

УДК 528.3

ОЦІНКА ВЕЛИЧИНИ ВПЛИВУ ТРОПОСФЕРИ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ У МЕРЕЖІ ZAKPOS

Н. Каблак

Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Ключові слова: тропосфера, RTK-режим, координати.

Постановка проблеми

В 2009 р. на території Західної України почала працювати мережа активних референціальних станцій ZAKPOS/UA-EUPOS [1].

Мережеві технології високоточних геодезичних визначень ґрунтуються на реалізації можливостей спільної обробки результатів спостережень, виконаних у мережі референціальних станцій, і формуванні так званих широкозонних корекцій для точного урахування іоносферних, ефемеридних, частотно-часових і тропосферних похибок. Така обробка передбачає використання сильної просторово-часової корельованості зазначених похибок для всіх станцій мережі з метою оцінювання цих похибок окремо або у вигляді лінійних комбінацій разом з іншими параметрами (координатами станцій, відхиленнями шкал часу між станціями тощо). Результати оцінювання похибок (або параметрів їх моделей) інтерполюються на місця розташування споживачів робочої зони мережі. Сформовані виправлення й змодельовані на їхній основі "віртуальні" спостереження за допомогою Інтернету (або іншими способами) передаються для обробки результатів спостережень користувачів.

Мережева обробка даних для визначення точного місцеположення у режимі реального часу (RTK) передбачає визначення та оцінку поправок до GNSS спостережень, що залежать від відстані між референціальними станціями і приймачем користувача.

Істотним недоліком методу RTK є обмеження максимальної відстані між референціальними станціями та мобільним приймачем. Це обмеження викликане залежними від відстані помилками (орбіти, іоносферної та тропосферної затримки сигналу тощо).

Порядок величин тропосферних затримок є вищим за шумові похибки фазових вимірювань. Їх вплив треба зменшити для того, щоб використати всю потенційну точність GNSS-технології. Цієї проблеми і стосується ця робота.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Зенітна затримка (ZTD) через тропосферну рефракцію має порядок 2.3 м або близько 8 наносекунд для станції на рівні моря і в стандартних атмосферних умовах. Ці дослідження, що розпочалися ще в 60-ті роки минулого століття і не закінчилися досі, потребували величезних зусиль багатьох вчених світу [2–9].

Нині багато провідних вчених вважають вплив тропосфери основним джерелом похибок при GPS-спостереженнях, наприклад, І. Бок [10], П. Мишра і

П. Енг [11], швейцарська група вчених із Астрономічного інституту Берна [12].

Сам процес визначення зенітних тропосферних затримок складається з двох основних кроків. На першому кроці, утворенням мережевих подвійних фазових різниць, виключається вплив іоносфери (ionosphere-free GPS carrier-phase double difference measurements), а вже потім, на другому кроці, утворюються рівняння зв'язку (поправки до прийнятої апріорної моделі тропосфери) та розв'язуються нормальні рівняння способом найменших квадратів.

Атмосфера нестабільна як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямку. Спостерігаються великомасштабні та дрібні неоднорідності, які, своєю чергою, змінюються іноді за хвилини і секунди. Тропосферну поправку до псевдовіддалі через ці зміни нині визначають практично без похибки за стан атмосфери, якщо враховуються всі інші похибки вимірювання. В інший момент часу (навіть через кілька секунд чи частки секунд) саме значення цієї тропосферної поправки до псевдовідстані може бути іншим. Все залежить від просторово-часових змін стану атмосфери вздовж шляху проходження сигналу від супутника до спостерігача референційної станції за цей інтервал часу. Проте в той самий момент часу сигнал від супутника до роверного приймача проходить інші шари атмосфери, у яких фізичні умови можуть бути іншими. Все залежатиме, головне, від відстаней "база-ровер". Тому і у рекомендаціях щодо побудови мережі активних референціальних станцій акцентується увага саме на відстані між станціями. У разі збільшення відстаней між такими станціями можливий додатковий ефект, зокрема від некомпенсованої тропосферної затримки.

Відомі підходи до компенсації впливу тропосфери у тому або іншому вигляді передбачають інтерполяцію тропосферних затримок, оцінених для станцій мережі, на місце розташування роверного приймача. Основні розходження між підходами полягають у виборі апроксимуючих функцій.

Так, у Німеччині запропонована інтерполяція метеопараметрів, заданих у вузлах мережі з кроком 1° [13, 14], на точку розташування роверного приймача. Причому інтерполяція здійснюється для кожного метеопараметра окремо. Згідно з [14] це забезпечує точність компенсації зенітних тропосферних затримок з похибкою близько 40 мм (RMS).

У Швейцарії апроксимація зенітних тропосферних затримок здійснюється з використанням їхнього розкладання в ряд по широті, довготі й висоті приймача споживача [15]. Таке подання забезпечує компенсацію зенітних тропосферних затримок для території Швейцарії (RMS) з точністю близько 3 см.

Постановка завдання проблеми

Конкретною метою нашого дослідження є спроба проаналізувати способи уточнення тропосферної поправки для роверного приймача в RTK-режимі. За цими даними зробити висновок щодо похибки обчислення координат через точність врахування впливу тропосфери в реальному часі спостережень. Мети досягнуто на основі математичних методів інтерполяції та МНК (метод найменших квадратів) з використанням GNSS-спостережень у мережі ZAKPOS.

Виклад основного матеріалу проблеми

У загальному випадку мережеві технології для високоточних диференціальних навігаційних і геодезичних визначень ґрунтуються на реалізації можливостей спільної обробки результатів спостережень багатьох базових станцій і формуванні широкозонних корекцій поправок, що повільно змінюються, таких як іоносферні й тропосферні. Спостереження на двох довжинах хвиль дають змогу виключити похибку за вплив іоносфери.

Інтегрування базової формули для врахування тропосферної затримки в напрямі зеніту дає зенітну гідростатичну (*суху*) затримку (*ZHD* або *ZDD*) та зенітну вологу затримку (*ZWD*), відповідно,

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

в яких загальна зенітна затримка становить $ZTD = ZDD + ZWD$.

Відповідно, тропосферна затримка *ZTD* на деякій зенітній відстані буде

$$ZTD = ZDD \times m_d + ZWD \times m_w.$$

У цьому рівнянні використовуються відомі функції відображення m_d та m_w , які отримують на основі часових змін метеопараметрів та географічного положення [16].

Функції RTK спостережень можна реалізувати як у традиційному варіанті (кожна вибрана базова станція

надає користувачам відповідні RTCM-повідомлення, які придатні для використання на відстані 20–25 км від станції), так і у варіанті RTK/VRS (мережевий варіант RTK), коли в реальному часі формується інформація VRS за даними найближчих станцій мережі.

Оскільки на території України відстані між станціями мережі ZAKPOS змінюються в межах від 50 км до 250 км і більше, і тепер все ще залишається актуальною проблема врахування атмосферної затримки проходження сигналу від супутника до спостерігача в реальному часі.

Для оцінювання впливу *ZTD* на визначення координат у RTK-режимі використано 12 часових вимірювань тропосферної затримки на семи станціях мережі ZAKPOS. У таблиці наведено значення різниць *ZTD*, визначених із мережевої обробки та ZTD_o , знайдених за допомогою апроксимації на умовно прийнятій роверній станції :

1. Різниці

$$ZTD - ZTD_o = c_0 + c_\varphi \cdot \Delta\varphi + c_\lambda \cdot \Delta\lambda + c_h \cdot \Delta h + c_{h^2} \cdot \Delta h^2$$

де *ZTD* – зенітна тропосферна затримка в точці з координатами (φ, λ, h), широта, довгота й висота відповідно; ZTD_o – зенітна тропосферна затримка на умовно прийнятій роверній станції.

2. Частки

$$\frac{ZTD}{ZTD_o} = c_0 + c_\varphi \cdot \Delta\varphi + c_\lambda \cdot \Delta\lambda + c_h \cdot \Delta h + c_{h^2} \cdot \Delta h^2$$

безпосередньо зенітної тропосферної затримки на роверний приймач

$$ZTD = c_0 + c_\varphi \cdot \varphi + c_\lambda \cdot \lambda + c_h \cdot h + c_{h^2} \cdot h^2$$

За кожним методом *ZTD* для роверного приймача розраховували методом МНК та інтерполяцією з урахуванням члена із Δh^2 та без нього.

Різниці тропосферних затримок *ZTD* та ZTD_o , визначених різними методами наближення в 12 часових точках

№	Метод різниць $ZTD-ZTD_o$ (МНК), мм		Метод різниць $ZTD-ZTD_o$ (інтерпол.), мм		Метод часток ZTD / ZTD_o (МНК), мм		Метод часток ZTD / ZTD_o (інтерпол.), мм		Прямий метод для ZTD (МНК), мм		
	з Δh^2	без Δh^2	з Δh^2	без Δh^2	з Δh^2	без Δh^2	з Δh^2	без Δh^2	з Δh^2	без Δh^2	
	1	1.7	2.2	8.4	9.5	0.1	2.2	0.6	7.9	1.6	
2	4.7	4.2	5.8	6.9	4.5	4.6	4.4	5.1	4.7	4.4	
3	2.7	1.9	1.6	1.6	3.8	2.3	3.8	1.6	2.8	2.1	
4	6.5	6.7	4.7	3.9	6.9	6.4	6.9	5.1	6.5	6.5	
5	6.7	5.9	5.8	6.7	6.9	6.5	6.9	5.2	6.7	6.2	
6	1.0	2.9	1.7	1.2	0.9	1.6	0.9	3.5	1.0	2.2	
7	5.0	4.7	5.4	6.1	4.9	4.9	4.9	5.0	5.0	4.8	
8	0.6	0.0	0.0	0.7	0.7	0.4	0.7	0.5	0.6	0.2	
9	7.5	7.4	9.3	9.9	7.1	7.6	7.1	8.9	7.5	7.5	
10	0.2	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	
11	3.1	3.6	5.8	5.8	2.5	3.4	2.5	5.8	3.1	3.5	
12	5.7	6.0	6.8	6.6	5.5	5.9	5.5	6.9	5.7	5.9	
Середнє	3.8	3.8	4.6	4.9	3.7	3.8	3.7	4.6	3.8	3.8	

Різниці тропосферних затримок, обчислених різними методами наближення, менші за 1 см. Середнє значення цих різниць у дванадцяти часових точках становить 3,7–4,6 мм.

Для обчислення координат роверної станції із урахуванням різниць тропосферних затримок:

– від наближених декартових прямокутних координат роверного приймача здійснено перехід до еліпсоїдних координат [17];

– в еліпсоїдну координату h введено апроксимоване значення тропосферної затримки в зенітному напрямку;

– за одержаними значеннями обчислено поправки в координати роверного приймача.

Середні значення поправок в планові координати за 12 часовими точками для роверного приймача становлять: по $X = 0,6$ см, по $Y = 0,25$ см, по $Z = 0,75$ см.

Висновки

Зроблена спроба моделювання або інтерполювання помилок, що впливають на точність визначення координат, за допомогою розроблених математичних методів для референціальних станцій мережі ZAKPOS.

Спочатку в результаті опрацювання GNSS-спостережень, розв'язавши систему рівнянь, отримують величини зенітних тропосферних затримок у місцях розміщення базових станцій мережі. На другому етапі визначаються параметри функції, яка уможливає інтерполяцію одержаних зенітних тропосферних затримок на точку розміщення роверного приймача.

Результати виконаних досліджень показали, що різниця тропосферних затримок не залежить від використання математичних представлень і досягають (0,5–1,0) см, внаслідок чого похибка у визначення планових координат становить близько 1 см.

Література

1. Офіційний сайт мережі референціальних станцій ZAKPOS: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>
2. Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E. and Elgered G. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length // Radio Science, Vol. 20, № 6. – 1985. – P. 1593–1607.
3. 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.
4. Goad C.C. and Goodman L. A modified Hopfield tropospheric refraction correction model // The American Geophysical Union, CA, USA. – 1974. – 28 p.
5. Niell A.E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // Journal of Geophysical Research, 1996. – Vol.101, № B2. – P. 3227–3246.
6. Saastamoinen J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radioringing if satellites // Geophysical monograph, 15, American Geophysical Union, Washington, D. C., USA, 1972. – P. 247–252.
7. Mendes V.B. and R.B. Langley. A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data // In Proceedings of the International Symposium on

Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation KIS94, Banff, Canada, 30 August – 2 September, 1994. – P. 87–98.

8. Boehm J., Niell A., Tregoning P. and Schuh H. 2006a. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // Geophysical Research Letters 33, L07304. DOI: 10.1029/2005GL025546.
9. Steigenberger P., Boehm J. and Tesmer V. 2009. Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading // Journal of Geodesy 83: 943–951, DOI 10.1007/s00190-009-0311-8.
10. Misra P.N. Global Positioning System // Signals, Measurements and Performance P.N. Misra, P. Enge. USA: Ganga-Jamuna Press. 2001. 390 p. Англ.
11. Schueler T., G.W. Hein and Eissfeller B. A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation Proceedings of GNSS 2001, V GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation, Seville, Spain, May 8–11, 2001
12. Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001, online: <http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html>
13. The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks // Pres. IAG Symposium on Positioning, Birmingham, UK, 19–24 July.
14. Кабляк Н.І. Сучасні підходи до визначення та використання тропосферних затримок / Н.І. Кабляк // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2009. – Вип. 72. – С. 22–27.
15. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Колинз Д.; пер. з англ. третього вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.

Оцінка величини впливу тропосфери на точність визначення координат у мережі ZAKPOS

Н. Кабляк

Проаналізовано моделювання тропосферних поправок, що впливають на точність визначення координат у мережі ZAKPOS, за допомогою математичних методів.

Оценка величины влияния тропосферы на точность определения координат в сети ZAKPOS

Н. Кабляк

Проанализировано моделирование тропосферной задержки, которая влияет на точность определения координат в сети ZAKPOS, с помощью математических методов.

An estimate of the effects of the troposphere on the accuracy of positioning in the network ZAKPOS

N. Kablak

The analysis of modeling tropospheric propagation delay that influences accuracy of definition of coordinates of network ZAKPOS, by means of mathematical methods.