

Опыт практического использования радиометра водяного пара в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ»

© У. С. Вахрушева, Л. П. Драгайло, А. А. Чигвинцев

ВСФ ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Иркутск, Россия

Реферат

Для решения задач прецизионной навигации и других прикладных задач (например, трансляции меток точного времени по трансатмосферному каналу связи, решение задач радиоастрономии, обработка и анализ сигналов радиолокационных средств космического базирования и пр.) погрешность измерений, вызванная тропосферной задержкой, может оказаться весьма существенным негативным фактором.

На территории Восточно-Сибирского филиала развернут и успешно эксплуатируется модернизированный метеорологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных спутников, прежде всего спутников системы ГЛОНАСС. В состав указанного комплекса функционально входит радиометр водяного пара, позволяющий в том числе оценивать ослабление навигационного сигнала в тропосфере.

Для получения необходимой точности работы радиометра водяного пара необходимо выполнять калибровку его высокочастотного тракта методом «вертикальных разрезов» атмосферы.

В процессе эксплуатации радиометра водяного пара выяснено, что особенности его географического положения (возвышение над городом), а также близость к большим водным массам Иркутской гидроэлектростанции накладывают ограничения на азимут проведения калибровки.

В процессе эксплуатации проводится непрерывное сравнение значений влажностной тропосферной задержки, измеряемой радиометром водяного пара, и значений, полученных в результате обработки глобальных ГНСС-данных. Полученные таким образом невязки позволяют проводить оперативный мониторинг состояния радиометра водяного пара и качества измерений.

Ключевые слова: РВП, тропосфера, тропосферная задержка, поглощение радиосигнала, радиометр водяного пара, калибровка, ГНСС.

Контакты для связи: Вахрушева Ульяна Сергеевна (uvakhrusheva@mail.ru), Драгайло Лия Павловна (ldragajlo@mail.ru).

Для цитирования: Вахрушева У. С., Драгайло Л. П., Чигвинцев А. А. Опыт практического использования радиометра водяного пара в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 24–28.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.24-28>

Practical Use of the Water Vapor Radiometer in the East Siberian Branch of FSUE «VNIIFTRI»

U. S. Vakhrusheva, L. P. Dragailo, A. A. Chigvintsev

East Siberian branch of the Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radioengineering», Irkutsk, Russia

Abstract

To solve problems of precision navigation and other applied tasks (for example, broadcasting precise time stamps over a transatmospheric communication channel, solving radio astronomy problems, processing and analyzing signals from space-based radar equipment, etc.), the measurement error caused by the tropospheric delay can be a very significant negative factor.

On the territory of the East Siberian Branch of the FSUE VNIIFTRI, a modernized metrological complex for evaluating the energy characteristics of navigation satellite signals, primarily GLONASS system satellites, has been deployed and it has been successfully operating. The specified complex functionally includes a water vapor radiometer, which allows, among other things, to evaluate the attenuation of the navigation signal in the troposphere.

To obtain the required accuracy of the water vapor radiometer, it is necessary to calibrate its high-frequency path using the method of “vertical cuts” of the atmosphere.

During the operation of the water vapor radiometer, it was found that the features of its geographical location (elevation above the city), as well as its proximity to large water masses of the Irkutsk hydroelectric power station, impose restrictions on the azimuth of the calibration.

During operation, a continuous comparison of the wet tropospheric delay is carried out, measured by a water vapor radiometer, and the values obtained as a result of global GNSS processing. The residuals obtained in this way allow monitoring the operating mode of the water vapor radiometer and the quality of measurements.

Keywords: WVR, troposphere, tropospheric delay, ZWD, ZHD, ZTD, calibration factors, GNSS.

Contacts: Ulyana S. Vakhrusheva (uvakhrusheva@mail.ru), Liya P. Dragailo (ldragajlo@mail.ru).

For citation: Vakhrusheva U. S., Dragailo L. P., Chigvintsev A. A. Practical use of the water vapor radiometer in the East Siberian branch of FSUE “VNIIFTRI” // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 24–28.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.24-28>

Введение

В Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» развернут и эксплуатируется модернизированный метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных спутников ([Завгородний и др., 2016](#)), основу которого составляет зеркальная антенна с диаметром зеркала 12 м. Комплекс предназначен для оценки спектральных и мощностных характеристик навигационных сигналов ГНСС «ГЛОНАСС». Кроме того, данные, получаемые с комплекса, позволяют решать такую важную прикладную задачу, как восстановление формы амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройства навигационного космического аппарата ([Завгородний и др., 2021](#)). Для решения указанной задачи используются данные, получаемые от радиометра водяного пара (РВП), а именно данные об ослаблении радиосигнала на трассе его распространения.

Образец РВП (рис. 1) изготовлен в ИПА РАН и предназначен для измерения радиояростной температуры атмосферы (РЯТ) на двух частотах 20.7 ± 0.25 ГГц и 31.40 ± 0.25 ГГц (каналы А и Б РВП) с последующим формированием следующих выходных параметров:

- ослабление радиосигнала на двух указанных частотах на луче поля зрения, Нп;
- влагосодержание (влагозапас) — интегральное содержание водяного пара в столбе атмосферы единичного сечения — Q , г/см²;
- водосодержание (водозапас), т. е. суммарное содержание жидко-капельной влаги водяного пара — W , кг/м²;
- влажностная тропосферная задержка сигнала — ВТЗ, мм.

Ослабление радиосигнала, измеряемое РВП, пересчитывается на рабочие частоты ГНСС «ГЛОНАСС» по известной модели ([Liebe, 1997](#)).

Очевидно, что результаты работы метрологического комплекса ВНИИФТРИ во многом зависят от точности измерений РВП и стабильности его метрологических характеристик на длительных интервалах времени.

Таким образом, ставится задача контроля за точностью формирования выходных параметров РВП на межповерочном интервале, составляющем два года. Исходной информацией в РВП для вы-

числения выходных параметров является измеряемая радиояростная температура. Оценивать точность (СКО ΔT) измерения РЯТ радиометром водяного пара на межповерочном интервале можно косвенным способом — по точности формирования влажностной тропосферной задержки (ВТЗ), пользуясь известным соотношением ([Ильин, 2018](#)):

$$\Delta T \sim 0.2\Delta L.$$

Точность расчета ВТЗ по данным РВП в нашем случае возможно оценить сравнением с аналогичными данными, получаемыми международной службой IGS ([NASA EOSDIS CDDIS DAAC](#)). Точность расчета тропосферной задержки (суммы гидростатической и влажностной компонент), декларируемая службой IGS, составляет ~4 мм, что позволяет использовать ряд данных IGS в качестве опорного.

Определение и учёт гидростатической («сухой») компоненты тропосферной задержки на практике достаточно успешно производится за счет использования соответствующих моделей. В настоящее время наибольшее применение нашли модели Саастамойнена ([Askne, Nordius, 1987](#)) и Мендеса-Павлиса ([Mendes, 1999](#)). Погрешность расчета гидростатической компоненты тропосферной задержки находится на уровне ~1 мм.

Перечисленные модели также описывают и влажностную компоненту тропосферной задержки, рассчитываемую на основе приземных метеопара-



Рис. 1. Радиометр водяного пара на полигоне ВСФ ФГУП «ВНИИФТРИ»

метров. Однако практическое применение подобных моделей затруднено ввиду их относительно невысокой точности, обусловленной большой пространственно-временной и особенно сезонно-суточной вариабельностью давления, влажности и температуры нижнего слоя тропосферы. Непрогнозируемое действие этих факторов дает большие остаточные погрешности оценки ВТЗ (сантиметрового уровня в зените), особенно при использовании указанных моделей на больших зенитных углах.

Более высокой точностью и оперативностью определения влажностной компоненты тропосферной задержки обладают радиометры водяного пара. Совместное использование сухой компоненты тропосферной задержки, вычисленной с помощью модели, и ВТЗ, формируемой РВП, позволяет получить оценку суммарной или полной зенитной тропосферной задержки (ПТЗ) (YiBin et al., 2016).

В работе рассматриваются результаты мониторинга технического состояния РВП и оценка точности его измерений на основе сравнения значений ПТЗ, полученных по данным РВП и ГНСС в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ».

Практические результаты

Образец РВП на пункте размещения работает круглосуточно на протяжении более 1000 сут. За указанный интервал времени относительные изменения коэффициента усиления СВЧ-блоков РВП на протяжении первого года работы составляли ~30 %, затем наступил период относительной стабилизации. С июня 2021 г. по настоящее время изменения коэффициента усиления в каналах РВП составили 8 % и 11 % соответственно. Методика расчёта РЯТ принимаемого сигнала в значительной степени парирует данные вариации, но не исключает требования регуляторной калибровки РВП с целью поддержания точности измерения РЯТ на требуемом уровне. Регулярная калибровка РВП позволяет компенсировать последствия дрейфа коэффициента усиления СВЧ-блоков РВП, приводящие к изменению шумовой температуры СВЧ-блоков и, соответственно, значений калибровочных коэффициентов (Ильин, 2018). Калибровка РВП проводится известным методом вертикальных разрезов атмосферы. По результатам обработки «разрезов» рассчитываются калибровочные коэффициенты для обоих каналов РВП, с учетом которых вычисляются текущие значения параметров атмосферы. Калибровка РВП выполняется регулярно при отсутствии облаков. Значения калибровочных коэффициентов заносятся в банк данных, что позволяет использовать их при вторичной обработке данных РВП, а также интегрально оценивать состояние РВП (точностные характеристики его выходных параметров) на временных интервалах.



Рис. 2. Ориентация РВП относительно сторон света

Полигон ВНИИФТРИ расположен на южной окраине г. Иркутска на небольшой возвышенности, на востоке от него находится Иркутское водохранилище (рис. 2). С целью оценки степени однородности атмосферы, которое необходимо для корректной калибровки РВП, была проведена серия разрезов в различных азимутах. На рис. 3 представлена зависимость амплитуды РЯТ на рабочих частотах РВП от азимутального угла на фиксированном угле места 30° . На рис. 4а и рис. 4б представлены аналогичные графики изменения калибровочных коэффициентов РВП на двух рабочих частотах. Из графиков видно, что южное направление является «благоприятным» для проведения

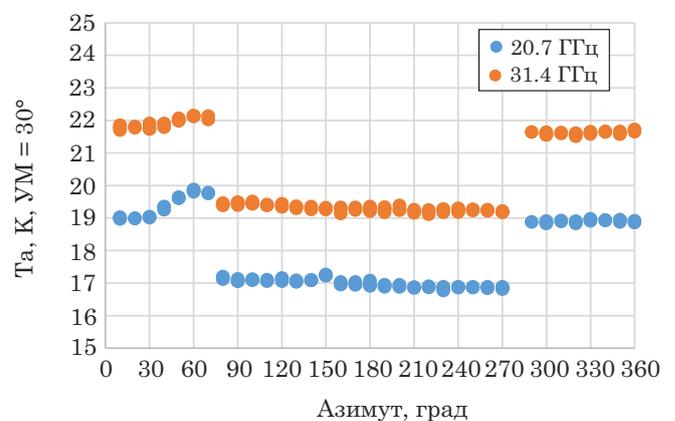


Рис. 3. Зависимость РЯТ на рабочих частотах РВП от азимута на угле места 30°

калибровки РВП, так как характеризуется минимальной РЯТ по сравнению с северным направлением.

Можно предположить, что азимутальная зависимость РЯТ и калибровочных сигналов обусловлена местоположением РВП, а именно возвышением над городом (+70 м), а также близостью к большим водным массам Иркутского водохранилища. На графиках отчётливо заметно резкое изменение калибровочных коэффициентов в тех точках азимута, где происходит переход между «благоприятной» и «неблагоприятной» зонами (рис. 4). Объяснить причины такого поведения калибровочных коэффициентов РВП пока не представляется возможным, требуются доказательные исследования.

Метрологические характеристики РВП проверяются один раз в два года при выполнении плановой поверки РВП как типа средств измерения. Поверка проводится с помощью низкотемпературного апертурного излучателя (Арсев и др., 2017). Результаты поверки в части оценки точности измерения РЯТ хорошо совпадают с аналогичными результатами, полученными методом разрезов.

Наличие на полигоне приёмников сигналов ГНСС позволяет проводить непрерывное сравнение значений влажностной тропосферной задержки, измеряемой РВП, и значений, полученных в результате обработки сигналов ГНСС-приёмников. Полученные таким образом невязки значений ПТЗ позволяют проводить оперативный мониторинг точности определения ПТЗ радиометром водяного пара.

С целью оценки технического состояния РВП на межповерочном интервале выполнялись следующие процедуры:

1) Мониторинг дрейфа коэффициентов усиления СВЧ-блоков РВП и вариации значений калибровочных коэффициентов РВП на длительных интервалах наблюдения;

2) Мониторинг значений среднеквадратического отклонения (СКО) и математического ожидания разности между значением тропосферной задержки, полученным в результате обработки ГНСС-измерений, и задержки, измеряемой РВП.

Изменчивость коэффициентов усиления СВЧ-блоков непрерывно контролируется — текущие отчёты, пропорциональные значениям коэффициента усиления блока записываются в файл данных РВП. В настоящее время отмечается медленный разнонаправленный дрейф коэффициента усиления со скоростями $\sim 6-7\%$ /год: рост в канале Б и убывание по амплитуде в канале А. Подобная динамика, но с противоположным знаком, прослеживается в изменении со временем значений калибровочных коэффициентов РВП.

Сравнение задержек, полученных средствами ГНСС и РВП показало хорошее совпадение при условии проведения своевременной калибровки.

В качестве примера на рис. 5 представлены значения ВТЗ ГНСС, ВТЗ РВП и их разности на интервале март 2023 г. ВТЗ ГНСС вычислялась как разность между данными полной тропосферной задержки ГНСС и гидростатической компоненты по Саастамойнену и ВТЗ, измеренными с помощью РВП. Шаг между соседними отсчетами составляет 5 мин. Имеющиеся пропуски в данных ГНСС не влияют на характер оценки точности сопоставления данных ГНСС и РВП. Различие значений ВТЗ на интервале анализа составляет -1.1 ± 4.7 мм.

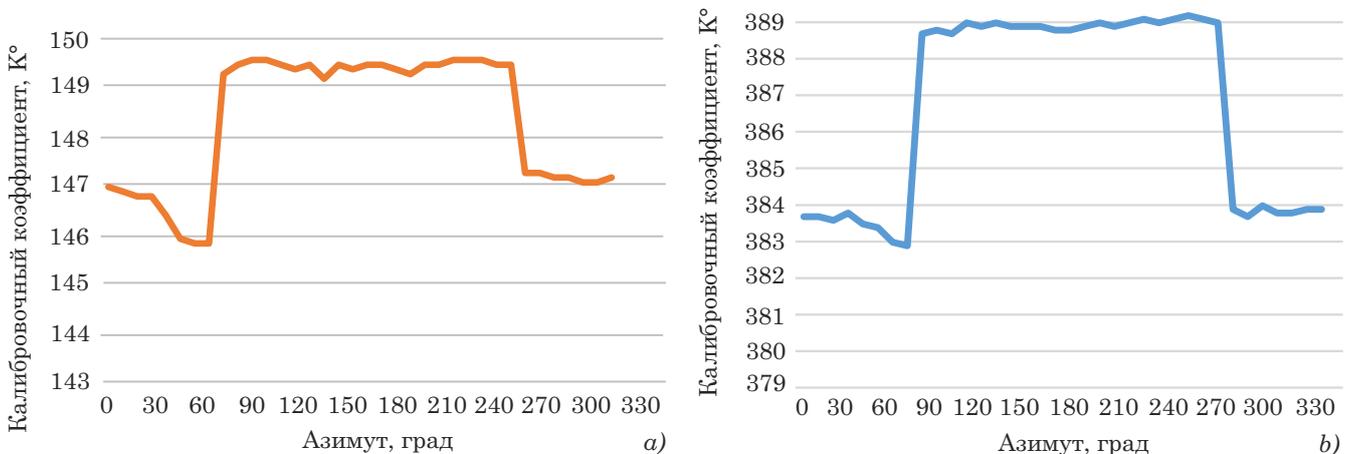


Рис. 4. Значения калибровочных сигналов в зависимости от азимута: а — канал 20.7 ГГц, б — канал 31.4 ГГц

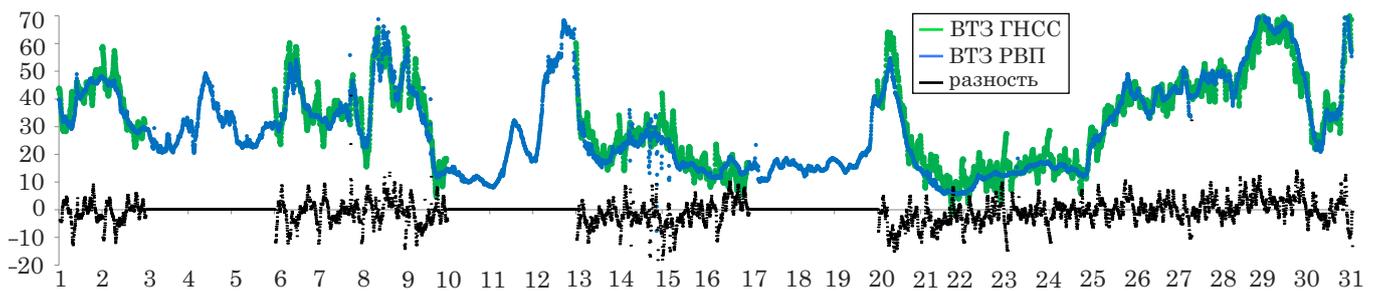


Рис. 5. 1–31 марта 2023 г. Значения VTЗ ГНСС, VTЗ РВП и их разность, мм

Приведенная оценка СКО разности значений VTЗ позволяет утверждать, что точность измерения РЯТ атмосферы радиометром водяного пара находится на уровне не хуже ~ 1 К, что соответствует заявленным метрологическим характеристикам прибора.

В летний период времени при исключении интервалов выпадения осадков, когда данные РВП некорректны, СКО разности значений возрастает до уровня 6–7 мм. При этом следует иметь в виду, что точность расчёта VTЗ по сигналам ГНСС также увеличивается.

Заключение

Опыт практического использования радиометра водяного пара показал, что прибор полностью удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям и может с успехом применяться для определения поглощения радиосигнала в атмосфере с точностями, соответствующими его заявленным метрологическим характеристикам.

Для контроля характеристик РВП на межповерочном интервале необходимо регулярно проводить калибровку разрезом атмосферы. Учёт результатов калибровки при обработке данных РВП позволяет компенсировать влияние дрейфа коэффициента усиления на шумовую температуру СВЧ-блоков РВП и поддерживать точность измерений РЯТ на требуемом уровне.

Процедура проведения калибровки требует учёта особенностей места расположения прибора. В условиях ВСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» оказалось обязательным определить оптимальное азимутальное направление для калибровки разрезом. Оказалось, что направление на юг даёт наилучшие значения калибровочных коэффициентов в части совпадения результатов измерений задержек средствами ГНСС и РВП. Использование значений калибровочных коэффициентов из «неблагоприятных» северных направлений приводит к

рассогласованию значений РВП и ГНСС до 9 мм, что неприемлемо при решении целевых задач.

Литература

- Арсавев И. Е., Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Юрчук Э. Ф. Радиометр водяного пара — средство измерения радиояростной температуры атмосферы // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 60–65.
- Завгородний А. С., Рябов И. В., Воронов В. Л. Метрологический комплекс оценки энергетических характеристик сигналов навигационных космических аппаратов ГНСС «ГЛОНАСС» // Альманах современной метрологии. 2016. № 7. С. 124–138.
- Завгородний А. С., Воронов В. Л., Рябов И. В. и др. О восстановлении формы амплитудной диаграммы направленности антенно-фидерного устройства навигационного космического аппарата по результатам наземных наблюдения. // Альманах современной метрологии. 2021. № 1. С. 35–43.
- Ильин Г. Н. Калибровочные сигналы радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 57–67. Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru> (дата обращения: 07.05.2023).
- Международная служба GNSS, данные ежедневных 30-секундных наблюдений. [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/1> (дата обращения: 07.05.2023) от NASA EOSDIS CDDIS DAAC, Гринбелт, Мэриленд, США.
- Askne J., Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data // Radio Sci. 1987. Vol. 22, Iss. 3. P. 379–386.
- Liebe H. J. MPM. An atmospheric millimeter-wave propagation model // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1989. Vol. 10, No. 6. P. 631–650.
- Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph.D. dissertation. Dept. of Geodesy & Geomatics Engineering Technical Report No. 199. University of New Brunswick, Canada. 1999. P. 353.
- YiBin Yao, Bao Zhang, Chao Qian Xu, et al. A global empirical model for estimating zenith tropospheric delay // Science China Earth Sciences. 2016. Vol. 59, Iss. 1. P. 118–128.