

Тропосферная составляющая топоцентрического вектора спутника при радиодальномерных измерениях

© 2019 г. А.О. Куприянов

Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
aoku28@gmail.com

The tropospheric component of the topocentric satellite vector in radio-ranging measurements

A.O. Kupriyanov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
aoku28@gmail.com

Received August 5, 2019

Revised November 6, 2019

Accepted December 2, 2019

Keywords: Earth's troposphere, neutral atmosphere, PPP method.

Summary. When positioning using the PPP method, one of the key errors affecting the accuracy of determining the topocentric vector of the satellite, and therefore the positioning accuracy, was and remains the influence of the Earth's neutral atmosphere. The article presents the theoretical foundations about the structure of the atmosphere and its effect on the delay of the radio signal. The question of what causes dry and wet tropospheric delays is considered, and IGS is used to calculate the zenith tropospheric delay.

Citation: Kupriyanov A.O. The tropospheric component of the topocentric satellite vector in radio-ranging measurements. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofototsyemka»*. Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2019, 63 (6): 623–626 [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-623-626.

Поступила 5 августа 2019 г.

После доработки 6 ноября 2019 г.

Принята к печати 2 декабря 2019 г.

Ключевые слова: метод PPP, нейтральная атмосфера, тропосфера Земли.

Рассмотрены теоретические основы влияния нейтральной атмосферы Земли на топоцентрический вектор спутника, получаемый по кодовым и фазовым псевдодальностям. Приведены сведения о современных методах, применяемых для оценки влияния тропосферной задержки навигационного сигнала на радиодальномерные измерения. Сделаны выводы о возможности применения технологии оценки влияния тропосферы IGS для позиционирования, близкого к реальному времени.

Для цитирования: Куприянов А.О. Тропосферная составляющая топоцентрического вектора спутника при радиодальномерных измерениях // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 6. С. 623–626. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-623-626.

Метод Precise Point Positioning (PPP) представляет собой сочетание и развитие геометрического и динамического методов. Несмотря на то, что топоцентрический вектор спутника (псевдодальность) можно получить по кодовым и фазовым измерениям, одной из основных ошибок, влияющих на оба типа измерений, остается нейтральная атмосфера Земли. Нейтральная атмосфера — недиспергирующая среда и обладает рефракцией, влияющей на распространение сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Данное влияние называют тропосферной задержкой радионавигационного сигнала и выделяют в уравнениях псевдодальностей как T_A^i [1, 2]:

$$P_{A,Lq}^i(t) = \rho_A^i(t, t - \tau_A^i) + I_{A,Lq}^i + T_A^i + dm_{A,Lq}^i + c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + \\ + c[d_{A,Lq}^i(t) + d_{Lq}^i(t - \tau_A^i)] + e_{A,Lq}^i + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_{A,Lq}^i,$$

где τ_A^i — время прохождения сигнала от генератора сигналов на спутнике до коррелятора сигнала

лов в приемнике; I_A^i — влияние ионосферной рефракции на измеренную псевдодальность; T_A^i — влияние тропосферной рефракции на измеренную псевдодальность; dm_A^i — влияние многолучевости на измеренную псевдодальность; d^i — задержка сигнала на спутнике; d_A — задержка сигнала в приемнике; dt_A — ошибка часов приемника; dt^i — ошибка часов спутника; e_A^i — случайная ошибка измерения псевдодальности; c — скорость света в вакууме; t — момент приема сигнала приемником; τ_A^i — время распространения сигнала от спутника i до приемника A ; ρ_A^i — геометрическая дальность от спутника i до приемника A ; P_A^i — измеренная псевдодальность от спутника i до приемника A .

При кодовых и фазовых измерениях псевдодальности тропосферная задержка имеет равную величину, так как она зависит только от показателя преломления в атмосфере Земли.

В общем виде тропосферную задержку можно выразить следующей формулой:

$$T_A^i = \int_A^i cN dt,$$

где N — показатель преломления; c — скорость света в вакууме.

Показатель преломления является функцией положения точек пространства, через которые проходит путь сигнала, зависящий от температуры, давления и парциального давления водяного пара:

$$N = f(T, P, e),$$

где N — показатель преломления; T — температура, К; P — давление, гПа; e — парциальное давление водяного пара.

Так как измерить метеорологические параметры в каждой точке на пути прохождения сигнала невозможно, для учета тропосферной задержки атмосферу Земли подразделяют на следующие слои:

1) тропосфера — варьируется от уровня моря до высоты в 11–12 км и характеризуется относительно линейным снижением темпера-

туры;

2) тропопауза — небольшой пограничный слой между 12 и 16 км, где температура остается примерно постоянной на уровне от –60 до –80 °С;

3) стратосфера — слой атмосферы от 16 до 50 км, в нем происходит медленное повышение температуры и практически отсутствует водяной пар;

4) стратопауза — небольшой пограничный слой между 50 и 55 км, температура примерно постоянная на уровне от 0° С.

Недисперсионная задержка радиосигнала частотой до 30 ГГц в атмосфере может достигать 2,3 м на уровне моря. Эта задержка удобно разделяется на сухую и влажную составляющую. Сухая задержка обусловлена рефрактерностью сухих газов (главным образом N_2 и O_2) в тропосфере и большей частью недипольного компонента рефрактерности водяного пара. Остальная часть рефрактерности водяного пара отвечает за большую часть влажной задержки. Компонент сухой задержки составляет примерно 90% общей задержки на любом выбранном участке по всему миру, но может варьироваться от 80 до 100% в зависимости от местоположения и времени года [3].

Его можно точно вычислить априори на основе достоверных данных о давлении на поверхности с использованием формулы Saastamoinen'a (1972), как представлено у Davis'a (1985) [4, 5]:

$$D_{d,z} = \frac{[(0,0022768 \pm 0,0000005)]P_0}{f_s(B, H)},$$

где $D_{d,z}$ — зенитная сухая задержка, м; P_0 — атмосферное давление, гПа (эквивалент миллибар) в опорной точке (например, фазового центра ГНСС-антенны); функция $f_s(B, H)$ задана уравнением

$$f_s(B, H) = 1 - 0,00266 \cos 2B - 0,00000028H,$$

где B — геодезическая широта станции; H — геодезическая высота станции, м.

Влажная составляющая обусловлена неоднородным распределением водяного пара, свя-

занным с быстрым изменением его агрегатного состояния на поверхности планеты, а также коррелируется с изменениями температуры в зависимости от высоты и местоположения [6, 7].

Для получения полной задержки радиосигнала в направлении на спутник T необходимо вычислить сухую D_d и влажную D_w , составляющие зенитной тропосферной задержки и воспользоваться функцией отображения, которая подразделяется на сухую m_d и влажную m_w части.

В настоящее время нет простого метода для оценки точного априорного значения влажной тропосферной задержки, хотя в исследованиях продолжают использовать для этого внешние устройства наблюдения (такие как радиометры водяного пара). Таким образом, в наиболее точных приложениях, где требуется субдециметровая точность, остаточная задержка обычно оценивается с учетом других геодезических величин. Оценка облегчается простой параметризацией тропосферной задержки, где задержка прямой видимости D_L выражается как функция четырех параметров следующим образом [8, 9]:

$$D_L = m_d(E)D_{d,z} + m_w(E)D_{w,z} + m_g(E)[G_N \cos(a) + G_E \sin(a)],$$

где $D_{d,z}$ — сухая тропосферная задержка, м; $D_{w,z}$ — зенитная влажная задержка, м; G_N и G_E — компоненты горизонтального градиента задержки; m_d , m_w и m_g — функции отображения атмосферы для сухой задержки, влажной задержки и градиентов соответственно; E — угол возвышения направления распространения сигнала, угл. градусы; a — азимут направления распространения сигнала, угл. градусы.

Данный метод разработан International GNSS service (IGS) для оценки зенитной тропосферной задержки методом PPP [10–13]. Обработка занимает три недели и позволяет получить оценку зенитной тропосферной задержки с точностью 4 мм. Для этого используют:

предварительно отфильтрованный, 27-часовой сеанс наблюдений;

финальные эфемериды и поправки часов сервиса IGS;

в обработке не учитываются спутники с углом возвышения менее 7° ;

глобальную функцию отображения GMF (Global Mapping Function) в качестве функции отображения;

оценку тропосферы по сухой модели Нейла;

программное обеспечение Bernese 5.0 Software.

Выводы

Необходимость учета влияния тропосферной задержки на радиодальномерные измерения обусловлена постоянным изменением состояния нейтральной атмосферы Земли. Несмотря на высокую точность предоставляемых тропосферных задержек сервисом IGS, их практическое применение невозможно по причине привязки к конкретной базовой станции. Методику же оценки влияния тропосферной задержки затруднительно использовать при наблюдениях близких к реальному времени, так как обработка данных занимает около трех недель. Исходя из этого, общепринятым методом, применяемым в геодезической отрасли, является расчёт тропосферной задержки с использованием моделей Хопфилд, Саастамойнена, Блэка и др. Используя обобщенные представления о строении атмосферы, модели позволяют выполнять расчет зенитных тропосферных задержек с точностью до нескольких десятков сантиметров. Исходными данными для применения таких моделей служат метеопараметры в точке проведения наблюдений. Они могут быть получены по реальным измерениям, спрогнозированы с использованием моделей метеорологических данных, по таблицам статистических данных или по стандартной атмосфере. Для выбора наиболее подходящих моделей и источников метеорологических параметров для тропосферной коррекции радиодальномерных наблюдений целесообразно провести отдельное исследование по их сравнению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Генике А.А., Побединский Г.Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. М.: Картогеоцентр, 2004. 355 с.
2. *Куприянов А.О.* Эволюция орбитального метода – развитие технологий высокоточного автономного позиционирования // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 2. С. 125–133. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-2-125-133.
3. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites," The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series, 15, Henriksen, S. W., Mancini, A., Chovitz, B. H. (eds.). 1972. P. 247–251.
4. *Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G.* Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length," Radio Sci. 1985, 20(6), P. 1593–1607, DOI: 10.1029/RS020i006p01593.
5. *Bevis M. et al.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using GPS. J. Geophys. Res. 1992. 97. 787–801.
6. *MacMillan D.S., Ma C.* Atmospheric gradients and the VLBI terrestrial and celestial reference frames", Geophys. Res. Lett., 1997, 24(4), P. 453–456, DOI:10.1029/97GL00143.
7. *Titov O.A.* Construction of a celestial coordinate reference frame from VLBI data," Astron. Rep., 2004, 48(11), P. 941–948, DOI:10.1134/1.1822976.
8. *Torben Schüler* On ground-based GPS tropospheric delay estimation. Dissertation, Schriftenreihe Studiengang für Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Heft 73, Neubiberg, 2001, 370 p.
9. *Eva Krueger, Torben Schueler, Bertram Arbesser-Rastburg.* The standard tropospheric correction model for the European satellite navigation system Galileo. In: XXVIIIth general assembly of International Union of Radio Science (URSI), 23–29 October 2005, New Delhi, India.
10. *Cai C., Gao Y., Pan L., Zhu J.* Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. Adv. Space Res. 2015. 56, 133–143.
11. *Zhao Q., Yao Y., Yao W., Li, Z.* Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. Sci. Rep. 2018. 8, 7939.
12. *Böhm J., Niell A., Tregoning P., Schuh, H.* Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. Geophys. Res. Lett. 2006. 33, L07304.
13. *Zhou F. et al.* The impact of estimating high-resolution tropospheric gradients on multi-GNSS precise positioning. Sensors 17, 2017, 756.

REFERENCES

1. *Genike A.A., Pobedinsky G.G.* *Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ih primeneniye v geodezii.* Global satellite positioning systems and their application in geodesy. Moscow: Kartgeotsentr, 2004: 355 p. [In Russian].
2. *Kupriyanov A.O.* Orbital method evolution as Precise Point Positioning technology development. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka».* Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying». 2019, 63 (2): 125–133. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-2-125-133.
3. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites," The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series, 15, Henriksen, S. W., Mancini, A., Chovitz, B. H. (eds.). 1972: 247–251.
4. *Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., Elgered G.* Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length," Radio Sci. 1985, 20(6): 1593–1607. DOI: 10.1029/RS020i006p01593.
5. *Bevis, M. et al.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using GPS. J. Geophys. Res. 1992. 97. 787–801.
6. *MacMillan D.S., Ma C.* Atmospheric gradients and the VLBI terrestrial and celestial reference frames", Geophys. Res. Lett., 1997, 24(4): 453–456. DOI:10.1029/97GL00143.
7. *Titov O.A.* Construction of a celestial coordinate reference frame from VLBI data," Astron. Rep., 2004, 48(11): 941–948. DOI:10.1134/1.1822976.
8. *Torben Schüler* On ground-based GPS tropospheric delay estimation. Dissertation, Schriftenreihe Studiengang für Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Heft 73, Neubiberg, 2001: 370 p.
9. *Eva Krueger, Torben Schueler, Bertram Arbesser-Rastburg.* The standard tropospheric correction model for the European satellite navigation system Galileo. In: XXVIIIth general assembly of International Union of Radio Science (URSI), 23–29 October 2005, New Delhi, India.
10. *Cai C., Gao Y., Pan L., Zhu J.* Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. Adv. Space Res. 2015. 56: 133–143.
11. *Zhao Q., Yao Y., Yao W., Li, Z.* Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. Sci. Rep. 2018. 8, 7939.
12. *Böhm J., Niell A., Tregoning P., Schuh, H.* Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. Geophys. Res. Lett. 2006. 33, L07304.
13. *Zhou F. et al.* The impact of estimating high-resolution tropospheric gradients on multi-GNSS precise positioning. Sensors 17, 2017, 756.