

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НА ПАРАМЕТРЫ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

к.т.н. А.И. Горб, О.А. Ксенофонтов

В статье проведен анализ влияния регулярной составляющей показателя преломления тропосферы на точность измерения радионавигационных параметров. На основе предложенной методики рассчитаны численные значения тропосферных погрешностей в измерениях дальности, разности дальностей и радиальной скорости.

В настоящее время одними из приоритетных направлений развития космических программ является разработка и создание высокоточных радиосистем спутниковой навигации. При этом радиосигнал проходит через атмосферу Земли и подвергается ее воздействию. Достижения в области создания высокостабильных генераторов, разработка новых моделей движения летательных аппаратов на околоземных орбитах и модели геопотенциала Земли привели к тому, что влияние атмосферы на распространение радиосигнала стало одним из основных факторов, определяющих точностные характеристики радиосистемы в целом.

Для оценки условий распространения радиосигналов в нижних слоях атмосферы использовались известные соотношения, полученные методом геометрической оптики и слоисто-сферическая структура тропосферы. Линеаризованное относительно профиля показателя преломления выражение для регулярного тропосферного эффекта в измерениях дальности  $\Delta R$  получено для случая, когда интегрирование ведется по прямолинейной траектории, соединяющей излучатель и приемник [1]:

$$\Delta R(\beta_0) = R_3 \int_{z_a}^{z_c} \frac{N(z)zdz}{\sqrt{z^2 - z^2 \cos^2 \beta_0}}, \quad (1)$$

где  $\beta_0$  - истинный угол места;

$$z = 1 + h/R, z_a = 1 + H_a / R_3, z_c = 1 + H_c / R_3;$$

$H_c, H_a$ - соответственно высоты спутника и расположения приемника;

$N = (n - 1) 10^6$  - приведенный показатель преломления;

$N_a$  - показатель преломления в месте расположения приемника;

$R_3$  - радиус Земли. Неучет искривленности траектории радиосигнала в (1) ведет к методическим погрешностям, которые необходимо учитывать при анализе атмосферных погрешностей.

Тропосферный эффект в разности дальностей есть

$$DQ = DR(\mathbf{b}_{t+t}) - DR(\mathbf{b}_t).$$

Введем в рассмотрение средний угол места  $b_t$ , тогда  $\mathbf{b}_t = b_t - \mathbf{D} b_t$  и  $\mathbf{b}_{t+t} = \mathbf{b}_t + \mathbf{D} b_t$ , что позволяет получить приближенное соотношение

$$\Delta Q(\beta_\tau) = R_3 \sin 2\beta_\tau \Delta \beta_\tau \int_{z_a}^{z_c} \frac{N(z)zdz}{(z^2 - z_a^2 \cos^2 \beta_\tau)^{3/2}}. \quad (2)$$

Воспользовавшись выражением (1), найдем тропосферный эффект в измерениях радиальной скорости

$$\Delta R = \frac{d}{dt} \Delta R(\bar{\rho}, t) = \frac{\partial \Delta R(\bar{\rho}, t)}{\partial \alpha} \dot{\alpha} + \frac{\partial \Delta R(\bar{\rho}, t)}{\partial \beta} \dot{\beta} + \frac{\partial \Delta R(\bar{\rho}, t)}{\partial R} \dot{R}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r} = \{\mathbf{a}, \mathbf{b}, R\}$  - вектор положения спутника в полярной системе координат;

$\mathbf{a}, \mathbf{b}$  - соответственно скорости изменения азимутального угла и угла места.

При таком подходе в выражении (2) следует учитывать зависимость показателя преломления от времени и пространственных координат. Параметры  $z_c(H)$  и  $b_c$  представляют собой временные функции. При сферическо-слоистой структуре тропосферы  $DR(\mathbf{r}, t)/\mathbf{a} = \mathbf{0}$ , так как при этом не учитываются тропосферные эффекты в измерениях дальности, обусловленные горизонтальными градиентами. Для спутниковых радионавигационных систем  $H_c \gg H_{тр}$ , а значит,  $DR(\mathbf{r}, t)/R = \mathbf{0}$ . Тогда тро-

посферный эффект в измерениях радиальной скорости (доплеровского сдвига частоты) есть

$$\Delta \dot{R} = \frac{\partial}{\partial \beta} \Delta R(\beta, t) \dot{\beta} .$$

Окончательно имеем

$$\Delta \dot{R}(\beta) = \frac{z_a^2 \sin 2\beta}{2} R_3 \dot{\beta} \int_{z_a}^{z_c} \frac{N(z) z dz}{(z^2 - z_a^2 \cos^2 \beta)^{3/2}} . \quad (4)$$

На основе проведенного анализа можно формализовать модель влияния тропосферы на параметры радиосигнала

$$U(\beta) = \int_{z_a}^{z_c} N(z) K_{\chi}(z, \beta) dz , \quad (5)$$

где  $z_b = 1 + H_{\text{тр}}/R_3$  ядра интегральных уравнений  $K_c$  определены в соответствии с выражениями (1) - (4);

индекс  $c$  характеризует соответствие вида данных и степени знаменателя (при  $c = 1/2$  - тропосферный эффект в измерениях дальности, при  $c = 3/2$  - эффекты при измерении радиальной скорости или разности дальностей);

верхний предел интегрирования  $z_b$  соответствует граничной высоте тропосферы. Таким образом, предложенная модель представляет собой линеаризованное относительно высотного профиля приведенного показателя преломления  $N(z)$  интегральное уравнение Фредгольма первого рода с неточно известной левой частью (входными данными) и ядрами  $K_c(z, b)$ .

В таблице 1 приведены численные значения тропосферных погрешностей в измерениях радиотехнических параметров для стандартной атмосферы ( $N = 329 N_0$  ед.,  $a = -0.126 \text{ км}^{-1}$ ;  $DR_T, DQ_T$  - геометрические дальность и разность дальностей;  $DR_{\Pi}, DQ_{\Pi}$  - дальность и разность дальностей с учетом тропосферных погрешностей). Для экспоненциальной модели тропосферы в диапазоне углов места  $b = 1 - 89^\circ$  эффекты имеют

следующие значения: 59 ц 2.6 м (**DR**);  $1.4 : 0.5 \cdot 10^{-2}$  м (**DQ**);  $1 \cdot 10^{-1}$  ц  $1.2 \cdot 10^{-4}$  м/с (радиальная скорость).

Таблица 1

b, град.	DR <sub>T</sub> , км (DR <sub>T</sub> - DR <sub>П</sub> )/ DR <sub>T</sub> , %	DQ <sub>T</sub> , км (DQ <sub>T</sub> - DQ <sub>П</sub> )/ DQ <sub>T</sub> , %
1.2	-0.0589420 -3.4426897	0.02598 -0.63034
9.8	-0.0162650 -0.3010786	0.01093 -0.07286
19.8	-0.0076243 -0.0613311	0.00876 -0.01746
41.9	-0.0038909 -0.0100443	0.00163 -0.00417
62.3	-0.0029959 -0.0026423	0.00078 -0.00220
83.9	-0.0026177 -0.0000914	0.00009 -0.00009

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что среда распространения оказывает существенное влияние на точность радионавигационных систем и при разработке высокоточных систем следует принимать специальные меры для компенсации атмосферных погрешностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев В.И., Горб А.И., Ксенофонтов О.А. Исследование характеристик тропосферы по радиоданным // Труды II Всесоюзной научно-технической конференции "Методы представления и обработки случайных сигналов и полей", Туапсе, 1991. - С.41-43.
2. Ponomarev V.I., Gorb A.I., Ksenofontov O.A. Tropospheric remote sensing by radiodata //Proc. 22 European Conf. on radiodata - Helsinki, Finland, 1992. - p.145-148.
3. Пономарев В.И., Горб А.И., Ксенофонтов О.А. Анализ влияния атмосферы на разрешающую способность РСА //Труды конференции "Современная радиолокация" - Киев, 1994. - С.25-28.