

## Калибровочные сигналы радиометра водяного пара

© Г. Н. Ильин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Постоянство калибровочных сигналов радиометра водяного пара (РВП) обеспечивает сохранение точности измеряемых величин на длительном интервале времени. В представленной работе обоснованы требования к точности измерения эквивалентной шумовой температуры калибровочных сигналов  $T_k$ . Приведены методы и результаты контроля текущих значений  $T_k$  на интервале эксплуатации РВП в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Рассмотрены возможные способы измерения  $T_k$ : с помощью внешнего широкоапертурного излучателя с известной температурой, по внутренним генераторам шума (согласованным нагрузкам), входящим в состав РВП, по результатам обработки регулярно проводимых вертикальных разрезов атмосферы. Показано, что технические решения, заложенные в конструкцию РВП, обеспечили поддержание требуемой точности калибровочных сигналов на более чем трехлетнем интервале эксплуатации РВП. Сравнение результатов измерения влажной тропосферной задержки с помощью РВП и по сигналам Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) подтверждает данный вывод.

**Ключевые слова:** радиометр водяного пара, атмосфера, радиояркая температура, калибровка, тропосферная задержка, ГНСС.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.57-67>

### Введение

Радиометр водяного пара (РВП) в настоящее время является единственным доступным высокоточным средством измерения в режиме реального времени радиояркой температуры излучения атмосферы (РЯТ), по результатам измерений которых рассчитываются текущие значения интегрального содержания водяного пара (интегрального влагосодержания, ИВС) и связанной с ним влажностной тропосферной задержки (ВТЗ). С помощью РВП также оценивается содержание конденсированной воды [1]. Стандартные измерения проводятся в зенитном направлении.

Результаты измерения текущих значений параметров тропосферы могут использоваться при решении ряда задач, в том числе в целях составления оперативных метеопрогнозов и для нужд высокоточного эфемеридно-вре-

менного обеспечения ГЛОНАСС-калибровки цифровых моделей территориального распределения ВТЗ [2–4].

РВП конструктивно состоит из двух радиометрических блоков (РБ) работающих на частотах 20.7 ГГц (канал А) и 31.4 ГГц (канал Б). Разрешающая способность РВП по отношению к измеряемым величинам определяется чувствительностью РБ к РЯТ. Чувствительность РБ к РЯТ при полосе частот СВЧ тракта РБ 500 МГц и шумовой температуре ~130 К (~250 К в канале Б) не превышает 0.03 К, что существенно ниже уровня температуры измеряемых сигналов и их вариаций, лежащих в диапазоне от единиц до десятков градусов.

В качестве калибровочного сигнала  $T_k$  в РБ используется суммарный шумовой сигнал стабилизированной по температуре волноводной согласованной нагрузки  $T_c$  и СВЧ приемной системы  $T_r$ , приведенный к входу антенной системы РБ. Сигнал  $T_r$  включает в себя шумы входного СВЧ тракта РБ и малошумящего усилителя (МШУ) [5]. Очевидно, что точность измерения РЯТ определяется точностью измерения калибровочных сигналов РБ и их нестабильностью во времени. В конструкцию РВП заложены технические решения, обеспечивающие постоянство каждой компоненты  $T_k$  на длительном интервале времени. В РБ имеются две термостатируемые нагрузки, находящиеся при разной температуре, что позволяет также использовать в качестве калибровочной ступеньки разностный сигнал нагрузок [6]. Применение относительно большого ( $T_k \approx 450\text{--}600$  К) по амплитуде сигнала полной мощности в качестве калибровочного сигнала имеет очевидные преимущества перед стандартной калибровкой по относительно малому (~5–20 К) разностному сигналу опорных согласованных нагрузок. Главное преимущество — шумы калибровочного сигнала не влияют на точность измерения малой по уровню (до ~3–6 К) температуры шума атмосферы. В результате на практике реализована чувствительность к РЯТ определяемая уровнем собственных шумов РБ.

Очевидно, что калибровочный сигнал должен сохранять постоянное значение на максимально большом (несколько лет) интервале времени. Меры, обеспечивающие выполнение данного требования, и полученные экспериментально результаты рассмотрены в последующем разделе данной работы. Достоинством метода калибровки с использованием собственных шумов МШУ в качестве компоненты калибровочного сигнала является возможность упрощения конструкции радиометрических блоков РВП за счет применения единственного опорного генератора шума (согласованной нагрузки генератора шума) и, соответственно, менее сложного СВЧ ферритового переключателя.

В работе обоснованы требования к точности измерения калибровочных сигналов  $T_k$ . Рассмотрены возможные способы измерения  $T_k$ : с помощью внешнего широкоапертурного излучателя с известной температурой, по внутренним генераторам шума (согласованным нагрузкам), входящим в состав РВП, и по результатам обработки вертикальных разрезов атмосферы. В качестве примера приведены результаты сравнения значений ВТЗ в обсер-

ватории «Светлое», полученные с помощью РВП и независимым способом — по сигналам спутников ГНСС. Ряд значений ВТЗ ГНСС использовался при сравнении результатов измерений РВП в качестве опорного ряда.

### Требования к точности измерения калибровочного сигнала

Значения РЯТ атмосферы  $T_a$  (К), рассчитываются следующим образом [5]:

$$T_a = \frac{V_a}{V_c} \cdot T_k - T_r, \quad (1)$$

где  $V_a = \gamma \cdot (T_a + T_r) \cdot G$ ,

$$V_c = \gamma \cdot T_k \cdot G = \gamma \cdot (T_c + T_r) \cdot G,$$

$V_c$ , мВ — отсчеты АЦП при подключенной к входу МШУ РБ волноводной согласованной нагрузки с температурой  $T_c$ ,

$V_a$ , мВ — отсчеты при подключении к входу МШУ сигнала антенны,

$T_k$ , К — эффективная температура шума калибровочного сигнала, подлежащая определению в процессе калибровки РБ,

$T_r$ , К — эффективная температура шума РБ, приведенная к входу антенной системы,

$T_c$ , К — эффективная температура шума «холодной» волноводной согласованной нагрузки,

$G$  — коэффициент усиления РБ,  $\gamma$ , мВ/К — масштабный коэффициент, зависящий от параметров тракта РБ.

Отсчеты  $V_a$ ,  $V_c$  снимаются с выхода усилителя постоянного тока квадратичного детектора радиометрического блока с частотой порядка 60 кГц. Усредненные на интервале ~6 с значения параметров записываются в исходный файл данных наряду со служебными данными [7].

Очевидно, что отношение  $\frac{V_a}{V_c}$  (и, соответственно, измеряемая величина  $T_a$ ) практически не зависит от вариаций коэффициента передачи радиометрического модуля.

Выражение (1) можно переписать в виде:

$$T_a = T_c - \left(1 - \frac{V_a}{V_c}\right) \cdot T_k. \quad (2)$$

Из (2) следует, что точность определения РЯТ в каналах РВП зависит от точности определения калибровочной константы  $T_k$  и составляет при ясной атмосфере летом, в среднем, в канале А (и Б):

$$\Delta T_a \sim 0.6(0.5) \cdot \Delta T_k. \quad (3)$$

В условиях ясной атмосферы наглядно проявляется зависимость РЯТ канала А РБ от ИВС ( $Q$ , г/см<sup>2</sup>). На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость РЯТ  $T_a$ , в зените от  $Q$ , построенная на основе данных РВП обсерватории «Бадары». Текущие значения ИВС определялись на основе данных обработки ГНСС сигналов [8]. Значительные отклонения РЯТ от основного массива точек вызваны присутствием жидких осадков и должны быть исключены

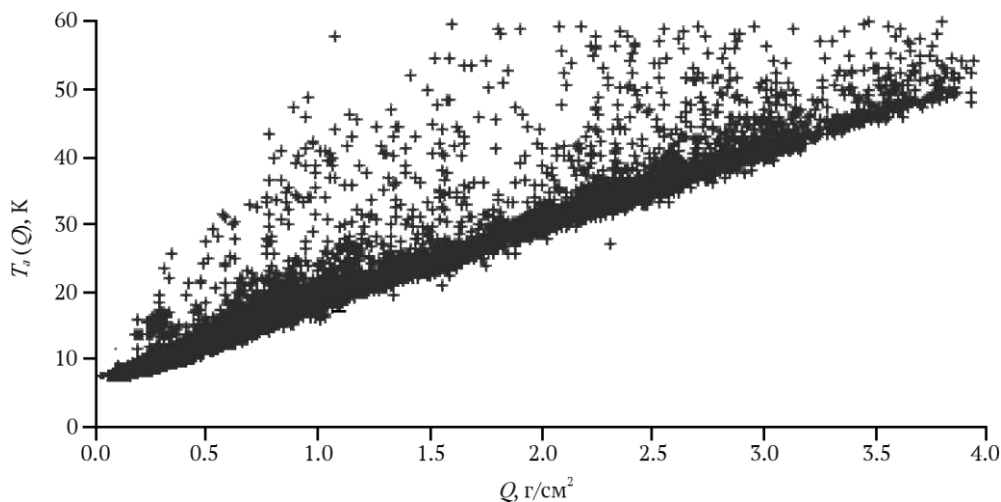


Рис. 1. Зависимость РЯТ атмосферы в зените (РБ канала А) от ИВС в условиях обсерватории «Бадары» на интервале 2017 г. Интервал осреднения данных — 30 мин

из рассмотрения. Тогда в отсутствие осадков зависимость  $T_a(Q)$  на рис. 1 может быть представлена в виде регрессионной линии, из уравнения которой следует:

$$\Delta T_a \sim 11.6 \cdot \Delta Q \quad (4)$$

Известно, что ВТЗ ( $L_w$ , мм) и ИВС ( $Q$ ) связаны соотношением [1, 9]:

$$\Delta L_w \sim 63 \cdot \Delta Q. \quad (5)$$

Соотношения (3–5) позволяют сформулировать требования к точности калибровки РВП  $\Delta T_k$ , которая должна выполняться на уровне  $\sim 1$  К, чтобы реализовать точность измерений ВТЗ (СКО) на уровне  $\sim 3$  мм.

### О стабильности калибровочного сигнала

Очевидно, что постоянство  $T_k$  зависит от постоянства температуры входного тракта и шумовой температуры МШУ. Стабильность температуры входного тракта обеспечивается двухуровневой системой температурной стабилизации узлов радиометрических блоков и температуры воздуха внутри контейнера [10]. Апертура рупорно-линзовых антенн закрыта радиопрозрачным теплозащитным экраном, обеспечивающим снижение теплового обмена с внешней средой аппаратуры, размещенной внутри контейнера. Потери сигнала в теплозащитном экране по результатам измерений оцениваются по уровню вносимого в шумовую температуру РБ сигнала, который составляет  $\sim 0.13$  К (эквивалентно ослаблению сигнала — 0.002 дБ).

Стабильность шумовой температуры МШУ радиометрических блоков определяется стабильностью рабочей температуры усилителя и постоянством напряжений (токов) питающих СВЧ приемный модуль. В [11] показано, что составляющая, обусловленная собственными шумами СВЧ приемно-

усилительного модуля сохраняется постоянной на межповерочном интервале (два года). Текущие значения шумовой температуры МШУ  $T_{пА}$  ( $T_{пБ}$  в канале Б) на его входе возможно оценить (и регулярно контролировать) по сигналам  $V4$  и  $V5$  ( $V6$  и  $V7$  в канале Б) двух коммутируемых волноводных нагрузок  $t_c$  и  $t_h$ , входящих в состав РБ, температура которых поддерживается постоянной на уровне  $t_c \approx 40$  °С и  $t_h \approx 45$  °С [11]:

$$T_{пА} = \frac{\beta \cdot T_{A2} - T_{A1}}{1 - \beta}, \quad (6)$$

где  $T_{A1}$ ,  $T_{A2}$  - температура излучения нагрузок  $t_c$  и  $t_h$ , пересчитанная к входу МШУ с учетом параметров СВЧ тракта,  $\beta = V4/V5$ .

Из (6) оценим погрешность определения шумовой температуры МШУ:

$$\Delta T_{пА} = \frac{\Delta \beta \cdot (T_{A2} - T_{A1})}{(1 - \beta)^2}. \quad (7)$$

При разности шумовых температур нагрузок  $\sim 5$  К отношение их сигналов в канале А составляет по результатам измерений на интервале 100 сут.:  $\beta_A \sim 0.98882 \pm 1.7 \cdot 10^{-5}$ . Подставив значения  $\beta_A$  в (7) получим оценку среднеквадратической погрешности  $\Delta T_{пА} \sim 0.7$  К. При увеличении разности температур до  $\sim 20$  К ( $t_c \approx 40$  °С и  $t_h \approx 60$  °С):  $\beta_A \sim 0.95665 \pm 2.1 \cdot 10^{-5}$ , а  $\Delta T_{пА} \sim 0.2$  К.

Таким образом, на интервале оценивания шумовая температура МШУ в канале А РВП сохраняет постоянное значение с относительной точностью  $\sim 0.5$  %, в канале Б  $\sim 1.3$  %.

### Методы контроля калибровочных сигналов РВП

Постоянство калибровочного сигнала РБ на протяжении эксплуатации РВП периодически контролировалось различными способами.

Измерение калибровочного сигнала может быть выполнено стандартным методом — по двум внешним сигналам с известной РЯТ. В качестве источника сигналов может быть использован криогенный широкоапертурный излучатель, представляющий собой панель с поглощающим радиоизлучение материалом, рабочая температура которого принимает фиксированные значения. Калибровка РВП с использованием криогенного широкоапертурного излучателя подробно представлена в [12, 13]. С его помощью проводились испытания в целях утверждения РВП в качестве типа средства измерения и получено свидетельство об утверждении типа средств измерений (RU.C/38.002.A № 60490). По результатам калибровки определены метрологические характеристики РВП. Точность измерения РЯТ (СКО) по результатам калибровки с помощью широкоапертурного излучателя составила  $\sim 1.2$  К.

Мониторинг текущих значений калибровочных сигналов РБ проводился известным методом вертикальных «разрезов» атмосферы [14, 15, 16]. Измерения проводились в условиях безоблачной атмосферы. При выполнении калибровки РВП «разрезом» рассчитывались значения оптической толщины  $\tau(\theta)$ , при различных положениях диаграммы направленности антенной си-

стемы РВП по угломестной координате. Диапазон зенитных углов  $\theta$  изменялся в пределах:  $-60^\circ-0^\circ-+60^\circ$ , с шагом  $5^\circ$  или  $10^\circ$ .

$$\tau_A(\theta) = \ln\left(\frac{T_{c,f_1}-T_{\text{eff}}}{T_{a,f_1(\theta)}-T_{\text{eff}}}\right), \quad (8)$$

где  $T_{a,f_1(\theta)}$  — РЯТ излучения атмосферы в канале А,  $T_{c,f_1}$  — эффективная температура излучения реликтового фона на рабочей частоте  $f_1$  канала А ( $f_2$  канала Б) РВП, рассчитываемая по формуле Планка [14],  $T_{\text{eff}}$  — средняя (взвешенная) температура атмосферы [1].

Текущие значения  $T_{\text{eff}}$  измерялись с помощью температурного профилера МТР-5. При отсутствии возможности прямых измерений  $T_{\text{eff}}$  обычно пользуются простейшей моделью расчета средней температуры атмосферы, построенной на основе усредненных данных радиозондовых наблюдений.

При обработке данных РВП обсерватории «Светлое» использовалась модель расчета зависимости  $T_{\text{eff}}$  от приземной температуры, построенная на основе результатов измерений температурного профилера МТР-5, полученные в обсерватории в 2014–2015 гг.

В условиях прозрачной атмосферы модель расчета  $T_{\text{eff}}$  заведомо обеспечивает требуемую точность расчета  $\Delta T_{\text{eff}}$  в пределах  $\pm 5$  К.

В приближении плоско-слоистой атмосферы, которое заведомо справедливо для диапазона изменения зенитных углов до  $85^\circ$ ,  $\tau(\theta)$  представляет линейную функцию вида:

$$\tau(\theta) = a \cdot x + b, \quad (9)$$

где  $x = 1/\cos(\theta)$ .

Коэффициенты в (9) определяются методом линейной регрессии. Коэффициент  $a = \tau(0)$  — оптическая толщина в зените.

Изменение значения калибровочного сигнала ( $T_k$ ) приводит к смещению графика по оси ординат. Находится величина  $T_k$ , при которой выполняется условие:

$$|\overline{b}| \leq 0.00001. \quad (10)$$

На рис. 2 приведен пример калибровки РВП в обсерватории «Светлое» 25 мая 2018 г. Регрессионное уравнение имеет вид:

$$\tau(\theta) = 0.0851 \cdot \sec(\theta) + 0.00001.$$

Усредненные результаты калибровки в обоих каналах РВП рассчитываются по восьми «разрезам» атмосферы, проводимым в одном цикле калибровки. Точность (СКО) определения  $T_k$  методом «разрезов» находится в пределах  $\sim(0.2-0.5)$  К, в зависимости от сезона и метеоусловий.

Калибровку РВП разрезом возможно проводить используя зависимость РЯТ атмосферы от угла места. Соответственно, при калибровке по РЯТ атмосферы находится значение  $T_k$ , при котором выполняется условие  $|\overline{b}| \approx T_{c,f_1}$ .

Метод калибровки разрезом имеет свои особенности, которые нужно учитывать при его использовании. В условиях прозрачной и «сухой» атмосферы в зимний период времени калибровка РВП «разрезом» позволяет получить

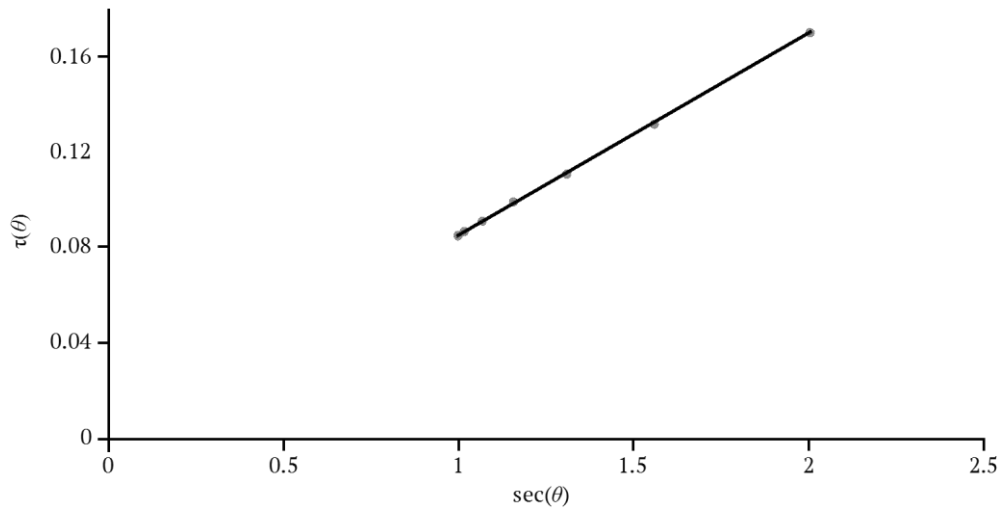


Рис. 2. Вид зависимости оптической толщины атмосферы от  $\sec(\theta)$

более точные результаты. В зимний период оба способа (по  $\tau(\theta)$  и РЯТ) калибровки дают близкие (в пределах  $\sim 0.2$ – $0.7$  К) значения  $T_k$ , а в летний период различие результатов может достигать  $\sim (1.5$ – $3)$  К.

В летний период с ростом ИВС атмосферы увеличивается  $\tau(\theta)$  и условие (10) выполняется при больших (по сравнению с «зимними») значениях  $T_k$ .

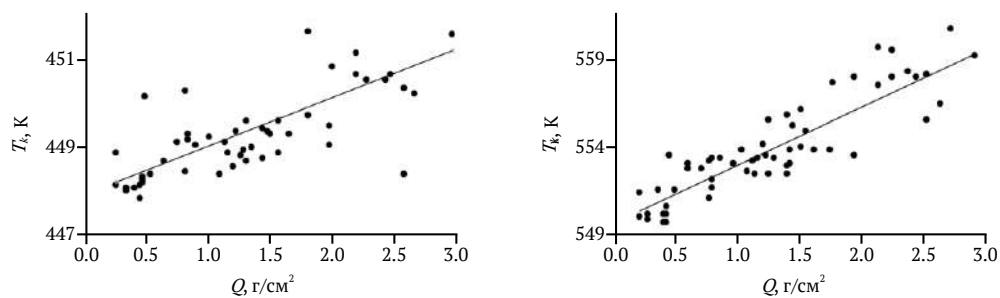


Рис. 3. Зависимость температуры калибровочных сигналов в каналах А и Б РВП от ИВС, обсерватория «Светлое»

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимость температуры калибровочных сигналов РБ от интегрального содержания водяного пара  $Q$  в обсерватории «Светлое», полученная по результатам измерений март-июнь 2018 г. Регрессионные уравнения, отражающие зависимость  $T_k$  от ИВС имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{k\_A}(Q) &= 1.1 \cdot Q + 448.0, \\ T_{k\_B}(Q) &= 3.2 \cdot Q + 549.8. \end{aligned} \quad (11)$$

В канале А (Б) стандартное отклонение от регрессионной линии составляет  $\sim 0.6$  К (1.5 К).

Аналогичным образом может быть построена зависимость калибровочных сигналов от внешней температуры  $T_0$  (К).

Предварительные оценки показывают, что использование в расчетах ВТЗ значений  $T_k(Q)$  или  $T_k(T_0)$  приводит к уменьшению разности значений ВТЗ РВП с результатами измерений ВТЗ по сигналам ГНСС. Возможной причиной увеличения калибровочных сигналов в летний период является недостаточная эффективность теплозащитного экрана на входе рупорно-линзовых антенны, приводящая к увеличению физической температуры расположенной вблизи экрана линзы рупорной антенны РБ и соответствующему изменению вносимой ею температуры в измеряемый сигнал. Требуется принять дополнительные меры по стабилизации температуры входного тракта РБ с целью снижения эффекта сезонных изменений калибровочных сигналов.

### Сравнение результатов расчета ВТЗ

О точности калибровки РВП возможно судить по результату сравнения значений ВТЗ, полученных с помощью РВП и опорного ряда значений ВТЗ, полученных независимым способом на длительном интервале времени. В качестве опорного ряда использовался ряд значений ВТЗ, полученный по результатам обработки сигналов ГНСС [8].

Следует иметь в виду, что неточность в определении калибровочных сигналов РБ приводит к появлению систематической ошибки в разности значений ВТЗ. Данная ошибка проявляется на большом (годовом) интервале

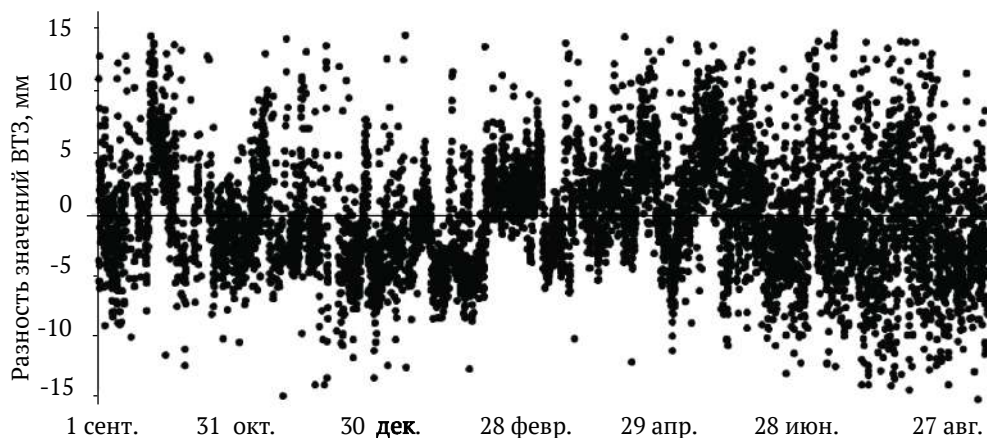


Рис. 4. Обсерватория «Светлое»: разность значений ВТЗ, измеренных РВП и по сигналам ГНСС на интервале сент. 2017 г. — авг. 2018 г.; значения ВТЗ ( $\sim 18\%$ ), приходящиеся на интервал выпадения осадков, удалены



времени в виде систематического «сдвига» графика. Отсутствие подобного «сдвига» на графике свидетельствует об удовлетворительной точности калибровки РВП.

На рис. 4 приведена разность значений ВТЗ, измеренных РВП и по сигналам ГНСС на интервале сентябрь 2017 г. — август 2018 г. в обсерватории «Светлое». Среднее значение разности ВТЗ на интервале анализа мало (~0.03 мм), а СКО разности на интервале составляет ~4.4 мм. Просматриваемые на графике многодневные вариации разностных значений связаны, по-видимому, с точностью модели расчета ВТЗ и требуют дополнительного изучения. Полученный результат в виде близкого к нулю среднего значения разности показывает, что точность калибровки РВП соответствует предъявляемым требованиям.

### Заключение

В работе показано, что требования к точности измерения калибровочных сигналов РБ обеспечиваются стабилизацией температурных режимов опорных нагрузок, МШУ и узлов входного СВЧ-тракта. Мониторинг вариаций амплитуды калибровочных сигналов РБ, регулярно проводимый методом разрезов атмосферы, позволил определить вид зависимости калибровочного сигнала от ИВС. Учет данной зависимости в алгоритме расчета ВТЗ приводит в летний период времени к большому согласию значений ВТЗ определенных с помощью РВП и по сигналам спутников ГНСС.

Точность измерения калибровочных сигналов (СКО) по результатам калибровок методом разрезов находится на уровне ~1 К. Данный вывод подтверждается результатами сравнения значений ВТЗ, полученных независимыми способами — с помощью РВП и по сигналам ГНСС.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

### Литература

1. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом. Известия высших учебных заведений // Радиофизика. — Н. Н.: ННГУ, 2017. — Т. 60, № 4. — С. 326–335.
2. Shelekhov A. P., Zuev V. V., Pavlinskii A. V., Shelekhova E. A., Ilin G. N., Bykov V. Yu. Evaluation of supercooled water content in the atmosphere using real-time radiometry methods, Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104665I (30 November 2017). doi: 10.1117/12.2286820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2286820>.
3. Шелехов А. П., Зуев В. В., Павлинский А. В., Шелехова Е. А., Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Возможности радиометрии реального времени для мониторинга и прогноза обледенения воздушного судна в атмосфере. Материалы XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» / под общ. ред. Ю. В. Кулешова. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2017. — Вып. 12. — Том 2. — С. 109–111.

4. *Титов Е. В., Широкий С. М., Ильин Г. Н., Троицкий А. В.* Экспериментальные оценки точности учета тропосферной задержки навигационных сигналов ГЛОНАСС по данным абсолютного РВП // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 36. — С. 90–95.
5. *Быков В. Ю., Ильин Г. Н.* Экспериментальная оценка стабильности характеристик радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 39. — С. 3–7.
6. *Быков В. Ю., Ильин Г. Н.* Регулируемые генераторы шума К-диапазона длин волн // Приборы и техника эксперимента. — М.: Наука, 2012. — № 6. — С. 66–69.
7. *Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Кайдановский М. Н.* Аппаратура системы измерения электрических характеристик тропосферы // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2010. — Вып. 21. — С. 255–269.
8. *Суворкин В. В., Ильин Г. Н., Курдубов С. Л., Гаязов И. С., Быков В. Ю.* О точности определений тропосферной задержки сигнала // Труды ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 100–107.
9. *Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии // Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — С. 568.
10. *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. 196–202.
11. *Быков В. Ю., Дугин М., Ильин Г. Н.* Анализ вариаций параметров радиометра водяного пара // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2018. — Вып. 46. — С. 108–116.
12. *Аксаев И. Е., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Юрчук Э. Ф.* Радиометр водяного пара — средство измерений радиояркостной температуры атмосферы // Измерительная техника. — 2017. — № 5. — С. 60–65.
13. *Аксаев И. Е., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Юрчук Э. Ф.* Оценка точности измерения радиояркостной температуры атмосферы двухканальным радиометром водяного пара // В книге: Метрология в радиоэлектронике Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»). — 2016. — С. 169–174.
14. *Dicke R. H., Beringer R., Kuhl R. L., Vane A. B.* Atmospheric absorption-measurements with a microwave radiometer // Phys. Rev. — 1946. — Vol. 70. — P. 340.
15. *Han Y., Westwater E. R.* Analysis and Improvement of Tipping Calibration for Ground-Based Microwave Radiometers // IEEE T. Geosci. Remote. — 2000. — Vol. 38, Issue 3. — P. 1260–1276.
16. *Maschwitz G., Löhnert U., Crewell S., Rose T., Turner D. D.* Investigation of ground-based microwave radiometer calibration techniques at 530 hPa, Atmos. Meas. Tech., 6. — P. 2641–2658. — URL: <https://doi.org/10.5194/amt-6-2641-2013>, 2013.

## Calibration Signals of a Water Vapor Radiometer

G. N. Ilin

Constancy of the water vapor radiometer (WVR) calibration signals provides the accuracy of values measured over a long time interval. This article substantiates the accuracy requirements for the equivalent noise temperature ( $T_k$ ) of the

calibration signals. It describes the methods and results of the  $T_k$  value monitoring at the time intervals when the WVR is being operated at the “Quasar” network observatories. The following possible methods of the  $T_k$  measurements are considered: using an external wide-aperture cryogenic radiator with a known temperature, using such internal WVR’s reference loads as noise generators, and using our regular “tip-curve” calibrations.

It is shown that the technical solutions incorporated in the WVR design have been ensuring the required accuracy of the calibration signals for more than three years of its operation. This conclusion is confirmed by the comparison of the tropospheric wet delay figures obtained by the WVR and as a result of processing the Global Navigation Satellite System’s (GNSS) signals.

**Keywords:** water vapor radiometer (WVR), atmosphere, brightness temperature, calibration, tropospheric delay, GNSS.