

УДК 528.3

Н. И. КаблакУжгородский национальный университет
ул. Пидгирна 46, Ужгород, Закарпатская обл., 88000**Технология определения тропосферных задержек
в сети активных референционных станций
ZAKPOS/UA-EUPOS**

Детально рассматривается технология определения тропосферных задержек в любом пункте в пределах территории покрытия сетью активных референционных GNSS-станций в режиме реального времени наблюдений и на разных высотах над поверхностью Земли.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРОПОСФЕРНИХ ЗАТРИМОК У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ZAKPOS/UA-EUPOS, Каблак Н. І. — Детально розглядається технологія визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референційних GNSS-станцій в режимі реального часу спостережень та на різних висотах над поверхнею Землі.

A PROCEDURE OF DETERMINATION OF TROPOSPHERE DELAYS IN THE NETWORK OF ACTIVE REFERENCE STATIONS ZAKPOS/UA-EUPOS, Kablak N. I. — We give a comprehensive consideration of our procedure for the determination of troposphere delays in any point within the limits of the territory of coverage with the network of active reference GNSS-stations for real time observations and for different heights above the Earth's surface.

Постановка проблемы. Постоянно действующие сети наблюдения GNSS-спутников стали чрезвычайно ценным инструментарием для многих научных задач. К таким сетям можно отнести глобальную сеть IGS (International GNSS Service), региональную сеть EPN (Euref Permanent Network), национальные сети референционных станций, которые работают в перманентном режиме, а в последние годы — и сети актив-

ных референцных станций, которые позволяют пользователям получать свои координаты в режиме реального времени (RTK-технологии). На территории Закарпатья создана первая украинская сеть активных референцных станций ZAKPOS [9]. В конце 2010 г. данная сеть объединяла 28 станций, и в результате стала сетью национального масштаба под названием ZAKPOS/UA-EUPOS.

Актуальной проблемой получения надежных результатов научных применений на сегодня остается определение и учет задержек радиосигнала при прохождении атмосферы.

В данной работе рассматривается технология определения тропосферных задержек в любом пункте в пределах территории покрытия сетью активных референцных станций в режиме реального времени наблюдений.

Анализ последних исследований и публикаций. Задержки распространения кодовых и фазовых GNSS-сигналов, которые вызваны нейтральной атмосферой (т. е. тропосферой) есть, наверное, одним из последних факторов, которые ограничивают точность геодезических применений GNSS.

Есть два основных подхода для точной обработки данных GNSS: режим сетевого решения и метод точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning) [8]. Важной особенностью метода PPP является то, что он не требует наличия базовой станции и фактически является разновидностью абсолютного метода GNSS-позиционирования, т. е. для его использования достаточно иметь лишь один приемник. Для компенсации основных погрешностей, которые возникают при абсолютных фазовых GPS-измерениях, в данном методе используются точные значения эфемерид и поправок часов спутников, информация о задержке спутникового сигнала в ионосфере и тропосфере и др. [6, 8].

Распространение радиосигнала в направлении зенита от навигационных спутников к наземным приемникам через нейтральную атмосферу сопровождается уменьшением скорости распространения радиоволн.

Главным концептуальным преимуществом любой сети активных референцных GNSS-станций, по сравнению с одиночными GNSS-станциями, есть возможность генерирования так называемого сетевого решения [5]. Тропосферные задержки имеют порядок величин, которые являются выше шумовых погрешностей фазовых измерений. Зенитная задержка через тропосферную рефракцию имеет порядок 2.3 м для станции на уровне моря при стандартных атмосферных условиях [7, 12]. Влияние тропосферных задержек должно быть уменьшено для того, чтобы использовать всю потенциальную точность GNSS-технологии в реальном времени наблюдений [2—4].

Современные подходы к компенсации влияния тропосферы в реальном времени наблюдения в том или другом виде предусматривают интерполяцию тропосферных задержек, оцененных для станций сети,

на место расположения роверного приемника (любой пункт). Основные расхождения между подходами заключаются в выборе аппроксимирующих функций [3, 10, 11].

Постановка задачи. Целью работы является определение тропосферных задержек в любом пункте и на любой высоте атмосферы над данными пунктами в пределах территории, охваченной GNSS-сетью на основании результатов наблюдений активных референчных GNSS-станций ZAKPOS/UA-EUPOS в режиме реального времени.

Изложение основного материала. На основании GNSS-наблюдений в сети станций ZAKPOS/UA-EUPOS разработана технология определения тропосферных задержек в любом пункте и на любой высоте атмосферы над данными пунктами на данной территории.

В последующих описаниях будут использованы следующие обозначения: S — количество активных референчных станций ($i = 1, 2, \dots, S$); B_i, L_i, H_{i0} — зенитная тропосферная задержка и геодезические координаты референчной станции (B_i — геодезическая широта, град; L_i — геодезическая долгота, град; H_{i0} — геодезическая высота, м); P — количество роверных станций ($j = 1, 2, \dots, P$); B_j, L_j, H_{j0} — зенитная тропосферная задержка и геодезические координаты любого пункта (роверной станции); k — уровень высот на каждой станции ($k = 1, 2, \dots, M$); N_{i0} — тропосферные задержки на поверхности Земли ($k = 0$) каждой референчной станции; N_{i0} — индекс рефракции на поверхности Земли каждой референчной станции ($k = 0$).

Для вычисления тропосферной задержки любого пункта используется система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{i0}{*} &= 1 - c_1(B_i - B^*) - c_2(L_i - L^*) \\ & - c_3(H_{i0} - H_0^*) - c_4(H_{i0} - H_0^*)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\frac{i0}{*}$ — тропосферная задержка одной из референчных станций на поверхности Земли с известными геодезическими координатами B^*, L^*, H_0^* . Число уравнений в системе (1) зависит от количества выбранных активных референчных станций данной сети. Для каждого момента времени осуществляется вычисление коэффициентов c_1, \dots, c_4 .

При определении координат любой роверной станции, на которой проводятся геодезические наблюдения, определяем тропосферную задержку на данный момент времени в данной точке. Для этого для любой роверной станции j находим $\frac{j}{*}$ по известным значениям B_j, L_j, H_{j0} по формуле

$$\begin{aligned} \frac{j}{*} &= 1 - c_1(B_j - B^*) - c_2(L_j - L^*) \\ & - c_3(H_{j0} - H_0^*) - c_4(H_{j0} - H_0^*)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Карту покрытия территории Украины активными GNSS-станциями можно увидеть на сайте www.zakpos.zakgeo.com.ua.

Для исследований было выбрано в разные моменты времени в качестве роверного приемника станции Межгорье (MIZG) или Львов (SULP). Полученные значения тропосферных задержек за формулой (1) сравнивались со значениями тропосферных задержек, полученных с сетевого решения GNSS-наблюдений. В обработку вошли данные 20 активных референчных станций сети ZAKPOS/UA-EUPOS.

Результаты выполненных исследований показали, что среднее значение разницы тропосферных задержек составляет 1.5—3 см со средним квадратичным отклонением 0.2 см, что дает ошибку определения плановых координат 1—2 см. Но для определения тропосферных задержек на высотах выше 800 м над пунктами в пределах территории покрытия сетью активных референчных станций ZAKPOS/UA-EUPOS формула (1) в таком виде дает значительную погрешность.

Поэтому разработана технология определения тропосферных задержек в любом пункте и на любой высоте в пределах территории покрытия сетью активных референчных станций в режиме RTK.

Как известно, величина тропосферной задержки задается следующим образом [1]:

$$10^{-6} \int_0^{H_{\max}} N(h) dh. \quad (3)$$

Анализ показывает, что зависимость экспериментальных значений коэффициента рефракции от высоты хорошо аппроксимируется с помощью формулы [7]

$$N(H) = N_0 \exp \left(-\frac{H - H_0}{\bar{H}} \right), \quad (4)$$

где N_0 и \bar{H} — функции геодезической долготы и геодезической широты точки, H_0 — высота пункта, для которой известен коэффициент рефракции N_0 . Подставляя (4) в (3) и вычисляя интеграл, получаем выражение для тропосферной задержки:

$$10^{-6} N_0 \bar{H} \exp \left(-\frac{H - H_0}{\bar{H}} \right) \exp \left(-\frac{H_{\max} - H_0}{\bar{H}} \right). \quad (5)$$

Из-за больших значений H_{\max} (50 км) вклад от второго слагаемого в формуле (5) порядка 1—2 мм (шар атмосферы от 50 до 100 км дает значение тропосферной задержки порядка 2 мм). Учитывая это, последним слагаемым в формуле (5) можно пренебречь.

Выбрав несколько активных референчных GNSS-станций вокруг исследуемой точки (ровера), для которых известны тропосферные задержки, и обозначив одну из них опорной, составляем систему уравнений

$$\frac{z_i}{\sigma_i} = [1 - q_1(B_i - B_{\text{оп}}) - q_2(L_i - L_{\text{оп}})] \exp \left(-\frac{H - H_{\text{оп}}}{q_3} \right). \quad (6)$$

Число уравнений в системе (6) зависит от количества выбранных активных референчных станций, расположенных вокруг исследуемой точки. Для каждого момента времени вычисляются коэффициенты q_1, q_2, q_3 .

С другой стороны, индекс рефракции может быть выражен формулой [7]

$$N = K_1 \frac{p}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (7)$$

где p — давление воздуха, мбар; e — парциальное давление водяного пара, мбар; T — температура воздуха. Для моделирования зависимостей температуры, давления и парциального давления от высоты будем пользоваться следующими формулами [12]:

$$T = T_0 - \gamma (H - H_0), \quad p = p_0 \frac{T}{T_0}^{\frac{g_0}{R_d}}, \quad e = e_0 \frac{T}{T_0}^{\frac{4g_0}{R_d}}, \quad (8)$$

где T_0 и p_0 — значение температуры и давления на поверхности Земли, $R_d = 287.054 \text{ м}^2\text{с}^2\text{град}^{-1}$ — газовая постоянная сухого воздуха, $g_0 = 9.80616 \text{ м/с}^2$ — значение ускорения свободного падения на поверхности Земли, γ — градиент температуры, который может изменяться в зависимости от местности, сезона года, времени суток и т. д. (в стандартной модели $\gamma = 0.0065 \text{ К/м}$).

Парциальное давление водяной пары на поверхности Земли e_0 находим через значение относительной влажности на поверхности Земли W_0 , используя формулу Магнуса [10]:

$$e_0 = \frac{6.1 W_0}{100} 10^{\frac{7.5(T_0 - 273.15)}{237.3 + T_0 - 273.15}}. \quad (9)$$

В расчеты брались данные аэрологического зондирования атмосферы во Львове и значения тропосферных задержек из GNSS-наблюдений на референчных станциях сети UA-EUPOS/ZAKPOS в эти же моменты времени.

Станция аэрологического зондирования Львов расположена на высоте 323 м над уровнем моря, а референчная станция SULP — на высоте 370 м, поэтому была введена поправка в величину тропосферных задержек за счет перепада высот.

В табл. 1 приведены числовые значения тропосферных задержек $i^{(6)}$, вычисленные по формуле (6), значения $i^{(3)}$, полученные по формуле (3) с использованием модельных зависимостей (8), значения $i^{\text{аэр}}$, полученные по формуле (3) с использованием данных аэрологического зондирования атмосферы на разных высотах атмосферы над пунктом Львов на 10.07.2012 г.

На значение тропосферной задержки большое влияние имеют инверсии температуры. Расхождение между значениями тропосферных задержек на разных высотах атмосферы над пунктом Львов, которые приведены в табл. 1, объясняются тем, что модельные представления

Таблица 1. Значение тропосферных задержек на разных высотах атмосферы (пункт Львов)

$H, \text{ м}$	$^{(6)}_i, \text{ м}$	$^{(3)}_i, \text{ м}$	$^{aep}_i, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$^{(6)}_i, \text{ м}$	$^{(3)}_i, \text{ м}$	$^{aep}_i, \text{ м}$
323	2.395	2.461	2.340	5197	1.228	1.253	1.217
497	2.336	2.403	2.341	5582	1.165	1.188	1.153
1022	2.169	2.234	2.176	5780	1.134	1.155	1.122
1499	2.029	2.091	2.036	6013	1.099	1.119	1.085
2325	1.811	1.875	1.815	6466	1.033	1.051	1.019
2478	1.774	1.826	1.777	7046	0.9	0.916	0.941
3114	1.627	1.672	1.627	7909	0.845	0.86	0.833
4058	1.432	1.467	1.427	8221	0.809	0.824	0.797
4589	1.333	1.363	1.325	8816	0.743	0.759	0.73
4926	1.274	1.301	1.264				

тропосферных задержек $^{(3)}_i$ не учитывают небольшие инверсии температуры в приземном слое атмосферы. Значения $^{aep}_i$ также нельзя считать абсолютно точными. Погрешность определения $^{(3)}_i$ в зените, которая вызвана погрешностями измерения метеопараметров, изменяется от 0.006 до 0.012 м [4].

При определении точных координат любой точки в пределах сети активных референчных станций в реальном времени наблюдений главным условием считается наличие достаточной корреляции тропосферных задержек с расстоянием.

Если бы состояние атмосферы над обоими пунктами было одинаково и стабильно, то задача учета влияния атмосферы была бы простой. Но атмосфера нестабильна как в вертикальном, так и горизонтальном направлении. Наблюдаются крупномасштабные и незначительные неоднородности, которые, в свою очередь, изменяются иногда за минуты и даже секунды. Поэтому задача традиционно должна была бы сводиться к оценке пространственно-временных изменений состояния атмосферы. Но поскольку время прохождения сигнала сквозь тропосферу очень мало, то никакие физические изменения тропосферы для референчной станции во время прохождения сигнала не имеют значения при определении расстояния к спутнику. Погрешности могут быть лишь в случае, когда спутник находится не в зените, а измеренные псевдорасстояния возводят к зенитному направлению. В другой момент времени (даже через несколько секунд или части секунд) само значение этой тропосферной задержки к псевдорасстоянию может быть другим. Все зависит от пространственно-временных изменений состояния атмосферы вдоль пути прохождения сигнала от спутника к наблюдателю референчной станции за этот интервал времени.

Однако в тот же момент времени сигнал от спутника к роверному приемнику проходит другие слои атмосферы, в которых физические условия могут быть иными. Все будет зависеть главным образом от расстояний «база — ровер». Поэтому и в рекомендациях из построения сети активных референчных станций акцентируется внимание именно на расстоянии между станциями.

При увеличении расстояний между такими станциями возможен дополнительный эффект от некомпенсированной тропосферной задержки. В нашем случае в качестве ровера взята станция SULP, а за базу выбиралась опорная станция, которая в процессе вычисления изменялась.

В табл. 2 приведены результаты исследования влияния расстояния «база — ровер» на точность определения тропосферных задержек. Найдена разница между значением тропосферной задержки на станции SULP, определенным из сетевого решения и интерполированным значением по формулам (1) и (6) от опорных станций на станцию SULP ($i^{(1)}$, $i^{(6)}$ соответственно).

Таблица 2. Разница между значениями тропосферных задержек

Опорная станция	Расстояние, км (SULP — опорная станция)	$i^{(1)}$, см	$i^{(6)}$, см
Рахив (RAHI)	200	-1.23	-2.22
Тернополь (TERN)	124	-1.50	-1.89
Польша (HOZD)	80	-1.07	-1.24
Среднее		1.27	1.78

Расхождение между значениями тропосферных задержек, определенных при GNSS-наблюдениях и вычисленных с использованием формул (1) и (6), составляет 1.5—2 см. Видно, что чем ближе опорная станция находится к искомой, тем лучше результат. Количество референционных станций, которые вошли в обработку, изменялось от 5 до 20. При этом значения $i^{(1)}$, $i^{(6)}$ практически не изменяются (в пределах ошибки). Вычисленные значения разниц $i^{(1)}$ на поверхности Земли на 1 см меньше, чем значения $i^{(6)}$. Однако формула (6) дает возможность вычислить значение тропосферной задержки и на высотах выше 800 м над поверхностью Земли.

Выводы. Результаты выполненных исследований указывают на то, что разработанная технология дает возможность определить тропосферные задержки в любом пункте и на любой высоте над данным пунктом в пределах территории покрытия сетью активных референционных станций в режиме реального времени наблюдений с точностью до 2 см.

1. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Г., Коллинз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. К.: Наук. думка, 1996.—376 с.
2. Каблак Н. І. Оцінка впливу атмосфери у мережі активних референціальних GNSS-станцій // Геодезія, картографія і аерофотознімання.—2010.—Вип. 73.—С. 17—21.
3. Каблак Н. І. Оцінка величини впливу тропосфери на точність визначення координат в мережі ZAKPOS // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць Західного геодезичного товариства УТГК. — Львів, 2011.—С. 118—120.

4. *Каблак Н. І.* Бюджет тропосферних похибок під час GPS-спостережень // Геодезія, картографія і аерофотознімання.—2011.—Вип. 74.—С. 13—23.
5. *Савчук С. Г., Ланьо О. В.* Аналіз якості мережевого розв'язку в активних GNSS-мережах // Геодезія, картографія і аерофотознімання.—2011.—Вип. 74.—С. 23—29.
6. *Bender M., Dick G., Wickert J., et al.* Estimates of the information provided by GPS slant data observed in Germany regarding tomographic applications // *J. Geophys. Res.*—2009.—**114**. D06303, doi:10.1029/2008JD011008.
7. *Bender M., Dick G., Ge M., et al.* Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques // *Adv. Space Res.*—2011.—**47**.—P. 1704—1720.
8. *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, 1998. P. 337–347.
9. *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.
10. *Saastamoinen J.* Contributions to the theory of atmospheric refraction. Part II: refraction corrections in satellite geodesy // *Bull. Geod.*—1973.—**107**.—P. 13—34.
11. *Schueler T., Hein G. W., Eissfeller B.* A new tropospheric correction model for GNSS navigation proceedings of GNSS 2001, V GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation, Seville, Spain, May 8–11, 2001.
12. *Schueler T.* On ground-based GPS tropospheric delay estimation dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001, online: <http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html>

Статья поступила в редакцию 02.07.12