

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПРИЕМНИКА В ДВУХЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ГНСС

М.В. Тинин, Е.В. Конецкая

ACCURACY INCREASE WHEN DETERMINING THE RECEIVER COORDINATES IN DOUBLE-FREQUENCY GNSS MEASUREMENTS

M.V. Tinin, E.V. Konetskaya,

Проведен анализ возможностей повышения точности при определении координат приемника радиосигнала глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Описывается методика учета ионосферной ошибки второго порядка в двухчастотных измерениях ГНСС для повышения точности местоопределения. Проверяются границы применимости предлагаемой методики с использованием компьютерного моделирования и анализа экспериментальных данных. Исследуется влияние неоднородностей, вытянутых вдоль линии магнитного поля, на качество принимаемого сигнала.

We analyzed possibilities for accuracy increase when determining coordinates of the receiver of radio signal of Global Navigational Satellite Systems (GNSS). The method of accounting for second-order ionospheric error in GNSS double-frequency measurements is described. The limits of applicability of the proposed method are verified using both a computer simulation and analysis of experimental data. The effect of magnetic field-aligned irregularities on the received signal quality is examined.

Влияние магнитного поля Земли на ионосферную ошибку

Потребность в миллиметровой точности при определении координат приемника в таких областях, как удаленный мониторинг атмосферы и исследование деформаций земной коры, вынуждает учитывать ионосферные ошибки высших порядков.

С учетом анизотропии ионосферной плазмы ионосферная составляющая фазового пути сигнала ГНСС имеет вид [Гинзбург, 1967; Budden, 1985]:

$$\phi_i = D - 40.3I_1/f_i^2 - 40.3I_2/f_i^3, \quad (1)$$

где $D = z_i - z_0$ – дальность спутника от наблюдателя;

$I_1 = \int_{z_0}^{z_i} N(z') dz'$ – полное электронное содержание;

$$I_2 = \int_{z_0}^{z_i} N(z) f_g \cos\theta dz. \quad (2)$$

Здесь $f_g = eB_0/(2\pi m) = C_g B_0$ – гирочастота ($C_g = e/(2\pi m)$), θ – угол между \mathbf{B}_0 и направлением распространения. Второе слагаемое в (1) – ионосферная ошибка первого порядка, третье слагаемое – ионосферная ошибка второго порядка, связанная с анизотропией ионосферной плазмы. В двухчастотных фазовых измерениях предполагается, что в (1) можно пренебречь эффектами второго порядка. При этом, полагая решенной задачу фазовой неопределенности, посредством так называемой безыоносферной комбинации определяется дальность между спутником и приемником:

$$D = D^{(2)}(f_1, f_2) = (\phi_1 f_1^2 - \phi_2 f_2^2) / (f_1^2 - f_2^2). \quad (2)$$

Для учета эффектов второго порядка воспользуемся предложенной в работе [Bassiri and Hajj, 1993] связью интеграла I_2 с полным электронным содержанием I_1 , учитывающей медленное изменение геомагнитного поля в пределах ионосферного слоя:

$$I_2 \approx I_1 f_g \cos\theta \Big|_{z=z_m}, \quad (3)$$

где в качестве z_m обычно берется высота главного максимума ионосферного слоя.

Результаты моделирования [Hoque, Jakowski, 2008; Тинин, Конецкая, 2013] показывают хорошую точность приближения (4).

Приближение (4) позволяет получить следующее выражение, аналогичное (3), но учитывающее анизотропию ионосферной плазмы:

$$D_{\text{кор}_2} = (\phi_1 f_{\text{ef}1}^2 - \phi_2 f_{\text{ef}2}^2) / (f_{\text{ef}1}^2 - f_{\text{ef}2}^2), \quad (4)$$

где $f_{\text{ef}i} = f_i - f_g \cos\theta|_{z=z_m}/2$ – эффективная частота.

Наличие неоднородностей в ионосфере приводит к сильным флуктуациям амплитуды и фазы, к срыву сопровождения сигнала навигационных спутников [Beach, 2004] и, как следствие, к сбою в определении координат. Поскольку одной из особенностей ионосферных неоднородностей как естественного, так и искусственного происхождения является их вытянутость вдоль силовых линий магнитного поля, то и вероятность сбоя зависит от ориентации направления распространения сигнала ГНСС относительно силовой линии земного магнитного поля [Afraimovich et al, 2011]. В следующем разделе мы приведем некоторые результаты исследований флуктуаций фазы навигационных сигналов при наличии магнитоориентированных ионосферных неоднородностей.

Моделирование

При моделировании в качестве модели ионосферы был взят слой Чепмена

$$N(h) = f_{\text{кр}}^2 \exp\{0.5[1 - \zeta - \exp(-\zeta)]\} / 80.6,$$

где $\zeta = (h - h_0)/H$. Использовались следующие параметры слоя: критическая частота $f_{\text{кр}} = 15$ МГц; высота максимума слоя $h_0 = 320$ км; характерный масштаб слоя $H = 70$ км. При этом вертикальное полное электронное содержание (ПЭС) составляет 80 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). При вычислении значений магнитного поля Земли использовалась International Geomagnetic Reference Field (IGRF) [Mandea et al., 2000]. Для определения эффективности предложенной методики учета ионосферной ошибки второго порядка будем рассчитывать корректированную остаточную ошибку, которую определим как разность

между скорректированной дальностью (5) и истинным расстоянием между спутником и приемником

$$\Delta_{\text{согг}} = D_{\text{согг}}^{(2)} - D. \quad (6)$$

Анализ распределения остаточной ошибки (6) по поверхности земного шара показал, что при малых углах возвышения (угол отсечки 10°) остаточная ошибка достаточно велика, достигает максимальных значений, но не превышает 1 мм (рис. 1).

Для территорий, расположенных в Южном полушарии и имеющих долготы от 1 до 80° Е остаточная ошибка превышает $0.4\text{--}0.6$ мм, на остальных территориях она не превышает 0.3 мм.

Также стоит отметить смещение величин остаточной ошибки в южном направлении (рис. 1), оно присутствует для всех значений азимута, но наиболее ярко проявляется при азимутах менее 45° .

Увеличение угла возвышения позволяет уменьшить величину остаточной ошибки до 0.2 мм. При этом асимметрия, наблюдавшаяся при низких углах возвышения устраняется и практически не наблюдается (рис. 2).

Стоит отметить также и азимутальную зависимость для фиксированного положения приемника при различных углах возвышения.

При анализе экспериментальных данных использовались данные станции Minprom. Отбор данных производился в дни, когда K_p -индекс имел значения $1\text{--}2$. Анализировались ряды фазовых измерений длительностью 1 час с 30-секундным интервалом. Остаточная ошибка после коррекции составила 0.5 мм. Уточнение координат в горизонтальной плоскости при использовании предложенной методики составило $1\text{--}2$ мм, а в вертикальной плоскости $2\text{--}3$ мм.

Моделирование дисперсии фазы σ_ϕ^2 , нормированной на ее максимальное значение $\tilde{\sigma}_\phi^2$, показало,

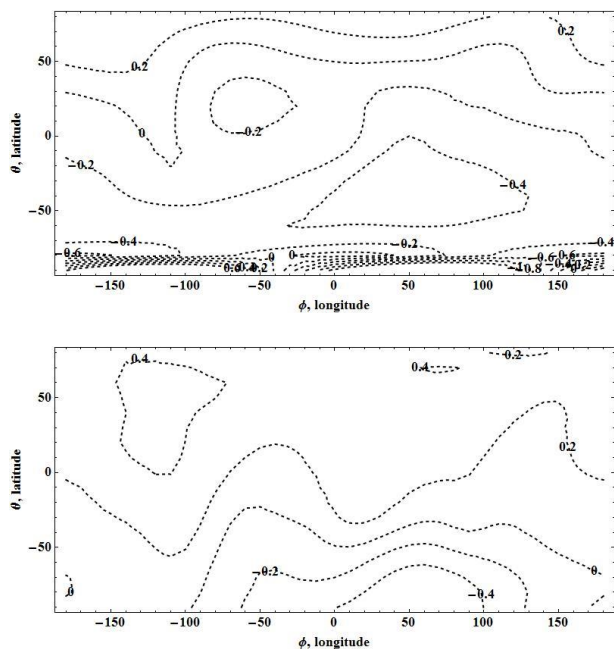


Рис. 1. Распределение (в миллиметрах) остаточной ошибки (9) по земному шару для угла возвышения 10° , азимута 10° (а) и 135° (б).

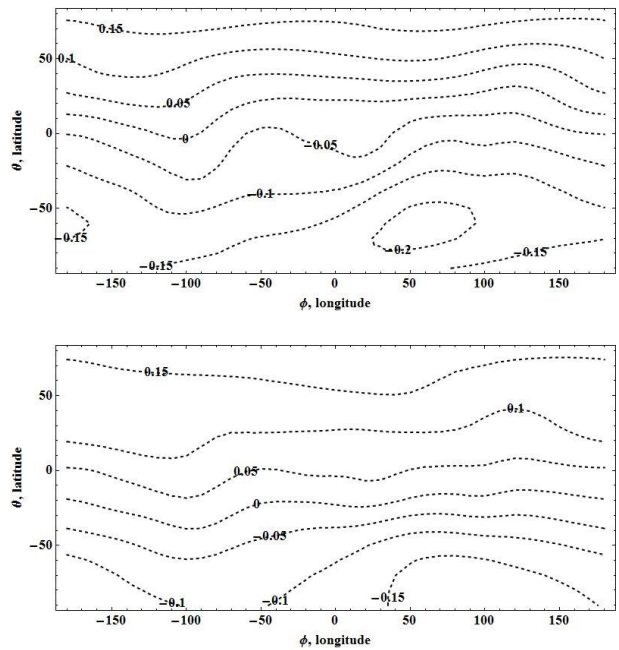


Рис. 2. Распределение (в миллиметрах) остаточной ошибки (9) по земному шару для угла возвышения 60° и азимута 10° (а), а также 70° и азимута 135° (б).

что наиболее сильные флуктуации фазы возникают на средних и высоких широтах (рис. 3).

Влияние магнитоориентированных неоднородностей на дисперсию фазы проявляется наиболее сильно в Северном полушарии при «просвечивании» ионосферы с северной стороны, когда азимут спутника равен 0° , а углы возвышения более 45° . Для Южного полушария наблюдается совершенно противоположная картина: наибольшие значения дисперсии фазы достигаются при азимутах, равных 180° . При приближении к экватору, в зависимости от азимута спутника, эффект полностью исчезает либо незначителен. Увеличение вытянутости неоднородностей приводит к уширению «пика» дисперсии фазы.

Заключение

В работе была показана состоятельность предложенной методики учета ионосферной ошибки второго порядка.

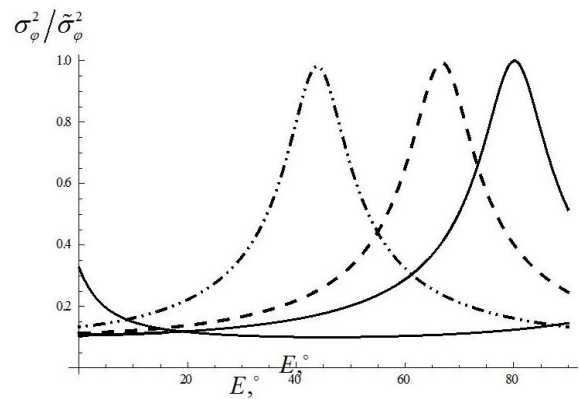


Рис. 3. Зависимость $\sigma_\phi^2 / \tilde{\sigma}_\phi^2$ от угла возвышения спутника (используется модель IGRF) для различных координат приемника. Азимут приемника 180° . Соотношение $l_x / l_x = 0.1$.

При моделировании были уточнены зависимости остаточной ошибки от параметров спутников и положения приемника. При анализе экспериментальных данных проверена предложенная методика. Показано небольшое повышение точности при определении координат приемника. Выполнено также моделирование влияния ионосферной анизотропии на дисперсию фазы ГНСС-сигнала.

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.) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-00249).

Bassiri S., Hajj G.A. Higher order ionospheric effects on global positioning system observables and means of modeling them // *Manuscr. Geodaet.* 1993. N 18. P. 280–289.

Beach T. Ionospheric scintillation monitoring and mitigation using a software GPS receiver // *Radio Sci.* 2004. V. 39. RS1S21. doi: 10.1029/2002RS002812.

Budden K.G. *The propagation of radio waves* // Cambridge: Cambridge University Press. 1985. 562 p.

Hoque M.M., Jakowski N. Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning // *Radio Sci.* 2008. V. 43, N 5. doi: 10.1029/2007RS003817.

Mandea M., Macmillan S. *International Geomagnetic Reference Field – The eighth generation* // *Earth Planets Space.* 2000. V. 52. N. 12. P. 1119–1124.

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме.* М.: Наука, 1967. 685 с.

Тинин М.В., Конечкая Е.В. Влияние геомагнитного поля на вклад ионосферы в ошибку спутниковых навигационных систем // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2013. Т. 53, № 6. С. 1–9.

Afraimovich E.L., Ishin A.B., Tinin M.V., et al. Evidence of anisotropy of GPS phase slips caused by the mid-latitude field-aligned ionospheric irregularities // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47. P. 1674–1680.