

Диагностика водяного пара в атмосфере с помощью дифференциальных подсистем глобальных навигационных спутниковых систем

В.В. Чукин

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ)
195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98
E-mail: chukin@rshu.ru

В работе рассматриваются вопросы использования сети наземных навигационных приемных станций для дистанционного зондирования атмосферы с целью определения содержания водяного пара в воздухе. В основе метода лежит принцип измерения задержек радиосигналов при распространении в тропосфере с последующим решением обратной задачи. Использование информации с сети базовых станций позволяет определять задержки радиосигналов с более высокой точностью, за счет использования групповой обработки результатов фазовых измерений дальности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы, водяной пар, ГЛОНАСС, GPS.

Введение

В настоящее время существуют или находятся в стадии проектирования пять глобальных навигационных спутниковых систем: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз), QZSS (Япония), COMPAS (Китай).

Для целей увеличения точности позиционирования пользователей используется дифференциальный метод, который основан на использовании сети базовых станций, осуществляющих прием навигационных сигналов, вычисление ошибок измерений и распространение пользователям корректирующей информации по каналам связи.

В данной работе рассматриваются вопросы использования сети базовых станций для дистанционного зондирования атмосферы методом радиопросвечивания сигналами навигационных спутников с целью определения содержания водяного пара в воздухе. Метод радиопросвечивания атмосферы предполагает определение параметров состояния атмосферы по результатам измерения пространственных задержек радиосигналов, распространяющихся через слой атмосферы в результате уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффектов поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара.

Использование информации с сети базовых станций позволяет определять задержки радиосигналов с более высокой точностью, за счет использования групповой обработки результатов фазовых измерений дальности.

Показатель преломления радиоволн в тропосфере

Показатель преломления радиоволн в нейтральной атмосфере может быть представлен в виде:

$$n = 1 + \frac{k_1 \cdot (P - e)}{T} + \frac{k_2 \cdot e}{T} + \frac{k_3 \cdot e}{T^2}, \quad (1)$$

где $k_1 = 7.76 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_2 = 7.20 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_3 = 3.75 \cdot 10^{-3}$ К²/Па [1, 2, 3]; P – атмосферное давление, Па; T – температура воздуха, К; e – парциальное давление водяного пара, Па.

Уравнение для расчета показателя преломления (1) можно представить как зависимость от плотности воздуха ($\rho = \rho_C + \rho_{II}$) и плотности водяного пара ρ_{II} :

$$n = 1 + k_1 \cdot R_C \cdot \rho + \left(k_2' \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T} \right) \cdot \rho_{II} = 1 + N_C + N_{II}, \quad (2)$$

где $R_C = 287.054$ Дж/(кг·К); $R_{II} = 461.526$ Дж/(кг·К); $k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_C}{R_{II}}$.

Задержка радиосигнала в тропосфере

Дополнительная задержка радиосигнала, связанная с прохождением через тропосферный слой, может быть определена по формуле:

$$\Delta L_{TP} = \int_0^L (n - 1) dl, \quad (3)$$

где ΔL_{TP} – пространственная задержка сигнала в тропосфере, м; L – расстояние до спутника, м; n – показатель преломления электромагнитных волн; l – путь вдоль траектории радиолуча, м.

С учетом формулы (2) для показателя преломления получается:

$$\Delta L_{TP} = \int_0^L N_C dl + \int_0^L N_{II} dl. \quad (4)$$

Таким образом, из формулы (4) видно, что задержку сигнала в тропосфере можно представить в виде суммы гидростатической задержки, связанной с прохождением радиосигнала сквозь тропосферу, где давление с высотой убывает в соответствии с гидростатическим законом, и задержки за счет распространения в водяном паре:

$$\Delta L_{TP} = \Delta L_C + \Delta L_{II}, \quad (5)$$

где ΔL_C – гидростатическая часть пространственной задержки сигнала, м; ΔL_{II} – пространственная задержка сигнала, обусловленная распространением радиоволн в водяном паре, м.

Гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере

Гидростатическая задержка сигнала может быть представлена следующим образом:

$$\Delta L_C(\beta) = k_1 \cdot R_C \cdot \int_0^L \rho dl = \Delta L_C(90^\circ) \cdot m_C(\beta). \quad (6)$$

Здесь $\Delta L_C(90^\circ)$ – гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере при вертикальном распространении; $m_C(\beta)$ – отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника; β – угол места спутника.

В случае вертикального распространения сигнала от спутника до приемника, гидростатическая часть задержки равна:

$$\Delta L_C(90^\circ) = k_1 \cdot R_C \cdot \int_0^\infty \rho dz. \quad (7)$$

Поскольку приземное атмосферное давление определяется как [4]:

$$P_0 = \int_0^\infty \rho \cdot g dz = g_m \int_0^\infty \rho dz, \quad (8)$$

где $g_m = 9.784 \cdot [1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot 10^{-3} \cdot h]$.

Тогда, с учетом $\int_0^{\infty} \rho dz = \frac{P_0}{g_m}$, получается расчетная формула для определения гидростатической части задержки сигнала при вертикальном распространении [4]:

$$\Delta L_C(90^\circ) = \frac{k_1 \cdot R_C \cdot P_0}{g_m} = \frac{2.2768 \cdot 10^{-5}}{[1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot 10^{-3} \cdot h]} \cdot P_0. \quad (9)$$

где φ – широта места; h – высота над уровнем моря, м; P_0 – атмосферное давление у поверхности Земли, Па.

Точность определения гидростатической задержки радиосигнала определяется точностью информации об атмосферном давлении и составляет 2.3 мм/гПа.

Отображающая функция по определению равна:

$$m_C(\beta) = \frac{\Delta L_C(\beta)}{\Delta L_C(90^\circ)} = \frac{\int_0^L \rho dl}{\int_0^{\infty} \rho dz}. \quad (10)$$

Ифадисом [6] получена эмпирическая зависимость, применимая в диапазоне углов места от 90° до 5° (при $\beta = 5^\circ$ среднеквадратическая ошибка определения задержки составляет 2.2 см):

$$m_C(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + c}}}, \quad (11)$$

где

$$a = 1.237 \cdot 10^{-3} + 1.316 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.378 \cdot 10^{-6} \cdot (T_0 - 288.15) + 8.057 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{e_0};$$

$$b = 3.333 \cdot 10^{-3} + 1.946 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.040 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.747 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{e_0};$$

$c = 0.078$; T_0 – приземная температура воздуха, К; e_0 – приземное значение парциального давления водяного пара, Па.

Задержка радиосигнала во влажном воздухе

При прохождении сигнала через атмосферу, содержащую только водяной пар, возникает задержка радиосигнала, равная:

$$\Delta L_{II}(\beta) = \int_0^L \left(k_2' \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T} \right) \cdot \rho_{II} dl = \Delta L_{II}(90^\circ) \cdot m_{II}(\beta). \quad (12)$$

Здесь $\Delta L_{II}(90^\circ)$ – задержка радиосигнала в водяном паре при вертикальном распространении; $m_{II}(\beta)$ – отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника.

Для расчета задержки сигнала при вертикальном распространении, обусловленной наличием водяного пара в атмосфере, необходимо интеграл представить в виде:

$$\Delta L_{II}(90^\circ) = \int_0^{\infty} \left(k_2' \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T} \right) \cdot \rho_{II} dz = \left(k_2' \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T_m} \right) \cdot \int_0^{\infty} \rho_{II} dz, \quad (13)$$

где T_m – взвешенное значение температуры воздуха, К.

Поскольку интегральное содержание водяного пара в столбе воздуха определяется выражением $v = \int_0^{\infty} \rho_{II} dz$, то получается:

$$\Delta L_{II}(90^\circ) = \left(k'_2 \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T_m} \right) \cdot v. \quad (14)$$

Так как по определению параметр T_m равен [4]:

$$T_m = \frac{\int_0^{\infty} \frac{e}{T} dz}{\int_0^{\infty} \frac{e}{T^2} dz}, \quad (15)$$

то значения данного параметра определяются вертикальным распределением влажности и сильно зависят от приземной температуры воздуха. На основе статистической обработки данных радиозондирования над территорией США в диапазоне широт от 27° до 65° с.ш. получена следующая зависимость [5]:

$$T_m = 70.2 + 0.72 \cdot T_0, \quad (16)$$

где T_0 – приземная температура воздуха (на высоте 2 м), К.

Задержка радиосигнала во влажном воздухе зависит в первую очередь от значений интегрального содержания водяного пара (0.6 мм/кг/м^2) и в меньшей мере от приземного значения температуры воздуха (0.5 мм/К).

Отображающая функция, показывающая зависимость задержки сигнала во влажном воздухе от угла места спутника, может быть определена по формуле Ифадиса [6]:

$$m_{II}(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + c}}}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} a &= 5.236 \cdot 10^{-4} + 2.471 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.724 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.328 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}; \\ b &= 1.705 \cdot 10^{-3} + 7.384 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 3.767 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 2.147 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}; \\ c &= 0.05917. \end{aligned}$$

Определение интегрального содержания водяного пара в атмосфере

Дальность от навигационного спутника до приемного устройства может быть оценена из результатов двухчастотных измерений дальности:

$$L' = L_1 - \frac{f_2^2(L_1 - L_2)}{(f_1^2 - f_2^2)}, \quad (18)$$

где L_1, L_2 – результаты измерения дальности в первом и втором диапазонах частот, м;
 f_1, f_2 – частоты первого и второго диапазонов, Гц.

В случае базовой станции, приемное устройство расположено стационарно, и дальность может быть оценена из результатов расчета положения спутника и известного местоположения приемного устройства:

$$L = \sqrt{(x_C - x_{II})^2 + (y_C - y_{II})^2 + (z_C - z_{II})^2}, \quad (19)$$

где x_C, y_C, z_C – координаты спутника, м; x_{II}, y_{II}, z_{II} – координаты приемного устройства, м.

На основании (18) и (19) возможен расчет задержки радиосигнала в тропосфере:

$$\Delta L_{TP}(\beta) = L' - L. \quad (20)$$

Из результатов расчетов задержки сигнала в тропосфере $\Delta L_{TP}(\beta)$, гидростатической части задержки $\Delta L_C(90^\circ)$, отображающих функций $m_C(\beta)$ и $m_{II}(\beta)$ может быть рассчитана задержка радиосигнала при вертикальном распространении, обусловленная наличием водяного пара:

$$\Delta L_{II}(90^\circ) = \frac{[\Delta L_{TP}(\beta) - \Delta L_C(90^\circ) \cdot m_C(\beta)]}{m_{II}(\beta)}. \quad (21)$$

Использование данного соотношения возможно при достаточно больших углах места спутников, когда отображающие функции дают достаточную точность. Отсюда, на основе формулы (14), может быть рассчитано интегральное содержание водяного пара:

$$v = \left(k'_2 \cdot R_{II} + \frac{k_3 \cdot R_{II}}{T_m} \right)^{-1} \cdot \Delta L_{II}(90^\circ), \quad (22)$$

где v – содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, кг/м² или мм.

Таким образом, для осуществления расчета интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы по формулам (22), (21), (9), (11), (17) необходимы измерения одним приемным устройством задержки сигнала в тропосфере ΔL_{TP} при больших углах места навигационного спутника и приземных значений температуры воздуха T_0 , атмосферного давления P_0 , парциального давления водяного пара e_0 в точке размещения приемника.

Заключение

Как показано, рассмотренный метод позволяет с достаточной для практики точностью определять весьма важную информацию о содержании водяного пара в атмосфере. Оперативность данного метода, полная автоматизация и отсутствие расходных материалов при осуществлении дистанционного зондирования открывают возможности к широкому внедрению в практику оперативного контроля за состоянием атмосферы. К достоинствам данного метода можно также отнести "всепогодность" (независимость от наличия облаков), которая выгодно отличает его от методов, основанных на регистрации собственного электромагнитного излучения атмосферы.

Литература

1. *Smith E. K., Weintraub S.* The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // *Proceedings of Proc. IRE* 41. 1953. P.1035–1037.
2. *Boudouris G.* On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases // *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 67D(6). 1963. P.631- 684.
3. *Thayer G.D.* An improved equation for the radio refractive index of air // *Radio Science* 9(10). 1974. P.803–807.
4. *Davis J.L., Herring T.A., Sharipo I.I., Rogers A.E., Elgered G.* Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // *Radio Sci.* 1985. Vol 20(6). P.1593-1607.

5. *Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware R. H.* GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning system // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol.97. P.15787–15801.

6. *Ifadis I.* The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale // Technical Report no. 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 1986.

Remote sensing of water vapor in atmosphere with the help of differential subsystem of Global Navigation Satellite Systems

V.V. Chukin

*Russian State Hydrometeorological University (RSHU)
195196, Saint-Petersburg, Malookhtinsky ave., 98
E-mail: chukin@rshu.ru*

The paper deals with the use of ground receiving navigation stations for remote sensing of the atmosphere to determine the water vapor in the air. The method is based on the principle of measuring the delay of radio signals in the troposphere, followed by a decision of the inverse problem. Using information from the network of base stations allows to determine the delay of radio signals with greater accuracy through the use of group processing of the phase measurement range.

Keywords: remote sensing of atmosphere, water vapor, GLONASS, GPS.