

УДК 521.2+520.16

Вплив атмосфери на вимірювання відстаней при денних лазерних спостереженнях ШСЗ

М. Т. Миронов¹, Н. І. Каблак²

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
252650, Київ ДСП 22, Голосіїв

²Ужгородський державний університет Міністерства освіти України

За даними аерологічного зондування досліджено вплив рефракції на лазерні вимірювання відстаней до ШСЗ. Показано, що формула Маріні—Мюррей, яка використовується Міжнародною службою обертання Землі як стандарт, дає завищене значення поправки за вплив атмосфери. З урахуванням регіональних особливостей проведено уточнення моделі Маріні—Мюррей.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ПРИ ДНЕВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ ИСЗ, Миронов М. Т., Каблак Н. И. — По данным аэрологического зондирования исследовано влияние рефракции при лазерных измерениях расстояний до ИСЗ. Показано, что формула Марини—Мюррей, используемая Международной службой вращения Земли в качестве стандарта, дает повышенное значение поправки за влияние атмосферы. С учетом региональных особенностей проведено уточнение модели Марини—Мюррей.

INFLUENCE OF THE EARTH'S ATMOSPHERE ON MEASUREMENTS OF DISTANCES IN DAYTIME SATELLITE LASER RANGING, by Myronov M. T., Kablak N. I. — Atmospheric refraction in daytime satellite laser ranging is investigated on the basis of radiosounding data gathered during a year. Test of the Marini—Murray formula used by the IERS as a standard is carried out.

У зв'язку із функціонуванням Міжнародної служби обертання Землі (МСОЗ) [7], виконанням міжнародних програм «Динаміка твердої Землі» [9], ВЕГЕНЕР—МЕДЛАС [12] і інших, підвищенням інструментальної точності лазерних вимірювань відстаней до ШСЗ до 2—3 мм [8] постає питання оцінки моделей атмосферних редуцій, які рекомендовані як стандартні при опрацюванні, аналізі та інтерпретації спостережень. При цьому з'ясовується необхідність дослідження регіональних і локальних особливостей моделей. Наше завдання полягало в тому, щоб у рамках сферично-симетричної моделі атмосфери оцінити границі значень атмосферної поправки у відстань за результатами денних аерологічних зондувань методом чисельного інтегрування, а також порівняти одержані результати зі значеннями атмосферної поправки, обчисленої за наземними значеннями

метеопараметрів в пункті спостережень за прийнятими МСОЗ стандартними формулами.

Як відомо, атмосферна поправка у віддаль при лазерній локації ШСЗ складається із двох складових: $\Delta\rho_1$ — поправки за зміну швидкості розповсюдження лазерного імпульсу в атмосфері, $\Delta\rho_2$ — поправки за викривлення траєкторії внаслідок рефракції.

Для сферично-симетричної моделі атмосфери поправку $\Delta\rho_1$ можна записати у такий спосіб [2]:

$$\Delta\rho_1 = \int_0^H \frac{(n_g - 1)dH}{\sqrt{1 - (n_0 R_0 \sin Z_0)^2 / [n(R_0 + H)]^2}}, \quad (1)$$

де R_0 — геоцентрична відстань точки спостережень, n_0 , Z_0 — фазовий показник заломлення повітря та видимий зенітний кут ШСЗ у точці спостережень, n_g , n — груповий та фазовий показники заломлення повітря в довільній точці траєкторії на висоті H над рівнем моря.

Поправку $\Delta\rho_2$ за викривлення траєкторії лазерного імпульсу внаслідок рефракції можна обчислити за формулою:

$$\Delta\rho_2 = \int (1 - \cos(\Delta Z))\Delta S, \quad (2)$$

де ΔZ — рефракція у довільній точці траєкторії.

Для обчислення показника заломлення за значеннями тиску P , температури T , і вологості W використовувались дисперсійні формули Оуенса [10].

Нами використано 468 аерологічних профілів метеопараметрів, одержаних протягом року практично в одні і ті ж моменти часу (12^h UT) в ясні дні (хмарність менша 2 балів) для семи пунктів регіону України і Будапешта. Перелік пунктів, їх географічні координати і кількість зондувань подано в табл. 1.

Таблиця 1. Географічні координати пунктів аерологічного зондування

| Пункт | φ , град | λ , град | Висота H_0 , км | Число зондувань |
|-------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Одеса | 46.5 | 30.80 | 0.040 | 27 |
| Ужгород | 48.5 | 22.33 | 0.120 | 56 |
| Київ | 50.45 | 30.03 | 0.170 | 63 |
| Чернівці | 48.25 | 25.90 | 0.210 | 52 |
| Сімферополь | 44.95 | 34.10 | 0.280 | 82 |
| Шепетівка | 50.20 | 27.05 | 0.280 | 31 |
| Львів | 49.83 | 27.00 | 0.330 | 58 |
| Будапешт | 47.27 | 19.15 | 0.150 | 99 |

Для сферично-симетричної моделі атмосфери обчислення поправки у відстань як суми поправок за зміну швидкості поширення лазерного випромінювання $\Delta\rho_1$ і викривлення траєкторії (геометричної поправки) $\Delta\rho_2$ проводилось для $\lambda = 0.694$ мкм при $Z = 0^\circ, 35^\circ, 55^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ з використанням даних аерологічного зондування (P , T , W) до висоти 25—35 км, але не нижче 20 км. В табл. 2 подані середні величини поправок $\Delta\rho_1$ в досліджуваних пунктах для різних значень зенітної відстані. Похибка інтегрування при обчисленні поправки у відстань за зміну швидкості поширення лазерного випромінювання у атмосфері майже на всьому діапазоні зенітних відстаней Z від 0 до 80° становить приблизно 1 мм. Видно, що значення поправки залежить від висоти пункту спостереження над рівнем моря, тобто зменшується із збільшенням висоти над рівнем моря. Ця залежність є очевидною, оскільки числові значення поправки визначаються

Таблиця 2. Середні величини поправок $\Delta\rho_1$, м

| Пункт | H_0 , км | Z , град | | | | | |
|-------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 0 | 35 | 55 | 70 | 75 | 80 |
| Одеса | 0.040 | 2.383 | 2.908 | 4.148 | 6.911 | 9.080 | 13.302 |
| Ужгород | 0.120 | 2.366 | 2.885 | 4.120 | 6.873 | 8.987 | 13.214 |
| Київ | 0.170 | 2.350 | 2.867 | 4.088 | 6.818 | 8.953 | 13.117 |
| Чернівці | 0.210 | 2.349 | 2.866 | 4.086 | 6.814 | 8.943 | 13.107 |
| Сімферополь | 0.280 | 2.318 | 2.829 | 4.033 | 6.725 | 8.414 | 12.926 |
| Шепетівка | 0.280 | 2.328 | 2.858 | 4.044 | 6.744 | 8.857 | 12.975 |
| Львів | 0.330 | 2.303 | 2.811 | 4.007 | 6.602 | 8.777 | 12.845 |
| Будапешт | 0.150 | 2.355 | 2.873 | 4.097 | 6.832 | 8.968 | 13.140 |

Таблиця 3. Середні значення $\Delta\rho_2$, мм для $\lambda = 694.3$ нм

| Пункт | Z , град | | | |
|-------------|------------|-------|-------|--------|
| | 55 | 70 | 75 | 80 |
| Одеса | 0.650 | 3.972 | 9.503 | 30.989 |
| Ужгород | 0.640 | 3.937 | 9.454 | 30.851 |
| Київ | 0.630 | 3.891 | 9.312 | 30.436 |
| Чернівці | 0.639 | 3.899 | 9.322 | 30.471 |
| Сімферополь | 0.614 | 3.748 | 8.961 | 29.247 |
| Шепетівка | 0.643 | 3.926 | 9.396 | 30.979 |
| Львів | 0.617 | 3.755 | 8.987 | 29.325 |
| Будапешт | 0.613 | 3.884 | 9.289 | 30.362 |

Таблиця 4. Середні значення $\Delta\rho_1$ і $\Delta\rho_2$ для регіону України

| Поправка | Z , град | | | | | |
|---------------------|------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 0 | | 70 | | 80 | |
| | день | ніч | день | ніч | день | ніч |
| $\Delta\rho_1$, м | 2.341 | 2.341 | 6.792 | 6.795 | 13.063 | 13.099 |
| $\Delta\rho_2$, мм | — | — | 3.9 | 3.6 | 30.3 | 26.8 |

Таблиця 5. Значення середніх квадратичних похибок вимірювання температури і тиску

| H , км | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| σ_T , °C | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 1.9 |
| σ_p , мбар | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.1 |

в основному впливом атмосферного тиску.

В табл. 3 наведені значення $\Delta\rho_2$ для $\lambda = 0.6943$ мкм на різних зенітних відстанях в досліджуваних пунктах. Видно, що $\Delta\rho_2$ із збільшенням Z збільшується. При $Z = 80^\circ$ поправка набуває середнього значення приблизно 3 см.

В роботі [1] опубліковані значення поправок $\Delta\rho_1$ і $\Delta\rho_2$ на нічний період доби для цих пунктів спостережень протягом року. Із табл. 4 видно, що значення $\Delta\rho_1$ вдень є меншими, ніж вночі. Геометричну поправку, при сучасних вимогах до точності вимірювань, потрібно враховувати при редукції нічних і денних лазерних спостережень ШСЗ.

В роботі [1] відзначено, що похибка обчислення $\Delta\rho_1$ методом чисельного інтегрування за даними аерологічного зондування, обумовлена похибкою вимірювання метеопараметрів. Значення середніх квадратичних похибок вимірювання температури σ_T і тиску σ_p на різних висотах над рівнем моря за даними аерологічного зондування наведені в табл. 5.

Таблиця 6. Середні значення різниці поправок $\Delta\rho^m - \Delta\rho$, см

| Пункт | Кількість зондувань | H_0 , м | Z , град | | | | | |
|-------------|---------------------|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 35 | 55 | 70 | 75 | 80 |
| Одеса | День 27 | 40 | +0.57 | +0.80 | +1.13 | +1.71 | +2.32 | +3.13 |
| | Ніч 94 | | +0.36 | | | +1.13 | +1.53 | +1.86 |
| Ужгород | День 56 | 120 | +0.60 | +0.75 | +0.99 | +1.81 | +2.42 | +3.23 |
| | Ніч 126 | | +0.29 | | | +0.92 | +1.24 | +1.42 |
| Київ | День 63 | 170 | +0.47 | +0.63 | +0.83 | +1.55 | +2.20 | +3.04 |
| | Ніч 156 | | +0.28 | | | +0.90 | +1.22 | +1.39 |
| Чернівці | День 52 | 210 | -0.20 | -0.23 | -0.29 | -0.44 | -0.30 | -3.75 |
| | Ніч 148 | | -0.32 | | | -0.82 | -0.98 | -1.63 |
| Сімферополь | День 82 | 280 | +0.34 | +0.43 | +0.63 | +1.21 | +1.85 | +2.70 |
| | Ніч 162 | | +0.11 | | | +0.42 | +0.62 | +0.64 |
| Шепетівка | День 31 | 280 | +0.38 | +0.48 | +0.61 | +1.28 | +2.07 | +3.80 |
| | Ніч 112 | | +0.28 | | | +0.91 | +1.27 | +1.60 |
| Львів | День 58 | 330 | +0.59 | +0.76 | +1.01 | +1.94 | +2.88 | +4.62 |
| | Ніч 130 | | +0.39 | | | +1.22 | +1.67 | +2.20 |
| Будапешт | День 99 | 150 | +0.28 | +0.42 | +0.66 | +1.23 | +1.78 | +2.41 |
| Середнє | День | | +0.38 | +0.50 | +0.70 | +1.29 | +1.90 | +2.74 |
| | Ніч | | +0.24 | | | +0.77 | +1.11 | +1.31 |

Середнє квадратичне відхилення відносної вологості складає 5—10 %. Середнє квадратичне відхилення $\Delta\rho_2$ від середнього за рік не перевищує 2 мм при $Z = 80^\circ$.

МСОЗ для обчислення величини впливу атмосфери як стандарт використовує формулу Маріні—Мюррей [5—7]. Ця формула дозволяє обчислити поправку за атмосферу на основі $\Delta\rho$ вимірних наземних значень метеопараметрів P_0 , T_0 , W_0 в точці спостережень (на поверхні Землі) [4]. Вона одержана для сферично-симетричної моделі атмосфери і дає повну поправку $\Delta\rho^m$, тобто включає поправку $\Delta\rho_1$ за зміну швидкості поширення лазерного імпульсу через атмосферу і за викривлення траєкторії $\Delta\rho_2$. За даними аерологічного зондування атмосфери тільки у регіоні США [4] було проведено перевірку відносної точності цієї формули. У [1, 3] вказується, що формула Маріні—Мюррей має обмежену точність, особливо при великих зенітних кутах ШСЗ. Для більш строгої оцінки точності формули необхідно використовувати аерологічні дані для тих умов погоди і періоду доби, коли саме можливі лазерні спостереження ШСЗ. В [1] така оцінка була виконана за даними аерологічних зондувань в ясні ночі протягом 1979 року в дев'яти пунктах України. Ми виконали таку перевірку на основі 268 денних значень аерологічних зондувань атмосфери протягом 1979 року для семи пунктів України і Будапешта. Використовуючи наземні значення P_0 , T_0 , W_0 , ми обчислили значення поправки $\Delta\rho^m$ за формулою Маріні—Мюррей для різних пунктів зондування і порівняли їх із значеннями атмосферної поправки $\Delta\rho = \Delta\rho_1 + \Delta\rho_2$, одержаними методом чисельного інтегрування даних. Різниця поправок для $\lambda = 694.3$ нм наведені у табл. 6. Отже, формула Маріні—Мюррей дає завищене значення поправки $\Delta\rho^m$. Величина зміщення вдень у 1.5—2 рази більша, ніж уночі. Вона становить 0.38 см при $Z = 0$ і 2.7 см при $Z = 80^\circ$. Лише для пункту Чернівці вночі і вдень $\Delta\rho^m < \Delta\rho$.

Аналогічні дослідження проведені для $\lambda = 532$ нм при $Z = 0$. Величини значень поправок для $\lambda = 532$ нм в середньому на 6 см більші, ніж для $\lambda = 694$ нм. В роботі [4] показано, що для регіону США формула Маріні—Мюррей дає майже незміщену оцінку поправки $\Delta\rho$. Розходження результатів досліджень пояснюються тим, що: по-перше, формули Маріні—Мюррей були виведені для сферично-симетричної моделі атмосфери. По-друге, у формулі Маріні—Мюррей температурний градієнт ($\beta = 6^\circ/\text{км}$) вважається сталим на різних висотах H . По-третє, приймалася умова гідростатичної

Таблиця 7. Значення коефіцієнтів A_1, A_2, A_3, A_4 , які враховують локальні особливості пунктів спостереження

| Пункт | A_1 | A_2 | $A_3 \cdot 10^{-4}$ | $A_4 \cdot 10^{-5}$ |
|-----------------------------|---------|---------|---------------------|---------------------|
| Львів | 1.00067 | 0.00968 | 1.936 | 7.34 |
| Сімферополь | 1.00040 | — | 1.200 | 4.79 |
| Київ | 1.00053 | — | 1.530 | 5.95 |
| Шепетівка | 1.00032 | — | 0.895 | 3.38 |
| Ужгород | 1.00051 | — | 1.480 | 5.82 |
| Середнє для регіону України | 1.00049 | 0.00968 | 1.410 | 5.45 |

рівноваги. Є й інші наближення та допуски.

Приймаючи до уваги той факт, що $\Delta\rho^m > \Delta\rho$ у всіх пунктах регіону України та Будапешті як вдень так і вночі, для досягнення потрібної точності проведено уточнення формули Маріні—Мюррей шляхом врахування регіональних і локальних особливостей пункту.

Уточнені значення коефіцієнтів з урахуванням локально-топографічних особливостей для кожного досліджуваного пункту України подано в табл. 7. Середнє квадратичне відхилення складає 0.02.

Уточнена формула Маріні—Мюррей для регіону України дає можливість точніше обчислити значення поправки $\Delta\rho^m$. Так, при $Z = 70^\circ$ величина зміщення між $\Delta\rho$ і $\Delta\rho^m$ зменшується у 4 рази.

Отже, для регіону України формулу для K при обчисленні поправки у віддаль по формулі Маріні—Мюррей слід записувати у такому вигляді:

$$K = 1.00067 - 0.00968 \cos 2\varphi - 1.409 \cdot 10^{-4} T_0 + 5.545 \cdot 10^{-5} P_0. \quad (3)$$

1. Миронов Н. Т., Емец А. И., Шопяк Р. Д. Рефракция атмосферы при лазерных наблюдениях ИСЗ // Сферически-симметрическая атмосфера. — Киев, 1992.—56 с.
2. Мотрунич И. И., Швалагин И. В. К вопросу об определении атмосферной поправки при лазерных измерениях дальности // Астрометрия и астрофизика.—1979.—Вып. 37.—С. 61—69.
3. Jaks W., Yatskiv Ya. S., Mironov N. T., Samoilenko A. N. Local geodetic survey for SLR station in Kiev // Проблемы астрометрии и космической геодинимики. — Киев: Наук. думка, 1991.—С. 115—121.
4. Marini J. W., Myrray J. C. W. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees // NASA. Tech. Rep.—1973.—X-591-73-351.
5. Martin C. F., Forcense M. H., Misner C. W. Relativistic effekt on an earth-orbiting satellite in the barycenter coordinate system // J. Geophys Res.—1985.—90B, N 11.—P. 9403—9410.
6. Meinig M. Influence of crustal movement on the terrestrial reference system // Geodesy and Physics of the Earth: Proc. 6-th Inter. Symp. — Potsdam, 1989.—Part III.—P. 439—443.
7. McCarthy D. D., Boucher C., Eanes R., et al. IERS Technical Note 3 // IERS Standarts. — Paris, 1989.—76 p.
8. Mueller I. I., Zerbini S. The interdisciplinary role of space geodesy // Lecture notes in Earth sciences: Proc. Inter. Workshop on the interdisciplinaru role of space geodesy. — Berlin: Springer, 1988.—Vol. 22.—300 p.
9. NASA research announcement dynamics of the solid Earth. — Washington, 1990.—NRA-90-OSSA-24 NASA.—40 p.
10. Owens J. C. Optical refraction index of air: dependence on pressure, temperature and composition // Appl. Opt.—1967.—6, N 1.—P. 51—59.
11. Saastamoinen J. Contribution to the teori of atmospheric refraction // Bul. Geod.—1979.—N 105.—P. 279—290; N 106.—P. 383—397; N 107.—P. 13—34.
12. Wilson P., Pearlman M. R. Report on the WEGENER Re-organisation and proposal preparation meeting. — Frankfurt on Main, 1991.—27 p.

Надійшла до редакції 13.10.97