УДК 551.551

ОЦЕНКА ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВОДЯНЫМ ПАРОМ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ РАДИОВОЛН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ И ДАННЫХ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

И. А. Готюр, Д. М. Караваев^{*}, В. М. Краснов, Ю. В. Кулешов, А. Б. Лебедев, А. Н. Мешков, Г. Г. Щукин

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

На основе глобальной модели атмосферы NRLMSISE-00 и модели влажности Северного полушария (ГОСТ 26352-84) разработана модель, позволяющая проводить расчёты диэлектрической проницаемости атмосферы вдоль траектории распространения радиоволн. Для проверки модели использованы данные микроволновой радиометрии. Разница модельных и измеренных значений обусловленных водяным паром зенитных задержек радиоволн в тропосфере в среднем составила 1÷3 см при среднеквадратичном отклонении 4,7÷5,3 см.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач радионавигации и радиолокации, а также реализации радиозатменного метода диагностики состояния атмосферы необходимо, в том числе, учитывать состояние ионосферы и величины давления, температуры и влажности атмосферы непосредственно вдоль траекторий распространения радиоволн. Метода, который бы позволял на основе спутниковых или наземных измерений параметров ионосферы и тропосферы определять изменения этих величин вдоль произвольного направления, в настоящее время не существует. Поэтому задача развития моделей ионосферы и тропосферы по-прежнему остаётся актуальной. Например, в работе [1] описана адаптивная модель ионосферы, позволяющая проводить расчёты профилей концентрации электронов вдоль произвольного направления. В работе [2] для реализации радиозатменного метода развита модель СIRA86aQ_UOG, созданная на основе международной модели атмосферы CIRA-86 [3] и климатологических профилей влажности, описанных в работе [4]. При этом глобальная модель влажности основывается на пяти эмпирических усреднённых по долготам профилях: среднегодовом для 15° с. ш., и усреднённым по летним и зимним месяцам профилям для 45° и 60° с. ш.

По рекомендации Международного союза электросвязи МСЭ-RP.835-5 (02/2012) [5] для расчёта характеристик распространения радиоволн на трассах Земля—космос предлагается использовать среднегодовую модель стандартной атмосферы, основанную на модели «Стандартная атмосфера США 1976 года» [6]. Влажность в данной модели описывается следующим образом: для низких широт (менее 22° с. ш.) — усреднёнными по долготе и году профилями, для средних (между 22° и 45° с. ш.) и высоких (выше 45° с. ш.) широт — усреднёнными по долготе профилями для летних и зимних месяцев. Вместе с тем комиссия COSPAR (Committee on Space Research) в 2012 году рекомендовала [7] проводить расчёты температуры и плотности составляющих атмосферу газов в области высот до 120 км на основе эмпирической модели NRLMSISE-00 [8]. Её разработка основана на большом количестве данных спутниковых, ракетных и радарных измерений с хорошим временны́м и пространственным разрешением. Результаты расчётов по этой модели протестированы международным научным сообществом в ходе многочисленных экспериментов

^{*} dm.karavaev@mail.ru

(например, ниже 90 км в спокойных условиях ошибка определения плотности меньше 5% [7]). Кроме того, существует стандартная модель влажности Северного полушария ГОСТ 26352-84, созданная на основе аэрологических наблюдений и введённая в действие с 01.01.1986 [9]. В этой модели, в отличие от модели CIRA86aQ_U0G, усреднённые профили влажности для широт 10°; 30°; 50° и 70° с. ш. даны для четырёх различных меридианов: 0°; 80°; 180° и 280° в. д. Цель данной работы состояла в создании модели атмосферы, совмещающей глобальную модель NRLMSISE-00 и модель влажности по ГОСТ 26352-84, и апробации модели влажности с использованием данных микроволновой радиометрии.

1. МОДЕЛЬ ПРОФИЛЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Диэлектрическая проницаемость ε тропосферы определяется выражением

$$\varepsilon = 1 + \frac{1,552 \cdot 10^{-4}}{T[K]} \left(p[r\Pi a] + \frac{4810e[r\Pi a]}{T[K]} \right), \tag{1}$$

где T — температура, p — давление, $e = q[\Gamma/\kappa\Gamma]p[\Gamma\Pi a]/(621,98 + 0.378q[\Gamma/\kappa\Gamma])$ — парциальное давление водяного пара, q — массовая доля влаги.

Для расчёта диэлектрической проницаемости воздуха используется модель, которая структурно состоит из трёх блоков: модель NRLMSISE-00, модель влажности и модель расчёта задержки радиоволн в тропосфере. Модель NRLMSISE-00 используется для профилей T(z) и p(z), где z высота. Модель влажности включает в себя 32 эмпирических среднемесячных профиля q(z) для января и июля для широт 10°, 30°, 50° и 70° с. ш. и долгот 0°, 80°, 180° и 280° в. д. в соответствии с ГОСТ 26352-84. Для примера на рис. 1 показаны профили влажности воздуха для января.

Для 80° с. ш. профиль q(z) взят из модели CIRA86aQ. Как и в модели CIRA86aQ, мы считаем его справедливым для всех долгот, а для всех высот на Северном полюсе влажность принимаем нулевой.

Профили влажности для 20°, 40° и 60° с. ш. были рассчитаны с помощью линейной интерполяции на основе данных для 10°, 30°, 50° и 70° с. ш. Таким образом получилась опорная сетка профилей вдоль четырёх меридианов с шагом по широте 10°. Для расчёта профилей в промежуточных точках используется линейная интерполяция. Как и в модели CIRA86aQ, учёт сезонных изменений профилей проводится по формуле

$$q_i(z) = \left[\frac{q_1(z) + q_7(z)}{2}\right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{q_1(z) - q_7(z)}{2}\right] \cos\left[\frac{\pi(i-2)}{6}\right],\tag{2}$$

где индекс і меняется от 1 (январь) до 12 (декабрь).

Расчёт задержки радиоволн (т. е. разности между фазовым путём волны в тропосфере и расстоянием вдоль прямой линии по траектории волны s_0) проводится по формуле

$$L_q = \int \sqrt{\varepsilon} \, \mathrm{d}s - s_0, \tag{3}$$

где *s* — длина траектории радиоволны.

224

2. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Для тестирования модели использовались данные наземной и спутниковой микроволновой радиометрии, позволяющей проводить измерения влагозапаса атмосферы в зените и оценивать



Рис. 1. Зависимость среднемесячных значений массовой доли водяного пара от высоты для 10° с. ш. (*a*), 30° с. ш. (*b*), 50° с. ш. (*b*), 70° с. ш. (*b*) и 0° в. д. (штриховые линии), 80° в. д. (линии с точками), 180° в. д. (линии с треугольниками) и 280° в. д. (линии с крестами)

соответствующие тропосферные задержки радиоволн с высоким пространственным и временным разрешением практически при любых погодных условиях [10]. Известно, что обусловленная водяным паром компонента тропосферной задержки («влажная компонента») может составлять около 40 см в тропической зоне Земного шара и доли сантиметров в полярной области. Данная компонента является наиболее изменчивой в пространстве и времени; это обусловливает трудности построения простых моделей. Мы полагаем, что тропосферная задержка, связанная с наличием водяного пара, определяется линейным соотношением

$$L_q = b_1 Q, \tag{4}$$

где Q — влагозапас атмосферы, b_1 — коэффициент.

В случае наземного зондирования облачной атмосферы без осадков её влагозапас определя-

Месяц	Координаты	Lq, см	$\sigma_{Lq},$ см
Апрель	(48° с. ш., 46° з. д.)	11,41	$5,\!52$
Июль	(60° с. ш., 31° в. д.)	$16,\!24$	3,71
Октябрь	(60° с. ш., 31° в. д.)	8,06	3,24
Январь	(60° с. ш., 31° в. д.)	$5,\!33$	1,98

Таблица 1. Средние значения и среднеквадратичные отклонения «влажной» компоненты задержки в зените для различных сезонов года

ется по характеристикам её собственного радиотеплового излучения из уравнения [11]

$$Q = a_0 + a_1 \tau(f_1) + a_2 \tau(f_2), \tag{5}$$

где $\tau(f)$ — оптическая толщина атмосферы на частоте f; a_i — коэффициенты регрессии, полученные по данным радиозондирования атмосферы и эмпирическим моделям облачности. Оптимальные частоты зондирования находятся вблизи центра линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц и в «окне прозрачности» атмосферы $31\div38$ ГГц.

Результаты экспериментов, проведённых в различных регионах с помощью наземного (или судового) двухчастотного радиометра, работающего на частотах 22,2 и 36,5 ГГц, позволили получить статистические оценки «влажной» компоненты тропосферной задержки L_q для различных сезонов года (см. табл. 1) [10].



Рис. 2. Тропосферная задержка радиоволн, обусловленная водяным паром, на основе модельных расчётов по модели МСЭ (линия 1) и модели ГОСТ 26352-84 (линия 2), а также по данным наземной микроволновой радиометрии (сплошная линия, среднее значение показано линией 3)

Слоистые облака, как правило, вносят вклад в тропосферную задержку менее 0,1 см (для районов, в которых проводились исследования). Сопоставление результатов эксперимента с синхронными данными аэрологического зондирования показало, что среднеквадратическая величина различий между данными радиометра и данными радиозондирования для «влажной» компоненты тропосферной задержки составляла 0,5÷ ÷1,0 см.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления расчётов задержек радиоволн на основе данных микроволновой радиометрии, расчётов по нашей модели на основе ГОСТ 26352-84 и модели Международного союза электросвязи (МСЭ) для 22-х дней измерений в районе Санкт-Петербурга. Среднее значение отличия наших модельных расчётов от средней задержки, полученной на основе эксперимента, составило $m \approx 4$ см, а среднеквадратическое отклонение $\sigma \approx 3,1$ см; для модели МСЭ среднее значение и

среднеквадратическое отклонение от данных эксперимента составили $m \approx 8,9$ см и $\sigma \approx 3,1$ см соответственно. Таким образом, модель влажности на основе ГОСТ 26352-84 даёт более близкие к эксперименту результаты расчёта по сравнению с моделью МСЭ.

В связи с тем, что модель влажности по ГОСТ 26352-84 создана на основе измерений, выполненных только над сушей, особенно важно провести сопоставление модельных расчётов с



Рис. 3. Зависимость тропосферной задержки, обусловленной водяным паром, от широты для различных дней января 2014 года. Экспериментальные значения представлены сплошными линиями, модельные расчёты — штриховыми

результатами измерений, осуществлённых над океаном. Для этого были использованы результаты измерений спутниковых радиометров SSMI DMSP F17 [13]. Для сопоставления данных был выбран регион Атлантического океана в диапазоне широт от 30° до 60° с. ш. вдоль меридиана 48° з. д. Для примера на рис. 3 показаны результаты сопоставления данных для 9-ти дней января 2014 года, а на рис. 4 и 5 — для 9-ти дней июля и 9-ти дней октября 2014 года соответственно.

Средняя величина разности модельных и экспериментальных задержек радиоволны для всех широт и 9-ти дней января 2014 года составила m = -2,18 см, а среднеквадратическое откло-



Рис. 4. То же, что на рис. 3, для июля 2014 года

нение $\sigma = 4,68$ см. Аналогичное сопоставление для 9-ти дней июля 2014 года дало значения m = -1,11 см и $\sigma = 4,84$ см, а для 9-ти дней октября 2014 года m = 2,35 см и $\sigma = 5,27$ см.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе глобальной модели атмосферы NRLMSISE-00 и модели влажности Северного полушария (ГОСТ 26352-84) создана модель, позволяющая проводить расчёты диэлектрической проницаемости вдоль траектории распространения радиоволн в тропосфере и оценивать задержку радиосигналов. Сопоставление соответствующей модельной «влажной» задержки радиоволн с результатами наземной микроволновой радиометрии для 22-х дней в районе г. Санкт-Петербурга показало среднюю разность около 4,0 см и среднеквадратическое отклонение около 3,1 см; при

И. А. Готюр, Д. М. Караваев, В. М. Краснов и др.

228



Рис. 5. То же, что на рис. 3, для октября 2014 года

этом модель МСЭ дала среднюю разницу с экспериментальными значениями около 9 см при среднеквадратическом отклонении 3,1 см. Таким образом, модель влажности на основе ГОСТ 26352-84 даёт более точное согласие с экспериментальными данными. Сопоставление результатов расчёта по модели с данными спутниковых микроволновых радиометрических измерений над регионом Атлантического океана в диапазоне широт от 30° до 60° с. ш. вдоль меридианаы 48° з. д. для 9-ти дней января, 9-ти дней июля и 9-ти дней октября 2014 года дало средний модуль разницы величин задержек 1,0÷3,0 см при среднеквадратичном отклонении 4,7÷5,3 см. В общем случае, при вертикальном распространении радионавигационного сигнала, задержка, обусловленная водяным паром, изменяется в пределах от 5 до 30 см [14]. Учитывая, что погрешности разработанной модели меньше этих величин, представляется возможным использовать её для прогнозирования «влажной» задержки. При этом важно отметить, что разработанная модель, как и модель МСЭ, позволяет проводить расчёты профилей диэлектрической проницаемости

вдоль траектории распространения радиоволн в отличие, например, от моделей GCAT и Нейлла, в которых величина «влажной» задержки считается постоянной и равной 10 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Devyatkin A., Gotur I., Krasnov V., et al. // Int. J. Remote Sensing. 2014. V. 35, No. 15. P. 5 913.
- Kirchengast G., Hafner J., Poetzi W. Techn. Report for ESA/ESTEC-№ 8/1999. Graz, Austria: Inst. For Meteorol. and Geophys., Univ. of Graz, 1999. 18 p.
- Fleming E. L., Chandra S., Schoeberl M. R., Barnett J. J. NASA Techn.Memorandum No. 100697. Washington, D.C., U.S.A.: Nat. Aeron. Space Admin., 1988. 85 p.
- 4. Damosso E., Stola L., Brussard G. // ESA J. 1983. V. 7. P. 25.
- Эталонные стандартные атмосферы. Серия Р. Распространение радиоволн. Рекомендация МСЭ-RP.835-5.02/2012. Женева, 2013. 12 с.
- 6. U.S. Standard Atmosphere, Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976. 241 p.
- 7. http://sol.spacenvironment.net/CIRA-2012/
- Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107A, No. A12. P. 1468.
- Модель влажности воздуха в Северном полушарии. ГОСТ 26352-84. М.: Госстандарт СССР, 1984. 14 с.
- Караваев Д. М., Щукин Г. Г. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 2. С. 48.
- 11. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г, Бобылёв Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л: Гидрометеоиздат, 1987. 283 с.
- 12. Караваев Д. М., Кулешов Ю. В., Щукин Г. Г. // Тез. 12-ой Всеросс. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 10–14 ноября 2014. С. 156.
- 13. http://www.remss.com/missions/ssmi.
- 14. Mohinder S. G., Lawrence R. W., Angus P. A. Global position system, intentional navigation, and integration. New York: John Wiley and Sons, Inc., 2001. 408 p.

Поступила в редакцию 18 января 2016 г.; принята в печать 19 октября 2016 г.

ESTIMATION OF THE TROPOSPHERIC WET DELAY OF RADIO WAVES BASED ON A MODEL AND MICROWAVE RADIOMETRY DATA

I. A. Gotyur, D. M. Karavaev, V. M. Krasnov, Yu. V. Kuleshov, A. B. Lebedev, A. N. Meshkov, and G. G. Shchukin

By combining the global atmospheric model NRLMSISE-00 and the humidity model of the Northern hemisphere (GOST 26352-84), we developed a model for calculation of the dielectric permittivity of the atmosphere along the radio-wave propagation path. Microwave radiometry data were used to test the model. The difference between the model and measured values of the zenith wet delay of radio waves in the troposphere averaged 1–3 cm for a r.m.s. deviation of 4.7-5.3 cm.