

Расчет содержания водяного пара в атмосфере по данным наземной регистрации радиосигналов глобальной навигационной спутниковой системы

В.В. Чукин, Е.С. Алдошкина, И.В. Обрезкова, С.В. Мостаманди

ГОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98
chukin@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы использования данных, получаемых с помощью наземной регистрации радиосигналов глобальной навигационной спутниковой системы, для целей дистанционного определения вертикального профиля содержания водяного пара в атмосфере.

The paper deals with the use of data obtained from ground-based registration of Global Navigation Satellite System radio signals for remote determination of the vertical profile of water vapour in the atmosphere.

Введение

На сегодняшний день имеется необходимость создания метода дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере, который с одной стороны, давал бы высокую точность измерения влажности воздуха, а с другой стороны, был доступным, надежным, простым и экономичным в эксплуатации. Это связано с тем, что существующие дистанционные методы (радиозондирование, лазерное и микроволновое зондирование) помимо достоинств, обладают и рядом существенных недостатков. К ним относятся проведение малого числа наблюдений в сутки (радиозондирование), высокая стоимость аппаратуры зондирования (лазерное зондирование), невысокая точность (микроволновое зондирование) [1].

Предлагаемый новый метод дистанционного зондирования атмосферы позволяет осуществлять расчет содержания водяного пара в атмосфере по данным наземной регистрации радиосигналов космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы. Содержание водяного пара определяется путем измерения пространственных задержек радиосигналов в атмосфере в результате уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффекта поляризации молекул водяного пара [2, 3, 4, 5].

Распространение радиоволн в тропосфере

В предположении сферически-слоистой атмосферы для расчета пространственной задержки радиосигнала в тропосфере может быть использована следующая формула:

$$\Delta L(\beta) = \int_0^{\infty} \frac{n(z) - 1}{\sqrt{1 - \frac{R^2 n_0^2 \cos^2 \beta}{(R+z)^2 n^2(z)}}} dz, \quad (1)$$

где ΔL – пространственная задержка сигнала в тропосфере, м; β – угол места навигационного спутника; R – радиус кривизны Земли, м; $n(z)$ – вертикальный профиль показателя преломления радиоволн; n_0 – показатель преломления радиоволн у земной поверхности.

Показатель преломления радиоволн зависит от концентрации молекул азота, кислорода, углекислого газа, водяного пара и температуры воздуха:

$$n = 1 + \frac{k_1(P-e)}{T} + \frac{k_2e}{T} + \frac{k_3e}{T^2}, \quad (2)$$

где $k_1 = 7.76 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_2 = 7.04 \cdot 10^{-7}$ К/Па; $k_3 = 3.74 \cdot 10^{-3}$ К²/Па [6, 7, 8]; P – атмосферное давление, Па; T – температура воздуха, К; e – парциальное давление водяного пара, Па.

На рис. 1 представлена типичная зависимость тропосферной задержки навигационного радиосигнала от высоты спутника над горизонтом. Из рисунка видно, что при расположении спутника в зените задержка радиосигнала составляет около 2.3 м и увеличивается по мере приближения к горизонту.

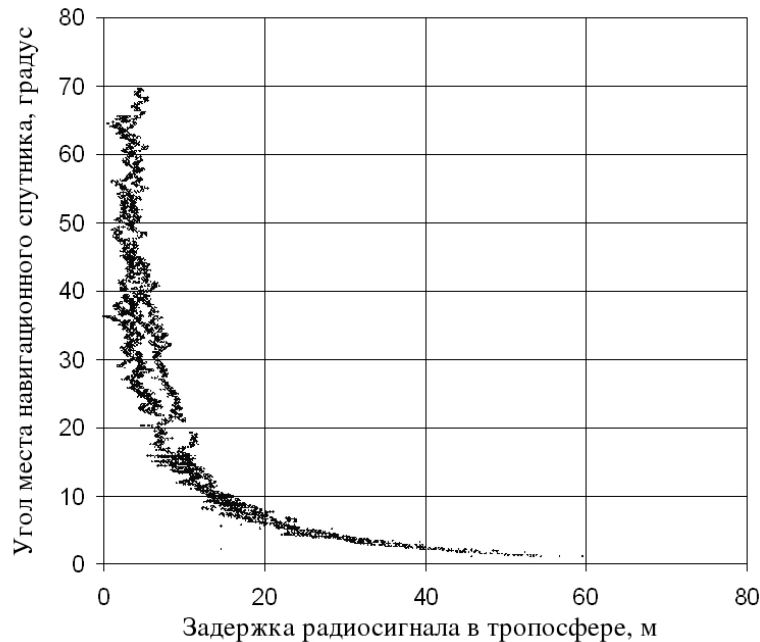


Рис. 1. Зависимость задержки радиосигнала в тропосфере от высоты навигационного спутника над горизонтом

Результаты измерений задержек радиосигналов, приходящих под различными углами места навигационных спутников, с помощью приемных устройств, расположенных на земной поверхности, позволяют получить систему уравнений:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}, \quad (3)$$

где \mathbf{y} – вектор результатов измерений задержек радиосигнала в тропосфере, элементы которого равны ΔL ; \mathbf{x} – вектор значений показателя преломления радиоволн, элементы которого определяются как $(n_i - 1)$. Элементы матрицы преобразования \mathbf{H} (ядра уравнения) задаются следующим образом:

$$h_{ij} = \frac{\Delta z_i \omega_i}{\sqrt{1 - \frac{R^2 n_0^2 \cos^2 \beta_j}{(R + z_i)^2 n_i^2}}}, \quad (4)$$

где ω_i – квадратурные веса на i -ом уровне.

Определение вертикального профиля показателя преломления радиоволн

Вертикальный профиль показателя преломления можно определить двумя способами:

1) решить обратную задачу – определить вектор \mathbf{x} по результатам измерений вектора \mathbf{y} . Данная задача с математической точки зрения является некорректной и для ее решения необходимо использование одного из методов регуляризации. В данной

работе используется метод статистической регуляризации [9, 10]:

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_b + \left[\mathbf{H}^T \mathbf{K}_y^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{R}_x^{-1} \right]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{K}_y^{-1} \left[(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{s-1}) - \mathbf{H} \cdot (\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_{s-1}) \right], \quad (5)$$

где \mathbf{x}_b - начальное приближение вектора \mathbf{x} ; \mathbf{K}_y - матрица ошибок измерений значений ΔL ; \mathbf{R}_x - матрица значений межуровневой корреляции показателя преломления радиоволн; s - номер шага итерационного процесса.

В предположении некоррелированности ошибок измерений ΔL матрица ошибок измерений может быть представлена в виде:

$$\mathbf{K}_y = \sigma_y^2 \mathbf{I}, \quad (6)$$

где σ_y^2 - дисперсия ошибок измерений ΔL ; \mathbf{I} - единичная матрица.

Ковариационная матрица \mathbf{R}_x рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{R}_x = \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)^2 \mathbf{R}_T + \left(\frac{\partial n}{\partial P} \right)^2 \mathbf{R}_P + \left(\frac{\partial n}{\partial e} \right)^2 \mathbf{R}_e, \quad (7)$$

где $\frac{\partial n}{\partial T} = \frac{(k_1 - k_2)e - k_1 P}{T^2} - \frac{2k_3 e}{T^3}$; $\frac{\partial n}{\partial P} = \frac{k_1}{T}$; $\frac{\partial n}{\partial e} = \frac{(k_2 - k_1)}{T} + \frac{k_3 e}{T^2}$; \mathbf{R}_T , \mathbf{R}_P , \mathbf{R}_e - матрицы ковариации полей температуры, атмосферного давления и влажности воздуха [11].

На точность решения обратной задачи влияет точность задания корреляционных функций, которые подвержены влиянию приземных инверсий температуры воздуха, облаков нижнего и среднего яруса.

2) использовать вариационный метод. Суть метода заключается в том, что необходимо найти такой вектор \mathbf{x} , при котором достигается минимум функции потерь:

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{K}_x^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} (\mathbf{y} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x})^T \mathbf{K}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}), \quad (8)$$

где \mathbf{x} - оценка вектора профиля состояния атмосферы [12].

Для реализации метода необходимо иметь архив реально наблюдавшихся вертикальных профилей показателя преломления. Профиль, для которого было получено наименьшее значение функции потерь считается наиболее соответствующим наблюдаемому.

Трудность реализации метода заключается в необходимости иметь очень большой архив вертикальных профилей показателя преломления.

Определение вертикального профиля влажности воздуха

По восстановленному вертикальному профилю показателя преломления восстанавливается профиль влажности:

$$q_i = \frac{R_d}{\frac{[(k_2 - k_1) \cdot T_i + k_3] R_v P_i}{(n_i - 1) T_i^2} - k_1 T_i - (R_v - R_d)}, \quad (9)$$

где $R_d = 287.054$ Дж/(кг·К); $R_v = 461.526$ Дж/(кг·К).

Поскольку в нижних слоях атмосферы значения показателя преломления в большей степени зависят от влажности воздуха, то для восстановления профиля влажности необходимо задавать вертикальный профиль температуры воздуха, убывающий с высотой по линейному закону:

$$T_i = T_{i-1} - \gamma \Delta z. \quad (10)$$

Вертикальное распределение атмосферного давления может быть получено из предположения гидростатического профиля плотности воздуха:

$$P_i = P_{i-1} \left(\frac{T_i}{T_{i-1}} \right)^{R_d \cdot \gamma \left[\frac{g}{1 + \bar{q} \cdot R_d / R_v} \right]}, \quad (11)$$

где $\bar{q} = \frac{q_i - q_{i-1}}{\ln\left(\frac{q_i}{q_{i-1}}\right)}$ – среднее значение массовой доли водяного пара между слоями i и $i-1$.

Анализ полученных результатов

Проведенные численные эксперименты показали, что наибольшей информативностью обладают значения измерений задержек радиосигналов, полученные при малых углах места навигационных спутников (менее 5° над горизонтом), что подтверждают данные работы [13]. На рис. 2 представлен пример вертикального профиля, полученного в результате численного эксперимента по восстановлению пространственного распределения влажности в атмосфере.

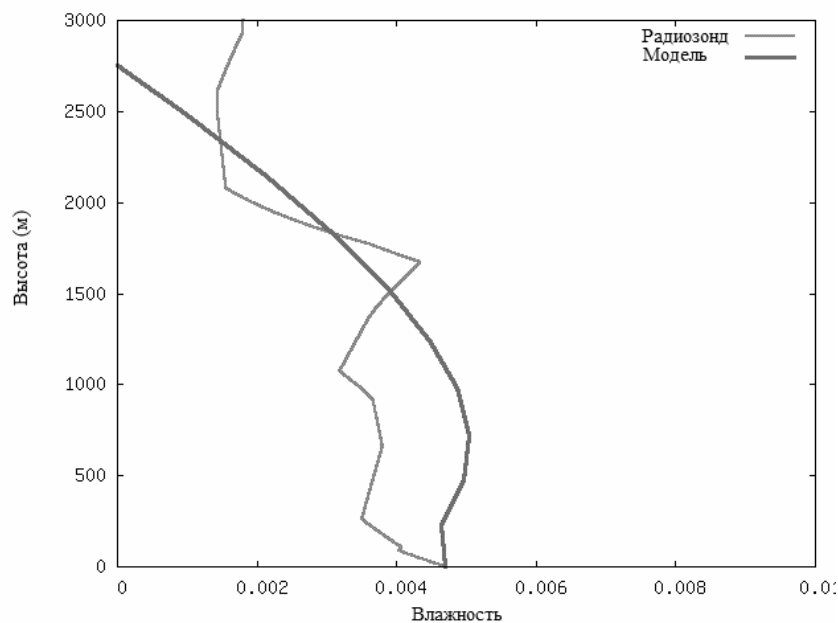


Рис. 2. Вертикальный профиль массовой доли водяного пара

Направлением дальнейших исследований является оценка точности определения вертикального профиля влажности воздуха при различных положениях космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы над горизонтом, при наличии облачности и слоев инверсии температуры в различные сезоны года.

Заключение

Рассмотренный метод позволяет получать важную информацию о вертикальном распределении содержания водяного пара в нижних слоях атмосферы. К достоинствам метода относятся его оперативность, "всепогодность", полная автоматизация, отсутствие расходных материалов при проведении дистанционного зондирования атмосферы. Информация, получаемая этим методом, может быть использована в региональных численных моделях прогноза погоды с целью улучшения качества прогноза и его пространственной детализации.

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

Литература

1. Алдошкина, Е.С. Сравнительный анализ методов дистанционного зондирования влажности в атмосфере [Текст] / Е.С. Алдошкина // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – №3. – С.29 – 30.
2. Flores, A. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays [Text] / A. Flores, G. Ruffini, A. Rius // Ann. Geophysicae. – 2000. – Vol.18. – P.223-234.
3. Gradinarsky, L.P. Ground-Based GPS Tomography of Water Vapor: Analysis of Simulated and Real Data [Text] / L.P. Gradinarsky, P. Jarlemark // Journal of the Meteorological Society of Japan. – 2004. – Vol.82, №1B. – P.551-560.
4. Чукин, В.В. Применение сетевых технологий при построении системы дистанционного зондирования атмосферы с помощью глобальной навигационной спутниковой системы [Текст] / В.В. Чукин // Успехи современного естествознания. – 2008. – №11. – С.58.
5. Чукин, В.В. Технология дистанционного зондирования атмосферы с помощью сети наземных приемных станций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] / В.В. Чукин // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – №11. – С.54.
6. Smith, E.K. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies [Text] / E.K. Smith, S. Weintraub // Proceedings of Proc. IRE. – 1953. – Vol.41. – P.1035-1037.
7. Boudouris, G.. On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases [Text] / G. Boudouris // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – Vol.67D(6). – 1963. – P.631-684.
8. Thayer, G.D. An improved equation for the radio refractive index of air [Text] / G.D. Thayer // Radio Science. – Vol.9(10). – 1974. – P.803-807.
9. Engeln, A. Retrieval of temperature and water vapor profiles from radio occultation refractivity and bending angle measurements using an Optimal Estimation approach: a simulation study [Text] / A. Engeln, G. Nedoluha // Atmos. Chem. Phys. – 2005. – Vol.5. – P.1665-1677.
10. Кисилев, В.Н. Математическое обеспечение автоматизированной обработки данных аэрологических наблюдений, выполненных с помощью зарубежных измерительных систем [Текст] / В.Н. Кисилев, А.Д. Кузнецов, В.В. Розанов, Ю.М. Тимофеев. – Л.: изд. ЛГМИ, 1989. – 106 с.
11. Обрезкова, И.В. Использование межуровневых корреляционных связей метеорологических полей для уточнения расчетов содержания водяного пара в атмосфере [Текст] / И.В. Обрезкова // Успехи современного естествознания. – 2010. – №8. – С.9-10.
12. Eresmaa, R. Exploiting ground-based measurements of the global positioning system for numerical weather prediction [Text] / R. Eresmaa // Finnish Meteorological Institute Contribution.. – 2007. . – № 61. . – P.10-140.
13. Азизов, А.А. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы [Текст] / А.А. Азизов, К.П. Гайкович, С.С. Кашкаров, М.Б. Черняева // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1998. – Т.41, №9. – С.1093-1116.