

УДК 629.056.8

Mapping of Tropospheric Delay of GLONASS/GPS Signals with use Satellite Remote Sensing Data of the Atmosphere

Valentin B. Kashkin* and Aleksandr O. Klykov

Siberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 19.07.2014, received in revised form 14.08.2014, accepted 28.09.2014

The estimation of the tropospheric delay based on satellite remote sensing data of the atmosphere is discussed. A technique for calculating and plotting of tropospheric delay maps is proposed. The winter and summer maps of delay covering large areas are given. Wet component of the tropospheric delay is distributed unevenly throughout the study area and varies considerably during the day.

Keywords: GLONASS / GPS signals, vertical profiles of troposphere, maps of the tropospheric delay.

Построение карт тропосферной задержки сигналов ГЛОНАСС/GPS по данным спутникового дистанционного зондирования атмосферы

В.Б. Кашкин, А.О. Клыков

Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Обсуждается оценка зенитной тропосферной задержки на основе данных спутникового зондирования атмосферы. Описана методика вычисления и построения карт тропосферной задержки. Получены карты задержки, охватывающие большие территории зимой и летом. Влажная составляющая тропосферной задержки распределена неравномерно по территории и существенно изменяется в течение дня.

Ключевые слова: сигналы ГЛОНАСС/GPS, вертикальные профили атмосферы, карты тропосферной задержки.

Введение

Основной проблемой при решении задач глобального спутникового позиционирования считают определение расстояния между спутником и наземным приемником [1]. Сложность заключается в том, что результатом измерения является псевдодальность, включающая реаль-

ное расстояние до спутника и погрешности, связанные с неточностью определения эфемерид и другими причинами. Серьезными источниками погрешности выступают дополнительные по сравнению со свободным пространством задержки сигналов в ионосфере и в нижней части атмосферы. Дополнительную задержку в ионосфере называют ионосферной задержкой. Дополнительную задержку в нижней, нейтральной части атмосферы (тропосфера, тропопауза и стратосфера) принято называть тропосферной задержкой. Величина задержки зависит от физических свойств атмосферы и от пути, который сигнал проходит через атмосферу.

В настоящее время для учета тропосферной задержки используют математические модели, которые прогнозируют значение задержки по наземным метеорологическим параметрам: температуре, влажности и давлению в точке приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2]. В тропосферной задержке выделяют сухую (гидростатическую) и влажную компоненты. Задержка, возникающая при прохождении сигнала в среде без учета водяного пара (сухая задержка), может быть определена с достаточной точностью. Задержку за счет водяного пара (влажную задержку), на которую приходится около 10 % от общей задержки, учесть сложнее, так как водяной пар в тропосфере распределен неравномерно и крайне изменчив.

Для более точного определения тропосферной задержки можно использовать данные о вертикальных профилях тропосферы, получаемые с помощью спутникового дистанционного зондирования атмосферы Земли [2].

Материалы и методы исследования

Принцип работы систем глобального спутникового позиционирования основан на определении расстояния от космического аппарата до наземного приемника. Фактически измеряют время, за которое радиоволна проходит путь. В результате получаем не реальное расстояние R , а псевдодальность PR [1]:

$$PR = R + \delta t + d_{\text{ион}} + d_{\text{троп}} + \varepsilon, \quad (1)$$

где $d_{\text{ион}}$ – задержка в ионосфере; $d_{\text{троп}}$ – задержка в тропосфере; δt – разность хода часов на спутнике и приемнике; ε – прочие погрешности.

Величина тропосферной задержки зависит от температуры, давления, содержания водяного пара в столбе нижней атмосферы и от угла возвышения спутника относительно приемника. В случаях, когда угол возвышения равен 0° , говорят о зенитной тропосферной задержке (ЗТЗ).

Скорость распространения радиоволн c и показатель преломления n нейтральной атмосферы связаны с температурой T , давлением p и парциальным давлением водяного пара e в этой среде соотношениями [3]:

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad n = 1 + \frac{77,64}{T} \times \left(p + \frac{4810 \times e}{T} \right) \times 10^{-6}, \quad (2)$$

где c_0 – скорость света в вакууме, м/с; T – температура, К; p и e выражены в гПа.

Пусть электромагнитная волна проходит одинаковый путь от точки z_1 до точки z_2 в среде и в вакууме. Так как скорость в среде меньше, чем в вакууме, то волна в среде отстанет на время Δt :

$$\Delta\tau = \int_{z_1}^{z_2} \frac{n}{c_0} dz - \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{c_0} dz = \frac{1}{c_0} \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz. \quad (3)$$

Тропосферная задержка, выраженная в единицах расстояния:

$$\Delta z = \int_{z_1}^{z_2} (n - 1) dz. \quad (4)$$

Разобьем тропосферу на изобарические слои, определим показатель преломления среды n_i для каждого слоя и оценим зенитную задержку Δl_i в i -м слое толщиной l_i как

$$\Delta l_i = l_i (n_i - 1),$$

величина n_i определяется по формуле (2), входящее в неё парциальное давление водяного пара e_i вычисляется как

$$e_i = 6,1070 \times 10^{\frac{7,665 \times t}{243,33 + t}} \times U_i / 100, \quad (5)$$

где t – средняя температура, °C в слое и U_i – средняя относительная влажность слоя, %.

Просуммировав задержки во всех слоях, мы получим полное значение зенитной тропосферной задержки.

Очевидно, что для использования этого метода расчета необходимо знать метеопараметры тропосферы на различных высотах. Источником данных о вертикальных профилях тропосферы служат искусственные спутники Земли, например, космические аппараты серии NOAA (США).

Вертикальный профиль атмосферы – способ представления данных об атмосфере, где данные представлены «слоями» по высоте. Вертикальные профили обычно содержат такую информацию, как влажность, температура, направление и скорость ветра, высота над уровнем моря [4].

Приборы ATOVS регистрируют интенсивность собственного излучения Земли в отдельных участках полос поглощения углекислого газа и водяного пара в инфракрасном диапазоне и в радиодиапазоне. Возбуждение линий или полос в спектрах газов зависит от параметров состояния атмосферы (температуры, давления, концентрации поглотителя). Это приводит к тому, что в каждом спектральном интервале излучение разных слоев атмосферы имеет разный удельный вес, и потому вклад уходящего излучения отдельных слоев атмосферы в различные участки спектра неодинаков. Внутри определенной полосы поглощения существуют интервалы, каждый из которых соответствует преимущественно излучению одного более или менее узкого изобарического слоя атмосферы. Восстановление вертикальных профилей осуществляется путем решения обратной задачи. Прибор ATOVS выдает температуру, влажность, направление и скорость ветра, привязанные непосредственно не к высоте, а к изобарическим уровням [5-7].

В СФУ данные со спутников NOAA и комплекса ATOVS принимаются станцией Алиса™ [8], однако получаемые таким образом данные покрывают только часть территории России и ближнего зарубежья.

Глобальная система сбора данных (GDAS) Air Recourse Laboratory NOAA (ARL) осуществляет обработку и хранение данных о состоянии атмосферы по всему миру [9]. Ее основу составляют данные ATOVS.

Данные хранятся с пространственным разрешением 1° по широте и долготе и временной плотностью 3 ч. Сайт ARL предоставляет ограниченную возможность расшифровки данных для определенных координат и времени, а также данные в архивированном виде. Спецификация формата архивных файлов предоставляется на сайте, но программное обеспечение для их чтения не дается [10].

Сайт ARL позволяет загрузку как недельных архивов, охватывающих весь мир (с плотностью данных около 700 мегабайт на неделю измерений), так и «отрезания» части архива по координатам или времени.

На языке программирования Python были реализованы алгоритмы расчета ЗТЗ на основе формул (2, 4, 5). С использованием особенностей формата архивных файлов GDAS была написана программа, позволяющая извлекать профили атмосферы из этих архивов, охватывающих большие площади.

На основе этих программных продуктов возможно построение карт ЗТЗ на выбранную территорию с пространственным разрешением 1° по широте и долготе. Для визуализации полученных вычислений использовали программное обеспечение Surfer-8.

Результаты и их обсуждение

В работе использованы данные архивов GDAS за январь и июнь 2014 г. для северного полушария. На рис. 1 представлены карты зенитной тропосферной задержки (КЗТЗ), включающие общую задержку, сухую составляющую и влажную составляющую задержки на территории по широте от 0° до 80° и от 70° до 110° по долготе за 29 января, 00:00 UTC.

На рис. 1 видно, что значение общей ЗТЗ в целом увеличивается с севера к экватору. Резкое уменьшение задержки в районе $30\text{--}40^\circ$ с.ш. объясняется наличием района, где высота над уровнем моря достигает 3-4 км и более. Значения сухой составляющей ЗТЗ распределены достаточно равномерно по площади, но здесь также заметна зависимость значения задержки от высоты местности. Влажная составляющая ЗТЗ растет при движении от северных широт к экватору. В это время в районах высокогорья и на севере влажная составляющая незначительна.

На рис. 2 изображена карта зенитной тропосферной задержки, охватывающая широту с 0° до 80° с.ш. и долготу с 70° до 110° в.д. за 29 июня 2014 г., 00:00 UTC.

В целом, летняя карта общей зенитной тропосферной задержки и карта сухой составляющей ЗТЗ похожи на зимнюю КЗТЗ. На карте влажной составляющей также заметно увеличение задержки при движении от севера к экватору, но задержка здесь больше, чем зимой.

Представляет интерес изменение значений зенитной тропосферной задержки на большой территории с течением времени. На рис. 3 показано, как изменилась ЗТЗ (включая полную задержку, сухую и влажную часть ЗТЗ) за 12 ч 29 июня 2014 г. на территории с 0° до 80° с.ш. и 70° до 110° в.д. Этот рисунок получен как разность карты зенитной тропосферной задержки в 00:00 UTC и карты ЗТЗ в 12:00 UTC. Следует отметить, что местное время, например, на меридиане 90° , соответствующее 00:00 UTC, в разных государствах равно 7 или 8 ч, а для 12:00 UTC – 19 или 20 ч. Таким образом, рис. 3 характеризует изменение ЗТЗ в дневное время.

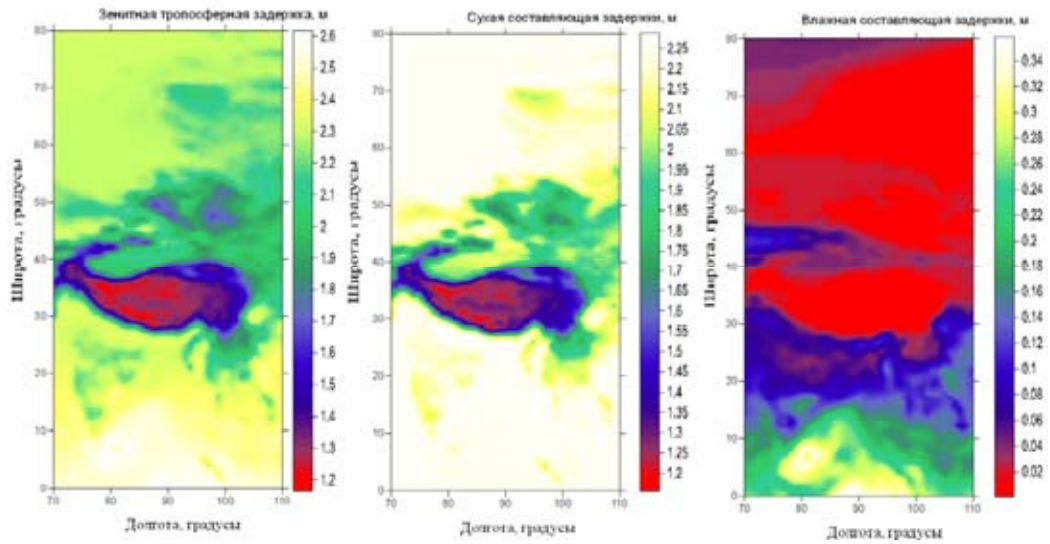


Рис. 1. Карта зенитной тропосферной задержки за 29 января 2014 г., 00:00 UTC

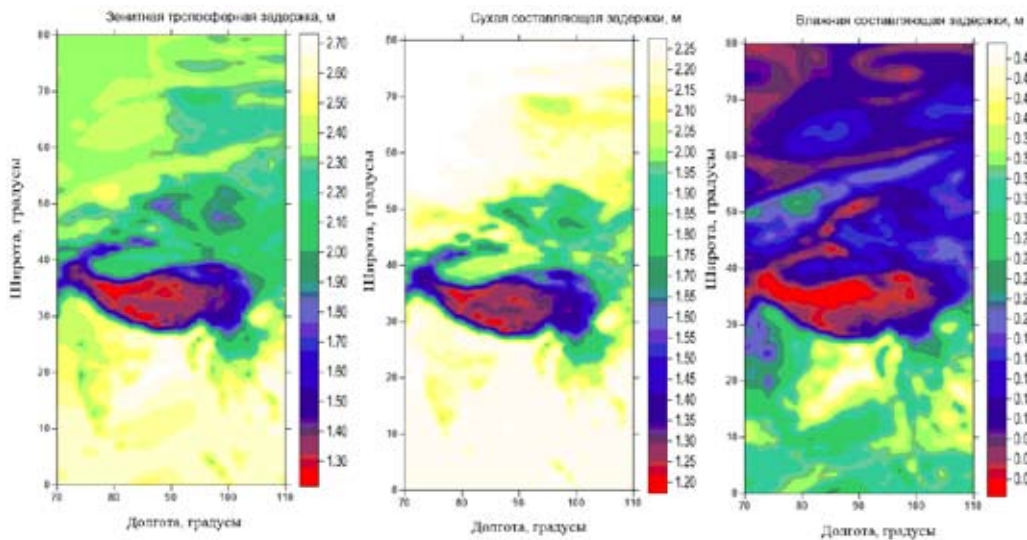


Рис. 2. Карта зенитной тропосферной задержки за 29 июня 2014 г., 00:00 UTC

Из рис. 3 следует, что на большой площади сухая составляющая задержки вблизи экватора в течение 12 ч практически не изменилась. На широтах от 15° до 60° местами утренняя задержка оказалась меньше вечерней на 1 см. В интервале широт 60° до 70° наблюдается «пятно», где утренняя задержка оказалась больше вечерней от 1 до 2,4 см. Исходя из (2) это можно объяснить повышением температуры к 19-20 ч местного времени.

Более существенные изменения на рис. 3 заметны для влажной составляющей ЗТЗ. В среднем на всей территории утренняя задержка оказалась больше вечерней на величину от 1 до 6 см, видны полосы, в пределах которых утренняя задержка меньше вечерней на 3-13 см.

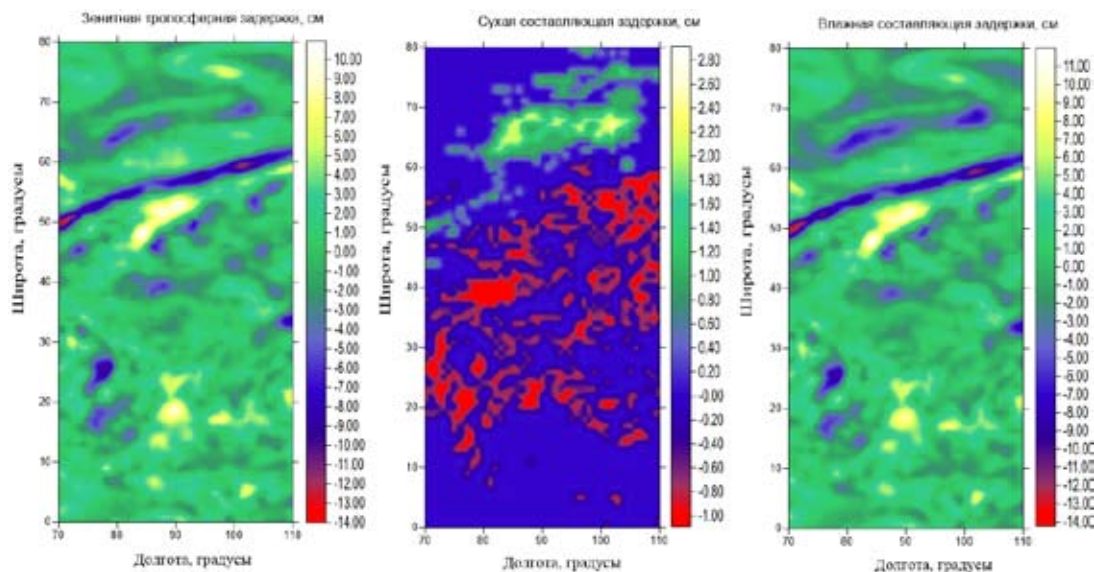


Рис. 3. Изменение зенитной тропосферной задержки 29 июня 2014 г.с 00:00 до 12:00 UTC

По-видимому, все это связано с появлением зон повышенной влажности в вечернее время и прохождением атмосферных фронтов.

Разность карты полной зенитной тропосферной задержки в 00:00 UTC и карты полной ЗТЗ в 12:00 UTC на рис. 3 трудно отличить от соответствующей карты разности влажных задержек, что свидетельствует о существенном вкладе влажной задержки в изменении ЗТЗ.

Заключение

В настоящее время для учета тропосферной задержки используют математические модели, которые прогнозируют значение задержки по метеорологическим параметрам, измеренным на Земле в точке приема сигналов ГНСС. В качестве альтернативы предлагается непосредственное вычисление ЗТЗ согласно (2, 4) с использованием распределения метеопараметров по высоте, полученных спутниковым дистанционным зондированием атмосферы. Метод позволяет не только определять ЗТЗ в точке приема сигналов ГНСС, но и строить карты зенитной тропосферной задержки.

В качестве примера построены карты ЗТЗ на область 0° - 80° с.ш. 70° - 110° в.д. Карты показывают наличие влияния географии местности на ЗТЗ. Видна зависимость значения задержки от высоты местности над уровнем моря. Тропосферная задержка увеличивается при движении от севера к экватору. Влажная составляющая задержки максимальна вблизи экватора. По сравнению с влажной сухая составляющая менее зависит от времени года. Задержка, особенно влажная её часть, может заметным образом изменяться в течение дня.

Список литературы

[1] Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

[2] *Кашкин В.Б., Владимиров В.М., Клыков А.О.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 5. С. 37-42.

[3] *Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г.* Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 496 с.

[4] *Седунов Ю.С.* Атмосфера: Справочное издание. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.

[5] *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 254 с.

[6] NOAA TOVS and ATOVS. URL: http://www.class.ngdc.noaa.gov/data_available/tovs_atovs/index.htm

[7] *Кондратьев К.Я.* Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.

[8] Каталог станций приёма спутниковой информации компании «СканЭкс». URL: <http://scanex.ru/ru/stations>

[9] EMC: Global Data Assimilation Group Documentation. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas/>

[10] Global Data Assimilation System (GDAS1) Archive Information. URL: <http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>