

В. В. ЧУКИН, Е. С. АЛДОШКИНА, А. В. ВАХНИН, С. В. МОСТАМАНДИ,
Т. Т. НГУЕН, И. В. ОБРЕЗКОВА

МОНИТОРИНГ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS

Введение

В настоящее время существуют и развиваются методы дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере: радиозондирование атмосферы, лазерное зондирование и микроволновое зондирование. Наилучшую точность измерения влажности воздуха обеспечивает использование радиозондирования атмосферы, но данный метод позволяет проводить измерения только два раза в сутки и при температуре воздуха ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ точность измерений сильно снижается. Высокое пространственное разрешение и хорошую точность обеспечивает метод лазерного зондирования атмосферы, однако аппаратура зондирования не получила широкого распространения из-за высокой стоимости. При этом диапазон высот зондирования и точность определения влажности как лазерным, так и микроволновым методами сильно зависят от наличия облаков в атмосфере. Кроме того, микроволновый метод зондирования обладает невысокой точностью. Таким образом, имеется необходимость дальнейшего развития методов и средств дистанционного зондирования атмосферы, которые с одной стороны, давали бы высокую точность измерения влажности воздуха, а с другой стороны, были доступными, надежными, простыми и экономичными в эксплуатации.

Рассматриваемый в данной работе метод дистанционного зондирования атмосферы позволяет осуществлять расчет содержания водяного пара в атмосфере по данным наземной регистрации радиосигналов космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS. Содержание водяного пара определяется путем измерения пространственных

задержек радиосигналов в атмосфере в результате уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффекта поляризации молекул водяного пара [1, 2, 6, 7].

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; $k_2 = 7.04 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_3 = 3.739 \cdot 10^{-3}$ К²/Па [4, 9, 10]; 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 ($\rho = \rho_d + \rho_v$) и плотности водяного пара ρ_v :

$$n = 1 + k_1 \cdot R_d \cdot \rho + \left(k'_2 \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T} \right) \cdot \rho_v, \quad (2)$$

где $R_d = 287.054$ Дж/(кг · К); $R_v = 461.526$ Дж/(кг · К); $k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v}$.

Задержка радиосигнала в тропосфере

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

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

где ΔL_{tr} — пространственная задержка радиосигнала в тропосфере, м; L — расстояние, проходимое радиосигналом, м; n — показатель преломления радиоволн; l — путь вдоль траектории радиолуча, м.

Из формулы (3) с учетом формулы (2) получается:

$$\Delta L_{tr} = k_1 \cdot R_d \cdot \int_0^L \rho dl + \int_0^L \left(k_2' \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T} \right) \cdot \rho_v dl. \quad (4)$$

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:

$$\Delta L_{tr} = \Delta L_d + \Delta L_v, \quad (5)$$

где ΔL_d — гидростатическая часть пространственной задержки сигнала, м; ΔL_v — пространственная задержка сигнала, обусловленная распространением радиоволн в водяном паре, м.

Гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере

Гидростатическая задержка сигнала может быть представлена следующим образом:

$$\Delta L_d = \Delta L_d^{90^\circ} \cdot m_d(\beta). \quad (6)$$

Здесь $\Delta L_d^{90^\circ}$ — гидростатическая задержка радиосигнала в тропосфере при вертикальном распространении, м; $m_d(\beta)$ — отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника β .

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

$$\Delta L_d^{90^\circ} = k_1 \cdot R_d \cdot \int_0^\infty \rho dz. \quad (7)$$

Поскольку приземное атмосферное давление определяется как [5]:

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

где $g_m = 9.784 \cdot [1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\varphi) - 2.8 \times 10^{-7} \cdot h]$.

Тогда, с учетом $\int_0^\infty \rho dz = \frac{P_0}{g_m}$, получается расчетная формула для определения гидростатиче-

ской части задержки радиосигнала при вертикальном распространении [5]:

$$\begin{aligned} \Delta L_d^{90^\circ} &= \frac{k_1 \cdot R_d \cdot P_0}{g_m} = \\ &= \frac{2.2768 \cdot 10^{-5} \cdot P_0}{1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\varphi) - 2.8 \cdot 10^{-7} \cdot h}, \quad (9) \end{aligned}$$

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:

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

Ифадисом [8] получена эмпирическая зависимость, применимая в диапазоне углов места от 90° до 5° (при $\beta = 5^\circ$ среднеквадратическая ошибка определения задержки составляет 2.2 см):

$$m_d(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a_d}{\sin \beta + \frac{b_d}{\sin \beta + c_d}}}, \quad (11)$$

где

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

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

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

Таким образом, гидростатическая часть задержки радиосигнала может быть рассчитана по формулам (6), (9), (11) с использованием приземных значений атмосферного давления P_0 , температуры T_0 и влажности воздуха e_0 .

Задержка радиосигнала во влажном воздухе

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

$$\Delta L_v = \Delta L_v^{90^\circ} \cdot m_v(\beta) \quad (12)$$

Здесь $\Delta L_v^{90^\circ}$ — задержка радиосигнала в водяном паре при вертикальном распространении; $m_v(\beta)$ — отображающая функция, зависящая от угла места навигационного спутника β .

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

$$\begin{aligned} \Delta L_v^{90^\circ} &= \int_0^\infty \left(k_2' \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T} \right) \cdot \rho_v dz = \\ &= \left(k_2' \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T_m} \right) \cdot \int_0^\infty \rho_v dz, \end{aligned} \quad (13)$$

где T_m — «взвешенное» значение температуры воздуха, К.

Поскольку интегральное содержание водяного пара в столбе воздуха определяется выражением $PWV = \int_0^\infty \rho_v dz$, то из (13) получается:

$$\Delta L_v^{90^\circ} = \left(k_2' \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T_m} \right) \cdot PWV. \quad (14)$$

Так как по определению параметр T_m равен [5]:

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

то значения данного параметра определяются вертикальным распределением влажности и сильно зависят от приземной температуры воздуха. На основе статистической обработки данных радиозондирования может быть получена статистическая зависимость:

$$T_m = a + b \cdot T_0, \quad (16)$$

где a, b — коэффициенты линейной аппроксимации, T_0 — приземная температура воздуха (на высоте 2 м), К.

В настоящее время широко используются значения коэффициентов $a = 70.2$ К и $b = 0.72$, которые получены по данным аэрологического зондирования над территорией США в диапазоне широт от 27° до 65° с.ш. [3]. Однако для других регионов земного шара коэффициенты аппроксимации имеют отличные значения. Для примера, на рис. 1 представлена зависимость параметра T_m от приземной температуры воздуха T_0 для Санкт-Петербурга. Нами был осуществлен расчет коэффициентов формулы (16), которые оказались равными: $a = 65.48 \pm 0.83$ и $b = 0.73 \pm 0.01$. Анализ данных показал, что использование аппроксима-

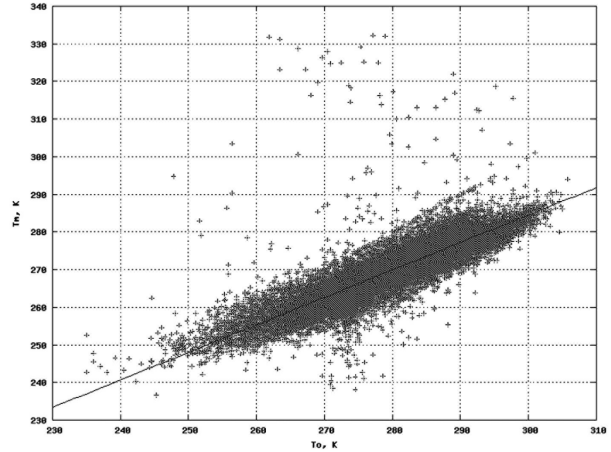


Рис. 1. Зависимость параметра T_m от приземной температуры воздуха T_0 для Санкт-Петербурга

ции (16) дает относительную ошибку определения интегрального содержания водяного пара не более чем на 1 % и использование адаптированных к региону коэффициентов a и b повышает точность незначительно.

Задержка радиосигнала во влажном воздухе зависит в первую очередь от значений интегрального содержания водяного пара (0.6 мм/кг/м²) 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 [8]:

$$m_v(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a_v}{\sin \beta + \frac{b_v}{\sin \beta + c_v}}}, \quad (17)$$

где

$$a_v = 5.236 \cdot 10^{-4} + 2.471 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.724 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.328 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0};$$

$$b_v = 1.705 \cdot 10^{-3} + 7.384 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 3.767 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 2.147 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0};$$

$$c_v = 0.05917.$$

Определение интегрального содержания водяного пара в атмосфере

Интегральное содержание водяного пара может быть определено из результатов измерений «влажной» задержки радиосигнала в тропосфере и отображающей функции m_v :

$$PWV = \frac{\Delta L_v}{\left(k_2' \cdot R_v + \frac{k_3 \cdot R_v}{T_m} \right) \cdot m_v(\beta)}, \quad (18)$$

где PWV — содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, $кг/м^2$ или $мм$. Использование данного соотношения возможно при достаточно больших углах места спутников, когда отображающая функция дает достаточную точность.

Задержка радиосигнала во влажном воздухе определяется выражением:

$$\Delta L_v = L_1 - L - \Delta L_{ion} - \Delta L_d - \Delta\tau \cdot c - \xi + \delta, \quad (19)$$

где L_1 — результат измерения радиоприемным устройством псевдодальности до навигационного спутника в диапазоне частот L_1 , м; L — геометрическое расстояние между навигационным спутником и приемным устройством, м; ΔL_{ion} — задержка радиосигнала в ионосфере, м; ΔL_d — гидростатическая часть задержки радиосигнала в тропосфере, м; $\Delta\tau$ — сдвиг шкалы часов приемника относительно шкалы часов спутника, с; ξ — систематическая ошибка, м; δ — случайная ошибка, м.

Также, задержка радиосигнала во влажном воздухе может быть оценена по разностной формуле:

$$\Delta L_v = \frac{0.5(L_k^{КОД} - L_{k-1}^{КОД}) + 0.5(L_k^{\Phi\Delta 3} - L_{k-1}^{\Phi\Delta 3})}{1 - \frac{m_v(\beta_{k-1})}{m_v(\beta_k)}} - \frac{(L_k - L_{k-1}) + \Delta L_d \left(1 - \frac{m_d(\beta_{k-1})}{m_d(\beta_k)}\right)}{1 - \frac{m_v(\beta_{k-1})}{m_v(\beta_k)}}, \quad (20)$$

где $L^{КОД}$ — результат кодовых измерений псевдодальности, м; $L^{\Phi\Delta 3}$ — результат фазовых измерений псевдодальности, м; k — момент времени.

Геометрическое расстояние от передающей антенны спутника до антенны приемного устройства может быть определено из формулы:

$$L = \sqrt{(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2}, \quad (21)$$

где X_s, Y_s, Z_s — декартовы координаты навигационного спутника, м; X_r, Y_r, Z_r — декартовы координаты приемного устройства, м.

Положение навигационного спутника в пространстве (X_s, Y_s, Z_s) может быть определено по параметрам орбит, передаваемым в навигационном сообщении, с точностью около 1.8 м при интегрировании на 30 минут вперед, что видно из данных, представленных на рис. 2.

В случае измерения дальности до навигационного спутника в двух диапазонах частот ионосферная задержка радиосигнала может быть определена по формуле:

$$\Delta L_{ion} = \frac{f_2^2(L_2 - L_1)}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (22)$$

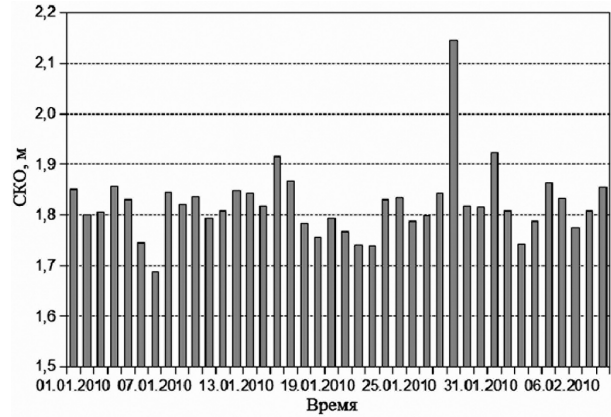


Рис. 2. Среднесуточные значения среднеквадратических ошибок (СКО) определения положения спутников ГЛОНАСС при интервале интегрирования 30 мин в период с 01.01.2010 г. по 09.02.2010 г.

где L_2 — результат измерения радиоприемным устройством псевдодальности до навигационного спутника в диапазоне частот L_2 , м; f_1, f_2 — несущие частоты навигационного радиосигнала в диапазонах L_1 и L_2 , соответственно, Гц.

Для определения ионосферной задержки радиосигнала в случае одночастотных измерений в диапазоне L_1 могут быть использованы формулы:

$$\Delta L_{ion} = \frac{(L_k^{\Phi\Delta 3} - L_{k-1}^{\Phi\Delta 3}) - (L_k^{КОД} - L_{k-1}^{КОД})}{2[m_i(\beta_k) - m_i(\beta_{k-1})]} \quad (23)$$

или

$$\Delta L_{ion} = \frac{-40.3 \cdot TEC}{f_1^2 \left[1 - \left(\frac{R \cdot \cos \beta}{R + z_{max}}\right)^2\right]^{0.5}}, \quad (24)$$

где TEC — интегральное содержание электронов в вертикальном столбе ионосферы, $м^2$; R — радиус кривизны Земли, в среднем равный 6 371 221 м; z_{max} — высота расположения максимума концентрации электронов в ионосфере, принимаемая при расчетах равной 432 500 м.

Гидростатическая часть тропосферной задержки определяется по формуле:

$$\Delta L_d = \frac{2.2768 \cdot 10^{-5} \cdot P_0 \cdot m_d}{1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2\varphi) - 2.8 \cdot 10^{-7} \cdot h}. \quad (25)$$

Таким образом, при зондировании атмосферы ГЛОНАСС/GPS-сигналами для определения интегрального содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы PWV необходимы результаты измерения ГЛОНАСС/GPS-приемником значений псевдодальности до навигационного спутника, результаты расчета геометрической дальности до спутника, ионосферной задержки и гидростатической части тропосферной задержки

ки радиосигнала, для расчета которой необходима информация о приземных значениях температуры воздуха T_0 , атмосферного давления P_0 и парциального давления водяного пара e_0 в точке размещения ГЛОНАСС/GPS-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 отсут-

ствие расходных материалов при осуществлении дистанционного зондирования открывают возможности широкого внедрения данного метода в практику оперативного контроля за состоянием атмосферы. К достоинствам метода можно также отнести «всепогодность» (независимость от наличия облаков), которая выгодно отличает его от методов, основанных на регистрации собственного электромагнитного излучения атмосферы.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ГК № П1549.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чукин В. В. Применение сетевых технологий при построении системы дистанционного зондирования атмосферы с помощью глобальной навигационной спутниковой системы // Успехи современного естествознания, 2008, № 11, С. 58.
2. Чукин В. В. Технология дистанционного зондирования атмосферы с помощью сети наземных приемных станций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Современные наукоемкие технологии, 2008, № 11, С. 54.
3. 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, 97. P. 15787–15801.
4. 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.
5. Davis J. L., Herring T. A., Sharipo I. I., Rogers A. E. E., Elgered, G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // Radio Sci., 1985, 20(6). P. 1593–1607.
6. Flores A., Ruffini G., Rius A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays // Ann. Geophysicae, 2000, 18. P. 223–234.
7. Gradinarsky L. P., Jarlemark P. Ground-Based GPS Tomography of Water Vapor: Analysis of Simulated and Real Data // Journal of the Meteorological Society of Japan, 2004, Vol.82, № 1B. P. 551–560.
8. 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, Goteborg, Sweden, 1986.
9. 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.
10. Thayer G. D. An improved equation for the radio refractive index of air // Radio Science, 9(10), 1974. P. 803–807.