

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ТРОПОСФЕРНИХ ЗАТРИМОК ДЛЯ GNSS СПОСТЕРЕЖЕНЬ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

© Каблак Н.І., 2012

Предложен алгоритм построения изоповерхностей тропосферных задержек в режиме реального времени наблюдения.

An algorithm for constructing isosurfaces tropospheric delays in the real-time monitoring.

Постановка проблеми. Сьогодні за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) отримують інформацію про місцезнаходження об'єктів на поверхні Землі (їх координати і швидкість руху). Поряд з одержанням координат можна виділити непряму задачу, яку можна розв'язати на основі використання GNSS технологій. Розроблено можливість визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референціальних станцій та розроблено алгоритм побудови ізоповерхонь тропосферних затримок у режимі реального часу спостережень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні найбільшим проектом у Центральній Європі, у межах якого проходить визначення в майже реальному часі зенітних тропосферних затримок на регіональній мережі GNSS станцій, є E-GVAP, а основний обчислювальний центр розташований у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB) [1]. Мережа містить тепер 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 через утворення мережових подвійних фазових різниць виключається вплив іоносфери (ionosphere-free GPS carrier-phase double difference measurements), а вже потім, на другому кроці, створюють рівняння зв'язку (поправки до прийнятої апіорної моделі тропосфери) та розв'язують нормальні рівняння способом найменших квадратів (МНК).

У результаті первинної обробки результатів GNSS вимірювань визначають псевдовідстані від станції спостережень до GNSS супутників. Вторинна обробка GNSS вимірювань полягає у розв'язанні навігаційної задачі і дає інформацію про місцезнаходження станції.

Постановка завдання. Наявність мережі активних референціальних станцій, яка базується 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 у всіх науках про Землю. Метою роботи є знаходження тропосферних затримок в будь-якому пункті та на будь-якій висоті атмосфери над цими пунктами в межах території, охопленої GNSS мережею на основі результатів спостережень активних референціальних GNSS станцій. У роботі запропоновано алгоритм побудови ізоповерхонь тропосферних затримок у режимі реального часу спостережень.

Виклад основного матеріалу. Поширення радіосигналу від навігаційних супутників до наземних приймачів через нейтральну атмосферу супроводжується зменшенням швидкості поширення радіохвиль. Це пов'язано з наявністю в атмосфері молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Під дією зовнішньої радіохвилі ці молекули поляризуються і створюють додаткові електричні струми в атмосфері. У результаті сумарні струми вже відрізняються від струмів у вакуумі, що призводить до зменшення фазової швидкості радіохвиль, яка безпосередньо

залежить від концентрації молекул. Отже, виміри додаткової затримки радіосигналу при поширенні в атмосфері дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери уздовж траєкторії поширення радіосигналу.

Переважно невідома зенітна тропосферна затримка оцінюється в мережі активних референційних станцій. У цьому випадку отримані оцінки враховують будь-які зміни, що відображаються в атмосфері.

Закарпатська служба визначення положення – ZAKPOS (Transcarpathian Positioning Service) є місцевою ініціативою та проектом встановлення однорідної базової інфраструктури диференційного GNSS (DGNSS) на території Закарпатської області [4]. За своєю суттю це регіональна GNSS система наземного базування, що працює за європейськими стандартами, і забезпечує GNSS даними спостережень та поправками до них у реальному часі (RTK) для високоточного визначення місцеположення. Така фундаментальна інфраструктура технічно базується на мережі активних референційних GNSS станцій та відповідних лініях зв'язку. На кінець 2010р. ця мережа об'єднувала 28 станцій, і в результаті стала мережею національного масштабу під назвою UA-EUPOS. На рис. 1 подано покриття території України активними GNSS станціями (www.zakpos.zakgeo.com.ua).

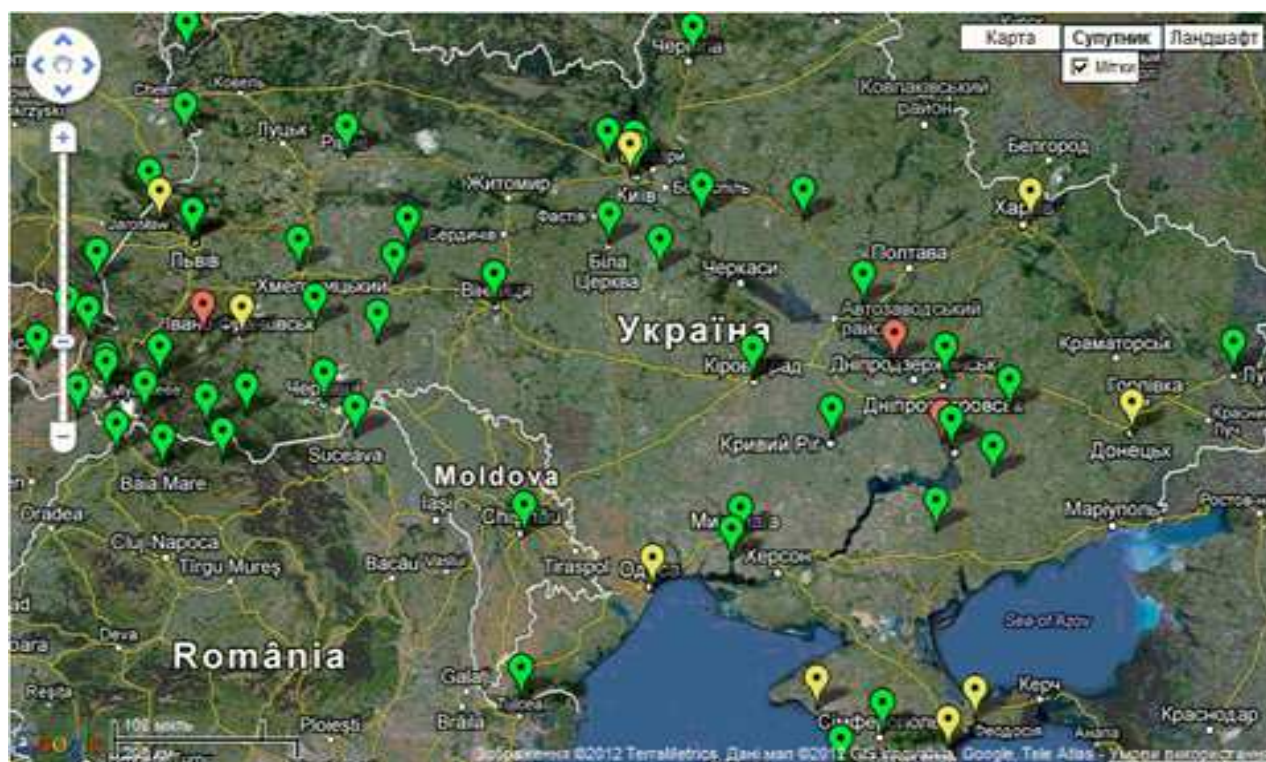


Рис. 1. Покриття території України активними референційними GNSS станціями

На основі GNSS-спостережень у мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS та використовуючи транскордонну співпрацю із Європейськими країнами, розроблено технологію визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті та на будь-якій висоті атмосфери над певними пунктами на певній території.

У подальших описах будуть використані такі позначення:

S – кількість активних референційних станцій ($i=1,2,\dots,S$);

$\Delta\rho_i, B_i, L_i, H_{i0}$ – зенітна тропосферна затримка та геодезичні координати референційної станції (B_i – геодезична широта (град), L_i – геодезична довгота (град), H_{i0} – геодезична висота, (м));

P – кількість роверних станцій ($j=1,2,\dots,P$);

$\Delta\rho_j, B_j, L_j, H_{j0}$ – зенітна тропосферна затримка та геодезичні координати роверної станції;

k – рівень висот на кожній станції ($k=1,2,\dots,M$);

$\Delta\rho_{i0}$ – тропосферні затримки на поверхні землі ($k=0$) кожної референцної станції;

$\Delta\rho_{ik}$ – тропосферні затримки на референцній станції на k -му рівні (визначені під час побудови ізоплощин тропосферних затримок);

N_{i0} – індекс рефракції на поверхні землі кожної референцної станції ($k=0$);

N_{ik} – індекс рефракції на k -му рівні кожної референцної станції.

З метою дослідження стану атмосфери в реальному часі спостережень будуємо ізоповерхні тропосферних затримок. Вибираємо референцну станцію, для якої значення тропосферної затримки $\Delta\rho_i = \Delta\rho_{\min} = \Delta\rho_0^*$. Відповідно координати цієї станції (геодезична широта, геодезична довгота та геодезична висота) позначимо – B^*, L^*, H_0^* і умовно її назвемо опорною станцією.

Складаємо систему рівнянь

$$\frac{\Delta\rho_{i0}}{\Delta\rho_0^*} = c_0 + c_1(B^* - B_i) + c_2(L^* - L_i) + c_3(H_0^* - H_{i0}) + c_4(H_0^* - H_{i0})^2, \quad (1)$$

Методом МНК знаходимо коефіцієнти c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 .

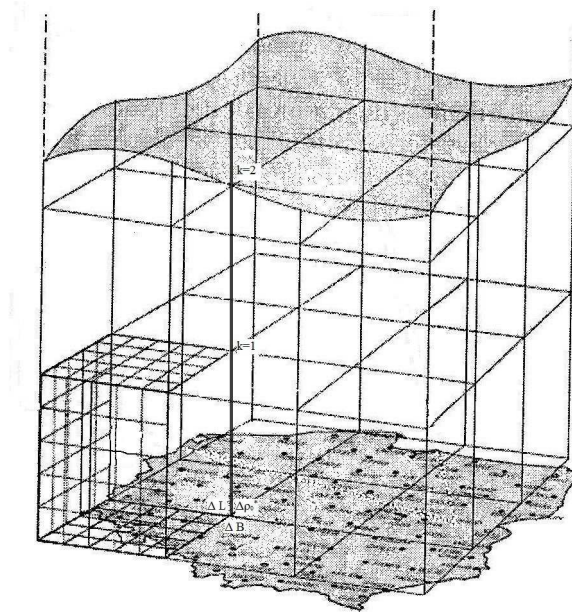


Рис. 2. Розбиття атмосфери на рівні

Для побудови ізоповерхонь тропосферних затримок розбиваємо площину, де розташована опорна референцна станція (висота площини дорівнює висоті опорної станції H_0^*) на квадрати із сторонами $\Delta B, \Delta L$. Прийmemo, що довжина сторін квадратів $0^0,25$ (сторони квадратів $\Delta B, \Delta L$ можуть бути і менші ніж $0^0,25$, ширина і довжина площини можуть бути теж не однакові). У вершинах квадратів знаходимо $B_r = B^* \pm m\Delta B, L_r = L^* \pm n\Delta L$; де $n, m = 1, 2, 3, \dots, G$, G – кількість квадратів.

Знаючи B_r, L_r знаходимо висоту H_r , на якій $\Delta\rho_r = \Delta\rho_{\min} = \Delta\rho_0^*$:

$$\frac{\Delta\rho_r}{\Delta\rho_0^*} = c_0 + c_1(B^* - B_r) + c_2(L^* - L_r) + c_3(H_0^* - H_r) + c_4(H_0^* - H_r)^2;$$

тоді

$$1 = c_0 + c_1(B^* - B_r) + c_2(L^* - L_r) + c_3(H_0^* - H_r) + c_4(H_0^* - H_r)^2.$$

З цього рівняння знаходимо висоту в деякій точці по прямій, що з'єднує вершину квадрата із поверхнею землі H_r .

По цих висотах H_k проводимо ізоповверхню із $\Delta\rho_{min}$

Для побудови інших ізоповверхонь вибираємо крок зміни тропосферної затримки на опорній станції $\delta(\Delta\rho)=0,1\text{м}$. Позначимо $\Delta\rho_{1n}^*=\Delta\rho_0^*+\delta(\Delta\rho)$, $\Delta\rho_{1s}^*=\Delta\rho_0^*-\delta(\Delta\rho)$ (тобто донизу (н) і догори (в) від поверхні опорної станції).

Знаходимо висоту на опорній станції, де $\Delta\rho_{1n}^*=\Delta\rho_0^*+\delta(\Delta\rho)$.

Отримуємо рівняння:

$$\frac{\Delta\rho_{1n}^*}{\Delta\rho_0^*}=c_0+c_3(H_0^*-H_{1n}^*)+c_4(H_0^*-H_{1n}^*)^2,$$

знаходимо H_{1n}^* , на якій $\Delta\rho=\Delta\rho_{1n}^*=\Delta\rho_0^*+\delta(\Delta\rho)$.

Потім знаходимо висоти на прямих, що з'єднують вершини квадратів із поверхнею землі H_{r1} , на якій $\frac{\Delta\rho_{r1}}{\Delta\rho_{1n}^*}=1$.

Для цього складаємо систему рівнянь

$$\frac{\Delta\rho_{r1}}{\Delta\rho_{1n}^*}=a_0+a_1(B^*-B_r)+a_2(L^*-L_r)+a_3(H_{1n}^*-H_{r1})+a_4(H_{1n}^*-H_{r1})^2, \quad (2)$$

Методом МНК знаходимо коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 .

З рівняння $1=a_0+a_1(B^*-B_r)+a_2(L^*-L_r)+a_3(H_{1n}^*-H_{r1})+a_4(H_{1n}^*-H_{r1})^2$ знаходимо H_{r1} .

По знайдених висотах H_{r1} проводимо другу ізоповверхню із $\Delta\rho_{1n}^*$.

Аналогічно проводимо інші ізоповверхні.

Розбиття по висоті проводимо від висоти опорної референційної станції H_0^* догори і донизу до потрібної висоти атмосфери із змінним кроком.

Під час визначення координат будь-якої роверної станції, на якій проводяться геодезичні спостереження, визначаємо тропосферну затримку на певний момент часу в конкретній точці.

Для цього аналогічно до вищенаведеного для будь-якої роверної станції j знаходимо $\Delta\rho_j$ за відомими B_j, L_j, H_{j0} згідно з формулою (1):

$$\frac{\Delta\rho_j}{\Delta\rho_0^*}=c_0+c_1(B^*-B_j)+c_2(L^*-L_j)+c_3(H_0^*-H_{j0})+c_4(H_0^*-H_{j0})^2.$$

На наступному етапі проводимо прив'язку до найближчої референційної GNSS станції. Тобто знаходимо різницю $\Delta\rho_i$ $\Delta(\Delta\rho)$ між значенням $\Delta\rho_i$, для найближчої референційної станції та значенням $\Delta\rho_j$ інтерпольованим на певну точку та вводим поправку в координати цієї точки за рахунок існування різниці тропосферних затримок.

Отже, в еліпсоїдну координату H' , що отримує j роверна станція від референційної, вводим апроксимоване значення тропосферної затримки в зенітному напрямку:

$$\begin{aligned}
X &= (N + H' + \Delta(\Delta\rho)) \cos B \cos L, \\
Y &= (N + H' + \Delta(\Delta\rho)) \cos B \sin L, \\
Z &= \left(\frac{b^2}{a^2} N + H' + \Delta(\Delta\rho)\right) \sin B.
\end{aligned}
\tag{3}$$

де $N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}}$, – радіус кривини в першому вертикалі, a, b – півосі референцного еліпсоїда в м.

Висновки. Описаний алгоритм побудови ізоповерхонь тропосферних затримок у режимі реального часу спостережень на певній території дає можливість використовувати GNSS-спостереження активних референцних станцій для знаходження тропосферних затримок у будь-якому пункті та на будь-якій висоті атмосфери над ним.

В подальших наших дослідженнях буде проведено обчислення атмосферних затримок на декілька моментів часу та розміщення ізоповерхонь $\Delta\rho$ над територією покриття мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS.

1. Інтернет ресурс E-GVAP: <http://egvap.dmi.dk>. 2. Інтернет ресурс EUREF: <http://www.epncb.oma.be>. 3. Інтернет ресурс IGS: <http://igscb.jpl.nasa.gov>. 4. Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I. Creation of ZAKPOS active Network Reference Stations for Transcarpatian Region of Ukraine // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Spacebased and Ground-based Augmentation Systems and Applications. – Berlin, 11–14 November 2008. EUPOS Presentations. 5. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. – К.: Наукова думка, 1996. – 376 с. 6. Козаков Л.Я., Ломакин В.С. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 156 с.