я | 430 | 1988–2005 | Епізодично+CORS | SINEX |
| Greece | Греція | 323 | 1994–2000 | Епізодично | SINEX |
| Nardo | Південна і Центральна Європа | 293 | – | Епізодично+CORS | SINEX |
| HUN | Угорщина | 84 | – | Епізодично+CORS | SINEX |
| IGN | Франція | | – | | SINEX |
| INGV | Італія | 153 | – | CORS | SINEX |
| SK | Словаччина | 33 | – | | SINEX |
| UK | Великобританія | >100 | – | | SINEX |
| ? | Україна | >20 | – | CORS+Епізодично | ? |

Постановка завдання

У роботі аналізуються підходи до опрацювання часових рядів тривалих GNSS-спостережень українських перманентних станцій, що входять у європейську мережу EPN.

Виклад основного матеріалу дослідження

Існують два основні методи отримання координат станцій регіональних мереж (таких як європейська мережа EUREF) у системі ITRF:

1) накладення апріорних обмежень на координати деякого набору опорних станцій, тобто прирівнювання, з деякою невеликою дисперсією, координат опорних станцій до їхніх значень у каталозі ITRF;

2) приведення регіонального розв'язку до ITRF за допомогою трансформації Гельмерта; цей метод також називають методом мінімальних обмежень.

До 1302 GPS-тижня (грудень 2004 р.) офіційний розв'язок EUREF обчислювався з використанням першого підходу. На жаль, цей розв'язок непридатний для геодинамічних досліджень, тому що використання під час опрацювання опорних станцій і послідовні зміни реалізацій ITRF призводять до “стрибків” у координатах і можуть викликати спотворення координат усіх станцій мережі. Крім того, офіційний EUREF розв'язок не містить інформації щодо варіацій координат опорних станцій.

Аналіз офіційних тижневих розв'язків за період з 900 GPS-тижня (квітень 1997 р.) і до 1302 GPS-тижня (грудень 2004 р.) показує наявність “стрибків” і систематичних сезонних похибок, особливо помітних у складовій по висоті (див. рис. 1).

Під час обчислення зведеного розв'язку EUREF на цьому проміжку часу використовувалася процедура опрацювання спостережень, за якої координати опорних станцій, як вже було зазначено, фіксуються до значень координат у поточній реалізації ITRF [5]. При цьому похибки моделювання рухів опорних станцій можуть спричинити спотворення отриманого розв'язку для координат усіх станцій мережі. Так, похибки в координатах опорних станцій, пекулярний рух станцій, локальні зсуви земної кори й періодичні зміни обладнання, особливо приймальної антени, можуть призводити до значних похибок у координатах усіх станцій мережі, причому це спотворення системи координат буде збільшуватися до країв мережі, особливо якщо більшість опорних станцій перебувають у центральній частині мережі. Саме це стосується насамперед українських перманентних станцій, адже всі вони є практично крайніми станціями як окремих підмереж, так і мережі EPN загалом [11]. На рис. 2 наведено фрагмент підмережі, що опрацьовується локальним центром аналізу OLG (Institute for Space Research, Graz – Austria).

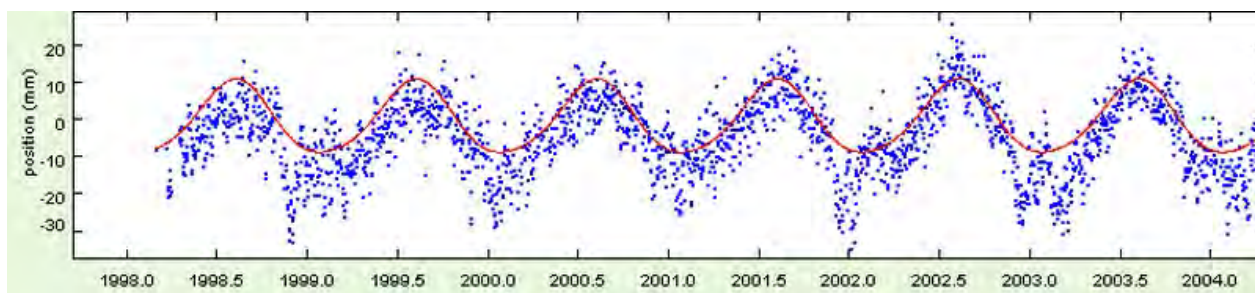


Рис. 1. Часовий ряд компоненти Z на станції GLSV за період 1998–2004 р.

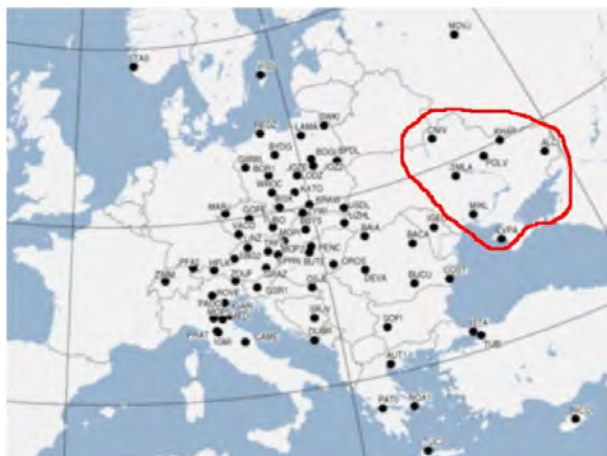


Рис. 2. Схематичне розташування українських перманентних станцій у підмережі від OLG

Разом з тим, треба зазначити, що склад опорних станцій не залишався незмінним на всьому проміжку часу, а також послідовно змінювалися реалізації ITRF (у різні періоди використовувалися опорні системи координат ITRF97, ITRF2000, ITRF2005). Зміни в складі опорних станцій і особливо послідовна зміна реалізацій земної системи координат призводять до “стрибків” у рядах координат станцій, отриманих з офіційних тижневих розв’язків.

Це унеможливило використання офіційного розв’язку для дослідження рухів станцій мережі на усьому проміжку часу спостережень.

Крім того, офіційні тижневі розв’язки не містять ніякої інформації про зсуви опорних станцій, тому що їхні координати фіксувалися до значень ITRF.

Оскільки недоліки офіційного комбінованого розв’язку EUREF були добре відомі, у EUREF був організований спеціальний проект “Time Series Monitoring” (діяв у 2001–2008 рр.), основним завданням якого стало отримання надійних однорідних рядів координат станцій мережі, придатних для геодинамічних досліджень [7, 8].

Починаючи з 1302 GPS-тижня, Центральне бюро EPN почало обчислювати тижневі комбі-

новані розв’язки, використовуючи метод мінімальних обмежень, що давав змогу частково подолати зазначені вище проблеми. Центральне бюро EPN почало надавати також інший розв’язок, отриманий з переопрацювання офіційних тижневих розв’язків з накладенням мінімальних обмежень (так звані “CLEANED Time Series”) у межах новоствореного проекту “Time Series Monitoring”. Цей розв’язок придатний для геодинамічних досліджень [3, 4], але, на жаль, його результати доступні тільки у графічному вигляді, а не в SINEX форматі.

Нами була зроблена спроба отримати незалежний розв’язок для координат українських станцій мережі EUREF. Цей розв’язок обчислювався як комбінація тижневих розв’язків тих центрів аналізу, до складу підмереж яких входять українські перманентні станції.

Комбінація здійснювалась так. Спочатку видалялись апріорні обмеження на координати українських станцій з тижневих розв’язків окремих центрів аналізу. Для цього кроку використовувалася апріорна інформація, що міститься у SINEX-файлах. Потім застосовувалася стандартна процедура приведення отриманих “вільних” розв’язків до ITRF2005 за допомогою трансформації Гельмерта з сімома параметрами. Завершальний етап полягав у використанні методу найменших квадратів для отримання комбінованого тижневого розв’язку. Новий комбінований розв’язок показав дещо кращу систематичну стабільність стосовно ITRF2005 ніж комбінований офіційний розв’язок EUREF, хоча новоутворені похибки координат станцій залишаються на тому самому рівні, що й випадкові похибки офіційного розв’язку. Новий комбінований розв’язок може бути використаний для визначення швидкостей українських перманентних станцій.

Висновки

1. Густота станцій мережі EUREF недостатня для дослідження локальних деформацій земної кори, викликаних тектонічною активністю.

2. Зміни координат станцій, що спостерігаються протягом тривалого часу, можуть бути

викликані як геофізичним сигналом, так і впливом опорної системи координат, похибок опрацювання даних, конфігурацією мережі станцій тощо.

3. Для отримання надійних оцінок швидкостей станцій європейської GNSS-мережі необхідно виключити вплив послідовної зміни реалізацій опорної системи координат через одержання нового однорідного розв'язку.

4. Враховуючи, що рух тектонічних блоків доволі постійний у “сучасному” часі, можна відокремити сезонні варіації у положенні станцій. Локальні ефекти на станціях можна контролювати, порівнюючи з поведінкою станцій, що розташовані поруч.

5. Швидкості станцій EPN добре узгоджуються (на рівні ~ 1 мм/рік) з геофізичною моделлю NNR-NUVEL-1A для євразійської плити. Водночас станції, розташовані близько до границь тектонічних блоків, показують розбіжність із моделлю у кілька міліметрів за рік.

Література

1. Панафидина Н.А., Малкин З.М. Вычисление однородного ряда координат европейских GPS-станций из переработки недельных решений EPN // Труды ИПА РАН, 2004. – Вып. 11. – С. 14–28.

2. Панафидина Н.А., Малкин З.М. Определение скоростей европейских GPS-станций // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2008. – № 1. – С. 34–41.

3. Савчук С., Тимошенко Н. Визначення швидкості зміни координат станцій української перманентної мережі // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Вип. II. – Львів, 2005. – С. 66–70.

4. Савчук С., Тимошенко Н., Тимошенко О. Аналіз способів визначення швидкостей зміни координат на прикладі українських перманентних станцій // Зб. матеріалів XI Міжнародного науково-технічного симпозиуму “Теоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS- і GIS-технології”, Алушта (Крим), 2006. – С. 63–65.

5. Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C. ITRF2005: a new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters. J Geophys Res 112:9401. doi:10.1029/2007JB004949.

6. Bruyninx C. The EUREF Permanent Network: a multi-disciplinary network serving surveyors as well as scientists // GeoInformatics, 2004. Vol. 7, P. 32–35.

7. Kenyeres A., Bosy J., Brockmann E., Bruyninx C., Caporali A., Hefty J., Jivall L., Kosters A., Poutanen M., Fernandes R., Stangl G. EPN Special

Project on Time series analysis, preliminary results and future prospects // EUREF Publication, 2002. No. 10, ed. J. A. Torres and H. Hornik, P. 72–75.

8. Kenyeres A., Bruyninx C. EPN coordinate time series monitoring for reference frame maintenance // GPS Solutions, 2004. No 8, P.200–209 (DOI 10.1007/s10291-004-0104-8).

9. Habrich H. Combining the EUREF Local Analysis Centers' solutions // Mitt. Bundesamtes Kartogr. Geod., Frankfurt am Main, Germany: 2002. Bd. 23, P. 62–66.

10. Nikolaidis Rosanne. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System //Dissertation for the degree Doctor of Philosophy in Earth Sciences. – San Diego, 2002. – 262 p.

11. Яцків Я.С., Болотіна О.В., Болотін С.Л., Медведський М.М., Хода О.О., Вольвач О.Є. Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки (Укргеокомережа). – К.: Компанія ВАІТЕ, 2005. – 60 с.

До питання про опрацювання часових рядів довготривалих безперервних GNSS-спостережень

О. Терещук

Аналізуються часові ряди координат GNSS-станцій і способи визначення швидкості їх руху. За умови відсутності яких-небудь сторонніх впливів ця швидкість являє собою рух геологічної структури. Розглянуто деякі ефекти, які порушують поставлену умову.

К вопросу обработки временных рядов длительных непрерывных GNSS-наблюдений

О. Терещук

Анализируются временные ряды координат GNSS-станций и способы определения скорости их движения. При условии отсутствия каких-либо посторонних воздействий эта скорость представляет собой движение геологической структуры. Рассмотрены некоторые эффекты, которые нарушают поставленное условие.

To a question of processing of time series long continuous GNSS-observations

O. Tereshchuk

Are analyzed time series of coordinates GNSS of stations and ways of definition of velocity of their movement. Under condition of absence of any extraneous influences, this velocity represents movement of geological structure. Some effects which break the laid down condition are considered.