

Широкоапертурные низкотемпературные генераторы шума для калибровки радиотелескопов двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой

И. Е. АРСАЕВ, А. И. ЛАПШИН, М. В. САРГСЯН, Э. Ф. ЮРЧУК

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

Описан разработанный и аттестованный во ВНИИФТРИ комплекс широкоапертурных низкотемпературных генераторов шума, предназначенный для метрологического обеспечения радиотелескопов РТ-13 двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой. Представлены результаты исследований и калибровки эталонных и рабочих широкоапертурных низкотемпературных генераторов шума, требуемых для метрологического обеспечения средств измерений радиояркости и шумовых температур в микроволновой области спектра от 2 до 40 ГГц.

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

The developed and validated by VNIIFTRI complex of wide-aperture low-temperature noise generators designed for metrological assurance of the radio telescopes RT-13 of two-element radio interferometer with a very long baseline (VLBI). The results of studies and calibration of reference and working large-aperture low-temperature noise generators needed for metrological assurance of brightness and noise temperature measuring instruments in the region of 2 to 40 GHz are presented.

Key words: calibration, noise temperature, radio telescope, radio interferometer, wide-band radiator.

Во ВНИИФТРИ создан и аттестован широкоапертурный низкотемпературный генератор шума (ШНГШ) ПНШИ200 в качестве Государственного рабочего эталона единицы шумовой температуры 1-го разряда номинальных значений (81 ± 2) К и (293 ± 2) К в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц. Эталон предназначен для передачи размера единицы шумовой температуры эталонам более низкого разряда и рабочим широкоапертурным генераторам шума. Для калибровки приёмных систем радиотелескопов (РТ) двухэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой создан рабочий ШНГШ РТ, метрологические характеристики которого прослеживаются к эталонному ПНШИ200. Также указанный эталон служит для калибровки и измерений характеристик радиометров водяного пара, измеряющих «влажностную» задержку в тропосфере излучения удалённых космических объектов (квазаров) и внесения поправок в результаты измерений радиоинтерферометра [1]. Двухэлементный радиоинтерферометр и радиометр водяного пара созданы в Институте прикладной астрономии РАН для определения параметров вращения Земли, а также с целью повышения точности и оперативности получения данных ГЛОНАСС.

Технологии создания эталонных ШНГШ, методы и средства их калибровки можно применять при разработке эталонных и рабочих генераторов шума нового поколения, необходимых для метрологического обеспечения создаваемых в России и за рубежом радиотелескопов, спутниковых радиометров дистанционного зондирования Земли, наземных средств измерений (СИ) температуры и влажности атмосферы.

Широкополосные излучатели ШНГШ. Излучатели ШНГШ, характеристики которых приближаются к характеристикам чёрного тела, охлаждаемые до температуры жидкого азота, должны удовлетворять следующим требованиям:

коэффициенты поглощения излучателя $\chi_f = 1 - R_f$, где R_f – интегральный по 4π коэффициент отражения, должен быть не менее 0,9950 в диапазонах частот 2–40 ГГц и температур 78–310 К. Их значения не должны изменяться или могут изменяться незначительно при охлаждении и нагреве в пределах заданного диапазона температур. Связанный с коэффициентом поглощения χ_f коэффициент отражения R_f излучателя соответственно должен быть минимальным во всех диапазонах частот и температур и не превышать $5 \cdot 10^{-3}$;

конструкция и радиопоглощающий материал излучателя должны обеспечивать как можно более быстрое охлаждение излучателя до температуры кипения жидкого азота (78 К). Неравномерность температуры по объёму излучателя в охлаждённом состоянии должна быть не более 0,5 К.

За весь период эксплуатации излучатель должен быть стойким к многократным циклам охлаждения – нагрева в диапазоне температур 310 (максимальная температура окружающей среды) – 78 К.

В миллиметровом диапазоне частот этим требованиям достаточно хорошо удовлетворяют широкоапертурные излучатели, изготовленные из монокристаллического кремния, но согласно оценочным измерениям характеристик специально созданных макетных элементов кремниевых излучателей, на низких частотах в диапазоне 2,14–3,20 ГГц (в S-диапазоне) коэффициенты поглощения χ_f при температуре около 294 К

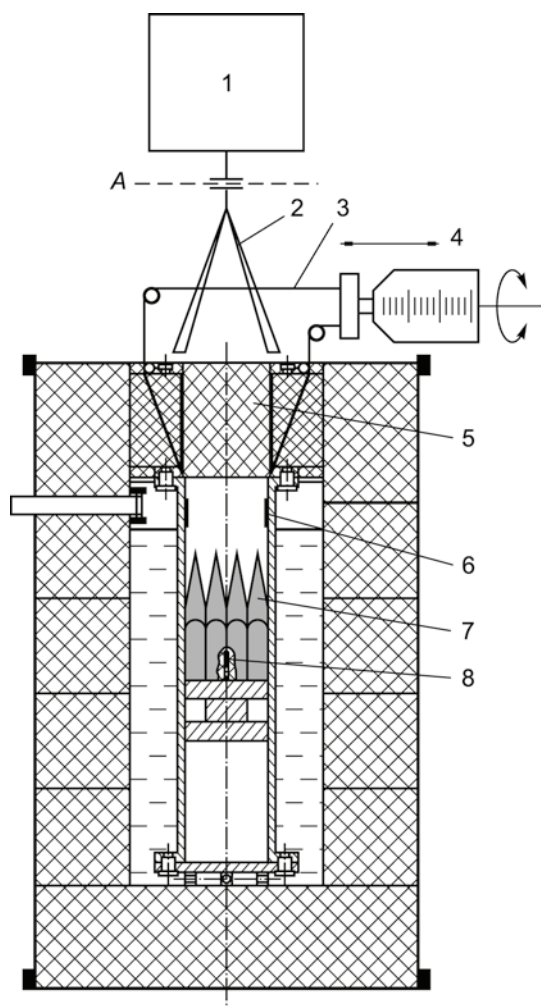


Рис. 1. Установка для измерений характеристик макетных волноводных элементов:

1 – анализатор цепей ZVA-67; 2 – переход волноводный; 3 – тонкие нити для перемещения исследуемой нагрузки; 4, 6 – термоизолирующее окно волновода 90×45 мм и волновод, соответственно; 5 – прецизионный измеритель перемещения нагрузки в волноводе криостата; 7 – исследуемая нагрузка; 8 – платиновый термометр сопротивления

меньше 0,9950 и уменьшаются при охлаждении до 78 К. По этой причине кремниевые излучатели мало пригодны для работы в S-диапазоне. При выборе материала и конструкции излучающих элементов ШНГШ использованы макетные волноводные элементы излучателя, изготовленные в виде волноводных подвижных нагрузок (сечение волновода 90×45 мм). Нагрузки собраны из восьми металло-ферроэпоксидных (МФЭ) или кремниевых поглощающих стержней прямоугольного сечения (22,5×22,5 мм), заточенных с одного конца на конус с углом при вершине 18°. Каждый поглощающий стержень МФЭ нагрузки состоит из внешней оболочки, отлитой из ферроэпоксидного состава, и центрального металлического стержня (алюминиевый сплав), необходимого для увеличения механической прочности излучателя, увеличения равномерности распределения температуры по объёму излучателя, а также для уменьшения времени его охлаждения.

Подбором марки эпоксидной смолы, отвердителя, пластификаторов и наполнителей были выбраны ферроэпоксидные композиты, стойкие к многократным циклам охлаждения до 78 К и последующего нагрева до 310 К. Изготовлены модельные образцы МФЭ-нагрузок различного состава, стойких к термоударам, и нагрузок из кремния различных марок. Измерены характеристики «тёплых» ($T_T \approx 294$ К) и «холодных» ($T_X \approx 78$ К) поглощающих МФЭ-нагрузок.

Схема установки для измерений коэффициентов отражения макетных нагрузок представлена на рис. 1. При измерениях в X- и Ka-диапазонах (7,0–9,5 и 28–34 ГГц соответственно) применяли волноводные переходы 2 от волновода 6 сечением 90×45 мм на волноводы сечениями 28,5×12,6 мм и 7,2×3,4 мм. Анализатор цепей ZVA-67 (Rohde&Schwarz, Германия) 1 калибровали с помощью коаксиальных мер отражения, входящих в состав анализатора. В волновод 6 последовательно помещали исследуемые нагрузки 7 различного состава. Нагрузки перемещали внутри волновода 6 с помощью подъёмного устройства и тонких нитей 3, пропущенных через отверстия диаметром не более 1 мм в узких стенках волновода. Отсчёт перемещения $l > \lambda_B/2$ (λ_B – максимальная длина волны зондирующего излучения в волноводе сечением 90×45 мм) исследуемой нагрузки контролировали прецизионным измерителем линейных перемещений 5 с погрешностью порядка 2 мкм. Шаг перемещения составлял $\Delta h \leq \lambda_B/50$. Для каждого фиксированного положения нагрузки в каждом диапазоне частот $f_{S,X,Ka}$ регистрировали массив коэффициентов стоячей волны по напряжению, которые пересчитывали в коэффициенты отражения по напряжению Γ . Далее по специальной программе на каждой частоте, устанавливаемой с шагом $\Delta f \approx f_{S,X,Ka}/n$, где n – число частотных точек, рассчитывали зависимости коэффициентов отражения от перемещения l нагрузки. Затем вычисляли зависимости от частоты максимальных $\Gamma_{\max}(f_i) = (\Gamma_i^+ + \Gamma_i^-)/2$ и минимальных $\Gamma_{\min}(f_i) = (\Gamma_i^+ - \Gamma_i^-)/2$ значений коэффициентов отражения, соответствующих коэффициентам отражения от исследуемой подвижной нагрузки (отражение с переменной фазой) Γ_H и неподвижных элементов измерительного тракта (отражение с постоянной фазой) Γ_{TP} (рис. 2). Соответствие полученных значений коэффициентов отражения измеряемой подвижной нагрузке или неподвижным элементам измерительного тракта устанавливали при анализе амплитуды и формы полученных характеристик подвижных нагрузок с разными коэффициентами отражения. При сравнимых коэффициентах отражения тракта Γ_{TP} и исследуемой нагрузки Γ_H условия $\Gamma_H > \Gamma_{TP}$ и $\Gamma_{TP} > \Gamma_H$ в диапазоне частот измерений могут изменяться. В этом случае результирующая частотная зависимость для нагрузки $\Gamma_H(f)$ будет содержать как максимальные $\Gamma_{\max}(f_i)$, так и минимальные $\Gamma_{\min}(f_i)$ значения коэффициентов отражения (см. рис. 2).

Коэффициенты отражения образцов, находящихся при температуре жидкого азота, измерялись в том же волноводе сечением 90×45 мм, помещённом в криостат, ох-

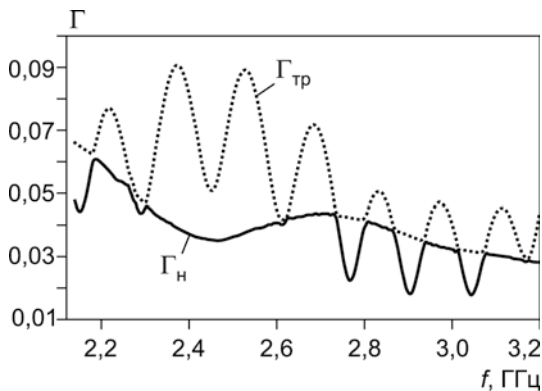


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов отражения нагрузки Γ_n и измерительного тракта $\Gamma_{тр}$

лаждаемый жидким азотом. Для сравнения измерялись коэффициенты отражения нагрузок из кремния и МФЭ (57 % карбонильного железа). Результаты измерений в S-диапазоне при температурах 300 и 78 К приведены на рис. 3. В данном частотном диапазоне коэффициенты отражения МФЭ-нагрузок $R_f \leq 10^{-3}$. При охлаждении до температуры жидкого азота эти коэффициенты не изменяются или изменяются незначительно, в то время как коэффициенты отражения кремниевых нагрузок имеют неприемлемо высокие, увеличивающиеся с уменьшением температуры значения.

Результаты измерений коэффициентов отражения во всех частотных диапазонах для МФЭ с разным процентным содержанием карбонильного железа показали, что наименьший коэффициент отражения имеет нагрузка с содержанием карбонильного железа 57 %. В X- и Ka-диапазонах коэффициенты отражения нагрузок значительно меньше, чем в S-диапазоне. В связи с этим для изготовления излучателей ШНГШ в диапазоне частот 2–40 ГГц использовали именно такие нагрузки.

Широкоапертурный низкотемпературный генератор шума ПНШИ200.

Указанный генератор (Государственный рабочий эталон единицы шумовой температуры 1-го разряда номинальных значений (81 ± 2) К и (293 ± 2) К в диапазоне частот от 2 до 40 ГГц) применяют для калибровки ШНГШ радиотелескопов, проверки радиометров водяного пара [1] и других СИ шумовых и яркостных температур. В состав ПНШИ200 входят охлаждаемый жидким азотом излучатель и криостат. Температуру излучателя ПНШИ200 измеряют пятью платиновыми термометрами сопротивления типа ПТСВ-2-3, их выводы подведены к разъёму типа

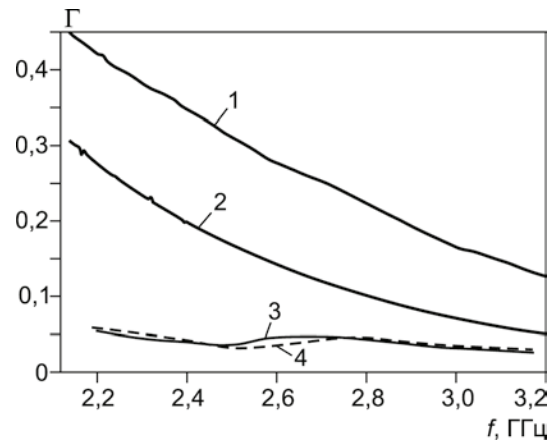


Рис. 3. Сравнение коэффициентов отражения в S-диапазоне кремниевых (1, 2) и металло-феррооксидных (3, 4) нагрузок с идентичными геометрическими размерами при комнатной температуре (2, 4) и при температуре кипения жидкого азота (1, 3)

РС-32 с золочёными контактами по четырёхпроводной схеме. К разъёму подключают прецизионный измеритель температуры типа МИТ8.10. Излучатель диаметром 210 мм изготовлен из МФЭ-стержней длиной 135 мм, конструкция и характеристики которых описаны выше. Номинальные значения шумовой температуры ПНШИ200 составляют (81 ± 2) и (293 ± 10) К, неравномерность термодинамической температуры по объёму «холодного» излучателя — около 0,4 К.

При калибровке «тёплого» и «холодного» ПНШИ200 определяли его шумовые температуры $T_{ш.т}$, $T_{ш.х}$, соответ-

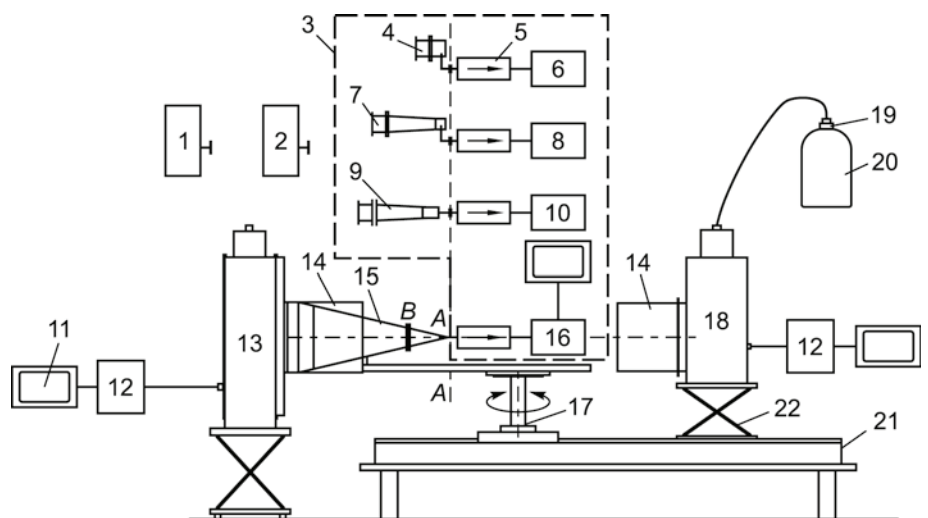


Рис. 4. Схема установки для измерений шумовых температур ШНГШ: 1, 2 — эталонные волноводный и коаксиальный ШНГШ; 3 — приёмная система; 4 — переход на волновод сечением 90×45 мм и коаксиальный волновод (S-диапазон); 5 — вентиль; 6, 8, 10 — приёмники шумового излучения S-, X-, Ka-диапазонов, соответственно; 7 — переход на волновод сечением 28,5×12,6 мм и коаксиальный волновод (X-диапазон); 9 — переход на волновод сечением 7,2×3,4 мм; 11 — компьютер; 12 — измеритель температуры МИТ8.10; 13 — ШНГШ РТ; 14 — бленда; 15 — рупор; 16 — приёмник излучателя; 17 — юстировочный столик; 18 — ПНШИ200; 19, 20 — переливное устройство и сосуд Дьюара для жидкого азота, соответственно; 21 — оптическая скамья; 22 — подъёмное устройство

Т а б л и ц а 1
Шумовые добавки для эталонного ПНШИ200

Диапазон частот эталона, ГГц	Диапазон частот калибровки, ГГц	Шумовая температура, К		Шумовая добавка, К	
		$T_{ш.т}$	$T_{ш.х}$	$\Delta T_{ш.т}$	$\Delta T_{ш.х}$
2–40	2,2–2,6 (S)	293,0	80,3	–1,0	–0,3
	7,0–9,5 (X)	293,9	81,9	–0,1	1,3
	28–34 (Ka)	294,0	82,2	0	1,6

ственно, «поэлементным» методом в соответствии с уравнением измерений

$$T_{ш.т.х} = [\chi_f \bar{T}_{т.х} \bar{\eta}_W + (1 - \bar{\eta}_W) \bar{T}_{т.хW}] (1 - \bar{R}_W), \quad (1)$$

где $\bar{T}_{т.х}$ – средние по объёму термодинамические температуры «тёплого» и «холодного» излучателя ПНШИ200, которые вычисляются усреднением пяти значений температуры, измеренных платиновыми термометрами сопротивления типа ПТСВ-2-3; $\bar{\eta}_W$ – коэффициент полезного действия (КПД) радиопрозрачного теплоизолирующего окна; $\bar{T}_{т.хW}$ – эффективные термодинамические температуры окна ШНГШ; $\bar{R}_W$ – коэффициент отражения (по мощности) апертуры ШНГШ в составе ПНШИ200.

Таким образом, при калибровке ПНШИ200 определяли значения следующих параметров: термодинамические температуры $\bar{T}_{т.х}$, $\bar{T}_{т.хW}$; коэффициент поглощения χ_f излучате-

ля; КПД окна $\bar{\eta}_W$; коэффициент отражения $\bar{R}_W$. Текущие значения шумовых температур $T_{ш.т.х}$ во всех частотных диапазонах ПНШИ200 вычислялись по формуле

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

где $\Delta T_{ш.т.х}(S, X, Ka)$ – шумовые добавки к измеренным текущим значениям термодинамических температур излучателя ПНШИ200 в S-, X- и Ka-диапазонах, соответственно (табл. 1).

Коэффициенты χ_f , $\bar{\eta}_W$, $\bar{R}_W$ уравнения (1) измеряли с применением аттестованных методик на установке, схема которой представлена на

рис. 4. Для внесения поправок в результаты измерений этих параметров, во всех частотных диапазонах измеряли КПД $\bar{\eta}_p$ рупора 15 (диаметр апертуры 210 мм) с волноводными переходами 4, 7, 9.

Суммарные стандартные неопределённости результатов измерений шумовой температуры «тёплого» и «холодного» ПНШИ200 определяли по формуле [2]:

$$u_{\Sigma T.х}(T_{ш.т.х}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial T_{ш.т.х}}{\partial X_{т.х}^i} \right)^2 (u_{т.х}^{A,B})^2},$$

где $X_{т.х}$ – составляющие уравнения (1) для «тёплого» и «холодного» ПНШИ200; $u_{т.х}^{A,B}$ – стандартные неопределённости измерений i -й составляющей уравнения (1) (табл. 2).

Широкоапертурный низкотемпературный генератор шума для калибровки радиотелескопов (ШНГШ РТ). Данный генератор включён в комплекс средств ка-

Т а б л и ц а 2
Суммарные стандартные неопределённости и их составляющие оценки уровней шумовых температур «тёплых» и «холодных» ПНШИ200

Диапазоны частот калибровки, ГГц	$\frac{u_{т1}^A(T_{ш.т}), K}{u_{х1}^A(T_{ш.х}), K}$	$\frac{u_{т1}^B(T_{ш.т}), K}{u_{х1}^B(T_{ш.х}), K}$	$\frac{u_{т2}^B(\chi_f), K}{u_{х2}^B(\chi_f), K}$	$\frac{u_{т3}^B(\eta_{ш.тW}), K}{u_{х3}^B(\eta_{ш.хW}), K}$	$\frac{u_{т5}^B(R_{шW}), K}{u_{х5}^B(R_{шW}), K}$	$\frac{u_{с}^{\Sigma}(T_{ш.т}), K}{u_{с}^{\Sigma}(T_{ш.х}), K}$
2,2–2,6 (S)	0,1/0,4	0,04/0,3	1,3/0,4	0,3/0,3	0,3/0,2	1,4/0,8
7,0–9,5 (X)	0,1/0,4	0,04/0,3	0,9/0,2	0,1/0,1	0,1/0,05	0,9/0,5
28–34 (Ka)	0,1/0,4	0,04/0,3	1,5/0,3	0,5/0,5	0,7/0,1	1,7/0,7

Примечание. Составляющие $u_{т4}^B(T_{тW})/u_{х4}^B(T_{хW})$ пренебрежимо малы.

Т а б л и ц а 3
Значения шумовых добавок для ШНГШ РТ №№ 1, 2

Диапазон частот, ГГц	$\Delta T_{ш.т}^{ШНГШ1}, K$	$\Delta T_{ш.х}^{ШНГШ1}, K$	$\Delta T_{ш.т}^{ШНГШ2}, K$	$\Delta T_{ш.х}^{ШНГШ2}, K$
2,2–2,6 (S)	0,2	4,7	0,3	5,6
7,0–9,5 (X)	0,1	3,7	0,2	5,2
28–34 (Ka)	0,1	3,4	0,2	3,1

либровки радиотелескопов по шумовой температуре. Комплекс состоит из двух идентичных комплектов аппаратуры, находящихся в радиоастрономических обсерваториях «Бадары», Бурятия (№ 1) и «Зеленчукская» (№ 2). Каждый комплект содержит следующие устройства:

охлаждаемый жидким азотом ШНГШ РТ; вспомогательный «тёплый» пассивный широкоапертурный генератор шума (ШГШ) РТ;

Т а б л и ц а 4

Типичные значения составляющих суммарных стандартных неопределённостей оценки уровней эквивалентных шумовых температур ШНГШ

Диапазоны частот калибровки, ГГц	$\frac{u^B(\bar{T}_T^{\text{ПНШИ}})}{u^B(\bar{T}_x^{\text{ПНШИ}})}$	$\frac{u^A(\bar{U}_T^{\text{ПНШИ}})}{u^A(\bar{U}_x^{\text{ПНШИ}})}$	$\frac{u^A(\bar{U}_T^{\text{ПНШИ}})}{u^A(\bar{U}_x^{\text{ПНШИ}})}$	$\frac{u^A(\bar{U}_T^{\text{ПНШИ}})}{u^A(\bar{U}_x^{\text{ПНШИ}})}$	$\frac{u^A(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}})}{u^A(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})}$	$\frac{u^B(R_T)}{u^B(R_x)}$	$\frac{u_c^{\Sigma}(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}})}{u_c^{\Sigma}(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})}$	$\frac{u_p(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}})}{u_p(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})}$
2,2–2,6 (S)	1,4/0,8	0,8/0,9	0,4/0,6	0,6/0,4	0,3/0,3	0,3/0,6	1,8/1,6	3,6/3,2
7,0–9,5 (X)	0,9/0,5	1,4/0,4	0,5/0,5	0,5/0,5	0,1/0,1	0,3/0,3	2,0/1,0	4,0/2,0
28–34 (Ka)	0,7/0,7	0,6/0,6	0,2/0,3	0,3/0,2	0,5/0,5	0,5/0,7	1,9/1,5	3,8/3,0

прецизионные СИ термодинамической температуры излучателей ШНГШ и ШГШ;

средства охлаждения излучателя ШНГШ РТ до 78 К (температуры кипения жидкого азота);

вспомогательные средства установки ШНГШ РТ и ШГШ на облучатель калибруемого радиотелескопа.

Уровни шумовых температур обоих ШНГШ РТ определяли методом сравнения с эталонным ПНШИ200 на установке (см. рис. 4). Значения шумовой температуры калибруемого «тёплого» или «холодного» ШНГШ РТ в моменты времени t_i, t_j находили по уравнениям измерений

$$T_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}(t_i) = \bar{T}_T^{\text{ПНШИ}} + (U_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}(t_i) - \bar{U}_{\text{ш.т}}^{\text{ПНШИ}}) / S_{\text{ПС}};$$

$$T_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}(t_j) = \bar{T}_x^{\text{ПНШИ}} + (U_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}(t_j) - \bar{U}_{\text{ш.х}}^{\text{ПНШИ}}) / S_{\text{ПС}},$$

где $\bar{T}_T^{\text{ПНШИ}}, \bar{T}_x^{\text{ПНШИ}}$ – шумовые температуры ПНШИ200; $U_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}, U_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}$ – уровни сигналов приёмников шумового излучения для «тёплого» и «холодного» ШНГШ РТ, соответственно; $S_{\text{ПС}} = (\bar{U}_T^{\text{ПНШИ}} - \bar{U}_x^{\text{ПНШИ}}) / (\bar{T}_T^{\text{ПНШИ}} - \bar{T}_x^{\text{ПНШИ}})$ – параметр градуировочной характеристики приёмной системы (по входу рупора), $\bar{U}_T^{\text{ПНШИ}}, \bar{U}_x^{\text{ПНШИ}}$ – средние значения уровней сигналов приёмников для «тёплого» и «холодного» ПНШИ200.

За результат измерений принимали средние значения шумовых температур:

$$\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}(t_i) / n;$$

$$\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}} = \sum_{j=1}^m T_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}(t_j) / m.$$

Полученные значения $\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}, \bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}$ записываются через измеренные текущие значения средних термодинамических температур $\bar{T}_T^{\text{ПНШИ}}, \bar{T}_x^{\text{ПНШИ}}$ «тёплых» и «холодных» излучателей ШНГШ РТ №№ 1, 2 и паспортных значений шумовых добавок $\Delta T_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}, \bar{T}_x^{\text{ПНШИ}}$, измеренных в процессе калибровки каждого ШНГШ РТ:

$$\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}} = \bar{T}_T + \Delta T_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}, \bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}} = \bar{T}_x + \Delta T_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}. \quad (6)$$

Значения шумовых добавок для ШНГШ РТ № 1 и № 2 приведены в табл. 3.

Были вычислены суммарные стандартные неопределённости косвенных измерений шумовой температуры ШНГШ РТ по формулам

$$u_c^{\Sigma}(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{u}_{Ti}^2(X_{Ti}) + u_A^2(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}})};$$

$$u_c^{\Sigma}(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \bar{u}_{xi}^2(X_{xi}) + u_A^2(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})},$$

где $\bar{u}_T(X_{Ti}), \bar{u}_x(X_{xi})$ – стандартные неопределённости составляющих величин, приведённых к уровням измеряемых шумовых температур; X_{Ti}, X_{xi} – некоррелированные оценки составляющих величин, входящих в уравнения измерений шумовой температуры ШНГШ; $u_A(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}), u_A(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})$ – неопределённости воспроизведения средних значений шумовой температуры,

$$u_A(\bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}}(t_i) - \bar{T}_{\text{ш.т}}^{\text{ШНГШ}})^2 / [n(n-1)]};$$

$$u_A(\bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}}(t_i) - \bar{T}_{\text{ш.х}}^{\text{ШНГШ}})^2 / [n(n-1)]}.$$

Типичные значения составляющих суммарных стандартных неопределённостей оценки уровней эквивалентных шумовых температур ШНГШ приведены в табл. 4.

Расширенные неопределённости результата измерения шумовых температур ШНГШ РТ получены путём умножения суммарных стандартных неопределённостей на коэффициент охвата $k=2$, соответствующий уровню доверия $P=95\%$ при допущении нормального распределения.

Закключение. Разработаны и аттестованы в качестве рабочего эталона единицы шумовой температуры в диапазоне частот 2–40 ГГц охлаждаемые жидким азотом ШНГШ, предназначенные для метрологического обеспечения микроволновых радиометрических систем, включая радиотелескопы, радиометры водяного пара и другие СИ шумовых и яркостных температур.

Л и т е р а т у р а

1. Арсаев И. Е., Быков В. Ю., Ильин Г. Н., Юрчук Э. Ф. Радиометр водяного пара – средство измерений радиояростной температуры атмосферы // Измерительная техника.

2017. № 5. С. 60–65.

2. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

Дата принятия: 06.09.2017.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.1.08

Разработка акустических методов контроля напряжённопдеформированного состояния резьбовых соединений

**М. Я. МАРУСИНА¹, А. В. ФЁДОРОВ¹, В. Е. ПРОХОРОВИЧ¹,
И. В. БЕРКУТОВ¹, В. А. БЫЧЕНОК², Н. В. ТКАЧЁВА², А. Л. МАЙОРОВ³**

¹Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: marusina_m@mail.ru

²Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники, С.-Петербург, Россия

³Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Показана актуальность разработки акустических методов контроля напряжённопдеформированного состояния резьбовых соединений. Представлены методы и схемы акустических измерений. Описан результат разработки и внедрения в производственный процесс специализированной оснастки, обеспечивающей повышение точности определения механических напряжений в резьбовом соединении.

Ключевые слова: резьбовое соединение, неразрушающий контроль, напряжённопдеформированное состояние, ультразвуковые методы.

The efficiency of a threaded joint is determined by a complex of factors, including a stress-strain state. The work shows the relevance of the development of acoustic methods for controlling the stress-strain state of threaded joints. The modern developments in this field with the use of acoustic methods are considered. Methods and schemes of acoustic measurements are presented. The article describes the result of development and introduction into the production process of specialized equipment ensuring an increase in the accuracy of determining the magnitude of mechanical stresses in a threaded joint.

Key words: threaded connection, non-destructive testing, stress-strain state, ultrasonic methods.

Контроль напряжённопдеформированного состояния (НДС) является одной из наиболее актуальных задач в технической диагностике изделий. Механические напряжения, возникающие в элементах конструкций не должны превышать допустимый порог, иначе может произойти полное или частичное разрушение изделий. При проектировании ответственных конструкций и изделий в подавляющем большинстве случаев значения параметров НДС, обеспечивающих работоспособность, определяются расчётными методами. Однако эти методы не позволяют контролировать реальную ситуацию – оценивать действительные (фактические) значения параметров НДС, в особенности в процессе мониторинга при эксплуатации. Неразрушающий контроль (НК) НДС и экспериментальная оценка остаточных и действующих напряжений в критических элементах конструкций приобретает всё большую значимость. В настоящее время не существует

методов, позволяющих с достаточной достоверностью определять параметры НДС контролируемых объектов.

Известны различные методы НК НДС, применяемые в производственном процессе: магнитные, рентгеновские, акустические, а также методы, основанные на дифрактометрии напряжений с использованием потока нейтронов. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, известные специалистам в области НК. В случае контроля резьбовых соединений, на взгляд авторов настоящей статьи, наиболее приемлемыми являются акустические методы, позволяющие контролировать напряжения, возникающие в объёме материала. При помощи остальных методов измеряют напряжения в приповерхностном слое. При этом аппаратура, реализующая акустический метод, достаточно компактная и мобильная, её можно применять как в условиях производства, так и в процессе контроля затяжки на ста-