

## Устройство контроля параметров радиоастрономических приемников S/X-диапазонов

© Ю. В. Векшин, М. Б. Зотов, А. С. Лавров

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Для контроля параметров радиоастрономических приемников S/X-диапазонов и их стабильности на радиотелескопах в обсерваториях в ИПА РАН разработано компактное устройство мониторинга параметров. Устройство предназначено для контроля выходной мощности, коэффициента передачи, шумовой температуры и стабильности перечисленных параметров приемников как в целом, так и их составных частей (криогенных приемных блоков и блоков преобразования частоты). В работе приведено описание и принцип работы устройства. Представлены методики и результаты измерений стабильности приемников S/X-диапазонов, определяемой по дисперсии Аллана, с помощью разработанного устройства. Сопоставлены результаты измерений стабильности коэффициентов передачи и шумовой температуры с помощью устройства с результатами, полученными с помощью измерителя мощности, векторного анализатора цепей и анализатора коэффициента шума. Приведено сравнение стабильности приемника в режимах полной мощности и в модуляционном.

**Ключевые слова:** радиоастрономический приемник, дисперсия Аллана, стабильность коэффициента усиления, шумовая температура, флуктуации.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.51.32-41>

### Введение

Чувствительность  $\Delta T$  радиометров ограничена нестабильностью коэффициента передачи  $G$  и шумовой температуры  $T_{ш}$  приемника [1]:

$$\Delta T = T_{\text{сист}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta f \cdot \tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{ш}}{T_{ш}}\right)^2} \quad (1)$$

где  $T_{\text{сист}}$  — шумовая температура системы,  $\Delta f$  — полоса частот,  $\tau$  — время накопления,  $\Delta G$  — изменение коэффициента передачи,  $\Delta T_{ш}$  — изменение шумовой температуры. Для  $\Delta f = 1$  ГГц и  $\tau = 0.1$  с отношение  $\Delta T/T = 10^{-4}$ . Для оценки влияния стабильности  $\Delta G/G$  на чувствительность ее необходимо измерять с не меньшей точностью —  $10^{-4}$  при  $\tau = 0.1$  с. Основными способами измерения стабильности являются: долговременная регистрация выходного сигнала измеряемого объекта при согласованной нагрузке на его входе [2] или подача внешнего сигнала и его регистрация во времени на входе и выходе измеряемого объекта [3]. Точность измерения выходной мощности шумового сигнала приемника анализатором спектра ( $10^{-3}$ ) ограничена его полосой пропускания (не более 8 МГц) и «мертвым временем» при ска-

нировании широкой полосы приемника 1 ГГц [4]. Достаточную точность измерений дает применение измерителя мощности для измерения монохроматического сигнала генератора, но при этом теряется информация о стабильности во всей рабочей полосе частот. Для измерения мощности шумового сигнала во всей полосе приемника необходимо обеспечить достаточный уровень мощности на входе измерителя. При измерении отдельных блоков приемника требуется дополнительное усиление и фильтрация полосы частот. Приемные системы радиотелескопов РТ-13 [5] имеют 8 каналов и для одновременного измерения параметров приемной системы необходимы многоканальные измерители.

Для проведения исследования стабильности приемников на радиотелескопах в обсерваториях необходимо создание компактного устройства контроля параметров, позволяющего контролировать выходную мощность, коэффициент передачи, шумовую температуру приемника и его отдельных блоков и стабильность во времени этих параметров.

## Описание и принцип работы устройства

Разработано устройство контроля параметров радиоастрономических приемников S/X-диапазонов радиотелескопов РТ-32 и РТ-13. Устройство состоит из сверхвысокочастотного (СВЧ) блока, реализующего функции усиления, фильтрации и генерации шумового сигнала, и блока сбора данных, осуществляющего квадратичное детектирование и оцифровку сигнала. Структурная схема устройства представлена на рис. 1, фотография — на рис. 2.

В СВЧ-блоке установлены усилители для обеспечения достаточного уровня сигнала при измерении отдельных блоков приемника. Для формирования полосы частот в канале S-диапазона установлены фильтры в диапазоне 2.3–2.4 ГГц, не содержащем помех, в канале X-диапазона — фильтры 8.2–9.2 ГГц, соответствующие рабочей полосе приемника. Генераторы шума необходимы для подачи входного шумового сигнала при измерениях коэффициента передачи и шумовой температуры приемника. Термостабилизация узлов СВЧ-блока обеспечивается с помощью элементов Пельтье. Управление СВЧ-блоком реализовано по интерфейсу Ethernet с помощью платы управления, расположенной в блоке, и программы управления на ПК. Оператор может дистанционно включать усилители и генераторы шума, регулировать ослабление аттенюаторов. Основные параметры СВЧ-блока приведены в табл. 1.

В блоке сбора данных детекторы и модули ввода сигналов позволяют регистрировать мощность 8 каналов приемника, цифровой модуль вывода используется для создания сигнала модуляции для модуляционного режима работы приемника и измерения стабильности шумовой температуры, модуль ввода напряжений используется для контроля напряжений питания блоков приемника (12 каналов). Управление блоком сбора данных осуществляется с помощью Ethernet-шасси NI, регистрация и визуализация данных на ПК осуществляется в разработанной в среде LabVIEW программе. В блоке используются коаксиальные детекторы с коэффициентом передачи 500 мВ/мВт, в диапазоне 42...22 дБм отклонение передаточной характеристики от квадратичной составляет менее 2 %. В качестве аналого-цифрового преобразо-

вателя для измерения выходного сигнала детектора используются два модуля ввода NI 9238 (диапазон  $\pm 500$  мВ, разрешение 24 бит, частота дискретизации  $f_d = 50$  кГц, 4 канала). Среднеквадратическое отклонение (СКО) собственного шума модуля при усреднении на интервале 0.1 с составляет 70 нВ. СКО собственного шума блока сбора данных с учетом коэффициента передачи детектора составляет  $-69$  дБм на интервале 0.1 с. Для контроля напряжений питания блоков приемника используется модуль ввода NI 9220 ( $\pm 10$  В, 16 бит,  $f_d = 100$  кГц, 16 каналов), собственный шум на интервале 0.1 с составляет 5 мкВ. Для генерации сигналов модуляции используется цифровой модуль вывода NI 9402 (TTL, время обновления 55 нс, 4 канала). Использование многофункциональных устройств для сбора данных и создания управляющих сигналов радиометров встречается в литературе [6].

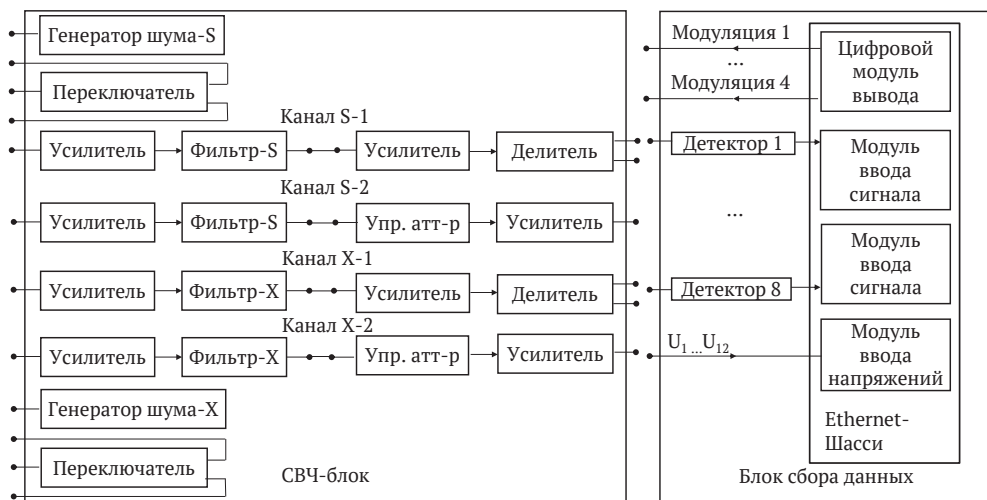


Рис. 1. Структурная схема устройства контроля параметров приемников

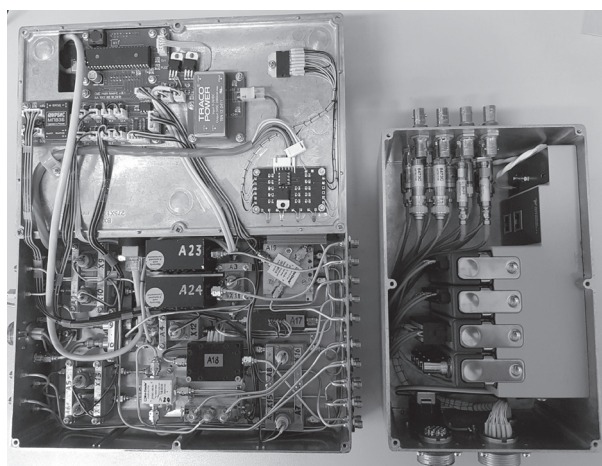


Рис. 2. Устройство контроля параметров приемников: слева — СВЧ-блок, справа — блок сбора данных

Основные параметры СВЧ-блока устройства контроля

	S-диапазон (2.3–2.4 ГГц)		X-диапазон (8.2–9.2 ГГц)	
	G, дБ	$T_{ш}$ , К	G, дБ	$T_{ш}$ , К
Канал-1	52	392	47	224
Канал-2	55	383	50	237
Генератор шума	–	181000	–	101000

Устройство может использоваться в трех режимах: контроль выходной мощности, контроль коэффициента передачи, контроль шумовой температуры приемника. Изменение режима измерения устройства осуществляется установкой перемычек на СВЧ-блоке.

Контроль выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  приемника необходим как для измерения его стабильности, так и для измерения шумовой температуры приемника с помощью нагрузки, охлаждаемой жидким азотом, а также для радиометрических измерений параметров радиотелескопа.

Блок сбора данных позволяет контролировать мощность 8 каналов приемника в диапазоне от  $-42$  дБм до  $-22$  дБм. При контроле стабильности мощности относительная точность составляет от  $2 \cdot 10^{-5}$  при мощности  $-22$  дБм до  $2 \cdot 10^{-3}$  при мощности  $-42$  дБм на входе блока на интервале 0.1 с.

Для контроля выходного сигнала отдельных блоков приемника (входных криогенных приемных блоков и блоков преобразования частоты) дополнительное усиление и фильтрация осуществляется в СВЧ-блоке устройства. Сигнал с выходов блоков подается на входы усилителей СВЧ-блока, а с выходов СВЧ-блока — на блок сбора данных. Устройство позволяет одновременно контролировать выходные сигналы 4 каналов: левой и правой поляризации S- и X-диапазонов приемника. При использовании СВЧ-блока динамический диапазон устройства составляет от  $-84$  дБм до  $-35$  дБм, при этом мощность на входе детектора с помощью внешнего аттенюатора устанавливается не более  $-22$  дБм. Мощность шума на выходе криоблока в зависимости от его режима («теплый» или «холодный») и сигнала на входе («небо» или согласованная нагрузка 300 К) составляет от  $-68$  дБм до  $-53$  дБм, что попадает в динамический диапазон устройства.

В режиме контроля коэффициента передачи (и его стабильности) измеряются мощности шумовых сигналов на входе  $P_{\text{вх}}$  и на выходе измеряемого устройства  $P_{\text{вых}}$  (рис. 3), коэффициент передачи вычисляется как их отношение  $G = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ . Опорный сигнал генератора шума фильтруется в заданном диапазоне и усиливается до необходимого для его измерения уровня. Далее сигнал разделяется и измеряется напрямую и после прохода через измеряемое устройство. Мощность опорного сигнала с помощью аттенюатора устанавливается на верхнюю границу динамического диапазона детектора 22 дБм. Динамический диапазон измерения коэффициента передачи составляет от 0 до 20 дБ с линейностью не более 0.1 дБ и определяется динамическим

диапазоном блока сбора данных. Динамический диапазон расширяется за счет установки внешнего аттенюатора после измеряемого устройства, ослабление аттенюатора выбирается равным коэффициенту передачи устройства для обеспечения близких уровней мощности сигналов на входах детекторов. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) на выходах делителя составляет не более 1.6, на входе детектора — не более 1.2. Для улучшения согласования тракта с измеряемым объектом на выходах делителя и входе детектора устанавливаются аттенюаторы 10 дБ, с аттенюаторами КСВН составляет не более 1.09. До начала измерения производится калибровка: сигналы с выходов делителя подключаются к детекторам, тем самым учитывается неидентичность каналов. Таким образом, погрешность измерения коэффициента передачи определяется точностью внешнего аттенюатора, устанавливаемого после измеряемого устройства, и составляет  $\pm 0.3$  дБ. Относительная погрешность измерения стабильности коэффициента передачи составляет от  $3 \cdot 10^{-5}$  при мощности  $-22$  дБм на входе блока сбора данных до  $3 \cdot 10^{-3}$  при мощности  $-42$  дБм на интервале 0.1 с.

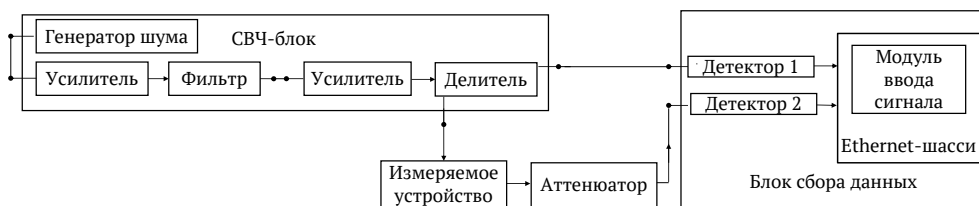


Рис. 3. Схема контроля коэффициента передачи

Для контроля шумовой температуры и ее стабильности на вход блока приемника попеременно подаются сигналы от генератора шума и согласованной нагрузки (300 К) с помощью переключателя, управляемого сигналом модуляции, генерируемом в блоке сбора данных (рис. 4). Выходная мощность блока приемника усиливается и измеряется отдельно на двух полупериодах модуляции, соответствующих двум разным источникам входного сигнала. При измерениях шумовой температуры на выход переключателя устанавливается аттенюатор 23 дБ для получения шумовой температуры генератора шума около 1000 К. Аттенюатор также минимизирует рассогласование тракта.

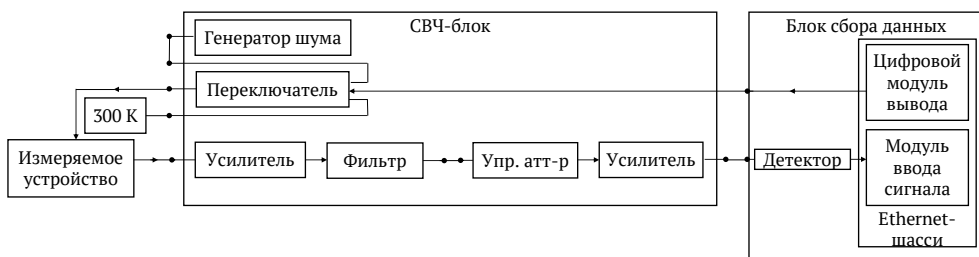


Рис. 4. Схема контроля шумовой температуры

Погрешность измерения шумовой температуры  $\Delta T_{ш}$  определяется по формуле:

$$\Delta T_{ш} = \sqrt{\left(\frac{T_{т} - T_{х}}{(n-1)^2} \cdot \Delta n\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{т}}{n-1}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \Delta T_{х}}{n-1}\right)^2} \quad (2)$$

где  $n$  – отношение мощностей при «теплой» нагрузке с температурой  $T_{т}$  и «холодной» нагрузке с температурой  $T_{х}$  на входе измеряемого устройства.

Шумовая температура генератора шума  $T_{т} = 905$  К измерена измерителем коэффициента шума с погрешностью  $\Delta T_{т} = \pm 7$  К, после прогрева изменение за час  $\Delta T_{т} = 1$  К. Температура согласованной нагрузки  $T_{х} = 300$  К определяется с точностью  $\Delta T_{х} = \pm 1$  К, изменение за час  $\Delta T_{х} = 1$  К. Погрешность измерения отношения мощностей  $\Delta n$  на линейном участке характеристики детектора определяется кратковременной погрешностью измерения мощности  $\Delta n = 1.5 \cdot 10^{-4}$  (1 с), переключение между «теплой» и «холодной» нагрузками происходит в течение 1 с. При подстановке значений в формулу (2) получим погрешность измерения  $\Delta T_{ш} = \pm 4$  К для  $T_{ш} = 10$  К,  $\Delta T_{ш} = \pm 9.5$  К для  $T_{ш} = 500$  К.

Установка устройства контроля в приемную систему радиотелескопа РТ-13 по схеме, показанной на рис. 5, позволяет независимо контролировать работоспособность основных блоков: криогенного приемного фокального блока (КПФБ) и блока преобразования частот (БПЧ). Для контроля коэффициента передачи блоков и их стабильности опорный шумовой сигнал вводится в КПФБ и измеряется на выходе блоков через направленные ответвители (НО). Данная схема позволяет также проводить контроль шумовой температуры КПФБ и параметров радиотелескопа по высокой частоте (исключая БПЧ). Уровень сигнала на выходе КПФБ при включенном и выключенном генераторе шума регулируется управляемым аттенуатором в СВЧ-блоке.

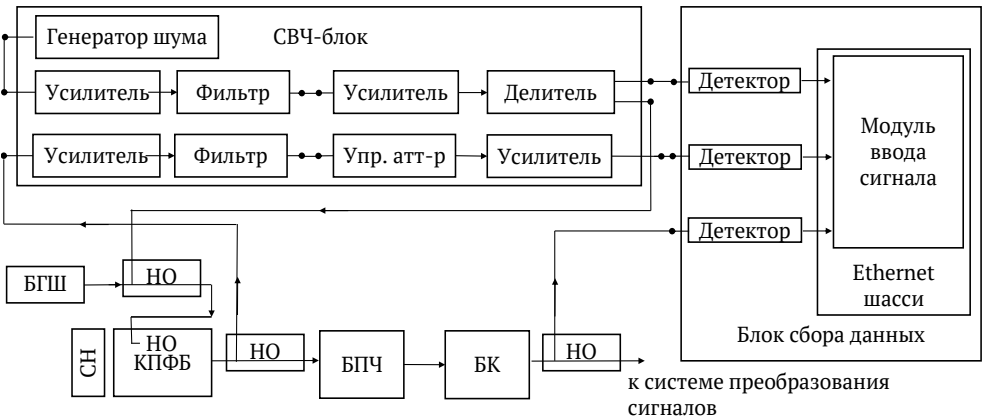


Рис. 5. Схема контроля параметров блоков приемной системы РТ-13

## Результаты измерений

Стабильность определяется с помощью расчета дисперсии Аллана [7] по временной записи зарегистрированных параметров измеряемого устройства [8]. Для оценки стабильности коэффициента передачи самого устройства кон-

троля, использовалась схема, приведенная на рис. 3, где шумовой сигнал с выходов делителя подавался напрямую на оба детектора без измеряемого устройства и определялось отношение этих сигналов. На рис. 6а представлены результаты измерения собственной стабильности коэффициента передачи устройства (1) в сравнении с другими измерительными системами, использованными ранее [9]: (2) — измеритель мощности N1914A с датчиком 8487D и генератор Agilent 8257D (на одной частоте) и (3) — векторный анализатор цепей R&S ZVA40 (измерение среднего коэффициента передачи в полосе 1 ГГц) — (3). Собственная стабильность устройства (1) несколько лучше таковой анализатора цепей (3) и несколько хуже стабильности измерителя мощности (2). На рис. 6б представлены результаты измерения стабильности коэффициента передачи приемника X-диапазона РТ-13, измеренной устройством контроля (1) и измерителем мощности с генератором (2) по методике [9]. Графики совпадают, что свидетельствует о возможности использования устройства контроля для измерения стабильности приемника. На рис. 7а представлены результаты измерений стабильности коэффициентов передачи блоков приемника S-диапазона РТ-13 по схеме, приведенной на рис. 5. Нестабильность КПФБ (1) больше, чем БПЧ (2) и совпадает с нестабильностью коэффициента передачи приемника в целом (3). Таким образом, в приемнике S-диапазона основную нестабильность вносит КПФБ.

Проверена работа блока сбора данных в модуляционном режиме на приемнике S-диапазона РТ-32. Чувствительность  $\Delta T$  модуляционного радиометра с пилот-сигналом определяется по формуле [1]:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot M}{M-1} \cdot \frac{T_{\text{сист}}}{\sqrt{\Delta f \cdot \tau_{\text{эф}}}} \quad (3)$$

где  $M$  — коэффициент ослабления сигнала в модуляторе коэффициента усиления,  $\tau_{\text{эф}}$  — эффективное время накопления сигнала.

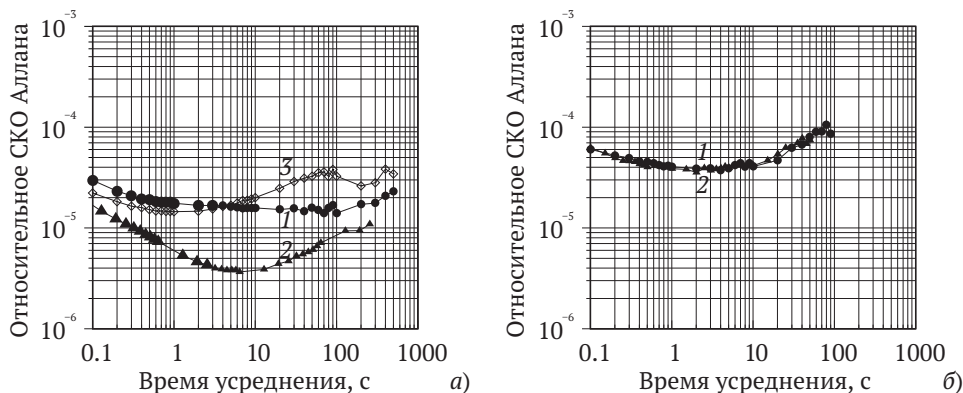


Рис. 6. а — стабильность измерения коэффициента передачи систем: 1 — устройство контроля; 2 — измеритель мощности с генератором; 3 — векторный анализатор цепей; б — стабильность коэффициента передачи приемника X-диапазона РТ-13, измеренная: 1 — устройством контроля; 2 — измерителем мощности с генератором



В блоке сбора данных генерируется сигнал модуляции 1 кГц и подается в приемник по схеме с пилот-сигналом (генератор шума компенсации модулируется в противофазе с модулятором коэффициента усиления блока преобразования частоты,  $M = 10$ ). Выходной сигнал приемника детектируется и оцифровывается с частотой 50 кГц. На периоде модуляции из 50 отсчетов 10 отбрасываются для исключения переходного процесса переключателя, что уменьшает эффективное время накопления сигнала,  $\tau_{\text{эф}} = 0.8 \cdot \tau$ . Таким образом, при подстановке значений в формулу (3) чувствительность данного радиометра в модуляционном режиме в 2.5 раза ниже, чем в режиме полной мощности. Для времени накопления  $\tau = 0.1$  с и полосы приемника S-диапазона  $\Delta f = 400$  МГц, относительная стабильность  $\Delta T/T = 1.6 \cdot 10^{-4}$  для режима полной мощности и  $\Delta T/T = 4 \cdot 10^{-4}$  для модуляционного режима, что соответствует результатам измерений, представленных на рис. 7б. Чувствительность в режиме полной мощности до времени накопления  $\tau = 10$  с (1) остается выше, чем в модуляционном режиме (2), а время когерентного накопления в модуляционном радиометре дольше — до 100 с. Сравнение чувствительности радиометра в различных режимах с применением дисперсии Аллана приводится в зарубежных работах [10].

На рис. 8 представлены результаты измерений шумовой температуры  $T_{\text{ш}}$  приемников РТ-32 с помощью устройства контроля по схеме, приведенной на рис. 4. На рис. 8а представлено измерение шумовой температуры криоблока X-диапазона при его охлаждении во время выхода на режим, а на рис. 8б — стабильность шумовой температуры на режиме,  $T_{\text{ш}} = 11$  К. Точность измерения кратковременных вариаций шумовой температуры  $\Delta T_{\text{ш}} = 0.07$  К ( $\tau = 1$  с) у устройства (1) выше, чем у анализатора коэффициента шума Keysight N8976B с генератором шума 15 дБ (2),  $\Delta T_{\text{ш}} = 0.4$  К ( $\tau = 1$  с) за счет измерения в широкой полосе и отсутствия «мертвого времени» при сканировании узкополосным фильтром 4 МГц полосы 1 ГГц (рассмотрено в работе [2]). Результаты соответствуют расчетной по формуле (2) кратковременной погрешности, обусловленной точностью измерения  $\Delta n$ . Для устройства при  $\tau = 1$  с  $\Delta n = 1.5 \cdot 10^{-4}$ , для анализатора  $\Delta n = 1.2 \cdot 10^{-3}$ .

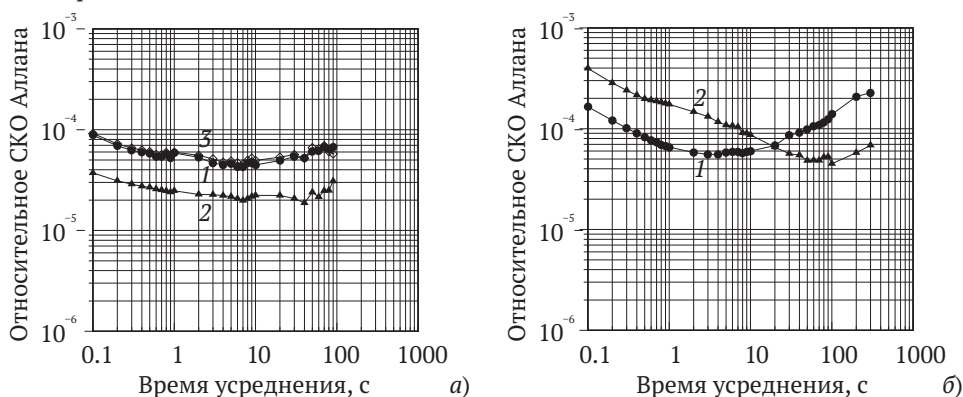


Рис. 7. а — стабильность коэффициентов передачи блоков приемника S-диапазона РТ-13: 1 — КПФБ; 2 — БПЧ; 3 — приемник в целом; б — стабильность приемника S-диапазона РТ-32: 1 — в режиме полной мощности; 2 — в модуляционном режиме



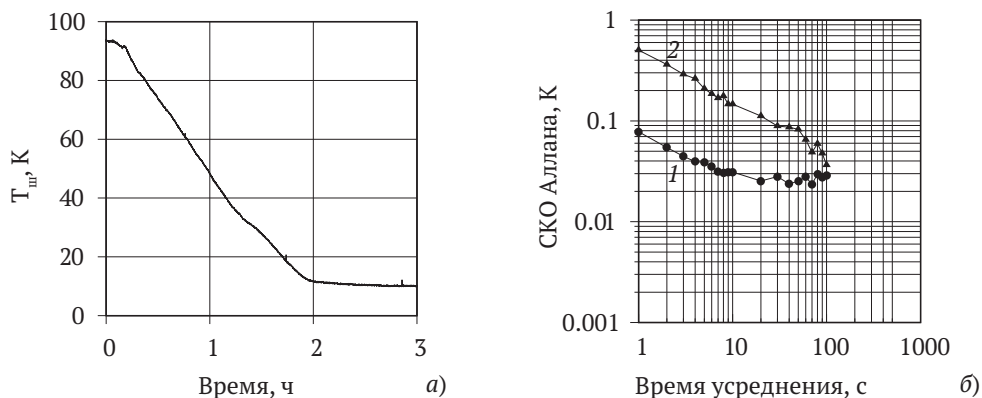


Рис. 8. *а* — шумовая температура криоблока X-диапазона РТ-32 при охлаждении; *б* — стабильность шумовой температуры криоблока X-диапазона РТ-32, измеренная: 1 — устройством контроля; 2 — анализатором коэффициента шума

## Заключение

Разработанное устройство позволяет контролировать основные параметры (выходную мощность, коэффициент передачи, шумовую температуру) радиоастрономических приемников S/X-диапазонов и их отдельных блоков и обеспечивает требуемый уровень точности для измерения их стабильности. Блок сбора данных может применяться для контроля выходной мощности приемников и других диапазонов длин волн. Для измерения параметров отдельных блоков других диапазонов необходимо изготовление СВЧ-блока с другими фильтрами. Установка устройства в приемник позволит независимо контролировать работоспособность отдельных блоков, не разбирая приемник, что особенно важно для приемной системы РТ-13, требующей для этого демонтаж всего фокального модуля. Устройство может быть использовано для контроля параметров приемников как в лаборатории, так и в обсерваториях ИПА РАН.

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

## Литература

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. — 416 с.
2. Gonneau E., Escotte L. Low-frequency noise sources and gain stability in microwave amplifiers for radiometry // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — 2012. — Vol. 60, no. 8. — P. 2616–2621.
3. Gallego J. D., López-Fernández I., Diez C., Barcia A. Experimental results of gain fluctuations and noise in microwave low-noise cryogenic amplifiers // Proc. of SPIE. — 2004. — Vol. 5470. — P. 402–413.
4. Векшин Ю. В., Лавров А. П. Исследование стабильности трехдиапазонного криогенного приемного фокального блока с применением дисперсии Аллана // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 33. — С. 3–21.

5. Chernov V., Evstigneev A., Evstigneeva O. et al. The S/X/Ka Receiving system for radio telescope RT-13 of the "Quasar" VLBI network // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 41. — С. 79–84.

6. Jarrige E., Escotte L., Gonneau E., Goutoule J. M. L-band radiometer design for long-term stability measurement of one-port devices // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. — 2012. — Vol. 4. — P. 119–126.

7. Schieder R., Kramer C. Optimization of heterodyne observations using Allan variance measurements // Astronomy and Astrophysics. — 2001. — Vol. 373. — P. 746–756.

8. Vekshin Yu. V., Lavrov A. P. The Allan variance usage for stability characterization of weak signal receivers // LNCS 9870. — 2016. — P. 648–657.

9. Векшин Ю. В., Лавров А. П., Хвостов Е. Ю. Методика и результаты исследований амплитудной и фазовой стабильности супергетеродинного радиоастрономического приемника // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2018. — Vol. 1. — С. 24–30.

10. Camps A., Tarongi J. M. Microwave Radiometer Resolution Optimization Using Variable Observation Times // Remote Sens. — 2010. — Vol. 2. — P. 1826–1843.

## A Control Device of S/X-bands Radio Astronomy Receivers Parameters

Yu. V. Vekshin, M. B. Zotov, A. S. Lavrov

A compact control device to measure radio astronomy receiver parameters has been developed in IAA RAS observatories. The device is designed to control output power, gain, noise temperature and stability of these parameters of a radio astronomy receiver and its separate units (cryogenic receiver unit, frequency conversion unit). The structure and operating principle of the device are described. The device generates a reference noise signal, amplifies, filters, detects and digitizes a receiver unit output signal. The device allows to control microwave signal power of eight receiver channels, as well as their supply voltage. The main parameters of the device developed are presented.

Measurement techniques and determination of S/X receivers stability, as obtained by Allan variance, are given. Gain and noise temperature stability results, measured with the device, are compared to those measured with power meter, vector network analyzer and noise figure analyzer. The comparison of receiver stability in total power mode and Dicke radiometer mode is also given.

**Keywords:** radio astronomy receiver, Allan variance, gain stability, noise temperature, fluctuation.