

## Определение влажной тропосферной задержки по данным радиометра водяного пара в неблагоприятных погодных условиях

© В. Ю. Быков, Г. Н. Ильин, В. Г. Стэмповский, А. М. Шишкин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Повышение точности позиционирования на основе использования радиосигналов навигационных спутников предусматривает решение задачи оперативного учета тропосферной задержки радиосигнала при прохождении атмосферы. Из существующих способов определения влажной компоненты задержки радиосигнала выделяется метод дистанционного зондирования тропосферы при помощи радиометра водяного пара как наиболее подходящий для получения данных в режиме реального времени. Однако применение радиометра водяного пара затруднено в неблагоприятных метеорологических условиях. Предлагаемый в работе метод обработки результатов измерений, полученных с помощью радиометра водяного пара, позволяет уменьшить зависимость результатов измерений от внешних условий.

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система, тропосферная задержка радиосигнала, радиометр водяного пара, влажная тропосферная задержка, яркостная температура атмосферы.

### Введение

Основным фактором, влияющим на точность влажной тропосферной задержки (ВТЗ), оцениваемой из радиометрических измерений, является присутствие жидких осадков [1]. Выпадение осадков приводит к тому, что они в виде водяных капель или снега и льда задерживаются на элементах конструкции радиометра водяного пара (РВП) и вносят существенные искажения в измеряемые величины яркостной температуры излучения атмосферы, на основе которых производится оценка текущих значений ВТЗ [2]. На время воздействия осадков данные, регистрируемые РВП, становятся недостоверными. Общий объем потерянных данных вследствие воздействия неблагоприятных метеофакторов может достигать 25 % на годовом интервале.

## Модель накопления и удаления осадков

Для учета неблагоприятных погодных условий предложена модель влияния осадков на показание РВП. Согласно этой модели искажение данных происходит из-за оседания водяных капель на поверхности зеркала и теплоизолирующей панели, закрывающей рупорно-линзовые антенны. В РВП встроена система удаления водяных капель с элементов конструкции, поэтому одновременно с накоплением осадков происходит процесс их удаления (высыхание или стекание с элементов конструкции РВП). Данный процесс с учетом конструктивных особенностей РВП и параметров системы осушения отражен в алгоритме расчёта накопленных осадков.

Намокание начинается с момента начала выпадения осадков, фиксируемого штатным датчиком дождя. При этом воздействие намокания на результаты работы РВП начинается лишь с накоплением некоторого минимального количества водяных капель. В предложенном алгоритме коррекции ВТЗ учитывается момент времени, когда накопленные осадки достигают заданного порога включения коррекции ВТЗ. Учитывается также и достижение насыщения, после чего значение количества накопленных осадков стабилизируется на максимально возможном пороговом уровне (1).

$$R_i = R_{i-1} + \begin{cases} r_i \times dt, & \text{если } R_{i-1} < R_{\max} \\ 0, & \text{если } R_{i-1} \geq R_{\max} \end{cases} - \begin{cases} p_i \times dt, & \text{если } R_{i-1} > 0 \\ 0, & \text{если } R_{i-1} \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $R_i$  — текущее накопленное количество осадков;  $r_i$  — интенсивность выпадения осадков;  $p_i$  — интенсивность стекания-высыхания осадков;  $dt$  — величина интервала усреднения;  $R_{\max}$  — максимально возможное накопленное количество осадков.

## Коррекция расчетных значений ВТЗ с учетом осадков

Коррекция вычисленного, согласно используемой математической модели [2], значения ВТЗ сводится к сравнению скорости изменения ВТЗ (2) с максимально возможным значением для выбора корректирующего действия. В свою очередь, максимально возможное значение скорости изменения ВТЗ выбирается с учетом влияния осадков (3). Если количество осадков с учетом выпадения и высыхания стало больше минимального значения, то включается алгоритм коррекции вычисленного значения ВТЗ.

$$V_i^{wtd} = \frac{wtd_i - wtd_{i-1}}{dt}, \quad (2)$$

$$V_i^{\max} = \begin{cases} V_r^{\max}, & \text{если } R_i > R_{\min} \\ V_{nr}^{\max}, & \text{если } R_i \leq R_{\min} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $R_i$  — текущее накопленное количество осадков;  $R_{\min}$  — минимальное количество осадков, оказывающих влияние на определение ВТЗ;  $wtd_i$  — текущее значение ВТЗ по данным РВП;  $V_r^{\max}$  — максимально возможная ско-

рость изменения ВТЗ при наличии осадков;  $V_{nr}^{\max}$  — максимально возможная скорость изменения ВТЗ при отсутствии осадков.

Коррекция искаженного значения ВТЗ по последнему допустимому значению самая простая и малоэффективная, поэтому используется более сложный алгоритм с учетом первых производных измеряемых параметров (4).

$$WTD_i = \begin{cases} wtd_i, & \text{если } |V_i^{wtd}| < V_i^{\max} \\ WTD_{i-1} + W_+, & \text{если } |V_i^{wtd}| \geq V_i^{\max} \cap V_i^{wtd} \geq 0 \\ WTD_{i-1} + W_-, & \text{если } |V_i^{wtd}| \geq V_i^{\max} \cap V_i^{wtd} < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $WTD_i$  — текущее скорректированное значение ВТЗ;  $W_+$  — минимальное возрастание ВТЗ при корректировке;  $W_-$  — минимальное убывание ВТЗ при корректировке.

Алгоритм коррекции ВТЗ записан на языке выражений, используемом в анализаторе временных рядов [3].

### Применение алгоритма коррекции ВТЗ

Качество работы разработанного алгоритма можно оценить путём сравнения полученных с его помощью «скорректированных» значений ВТЗ со значениями опорного ряда, который формируется в результате обработки сигналов ГНСС [4]. Количественные оценки работы алгоритма были получены на основе вычисления СКО разностей опорного ряда ВТЗ ГНСС и ВТЗ РВП и ВТЗ РВП после коррекции данных. Предварительно все данные были усреднены на интервале 5 мин.

На интервале наиболее сильных осадков с 19:00 8 июля до 04:00 9 июля 2016 г. (рис. 1) СКО разностей сигналов опорного ряда при сравнении

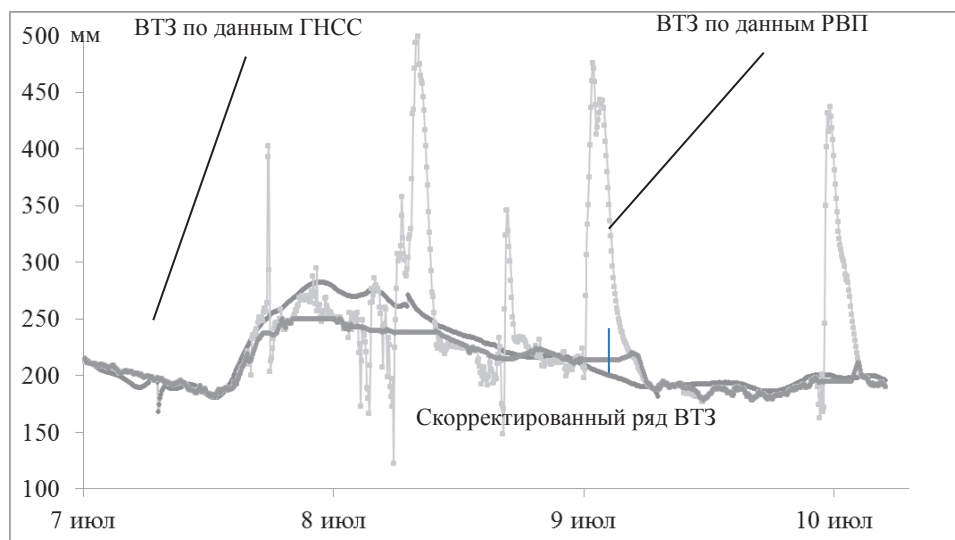


Рис. 1. Ряды ВТЗ: ГНСС, исходный ряд и «скорректированный»

с исходными и скорректированными данными составили соответственно 89.7 мм и 8.8 мм.

Таким образом, применение алгоритма коррекции ВТЗ позволило сохранить оценку текущих значений ВТЗ с удовлетворительной точностью (СКО). В противном случае значения ВТЗ в пределах интервала выпадения осадков пришлось бы исключить как неприемлемые по точности.

### **Адаптация алгоритма коррекции ВТЗ**

В алгоритме коррекции ВТЗ важнейшую роль играет набор коэффициентов, которые приходится определять эмпирически. Поскольку а priori для значений коэффициентов нет никаких отправных точек, поиск осуществляется простым перебором. Учитывая количество настраиваемых коэффициентов, для поиска подходящего множества значений был доработан интерпретатор языка выражений [3], что позволило частично автоматизировать поиск. Процедура поиска заключается в том, что выбирается интервал времени наблюдений, который должен характеризоваться некоторой стабильностью погодных условий. На этом интервале времени определяется ВТЗ согласно математической модели и в период выпадения осадков ВТЗ корректируется в соответствии с предложенным алгоритмом коррекции. Далее, рассчитанное и скорректированное, если потребовалось, значение сравнивается с данными используемого опорного ряда, в данном случае — это ВТЗ, определённая на основе данных ГНСС. Сумма расхождений вычисленных значений и значений из опорного ряда на выбранном интервале дают целевую функцию (5) для формирования оптимизационной задачи определения коэффициентов алгоритма коррекции ВТЗ.

$$\sum_{i=1}^n (WTD_i^{WVR} - WTD_i^{GNSS})^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $WTD_i^{WVR}$  — оценка ВТЗ для  $i$ -го момента времени по данным РВП;  $WTD_i^{GNSS}$  — оценка ВТЗ для  $i$ -го момента времени по данным ГНСС.

В настоящее время задача решается простым перебором.

### **Заключение**

Представленный алгоритм коррекции ВТЗ пригоден для практического применения, однако не претендует на роль универсального средства.

Развитие метода коррекции ВТЗ предполагает глубокий анализ накопленного статистического материала для выявления зависимости ВТЗ от климатических особенностей наблюдательного пункта, времени года, темпа регистрации измерений, используемого усреднения исходных данных и др.

### **Литература**

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 210–215.

2. *Ilyin G. N., Troitsky A. V.* Determining the Tropospheric Delay of a Radio Signal by the Radiometric Method // Radiophysics and Quantum Electronics. — September 2017. — Vol. 60, Issue 4. — pp. 291–299. — DOI:10.1007/s11141-017-9799-6.

3. *Стэмповский В. Г.* Анализ больших рядов наблюдений // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2012. — Вып. 23. — С. 281–287.

4. *Гаязов И. С., Суворкин В. В., Курдубов С. Л., Пшенкин В. С.* Новая версия программного пакета GRAPE для уравнивания фазовых наблюдений ГНСС // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2013. — Вып. 27. — С. 414–418.

## **Determination of Tropospheric Wet Delays in Unfavorable Weather Conditions Using the Water Vapor Radiometer**

**V. Y. Bykov, G. N. Ilin, V. G. Stempkovskiy, A. M. Shishikin**

GNSS positioning accuracy can be improved if the problem to measure and take into account tropospheric delays online is solved. The method of sensing the troposphere remotely with a water vapor radiometer is the only way to obtain the required data in real time. However, it is difficult to use the water vapor radiometer in unfavorable meteorological conditions. The proposed method of analyzing the measurement data obtained by the water vapor radiometer makes it possible to reduce the dependence of the measurement results on external conditions.

**Keywords:** global navigation satellite system (GNSS), tropospheric radio signal delay, water vapor radiometer, wet tropospheric delay, brightness temperature of the atmosphere.