

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПСЕВДОДАЛЬНОСТИ В ГНСС

В.С. Самолига, В.И. Сажин, А.С. Тимофеев

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
wernayk@ya.ru

## MODELING VARIATIONS OF THE PSEUDORANGE IN THE GNSS

V.S. Samoliga, V.I. Sazhin, A.S. Timofeev

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** Проведено моделирование вариаций псевдодальности, измеряемой в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), в зависимости от изменений основных параметров формы высотного профиля электронной концентрации  $N(z)$  ионосферы. Используется составная модель ионосферы, включающая гауссову форму профиля  $N(z)$  на участках высот от 0 до высоты некоторой точки, лежащей выше максимума  $N$ . В данной точке гауссова форма профиля  $N(z)$  сопрягается с экспоненциальной зависимостью  $N(z)$ , идущей вплоть до высоты окончания ионосферы. У этой зависимости имеется параметр, определяющий скорость убывания  $N$  с ростом высоты, вычисляемый исходя из опорного задаваемого значения  $Z_{0,1}$ . При моделировании задаются изменения  $N_{\max}$ ,  $Z_{\max}$  и формы профиля выше максимума через изменение  $Z_{0,1}$ . Оценивается степень влияния одинаковых относительных изменений этих параметров на вариации псевдодальности. Получено, что вариации критической частоты в точке пересечения траектории сигнала с линией максимума электронной концентрации играет определяющую роль в изменениях псевдодальности по сравнению с другими параметрами модели.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, псевдодальность, модель ионосферы, численное моделирование.

**Abstract.** The simulation of variations of the pseudo range measured in global navigation satellite systems (GNSS), depending on changes to basic parameters and shapes of high-rise profile of the electron density  $N(z)$  of the ionosphere. Uses a composite model of the ionosphere, including the Gaussian form of the profile  $N(z)$  plots of heights from 0 to the height of some point lying above the high of the  $N$ . At this point the Gaussian shape of the profile  $N(z)$  is mated with the exponential dependence of  $N(z)$ , going up to the height of the end of the ionosphere. This based on a parameter that determines the rate of decrease of  $N$  with height that is calculated based on the reference value specified  $Z_{0,1}$ . In the simulation set changes  $N_{\max}$ ,  $Z_{\max}$  and shapes of profile above the maximum changes  $Z_{0,1}$ . Estimated degree of influence of the same relative changes of these parameters on the variation of the pseudo range. It is received that variations of a critical frequency in a point of suppression of a trajectory of a signal from the line of a maximum of ionization plays a part in changes of pseudo-range in comparison with other parameters of model.

**Keywords:** global navigation satellite system, pseudorange, ionosphere model, numerical simulation.

### Введение

Моделирование вариаций псевдодальности ГНСС играет важную роль при оценке дополнительного ионосферного запаздывания сигналов от навигационных спутников (НС), ответственного за ионосферную погрешность позиционирования, выполняемого одночастотными приемниками [Афраймович, 2006; Шебшаевич, 1993]. В данной работе проводилось численное моделирование распространения радиоволн в ГНСС, с целью оценить степень влияния изменения основных ионосферных параметров на вариации псевдодальности. Для проведения моделирования выбрана составная модель однослойной ионосферы с развитым верхним участком высотного профиля электронной концентрации. Применение составной модели позволяет исследовать влияние изменения формы профиля на верхнем участке при неизменной форме в области максимума. Таким образом, в отличие от работы [Сажин, 2014], была реализована возможность оценить степень влияния на псевдодальность при изменении формы профиля на верхнем участке.

### Моделирование распространения радиоволн

Разработана программа траекторных расчетов для наземного ионосферного распространения. Зависимость концентрации электронов от высоты, используемая при расчетах в программе, выглядит следующим образом:

$$N(Z) = \begin{cases} N_{\max} \exp\left\{-\left(\frac{Z-Z_m}{W_m}\right)^2\right\}, & Z \leq Z_0 \\ 0.1N_{\max} \exp\left\{-\frac{Z-Z_{0,1}}{S}\right\}, & Z > Z_0 \end{cases},$$

где  $Z_m$  — высота максимума концентрации электронов ( $N_{\max}$ );  $W_m$  — эффективная ширина, такая, что на высоте  $Z_m - W_m$  концентрация падает в  $e$  раз;  $Z_{0,1}$  — высота, на которой концентрация падает в 10 раз;  $Z_0$  — точка, в которой обе функции равны и имеют одинаковые значения производной;  $S$  — параметр, определяющий скорость убывания концентрации с ростом высоты, вычисляемый исходя из значений  $Z_0$  и  $Z_{0,1}$ . Изменение формы профиля, описываемого

данной моделью, определяется тремя параметрами:  $N_{max}$ ,  $Z_m$  ответственные за величину концентрации в максимуме и его высоту, параметр  $Z_{0,1}$  позволяет задавать форму профиля на участке высоты значительно выше максимума. Его значение связывается с типичными высотами, так называемого колена, на верхнем участке профиля, на высотах которого происходит смена доминирующего влияния ионов атомарного кислорода на влияние ионов атомарного водорода [Поляков, 1986].

Большая высота расположения НС и сравнительно малые величины дополнительного ионосферного увеличения псевдодальности по сравнению с геометрической дальностью привели к необходимости более точного расчета точки прихода траектории на высоту расположения спутника. Точность расчета положения этой точки зависит от величины шага интегрирования. Поэтому был проведен выбор шага интегрирования, при котором дальнейшее уменьшение шага приводит к изменению величины ионосферной поправки менее чем на 0.1 м. Величина такого шага составила 25 м. Надо отметить, что оперативность расчетов при таком шаге достаточно высокая.

Проведено моделирование вариации разности между значениями псевдодальности и геометрической дальности, определяющей ионосферную поправку ( $Dif$ ). На рис. 1, для углов места навигационных спутников, показано полученное изменение величины ионосферной поправки при изменениях критической частоты. При моделировании использовались значения  $Z_m=300$  км,  $Z_{0,1}=800$  км, а значения критической частоты последовательно составляли величины 6.8 и 10 МГц.

Из рис. 1 видно, что с увеличением критической частоты от 6 до 10 МГц величина ионосферной поправки возрастает примерно в три раза. Наиболее значительные значения ионосферной поправки соответствуют углу места спутника  $25^\circ$ , превосходящие примерно в два раза величины ионосферной поправки для углов места НС выше  $50^\circ$ .

На рис. 2 показаны полученные результаты при фиксированном значении  $f_0=10$  МГц и  $Z_{0,1}=800$  км, для изменения высоты максимума от 200 до 400 км. Обращает на себя внимание увеличение поправки с уменьшением высоты, а также меньший наклон зависимостей, чем для изменения критической частоты.

На рис. 3 показаны результаты для изменения ионосферной поправки в зависимости от вариации высоты  $Z_{0,1}$  с 800–1000 км. Они получены при  $f_0=8$  МГц и  $Z_m=300$  км.

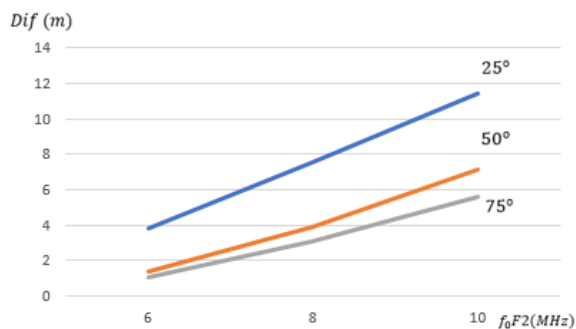


Рис. 1. Изменения ионосферной поправки в зависимости от величины критической частоты

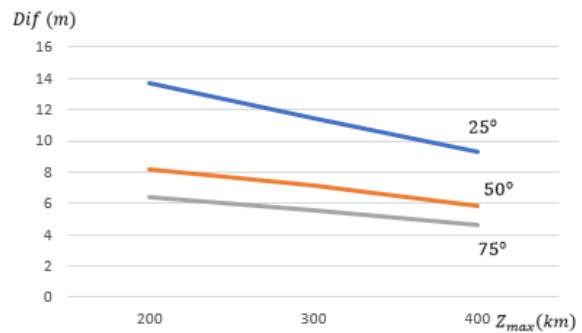


Рис. 2. Изменения ионосферной поправки в зависимости от высоты максимума ионизации

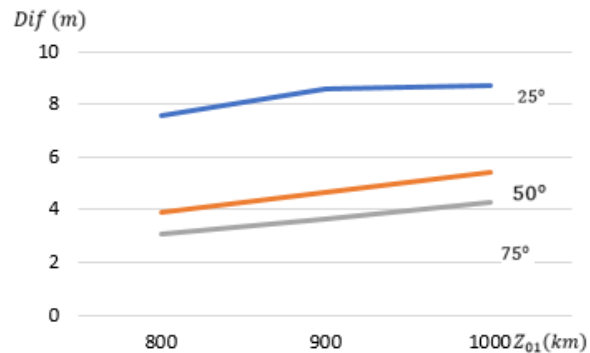


Рис. 3. Изменения ионосферной поправки в зависимости от верхней части

Можно видеть, что вариации ионосферной поправки слабо зависят от изменения величины  $Z_{0,1}$  и по абсолютной величине значительно меньше, чем на выше приведенных рисунках.

Для оценки степени относительного влияния изменения отдельных параметров модели было проведено моделирование по сравнению степени влияния на вариации относительных изменений ионосферной поправки от изменений тех или иных параметров. На рис. 4, а показаны результаты сравнения относительных изменений критической частоты и высоты максимума при  $Z_{0,1}$  равной 800 км, а на рис. 4, б результаты сравнения относительных изменений критической частоты и параметра  $Z_{0,1}$  при  $Z_m$  равной 300 км.

Можно видеть, что вариации  $f_0$  оказывают наиболее существенное влияние на изменение ионосферной поправки в несколько раз превосходящее влияние вариаций  $Z_m$  и  $Z_{0,1}$ .

### Заключение

Полученный результат определяющего влияния на величину ионосферной поправки, по сравнению с другими ионосферными параметрами, предполагается использовать для приближенного решения задачи определения критических частот в точках пересечения траекторий линии максимума ионосферы по измерениям псевдодальности на одночастотных приемниках. Безусловно, при этом должен быть осуществлен переход от используемой простой модели ионосферы к более сложной, лучше соответствующей реальной, учитывающей, в частности, продольные горизонтальные градиенты и

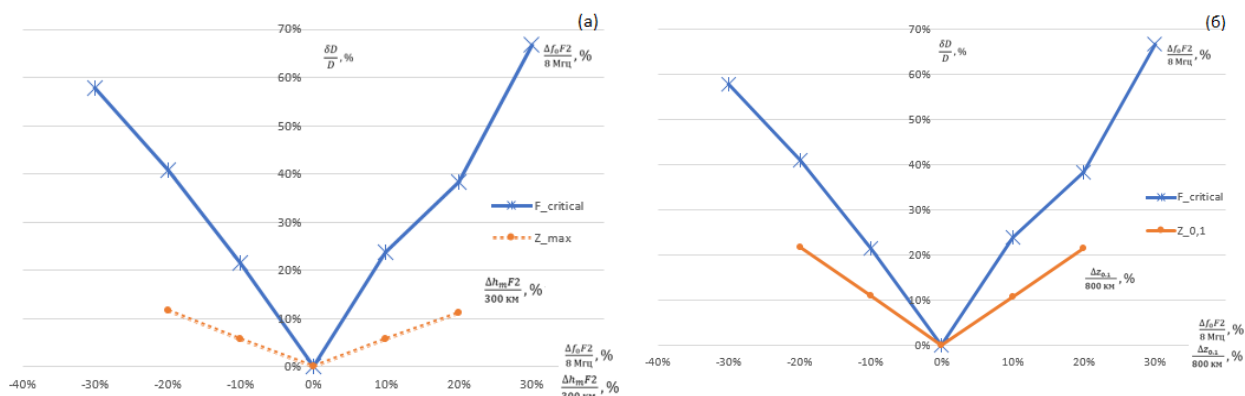


Рис. 4. Вариации относительных изменений ионосферных поправок

возможное наличие существенной электронной концентрации в верхней части ионосферы. Методика такого восстановления значений критических частот, использующая известный метод фитинга (подбора), и пример ее использования приведены в работе [Голыгин, 2007].

### Список литературы

- Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Голыгин В.А. Адаптация к текущим условиям параметров ионосферного радиоканала по наблюдениям за сигналами реперных радиостанций // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. № 47. С. 71–75.
- Поляков В.М. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. М.: МЦД-Б, 1986. 136 с.
- Сажин В.И. Оценка пространственных вариаций ионосферного запаздывания сигнала по данным одночастотных приемников спутниковых радионавигационных систем // Изв. ИГУ. 2014. Т. 30. С. 91–100.
- Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.