

Анализ влагосодержания атмосферы по данным приема сигналов GNSS

И. А. Нестеров* Н. А. Терешин†

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

В данной работе описывается метод оценки интегрального влагосодержания атмосферы по данным приемников спутниковых навигационных систем. Проводится сравнение получаемых значений влагосодержания с измерениями наземных фотометров сети AERONET и данными реанализов NCEP.

PACS: 42.68.Ge, 92.60.Jq УДК: 621.3.09, 537.874.34, 528.8

Ключевые слова: GNSS, GPS, влагосодержание, водяной пар, тропосферная задержка.

Водяной пар является основным фактором в физике многих атмосферных процессов и явлений [1]. Высокая изменчивость содержания атмосферного водяного пара во времени требует непрерывного проведения измерений по всей поверхности земного шара.

Существующие средства зондирования атмосферного влагосодержания, такие как спутниковые радиометры, существенно облегчают задачу глобального мониторинга влагосодержания. Тем не менее, радиометрическое зондирование осложнено в случае изменчивой подстилающей поверхности (которую представляет собой большая часть суши). Погодные условия, такие как облачность, также оказывают влияние на корректность измерений.

Данная работа представляет метод, который позволяет использовать измерения двухчастотными навигационными приемниками фазовой задержки сигнала спутников GNSS (*Global Navigation Satellite System*), таких как спутники GPS и ГЛОНАСС.

Современные навигационные приемники измеряют фазовую задержку спутникового сигнала на двух и более частотах в диапазоне 1–2 ГГц. Эта задержка преимущественно зависит от расстояния, которое проходит сигнал, но свой вклад также дает и атмосферное преломление, которое в том числе модулируется содержанием водяного пара. Дополнительно к этому вносятся различные ошибки, связанные с неполной синхронизацией времени приемника и спутника и неточностями оценки их положения, релятивистскими эффектами, и многими другими факторами.

Для получения независимых от приемника и спутника измерений задержки в первую очередь производится устранение вклада, создаваемого расстоянием до спутника — расстояние рассчитывается по заранее известным эфемеридам и примерному положению приемника. Чтобы исключить влияние часов приемника на измерения, используется метод одинарных разностей [2]. Получаемая в остатке чисто атмосферная за-

держка зависит только от оптической толщины атмосферы, связанной с углом подъема конкретного спутника. Использование картирующей функции Нила [3] позволяет оценить значение зенитной атмосферной задержки, не зависящей от углов подъема спутников.

Неопределенность точного положения приемника также создает небольшой дополнительный вклад, который необходимо оценить в процессе решения задачи извлечения влажной тропосферной задержки. Данный метод не оценивает корректное положение приемника заранее, а использует дополнительный неизвестный вектор смещения $\delta\rho$ (разницу между приблизительным и настоящим положениями приемника), который создает дополнительную задержку сигнала (\mathbf{n} — вектор направления распространения сигнала):

$$\Delta\rho = (\mathbf{n}, \delta\rho)$$

Значение этого вектора смещения определяется в процессе решения задачи вместе с значениями влажной задержки.

Для расчета задержки, создаваемой водяным паром, необходимо исключить из зенитной задержки вклад ионосферы и сухого воздуха. Использование двухчастотных приемников позволяет исключить ионосферную задержку путем построения безионосферной комбинации сигналов нескольких частот в связи с характерной обратной квадратичной зависимостью ионосферной задержки от частоты. Задержка, создаваемая сухим воздухом, не зависит от частоты сигнала и не может быть исключена подобным образом, поэтому производится ее оценка исходя из модели Саастамойнена [4], которая включает в себя заранее известные данные о давлении и температуре на поверхности вблизи приемника.

Получаемая в результате влажная задержка — задержка, создаваемая водяным паром — является прямой характеристикой атмосферного влагосодержания, и можно показать [5], что влажная задержка пропорциональна интегральному влагосодержанию атмосферы (массе воды в атмосферном столбе).

В связи с небольшой величиной влажной задержки, соотношение сигнал-шум для получаемых данных является очень высоким, поэтому вместо индивидуаль-

*E-mail: nia2002@yandex.ru

†E-mail: nikita.tereshin@gmail.com

ных расчетов для каждого проделанного приемником измерения производится решение задачи аппроксимации полученных данных базисными сплайнами с использованием регуляризации Тихонова.

Описанный в работе метод был применен к массиву данных, взятому из архива записей стационарных приемников GPS *Scripps Orbit and Permanent Array Center* за 2015 г. Для получения актуальных полей давления, температуры и, в случае оценки влажной части тропосферной задержки по модели Саастамойнена, влажности использовались данные глобального реанализа NCEP NCAR, а также реанализа NARR для североамериканского региона.

Для ряда приемных станций были рассчитаны временные ряды тропосферной задержки, по которым были оценены значения атмосферного влагосодержания.

Рассчитанные значения тропосферной задержки для ряда станций-приемников были сравнены с оценкой тропосферной задержки, полученной по модели Саастамойнена, а также с результатами расчетов аналогичной методики GAGE, используемой консорциумом UNAVCO. Сравнение выявило, что обе методики расчета тропосферной задержки по данным GPS не имеют явных преимуществ относительно друг друга, и имеют среднее отклонение от оцененной задержки порядка 3–4 см при корреляции в 75–80 %.

Рассчитанные значения влагосодержания для одной из станций, расположенной в Звенигороде, были сравнены с данными об осаждаемой воде, которые бы-

ли получены расположенным вблизи фотометром сети AERONET. Коэффициент корреляции обоих рядов данных составляет 70 %, однако количественное сравнение показало, что метод на данный момент имеет систематическую ошибку, в связи с которой происходит переоценка влагосодержания на 0.8 см жидкой воды.

Для региона западного побережья Северной Америки, на территории которого находится большинство приемников, принадлежащих архиву SOPAC, были рассчитаны пространственные поля влагосодержания. Сравнение этих полей с данными о количестве осаждаемой воды из реанализа NARR показало, что характерные особенности распределения влагосодержания четко выражены в обоих случаях, но ошибка определения влагосодержания относительно данных реанализа достигает 40 %.

В данной работе был разработан и реализован метод расчета влагосодержания по данным станций-приемников глобальных навигационных систем. Точность получаемых результатов невелика по сравнению с радиометрическим зондированием, однако метод нечувствителен к неблагоприятным погодным условиям и свойствам подстилающей поверхности и позволяет почти непрерывно получать актуальные данные о влагосодержании атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-35-00607). Анализ данных приемных станций GPS произведен при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00637).

-
- [1] Дроздов О. А. и др. Климатология. (Л.: Гидрометеиздат, 1989).
 [2] Alber C. et al. Geophysical Research Letter. **27**, № 17. P. 2661. (2000).
 [3] Niell A. E. J. of Geophysical Research: Solid Earth. **101**, № B2, P. 3227. (1996).

- [4] Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites The use of artificial satellites for geodesy. 1972, P. 247.
 [5] Solheim F. S. et al. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. **104**, № D8, P. 9663. (1999).

Sensing atmospheric water vapor content using received GNSS signals

I. A. Nesterov^a, N. A. Tereshin^b

*Department of Atmospheric Physics, Faculty of Physics,
 M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^ania2002@yandex.ru, ^bnikita.tereshin@gmail.com*

This article describes the technique for estimating integrated water vapor content of the atmosphere by analyzing received signals of satellite navigation systems. Computed data series of integrated water vapor content are compared with NCEP reanalysis data and AERONET photometer measurements.

PACS: 42.68.Ge, 92.60.Jq

Keywords: GNSS, GPS, integrated water vapor, total precipitable water, tropospheric delay.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Нестеров Иван Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-15-41, e-mail: nia2002@yandex.ru.
2. Терешин Никита Алексеевич — аспирант, e-mail: nikita.tereshin@gmail.com.