

Радиометр водяного пара — средство измерений радиояркостной температуры атмосферы

И. Е. АРСАЕВ¹, В. Ю. БЫКОВ², Г. Н. ИЛЬИН², Э. Ф. ЮРЧУК¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: yurchuk@vniiftri.ru

² Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, e-mail: bykovvladimir@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований погрешности измерения радиояркостной температуры атмосферы на частотах 20,7 и 31,4 ГГц в окрестности линий излучения водяного пара. Оценена точность измерений радиояркостной температуры атмосферы радиометром водяного пара в обсерватории «Зеленчукская». Измерения произведены с помощью широкоапертурного низкотемпературного генератора шума ПНШИ200 — рабочего эталона единицы эквивалентной шумовой температуры. Сформулированы требования к радиофизическим характеристикам и точности воспроизведения единицы шумовой температуры перспективными эталонными широкоапертурными низкотемпературными генераторами шума.

Ключевые слова: радиояркостная температура атмосферы, эквивалентная шумовая температура, радиометр водяного пара, низкотемпературный широкоапертурный генератор шума, калибровка радиометра.

The results of experimental studies of measurement error of radio brightness temperature of the atmosphere at frequencies of 20,7 GHz and 31,4 GHz in the vicinity of water vapor emission lines by water vapor radiometer are presented. Measurement accuracy brightness temperature have assessed at the place of dislocation water vapor radiometer in Observatory «Zelenchukskaya» by using of wide-aperture low-temperature noise generator PNSSI200 — working standard of unit of equivalent noise temperature. By results of measurements performed to evaluate the accuracy of measurement brightness temperature of the atmosphere by water vapor radiometer, the requirements to radio-physical characteristics and to accuracy requirements for unit of noise temperature reproducibility by perspective wide-aperture low-temperature noise generators were formulated.

Key words: radio brightness temperature of the atmosphere, equivalent noise temperature, water vapor radiometer, low-temperature wide-aperture noise generator, radiometer calibration.

Радиометр водяного пара (РВП) предназначен для измерений радиояркостной температуры (РЯТ) атмосферы на рабочих частотах 20,7 Гц (канал А) и 31,4 ГГц (канал Б). Данные, полученные с помощью РВП, в совокупности с данными метеостанции о текущих значениях давления и температуры используют для расчёта интегрального содержания водяного пара в атмосфере и определения в реальном времени влажностной составляющей тропосферной задержки, обусловленной присутствием водяного пара. Требования к точности измерений РЯТ атмосферы при этом находятся на уровне эталонных: 1,0—1,5 К [1, 2].

Двухканальный РВП входит в состав комплекса «Квазар-КВО», который является штатным радиоинтерферометрическим оборудованием со сверхдлинной базой обсерватории «Зеленчукская».

Экспериментальную оценку точности измерений РЯТ атмосферы двухканальным РВП выполняли с применением широкоапертурного низкотемпературного генератора шума (ШНГШ) типа ПНШИ200 (диаметр апертуры 210 мм), представляющего эталонную меру единицы шумовой температуры из состава Государственного рабочего эталона единицы шумовой температуры 1-го разряда номинальных значений (81 ± 2) К и (293 ± 10) К в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц 3.1.ZZT.0218.2015 [3].

Калибровку ШНГШ ПНШИ200 на рабочих частотах РВП выполняли с помощью эталонных волноводных низкотемпературных генераторов шума из состава Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шума ГЭТ 21—2011. Для экспериментальной оценки

точности измерений шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200 попеременно устанавливали вплотную к апертурам рупорно-линзовых антенн (РЛА) каналов А, Б РВП. Значения шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200, полученные с помощью РВП, сравнивали с паспортными значениями шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200, полученными при его калибровке.

Радиометр водяного пара. Рассматриваемый РВП представляет двухканальный модуляционный радиометр с регистрацией полной мощности выходного сигнала. Ширина полосы частот регистрируемого сигнала в обоих каналах составляет 500 МГц. Относительно широкая полоса частот, наряду с низкой (менее 300 К) шумовой температурой приёмных устройств каналов А, Б, включая рупорно-линзовые антенны (РЛА) и радиометрические блоки, обеспечивает высокое разрешение по РЯТ (более $0,02 \text{ К} \cdot \text{с}^{-0,5}$).

Радиометрические блоки каналов А, Б с РЛА установлены друг над другом так, что электрические оси антенн располагаются в вертикальной плоскости (рис. 1). Апертуры РЛА каналов А, Б имеют соответственно диаметры 220 и 140 мм. Коэффициенты передачи РЛА каналов А, Б: $\eta^A = 0,9969$; $\eta^B = 0,9951$ [4]. Диаметр плоского поворотного зеркала (на рис. 1 не показано), расположенного под углом 45° к электрическим осям РЛА, равен 700 мм, а размер проекции зеркала на плоскость, перпендикулярную направлению электрических осей антенн, составляет порядка 556 мм. Габаритные размеры зеркала обеспечивают эффективное экранирование РЛА от излучения земной поверхности при отклонении оси диаграммы направленности антенной системы по углу места.

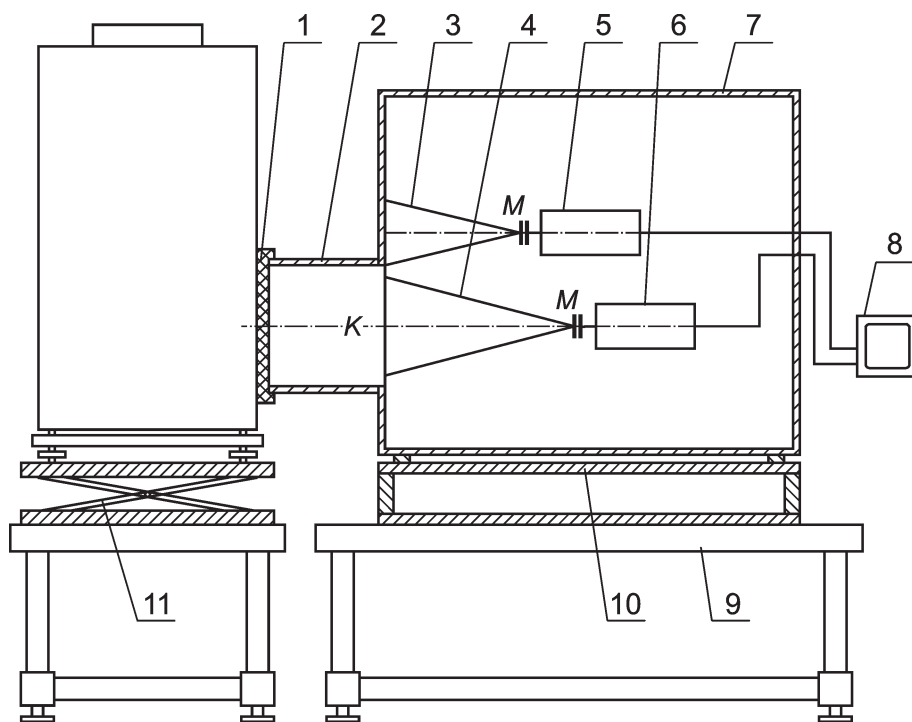


Рис. 1. Схема измерений шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200 с использованием РВП (без поворотного зеркала):

1 — окно ПНШИ200; 2 — бленда; 3, 4 — антенны каналов Б, А (31,4; 20,7 ГГц) РВП, соответственно; 5, 6 — приёмники каналов Б, А; 7 — термостатированный контейнер РВП; 8 — компьютер; 9 — опорный стол; 10 — подставка; 11 — подъёмное устройство

Таблица 1

Измеренные метрологические характеристики каналов А, Б РВП

Характеристика	Канал А (20,7 ГГц)	Канал Б (31,4 ГГц)
Чувствительность каналов РВП (при $\tau = 1$ с), К	0,03	0,04
Динамический диапазон РЯТ, К	6—315	6—315
Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, °		
Н-плоскость	6	7
Е-плоскость	6	6
Уровень бокового лепестка, дБ, не более		
Н-плоскость	-39	-35
Е-плоскость	-34	-35
Коэффициент усиления РЛА в полосе частот РВП, дБ	30,2	29,6
Коэффициент отражения по мощности РЛА $r_1^{А,Б}$	0,007	0,004
Температура калибровочных нагрузок, °С		
T_1	$40,00 \pm 0,01$	$40,00 \pm 0,01$
T_2	$45,00 \pm 0,01$	$45,00 \pm 0,01$

Радиометрические блоки РВП имеют внутренние опорные тепловые генераторы шума (ГШ1, ГШ2), выполненные в виде волноводных согласованных нагрузок, находящихся при температурах $T_1 = (40,00 \pm 0,01)^\circ\text{C}$ и $T_2 = (45,00 \pm 0,01)^\circ\text{C}$. Стабильность температур нагрузок обеспечивается эффективной теплоизоляцией конструкции и прецизионной системой регулирования температуры [4]. Все узлы РВП, включая РЛА, помещены в термостатируемый контейнер. Внутри контейнера температура воздуха поддерживается на уровне $T_3 = (32,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Термостатирование узлов РВП обеспечивает стабильность параметров и снижает до минимума влияние внешней среды.

В табл. 1 представлены измеренные метрологические характеристики каналов А, Б РВП, в наибольшей степени влияющие на точность измерений РЯТ атмосферы. Результаты измерений получены в ходе испытаний РВП с целью утверждения типа средства измерений. Испытания были проведены во ВНИИФТРИ с применением ШНГШ ПНШИ200, волноводных низкотемпературных генераторов шума из состава ГЭТ 21—2011, а также аппаратуры Государственного эталона единицы коэффициента усиления (эффективной площади) направленных антенн с размером апертуры до 40 см 3.1.ZZT.0015.2012. В этом случае обеспечивается прослеживаемость результатов измерений метрологических характеристик

РВП к соответствующим государственным эталонам (ГЭ) воспроизведения единиц шумовой и радиояростной температур.

Низкотемпературные широкоапертурные генераторы шума. Во ВНИИФТРИ функционируют Государственный эталон единицы спектральной плотности энергетической яркости и радиояростной температуры в микроволновой области спектра в диапазоне частот от 18,1 до 118,3 ГГц, 3.1.ZZT.0014.2012, предназначенный для воспроизведения и передачи единицы РЯТ (кельвин) [5], и Государственный рабочий эталон единицы шумовой температуры в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц 3.1.ZZT.0218.2015.

Диапазоны частот калибровки ШНГШ ПНШИ200 эталона 3.1.ZZT.0218.2015: 2,2—2,6 ГГц; 7,0—9,5 ГГц; 28—34 ГГц. Дополнительно выполнена калибровка ШНГШ ПНШИ200 на частотах каналов РВП. Метрологические характеристики ШНГШ ПНШИ200 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метрологические характеристики ШНГШ ПНШИ200

Характеристика	Частота, ГГц	
	20,7	31,4
Номинальные (паспортные) значения эквивалентной шумовой температуры — T_n^A, T_n^B , К	78,9	81,2
СКО суммарной погрешности результата измерений шумовой температуры, К	0,7	0,8
Коэффициент отражения по мощности от апертуры ШНГШ ПНШИ200, $r_2^{А,Б}$	0,0010	0,0013

Измерения параметров РЛА РВП.

Измерения коэффициентов усиления. Измерения коэффициентов усиления G^{AB} и диаграмм направленности РЛА РВП в пределах нескольких боковых лепестков выполнены на радиоколлиматоре, входящем в состав ГЭ 3.1.ZZT.0015.2012. Диаметр рефлектора радиоколлиматора 1300 мм. Цена деления шкалы опорно-поворотного устройства $0,05^\circ$. Уровень безэховости в рабочей зоне не более -32 дБ. Для измерений использовали ваттметры МЗ-91, МЗ-92 и эталонные рупорные пирамидальные антенны диапазонов 17,44—25,95 ГГц и 25,95—37,5 ГГц — меры коэффициента усиления, аттестованные с погрешностью $\pm 0,6$ дБ. На рис. 2 показана схема установки для измерений коэффициентов усиления G^{AB} РЛА РВП методом сравнения с коэффициентом усиления G_3 эталонных антенн. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Определение коэффициентов передачи $\eta^{A,B}$ РЛА РВП. Для определения коэффициентов $\eta^{A,B}$ использовали метод, заключающийся в сравнении отдельно измеренных коэффициентов передачи $\eta_{iB}^{A,B}$ отрезков стандартных прямоугольных волноводов (сечения $11,0 \times 5,5$ и $7,2 \times 3,4$ мм, длина $l_B^{A,B}$) с коэффициентами передачи $\eta_i^{A,B}$ i -х отрезков цилиндрических волноводов (длина $l_i^{A,B}$, радиус R_i), аппроксимирующих при последовательном соединении образующую РЛА каналов А или Б РВП. Минимальное количество аппроксимирующих отрезков цилиндрических волноводов выбирали из условия неизменности третьей после запятой значащей цифры значения $\eta^{A,B}$ РЛА РВП.

Коэффициент затухания $\alpha_i^{A,B}$ основной волны H_{11} в отрезке регулярного цилиндрического волновода длиной $l_i^{A,B}$ и радиусом $R_i^{A,B}$ определяется выражением [6]:

$$\alpha_i^{A,B} = \frac{\alpha_B^{A,B} l_B^{A,B} \Phi_i^{A,B}(R_i(z), \lambda) d^{A,B}}{l_B^{A,B} \Phi_B^{A,B}(a, b, \lambda) d^{A,B}}, \quad (1)$$

где $\alpha_B^{A,B}$ — коэффициент затухания основной волны H_{10} на частотах каналов А, Б в отрезке регулярного прямоугольного волновода длиной $l_B^{A,B}$; $d_B^{A,B}$, $d^{A,B}$ — глубины скин-слоёв материалов стенок прямоугольного регулярного волновода и конического рупора РЛА на частотах каналов А, Б соответственно; $\Phi_B^{A,B}(a, b, \lambda)$ — функция длины волны λ и геометрических параметров a, b прямоугольного волновода сравнения,

$$\Phi_B = \frac{1 + 2b(\lambda/\lambda_{kp})^2/a}{b\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{kp})^2}}, \quad \lambda_{kp} = 2a; \quad (2)$$

$\Phi_i^{A,B}(R_i(z), \lambda)$ — аналогичная функция для волны H_{11} круглого волновода радиусом R_i ,

$$\Phi_i^{A,B}(R_i\lambda) = \frac{0,42 + (\lambda/\lambda_{kp})^2}{R_i\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{kp})^2}}, \quad \lambda_{kp} = 3,41R_i. \quad (3)$$

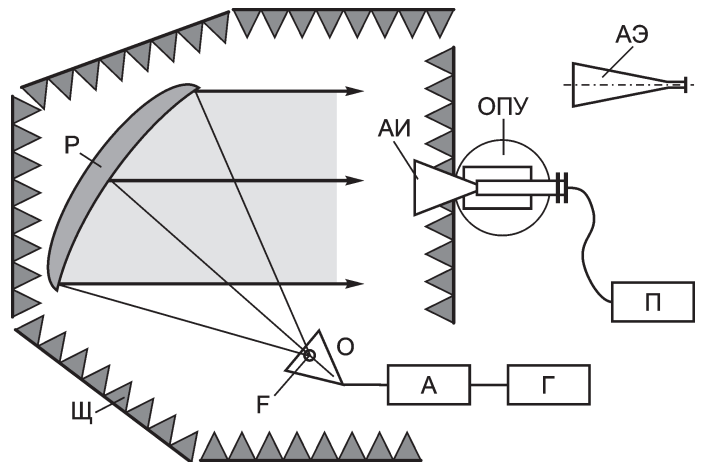


Рис. 2. Схема установки для измерений параметров РЛА РВП:

P, F — рефлектор и его фокус, соответственно; O — облучатель; A — антеннатор; G — СВЧ-генератор; $AI, AЭ$ — антенны измерительная и эталонная, соответственно; $ОПУ$ — опорно-поворотное устройство, $П$ — приёмник; $Щ$ — щиты радиопоглощающие

На рис. 3 показана схема установки для измерений коэффициентов передачи волны H_{10} отрезков прямоугольных волноводов. Калибровку каналов А, Б РВП осуществляли по волноводным низкотемпературным генераторам шума (ВНГШ) из состава ГЭТ 21—2011 при комнатной температуре T_K и температуре T_N кипения жидкого азота (рис. 3, а). Схема измерений приращения шумовой температуры $\Delta T^{A,B}$ на входе РВП при установке в тракт измеряемого отрезка прямоугольного волновода представлена на рис. 3, б.

Приращение шумовой температуры на входе РВП определяется как

$$\Delta T^{A,B} = (U_{NB}^{A,B} - U_N^{A,B}) / L^{A,B}, \quad (4)$$

где $U_{NB}^{A,B} - U_N^{A,B}$ — уровни сигналов РВП с волноводным отрезком и без него; $L^{A,B}$ — параметры градуировочных характеристик каналов А, Б РВП,

$$L^{A,B} = \frac{U_K^{A,B} - U_N^{A,B}}{(T_K^{A,B} - T_N^{A,B})(1 - r_3^{A,B})}, \quad (5)$$

где $T_K^{A,B}, T_N^{A,B}$ — паспортные значения шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200; $U_K^{A,B}, U_N^{A,B}$ — уровни сигналов РВП,

соответствующие шумовым температурам $T_K^{A,B}, T_N^{A,B}; r_3^{A,B}$ — коэффициент отражения входа РВП в плоскости А (см. рис. 3).

Коэффициенты передачи отрезков волновода сечением $11,0 \times 5,5$ мм длиной l_B^A и $7,2 \times 3,4$ мм длиной l_B^B рассчитывали по формуле

$$\eta_B^{A,B} = 1 - \Delta T^{A,B} / [(T_B^{A,B} - T_N^{A,B})(1 - r_3^{A,B})], \quad (6)$$

где $T_B^{A,B}$ — термодинамические температуры измеряемых отрезков волноводов.

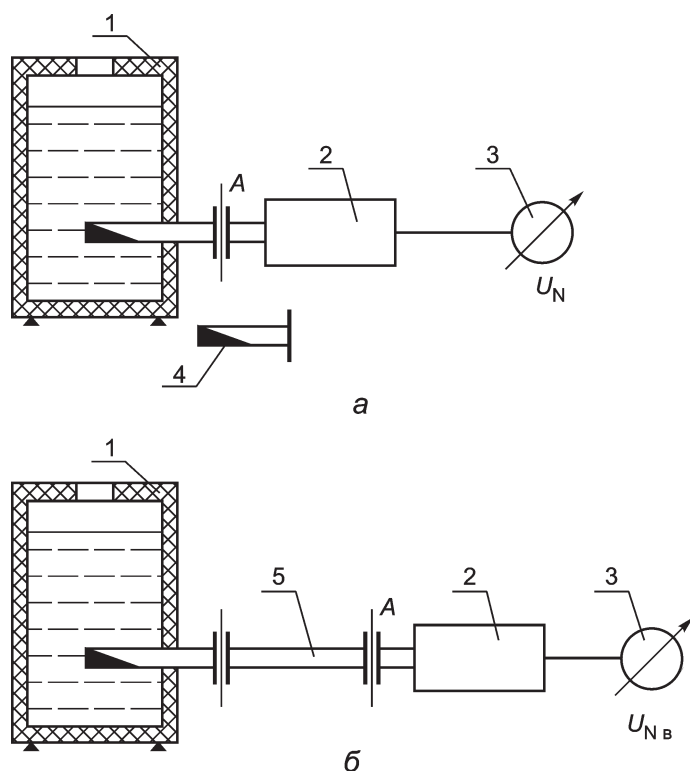


Рис. 3. Схемы калибровки радиометров (а) и измерений потерь в отрезке стандартного волновода (б):

1 — ВНГШ сечениями 11,0×5,5 и 7,2×3,4 мм; 2 — РВП (канал А или Б); 3 — компьютер; 4 — согласованная нагрузка; 5 — отрезок волновода сечением 11,0×5,5 мм или 7,2×3,4 мм

Потери в измеряемых прямоугольных отрезках волноводов можно вычислить по формуле: $\alpha_B^{A,B} = 10 \lg \eta_B^{A,B}$. Результаты измерений потерь $\alpha_B^{A,B}$ отрезков медного волновода сечением 7,2×3,4 мм длиной 185 мм и сечением 11,0×5,5 мм длиной 215 мм приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения затухания (потери) рупорных антенн РВП

Параметр	Канал А (20,7 ГГц)	Канал Б (31,7 ГГц)
Длина волновода сравнения $l_B^{A,B}$, см	21,7	18,5
Потери волновода сравнения $\alpha_B^{A,B}$, дБ	0,12	0,185
Потери РЛА $\alpha^{A,B}$, дБ	0,0134	0,0212
Коэффициенты передачи РЛА η^A, η^B	0,9969	0,9951

Подставив результаты измерений коэффициентов затухания отрезков прямоугольных волноводов в (1), получим ряд коэффициентов затухания $\alpha_i^{A,B}(l_i^{A,B})$ для цилиндрических волноводов длиной $l_i^{A,B}$ и радиусом R_i .

Полные потери РЛА определяются выражениями [3]:

$$\alpha^A = \frac{d^A}{d_B^A} \sum_i \alpha_i^A; \alpha^B = \frac{d^B}{d_B^B} \sum_i \alpha_i^B. \quad (7)$$

В табл. 3 приведены результаты определения затухания отрезков стандартных волноводов, изготовленных из латуни (содержание меди 90 %) и РЛА РВП. При пересчёте потерь РЛА в коэффициент передачи использовали формулу

$$\eta^{A,B} = 10^{-0,1\alpha^{A,B}}.$$

Определение абсолютной погрешности измерения РЯТ атмосферы с помощью РВП. Абсолютную погрешность измерений РЯТ атмосферы определяли экспериментально-расчётным путём с использованием ШНГШ ПНШИ200. Измерения по каналам А, Б производили со снятым поворотным зеркалом. Предварительно РВП калибровали по волноводным внутренним шумовым источникам с известными шумовыми температурами $T_1^{A,B}, T_2^{A,B}$. Измеряли выходные сигналы внутренней калибровки каналов А, Б РВП U_1^A, U_2^A и U_1^B, U_2^B . Далее находили параметр $\bar{L}^{A,B}$ внутренней калибровки радиометров для каналов А, Б:

$$\bar{L}^{A,B} = (U_2^{A,B} - U_1^{A,B}) / (T_2^{A,B} - T_1^{A,B}).$$

Охлаждённый до температуры кипения жидкого азота ШНГШ ПНШИ200 поочерёдно устанавливали вблизи апертур РЛА каналов А, Б (см. рис. 1). Измеряли сигналы U_N^A, U_N^B . На основе полученных результатов вычисляли шумовую температуру $T_N^{A,B}$ ШНГШ ПНШИ200, сравнивали с паспортными значениями $T_n^{A,B}$, оценивали составляющие погрешности измерений РЯТ атмосферы.

Шумовую температуру ШНГШ ПНШИ200 по волноводному входу М РВП (см. рис. 1) определяли из соотношения

$$T_N^{A,B}(M) = T_1^{A,B} - (U_1^{A,B} - U_N^{A,B}(M)) / (\bar{L}^{A,B} (1 - r_3^{A,B})), \quad (8)$$

а шумовые температуры ШНГШ ПНШИ200 $T_N^{A,B}(K)$ в плоскости К апертур РЛА (или в плоскости окна ШНГШ ПНШИ200) находили как

$$T_N^{A,B}(K) = [T_N^{A,B}(M) - (1 - \eta^{A,B}) T_3] / \eta^{A,B}, \quad (9)$$

где T_3 — термодинамическая температура РЛА каналов А, Б, равная внутренней температуре контейнера РВП.

Рассмотрим основные составляющие систематической погрешности измерения РЯТ атмосферы: $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5$.

Составляющая Θ_1 обусловлена отражением шумового излучения РВП $T_{\text{РВП}}^{A,B}$ от окна ШНГШ ПНШИ200:

$$\Theta_1^A = r_2^A T_{\text{РВП}}^A; \Theta_1^B = r_2^B T_{\text{РВП}}^B, \quad (10)$$

где $r^{A,B}$ — коэффициенты отражения по мощности окна ШНГШ ПНШИ200 на рабочих частотах каналов А, Б. Используя данные табл. 1, 2 для $r^{A,B}$ и $T_{\text{РВПmax}}^{A,B} = 315$ К, получим

$$\Theta_1^A = 0,3 \text{ К}, \Theta_1^B = 0,4 \text{ К}.$$

Составляющая Θ_2 обусловлена погрешностью измерения шумовой температуры $T_N^{A,B}$ ШНГШ ПНШИ200 с помощью РВП:

$$\Theta_2^A = T_N^A - T_n^A; \Theta_2^B = T_N^B - T_n^B. \quad (11)$$

Измеренные РВП значения $T_N^{A,B} = 79,5$ К, $T_N^B = 82,1$ К. Отсюда $\Theta_2^A = 0,6$ К, $\Theta_2^B = 0,9$ К.

Составляющая Θ_3 обусловлена потерями в РЛА каналов А, Б:

$$\Theta_3^A = \eta^A T_n^A + (1 - \eta^A) T_3 - T_n^A; \Theta_3^B = \eta^B T_n^B + (1 - \eta^B) T_3 - T_n^B, \quad (12)$$

где $T_3 = 303$ К — температура теплоизолирующего контейнера РВП. Используя данные табл. 1, 2, получим $\Theta_3^A = 0,7$ К,

$$\Theta_3^B = 1,0 \text{ К}.$$

Составляющая Θ_4 , обусловленная краевыми эффектами, пропорциональна уровню диаграммы направленности антенн РВП в направлении кромки зеркала и диаграмм направленности краевой волны от кромки в направлении центра апертуры РЛА. Учитывая, что средний уровень излучения вне главного лепестка диаграммы направленности по мощности $F^{A,B} \leq -42$ дБ (см. табл. 1), получим оценку

$$\Theta_4^{A,B} \leq 0,1 \text{ К}.$$

Составляющая Θ_5 обусловлена влиянием уровней бокового и заднего лепестков приёмных антенн РВП и распределением шумовых потоков T_n , T_3 в телесном угле ($4\pi - \Omega_3$), где Ω_3 — телесный угол зеркала из центра апертур антенн; T_n — шумовая температура неба; T_3 — шумовая температура земли. При $T_n \approx 80$ К в ясную погоду и $T_3 \approx 300$ К, $\Omega_3 \approx 2,5$ рад получим оценку $\Theta_5^A \leq 0,12$ К, $\Theta_5^B = 0,12$ К.

Доверительные границы неисключённой систематической погрешности (НСП) $\Theta_\Sigma(P)$ при доверительной вероятности $P = 0,95$ и равномерном её распределении вычислим по формуле:

$$\Theta_\Sigma = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^5 \Theta_i^2}. \quad (13)$$

Из случайных составляющих погрешностей измерения наиболее значимая связана с погрешностью измерений значений шумовой температуры эталонной меры ШНГШ ПНШИ200 с помощью РВП:

$$\bar{T}^{A,B} = \frac{1}{n} \sum_i T_i^{A,B}. \quad (14)$$

Среднее квадратическое отклонение (СКО) определим по формуле

$$S^{A,B} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i^{A,B} - \bar{T}^{A,B})^2 / n(n-1)}, \quad (15)$$

где $n \geq 10$; $T_i^{A,B}$ — результаты единичных измерений.

Доверительные границы $\Delta \tilde{T}_{\text{РЯТ}}^{A,B}$ погрешности измерений РЯТ атмосферы с помощью РВП при доверительной вероятности $P = 0,95$ приведены в табл. 4. Расчёт произведён в соответствии с [7].

Таблица 4

Погрешности измерения РЯТ атмосферы с помощью РВП

Характеристика	Канал А (20,7 ГГц)	Канал Б (31,7 ГГц)
Доверительные границы НСП измерений РЯТ атмосферы ($P = 0,95$) $\Delta T_{\text{РЯТ}}^{A,B}$, К	1,4	1,8
СКО измерений РЯТ атмосферы РВП, К	0,30	0,40
Доверительные границы суммарной погрешности измерений РЯТ, К	1,65	2,1

Сравнение приведённых в табл. 2 паспортных и измеренных значений шумовой температуры ШНГШ ПНШИ200 $T_N^A(M) = 79,5$ К, $T_N^B(M) = 82,1$ К показало их совпадение в пределах паспортных значений погрешностей измерений РЯТ атмосферы. Современные требования к точности измерения РЯТ атмосферы с помощью РВП находятся на уровне 1—1,5 К ($P = 0,95$). Для контроля характеристик таких РВП необходимо разработать ШНГШ с улучшенными метрологическими характеристиками.

Выводы. Рассмотрен бюджет неопределённости измерения РЯТ с использованием РВП. Наибольший вклад в бюджет неопределённости вносят составляющие НСП, связанные с ослаблением сигнала в тракте, включая антенную систему, и погрешность калибровки ПНШИ200. Тем не менее, доверительные границы суммарной погрешности измерений РЯТ атмосферы при доверительной вероятности $P = 0,95$ не превосходят 2,1 К.

Результаты измерений и опыт создания показывают, что сформулированные ниже требования к эталонным ШНГШ для калибровки РВП реализуемы.

Требования к ШНГШ для калибровки РВП

Размер апертуры генератора шума ≥ 300 мм
Воспроизводимые уровни шумовых температур

(многозначная мера $T_{\text{Ш}}^f$) 78—300 К

Коэффициент отражения апертуры
эталонного ШНГШ не более -30 дБ

Коэффициент поглощения излучающего элемента в диапазоне
частот $18 \div 37,5$ ГГц более 0,9990—0,9995

Дополнительная шумовая температура радиопрозрачного
теплоизолирующего окна не более 0,1 К

Доверительные границы калибровки ШНГШ по шумовой
температуре $P = 0,95$ не более 0,5 К

Л и т е р а т у р а

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стемповский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 210—215.
2. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Ипатов В. В., Миллер Е. Ю. Аппаратные средства мониторинга параметров атмосферы в обсерваториях РСДБ комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 33. С. 52—57.
3. Юрчук Э. Ф., Арсаев И. Е. Обеспечение единства измерений в микроволновой радиометрии // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 51—56.

4. Быков В. Ю., Ильин Г. Н. Регулируемые генераторы шума К-диапазона длин волн // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 66.
5. Арсаев И. Е., Юрчук Э. Ф., Саргсян М. В. Некоторые вопросы калибровки НШИ500 — широкоапертурной меры единицы шумовой температуры на частотах 20,7 и 31,4 ГГц // Тезисы докладов IX Всерос. научн.-техн. конф., 17—19 июня 2014 г., Менделеево, С. 167—171.
6. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966.
7. ГОСТ 8.736—2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

Дата принятия: 29.06.2016.

681.518.3.621.371

Корреляционный метод обработки сигналов сверхвысокочастотных доплеровских датчиков

Д. В. ХАБЛОВ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, e-mail: dkhablov@mail.ru

Предложен метод обработки сигналов сверхвысокочастотных датчиков. Применение метода позволяет существенно увеличить точность определения доплеровской частоты и связанных с ней информативных параметров. При этом используется частотная модуляция, изменяющаяся по симметричному пилообразному закону, со спектральной обработкой выходного сигнала на растущем и падающем участках. Доплеровская частота вычисляется по взаимно-корреляционной функции огибающих спектров, что позволяет устранить погрешность, обусловленную спектральным составом доплеровского сигнала.

Ключевые слова: эффект Доплера, частотная модуляция, сверхвысокие частоты, датчик, спектральная обработка, взаимно-корреляционная функция.

The method of signal processing of microwave sensors allowing significantly increase the accuracy of Doppler frequency and related informative parameters is proposed. It makes use of symmetric saw-like frequency modulation with spectral processing of the output signal on the rising and falling phase. Doppler frequency is calculated by cross-correlation function envelope of these spectra, which allows to reduce the error due to spectral composition of the Doppler signal.

Key words: Doppler effect, frequency modulation, microwaves, sensor, spectral processing, cross-correlation function.

В настоящее время широко применяются сверхвысоко-частотные (СВЧ) способы измерения скорости объектов, основанные на эффекте Доплера [1]. В радиолокации такими способами определяется скорость движущихся объектов. Доплеровский метод измерения заключается в зондировании движущихся объектов электромагнитными волнами и выделении частоты смещения рассеянной волны. Если приёмо-передающая антенна источника излучения с несущей частотой f_0 направлена на движущийся со скоростью v объект, то частота принятой антенной отраженной волны будет отличаться на доплеровскую частоту f_D , выражаемую как

$$f_D = 2v \cos \alpha / \lambda_0, \quad (1)$$

где α — угол между направлением на объект и вектором скорости; $\lambda_0 = c_B / (f_0 \sqrt{\epsilon})$ — длина волны в среде измерения (воздухе); ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, для воздуха $\epsilon = 1$; c_B — скорость света в воздухе.

Таким образом, по доплеровской частоте из (1) можно вычислить скорость объекта по формуле

$$v = c_B f_D / (2 \cos \alpha \sqrt{\epsilon} f_0). \quad (2)$$

При традиционном радиолокационном применении эффекта Доплера объект можно считать точечным, поэтому доплеровская частота определяется единственной гармоникой и погрешность её измерения будет минимальной. Однако при использовании этого эффекта в датчиках путевой скорости транспортных средств или для нахождения расхода жидких и сыпучих сред в трубопроводах точное определение доплеровской частоты является более сложным. В первом случае отражение происходит от подстилающей поверхности, приёмо-передающая антенна датчика находится на движущемся объекте и направлена под углом α к поверхности. Диаграмма направленности антенны имеет не-