

Н. Турчин, Ф. Заблоцький
Національний університет "Львівська політехніка"

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ТА ЇЇ СКЛАДОВИХ

© Турчин Н., Заблоцький Ф., 2013

Освещены вопросы определения тропосферной задержки: по данным радиозондирования атмосферы, только по данным приземных значений основных метеорологических параметров, по данным, полученным в результате GNSS-наблюдений. Проведены сравнения и оценка точности полученных результатов.

The paper illuminates the following questions according to the determination tropospheric delay: by the data of atmosphere radio sounding, by the data of the basic surface meteorological parameters only and by the data derived from GNSS observations. Comparison of the results and estimation of accuracy have been carried out.

Постановка проблеми. Глобальна система визначення місцезоташування GPS (*Global Positioning System*) сьогодні домінує в геодезії та навігації. Попри оперативність та всепогодність проведення GPS-спостережень вони можуть забезпечувати доволі високу точність отримуваних результатів. Ця точність регламентується цілою низкою похибок, величину яких або достатньо успішно корегують, або виключають. Серед них основною похибкою, що важко піддається врахуванню для високоточних GPS-визначень, є похибка, викликана впливом нейтральної атмосфери (тропосфери і стратосфери). Цю похибку називають тропосферною затримкою, яка має дві складові: суху і вологу. У зенітному напрямку величина загальної тропосферної затримки (суха + волога складові) коливається на рівні моря залежно від фізико-географічних умов приблизно від 2,3 до 2,6 м [2]. Проблема точного визначення тропосферної затримки полягає в тому, що волога складова, яка хоч і становить в середньому приблизно 10 % від загальної величини, не може бути визначена із задовільною точністю, оскільки просторово-часовий розподіл водяної пари не піддається якійсь певній закономірності. Вологу складову можна достатньо точно визначити лише при застосуванні надто громіздких і затратних технологій, а саме: радіозондування нейтральної атмосфери, радіометрів водяної пари, лідарних систем тощо. Правда, вони, окрім дороговизни, характеризуються ще довготривалістю вимірювання і, відповідно, часовим зміщенням результатів вимірювань (радіозондування), погодними обмеженнями (хмари, дощ) тощо. Тому до недавнього часу вологу складову зенітної тропосферної затримки визначали за аналітичними моделями. Зазначимо, що існуючі моделі не можуть забезпечити достатньої точності визначення вологої складової. Можливість вирішення цієї проблеми залишалась примарною, поки не з'явилась ідея нового наукового напрямку GPS-метеорології [5], яку останнім часом називають ГНСС-метеорологією.

Тепер суть визначення вологої складової зенітної тропосферної затримки зводиться до такого: із ГНСС-вимірювань за певними інтервально-часовими розв'язками отримують загальну тропосферну затримку на середній зенітній відстані місцеположення ГНСС-супутника. Використовуючи функцію відображення, наприклад, *Niell* [5], отримують загальну зенітну тропосферну затримку. Згодом обчислюють за аналітичною моделлю, наприклад, *Sastamoinen*, гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки за виміряним (на висоті антени) значенням атмосферного тиску. За різницею між приведеною до зенітного напрямку загальною тропосферною затримкою, отриманою із ГНСС-розв'язків, і обчисленою гідростатичною складовою отримують величину

вологої складової зенітної тропосферної затримки на заданий момент часу. Далі від цієї величини переходять шляхом простих обчислень до інтегрованої водяної пари, осаджуваної водяної пари (осаджуваної води) тощо.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Останнім часом у науковій літературі з'явилося багато публікацій, присвячених проблемі підвищення точності визначення вологої складової тропосферної затримки, зокрема, це роботи [2, 3, 6, 8, 10, 11] та ін. Проте все ще не вирішеними до кінця залишаються питання: з якою все ж таки точністю отримується гідростатична, чи суха складова зенітної тропосферної затримки та з якою точністю визначають вологу складову із ГНСС спостережень тощо.

Постановка завдання. Основною метою нашої роботи є аналіз результатів гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки, отриманих за даними радіозондування на двох станціях [12]: Центральній аерологічній обсерваторії (Долгопрудний, Росія) та Центральній геофізичній обсерваторії (Воейково, Росія), а також величин вологої складової зенітної тропосферної затримки, обчислених за даними радіозондування на станції ЛЬВІВ [12] та визначених із результатів ГНСС-спостережень на станції SULP, Львів.

Виклад основного матеріалу. Величину тропосферної затримки обчислюють за даними радіозондування з використанням формул індексу показника заломлення:

$$N = K_1 \frac{P}{T} + (K_2 - K_1) \frac{e}{T} + K_3 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}; \quad (1)$$

$$N = K_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + (K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}) Z_w^{-1}; \quad (2)$$

$$N = K_1 \frac{P}{T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{P} \right) + \left[(K_2 - K_1 \cdot 0.622) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right] Z_w^{-1}, \quad (3)$$

де K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти Ессена і Фрума; T – температура за абсолютною шкалою, К; а P і e – атмосферний тиск вологого повітря і парціальний тиск водяної пари відповідно, гПа; $P_d = P - e$ – тиск сухого повітря; Z_d^{-1}, Z_w^{-1} – коефіцієнти стисливості сухого повітря і водяної пари для переходу від ідеального до неідеального газу.

Наведемо також формулу для обчислення повної зенітної тропосферної затримки, яка визначається шляхом інтегрування вертикального профілю індексу показника заломлення повітря:

$$d_{tot}^z = d_{h(d)}^z + d_w^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{h_d} N_{h(d)} dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{h_w} N_w dH, \quad (4)$$

де $d_{h(d)}^z$ – гідростатична (суха) складова зенітної тропосферної затримки; d_w^z – волога складова зенітної тропосферної затримки; H_s – початкова висота вертикального профілю індексу показника заломлення; h_d – висота шару сухого повітря; h_w – висота шару атмосфери, що містить у собі водяну пару; $N_{h(d)}$ – гідростатична (суха) складова індексу показника заломлення повітря; N_w – волога складова індексу показника заломлення повітря; dH – прошарки висоти.

Точність гідростатичної (сухої) складової зенітної тропосферної затримки визначає точність вологої складової, тому постає питання: з якою точністю можна отримати величину гідростатичної (сухої) складової зенітної тропосферної затримки як за даними радіозондування, так і з GNSS-спостережень.

Для аналізу нами було використано дані радіозондування на двох основних російських станціях – Центральній аерологічній обсерваторії (Долгопрудний) та Головні геофізичній обсерваторії (Воейково). Вибір цих станцій обумовлений тим, що це найвідоміший з науково-

технічного погляду аерологічні станції у Східній Європі. Для опрацювання було вибрано по 10 зондувань (на 0 год UTC кожне), що припадали на середні декади січня і липня 2011 і 2012 років.

За даними зондування з використанням формул (1), (2), (3) обчислено суху, чи гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки. Середню квадратичну похибку величин гідростатичної (сухої) складової зенітної тропосферної затримки обчислено з використанням формули Бесселя, m .

У табл. 1 для кожної декади кожної станції наведено у перших рядках усереднені різниці між гідростатичною та сухою складовою зенітної тропосферної затримки, визначені як:

$$\delta d_{h(d)}^z(3-1) = d_h^z(3) - d_d^z(1), \tag{5}$$

$$\delta d_{h(d)}^z(3-2) = d_h^z(3) - d_d^z(2)$$

де $d_d^z(1)$ і $d_d^z(2)$ – суха складова зенітної тропосферної затримки, обчислена за формулами (1) і (2); $d_h^z(3)$ – гідростатична зенітна складова за формулою (3).

У других рядках наведені стандартні відхилення (середні квадратичні похибки) цих різниць.

Таблиця 1

Гідростатична (суха) складова зенітної тропосферної затримки

С І Ч Е Н Ь			Л И П Е Н Ь		
	$\delta d_{h(d)}^z(3-1)$ мм	$\delta d_{h(d)}^z(3-2)$ мм		$\delta d_{h(d)}^z(3-1)$ мм	$\delta d_{h(d)}^z(3-2)$ мм
1	2	3	4	5	6
Долгопрудний 2011					
сер.	-0,9	0,4	сер.	-3,9	5,7
m	0,4	0,6	m	0,7	1,1
Долгопрудний 2012					
сер.	-0,9	0,4	сер.	-3,7	5,4
m	0,3	0,6	m	0,9	1,4
Восейково 2011					
сер.	-1,2	1,0	сер.	-3,5	5,0
m	0,4	0,7	m	0,8	1,3
Восейково 2012					
сер.	-1,0	0,4	сер.	-3,3	4,7
m	0,2	0,4	m	0,5	0,8

Аналізуючи результати табл. 1, зазначимо, що для літнього періоду різниці $\delta d_{h(d)}^z$ для обох станцій, визначені як за формулами (3) і (1), так і за формулами (3) і (2), є невеликі – їх середні значення знаходяться практично в межах ± 1 мм. Для зимового періоду ці різниці є в декілька разів більшими, але не виходять за межі $-4 \div 6$ мм. Відмінність зазначених різниць між двома періодами можна пояснити сезонною зміною баричного градієнта з висотою. Окрім цього, для станції Восейково є притаманним більш вологий клімат порівняно зі станцією Долгопрудний. Отже, всі три формули обчислення індексу показника заломлення є в принципі рівноточними. Однак для обчислення гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки ми рекомендуємо формулу (3), яка найбільш відповідає закону гідростатики атмосфери.

У подальших наших дослідженнях для визначення вологої складової зенітної тропосферної затримки із даних GPS-спостережень використовуємо зенітну гідростатичну складову, отримувану за формулою (3) і за моделлю Саастамойнена:

$$d_w^z = d_{tot}^z(GPS) - d_h^z(3) \tag{7}$$

$$d_w^z = d_{tot}^z(GPS) - d_h^z(SA),$$

де $d_{tot}^z(GPS)$ – повна зенітна тропосферна затримка, виведена із GPS-спостережень; $d_h^z(3)$ – гідростатична складова, отримана інтегруванням вертикального профілю N , за формулою (3); $d_h^z(SA)$ – гідростатична складова, отримана за формулою Саастамойнена.

Оскільки дані зенітної тропосферної затримки із GPS – спостережень на російських станціях будуть доступні лише через кілька місяців, тому для подальшого аналізу ми використовуємо дані GPS – спостережень на станції SULP (Львів), а дані радіозондування на станції ЛЬВІВ (зауважимо, що відстань між станціями є меншою ніж 2 км). Результати обчислення гідростатичної та вологої складової зенітної тропосферної затримки за вказаними даними наведено в табл. 2. Слід зазначити, що як дані радіозондування, так і дані GPS-спостережень віднесені до 0 год UTC.

Таблиця 2

Волога складова із GPS-спостережень, визначена з використанням гідростатичної складової за формулою (3) та за формулою Саастамойнена (SA), станція SULP (Львів) 2012 рік

Дата	$d_{tot}^z(GPS)$	$d_h^z(3)$	$d_w^z(3)$	$d_h^z(SA)$	$d_{w,1}^z$	$d_{w,2}^z$	$\delta d_{w,1}^z$	$\delta d_{w,2}^z$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.07	2445,2	2215,8	205,7	2217,0	229,4	228,2	-23,7	-22,5
24.07	2382,5	2246,3	165,0	2251,2	136,2	131,3	28,9	33,7
26.07	2469,8	2226,3	262,2	2226,1	243,5	243,7	18,8	18,5
28.07	2429,2	2221,3	224,7	2221,6	207,9	207,6	16,7	17,1
02.08	2412,4	2227,5	213,5	2230,7	184,9	181,7	28,5	31,8
04.08	2399,1	2220,4	205,2	2221,6	178,7	177,5	26,5	27,7
04.10	2382,8	2233,9	139,5	2228,4	148,9	154,4	-9,4	-14,9
29.06	2379,9	2225,5	170,1	2226,1	154,4	153,8	15,7	16,3
26.04	2295,6	2219,7	111,3	2217,0	75,9	78,6	35,4	32,7
05.07	2443,3	2223,5	203,3	2226,1	219,8	217,2	-16,5	-13,8
сер.	2404,0	2226,0	190,1	2226,6	178,0	177,4	12,1	12,7
m, σ					50,8	50,0	23,2	24,1

У табл. 2 наведено в стовпцях:

- 4 $d_w^z(3)$ – волога складова, отримана інтегруванням вертикального профілю N за формулою (3);
- 6 $d_{w,1}^z$ – волога складова, як різниця між $d_{tot}^z(GPS)$ і $d_h^z(3)$;
- 7 $d_{w,2}^z$ – волога складова, як різниця між $d_{tot}^z(GPS)$ і $d_h^z(SA)$;
- 8 $\delta d_{w,1}^z$ – різниця між $d_w^z(3)$ і $d_{w,1}^z$;
- 9 $\delta d_{w,2}^z$ – різниця між $d_w^z(3)$ і $d_{w,2}^z$;

Перед тим, як перейти до аналізу результатів наведених у табл. 2, зазначимо наступне. Величини гідростатичної $d_h^z(3)$ і вологої $d_w^z(3)$ складових зенітної тропосферної затримки прийmemo за істинні, щоб оцінити отримані результати за формулою Гаусса. У нижній частині табл. 2 за кожним стовпцем наведено відповідні усереднені величини, середня квадратична помилка вологої складової (стовпці 8 і 9) та стандартні відхилення (стовпці 6–9).

Аналізуючи описані дані табл. 2, можна стверджувати:

– стандартні відхилення гідростатичних складових, визначених за даними радіозондування (стовпець 3) та за моделлю Саастамойнена (стовпець 5), характеризують для станції Львів, як і для попередньо розглянутих станцій – Долгопрудний і Воєйково – доволі сталу закономірність зміни баричного градієнта з висотою;

– середня квадратична помилка вологої складової зенітної тропосферної затримки (23,2 мм, стовпець 8), отриманої із загальної зенітної тропосферної GPS-затримки з урахуванням гідростатичної складової із радіозондування, містить не лише помилку власної величини, але й віддзеркалює залишкові помилки усіх врахованих чи усунених помилок, що наповнюють основне рівняння GPS-спостережень;

– такого ж характеру є помилка (24.1 мм, стовпець 9), лише з урахуванням гідростатичної складової за моделлю Саастамойнена.

Висновки та рекомендації. На завершення виконаних досліджень слід зазначити таке.

1. Визначати гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки за наявності чи можливості визначення вертикальних профілів основних метеорологічних параметрів доцільно з використанням першого члену правої частини рівняння (3).

2. Для визначення гідростатичної складової лише за приземним значенням атмосферного тиску слід використовувати відому формулу Саастамойнена.

3. Для підвищення точності вологої складової зенітної тропосферної затримки слід використовувати наявні в районі спостережень числові моделі погоди.

1. Заблоцький Ф.Д. До визначення зенітної тропосферної затримки у GPS вимірах / Ф.Д. Заблоцький // Міжвід. наук.-техн. зб. “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2000. – Вип. 60. – С. 33–38. 2. Заблоцький Ф.Д. Особливості формування вологої складової тропосферної затримки в різних регіонах / Ф.Д. Заблоцький // Зб. наук. праць “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів: Ліга-прес, 2002. – С.121–127. 3. Каблак Н.І. Використання GPS-спостережень для визначення водяної пари в атмосфері / Н.І. Каблак, В.У. Клімик, І.В. Швалагін, Я.М. Мотрунич, Н.Д. Кучеревич // Вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – 2005. – №18. – С. 19–24. 4. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии (Физика атмосферы): учебник / Л.Т. Матвеев. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. – 751 с. 5. Bevis, M.S. Businger, T.A Herring, C. Rocken, R.A Anthes, and R.H. Ware (1992). “GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pp.15, 787–15,801. 6. Mendes, V.B. (1999). *Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report № 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.* 7. Niell, A.E. (1996). “Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B2, pp. 3227–3246. 8. Rocken, C. “GNSS Meteorology – I. GPS Observation Equation and Obtaining the Tropospheric Excess Phase”. 9. Saastamoinen, J. (1973). “Contributions to the theory of atmospheric refraction.” *In three parts. Bulletin Geodesique*, No. 105, pp. 279–298; No. 106, pp. 383–397; No. 107, pp. 13–34. 10. Schueler T. and Hein G.W. *Tropospheric Correction Services for GNSS Users – Concepts, Status and Future Prospects/ University FAF Munich, Germany, 2002, 9pp.* 11. Vedel H., de Haan S., and Jones J. “E-GVAP and the use of ground based GNSS data in meteorology”. 12. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sonding.html>.