

УДК 528.28

СУХА І ГІДРОСТАТИЧНА СКЛАДОВІ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ

Ф. Заблоцький, Б. Паляниця, Л. Матвієнко, Н. Турчин

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: супутникові виміри, тропосферна затримка.

Постановка проблеми

З проблеми визначення зенітної тропосферної затримки, а особливо її вологої складової впродовж останніх декількох десятиків років опубліковано багато робіт. Незважаючи на те, що деякі питання до кінця не розв'язані, інтерес до цієї проблеми почав дещо згасати, поки не з'явилась ідея нового наукового напрямку – GPS-метеорологія [5], породжена зворотними задачами GPS-рефракції, яку останнім часом називають GNSS-метеорологією. Нині її суть зводиться до такого: із розв'язків GNSS-вимірювань виділяють повну тропосферну затримку, яку приводять функціями відображення до зенітного напрямку. Далі за точно вимірним атмосферним тиском біля антени GNSS-приймача визначають за формулою, наприклад Саастамойнена, величину гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки, віднявши від повної зенітної тропосферної затримки гідростатичну складову і визначають вологу складову. Відтак за цим значенням визначають вміст осаджуваної водяної пари в атмосфері, її поширення за висотою, вертикальний профіль температури повітря, її середнє значення тощо. Оскільки точність гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки визначає в цьому розв'язку точність вологої складової та інших параметрів атмосфери, то постає питання: по-перше, з якою точністю можна отримати величину гідростатичної чи сухої складової зенітної тропосферної затримки за емпіричними формулами, наприклад, Саастамойнена чи Гопфілд; по-друге, котру із цих формул слід використовувати і що обчислювати за даними зондування атмосфери – суху чи гідростатичну складову зенітної тропосферної затримки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Більшість останніх публікацій роблять акцент на визначенні гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки [6], інші ототожнюють гідростатичну складову зі сухою, на неприпустимості чого наголошується в роботі [5]. Крім цього, зазначимо, що негідростатичну і вологу складову здебільшого прирівнюють і приймають одну назву – волога складова зенітної тропосферної затримки.

Постановка завдання проблеми

Основною метою нашої роботи є аналіз результатів, отриманих за формулами сухої та гідростатичної складової зенітної тропосферної затримки та за емпіричними формулами Саастамойнена і Гопфілд. Його виконують на основі даних радіозондування у всіх

основних широтних зонах земної кулі, а саме на станціях: Арктики [1], середніх широт, екваторіальної зони [3] та Антарктиди [2, 12].

Виклад основного матеріалу. Як відомо, тропосферна затримка визначається переважно через показник (індекс показника) заломлення повітря для ультракоротких радіохвиль (УКХ) у нейтральній атмосфері (тропосфері та стратосфері), який є функцією температури повітря T , атмосферного тиску P і парціального тиску водяної пари e . Одними із перших виразів для визначення індексу показника заломлення для радіохвиль були [4]:

формула Ессена

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

формула Сміта і Вейнтрауба

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4.81 \cdot 10^3 \frac{e}{T} \right); \quad (2)$$

формула Ессена і Фрума

$$N = K_1 \frac{P-e}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (3)$$

де K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти, наведені в табл. 1; температура T – у кельвінах, а P і e – в гектопаскалях; $P-e = P_d$ – атмосферний (парціальний) тиск сухого повітря.

Формула (3) є, по суті, формулою (1), оскільки вона утворена зведенням членів $K_1 \frac{P}{T}$ і $-K_1 \frac{e}{T}$. Ця формула відповідає стану ідеального газу, а для неідеального газу набуває вигляду [8]

$$N = K_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + \left(K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1}, \quad (4)$$

де Z_d^{-1}, Z_w^{-1} – коефіцієнти стиснення сухого повітря і водяної пари для переходу від ідеального до неідеального

Таблиця 1

Емпіричні коефіцієнти індексу показника заломлення для УКХ [8]

Автори, рік	K_1 (К·hPa ⁻¹)	K_2 (К·hPa ⁻¹)	K_3 (10 ⁵ К ² ·hPa ⁻¹)
Smith and Weintraub, 1953	77.61±0.01	72 ± 9	3.75 ± 0.03
Boudouris, 1963	77.59±0.08	72 ± 11	3.75 ± 0.03
Essen and Froome	77.624	64.7	3.719
Thayer, 1974	77.60±0.01	64.79±0.08	3.776±0.004
Hill et al., 1982	–	98±1	3.583±0.003
Bevis et al.	77.60±0.05	70.4±2.2	3.739±0.012

газу, які запропонував Оуенс [9] і привів Тайер до вигляду [11]:

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57.9 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0.52}{T} \right) - 9.4611 \cdot 10^{-4} \frac{t}{T^2} \right], \quad (5)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \cdot \left(\frac{e}{T^3} \right) \cdot (1 - 0.01317 \cdot t + 1.75 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 1.44 \cdot 10^{-4}). \quad (6)$$

У роботі [6], використовуючи рівняння стану газів для вологого повітря, запропоновано таку формулу індексу показника заломлення:

$$N = K_1 \cdot R_d \cdot \rho + \left(K_2' \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1}, \quad (7)$$

де $R_d = 287,06 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – питома газова стала сухого повітря; ρ – густина вологого повітря. Коефіцієнт K_2' визначається з відношення:

$$K_2' = K_2 - K_1 \frac{R_d}{R_w} = K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d},$$

де $R_w = 461,525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – питома газова стала водяної пари; M_w, M_d – молекулярні маси водяної пари і сухого повітря.

У формулі (7) перший член називають гідростатичною, а другий – негідростатичною складовою індексу показника заломлення повітря.

Підставляючи замість відношення газових сталих чи молекулярних мас коефіцієнт, що дорівнює 0,622, та використовуючи рівняння стану для вологого повітря, рівняння (7) отримуємо у вигляді:

$$N = K_1 \frac{P}{T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{P} \right) + \left[(K_2 - K_1 \cdot 0.622) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \right] Z_w^{-1}. \quad (8)$$

Члени формул (7) і (8) вже дещо відрізняються за змістом від відповідних у формулі (3) і не віддзеркалюють точно суху та вологу складові індексу показника заломлення повітря, оскільки у (7) у першому члені наявна вологість у величині густини вологого повітря, що наочно представлено у (8) віртуальним додатком, а другий член “здеформовано” питоною газовою сталою (або молекулярною масою) сухого повітря. Разом з тим, повне значення індексу показника заломлення повітря, обчислене за (8), збігається повністю з відповідною величиною, отриманою за (3).

Що стосується зенітної тропосферної затримки, то її повну величину подають, як правило, сумою двох складових:

$$d_{trop}^z = d_{d(h)}^z + d_{w(nh)}^z, \quad (9)$$

де $d_{d(h)}^z$ і $d_{w(nh)}^z$ – зенітна суха чи гідростатична і волога або негідростатична складові.

Найточніше повна зенітна тропосферна затримка визначається інтегруванням вертикального профілю індексу показника заломлення повітря:

$$d_{trop}^z = d_{d(h)}^z + d_{w(nh)}^z = 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_{d(h)} dH + 10^{-6} \int_{H_s}^{H_a} N_{w(nh)} dH, \quad (10)$$

де $N_{d(h)}$ – індекс показника заломлення повітря сухої чи гідростатичної складової; $N_{w(nh)}$ – індекс показника заломлення повітря вологої чи негідростатичної складової зенітної тропосферної затримки; H_s – початкова висота вертикального профілю індексу показника заломлення; H_a – задана верхня границя інтегрування атмосфери; dH – прошарки висоти.

Запишемо окремо перші члени формул (1), (3), (4), (7) і (8), що виражають суху чи гідростатичну складові зенітної тропосферної затримки:

$$N = K_1 \frac{P}{T}; \quad (11)$$

$$N_d = K_1 \frac{P - e}{T}, \quad (12)$$

$$N_d = K_1 \frac{P - e}{T} Z_d^{-1}, \quad (13)$$

$$N_h = K_1 \cdot R_d \cdot \rho, \quad (14)$$

$$N_h = K_1 \frac{P}{T} (1 - 0.378 \frac{e}{P}). \quad (15)$$

Зазначимо, що вираз (11) не можна назвати ні сухою, на відміну від виразів (12) і (13), ні гідростатичною, як у формулах (14) і (15), складовою, оскільки вони відображають загальний тиск повітря, тобто тиск вологого повітря.

Як вказувалось вище, формула (8) випливає із (7), тому очевидно, що вирази (14) і (15) є ідентичними.

Оскільки, використовуючи вирази (11–15), ми обчислюємо суху (гідростатичну) складову зенітної тропосферної затримки за допомогою інтегрування даних радіозондування, отриманих у різних кліматичних зонах земної кулі, і порівнюємо ці затримки з обчисленими за моделями Саастамойнена і Гопфілд, то наведемо також відповідно вирази:

- гідростатична складова за моделлю Саастамойнена [8, 10]

$$d_h^z = \frac{0.002277 \cdot P_0}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 28 \cdot 10^{-8} H_0)}, \quad (16)$$

- суха складова за моделлю Гопфілд [7, 8]

$$d_d^z = 77.6 \cdot 10^{-6} \frac{P_0}{T_0} \frac{H_d}{5}, \quad (17)$$

де P_0, T_0 – приповерхневі значення атмосферного тиску і температури повітря; φ, H_0 – широта і висота станції на рівнем моря, м; H_d – висота над рівнем станції, на якій суху складову індексу показника заломлення прирівнюють до нуля, м. Результати вказаних обчислень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Різниці між гідростатичною чи сухою складовою з даних радіозондування
(формули (11)–(13), (15)) та складовою з моделей Саастамойнена і Гопфілд**

Станція, дата	Різниця Δd між радіозондуванням і моделлю							
	11-SA	12-SA	13-SA	15-SA	11-НО	12-НО	13-НО	15-НО
Алерт 13.01.2011	14,2	13,7	18,0	14,0	7,8	7,3	11,6	7,6
Алерт 11.07.2010	4,8	-0,8	0,1	2,7	-4,5	-10,1	-9,2	-6,6
Прага 11.01.2010	1,3	-1,4	0,4	0,3	-2,6	-5,3	-4,3	-3,6
Прага 11.07.2010	1,9	-6,5	-5,8	-1,2	-5,4	-13,8	-13,1	-8,5
Відень 11.01.2011	0,0	-5,3	-4,3	-2,0	-4,5	-9,8	-8,8	-6,5
Відень 11.07.2010	-0,1	-9,5	-8,8	-3,6	-7,0	-16,4	-15,7	-10,5
Сінгапур 13.01.2011	-1,1	-20,3	-19,6	-8,3	-1,2	-20,4	-19,7	-8,4
Сінгапур 12.07.2010	0,5	-19,6	-18,9	-7,1	0,3	-19,8	-19,1	-7,3
Мак-Мердо 13.01.2011	6,4	4,1	5,2	5,5	-2,1	-4,4	-3,3	-3,0
Мак-Мердо 13.06.2009	4,8	4,6	6,0	4,7	0,9	0,7	2,1	0,8

Зауважимо, що станції Алерт і Мак-Мердо розміщені у високих широтах, перша – на північно-західному узбережжі канадської Арктики, друга – на крайньому південно-східному узбережжі Антарктиди і є однією з основних наукових станцій-обсерваторій. Станції Прага і Відень розташовані у середніх широтах північної півкулі, а станція Сінгапур – майже на екваторі (на півдні Малайзійського півострова).

Висновки

Наведені в табл. 2 результати не дають, на жаль, однозначних рекомендацій, яку ж формулу використовувати для визначення сухої чи гідростатичної складової за даними радіозондування. Якщо у середніх широтах (ст. Прага і Відень) і в екваторіальній зоні (ст. Сінгапур) отримуємо за формулою (11) і моделлю Саастамойнена порівняно добру збіжність, то в полярних регіонах, особливо в Арктиці, одержуємо незадовільні результати, що вказує на невідповідність моделі Саастамойнена вертикальному профілю атмосферного тиску. Ще незадовільні результати (окрім ст. Мак-Мердо) дає модель Гопфілд.

На нашу думку, необхідно перевірити виконані у цій роботі дослідження на триваліших періодах радіозондувань (хоча б до десяти днів) на кожній із вибраних станцій.

Література

1. Заблоцький Ф.Д. Визначення і оцінка складових тропосферної затримки у GPS вимірах / Ф.Д. Заблоцький // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2001. – Вип. 61. – С. 11–23.
2. Заблоцький Ф.Д. Особливості формування тропосферної затримки в Антарктиді (за даними станції Мак-Мердо) / Ф.Д. Заблоцький, Н.Р. Довган, Б.Б. Паляниця // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2006. – С. 115–119.
3. Заблоцький Ф.Д. Аналіз зенітної тропосферної затримки в тихоокеанських тропічних широтах / Ф.Д. Заблоцький, О.Ф. Заблоцька // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2010. – Вип. 1(19). – С. 50–55.
4. Лаурила С. Электронные измерения и навигация / Пер. с англ. – М.: Недра, 1981. – 480 с.
5. Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // J. Geophys., 1992, Res. 97, 15,787–15,801.
6. Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // Radio Science, 1985. – Vol. 20. – № 6. – P. 1593–1607.
7. Hopfield H.S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // Journal of Geophysical Research, 1969. – Vol. 74. – № 18. – P. 4487–4499.
8. 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.

9. Owens J.C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition // Appl. Opt., 1967, 6, № 1. – P. 51–58.
10. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics. Monogr. Ser., vol.15, AGU, Washington, D.C., 1972. – P. 247–251.
11. Thayer G.D. An improved equation for the radio refractive index of air // Radio Science, 1974. – Vol. 9. – № 10. – P. 803–807.
12. Zablotskyj F.D. On determination precision of tropospheric delay at the Antarctic coast stations // Proceedings of the Third Antarctic Geodesy Symposium, 17–21 July, 2001, Saint Peterburg. <http://www.scar-ggi.org.au/geodesy/ags01/zablotskyj.pdf>

**Суша і гідростатична складові
зенітної тропосферної затримки**

Ф. Заблоцький, Б. Паляниця,
Л. Матвієнко, Н. Турчин

Розглянуто всі основні формули визначення індексу показника заломлення повітря для ультракоротких радіохвиль. За ними визначено суху і гідростатичну складові зенітної тропосферної затримки числовим інтегруванням за даними радіозондування на станціях основних кліматичних зон земної кулі. Виконано порівняння із відповідними затримками, отриманими за моделями Саастамойнена і Гопфілд. Подано рекомендації щодо подальшого дослідження цього питання.

**Сухая и гидростатическая составляющие
зенитной тропосферной задержки**

Ф. Заблоцкий, Б. Паляныця,
Л. Матвиенко, Н. Турчин

Рассмотрено все основные формулы определения индекса показателя преломления воздуха для ультракоротких радиоволн. По ним определена сухая и гидростатическая составляющие зенитной тропосферной задержки численным интегрированием по данным радиозондирования на станциях основных климатических зон земного шара. Выполнено сравнение с соответствующими задержками, полученными по моделям Саастамойнена и Хопфилд. Приведены рекомендации по дальнейшему исследованию этого вопроса.

**On the dry and hydrostatic component
of zenith tropospheric delay**

F. Zablotskyj, B. Palyanytsya,
L. Matvienko, N. Turchyn

All basic formulae of the refractivity for ultra-short radio waves are considered. The dry and hydrostatic component of zenith tropospheric delay had been defined by numerical integration of the radiosonde data obtained in major climatic zones of the Earth. A comparison with the corresponding delays obtained by means of Saastamoynen and Hopfield models had been carried out. Recommendations for further study of this problem are given.

Видавництво Львівської політехніки пропонує



**А.Л. Островський, О.І. Мороз,
З.Р.Тартачинська, І.Ф. Гарасимчук.
ГЕОДЕЗІЯ. ТОПОГРАФІЯ**

Навчальний посібник. Частина перша. Львів: Видавництво
Львівської політехніки, 2011. 440 с.

Формат 170 x 240 мм.

Тверда оправа.

ISBN 978-617-607-081-8

Викладено загальні відомості з топографії, системи координат та картографічних проєкцій, сучасні дані про форму і розміри Землі, описано найпростіші прилади та вимірювання на місцевості. Розглянуто принцип вимірювання горизонтальних кутів, будову і перевірки технічних теодолітів, польові та камеральні роботи в горизонтальному зніманні. Викладено основи вертикального знімання, а саме рельєф та його зображення на планах і картах, суть геометричного нівелювання, будову та перевірки нівелірів, нівелювання траси та виконання інженерно-геодезичних завдань. Висвітлено теоретичні основи тахеометричного знімання та виконання польових робіт, а також описано прилади, які для цього використовують. Розглянуто суть мензульного знімання, прилади і приладдя для його виконання, їх будову і перевірки та способи створення робочої планово-висотної основи, а також барометричне нівелювання.

**Книги можна замовити за адресою: вул. Ф. Колесси, 2, корп. 23А, м. Львів, 79000
тел. +38032 2582146, факс +38032 2582136, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua, <http://vlp.com.ua>**