

УДК 629.056.88+551.51

ТОЧНІСТЬ ВОЛОГОЇ СКЛАДОВОЇ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ, ВИВЕДЕНОЇ ІЗ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Ф. Заблоцький, М. Савчук

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: GPS-спостереження, зенітна тропосферна затримка, аерологічне зондування.

Постановка проблеми

Нейтральна атмосфера (тропосфера, стратосфера) – нижній шар земної атмосфери, що складається із суміші сухих газів та водяної пари. Він простягається приблизно до 50 км над поверхнею Землі. Поширення радіосигналу від навігаційних супутників до наземних приймачів через нейтральну атмосферу супроводжується зменшенням його швидкості. Таке явище називають тропосферною затримкою. Тропосферна затримка змінюється приблизно від 2 до 25 м і більше, залежно від кута напрямку на супутник. Мінімальне значення затримки, що збігається з напрямом прямої лінії, називають зенітною тропосферною затримкою (ЗТЗ). Повна тропосферна затримка у зенітному напрямку на рівні моря становить близько 2,4 м. Її поділяють на гідростатичну та вологу складові. Гідростатичну складову, що становить приблизно 90 % від повної величини, доволі надійно визначають за точно вимірним приземним атмосферним тиском. Вологу ж складову, яка хоч і становить лише 10 %, змоделювати практично неможливо через динамічний характер водяної пари в атмосфері. Сьогодні існують певні технології для врахування вологої складової ЗТЗ, зокрема радіозондуванням тропосфери чи з використанням інших технічних засобів дистанційного зондування. Проте вони є економічно затратними і мають ще й низку недоліків, таких як часові зміщення через довготривалість вимірювань, погодні обмеження (хмари, дощ) тощо [1].

Одним із підходів до вирішення цієї проблеми стало використання сигналів глобальних навігаційних супутникових систем для визначення величини тропосферної затримки, а потім її вологої складової. Суть цього підходу полягає в тому, що волога складова ЗТЗ визначається як різниця між повною величиною ЗТЗ, отриманою із GPS-спостережень, та гідростатичною складовою, обчисленою за модельним представленням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Протягом останніх кількох десятиліть опубліковано чимало праць, зокрема [2–4], в яких досліджується проблема підвищення точності визначення складових тропосферної затримки. Та все-таки ще не надано чіткої відповіді на питання: з якою ж точністю визначається волога складова ЗТЗ за даними GPS-спостережень?

Постановка завдання

Мета роботи – оцінити точність вологої складової ЗТЗ, отриманої за даними GPS-спостережень на

станціях SULP (Львів, Україна), GANP (Ganovce, Словаччина) та GOPE (Ongejov, Чеська Республіка) [5] порівняно з даними аерологічного зондування на станціях Львів (Україна), Poprad-Ganovce (Словаччина) і Praha-Libus (Чеська Республіка) [6].

Виклад основного матеріалу

Зенітну тропосферну затримку визначають через гідростатичну і вологу складові індексу заломлення заломлення повітря:

$$d_{trop}^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_d} N_h dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{H_w} N_w dH, \quad (1)$$

де H_s – висота поверхні станції, км; H_d і H_w – висота верхньої межі сухої і, відповідно, вологої атмосфери; N_h і N_w – гідростатична і волога складові індексу заломлення; dH – висота аналізованого прошарку атмосфери.

Гідростатична складова індексу заломлення визначається за формулою:

$$N_h = K_1 \frac{P}{T} (1 - 0.378 \frac{e}{P}), \quad (2)$$

де K_1 – емпіричний коефіцієнт; P і e – атмосферний тиск повітря і парціальний тиск водяної пари, гПа; T – температура повітря за шкалою Кельвіна;

Волога складова індексу заломлення визначається за формулою:

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

де K_2 , K_3 – емпіричні коефіцієнти; Z_w^{-1} – коефіцієнт стисливості водяної пари для переходу від ідеального до неідеального газу [1].

Аерологічні станції здебільшого розташовані в районах аеропортів, тому не для всіх GPS-станцій можна підібрати відповідні дані зондувань. Для врахування впливу тропосферної затримки під час GPS-спостережень застосовують аналітичні моделі, переважно модель Saastamoinen. Вона покладена в основу багатьох програм для обробки GPS вимірів, тому ми прийняли її основною для досліджень, зокрема, для визначення гідростатичної складової ЗТЗ, заданої формулою:

$$d_h^z = \frac{0.002277 \cdot P_s}{1 - 0.0026 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot H_s}, \quad (4)$$

де φ – широта пункту спостережень; P_s – приземне значення атмосферного тиску, гПа [3].

Для виконання поставленого завдання використано три станції аерологічного зондування і вибрано найближче до них три GPS-станції, що входять в EPN-мережу [7]. Координати станцій подані в табл. 1.

Таблиця 1
Координати аерологічних і GPS-станцій

	Назва, номер	Країна	Широта	Довгота	Висота, м	Відстань, км
Станція аерологічного зондування	UKLL Lviv	Україна	49 48,6	23 57,0	323,0	5,5
	33393					
GPS-станція	SULP	Україна	49 50,4	24 00,6	379,1	
Станція аерологічного зондування	Poprad-Ganovce	Словаччина	49 01,8	20 18,6	706,0	0,7
	11952					
GPS-станція	GANP	Словаччина	49 01,8	20 19,2	745,2	
Станція аерологічного зондування	Praha – Libus	Чеська Республіка	50 00,0	14 27,0	303,0	26,3
	11520					
GPS-станція	GOPE	Чеська Республіка	49 54,6	14 47,4	592,6	

Оскільки відстань між станціями Львів і SULP становить близько 6 км, а між станціями GANP та Poprad-Ganovce – приблизно 1 км, то можна вважати, що характер нейтральної атмосфери для обох станцій однаковий. Відстань між станціями Praha-Libus і GOPE є більшою, близько 26 км, проте прийемо, що метеорологічні поля цих станцій близькі за структурою.

Для аналізу використано дані ЗТЗ, виведені із GPS-спостережень на перманентних станціях SULP, GANP та GOPE [5]. Використовувались також дані аерологічного зондування на станціях Львів і Praha – Libus (0^h UT) та Poprad-Ganovce (12^h UT). Вибір цих станцій зумовлений тим, що вони розміщені практично на одній паралелі. За даними станцій Praha – Libus та Poprad-Ganovce вибрано по 10 зондувань, що припадали приблизно на середні декади січня і липня 2013 року. Враховуючи значне перевищення між аерологічною станцією Praha-Libus і GPS-станцією GOPE, метеопараметри нижньої межі зондування на станції Praha-Libus приводились до висот станції GOPE інтерполяванням. На станції Львів аерологічне зондування проводять, на жаль, не періодично (часто не дотримуючись загальноприйнятих висот зондування). Тому не було можливості взяти дані за середні декади місяця і їх вибирали протягом тривалого періоду 2013 року. Загалом було вибрано 17 зондувань.

Під час досліджень прийемо значення гідростатичної та вологої складових ЗТЗ, отриманих за даними аерологічного зондування як еталонні (хоча, звичайно, це відносна назва, тому що величина тропосферної затримки міститиме похибки, насамперед за рахунок вимірювання таких параметрів, як тиск, температура та вологість повітря). Усереднені результати обчислень для кожної із станцій наведено в табл. 2.

У колонках таблиці наведено такі величини: $d_{h}^z aer$ – гідростатична складова ЗТЗ, одержана за

даними аерологічного зондування; $d_w^z aer$ – волога складова ЗТЗ, одержана за даними аерологічного зондування; $d_h^z SA$ – гідростатична складова ЗТЗ, отримана за формулою Saastamoinen; $\Delta d_h^z SA$ – різниця між гідростатичною складовою, отриманою за даними аерологічного зондування і за аналітичною моделлю Saastamoinen; $d_{trop}^z GPS$ – повна ЗТЗ, отримана за даними GPS-спостережень; $d_w^z GPS$ – волога складова ЗТЗ, виведена із GPS-спостережень; $\Delta d_w^z GPS$ – різниця між вологою складовою, отриманою за даними аерологічного зондування і за даними GPS-спостережень; σ – середнє квадратичне відхилення (СКВ).

Таблиця 2
Усереднена гідростатична та волога складові ЗТЗ, за даними аерологічних та GPS-станцій (2013 р.), мм

	$d_h^z aer$	$d_w^z aer$	$d_h^z SA$	$\Delta d_h^z SA$	$d_{trop}^z GPS$	$d_w^z GPS$	$\Delta d_w^z GPS$
	1	2	3	4	5	6	7
Львів і SULP							
<i>Травень – жовтень</i>							
Сер.	2224,8	152,8	2229,9	-5,2	2362,0	132,0	20,8
	$\sigma =$			3,8			19,9
Poprad-Ganovce і GANP							
<i>Січень</i>							
Сер.	2095,9	64,4	2097,3	-1,4	2163,9	66,6	-2,1
	$\sigma =$			1,2			4,2
Липень							
Сер.	2131,2	119,6	2135,3	-4,1	2262,6	127,3	-7,7
	$\sigma =$			0,5			16,9
Praga-Libus і GOPE							
<i>Січень</i>							
Сер.	2135,1	43,9	2141,4	-3,3	2190,8	49,4	-5,6
	$\sigma =$			3,6			2,4
Липень							
Сер.	2168,9	117,0	2172,6	-3,7	2298,3	125,8	-8,7
	$\sigma =$			4,7			13,5

Проаналізуємо дані табл. 2.

Для всіх аерологічних станцій усереднені різниці $\Delta d_h^z SA$, що, по суті, виражають точність гідростатичної складової ЗТЗ, отриманої за моделлю Saastamoinen, лежать у межах -5,2 ÷ -1,4 мм. Зауважимо, що в літній період вони дещо більші, ніж у зимовий, що пояснюється значно більшим вмістом водяної пари в тропосфері літом. Зупиняючись на точності гідростатичної складової ЗТЗ, отриманої за формулою Saastamoinen, проаналізуємо величини середнього квадратичного відхилення для кожного значення $\Delta d_h^z SA$. Так, на станціях Poprad-Ganovce і Praga-Libus значення σ теж менші у зимовий період, що свідчить про менше розсіювання різниць $\Delta d_h^z SA$. Це теж підтверджується меншим вмістом водяної пари взимку в тропосфері.

Що ж стосується усереднених різниць $\Delta d_w^z GPS$, то зауважимо, що на GPS-станціях GOPE (Прага) і GANP

(Попрад) ці різниці також є меншими взимку, ніж влітку, а їх значення σ у 4–5 разів менші взимку, ніж влітку, що свідчить не лише про менший вміст водяної пари в атмосфері в зимовий період, а й про слабшу її динаміку.

Щодо характеру різниці $\Delta d_w^z GPS$ стосовно GPS-станції SULP (Львів), то тут як сама ця величина, так і її значення σ є значно більшими, ніж на попередніх станціях. Це пояснюється, на нашу думку, не тільки тим, що більшість зондувань і відповідних їм тропосферних затримок із GPS-спостережень припадають на літній період, а й тим, що переважна більшість аерологічних зондувань не охоплює вологості у верхній частині тропосфери. Підтвердженням цьому є те, що лише у 30 % сенсори фіксують відносну вологість до висоти приблизно 9 км (у половині випадків – 7 км), тоді як верхня межа тропосфери становить тут у літній період близько 12 км.

Висновки

У результаті аналізу опрацьованих даних трьох аерологічних і трьох відповідних сусідніх GPS-станцій отримано величини вологості складової ЗТЗ, виведені із GPS-спостережень. Точність цих величин добре узгоджується з відповідними оцінками, викладеними в сучасній зарубіжній науковій літературі.

Надалі, на нашу думку, доцільно розширити такі дослідження, підбираючи інші аерологічні та відповідні їм за місцезнаходженням GPS-станції, розміщені приблизно вздовж 50-ї паралелі як на схід, так і на захід.

Література

1. Заблоцький Ф.Д. ГНСС-метеорологія: навч. посіб. / Заблоцький Ф.Д. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2013. – 95 с.
2. Заблоцький Ф.Д. Особливості формування вологості складової тропосферної затримки в різних регіонах / Ф.Д. Заблоцький // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Ліга-прес, 2002. – С.121–127.
3. Mendes V.B. 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, 1999. – 353 pp.

4. Schueler T. Tropospheric Correction Services for GNSS Users / Schueler T. and Hein G.W – Concepts, Status and Future Prospects / University FAF Munich, Germany, 2002. – 9 p.
5. GNSS Data Center: інтернет-ресурс. – Режим доступу: <http://igs.bkg.bund.de/file/productsearch/>
6. Служба атмосферних досліджень при університеті Вайомінгу: інтернет-ресурс. – Режим доступу: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
7. EUREF Permanent GNSS Network: інтернет-ресурс. – Режим доступу: http://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php.

Точність вологості складової зенітної тропосферної затримки, виведеної із GPS-спостережень

Ф. Заблоцький, М. Савчук

Проаналізовано точність вологих складових зенітної тропосферної затримки, отриманих у результаті спостережень трьох GPS-станцій і за даними радіозондування атмосфери на трьох аерологічних станціях.

Точность влажной составляющей зенитной тропосферной задержки, выведенной из GPS-наблюдений

Ф. Заблоцкий, М. Савчук

Проанализировано точность влажных составляющих зенитной тропосферной задержки, полученных в результате наблюдений трех GPS-станций и по данным радиозондирования атмосферы на трех аерологических станциях.

Precision of wet component of zenith tropospheric delay derived from GPS-observations

F. Zablotskyj, M. Savchuk

Accuracy analysis of wet components of zenith tropospheric delay was carried out by the observation data derived from three GPS stations as well as by the radio sounding data obtained on three aerological stations.

Trade Fair and Conference for Landmanagement, Geoinformation, Building Industry, Environment
28–29 April 2014, Istanbul

INTERGEO EURASIA

Конференція відбудеться 28–29 квітня 2014 р. у м. Стамбул (Туреччина)

<http://www.intergeo-eurasia.net>