

УДК 550.2, 523.31-853

**ВОЗМОЖНОСТЬ УЧЕТА ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ ВТОРОГО ПОРЯДКА
В ДВУХЧАСТОТНЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ**

Е.В. Конецкая, М.В. Тинин

**THE SECOND ORDER RESIDUAL ERROR OF THE DUAL-FREQUENCY GLOBAL NAVIGATION
SATELLITE SYSTEM**

E.V. Konetskaya, M.V. Tinin

Рассматривается ионосферная поправка второго порядка в одночастотных и двухчастотных глобальных навигационных спутниковых системах. Сравниваются значения ионосферной поправки и остаточной ошибки второго порядка, вычисленные с использованием модели диполя магнитного поля и модели IGRF. Исследуется возможность учета ионосферной поправки второго порядка в двухчастотных измерениях.

The second order ionospheric correction is considered in the single-frequency and dual-frequency global navigation satellite systems. The second order ionospheric correction and residual error values calculated using the models of a dipole magnetic field and the IGRF are compared. The possibility of taking into account the second order ionospheric correction in dual-frequency measurements is investigated.

Введение

Известно, что наиболее существенный вклад в ошибки измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при определении координат приемника вносит ионосферная ошибка. С введением в эксплуатацию двухчастотных навигационных спутниковых систем появилась возможность устранения до 99 % этой ошибки. В настоящее время возникла потребность в более прецизионных измерениях. Результаты определения координат приемника, достигаемые двухчастотным методом, являются недостаточно точными. Поэтому неизбежно возникла потребность в исследовании ошибок более высокого порядка. Так, в работе [Bassiri, Hajj, 1993] было показано, что в зависимости от условий приема сигнала поправки второго порядка могут достигать нескольких десятков миллиметров. Исследования остаточной ошибки второго порядка в работе [Bassiri, Hajj, 1993] проводились с использованием модели магнитного диполя, а в [Hawarey et al., 2005; Hoqu, Jakowski, 2008] – Международной геомагнитной эталонной модели (International Geomagnetic Reference Model – IGRF). В [Hawarey et al., 2005] расчеты проводились как для GPS-частот, так и для частот, используемых в радиоинтерферометрических измерениях со сверхдлинной базой, где рабочие частоты существенно выше, чем в GPS. Сравнение результатов расчета с использованием вышеупомянутых моделей магнитного поля Земли проведено в [Hawarey et al., 2005; Hernandez-Pajares et al., 2007], где утверждается, что для лучшего учета влияния магнитного поля на точность измерений необходимо в качестве модели магнитного поля выбирать модель IGRF. Погрешность вычисления ионосферной поправки второго порядка в вышеназванных работах [Bassiri, Hajj, 1993; Hawarey et al., 2005; Hernandez-Pajares et al., 2007; Hoqu, Jakowski, 2008] составляет для различных моделей ионосферы 0–2 мм. При сравнении моделей магнитного поля в [Hawarey et al., 2005] утверждалось, что на 10 % улучшается точность учета ошибки второго порядка при использовании модели IGRF. Согласно [Alber et al., 1997], современные фазовые приемники позволяют выполнять измерения с точностью до 1 мм. Поэтому

при величине поправки в 10 мм уточнение величины равно 1 мм, что составляет погрешность фазовых измерений. В данной работе будет произведено исследование границ применимости приближенной формулы вычисления поправки и возможности использования более простой модели магнитного поля Земли в двухчастотных измерениях.

Ионосферные ошибки второго порядка

Для определения положения приемника в ГНСС одновременно ведутся и фазовые, и кодовые измерения. Однако в связи с тем, что кодированный сигнал сильно зашумлен и высокоточные измерения порядка нескольких миллиметров невозможно производить, в дальнейшем будет рассматриваться только фазовая дальность. Во всех расчетах используется система координат $\{x, y, z\}$, в которой ось z проходит через точки излучения $r_0 = \{0, 0, z_0\}$ и приема $r_i = \{0, 0, z_i\}$. Выражение для фазового пути имеет вид

$$\Phi_i = D - 40.3I_1/f_i^2 - 40.3I_2/f_i^3 = \Phi_i = D - d_1^{(1)} - d_2^{(1)} = D + d_1^{*(1)} + d_2^{*(1)}. \quad (1)$$

Здесь D – истинная (искомая дальность), $f_g = eB_0/(2\pi m) = C_g B_0$, $d_1^{(1)} = 40.3I_1/f_i^2$ – поправка первого порядка к истинной дальности, $d_2^{(1)} = 40.3I_2/f_i^3$ – поправка второго порядка к истинной дальности, $d_1^{*(1)}$ и $d_2^{*(1)}$ – ошибки первого и второго порядка соответственно, $I_1 = \int_{z_0}^{z_i} N(z) dz = TEC$, а

$I_2 = \int_{z_0}^{z_i} N(z) f_g \cos \theta dz$. Учитывая вышеперечисленные обозначения, выражение для поправки $d_2^{(1)}$ будет иметь вид

$$d_2^{(1)} = 40.3 f_i^{-3} \int_{z_0}^{z_i} N(z) f_g \cos \theta dz. \quad (2)$$

При вычислении слагаемого $d_2^{(1)}$ в работах [Bas-

siri, Hajj, 1993; Hawarey et al., 2005; Hernandez-Rajares et al., 2007; Ноци, Jakowski, 2008] использовался ряд приближений. При анализе поведения подынтегрального выражения авторы работ предполагали, что скорость и порядок изменения электронной плотности концентрации $N(z)$ больше, чем скорость и порядок изменения магнитного поля B_0 . $N(z)$ изменяется в пределах от 0 до 10^{12} , а B_0 – в пределах $10^{-6} \div 10^{-5}$. Они выносили медленно меняющийся множитель в выражении (2) за знак интегрирования, вычисленный в какой-либо точке (в качестве точки z_{\max} предлагалась точка пересечения луча, соединяющего спутник с приемником, максимума плотности электронной концентрации) (рис. 1):

$$d_{2a}^{(1)} = 40.3I_1 f^{-3} (f_g \cos \theta) \Big|_{z=z_{\max}} = 40.3I_1 C_g f^{-3} (\vec{B}_0 \vec{k}) \Big|_{z=z_{\max}} \quad (3)$$

При проверке допустимости использования этого выражения в одночастотном приеме в данной работе использовались две модели магнитного поля – магнитный диполь и модель IGRF. В обоих случаях вычислялась разность точного и приближенного значения поправки $d_2^{(1)}$ (рис. 2):

$$\Delta = d_2^{(1)} - d_{2a}^{(1)} \quad (4)$$

Учет ионосферных поправок второго порядка в двухчастотном приеме

В двухчастотных измерениях в выражении для фазовой дальности (1) удерживаются слагаемые до поправки первого порядка включительно:

$$\Phi_1 = D - 40.3I_1 / f_1^2, \\ \Phi_2 = D - 40.3I_2 / f_2^2.$$

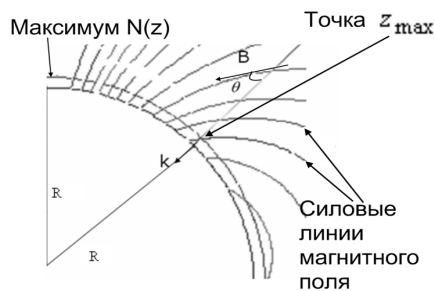


Рис. 1. Геометрия задачи (упрощенный случай – спутник и приемник находятся на одной долготе). Сигнал распространяется в направлении \mathbf{k} от спутника к приемнику. θ – угол между векторами \mathbf{k} и магнитного поля \mathbf{B} .

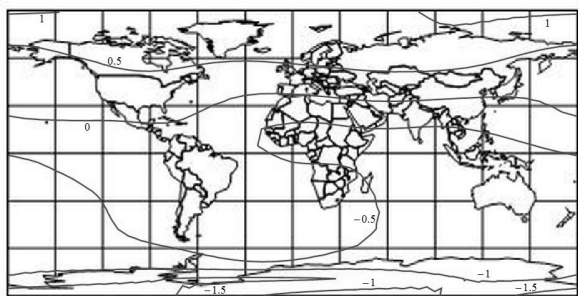


Рис. 2. Ошибка вычисления поправки (2) с помощью аппроксимации (3). Угол возвышения спутника составляет 10° , азимут – 170° .

После этого посредством так называемой безыоносферной комбинации определяется истинная дальность $D = (\Phi_1 f_1^2 - \Phi_2 f_2^2) / (f_1^2 - f_2^2)$. Для учета погрешности второго порядка, используя приближенное выражение (3) для поправки второго порядка и выражение (1) для фазовой дальности, получим:

$$\Phi_i = D - 40.3I_1 / f_i^2 - 40.3C_g (\vec{B}\vec{k}) I_1 / f_i^3 = \\ = D - 40.3I_1 (1 + C_H / f_i) / f_i^2 \approx \\ \approx D - 40.3I_1 / (f_i - C_H / 2)^2 = \\ = D - 40.3I_1 / f_{ef,i}^2. \quad (5)$$

Здесь $f_{ef,i} = f_i - C_H / 2$ – эффективная частота ($C_H = C_g (\vec{B}\vec{k})$) (см. также [Bassiri, Hajj, 1993]). По аналогии с двухчастотной линейной комбинацией, заменив реальные частоты эффективными, можно записать выражение для истинной дальности D :

$$D_{\text{соп-2}} = (\Phi_1 f_{ef,1}^2 - \Phi_2 f_{ef,2}^2) / (f_{ef,1}^2 - f_{ef,2}^2) = \\ = D + 40.3(I_2 - 2\Delta f I_1) / (f_1 f_2 (f_1 + f_2)), \quad (6)$$

где $\Delta f = C_g (\vec{B}\vec{k}) / 2$ – малая поправка к частоте.

Величина остаточной ошибки второго порядка при использовании выражения (3)

$$RRE_2 = 40.3(I_2 - 2\Delta f I_1) / (f_1 f_2 (f_1 + f_2)) = \\ = 40.3 f_i^2 / (f_j (f_1 + f_2)) \Delta. \quad (7)$$

Таким образом, введение эффективной частоты позволяет учесть ионосферный эффект второго порядка с ошибкой (7). В свою очередь, учет ионосферных эффектов второго порядка в двухчастотных измерениях позволит устранить в трехчастотном приеме эффекты третьего порядка [Kim, Tinin, 2010].

Результаты моделирования

Для всех вычислений использовалась модель чепменовского слоя. Ширина его составляла 70 км, высота – 320 км, критическая частота – 15 МГц.

В одночастотном приеме сравнение $d_2^{(1)}$ и $d_{2a}^{(1)}$ с использованием модели диполя магнитного поля показало, что наименьшие значения абсолютной погрешности вычисления поправки второго порядка Δ , равные нулю, можно обнаружить на экваторе, а также при определенных значениях азимутального угла спутника на различных широтах. Наименьшие ошибки при использовании аппроксимации $d_{2a}^{(1)}$ возникают при зондировании Северного полушария спутниками, у которых широта ниже, чем у приемника. Максимальное по модулю значение разности Δ составляет 2 мм.

Остаточная ошибка (6) после предложенной коррекции (5) составляет в различных случаях 1–30 % от своей первоначальной величины для модели IGRF и 15–30 % – для модели IGRF. На рис. 3 представлен типичный ход поправки второго порядка для двух моделей магнитного поля – диполя и IGRF. Как видно из рис. 3, в большинстве случаев модуль разности $d_{2IGRF}^{(1)} - d_{2диполь}^{(1)}$ составляет 1–2 мм, однако существует множество областей со значениями, большими 4–6 мм.

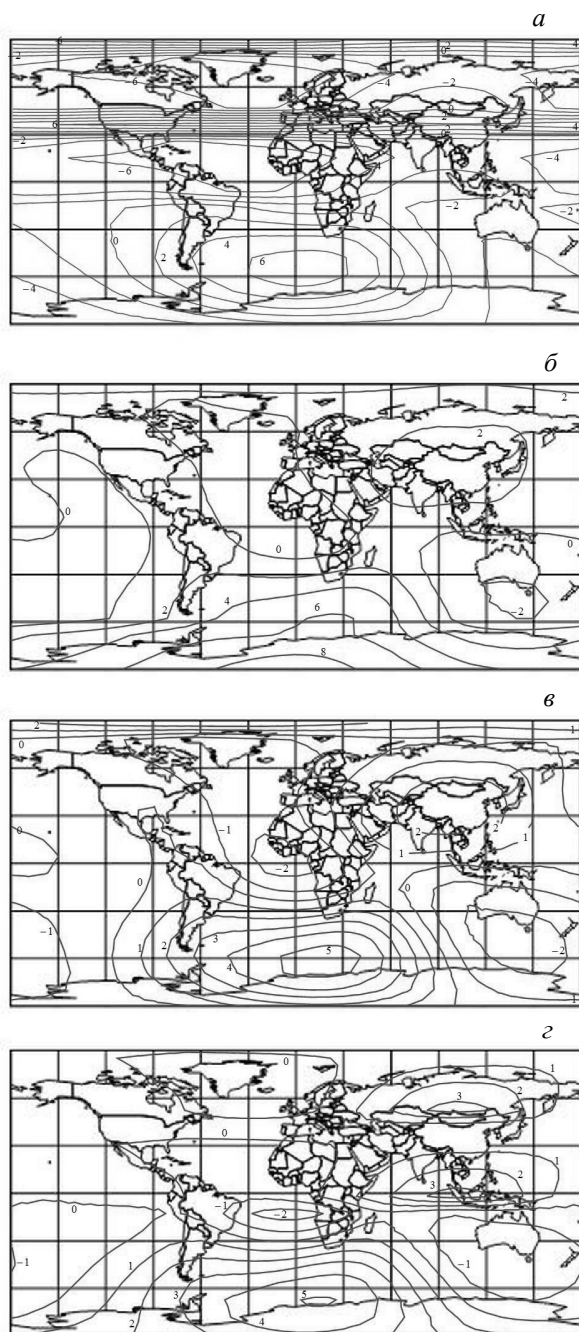


Рис. 3. Поправка (2) при использовании модели диполя магнитного поля (сплошная линия) и модели IGRF (пунктирная линия). Параметры спутника: угол возвышения 20° , азимут -10° (а), угол возвышения 40° , азимут -80° (б), угол возвышения 50° , азимут -60° (в), угол возвышения 70° , азимут -110° (г).

Вычисления, произведенные в данной работе, показали, что замена модели IGRF на модель диполя магнитного поля в большинстве случаев влияет на результат вычисления ионосферной поправки второго порядка, однако погрешность вычисления поправки при подобной замене по модулю составляет не более 1 мм и при больших углах возвышения не превышает ошибки, связанной с погрешностью измерений, вносимых фазовыми приемниками.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alber C., Ware R., Rocken C., Solheim F. GPS surveying with 1mm precision using corrections for atmospheric slant path delay // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 1859–1862.

Bassiri S., Hajj G. A. Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them // *Manuscripta Geodaetica*. 1993. V. 18. P. 280–289.

Hawarey M., Hobiger Th., Schuh H. Effects of the 2nd order ionospheric terms on VLBI measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. doi:10.1029/2003GL017639.

Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Orus R. Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates // *Ibid.* 2007. V. 112. P. B08417. doi:10.1029/2003GL017639.

Hoqu M.M., Jakowski N. Mitigation of higher order ionospheric effects on GNSS users in Europe // *GPS Solution*. 2008. P. 87–97.

Kim B., Tinin M.V. C.Potentialities of multifrequency ionospheric correction in Global Navigation Satellite System // *Journal Geodesy*. 2010. doi 10.1007/s00190-010-0425-z.

Иркутский государственный университет, Иркутск