

ПОПРАВКИ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНЫХ ГНСС ИЗМЕРЕНИЯХ

Предложена строгая модель для отыскания поправок к результатам двухчастотных ГНСС измерений, компенсирующих рефракционные ионосферные эффекты высших порядков, обусловленные вкладом членов разложения коэффициента преломления ионосферы второго и третьего порядка, а также эффекты рефракционного удлинения и рефракционного пространственного разнесения траекторий сигналов с различными несущими частотами при их распространении в ионосфере и тропосфере. Получены формулы для поправок, которые не имеют ограничений по точности, присутствующих известным приближенным моделям, и могут быть использованы для повышения достоверности результатов оценки неопределенности измерений двухчастотным методом, а также для повышения точности повторной обработки результатов ГНСС измерений в сети IGS.

ГНСС, оценка влияния ионосферы, двухчастотный метод, неопределенность, рефракция

Введение

В последние годы усилия большого числа исследователей разных стран направлены на повышение точности измерений, осуществляемых с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). К подобным системам относятся, в частности, разработанная в США GPS, российская ГЛОНАСС и разработка стран ЕС – GALILEO. Интерес к проблеме точности ГНСС измерений объясняется широким применением таких систем в геодезии, геофизике, навигации, при мониторинге окружающей среды [1], в метрологии и фундаментальных исследованиях (например, при сличениях эталонов времени и частоты, при изучении гравитационных и релятивистских эффектов [2, 3]).

Одним из основных факторов, ограничивающих точность ГНСС измерений, является влияние земной атмосферы на характеристики распространения сигналов ГНСС (ЭМ волн сверхвысокочастотного диапазона, используемых при измерениях). Главными источниками погрешности измерения в данном случае оказываются дополнительная задержка сигнала в атмосфере и рефракционное искривление траектории, по которой он распространяется. Влияние земной атмосферы может быть скомпенсировано либо введением соответствующих поправок при обработке результатов измерений, либо аппаратным путем – с использованием измерительной информации, получаемой непосредственно в процессе измерений [1, 4].

Особое внимание в настоящее время уделяется совершенствованию аппаратных методов коррекции. Влияние тропосферы (электрически нейтрального приземного слоя атмосферы, высота верхней границы которого обычно принимается равной 60 – 80 км) учитывается, как правило, введением тропосферных поправок в число неизвестных, подлежащих определению по результатам ГНСС измерений

[4]. Для учета влияния ионосферы (электрически заряженного атмосферного слоя, нижняя и верхняя границы которого располагаются вблизи высот 100 км и 1000 км над Землей, соответственно) измерения осуществляются на двух несущих частотах [1].

Двухчастотный метод, однако, позволяет исключить вклад в результат измерений лишь той части ионосферной задержки сигнала, которая определяется основным членом разложения коэффициента преломления ионосферы обратно пропорциональным квадрату частоты [1, 5]. Члены разложения более высоких порядков при этом не учитываются. Необходимо отметить, что при выводе уравнения измерения классического двухчастотного метода не учитывается также эффект рефракционного пространственного разнесения траекторий сигналов с различными несущими частотами, а также связанное с данным эффектом различие в тропосферных задержках сигналов (задержки отличаются именно из-за несовпадения траекторий, которые проходят по разным участкам пространства с отличающимися значениями показателя преломления воздуха) [5, 6].

Вышеуказанные упрощения приводят к принципиальным ограничениям точности классического двухчастотного метода. Данной проблеме посвящено большое число работ (см., например, [5, 7 – 12]), в которых разработаны приближенные расчетные модели и выполнены количественные оценки перечисленных эффектов (эти эффекты далее для краткости мы будем называть эффектами высших порядков). Анализируя опубликованные работы необходимо отметить, что в статье [5] для оценки эффектов высших порядков разработана модель, основанная на использовании метода возмущений. В работах [7 – 9] теоретические обоснования методов расчета эффектов высших порядков выполнены в пренебрежении рефракционным пространственным разнесением траекторий и различием тропосферных

задержек, соответствующих этим траекториям. В статье [10] также не учтено влияние различия задержек в тропосфере, не показана применимость полученных результатов для анализа влияния магнитного поля Земли. Формулы, полученные в [10], распространены на случай учета магнитного поля в статье [11]. Вместе с тем, выполненные в цитированных работах оценки указывают на существенную роль эффектов высших порядков для высокоточных ГНСС измерений (вклад данных эффектов в псевдодальность для углов места порядка 10 градусов может составлять от 1 до 7 см в зависимости от условий измерений [5, 7 – 11]).

В работах [12, 13] предлагается использовать третью несущую частоту системы GALILEO для частичной коррекции ионосферных эффектов высших порядков, а в статье [9] сообщается о проекте, целью которого является повторная обработка накопленных за последние 10 лет в сети IGS данных GPS измерений. При повторной обработке используются новейшие научные достижения, в том числе, развитие в последние годы методы коррекции ионосферных эффектов высших порядков (при жестких требованиях к точности повторной обработки, когда погрешность определения координат пунктов должна быть не более 1 мм, учет таких эффектов является обязательным).

Таким образом, в имеющейся литературе показано, что учет ионосферных эффектов высших порядков при особо точных ГНСС измерениях является обязательным. Вместе с тем необходимы дальнейшие исследования в рамках данной проблемы, в частности, разработка более строгого с теоретической точки зрения подхода, свободного от упрощающих предположений опубликованных к настоящему времени работ.

В данной статье дано обоснование точных соотношений для определения поправок, учитывающих вклад всех обсуждавшихся выше ионосферных эффектов высших порядков при двухчастотных ГНСС измерениях. Формулы получены путем тождественных преобразований исходной системы уравнений, определяющих уравнение измерений двухчастотного метода с учетом влияния пространственного разнесения траекторий сигналов с различными несущими частотами (и связанного с этим эффектом отличия в тропосферных задержках сигналов с данными частотами), а также с учетом членов разложения коэффициента преломления ионосферы второго и третьего порядков [5, 7], что предполагает, в частности, учет влияния магнитного поля Земли.

Обоснование точных уравнений для поправок

В качестве исходной системы уравнений, необходимой для вывода уравнения измерения двухчастотного метода с поправками, учитывающими рефракционные ионосферные эффекты высших порядков, будем использовать следующие уравнения. Прежде всего, это соотношения для псевдодальностей P_i на

частотах f_i , которые мы представим в виде [1]

$$P_i = \rho_i + \Delta P_{\text{trop},i} + \Delta P_{\text{ion},i}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где ρ_i – геометрическая дальность для частоты f_i , определяемая соотношением $\rho_i = \int_{\sigma(f_i)} d\sigma$, причем интег-

рирование здесь и далее для каждой из частот осуществляется по своим траекториям – $\sigma(f_1)$ и $\sigma(f_2)$ соответственно (уравнение для определения траекторий, явный вид которых в настоящей статье не используется, приведено во многих публикациях, например, [14]). Нетрудно видеть, что величина $\Delta P_i = P_i - \rho_i$ представляет собой полную атмосферную задержку на частоте f_i и определяется суммарным вкладом задержек в тропосфере $\Delta P_{\text{trop},i}$ и в ионосфере $\Delta P_{\text{ion},i}$:

$$\Delta P_{\text{trop},i} = \int_{\sigma(f_i)} (n_{\text{trop}} - 1) d\sigma, \quad i = 1, 2; \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{ion},i} = \int_{\sigma(f_i)} (n_{\text{ion},i} - 1) d\sigma, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где n_{trop} , $n_{\text{ion},i}$ – соответственно показатель преломления воздуха (см., например, [1]) и коэффициент преломления ионосферы для частоты f_i в текущей точке траектории сигнала. Формула для $n_{\text{ion},i}$ (например, в обозначениях [5]) имеет вид:

$$n_{\text{ion},i} = 1 - \alpha_i N_e - \beta_i N_e H \cos \theta - \gamma_i N_e^2, \quad (4)$$

где N_e – концентрация электронов; H – напряженность геомагнитного поля; θ – угол между вектором напряженности поля H и направлением распространения сигнала; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – множители, пропорциональные f^{-2}, f^{-3}, f^{-4} соответственно.

Поскольку траектории $\sigma(f_1)$ и $\sigma(f_2)$ не совпадают, то тропосферные задержки на частотах f_1 и f_2 различаются, т.е. $\Delta P_{\text{trop},1} \neq \Delta P_{\text{trop},2}$.

Введем удлинение траекторий вследствие рефракции в неоднородной среде:

$$\delta \rho_i = \rho_i - L, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где L – истинное расстояние между источником сигнала и приемником по прямой линии, и обозначим:

$$\Delta P_{21} = P_2 - P_1; \quad \Delta \rho_{21} = \rho_2 - \rho_1. \quad (6)$$

Выбирая для определенности в качестве основной частоты частоту f_1 , представим уравнение (1) в виде, выражающем искомое расстояние L через измеренную псевдодальность P_1 , поправку за искривление траектории $\delta \rho_1$ и полную атмосферную задержку $\Delta P_{\text{trop},1} + \Delta P_{\text{ion},1}$:

$$L = P_1 - \delta \rho_1 + \Delta P_{\text{trop},1} + \Delta P_{\text{ion},1}. \quad (7)$$

Путем тождественных преобразований с использованием системы уравнений (1) – (6) получим для (7) следующее соотношение:

$$L = P_1 - (\alpha_1 / (\alpha_2 - \alpha_1)) \Delta P_{21} - \delta \Sigma, \quad (8)$$

где первые два слагаемых в правой части соответствуют уравнению измерения классического двухчастотного метода, реализующего так называемую безионосферную комбинацию; δ_{Σ} – суммарная поправка, учитывающая рефракционное удлинение $\delta\rho_1$ на основной частоте f_1 и все эффекты высших порядков, о которых говорилось выше.

Строгую формулу для поправки δ_{Σ} можно представить различным образом, например, так:

$$\delta_{\Sigma} = \delta\rho_1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \left[(\delta\rho_2 - \delta\rho_1) + \Delta P_2 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \Delta P_1 \right]. \quad (9)$$

В (9) первое слагаемое в правой части определяет поправку за удлинение траектории сигнала на основной частоте, второе слагаемое – поправку за эффекты высших порядков.

Обсуждение полученных результатов

В отличие от приближенных соотношений известных работ, полученное в данной статье соотношение (9) выражает поправки двухчастотного метода через задержки сигналов и удлинения их траекторий на каждой частоте с помощью строгих формул, корректно учитывающих и рефракционное удлинение, и все остальные эффекты высших порядков.

В связи с этим необходимо отметить два важных обстоятельства. Во-первых, именно уравнение измерения (8) вместе с формулой (9) должны использоваться в качестве исходных соотношений, если ставится цель повысить точность оценки неопределенности измерений двухчастотным методом. Так как именно эти соотношения дают возможность точно учесть вклад в неопределенность отдельных влияющих факторов. Оценки неопределенности могут быть выполнены с использованием методологии работ [5, 15, 16], однако данная задача выходит за рамки настоящей публикации и требует отдельного рассмотрения. Во-вторых, именно строгие формулы (8), (9), а не приближенные формулы известных работ [5, 7 – 13], целесообразно использовать в качестве исходных соотношений при повторной обработке GPS данных в сети IGS (соответствующий проект описан в [9]). Точность результатов постобработки должна в данном случае повыситься в связи с использованием более строгих расчетных формул (при использовании реальных натуральных данных о состоянии земной атмосферы в момент GPS измерений).

Заключение

Обоснованы строгие соотношения для определения поправок к результатам двухчастотных ГНСС измерений, учитывающие эффекты рефракционного удлинения и рефракционного пространственного разнесения траекторий сигналов с различными несущими частотами при их прохождении в ионосфере и тропосфере (и обусловленное данными эффектами отличие в тропосферной задержке этих сигналов), а также рефракционные эффекты высших порядков, обусловленные вкладом дополнительных

членов разложения коэффициента преломления ионосферы (членов второго и третьего порядков).

Найденные соотношения целесообразно использовать для повышения точности результатов оценки неопределенности измерений двухчастотным методом, а также точности повторной обработки результатов GPS измерений в сети IGS.

Список литературы

1. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Р., Коллинз Д. *Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика.* – К.: Наук. думка, 1995 – 380 с.
2. Ashby, N. (2003): *Relativity in the Global Positioning System.*// *Living Rev. Relativity*, v. 6, #1. – P. 45.
3. Lewandowski, W., and J. Azoulib (1998): *GPS+GLONASS: toward subnanosecond time transfer.*// *GPS World*, November. – P. 30-39.
4. Rothacher, M., and Mervart, L. (1998): *Bernese GPS Software Version 4.2.*// *Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.*
5. Gu, M, Brunner F. K. *An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations.*// *Manuscripta geodetica.* – 1991, Springer-Verlag. – P. 205- 214.
6. Горб А.И., Прокопов А.В., Ремаев Е.В., Ремаева О.А. *Совместное влияние тропосферы и ионосферы Земли на точность фазовых измерений, осуществляемых с помощью ГНСС* // *Український метеорологічний журнал.* – 2006. – Вип. 3. – С. 19-22.
7. Bassiri, S and Hajj A.G. *Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them.*// *Manuscripta geodetica.* – 1993. – V. 18. – P. 280-289.
8. Kedar S., Hajj G.A., Wilson B.D. and Heflin M.B. *The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions.*// *Geophys. Res. Letters*, Vol. 30, No. 16, 1823, doi:10.1029/2003GL017639. - 2003.
9. *Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates* / M. Fritsche, R. Dietrich, C. Knofel, A. Rulke, S. Vey, M. Rothacher and P. Steigenberger // *Geophys. Res. Letters*, Vol. 32, L 23311, doi:10.1029/2005GL024342. – 2005.
10. Занімонська А.Є., Прокопов О.В. *Оцінка рефракційних ефектів другого порядку в моделях іоносфери для GPS застосувань* // *Геодезія, картографія і аерофотознімання.* – Львів. – 2001. – Вип. 61. – С. 24-29.
11. *Влияние глобальных ионосферных процессов на погрешности спутниковых радионавигационных систем* / Е.М. Занимонский и др. // *Вісник ХНУ.* – 2002. – № 570: *Радіофізика та електроніка.* – Вип. 2. – С. 195-197.
12. Prokopov, A., Zanimonska, A. *The Second Order Refraction Effects for GPS Signals Propagation in Ionosphere.*// *SCAR Report No 23, April 2005.* – *Report of the Fifth SCAR Antarctic Geodesy Symposium, Lviv, Ukraine, 14-17 September, 2003.* – P. 25-28.
13. Wang Z., Wu Y., Zhang, K. *Triple-Frequency Method for High-Order Ionospheric Refractive Error Modeling in GPS Modernization.*// *Presented at the 2004 Int. Symp. on GNSS/GPS. Sydney, Australia, 6-8 December 2004.*
14. Prokopov A., Remayev Y. *New approach to the problem of determination of atmospheric refractivity corrections for space geodetic applications* // *Reports on geodesy.* – 2000. – No. 9 (55). – P. 43-48.
15. Yeh T.K., Wang C.S., Lee C.W. and Lion Y.A. *Construction and uncertainty evaluation of a calibration system for GPS receivers* // *Metrologia.* – #43 (2006). – P. 451-460.

16. Олейник А.Е., Прокопов А.В. Оценка неопределенности по типу В методов учета влияния ионосферы на результаты двухчастотных ГНСС измерений // Украинський метрологічний журнал. – 2007. – Вип. 2. – С. 15-18.

Поступила в редколлегию 11.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.