

УДК 629.78

Агафонова С.Е.

### МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ДЛЯ ДАЛЬНОМЕРНОЙ И РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СХЕМ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При распространении радионавигационных сигналов от навигационных спутников (НС) к определяющемуся объекту влияние трассы проявляется в ослаблении сигнала, изменении скорости его распространения и отклонении траектории распространения от прямолинейной [1].

Основным параметром атмосферы для радиоволн используемых диапазонов является коэффициент преломления. Коэффициент преломления радиоволн в ионосфере зависит от электронной концентрации и частоты радиосигнала.

Ионосфера по сравнению с тропосферой является весьма изменчивой средой и профиль её электронной концентрации трудно поддается аппроксимации какой-либо универсальной функцией. Эти обстоятельства не позволяют для ионосферных поправок в отличие от тропосферы получить сравнительно простые расчётные формулы. Поэтому расчёт возможен лишь для какого-либо конкретного вида аппроксимации, и его, как правило, приходится производить методами численного интегрирования.

Ионосфера начинается с высоты 100 км, на высотах от 300 до 400 км электронная концентрация в ионосфере максимальна и выше с увеличением высоты уменьшается почти экспоненциально, на высоте 900 км электронная концентрация составляет примерно 10 % от максимальной.

Электронная концентрация верхней ионосферы удовлетворительно описывается экспонентой [2]

$$N(h) = N_m e^{-\beta_i(h-h_m)} \quad (1)$$

где  $N(h)$  – электронная концентрация ионосферы на высоте  $h$  [эл/см<sup>3</sup>];  $\beta_i$  – параметр, имеющий значения  $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$  (днём) и  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$  (ночью);  $h$  – высота над поверхностью Земли [км];  $h_m$  – высота, на которой достигается максимум электронной концентрации.

Нижняя ионосфера удовлетворительно описывается параболой [2]:

$$N(h) = N_m \left( 1 - \left( \frac{h-h_m}{u} \right)^2 \right) \quad (2)$$

где  $u$  – толщина нижней ионосферы (равна расстоянию от высоты максимума ионосферы  $h_m$  до высоты, где влиянием электронной концентрации можно пренебречь).

В расчётах принимались следующие значения параметров модели аппроксимации:  $\beta_1 = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$  (днём) и  $\beta_1 = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$  (ночью),  $h_m = 320 \text{ км}$ ,  $N_m = (0,15 \dots 3,5) \cdot 10^6 \text{ эл/см}^3$ ;  $u = 220 \text{ км}$ . Результаты расчётов по формулам аппроксимации (1) и (2) хорошо согласуются с результатами мониторинга ионосферы с помощью ГЛОНАСС и GPS [3, 4, 5].

Согласно зависимостям (1), (2) на высоте порядка 1400 км электронную концентрацию можно считать равной нулю. Для дальнейшего рассмотрения обозначим эту высоту  $h_i$  и будем называть её высотой ионосферы.

Групповая скорость радиосигнала в ионосфере равна  $v_{gp} = cn(h)$ , где  $c$  – скорость света в вакууме,  $n(h)$  – коэффициент преломления ионосферы на высоте  $h$  ( $n(h) < 1$ ). Коэффициент преломления в ионосфере зависит от частоты радиосигнала, и для несущей частоты  $f > 10^5$  кГц можно воспользоваться равенством

$$\Delta n(h) = 1 - n(h) = \frac{40,3N(h)}{f^2}, \quad (3)$$

где  $f$  – несущая частота [кГц].

При помощи уравнения Снелля, описывающего траекторию луча радиоволн в сферически слоистой среде, получена формула, которую можно использовать для оценки ионосферной погрешности при прохождении радиолуча от НС к потребителю на высоте  $h_n$  [2]:

$$\Delta r_s = \int_{h_n}^{h_i} \frac{\Delta n(h)(R_e + h)dh}{\sqrt{(R_e + h)^2 - (R_e + h)^2 \sin^2 \vartheta_m}} \quad (4)$$

Формулу (4) можно использовать, когда зенитный угол НС не превышает  $90^\circ$  и при  $h_n \leq h_i$ .

При  $\vartheta_m > 90^\circ$  и  $h_n > h_i$  можно получить аналогичные формулы, рассматривая  $\Delta r_s$  как функцию  $\Delta r_s(h_n, h_i, \vartheta_{nc})$ .

Для  $h_n < h_i$  и  $\vartheta_{nc} > 90^\circ$  получаем (рис. 1)

$$\Delta r_s = 2\Delta r_s(h_n, h_n, \pi/2) + \Delta r_s(h_n, h_i, \pi - \vartheta_{nc});$$

$$\Delta r_{is} = 2 \int_{h_s}^{h_i} \frac{\Delta n(h)(R_s + h) dh}{\sqrt{(R_s + h)^2 - (R_s + h_s)^2 \sin^2 \vartheta_{nc}}} + \int_{h_s}^{h_i} \frac{\Delta n(h)(R_s + h) dh}{\sqrt{(R_s + h)^2 - (R_s + h_s)^2 \sin^2 \vartheta_{nc}}}, \quad (5)$$

где  $h_s = (R_s + h_n) \sin \vartheta_{nc} - R_s$ ,

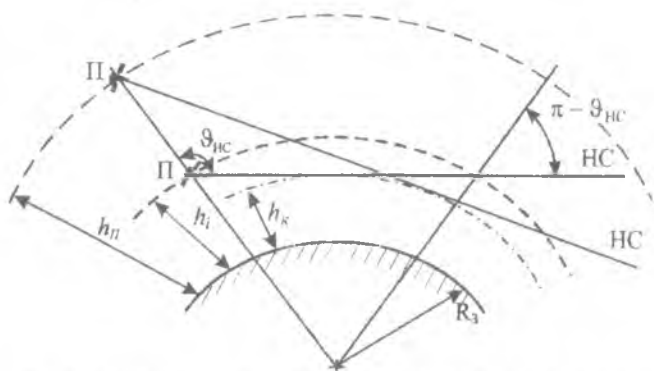


Рис. 1. К расчёту ионосферной погрешности при  $\vartheta_{nc} > 90^\circ$  и  $h_n > h_i$

Для  $h_n > h_i$  и  $\vartheta_{nc} > 90^\circ$  ионосферная погрешность вычисляется по формуле

$$\Delta r_{is} = 2 \Delta r_{is}(h_s, h_i, \pi/2);$$

$$\Delta r_{is} = 2 \int_{h_s}^{h_i} \frac{\Delta n(h)(R_s + h) dh}{\sqrt{(R_s + h)^2 - (R_s + h_s)^2 \sin^2 \vartheta_{nc}}}, \quad (6)$$

причём  $h_s < h_i$ .

Таким образом, получаем модель ионосферной погрешности в следующем виде

$$\Delta r = \begin{cases} \text{при } h_n < h_i \\ \vartheta_{nc} \leq 90^\circ: & \Delta r_i = \Delta r_{is}, \\ \vartheta_{nc} > 90^\circ: & \Delta r_i = \Delta r_{is}; \\ \text{при } h_n > h_i \\ \vartheta_{nc} \leq 90^\circ: & \Delta r_i = 0, \\ \vartheta_{nc} > 90^\circ \text{ и } h_n > h_i: & \Delta r_i = 0, \\ \vartheta_{nc} > 90^\circ \text{ и } h_n < h_i: & \Delta r_i = \Delta r_{is}. \end{cases} \quad (7)$$

здесь  $\Delta n(h) = \frac{40,3N(h)}{f^2}$ ,

$$N(h) = \begin{cases} h > h_m: & N_m e^{-B(h-h_m)}, \\ h \leq h_m: & N_m \left( 1 - \left( \frac{h-h_m}{u} \right)^2 \right) \end{cases}$$

Расчёты электронной концентрации с учётом суточных, географических, сезонных и цикловых вариаций позволяют рассчитывать поправки на ионосферные задержки, способные снизить ионосферную погрешность на 50-75%. Остаточную погрешность можно оценить следующим образом:

$$\delta \bar{r}_i = (0,25 \dots 0,50) \cdot \Delta r_i, \quad (8)$$

где  $\delta \bar{r}_i$  – остаточная погрешность измерения дальности на одной несущей частоте.

В случае разностно-дальномерной схемы измерений (рис. 2) ионосферную задержку  $\Delta \bar{r}_i$  и остаточную погрешность после её компенсации  $\delta \bar{r}_i$  можно вычислить следующим образом:

$$\Delta \bar{r}_i = \left| \sqrt{(D_1 + \Delta r_{i1})^2 + (D_2 + \Delta r_{i2})^2 - 2(D_1 + \Delta r_{i1})(D_2 + \Delta r_{i2}) \cos|\vartheta_{nc1} - \vartheta_{nc2}|} - \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 D_2 \cos|\vartheta_{nc1} - \vartheta_{nc2}|} \right|; \quad (9)$$

$$\delta \bar{r}_i = \left| \sqrt{(D_1 + \delta r_{i1})^2 + (D_2 + \delta r_{i2})^2 - 2(D_1 + \delta r_{i1})(D_2 + \delta r_{i2}) \cos|\vartheta_{nc1} - \vartheta_{nc2}|} - \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - 2D_1 D_2 \cos|\vartheta_{nc1} - \vartheta_{nc2}|} \right|. \quad (10)$$

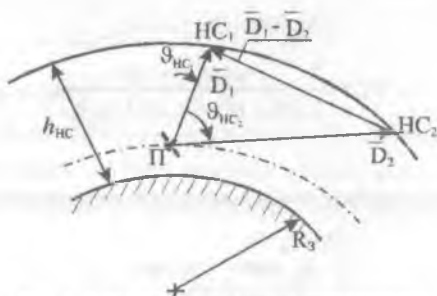


Рис. 2. К расчёту ионосферной погрешности при разностно-дальномерных измерениях

Здесь  $D_1 = \sin \left( \vartheta_{nc1} - \arcsin \left( \frac{R_3 + h_n}{R_3 + h_{nc}} \sin \vartheta_{nc1} \right) \right) \frac{R_3 + h_{nc}}{\sin \vartheta_{nc1}}$ ;

$$D_2 = \sin \left( \vartheta_{nc2} - \arcsin \left( \frac{R_3 + h_n}{R_3 + h_{nc}} \sin \vartheta_{nc2} \right) \right) \frac{R_3 + h_{nc}}{\sin \vartheta_{nc2}};$$

$\Delta r_{i1}$ ,  $\Delta r_{i2}$  – ионосферные погрешности измерения дальностей до 1-го и 2-го НС;  $\delta r_{i1}$ ,  $\delta r_{i2}$  – остаточные погрешности измерения дальностей до 1-го и 2-го НС;  $h_{nc}$  – высота орбиты НС;  $\vartheta_{nc1}$ ,  $\vartheta_{nc2}$  – зенитные углы 1-го и 2-го НС.

Согласно используемой модели ионосферы для небольших высот потребителя наблюдается плавное увеличение ионосферных погрешностей при возрастании зенитного угла. На больших высотах потребителя ионосферные погрешности почти во всей области радиовидимости равны нулю, ионосферная погрешность достигает максимума вблизи границы зоны радиовидимости, а затем быстро уменьшается до границы зоны радиовидимости.

Для разностно-дальномерной схемы измерений расчёты ионосферных погрешностей при изменении зенитных углов используемых НС в диапазоне зоны радиовидимости для различных  $h_p$  и  $N_m$  показали, что для небольших высот потребителя (порядка 500 км) характерна зависимость погрешности измерений от величины разности зенитных углов НС. Наибольшая погрешность возникает, когда оба НС располагаются с потребителем в одной плоскости и имеют зенитные углы противоположного знака. Чем меньше разность зенитных углов НС, тем меньше ионосферная ошибка. На больших высотах потребителя наблюдается ещё один максимум ошибки, когда один НС находится вблизи зенита, а другой на границе области радиовидимости.

Результаты расчётов по полученным моделям ионосферных погрешностей измерений дальности для дальномерной и разностно-дальномерной схем измерений согласуются с имеющимися данными в публикациях [3].

#### Библиографический список

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы [Текст]/под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. Колосов, М.А. Распространение радиоволн при космической связи [Текст]/ М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. – М.: Изд-во «Связь», 1969. – 155 с.
3. Continuous Monitoring of the Atmosphere Using GPS. F.Darin, J.Johansson, R.Carlsson, G.Elgered, P.Jarlemark, B.Ronnang.//Proceedings of The Institute of Navigation GPS-97.
4. Андриянов, В.А. Результаты экспериментального мониторинга ионосферы Земли с использованием спутниковых навигационных систем [Текст]/ В.А. Андриянов, Л.С. Юношев, Е.Л. Мосия, В.К. Русаков, В.М. Смирнов // Измерительная техника. – 1997. – №10 – С. 10-12.
5. Influence of the Ionospheric Refraction on the Repeatability of Distances Computed by GPS. R.Warnant, Royal Observatory of Belgium//Proceedings of The Institute of Navigation GPS-97.