

Измерения шумовых температур приёмной системы радиотелескопа двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой

И. Е. АРСАЕВ¹, Ю. В. ВЕКШИН², А. И. ЛАПШИН¹, В. В. МАРДЫШКИН²,
М. В. САРГСЯН¹, Е. Ю. ХВОСТОВ², В. К. ЧЕРНОВ², Э. Ф. ЮРЧУК¹

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

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mardyshkin@rambler.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований шумовых температур приёмной системы радиотелескопа РТ-13 двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой в диапазонах частот 2,2–2,6; 7,0–9,5; 28–34 ГГц. Измерения выполнены с помощью широкоапертурных низкотемпературных генераторов шума, разработанных и аттестованных на эталонной базе ВНИИФТРИ. Оценена погрешность измерений шумовых температур приёмной системы радиотелескопа. Доверительные границы погрешности измерений (при доверительной вероятности $P=0,95$) составили не более 3,5 К.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, радиотелескоп, шумовая температура, калибровка.

The results of experimental studies of noise temperatures of the receiver system (NT RS) of radio telescope RT-13 of two-elements radio interferometer with a very long baseline in the frequency ranges S (2,2–2,6 GHz), X (7,0–9,5 GHz) and Ka (28–34 GHz) are shown. The experimental results has been obtained with use of wide-aperture low-temperature generators noise. Limits of permissible error of measurement NT RS ($P=0,95$) of RT-13 were not more than 3,5 K.

Key words: radio interferometer, radio telescope, noise temperature, calibration.

Двухэлементный радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ) [1] состоит из двух радиотелескопов РТ-13, расположенных на узлах колокации в радиоастрономических обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары». Двухэлементный радиоинтерферометр создан и эксплуатируется Институтом прикладной астрономии РАН.

Принцип действия радиоинтерферометра состоит в преобразовании выборок широкополосного шумового сигнала внегалактических радиоисточников в двухбитовые информационные последовательности. Сигналы принимаются одновременно двумя радиотелескопами, разнесёнными на расстояние 4405 км. При этом осуществляются синхронизация результатов измерений с атомной шкалой всемирного координированного времени UTC(SU) и привязка их к международной земной опорной системе отсчёта координат ITRF. Корреляционная обработка позволяет определить интервалы времени (задержки) между приходами на антенны двух радиотелескопов радиосигнала, излучаемого внегалактическим радиоисточником. Далее результаты измерений используются для высокоточного определения всемирного времени. При работе радиоинтерферометра в составе РСДБ-сети результаты измерений применяются для определения параметров вращения Земли. Испытания радиоинтерферометра для целей утверждения типа средства измерений (СИ) выполнены во ВНИИФТРИ, регистрационный номер в Госреестре СИ 62488-15.

Радиотелескоп РТ-13 состоит из следующих элементов: антенной системы (Vertex, Германия), служащей для приёма радиоизлучения от заданного космического источника и быстрой смены положения при переходе на следующий источник (до 60 перестановок за час наблюдений);

приёмной системы радиотелескопа (ПСП) [3], принимающей и усиливающей слабые радиосигналы космических источников. Диапазоны частот ПСП S=2,2...2,6 ГГц, X=7,0...9,5 ГГц, Ka=28...34 ГГц. Применяется криогенное охлаждение входных каскадов ПСП до 15 К;

широкополосной цифровой системы преобразования сигналов, служащей для преобразования высокочастотных широкополосных шумовых сигналов в диапазоне промежуточных частот ПСП в цифровые информационные двухбитовые потоки;

системы частотно-временной синхронизации, обеспечивающей аппаратуру радиотелескопа опорными высокостабильными сигналами времени и частоты;

системы управления радиотелескопом.

На рис. 1 представлена схема радиотелескопа РТ-13 радиоинтерферометра. Для проведения измерений зеркальную антенну РТ-13 переводят в горизонтальное положение. При подготовке к калибровке широкоапертурный низкотемпературный генератор шума (ШНГШ) 4, установленный в пружинную раму, вместе с сосуда́ми Дьюара 5 для жидкого азота поднимается с помощью ножничного подъёмника на высоту около 11 м, подвешивается на верхней опоре 2 контррефлектора между контррефлектором 3 и ПСП 1.

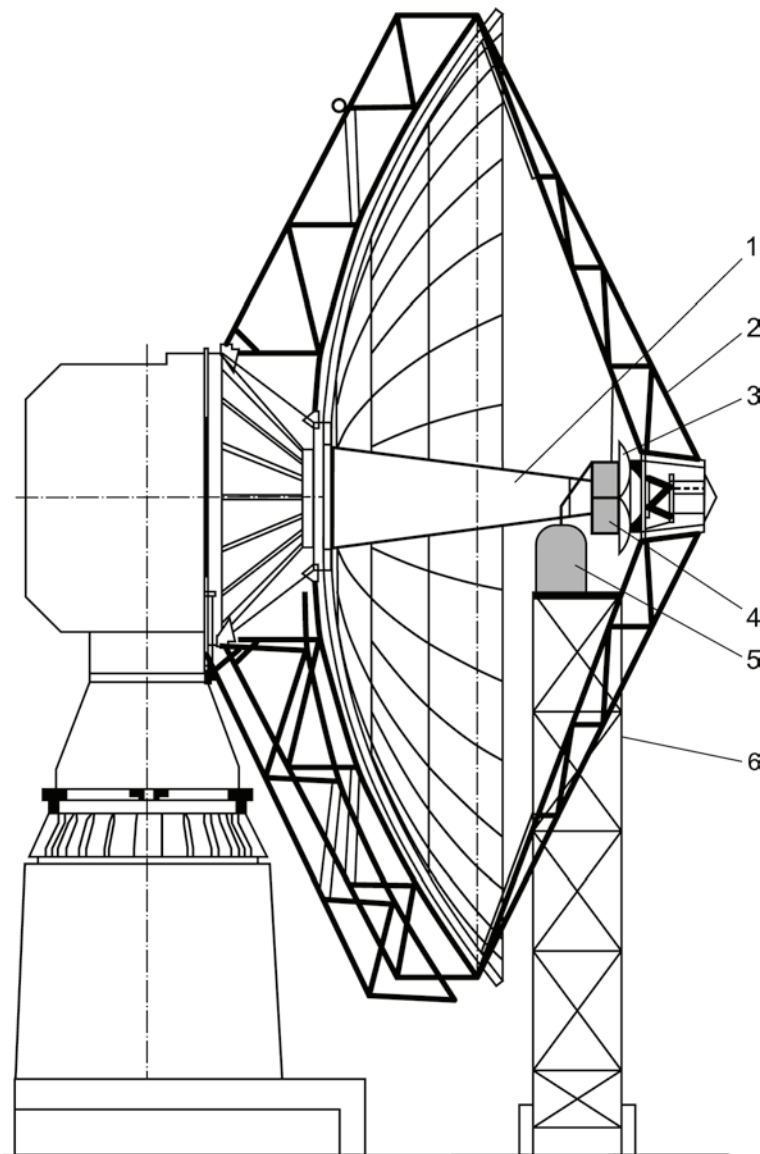


Рис.1. Схема радиотелескопа РТ-13:

1 – приёмная система радиотелескопа; 2 – опоры контррефлектора радиотелескопа; 3 – контррефлектор; 4 – широкоапертурный низкотемпературный генератор шума, установленный в положение калибровки; 5 – сосуд Дьюара; 6 – подъёмник

Схема метрологического обеспечения радиотелескопов РТ-13 двухэлементного радиоинтерферометра в области измерений шумовых температур. Измерения шумовых температур ПРС ($T_{ш}=10...65$ К) осуществляются в соответствии с метрологически аттестованной методикой измерений эквивалентной шумовой температуры ПРС (свидетельство об аттестации методики измерений МИ № 249-RA.RU.311243-2015) с помощью рабочего эталона единицы шумовой температуры – ШНГШ (сертификаты калибровки RU02№090, RU02№091 от 19.11.2015 г.) – из состава комплекса средств калибровки радиотелескопов по шумовой температуре в диапазонах температур 78–90, 253–303 К и частот 2–40 ГГц. Расширенная неопределённость калибровки

ШНГШ РТ $u_p(T_{ш})=2...4$ К. Указанный эталон калибруется согласно разработанной методике калибровки МК 08-44-2015 методом сравнения с аттестованным в том же диапазоне частот широкоапертурным генератором шума ПНШИ200 (Государственным рабочим эталоном единицы шумовой температуры 1-го разряда номинальных значений (81 ± 2) К и (293 ± 10) К в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц, стандартная неопределённость калибровки ПНШИ200 $u_c(T_{ш})=0,7...1,7$ К, регистрационный номер 3.1.ZZT.0218.2015). При этом используется следующее оборудование: установка, содержащая волноводный и коаксиальный генераторы шума, входящие в состав Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения и эквивалентной шумовой температуры в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц номинальных значений шумовой температуры от 80 до 86 К ГЭТ 21–2011 (стандартная неопределённость $u_c(T_{ш})=0,3...0,8$ К); векторный анализатор цепей ZVA-24 с преобразователями частоты фирмы R&S (регистрационный номер 48355-11) для измерения коэффициентов отражения и поглощения элементов ШНГШ ($\Delta R \approx \pm 3$ дБ); прецизионный измеритель температуры МИТ8.10-М1 с платиновыми термометрами сопротивления ПТСВ-2-3 (погрешность измерений термодинамической температуры $\Delta T(0,95) \approx 0,01...0,05$ К, регистрационный номер 19736-11).

Измерения шумовой температуры ПРС. Измерения шумовой температуры в S-, X- и Ka-диапазонах по входу облучателя РТ-13, выполнены с помощью описанных выше ШНГШ РТ, разработанных и аттестованных во ВНИИФТРИ. Применяется метод косвенных измерений шумовой температуры ПРС [4].

На рис. 2 представлена схема измерений шумовой температуры ПРС. Окно радиатора ШНГШ 2 герметично соединяется с вакуумным окном ПРС 5. Для исключения затекания влажного наружного воздуха в промежуток между окнами облучателя и ШНГШ РТ используется система наддува (на рис. 2 не показана) этого промежутка газообразным сухим азотом при небольшом (примерно 10132 Па) избыточном давлении.

Измерения выполняют путём последовательной подачи на вход облучателя ПРС шумового излучения «тёплого» и «холодного» ШНГШ, шумовые температуры которых соответствуют температуре окружающей среды ($T_{ш,т}=253...300$ К) и температуре кипения жидкого азота ($T_{ш,х}=78$ К).

Для регистрации сигналов $U_{ш,т}$, $U_{ш,х}$ ПРС, нагруженной на ШНГШ РТ, применяются модули радиометрического контроля 8, входящие в состав ПРС. В S-диапазоне из-за помех также используется анализатор спектра 6 для измерения уровня сигнала на участке рабочего диапазона, не содержащего помех. Для регистрации сигналов ПРС настраивается одновременно в S-, X- и Ka-диапазонах на двух круговых поляризациях. Для регистрации уровней сигналов во всей полосе входных частот в X- и Ka-диапазонах проводится

серия измерений уровня сигнала промежуточной частоты (ширина полосы промежуточной частоты 1 ГГц) с различными установками частот гетеродина. Это позволяет получить результаты измерений ШТ для всей входной полосы частот. Для контроля (при необходимости) стабильности сигнала ПСР после «холодного» ШНГШ РТ можно установить вспомогательную «тёплую» широкоапертурную нагрузку, параметры которой идентичны параметрам «тёплого» ШНГШ РТ.

После регистрации в течение 20–30 мин излучения «тёплого» ШНГШ начинается автоматическая заливка жидкого азота в криостат. Регулировка заливки осуществляется поплавковым игольчатым клапаном. Охлаждение ШНГШ требует 50–70 л жидкого азота. На стационарный «холодный» режим система выходит через 6–7 ч. Измерения температуры излучателя ШНГШ РТ выполняются девятью платиновыми термометрами сопротивления и прецизионным измерителем термодинамической температуры МИТ8.10.М1. Полученные значения ШТ передаются в компьютер 7. Текущие значения ШТ «тёплого» $T_{ш.тj}$ и «холодного» $T_{ш.хj}$ ШНГШ РТ определяют по формулам

$$\bar{T}_{ш.тj}(S, X, Ka) = \bar{T}_{тj} + \Delta \bar{T}_{ш.т}(S, X, Ka);$$

$$\bar{T}_{ш.хj}(S, X, Ka) = \bar{T}_{хj} + \Delta \bar{T}_{ш.х}(S, X, Ka),$$

где $\bar{T}_{тj}$, $\bar{T}_{хj}$ – измеряемые текущие значения средней термодинамической температуры «тёплого» и «холодного» ШНГШ в моменты времени t_j , t_j , соответственно; $\Delta \bar{T}_{ш.т}(S, X, Ka)$, $\Delta \bar{T}_{ш.х}(S, X, Ka)$ – шумовые добавки, приведённые в сертификатах калибровки ШНГШ и табл. 1, значения которых в основном определяется неравномерностью термодинамической температуры излучателя ШНГШ.

Т а б л и ц а 1
Метрологические характеристики ШНГШ

Диапазон частот калибровки, ГГц	Паспортные значения шумовых добавок*		Расширенная неопределённость калибровки при $P=0,95$, $k=2$	
	$\Delta \bar{T}_{ш.т}$, К	$\Delta \bar{T}_{ш.х}$, К	$U_{р.т}^{ш.т}$, К	$U_{р.х}^{ш.х}$, К
2,2–2,6 (S)	0,3	5,6	3,6	3,2
7,0–9,5 (X)	0,2	5,2	4,0	2,0
28–34 (Ka)	0,2	3,1	3,8	3,0

Примечание: * – данные для ШНГШ РТ № 2, находящегося в радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская».

Воспроизводимые значения шумовых температур «тёплых» и «холодных» ШНГШ составляют 250–300 и порядка 85 К, соответственно.

С периодичностью 20–30 мин во всех трёх диапазонах регистрируется нулевой $U_{т}^0$ сигнал ПСР, соответствующий

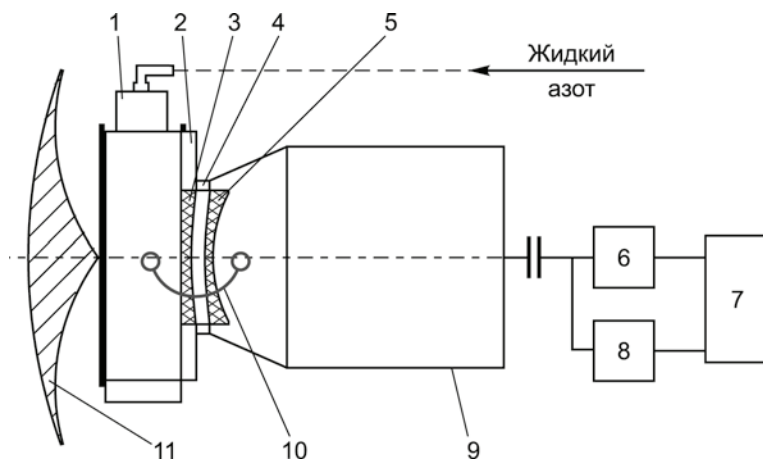


Рис. 2. Схема измерений шумовой температуры приёмной системы радиотелескопа:

1, 2, 3 – широкоапертурный низкотемпературный генератор шума, его радиатор и окно радиатора, соответственно; 4 – кольцо для герметизации промежутка между окнами генератора шума и приёмной системы радиотелескопа; 5 – окно приёмной системы; 6 – анализатор спектра; 7 – компьютер; 8 – модуль радиометрического контроля; 9 – кожух приёмной системы; 10 – наружный кабель соединения термометров генератора шума с внутренним кабелем МИТ8.10.М; 11 – контррефлектор радиотелескопа

режиму отсутствия сигнала на входе индикаторов сигналов ПСР. Измеренный нулевой сигнал вычитается из зарегистрированных сигналов ПСР $U_{ш.тj}^{рег}$, $U_{ш.хj}^{рег}$. Полученные значения сигналов $U_{ш.тj}$, $U_{ш.хj}$ используются для вычисления массива значений $T_{ш.ПСР}$, состоящего из m отдельных реализаций измеряемых шумовых температур ПСР:

$$T_{ш.ПСР}(i, j) = (1 - R_{ПСР}) \left(\frac{U_{ш.хj} \bar{T}_{ш.тj} - U_{ш.тj} \bar{T}_{ш.хj}}{U_{ш.тj} - U_{ш.хj}} - R_0 T_B \right), \quad (1)$$

где $R_{ПСР}$, R_0 – коэффициенты отражения окон ПСР и ШНГШ, соответственно; T_B – шумовые температуры вентиля и нагрузок (в сторону ШНГШ), в охлажденной и тёплой ПСР T_B примерно составляет 20 и 300 К, соответственно.

Измеренные в трёх диапазонах частот калибровки значения коэффициентов отражения (по мощности) приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Коэффициенты отражения (по мощности) окон ПСР и облучателя ШНГШ

Диапазон частот калибровки, ГГц	R_0	$R_{ПСР}$	$\Delta(R_0)$, $\Delta(R_{ПСР})$
2,2–2,6 (S)	0,027	0,013	$1,3 \cdot 10^{-3}$
7,0–9,5 (X)	0,023	0,018	$1,2 \cdot 10^{-3}$
28,0–31,5 (Ka)	0,031	0,055	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Измеряемое значение шумовой температуры ПСР определяется как среднее по массиву реализаций этих температур. Результаты измерений значений $\bar{T}_{ш.ПСР}$ РТ-13 радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» показали,

Таблица 3

Расчётные значения коэффициента m

$\frac{\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})}{S(\bar{T}_{ш.ПСП})}$	$m (P=0,95)$	$\frac{\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})}{S(\bar{T}_{ш.ПСП})}$	$m (P=0,95)$
0,50	0,81	5,00	0,78
0,75	0,77	6,00	0,79
1,00	0,74	7,00	0,80
2,00	0,71	8,00	0,81
3,00	0,73	9,00	0,82
4,00	0,76	10,00	0,83

что максимальная по входу облучателя шумовая температура не превышает 35, 30 и 65 К в S-, X- и Ka-диапазонах, соответственно. Доверительные границы погрешности результата измерений шумовой температуры вычислялись по формуле [4]:

$$\Delta \bar{T}_{ш.ПСП} = m [\varepsilon(\bar{T}_{ш.ПСП}) + \theta(\bar{T}_{ш.ПСП})],$$

где $\varepsilon(\bar{T}_{ш.ПСП})$, $\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})$ – доверительные границы случайной и неисключённой систематической (НСП) погрешностей результата измерений, определяемые выражениями

$$\varepsilon(\bar{T}_{ш.ПСП}) = t S(\bar{T}_{ш.ПСП});$$

$$\theta(\bar{T}_{ш.ПСП}) = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \bar{T}_{ш.ПСП}}{\partial X_i} \theta(X_i) \right)^2}.$$

$$\text{Здесь } S(\bar{T}_{ш.ПСП}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{ш.ПСП}(t_{i,j}) - \bar{T}_{ш.ПСП})^2 / [n(n-1)]} -$$

среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений; $t=2,26$ – коэффициент Стьюдента; $n=10$; $P=0,95$; $k=1,1$; X_i – составляющие уравнения (1); $\theta(X_i)$ – границы НСП составляющих X_i ; m – коэффициент, зависящий от отношения $\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})/S(\bar{T}_{ш.ПСП})$, например, при $\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})/S(\bar{T}_{ш.ПСП})=5,1$ имеем $m=0,78$. В табл. 3 приведены значения m , вычисленные при разных $\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})/S(\bar{T}_{ш.ПСП})$.

По результатам проведённых исследований в августе 2015 г. в радиоастрономической обсерватории «Зеленчукская» получены следующие данные измерений шумовой температуры ПСП в Ka-диапазоне: доверительные границы (при $P=0,95$) погрешности результата измерений $\Delta \bar{T}_{ш.ПСП}$ не превышают 3,5 К (в S- и X-диапазонах, где составляющие по-

Таблица 4

Составляющие НСП и доверительные границы результата измерений шумовой температуры ПСП

Параметр	Составляющая НСП X_i						
	$T_{ш.т}, \text{ К}$	$T_{ш.х}, \text{ К}$	$T_{в}, \text{ К}$	$R_{ПСП}$	R_o	$U_{ш.т}$	$U_{ш.х}$
$\theta_i(X_i)$	3,8	3,0	2,00	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
$\frac{\partial T_{ш.ПСП}}{\partial X_i} \theta_i(X_i), \text{ К}$	0,3	3,0	0,05	0,14	0,2	0,05	0,5

грешностей меньше, чем в Ka-диапазоне, это условие также выполняется); $\theta(\bar{T}_{ш.ПСП})=3,6$ К; $S(\bar{T}_{ш.ПСП})=0,7$ К; составляющие НСП приведены в табл. 4.

С помощью метрологически аттестованных ШНГШ (в соответствии с аттестованной методикой измерений) измерены шумовые температуры ПСП по входу облучателя радиотелескопа РТ-13 двухэлементного радиоинтерферометра. Осуществлена прослеживаемость результатов измерений шумовой температуры ПСП к ГЭТ 21–2011. Модернизация конструкции разработанного ШНГШ с целью существенного уменьшения времени охлаждения и увеличения равномерности температуры по объёму излучателя позволит в дальнейшем значительно снизить погрешности измерений шумовой температуры ПСП.

Л и т е р а т у р а

1. Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. С. 769–777.
2. Арсаев И. Е., Лапшин А. И., Малай И. М., Саргсян М. В., Юрчук Э. Ф. Широкоапертурные низкотемпературные генераторы шума – эталонные и рабочие меры единицы шумовых и яркостных температур // Метрология в радиоэлектронике: Тезисы докладов X Всерос. науч.-техн. конф., 2016. С. 162–168.
3. Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O., Ivanov D., Ipatov A., Ipatova I., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshev V., Pozdnyakov I., Vekshin Y., Zotov M. The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the «Quasar» VLBI Network // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 79–84.
4. МИ 2083–90. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

Дата принятия: 06.09.2017.