



УДК 621.371:551.510.535

А. А. Бекентаева

О КОМПЕНСАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ¹

Приводятся численные данные, позволяющие сопоставить итоговые погрешности измерений при использовании двухчастотного и трехчастотного методов компенсации ионосферной ошибки позиционирования по сигналам ГНСС GPS и ГЛОНАСС. Устанавливаются условия, при которых тот или иной метод коррекции оказывается предпочтительным.

Глобальные навигационные спутниковые системы, ионосфера, методы компенсации ионосферной погрешности

Толщина земного атмосферного слоя равна примерно утроенному радиусу Земли. Состав, строение и свойства атмосферы существенно меняются с высотой. В частности, в атмосфере можно выделить две большие области: нейтросферу, простирающуюся до высоты порядка 60 км, в которой степень ионизации газов (т. е. концентрация свободных электронов) незначительна, и ионосферу, располагающуюся выше, где газы частично или полностью ионизированы [1]. Одним из основных факторов, ограничивающих точность измерений, осуществляемых с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), является дополнительная задержка сигнала из-за рефракции в ионосфере. Значения названной рефракционной задержки существенно зависят от используемого системой частотного диапазона [2], а также от региона, в котором расположена аппаратура потребителя, времени суток и года, солнечной и геомагнитной активности. Типичный диапазон ионосферной погрешности измерения запаздывания сигнала составляет 5...500 нс, или в дальностном эквиваленте 1,5...150 м. Среднее значение этой погрешности для углов возвышения, близких к 90°, составляет 5...10 нс (1,5...3 м) в ночное время и 30...50 нс (9...15 м) – в дневное. При углах возвышения менее 15° эти значения возрастают в 2...3 раза [3], [4].

¹ Работа выполнена в рамках гранта ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (соглашение 14.В37.21.0432. ИДН/РС-122/ГР от 01.09.2012 г.).

В последние годы усилия большого числа исследователей разных стран направлены на повышение точности позиционирования с помощью ГНСС. Многочисленные публикации в российских и зарубежных изданиях показывают, что компенсация влияния ионосферы при этом является обязательной. Актуальность проблемы объясняется постоянно возрастающим спросом на навигационный сервис высокой точности. Среди соответствующих приложений можно упомянуть системы посадки летательных аппаратов, геодезическую съемку, управление строительной и сельскохозяйственной техникой, комплексы контроля деформаций мостов и иных конструкций и многое др. Целью работы, результаты которой частично представлены настоящей статьей, являлся сравнительный анализ эффективности использования двухчастотного и трехчастотного методов компенсации ионосферной погрешности.

Компенсация ионосферной погрешности. Методы компенсации ионосферной погрешности для одночастотных приемников, работающих только в диапазоне L_1 , и двухчастотных приемников, работающих в диапазонах L_1 и L_2 , различны. В первом случае возможно лишь использование той или иной модели ионосферы. Основная проблема при таком подходе заключается в том, что состояние ионосферы очень изменчиво и зависит от многих факторов. В итоге точность алгоритмов компенсации ионосферной погрешности на основе модельного прогноза сравнительно невысока. В частности, восьмипараметрическая модель (предложенная Дж. А. Клобушаром применительно к системе GPS) позволяет снизить ионосферную компоненту погрешности лишь примерно наполовину. При этом в ГНСС GPS данные 8 параметров передаются в навигационном сообщении, что позволяет относительно просто реализовать процедуру компенсации в приемнике. В дальнейшем были разработаны более сложные модели ионосферы. Однако и их использование не позволяет уменьшить ионосферную погрешность больше, чем на 75 %.

В навигационном кадре ГНСС ГЛОНАСС информация о состоянии ионосферы вообще не передается, поэтому для компенсации ионосферной погрешности в одночастотном приемнике приходится использовать дополнительную внешнюю информацию о параметрах ионосферы [5]. В двухчастотном приемнике для учета влияния ионосферы используется метод, базирующийся на зависимости ионосферной погрешности от частоты. Известно, что дополнительная задержка в ионосфере $\Delta t_{\text{ион}}$ сигнала навигационного спутника с частотой f по сравнению с задержкой сигнала при прямолинейном распространении оценивается как [3]

$$\Delta t_{\text{ион}} = \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f^3} + \frac{C}{f^4} + \dots \approx \frac{A}{f^2}, \quad (1)$$

где A , B , C — коэффициенты, характеризующие свойства среды распространения радиоволн. Вторым и третьим слагаемыми в (1) при двухчастотной коррекции обычно пренебрегают, учитывая лишь слагаемое первого порядка Ion1 ($\sim 1/f^2$). Значения остаточной ошибки второго порядка Ion2 ($\sim 1/f^3$), приводимые в литературе, заметно отличаются друг от друга: 1,1 см в [6], 5...15 см в [7], десятки сантиметров в [4]. Следует отметить, что при двухчастотной коррекции снижение ионосферной погрешности достигается в об-

мен на заметный рост погрешности шумовой [3], [4], [8]. Доступность третьей частоты в модернизированных ГНСС GPS и ГЛОНАСС обеспечивает возможность полного устранения обеих компонент ионосферной погрешности Ion1 и Ion2 [6] – [8], однако шумовая ошибка измерений при этом возрастает еще больше [8], [9]. В связи с этим важно выяснить, при каких условиях целесообразно использовать каждый из упомянутых методов компенсации рефракционной ошибки.

Основные соотношения. Измерив псевдодальности R_1 и R_2 на двух частотах f_1 и f_2 можно составить так называемую безыоносферную комбинацию первого порядка (first order ionosphere-free combination) [10]:

$$R_{\text{or1}} = \frac{f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (2)$$

где R_{or1} — псевдодальность с компенсированной составляющей Ion1. Тогда с учетом формулы (2) среднеквадратическое отклонение (СКО) полной остаточной погрешности для двухчастотного метода $\sigma_{(2)}$ может быть найдено так:

$$\sigma_{(2)} = \sqrt{\sigma_i^2 \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma - 1}^2 + (\text{Ion2})^2}, \quad (3)$$

где $\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$; σ_i – СКО шумовой ошибки измерения псевдодальности на одной частоте.

Поделив правую и левую часть (3) на σ_i получим:

$$\frac{\sigma_{(2)}}{\sigma_i} = \sqrt{\frac{\gamma^2 + 1}{\gamma - 1}^2 + \left(\frac{\text{Ion2}}{\sigma_i}\right)^2}. \quad (4)$$

Располагая измерениями на трех частотах, можно получить безыоносферную комбинацию второго порядка (second order ionosphere-free combination) [10]:

$$R_{\text{or2}} = C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_3 R_3, \quad (5)$$

где R_{or2} – псевдодальность с компенсированными Ion1 и Ion2; R_i – псевдодальность, измеренная на частоте f_i ($i = 1, 2, 3$); C_1, C_2, C_3 — коэффициенты:

$$C_1 = \frac{f_1^3(f_3 - f_2)}{C_4}; \quad C_2 = \frac{f_2^3(f_1 - f_3)}{C_4}; \quad C_3 = \frac{f_3^3(f_2 - f_1)}{C_4}. \quad (6)$$

В (6) $C_4 = f_1^3(f_3 - f_2) + f_2^3(f_1 - f_3) + f_3^3(f_2 - f_1)$. Тогда с учетом формулы (5) отношение СКО итоговой погрешности для трехчастотного метода $\sigma_{(3)}$ к σ_i найдется как

$$\frac{\sigma_{(3)}}{\sigma_i} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2}. \quad (7)$$

При выводе формул (4), (7) было принято, что шумовые погрешности оценки псевдодальностей на всех частотах одинаковы, а значением ионосферной погрешности

третьего порядка $\text{Ion}3$ ($\sim 1/f^4$) можно пренебречь. Частоты, использованные для анализа:

GPS $f_1 = 1575,42\text{МГц}$, $f_2 = 1227,6\text{МГц}$, $f_3 = 1176,45\text{МГц}$;

ГЛОНАСС $f_1 = 1602\text{МГц}$, $f_2 = 1246\text{МГц}$, $f_3 = 1202,025\text{МГц}$.

Численный анализ осуществлялся на основе пакета MATLAB.

Результаты моделирования. На рис. 1 представлена вычисленная по формуле (4) зависимость $\sigma_{(2)}/\sigma_i$ от $\text{Ion}2/\sigma_i$ и $\sigma_{(3)}/\sigma_i$, которая согласно (7) постоянна при любых значениях $\text{Ion}2/\sigma_i$, для ГНСС GPS. Аналогичные зависимости для ГНСС ГЛОНАСС показаны на рис. 2.

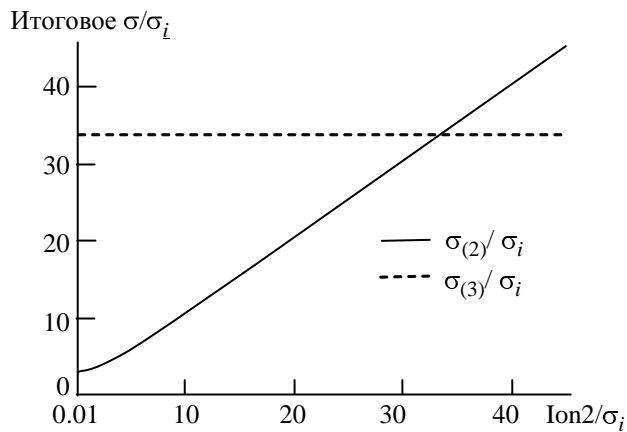


Рис. 1

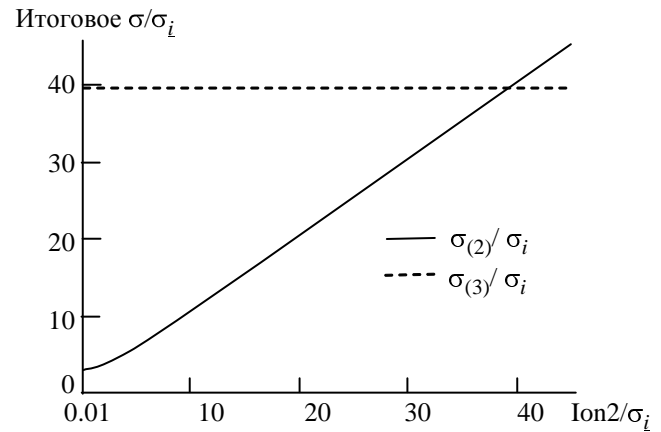


Рис. 2

Обсуждение результатов. По итогам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

- Для системы GPS при двухчастотном методе шумовая погрешность увеличивается в 2,98 раз (для комбинации $f_1 - f_2$) / 2,59 раз (для комбинации $f_1 - f_3$), при трехчастотном методе – в 33,69 раз, что хорошо согласуется с данными работы [8].

- В случае ГНСС ГЛОНАСС при двухчастотном методе шумовая погрешность увеличивается в 2,96 раз (для комбинации $f_1 - f_2$) / 2,63 раз (для комбинации $f_1 - f_3$), при трехчастотном методе – в 39,7 раз.

- Если отношение ионосферной ошибки второго порядка к СКО шумовой погрешности для одной частоты $\text{Ion}2/\sigma_i < 33,56$ (GPS) / 39,59 (ГЛОНАСС), двухчастотный метод превосходит по эффективности трехчастотный. Во всех остальных случаях ($\text{Ion}2/\sigma_i \geq 33,56$ (GPS) / 39,59 (ГЛОНАСС)) предпочтительней использовать трехчастотный метод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудинская Г. П. Распространение коротких и ультракоротких радиоволн. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 11.
2. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Картгеоцентр, 2004. – С. 152.
3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – С. 98–99, 101.
4. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – С. 104–105.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – С. 294–296.

6. Bassiri S., Hajj G. Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them // Manuscripta Geodaetica. – 1993. – Vol. 18. – P. 280–289.
7. Wang Z. Triple-Frequency Method for High-Order Ionospheric Refractive Error Modelling in GPS Modernization // J. of Global Positioning Systems. – 2005. – Vol. 4, № 1–2. P. 291–295.
8. Hoque M. M., Jakowski N. Ionospheric Propagation Effects on GNSS Signals and New Correction Approaches (Chapter 16), Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications / ed. S. G. Jin. In Tech-Publisher, 2012. – P. 386–388.
9. Bassiri S. Three-Frequency Ranging Systems and Their Applications to Ionospheric Delay Calibration // Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42-103, Jet Propulsion Lab., Pasadena, California, 1990. P. 14–20.
10. Guochang Xu GPS. Theory, algorithms and applications. Second Edition – Springer, 2007. – P. 97–98.

A. A. Bekentaeva

ON IONOSPHERIC ERROR CORRECTION IN THE GLOBAL SATELLITE NAVIGATION

Results are presented allowing to compare total errors of measurements when using dual frequency and three-frequency methods of compensation of an ionospheric error. Recommendations about application of each of methods for GNSS GPS and GLONASS are made.

Global navigation satellite system (GNSS), ionosphere, compensation methods of an ionospheric error