

УДК 528.3

Н. Каблак

Національний університет "Львівська політехніка"

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ТРОПОСФЕРНИХ ЗАТРИМОК GNSS-СИГНАЛІВ

© Каблак Н., 2009

Рассмотрены вопросы определения и использования тропосферных задержек GNSS-сигналов на современном этапе развития спутниковых технологий.

Questions of definition that uses of tropospheric delays of GNSS-signals at the present stage of development of satellite technologies are considered.

Постановка проблеми. Постійні мережі з відслідковування GNSS супутників стали надзвичайно цінним інструментарієм для багатьох наукових застосувань. Передусім до таких мереж можна зарахувати глобальну мережу IGS (International GNSS Service) та регіональну мережу EPN (EUREF Permanent Network). До числа таких мереж можна зарахувати також національні мережі референсних станцій, що працюють у перманентному режимі, наприклад, німецька мережа GREIF, а за останні роки і мережі активних референсних станцій, які дозволяють користувачам отримувати свої координати у режимі реального часу (RTK-технології). Прикладом такої мережі у Західному регіоні України слугує віднедавна мережа референсних станцій ZAKPOS [8].

Для отримання надійних оцінок параметрів великомасштабної мережі повинні істотно бути зменшеними, за умови "безпомилковості" вихідних координат референсних станцій, два головних джерела похибки, а саме похибки орбіти супутників GNSS та затримок сигналів у тропосфері.

У 1992 р. через IGS була запроваджена практика точного визначення ефемерид GPS супутників, які стали стандартними їхніми продуктами високої точності і яка фактично вивела невизначеність орбіти із списку істотних складових загальної похибки супутникової технології визначення координат. Проблемою, що залишається сьогодні, є визначення та врахування тропосферних затримок. Особливо важливою частиною цієї проблеми є моделювання вологості складової затримки з високою точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Всі звиклі атмосферні моделі "змирилися" з тим, що врахувати вологу складову затримки винятково від поверхневих вимірювань температури та відносної вологості неможливо [2]. Фактично, негідростатичний компонент тропосферної затримки дістає значний вплив від розподілу водяної пари у приземних шарах атмосфери, яка не може бути достатньо спрогнозована на основі окремих поверхневих вимірювань [1].

Єдиним виходом із цієї ситуації є спроби включити атмосферні параметри як додаткові невідомі під час аналізу даних GNSS-спостережень від перманентних станцій мережі. Як показали подальші дослідження, незалежне визначення атмосферних параметрів (тропосферних затримок) у вигляді додаткових невідомих, сприяє кращій оцінці часових змін координат станцій, що може мати і вже має важливе значення для геодинамічного моніторингу земної кори. Важливим аспектом цього підходу є також те, що знання Zenітних тропосферних затримок дозволяє отримувати цінну інформацію для кліматології та метеорології, адже інтегрована водяна пара є важливим параметром для рівноваги енергії атмосфери і має значний внесок (більш ніж 60 %) природного парникового ефекту. З цієї позиції GNSS-технології можуть сприяти вдосконаленню моделювання клімату та прогнозу погоди.

З іншого боку, якщо дослідження клімату і метеорології можуть значною мірою опиратися на GNSS-вимірювання, то можна поставити і зворотну задачу. Для точного координування за допомогою GNSS-вимірювань теж можна отримати вигоду від використання числових моделей погоди для визначення тропосферних затримок у тих застосуваннях, де оцінка тропосфери не є можливою, наприклад, при кінематичних методах та методі швидкої статистики [4].

Постановка завдання. Основною метою нашої роботи було дати аналіз сучасним тенденціям до визначення та можливостей використання тропосферних затримок сигналів GNSS.

Виклад основного матеріалу. Атмосфера Землі переважно поділяється на дві основні оболонки – тропосферу та іоносферу, оскільки умови розповсюдження супутникових сигналів в цих двох частинах достатньо відмінні:

- **тропосфера** (нейтральна атмосфера) є нижчою частиною атмосфери і простягається від поверхні Землі до висоти близько 20 км. Розповсюдження сигналу залежить переважно від температури, тиску та вмісту водяної пари в атмосферних шарах. Для мікрохвильової довжини хвилі нейтральна атмосфера не є дисперсною на відміну від оптичних довжин хвиль, що має місце при SLR-спостереженнях, де вона є дисперсною. Для приймачів на борту ШСЗ тропосфера не є перешкодою.

- **іоносфера** – верхня частина атмосфери. Розташована десь між 70 та 1000 км над поверхнею Землі. Розповсюдження сигналу переважно затримують вільно заряджені частинки. Іоносфера є дисперсним середовищем для мікрохвильових сигналів.

За можливості на сучасному етапі отримання з високою точністю орбіт від IGS, потреба розглядати похибки орбіти, як важливе джерело загальної похибки, вже не приходиться. Затримки розповсюдження кодових і фазових GNSS сигналів, що зумовлені нейтральною атмосферою (тобто тропосферою), напевне один із останніх факторів, що обмежує точність геодезичних застосувань GNSS. Zenітна затримка (ZTD) через тропосферну рефракцію має порядок 2.3 м або близько 8 наносек для станції на рівні моря і стандартних атмосферних умовах.

Як відомо, розрізняють два види тропосферних затримок сигналів:

- відносні тропосферні затримки, які зумовлені похибками (немодельованими) тропосферної рефракції в одній кінцевій точці базової лінії щодо другої кінцевої точки.
- абсолютні тропосферні затримки, які спричинені похибками (немодельованими) тропосферної рефракції, що є спільними для обох точок базової лінії.

Відзначимо, що причиною відносних тропосферних затримок є передусім зміщення станції по висоті, тоді як абсолютні тропосферні затримки приводять до зміщених оцінок масштабу довжин базових ліній.

Для локальних та невеликих регіональних кампаній спостережень відносні тропосферні затримки набагато важливіші і найбільше піддаються моделюванню.

Тропосферне моделювання у популярному програмному пакеті Bernese ґрунтується на такому основному рівнянні:

$$\Delta\rho(t, A, z) = \text{апріорна_ модель}(z) + ZTD(t, z) + \text{гор.градієнт}(t, A, z).$$

Як апріорну можна використовувати загальноприйняті моделі врахування тропосферної затримки:

- модель Saastamoinen [7],
- суху і вологу моделі Niell [6], а при використанні моделі Saastamoinen для zenітної тропосферної затримки рекомендується використовувати функцію відображення Niell,
- модифіковану модель Hopfield [5],
- модель, що базується на формулі Essen і Froome [2],
- модель Marini-Murray [2].

Відомо, що інтегрування базової формули для врахування тропосферної затримки в напрямі zenіту дає zenітну гідростатичну (суху) затримку (ZHD або ZDD) та zenітну вологу затримку (ZWD), відповідно,

$$ZDD = 10^{-6} \times \int N_d(S) dS,$$

$$ZWD = 10^{-6} \times \int N_{wv}(S) dS.$$

в яких загальна zenітна затримка становить $(ZTD) = ZDD + ZWD$.

Відповідно, похила тропосферна затримка STD буде

$$STD_i = ZDD_i \times m_{d,i}^k(\alpha) + ZWD_i \times m_{wv,i}^k(\alpha). \tag{1}$$

У цьому рівнянні використовуються відомі функції відображення m_d та m_{vv} , які отримують на основі часових змін метеопараметрів і географічного положення для i приймача та k GNSS супутника за деякого кута відсічки α .

Стандартні моделі атмосфери використовують метеорологічні дані, але вони не в стані описати метеоумови на шляху проходження GNSS сигналу протягом сесії спостереження [2].

Використання під час оброблення супутникових спостережень невідомих тропосферних параметрів, особливо вологості складової (суха складова може бути змодельована на основі атмосферного тиску), дозволяє для кожної станції отримати значення тропосферної затримки.

Розглянемо рівняння (1), в якому для простоти приймемо

$$STD_i = ZTD_i \times m_{kombin.,i}^k(\alpha),$$

де

$$m_{kombin.,i}^k(\alpha) = \frac{ZDD_i \times m_{d,i}^k(\alpha) + ZWD_i \times m_{vv,i}^k(\alpha)}{ZDD_i + ZWD_i}.$$

Тоді тропосферну затримку можна оцінити у разі опрацювання GNSS-спостережень (фазові вимірювання Φ_i^k) методом найменших квадратів, використовуючи спостереження подвійних різниць, тобто

$$\Phi_{ij}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} - \lambda \times N_{ij}^{kl} + ZTD_j \times (m_j^l - m_j^k) - ZTD_i \times (m_i^l - m_i^k), \quad (2)$$

де ρ – псевдовиміряна відстань, λ – довжина хвилі GNSS-сигналу, N – цілочислова величина із розв'язку фазової неоднозначності.

Переважно невідома зенітна тропосферна затримка оцінюється в мережі. У цьому разі отримані оцінки можуть враховувати будь-які зміни, що відбуваються в атмосфері. Проблемним питанням цієї технології є сумарне врахування з тропосферною затримкою деяких джерел додаткових впливів, таких, наприклад як припливні ефекти, вологе тропосферне коливання тощо.

У таблиці, як приклад, наведено значення тропосферних зенітних затримок для референсних станцій мережі ZAKPOS та перманентної станції SULP, отриманої на основі рівняння (2) з використанням мережевого програмного забезпечення GPSNet.

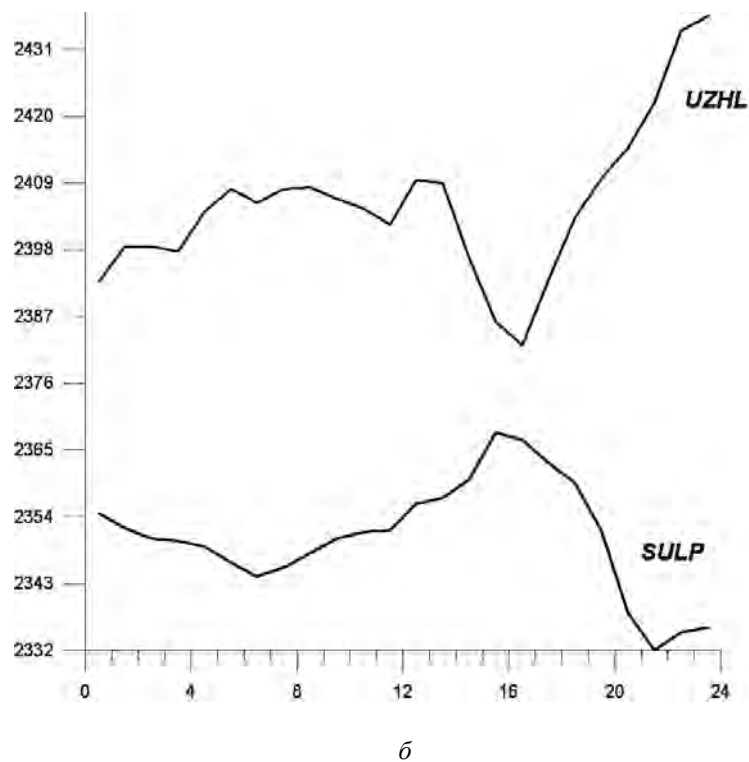
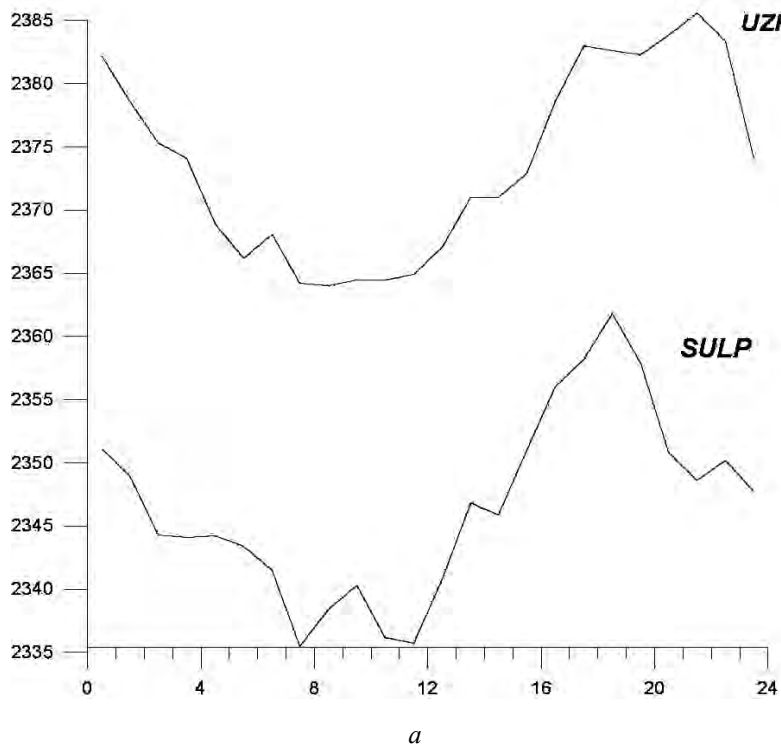
Таблиця

Величини зенітних тропосферних затримок для станцій мережі ZAKPOS

	MUKA	KHST	VBER	MIZG	RAKH	SULP
Час	17 жовтня 2009 р					12 00
$ZTD, м$	2.38280	2.36960	2.34827	2.28059	2.28037	2.29884
$\sigma, м$	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002
Час	17 жовтня 2009 р					12 10
$ZTD, м$	2.38158	2.36794	2.34514	2.28180	2.27455	2.29934
$\sigma, м$	0.00002	0.00002	0.00001	0.00002	0.00002	0.00002
Час	17 жовтня 2009 р					12 20
$ZTD, м$	2.38111	2.36688	2.34502	2.28355	2.27360	2.29728
$\sigma, м$	0.00001	0.00002	0.00001	0.00002	0.00002	0.00002
Час	17 жовтня 2009 р					12 30
$ZTD, м$	2.37942	2.36598	2.34513	2.28266	2.27456	2.29407
$\sigma, м$	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002	0.00002

Відзначимо, що під час отримання даних таблиці за апіорну модель приймали атмосферну модель для сухої та вологості складових Niell, а за функції відображення також Niell. До того ж мінімальний кут відсічки становив 5° .

Аналогічно були отримані дані зенітної тропосферної затримки *ZTD* для перманентних станцій *SULP* та *UZHL*. На рисунку у графічному вигляді наведений добовий хід *ZTD* на 5 жовтня (а) та 10 жовтня (б) 2009 р. для вказаних станцій.



Добовий хід зенітної тропосферної затримки для станцій *SULP* та *UZHL*

Як видно із даних таблиці зміна тропосферної затримки за короткі проміжки часу (10 хв) становить декілька мм, то на добовому русі між двома станціями (рисунок, а, б) зміни доволі істотні через 5 днів. Ці зміни ніякими апріорними моделями виявити практично неможливо.

Альтернативний шлях – моделювати тропосферну зенітну затримку стохастичною моделлю, яка опрацьовує невідому затримку як змінний параметр від часу. Математичне урівнювання виконується при цьому з послідовним фільтром Kalman. Головна суть цього підходу полягає в тому, що якщо просторово-часові характеристики можуть бути охарактеризовані на основі імовірнісних законів або статистичних моделей, то ZTD/ZWD можна передбачити за змінами просторових вимірів та часових масштабів згідно з заданою функцією щільності імовірності в значеннях просторово-часових кореляцій коливаль.

Стохастичними моделями використовують, як правило, дві моделі – модель випадкового блукання та модель випадкового процесу Гаусса–Маркова першого роду [9].

Модель випадкового блукання ґрунтується на такому рівнянні:

$$\frac{dZWD}{dt} = w(t),$$

де $w(t)$ є білою шумовою випадковою величиною з нульовим середнім значенням.

Дискретний розв'язок цього рівняння має такий вигляд:

$$ZWD(t + \Delta t) = m \times ZWD(t) + \sqrt{\Delta t} \times w_{rw}.$$

Відповідно стандартне відхилення σ для процесу випадкового блукання буде

$$\sigma_{rw} = \sqrt{\left[\frac{(ZWD(t + \Delta t) - ZWD(t))^2}{\Delta t} \right]}.$$

Процес Гаусса–Маркова першого порядку, який виражає зміни вологості зенітної тропосферної затримки (ZWD) в часі (dt), можна описати таким рівнянням:

$$\frac{dZWD}{dt} = -\frac{ZWD(t)}{\tau_{G-M}} + w(t).$$

де τ_{G-M} – часом кореляції Гаусса–Маркова.

Дискретний розв'язок можна отримати із рівняння

$$ZWD(t + \Delta t) = m \times ZWD(t) + \sqrt{1 - m^2} \times w_{G-M}(t),$$

у якому $m = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{G-M}}\right)$.

Параметр m є показниковою кореляційною функцією між суміжними вимірними значеннями ZWD, вибраними на певному часовому інтервалі Δt між двома епохами спостережень

Отримати параметри стохастичних моделей σ_{rw} , τ_{G-M} можна лише із аналізу даних GNSS спостережень та їх опрацювання, що і буде предметом подальших досліджень.

Висновки. Отже, ми можемо з впевненістю вважати, що тропосферні затримки мають порядок величин, що є вищим за шумові похибки фазових вимірювань. Їхній вплив повинен бути зменшений для того, щоб використати всю потенційну точність GNSS-технології. Можливими є два методи:

- моделювання тропосферних впливів без використання GNSS спостережень, тобто на основі наземних метеорологічних вимірювань та зондувань тропосфери;
- визначення параметрів тропосфери, наприклад, зенітної тропосферної затримки в загальному обчислювальному процесі GNSS та їхнє подальше використання у прикладних задачах.

1. Каблак Н.І. Дослідження водяної пари, що випадає в атмосфері // Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – С.89–94. 2. Миронов М.Т., Емець А.Н. и другие. Рефракция атмосферы при лазерных наблюдениях ШСЗ. – К.:Препринт ГАО УАН, 1993. – 12 с. 3. Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I.,

A.E. E. Rogers, and G. Elgered *Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length*, *Radio Science*, Vol. 20, No. 6. – 1985. – P. 1593–1607. 4. Mendes V.B., Langley R.B. *Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning*, *Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, U.S.A., 1–3 June 1998*. – P. 337–347. 5. Goad C.C., and Goodman L. *A modified Hopfield tropospheric refraction correction model* // *The American Geophysical Union, CA, USA*. – 1974. – 28 pages. 6. Niell A.E. (1996) *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*, *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, No.B2. – P. 3227–3246. 7. Saastamoinen J. (1972) *Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radioringing if satellites*, *Geophysical monograph*, 15, American Geophysical Union, Washington, D. C., USA. – P. 247–252. 8. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. *Creation of ZAKPOS active Network Reference Stations for Transcarpatian Region of Ukraine* // *International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications*. – Berlin, 11–14 November 2008. *EUPOS Presentations*. 9. Tralli D.M. and Lichten S.M. *The stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements*. – *Bull. Geod.* – 1990. – P. 127–159.

УДК 528.21/22

П.Д. Двудіт, Ю.І. Голубінка

Національний університет “Львівська політехніка”

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТ КВАЗІГЕОЇДА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ ГЕОЇДА / КВАЗІГЕОЇДА ТА ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

© Двудіт П.Д., Голубінка Ю.І., 2009

Рассмотрена точность определения высот квазигеоида для территории Украины на основе сравнения различных моделей геоида/ квазигеоида и гравитационного поля Земли.

In this article is considered the question of accuracy of quasigeoid heights determination for the territory of Ukraine using comparison of different models: geoid / quasigeoid and Earth's gravity field models.

Вступ. Нині існують різні моделі геоїда / квазігеоїда / та гравітаційного поля Землі, за якими обчислюють висоти квазігеоїда, гравіметричні складові відхилень прямовисних ліній та інші деривати. Для обчислення моделей використовують два підходи. У першому використовують наземні гравіметричні дані та інтеграл Стокса. У другому варіанті використовують моделі геопотенціалу.

Першу геопотенціальну модель порядку $n=8$, визначену за наземними гравіметричними даними, опрацював Жонголович в 1956 році [2, 7]. Друга модель була визначена за супутниковими даними у 1966 році у Смітстонському інституті. Ці моделі давали можливість обчислювати висоти квазігеоїда з точністю ± 10 м. Від цього часу спостерігається значний прогрес щодо точності моделей геопотенціалу.

Починаючи з 1978 року, опрацьовано і опубліковано багато моделей гравітаційного поля до ступеня і порядку 180 і вище, а в 1985 році опубліковано модель OSU 80 E / F, яка була визначена до ступеня і порядку 360.

Модель EGM 96 порядку $n=360$ опублікована у 1996 році. Вона містить покращені гравіметричні дані, аномалії з ERS-1 і з GEOSAT, обширні супутникові дані – включаючи нові дані з SLR,