

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.3

Н.І. Каблак

Національний університет “Львівська політехніка”

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 місцеположення 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 розташовано 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 мережеских 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 апріорної 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 місцеположення станції.

Постановка завдання. Наявність мережі активних референціальних станцій, яка базується на найсучаснішій RTK-технології і є централізованою та максимальною 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).

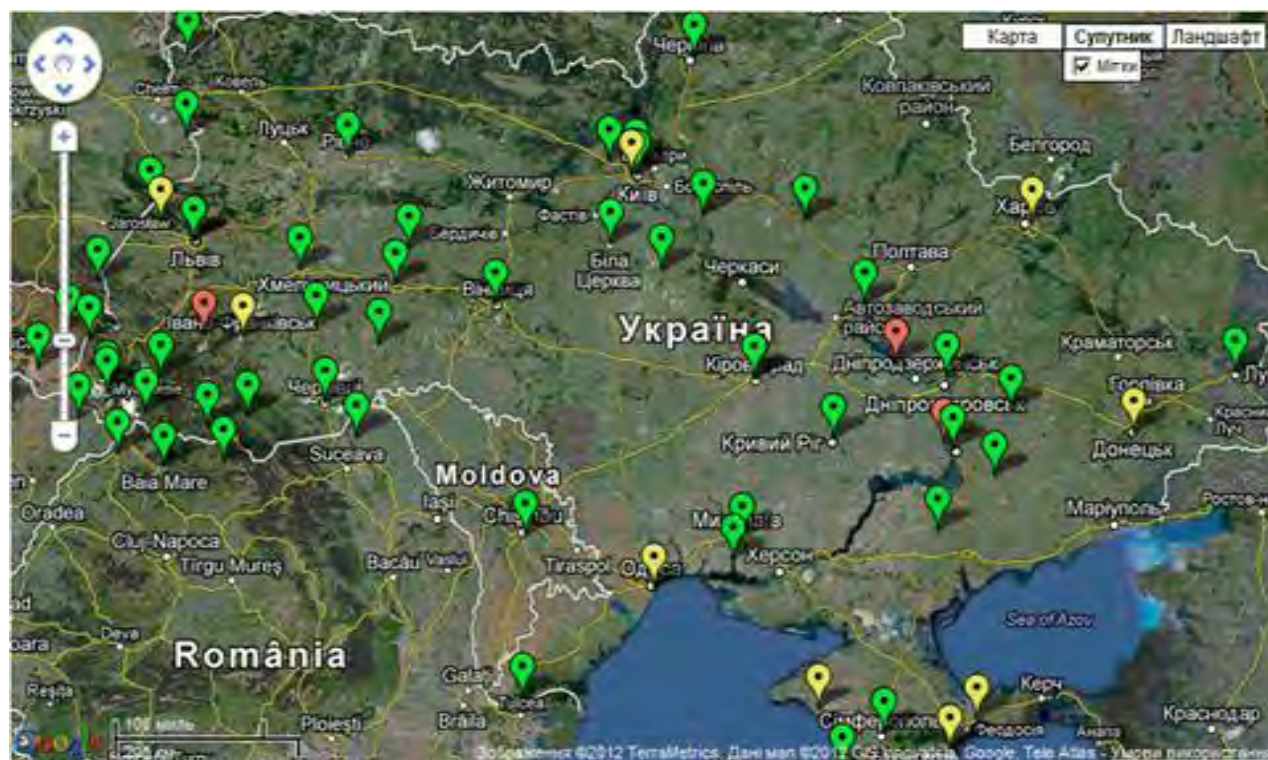


Рис. 1. Покриття території України активними референційними GNSS станціями

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 референцних станцій ($i=1,2,\dots,S$);

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

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

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

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

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

Δr_{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 ізоплощини тропосферних затримок. Вибираємо референцну станцію, для якої значення тропосферної затримки $\Delta r_i = \Delta r_{\min} = \Delta r_0^*$. 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

$$\frac{\Delta r_{i0}}{\Delta r_0^*} = c_0 + c_1(B^* - B_i) + c_2(L^* - L_i) + c_3(H_0^* - H_{i0}) + c_4(H_0^* - H_{i0})^2, \quad (1)$$

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

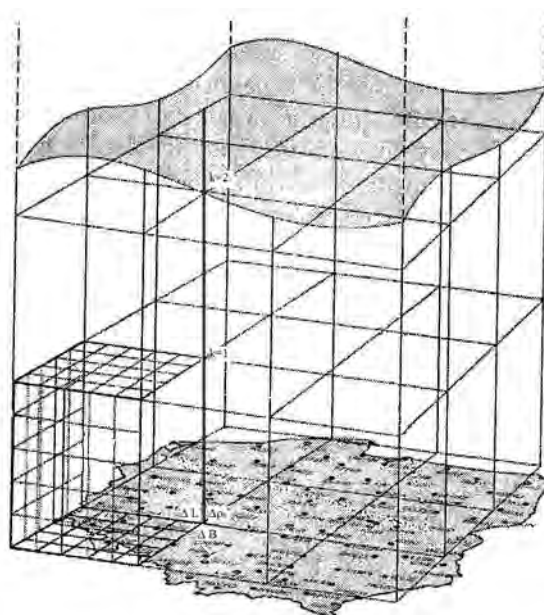


Рис. 2. Розбиття атмосфери на рівні

Для побудови ізоплощин тропосферних затримок розбиваємо площину, де розташована опорна референцна станція (висота площини дорівнює висоті опорної станції H_0^*) на квадрати із сторонами $\Delta B, \Delta L$. Прийемо, 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 $\Delta r_r = \Delta r_{\min} = \Delta r_0^*$:

$$\frac{\Delta r_r}{\Delta r_0^*} = c_0 + c_1(B^* - B_r) + c_2(L^* - L_r) + c_3(H_0^* - H_r) + c_4(H_0^* - H_r)^2;$$

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 ізоповерхню із Δr_{\min}

Для побудови інших ізоповерхонь вибираємо крок зміни тропосферної затримки на опорній станції $d(\Delta r) = 0,1$ м. Позначимо $\Delta r_{1H}^* = \Delta r_0^* + d(\Delta r)$, $\Delta r_{1B}^* = \Delta r_0^* - d(\Delta r)$ (тобто донизу (н) і догори (в) від поверхні опорної станції).

Знаходимо висоту на опорній станції, де $\Delta r_{1H}^* = \Delta r_0^* + d(\Delta r)$.

Отримуємо рівняння:

$$\frac{\Delta r_{1H}^*}{\Delta r_0^*} = c_0 + c_3(H_0^* - H_{1H}^*) + c_4(H_0^* - H_{1H}^*)^2,$$

знаходимо H_{1H}^* , на якій $\Delta r = \Delta r_{1H}^* = \Delta r_0^* + d(\Delta r)$.

Потім знаходимо висоти на прямих, що з'єднують вершини квадратів із поверхнею землі

H_{r1} , на якій $\frac{\Delta r_{r1}}{\Delta r_{1H}^*} = 1$.

Для цього складаємо систему рівнянь

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

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

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

По знайдених висотах H_{r1} проводимо другу ізоповерхню із Δr_{1H}^* .

Аналогічно проводимо інші ізоповерхні.

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 Δr_j за відомими B_j, L_j, H_{j0} згідно з формулою (1):

$$\frac{\Delta r_j}{\Delta r_0^*} = c_0 + c_1(B^* - B_j) + c_2(L^* - L_j) + c_3(H_0^* - H_{j0}) + c_4(H_0^* - H_{j0})^2.$$

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

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

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

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 Δr 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://igsb.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.