

ВПЛИВ СУХОЇ АТМОСФЕРИ НА РАДІОВІДАЛЕМІРНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

**Н.І.Каблак, У.І.Каблак, В.У.Клімик,
І.В.Швалагін, О.В.Фекете**

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень,
вул.Далека, 2а, 88000, Ужгород.

E-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Подано алгоритм побудови локальної моделі врахування впливу сухої атмосфери на точність радіовіддалемірних спостережень штучних супутників Землі.

В останні десятиріччя спостерігається широке використання Глобальної системи визначення місцеположення для розв'язку наукових і прикладних задач. За визначенням [1] Глобальна система визначення місцеположення (GPS) – всепогодна навігаційна система космічного базування, розроблена Міністерством оборони США для безперервного забезпечення збройних сил, розміщених в будь-якому місці на поверхні Землі або біля неї, високоточними даними про їх положення, швидкість і час в єдиній системі відліку. Як видно з цього визначення, GPS розроблялась перш за все для потреб збройних сил США. Але Конгрес США дозволив громадянським споживачам використовувати GPS з деякими обмеженнями.

Глобальна система визначення місцеположення складається з трьох сегментів [1-3]:

- космічного сегмента, який складається із супутників, що передають спеціальні сигнали;
- контрольного сегмента, який управляє всією системою;
- сегмента користувача, що включає в себе всі типи GPS-приймачів.

На даний час космічний сегмент складається з 24 супутників (плюс 4 запасних), які знаходяться на шести кругових орбітах, нахилених на 55° до екватора, на висоті біля 20200 км від

поверхні Землі і мають період обертання приблизно 11 год. 58 хв. (половина зоряної доби).

Контрольний сегмент GPS складається з головної станції управління, кількох станцій спостереження і додаткових станцій управління. Головна станція управління спершу була розміщена на авіабазі США Ванденберг, Каліфорнія, але пізніше була перенесена в Об'єднаний центр космічних операцій на авіабазу Фалкон, Коллорадо-Спрінгс, штат Коллорадо. Вона здійснює контроль стану GPS-супутників і системи в цілому.

Сегмент користувачів – це сукупність елементів, необхідних для отримання сигналів, які передаються із GPS-супутників.

Серед користувачів можна виділити дві категорії: військових і цивільних. GPS створювалась в США перш за все для своїх військових цілей. З тих пір, як Конгрес США дозволив цивільним користувачам використовувати GPS з деякими обмеженнями, ця система ввійшла в повсякденне життя. Було створено велику кількість моделей GPS-приймачів від простих дешевих кодових, які дають точність в десятки метрів, до високоточних геодезичних вартістю в декілька десятків тисяч доларів США, що забезпечують точність визначуванних координат після обробки GPS-спостережень в долі міліметра.

Важливою проблемою обробки GPS-спостережень є побудова моделей тропосфери та іоносфери. Використання цих моделей необхідне для виключення впливу атмосфери при обробці спостережень [2,3,5].

Список робіт, що присвячені проблемі впливу земної атмосфери на координатно-часові вимірювання при спостереженні ШСЗ, дуже великий. З його аналізу випливає, що атмосферну поправку у відстань часто представляють у такому вигляді [2]:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int N ds.$$

Величину індексу рефракції $N = 10^6(n-1)$ в тропосфері доцільно поділити на суху та вологу складову:

$$N = N_c + N_{в.п.}$$

Суха складова є результатом впливу сухої нейтральної атмосфери, а волога зумовлена наявністю парів води. Приблизно 90 % величини значення тропосферної рефракції складає вплив сухої складової, а решта 10 % – вологої. Оскільки із-за значних просторово-часових варіацій вологу поправку важко моделювати, то в даній роботі проведено моделювання тільки сухої поправки.

Для найбільш точного визначення значення поправки $\Delta\rho$ необхідно знати реальні, миттєві значення метеопараметрів вздовж шляху розповсюдження електромагнітної хвилі [4,5]. У випадку відсутності таких даних $\Delta\rho$ шукають, використовуючи модельне представлення поправки. Для кожної віддалемірної станції доцільно розробити свою модель, яка буде найбільш точно враховувати регіональні, локальні і топографічні особливості пункту спостереження

Дослідження висотного розподілу фізичних параметрів атмосфери (тиску сухого повітря P_c , температури t , вологості повітря W) протягом року в пункті спостереження та визначення за цими даними сухої складової атмосферних поправок на віддалемірні спостереження штучних небесних тіл дали змогу створити локальну модель атмосферної поправки, яку можна

представити слідуючою емпіричною залежністю:

$$\Delta\rho_{ic} = a_i + b_i t_i.$$

Для будь-якого значення тиску P_i коефіцієнти a_i і b_i обчислюються за формулами:

$$a_i = a_0 + \frac{\Delta a}{\Delta P} (P_i - P_0),$$

$$b_i = b_0 + \frac{\Delta b}{\Delta P} (P_i - P_0),$$

де a_0 і b_0 – мінімальні значення,

$$\Delta a = a_{\max} - a_0,$$

$$\Delta b = b_{\max} - b_0,$$

$$\Delta P = P_{\max} - P_0.$$

В локальній моделі п.Ужгород ($\varphi = 48^\circ 38'$, $\lambda = 1^\circ 29'$, $h = 120$ м)

$$a_0 = 2,209 \text{ м},$$

$$b_0 = 0,0013 \text{ м/}^\circ\text{C},$$

$$P_0 = 975 \text{ мб}.$$

Для фіксованого P_c атмосферну поправку по локальній моделі можна представити такими залежностями:

$$\Delta\rho_{л} = 2,226 + 0,00118 t \text{ при } P_c = 980 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,239 + 0,00098 t, \quad P_c = 985 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,253 + 0,00078 t, \quad P_c = 990 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,266 + 0,00058 t, \quad P_c = 995 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,280 + 0,00038 t, \quad P_c = 1000 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,293 + 0,00018 t, \quad P_c = 1005 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,307 + 0,00002 t, \quad P_c = 1010 \text{ мб};$$

$$\Delta\rho_{л} = 2,324 + 0,00042 t, \quad P_c = 1020 \text{ мб};$$

Для аналізу результатів досліджень обчислено еталонне (найточніше) значення поправки за вплив сухої атмосфери на радіовідділемірні спостереження за миттєвими профілями метеопараметрів $\Delta\rho_c$, по моделі Хопфільда $\Delta\rho_x$ і локальній моделі $\Delta\rho_{л}$. В останніх двох моделях для знаходження величини впливу сухої складової атмосферної поправки використано метеопараметри, виміряні тільки на поверхні Землі у пункті спостереження (табл.1). Різниця значень $\Delta\rho_c - \Delta\rho_{л}$ і $\Delta\rho_c - \Delta\rho_x$ (табл.2) вказують на те, що $\Delta\rho_{л}$, обчислені по локальній моделі, краще узгоджуються з еталонними значеннями $\Delta\rho_c$, ніж $\Delta\rho_x$.

Таблиця 1. Значення наземних метеопараметрів (тиску сухого повітря P_c та температури t) і поправок

| № | Дата | $t, ^\circ\text{C}$ | $P_c, \text{мб}$ | $\Delta\rho_c, \text{мб}$ | $\Delta\rho_l, \text{мб}$ | $\Delta\rho_x, \text{мб}$ |
|----|---------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 3.01.00 | -5.6 | 995.4 | 2.264 | 2.263 | 2.267 |
| 2 | 4.01 | -6.4 | 990.6 | 2.248 | 2.248 | 2.258 |
| 3 | 6.01 | -8.2 | 1011.3 | 2.301 | 2.301 | 2.305 |
| 4 | 7.01 | -7.8 | 1021.2 | 2.328 | 2.336 | 2.327 |
| 5 | 9.02 | -11.1 | 994.6 | 2.261 | 2.260 | 2.266 |
| 6 | 20.02 | 3.0 | 1018.8 | 2.364 | 2.332 | 2.323 |
| 7 | 21.02 | 2.4 | 1015.3 | 2.314 | 2.313 | 2.315 |
| 8 | 22.02 | 2.1 | 1013.0 | 2.305 | 2.304 | 2.310 |
| 9 | 23.02 | 3.0 | 1008.2 | 2.301 | 2.306 | 2.298 |
| 10 | 24.02 | 2.7 | 1008.5 | 2.302 | 2.306 | 2.299 |
| 11 | 26.02 | 3.4 | 1013.6 | 2.307 | 2.306 | 2.311 |
| 12 | 27.02 | 4.0 | 1010.0 | 2.301 | 2.306 | 2.302 |
| 13 | 2.03 | 8.5 | 1009.2 | 2.295 | 2.306 | 2.302 |
| 14 | 25.03 | 8.4 | 1005.1 | 2.294 | 2.295 | 2.292 |
| 15 | 12.04 | 12.0 | 994.5 | 2.274 | 2.273 | 2.268 |
| 16 | 13.04 | 12.3 | 1000.8 | 2.284 | 2.284 | 2.283 |
| 17 | 14.04 | 14.5 | 997.2 | 2.281 | 2.282 | 2.283 |
| 18 | 16.04 | 14.8 | 1000.9 | 2.285 | 2.285 | 2.283 |
| 19 | 13.05 | 19.7 | 1001.3 | 2.287 | 2.287 | 2.285 |
| 20 | 14.05 | 20.6 | 1004.9 | 2.294 | 2.296 | 2.293 |
| 21 | 15.05 | 22.0 | 998.3 | 2.289 | 2.288 | 2.278 |
| 22 | 20.05 | 27.2 | 990.9 | 2.280 | 2.274 | 2.262 |
| 23 | 21.05 | 29.0 | 989.8 | 2.271 | 2.275 | 2.260 |
| 24 | 22.05 | 26.5 | 988.6 | 2.278 | 2.274 | 2.278 |
| 25 | 23.05 | 25.0 | 993.5 | 2.273 | 2.274 | 2.267 |
| 26 | 24.05 | 26.1 | 991.0 | 2.280 | 2.273 | 2.262 |
| 27 | 25.05 | 24.7 | 983.5 | 2.264 | 2.263 | 2.244 |
| 28 | 26.05 | 25.0 | 989.7 | 2.276 | 2.273 | 2.275 |
| 29 | 27.05 | 25.5 | 989.6 | 2.276 | 2.273 | 2.273 |
| 30 | 30.05 | 26.0 | 991.3 | 2.278 | 2.274 | 2.272 |
| 31 | 31.05 | 30.0 | 991.8 | 2.281 | 2.277 | 2.279 |
| 32 | 5.06 | 15.6 | 992.6 | 2.278 | 2.278 | 2.265 |
| 33 | 8.06 | 25.8 | 984.8 | 2.265 | 2.264 | 2.248 |
| 34 | 11.06 | 25.4 | 995.1 | 2.282 | 2.281 | 2.271 |
| 35 | 23.06 | 27.4 | 983.0 | 2.267 | 2.266 | 2.244 |
| 36 | 28.06 | 29.1 | 983.9 | 2.267 | 2.267 | 2.246 |
| 37 | 3.08 | 30.4 | 978.7 | 2.260 | 2.261 | 2.234 |
| 38 | 7.08 | 26.0 | 987.4 | 2.268 | 2.268 | 2.263 |
| 39 | 8.08 | 22.6 | 989.2 | 2.276 | 2.274 | 2.267 |
| 40 | 9.08 | 26.1 | 980.8 | 2.256 | 2.256 | 2.238 |
| 41 | 19.08 | 23.5 | 979.5 | 2.248 | 2.253 | 2.235 |
| 42 | 22.08 | 25.2 | 984.7 | 2.273 | 2.273 | 2.247 |
| 43 | 23.08 | 25.2 | 983.4 | 2.273 | 2.272 | 2.244 |
| 44 | 1.09 | 23.1 | 998.0 | 2.289 | 2.288 | 2.277 |
| 45 | 2.09 | 24.7 | 994.3 | 2.282 | 2.281 | 2.269 |
| 46 | 3.09 | 25.2 | 991.1 | 2.277 | 2.273 | 2.282 |
| 47 | 6.09 | 22.5 | 991.4 | 2.273 | 2.271 | 2.262 |
| 48 | 30.09 | 17.4 | 1001.2 | 2.287 | 2.286 | 2.284 |

Закінчення таблиці 1.

| № | Дата | $t, ^\circ\text{C}$ | $P_c, \text{мб}$ | $\Delta\rho_c, \text{мб}$ | $\Delta\rho_l, \text{мб}$ | $\Delta\rho_x, \text{мб}$ |
|----|---------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 49 | 2.10.00 | 15.4 | 1005.8 | 2.294 | 2.295 | 2.295 |
| 50 | 3.10 | 11.5 | 1011.4 | 2.291 | 2.306 | 2.307 |
| 51 | 9.10 | 14.9 | 1006.6 | 2.295 | 2.296 | 2.296 |
| 52 | 21.10 | 13.7 | 1004.1 | 2.294 | 2.295 | 2.291 |
| 53 | 26.10 | 4.4 | 1012.4 | 2.303 | 2.304 | 2.308 |
| 54 | 6.11 | 4.1 | 982.7 | 2.246 | 2.246 | 2.241 |
| 55 | 25.12 | 5.2 | 1003.9 | 2.295 | 2.294 | 2.289 |
| 56 | 28.12 | 0.7 | 1005.4 | 2.295 | 2.293 | 2.282 |

Таблиця 2. Розходження поправок локальної моделі та моделі Хопфільда від еталонних значень поправок.

| Дата | $\Delta\rho_c - \Delta\rho_l, \text{м}$ | $\Delta\rho_c - \Delta\rho_x, \text{м}$ | Дата | $\Delta\rho_c - \Delta\rho_l, \text{м}$ | $\Delta\rho_c - \Delta\rho_x, \text{м}$ |
|---------|---|---|----------|---|---|
| 3.01.00 | 0.001 | -0.003 | 27.05.00 | 0.003 | 0.003 |
| 4.01 | 0.000 | -0.010 | 30.05 | 0.004 | 0.006 |
| 6.01 | 0.000 | -0.004 | 31.05 | 0.004 | 0.003 |
| 7.01 | -0.008 | 0.001 | 5.06 | 0.000 | 0.013 |
| 9.02 | 0.001 | 0.005 | 8.06 | 0.001 | 0.017 |
| 20.02 | 0.032 | 0.041 | 11.06 | 0.001 | 0.011 |
| 21.02 | 0.001 | -0.001 | 23.06 | 0.001 | 0.023 |
| 22.02 | 0.001 | -0.005 | 28.06 | 0.000 | 0.021 |
| 23.02 | -0.005 | 0.003 | 3.08 | -0.001 | 0.026 |
| 24.02 | -0.004 | 0.003 | 7.08 | 0.000 | 0.015 |
| 26.02 | 0.001 | -0.004 | 8.08 | 0.002 | 0.009 |
| 27.02 | -0.005 | -0.001 | 9.08 | 0.000 | 0.018 |
| 2.03 | -0.011 | -0.007 | 19.08 | -0.005 | 0.013 |
| 25.03 | -0.001 | 0.002 | 22.08 | 0.000 | 0.026 |
| 12.04 | 0.001 | 0.006 | 23.08 | 0.001 | 0.028 |
| 13.04 | 0.000 | 0.001 | 1.09 | 0.001 | 0.012 |
| 14.04 | -0.001 | -0.002 | 2.09 | 0.001 | 0.013 |
| 16.04 | 0.000 | 0.002 | 3.09 | 0.004 | -0.005 |
| 13.05 | 0.000 | 0.002 | 6.09 | 0.002 | 0.011 |
| 14.05 | -0.002 | 0.001 | 30.09 | 0.001 | 0.003 |
| 15.05 | 0.001 | 0.011 | 2.10 | -0.001 | -0.001 |
| 20.05 | 0.006 | 0.018 | 3.10 | -0.015 | -0.016 |
| 21.05 | -0.004 | 0.011 | 9.10 | -0.001 | -0.001 |
| 22.05 | 0.004 | 0.000 | 21.10 | -0.001 | 0.003 |
| 23.05 | -0.001 | 0.006 | 26.10 | -0.001 | -0.005 |
| 24.05 | 0.007 | 0.018 | 6.11 | 0.000 | 0.005 |
| 25.05 | 0.001 | 0.020 | 25.12 | 0.001 | 0.006 |
| 26.05 | 0.003 | 0.001 | 28.12 | 0.002 | 0.013 |

Із аналізу результатів досліджень видно, що лише у 6 випадках із 56 різниця $\Delta\rho_c - \Delta\rho_l$ є більшою, ніж $\Delta\rho_c - \Delta\rho_x$. Отже, можна стверджувати, що створена локальна модель працює для будь-яких спостережуваних днів з різними наземними метеопараметрами,

виміряними під час спостережень ШСЗ в пункті м.Ужгород.

1. Wooden W.H. // Proc. First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System.-Vol.1. – Rockville (Maryland, USA),–1985.– P.23-32.

2. Б.Гофманн-Велленгоф, Г.Ліхтенеггер, Д.Коллінз. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. – К.: Наукова думка, 1996. – 376с.
3. Хода О. А. // Космічна наука і технологія. – Т.5, №5/6, – 1999 . – С.25-32.
4. N.Mironov, I.Shvalagin, N.Kablak. // Earth rotation, reference systems in geodynamics and solar system. – Varshava, 1995. – P.161-164.
5. Н.І.Каблак, В.У.Клімик та інші. // Науковий вісник УжДУ. Серія: Фізика. – №5, – Ужгород, 1999. – С.67-70.

THE INFLUENCE OF DRY ATMOSPHERE ON RADIO RANGING OBSERVATION OF THE ARTIFICIAL SATELLITES

N.I.Kablak, U.I.Kablak, V.U.Klimyk, I.V.Shvalagin, O.V.Fekete

Uzhgorod National University, Laboratory of space researches,
Daleka str. 2a, 88000, Uzhgorod, Ukraine. E-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Algorithm of influence of local dry atmosphere for precision of radio observations of the earth artificial satellites is presented