

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ВОДЯНОЇ ПАРИ В АТМОСФЕРІ ЗА ДОПОМОГОЮ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

© Каблак Н., 2011

Рассмотрены вопросы использования сети активных референциальных GNSS – станций UA – EUPOS/ZAKPOS для дистанционного зондирования атмосферы с целью определения содержания водяного пара.

Questions of the use of network active reference GNSS – stations UA – EUPOS/ZAKPOS for the distance monitoring of the atmosphere with a purpose determination water vapor.

Постановка проблеми. Одним з варіантів практичного застосування системи GNSS є дистанційне зондування атмосфери радіосигналами навігаційних супутників з метою поліпшення якості та деталізації прогнозів погоди.

Оперативний прогноз погоди зазвичай ґрунтується на вимірюваннях відносної вологості поряд з тиском і температурою, що визначаються за допомогою радіозондів і наземних метеорологічних приладів. Радіозонди запускають двічі на добу і визначають профілі зміни з висотою атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря. Один з головних недоліків радіозондів – це відносно низька точність датчиків у результаті їх забруднення. З іншого боку, кількість водяної пари можна визначити радіометрами. Цей інструмент забезпечує зазвичай дуже точні дані, але його виміри ненадійні під час опадів, а також цей прилад є надто дорогим. Радіозонди та наземні або космічні радіометри водяної пари розташовані на значних відстанях, і дискретність вимірювань їх низька. Отже, просторовий і часовий розподіл існуючих вимірювань дуже розріджений і залежить від погодних умов. Перевагою дистанційного зондування атмосфери є його реалізація на існуючій GNSS інфраструктурі (мережі активних референциальних станцій з єдиним центром управління), а також можливість проведення вимірювань незалежно від опадів та наявності хмар.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні найбільшим проектом у Центральній Європі, у межах якого визначають у майже реальному часі зенітні тропосферні затримки на регіональній мережі GNSS станцій, є E-GVAP, а основний обчислювальний центр знаходиться у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB) [1]. Мережа містить сьогодні близько 160 станцій: більшість з них належать до перманентної мережі EPN від EUREF [2] та Міжнародної GNSS служби IGS [3].

Сам процес визначення зенітних тропосферних затримок складається з двох основних кроків. На першому кроці шляхом утворення мережових 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.

У результаті первинної обробки результатів GNSS вимірювань визначають відстані від станції спостережень до GNSS супутників. Вторинна обробка GNSS вимірювань полягає у розв'язанні навігаційної задачі і дає інформацію про місцезнаходження станції. Для отримання метеорологічної інформації розробляються спеціальні методи вторинної обробки даних, що ґрунтуються на розв'язуванні обернених задач [4].

Через кореляцію між кількістю водяної пари в атмосфері і тропосферною затримкою поширення сигналу за допомогою GNSS вимірювань можна оцінити інтегровану випадваючу водяну пару (*IPWV* – Integrated Precipitable Water Vapor) в атмосфері. Як відомо, цей параметр має

вирішальне значення для метеорологів, оскільки вміст води в атмосфері є ключовим параметром в моделі погоди [5–7].

Сукупним об'єднанням даних первинної та вторинної обробки разом із додатковою метеорологічною інформацією можна отримати модель атмосфери в режимі реального часу. Подальше використання отриманих даних сприяє ефективнішим метеорологічним і кліматичним дослідженням. Розроблення методів отримання інформації про просторовий розподіл водяної пари в атмосфері за даними реєстрації GNSS-сигналів дасть змогу вийти на якісно новий рівень метеорологічного забезпечення, підвищити якість метеорологічних прогнозів погоди.

Постановка завдання. Наявність мережі активних референціальних станцій, яка ґрунтується на найсучаснішій RTK-технології і є централізованою та максимально автоматизованою, та високотехнологічної інфраструктури допомагає розв'язувати не тільки практичні задачі із забезпечення координатною основою, але й суто наукові задачі, що мають важливе значення для всіх наук про Землю. Метою цієї роботи є аналіз можливостей використання мережі активних референціальних GNSS – станцій для потреб метеорології.

Виклад основного матеріалу

Повну тропосферну затримку можна визначити таким чином [8]:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_d + \Delta\rho_w = 10^{-6} \cdot \int N_d dh + 10^{-6} \cdot \int N_w dh, \quad (1)$$

де $N_d = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1}$ – коефіцієнти рефракції сухого повітря;

$$N_w = \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1} \text{ – коефіцієнти рефракції вологого повітря;}$$

P_d – тиск сухого повітря, мбар; e – парціальний тиск водяної пари, мбар; T – температура повітря, K_1 – коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря, $K \cdot \text{мбар}^{-1}$; K_2 – коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води, $K \cdot \text{мбар}^{-1}$; K_3 – коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води, $10^5 K^2 \cdot \text{мбар}^{-1}$ [9].

Використовуючи рівняння Менделєєва–Клапейрона, одержуємо:

$$N = K_1 R_d \rho + \left[K'_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1}, \quad (2)$$

де

$$K'_2 = K_2 - K_1 \left(\frac{R_d}{R_w} \right) = K_2 - K_1 \frac{\mu_w}{\mu_d}, \quad (3)$$

$R_d = 287,06 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – питома газова стала сухого повітря; $R_w = 461,525 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – питома газова стала водяної пари; ρ – загальна густина повітря; μ_d і μ_w – молекулярні маси сухого повітря і водяної пари.

Затримка за рахунок впливу гідростатичної складової атмосфери в зенітному напрямку:

$$\Delta\rho_d^z = 10^{-6} K_1 R_d \int_{h_0}^h \rho dh. \quad (4)$$

Атмосферна затримка, спричинена впливом водяної пари, в зеніті:

$$\Delta\rho_w^z = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\max}} \left[K'_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1} dh. \quad (5)$$

Використовуючи значення тропосферної затримки, одержане при обробці GPS-спостережень, випадаючу водяну пару (IWV) як загальну масу водяної пари в стовпчику повітря від поверхні Землі до кінця атмосфери з поперечним перерізом 1 м^2 можна визначити за формулою [4–6]:

$$IWV = \frac{\Delta\rho_w}{\xi}, \quad (6)$$

де

$$\xi = 10^{-6} R_w \left[K'_2 + \frac{K_3}{T_m} \right].$$

В останній формулі середню температуру T_m можна знайти за співвідношенням:

$$T_m = \frac{\int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T} Z_w^{-1} dh}{\int_{h_0}^{h_{\max}} \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} dh}. \quad (7)$$

З рівняння стану газу отримаємо:

$$\left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} = \rho_w R_w,$$

де ρ_w – густина водяної пари.

Тоді волога складова затримки матиме вигляд:

$$\Delta\rho_w = 10^{-6} R_w \left[K'_2 + \frac{K_3}{T_m} \right] \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_w dh. \quad (8)$$

Величина IWV може бути легко переведена в одиниці довжини, якщо розділити її на густину води ($\rho(\text{H}_2\text{O}) \cong 10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$). Тоді вона інтерпретується як висота (в мм) стовпа води перерізом 1 м^2 , отриманої із сконденсованої пари. Її можна назвати випадаючою водяною парою, або просто випадаючою водою (PW):

$$PW = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \int_{h_0}^{h_{\max}} \rho_w dh. \quad (9)$$

Очевидно, що $1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$ IWV відповідає 1 мм PW .

Отже, для переходу від $\Delta\rho_w$ до значень випадаючої водяної пари необхідно знати середню температуру атмосфери над певним пунктом. Середня температура залежить від поверхневої температури з високим коефіцієнтом кореляції. З цією метою потрібно побудувати регресійні залежності середньої температури T_m від температури на поверхні Землі T_0 у пунктах спостереження.

Для оцінювання похибки визначення IWV беремо до уваги формули (6) і (7). Вологу затримку $\Delta\rho_w$ визначають шляхом вилучення із загальної тропосферної затримки $\Delta\rho_{GPS}^{tropo}$, одержаної із GNSS вимірювань, гідростатичної складової атмосферної затримки $\Delta\rho_{m,d}$, визначеної за модельним представленням:

$$\Delta\rho_w = \Delta\rho_{GPS}^{tropo} - \Delta\rho_{m,d}. \quad (9)$$

У більшості випадків під час опрацювання GNSS даних для обчислення гідростатичної складової тропосферної поправки використовують модель Саастамойнена $\Delta\rho_{d,c}$ [8]. За моделлю

Саастамойнена гідростатичну складову тропосферної затримки обчислюють за вимірними наземними значеннями тиску на кожній станції, для якої відомі широта і висота над рівнем моря.

Точність вимірювань метеопараметрів залежить від типу радіозонда. Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) ставить такі вимоги до точності вимірювань метеопараметрів: значення тиску $\Delta P = \pm 1$ мбар; температури $\Delta T = \pm 0,5$ °С; відносної вологості $\Delta W = \pm 5\%$. Оцінка похибки визначення гідростатичної складової атмосферної затримки $\Delta \rho_{m,d}$ в zenіті, спричиненої похибками вимірювання метеопараметрів, змінюється в межах від 0,006 до 0,012 м.

Отже, похибка визначення гідростатичної складової $\Delta \rho_{m,d}$ в середньому становить 1 см, а це відповідає похибці визначення $IWV - 1,5$ мм.

Знаменник формули (6) ξ визначають через сталі R_w , K'_2 , K_3 та середньої температури, яку можна знайти за формулою (7). На певній висоті h метеопараметри e і T можна визначити за аерологічним зондуванням атмосфери, яке неможливо проводити в кожному пункті та й ще неперервно, синхронно з GNSS- вимірюваннями. Саме тому знаходять кореляцію між T_0 (температурою на поверхні землі) і T_m , обчислену за формулою (7) в ті моменти, коли проведено виміри e і T на різних висотах h в межах тропосфери. В [10] для території Німеччини для визначення значення середньої температури запропоновано використовувати таку регресійну залежність:

$$T_m = 0.77T_0 + 54.7 .$$

Для пунктів Ужгород та Київ нами запропоновано такі регресійні залежності:

$$\text{п. Ужгород: } T_m = 1.0383T_0 - 6.7844 ,$$

коефіцієнт кореляції $\rho = 0.9423$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 3.0940$;

$$\text{п. Київ: } T_m = 0.77762T_0 + 55.50985 ,$$

коефіцієнт кореляції $\rho = 0.9686$, середнє квадратичне відхилення $\sigma = 2.12588$.

Залежно від вибраних коефіцієнтів під час визначення середньої температури в тропосфері за значеннями поверхневої температури значення IWV змінюється в межах від 0.3 до 1.0 мм.

Тому для підвищення точності визначення значень випадаючої водяної пари IWV на основі оперативного опрацювання GNSS даних доцільно використовувати локальні модельні представлення для гідростатичної складової тропосферної затримки та локальні значення коефіцієнтів кореляційних залежностей T_m від T_0 .

Із GNSS вимірювань ми маємо загальну тропосферну затримку $\Delta \rho_{GPS}^{tropo}$. Якби GNSS вимірювання проводили тільки в zenітному напрямку (супутник для цього пункту знаходиться в zenіті), то точність визначення $\Delta \rho_{GPS}^{tropo}$ визначалась би лише точністю вилучення похибок складових рівняння псевдовіддалі [8]. Можна вважати, що радіосигнал під час GNSS-спостережень проходить крізь атмосферу Землі миттєво. Тобто враховується реальний стан нестабільної атмосфери у певний момент часу. Проте саму величину $\Delta \rho_{GPS}^{tropo}$ визначають за розв'язком рівняння псевдовідстані після вилучення інших похибок та, окрім цього, безпосередньо знаходять $\Delta \rho_{GPS}^{tropo}$ не в zenіті, а на певній zenітній відстані, яку через функції відображення зводять до zenіту. У більшості випадків для обробки GNSS вимірювань використовують функцію відображення Ніла [10]. Похибка функції відображення Ніла при $Z = 75^0$ становить 5–6 см і збільшується до 60–70 см при $Z = 87^0$ [11]. Отже, значення $\Delta \rho_{GPS}^{tropo}$ не є абсолютно точним.

На точність IWV також впливають похибки визначення коефіцієнтів K'_2 , K_3 . Максимальне значення похибки визначення $K'_2 = 17 \pm 10 (K\text{mbar}^{-1})$ дає похибку у визначення $\Delta(IWV) \approx (0.3 - 0.9) \text{мм}$. Максимальне значення похибки визначення коефіцієнта $K_3 = (3.776 \pm 0.004) 10^5 (K\text{mbar}^{-1})$ дає похибку $\Delta(IWV)$ порядку $\approx 0.02 \text{мм}$.

Висновки. Використання GNSS-спостережень у мережі активних референцних станцій дає змогу проводити регіональний та глобальний моніторинг випадаючої водяної пари.

Для підвищення точності визначення випадаючої водяної пари IWV потрібно:

- знати тиск та температуру на поверхні землі;
- знати середню температуру T_m , яка добре корелює із поверхневою температурою T_0 .
- використовувати локальні модельні представлення для гідростатичної складової тропосферної затримки.

Із розробленням методів отримання інформації про просторовий розподіл водяної пари в атмосфері за даними реєстрації GNSS-сигналів можна вийти на якісно новий рівень метеорологічного забезпечення, підвищити якість метеорологічних прогнозів погоди.

1. Інтернет ресурс E-GVAP: <http://egvap.dmi.dk>. 2. Інтернет ресурс EUREF: <http://www.epncb.oma.be>. 3. Інтернет ресурс IGS: <http://igsb.jpl.nasa.gov>. 4. Н. І. Каблак. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних. // *Космічна наука і технологія*. - 2011. - Т. 17, № 4. С. 65–73. 5. Herring T.A., Anthes R.A., Ware R.H. GPS Metrology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the GPS // *J. Geophys. Res.* - 1992. - 97. - P.15787-15801. 6. Каблак Н.І., Клімик В.У. та ін. Моніторинг випадаючої водяної пари за допомогою GPS для прогнозування погоди. // *Космічна наука і технологія*. - 2004. - 10, №5/6. - С.163-166. 7. Real Time Integrated Atmospheric Water Vapor and TEC from GPS – Інтернет ресурс: <http://www.suominet.ucar.edu/indexGlobal.html>. 8. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. – К.: Наукова Думка, 1996. – 376 с. 9. Козаков Л.Я., Ломакин В.С. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 156 с. 10. Niell, A. E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001. 26: 475-480. 11. 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*. – pp. 337–347.