

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.272.5:520.274

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2023 г. Ю. В. Векшин^а, М. Б. Зотов^{а,*}, А. С. Лавров^а, И. А. Поздняков^а,
Е. Ю. Хвостов^а, В. К. Чернов^а

^аИнститут прикладной астрономии РАН
Россия, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

*e-mail: zmb@iaaras.ru

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 21.09.2022 г.

Принята к публикации 10.11.2022 г.

Рассмотрены основные принципы работы и особенности конструкции разработанной в ИПА РАН широкополосной приемной системы, работающей на ортогональных линейных поляризациях в диапазоне частот 3–16 ГГц с шириной полосы выходных частот 2 ГГц. Приведены результаты измерений параметров приемной системы и характеристик радиотелескопа РТ-13, оснащенного разработанной приемной системой.

DOI: 10.31857/S0032816223020283, EDN: GUDDLU

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее современным инструментом для оперативного определения параметров вращения Земли и решения важнейших глобальных геодезических и геофизических задач является глобальная радиоинтерферометрическая сеть VGOS (VLBI Global Observing System) [1]. Точность определения параметров вращения Земли в значительной степени определяется точностью измерения задержки прихода сигнала космического радиосточника на удаленные радиотелескопы, которая существенно зависит от ширины полос принимаемых сигналов и их расположения. В ходе развития технологии приема сигнала с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) сформировалось два основных вида приемных систем, обеспечивающих либо многодиапазонный прием сигналов в нескольких частотных каналах, либо широкополосный прием сигналов в непрерывной полосе частот.

Радиоинтерферометр нового поколения на основе радиотелескопов РТ-13 комплекса “Квазар-КВО” оснащается двумя типами приемных систем — либо трехдиапазонной, либо широкополосной — для возможности проведения совместных наблюдений с разными обсерваториями сети VGOS [2]. Главной особенностью трехдиапазонной приемной системы является возможность одновременного приема шумовых сигналов от космических источников в трех диапазонах частот: *S* (2.2–2.6 ГГц), *X* (7.0–9.5 ГГц) и *Ka* (28–34 ГГц) —

в обеих круговых поляризациях [2]. Отличительной особенностью широкополосной системы является возможность обеспечить работу радиотелескопов РТ-13 в непрерывном диапазоне частот 3–16 ГГц, принимая сигналы двух ортогональных линейных поляризаций.

В данной статье представлены результаты разработки широкополосной приемной системы (ШПС), описаны основные принципы ее работы и результаты измерений, полученные в процессе опытной эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ШПС И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ КОНСТРУКЦИИ

Выбор частотного диапазона широкополосной приемной системы был достаточно подробно описан в работе [4], поэтому в данной статье уделим больше внимания описанию принципов работы ШПС. На рис. 1 показана функциональная схема ШПС, а на рис. 2 приведены блок-схема и внешний вид одного из основных узлов системы — широкополосного криогенного приемного фокального блока (ШКПФБ).

Электромагнитное излучение от космического источника, сфокусированное антенной, через радиопрозрачное вакуумное окно 1 попадает на широкополосный облучатель 2, расположенный внутри криостата 3 ШКПФБ (см. рис. 2). Широкополосный облучатель [5] представляет собой четырехребневый рупор, способный работать в диапазоне 3–16 ГГц и принимать две линейные

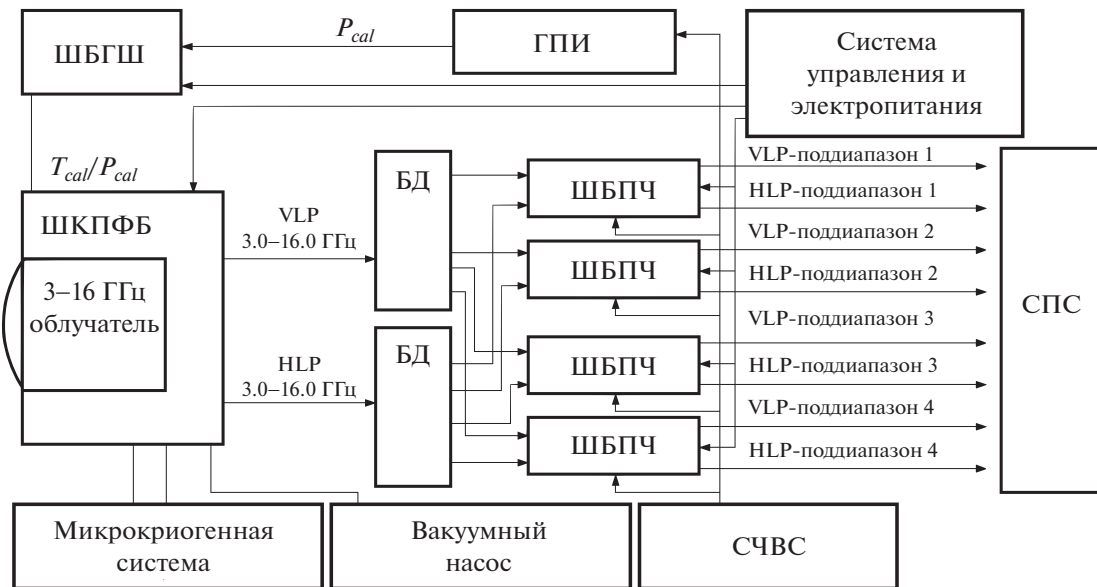


Рис. 1. Функциональная схема широкополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 РСДБ-комплекса “Кварзар-КВО”. ШКПФБ – широкополосный криогенный приемный фокальный блок; ШБГШ – широкополосный блок генератора шума; БД – блок делителей; ШБПЧ – широкополосный блок преобразователей частоты; ГПИ – генератор пикосекундных импульсов фазовой калибровки; СЧВС – система частотно-временной синхронизации; СПС – система преобразования сигналов; VLP и HLP – вертикальная и горизонтальная линейные поляризации; T_{cal} и P_{cal} – сигналы амплитудной и фазовой калибровок.

ортогональные поляризации. Усиление сигналов, разделенных по поляризациям, обеспечивается охлаждаемыми малошумящими усилителями 4. В каждом из каналов, соответствующих вертикальной и горизонтальной поляризациям, перед усилителями установлены направленные ответвители 5, с помощью которых принимаемые сигналы смешиваются с сигналами амплитудной (T_{cal}) и фазовой (P_{cal}) калибровок, поступающими в тракт от широкополосного блока генератора шума (ШБГШ) [6].

В ШКПФБ применены корпусированные широкополосные усилители LNF-LNC4_16C производства фирмы Low Noise Factory. Они построены на основе транзисторных гетероструктур с высокой подвижностью электронов (InP HEMT) по технологии МИС (монокристаллическая интегральная схема). Их шумовая температура не превышает 10 K во всем диапазоне частот 3–16 ГГц [7].

Размещение облучателя внутри ШКПФБ и охлаждение его до криогенных температур значительно снижают собственные шумы системы. Однако установка облучателя в металлический корпус криостата требует применения радиопрозрачного укрытия с минимальным поглощением электромагнитных сигналов во всей полосе принимаемых частот. Применяемое в ШКПФБ вакуумное окно куполообразной формы выполнено из пенополистирола, покрытого двумя слоями пленок с разными характеристиками: лавсановой (полиэтилентерефталат) толщиной 0.02 мм,

укрытой тефлоновой (ПТФЭ) толщиной 0.1 мм. Такое окно позволяет выдерживать давление атмосферы при величине остаточного давления 10^{-7} Па в полости криостата. Для снижения нагрева тепловым излучением все элементы ШКПФБ (см. рис. 2а) укрыты азотным экраном 6, а со стороны облучателя теплоперехват обеспечивает инфракрасный фильтр, представляющий собой многослойную конструкцию из тефлоновых пленок толщиной 0.1 и 0.2 мм.

Для криостатирования облучателя и малошумящих усилителей применяется двухступенчатый микроохладитель RDK-408S (7) с уровнем охлаждения 10 K на второй ступени, входящий в состав гелиевой микрокриогенной системы с воздушным охлаждением производства SHI Cryogenics. Ее работа основана на замкнутом газовом цикле Джибфорда–МакМагона. Основные рабочие характеристики для микроохладителя: холодопроизводительность на 2-й ступени 5.4 Вт при 10 K, 35 Вт при 45 K на 1-й ступени, минимальная температура криостатирования 7 K.

На первой ступени микроохладителя 8 размещены азотный экран 6 и тепловая развязка СВЧ-кабелей 9, на второй ступени микроохладителя 10 расположены малошумящие усилители, облучатель и направленные ответвители. Вакуумирование полости криостата обеспечивается двухступенчатым вакуумным насосом Value VRD-16 через вакуумный вентиль 11. Остаточное давление составляет $4 \cdot 10^{-2}$ Па. Измерение давления в по-

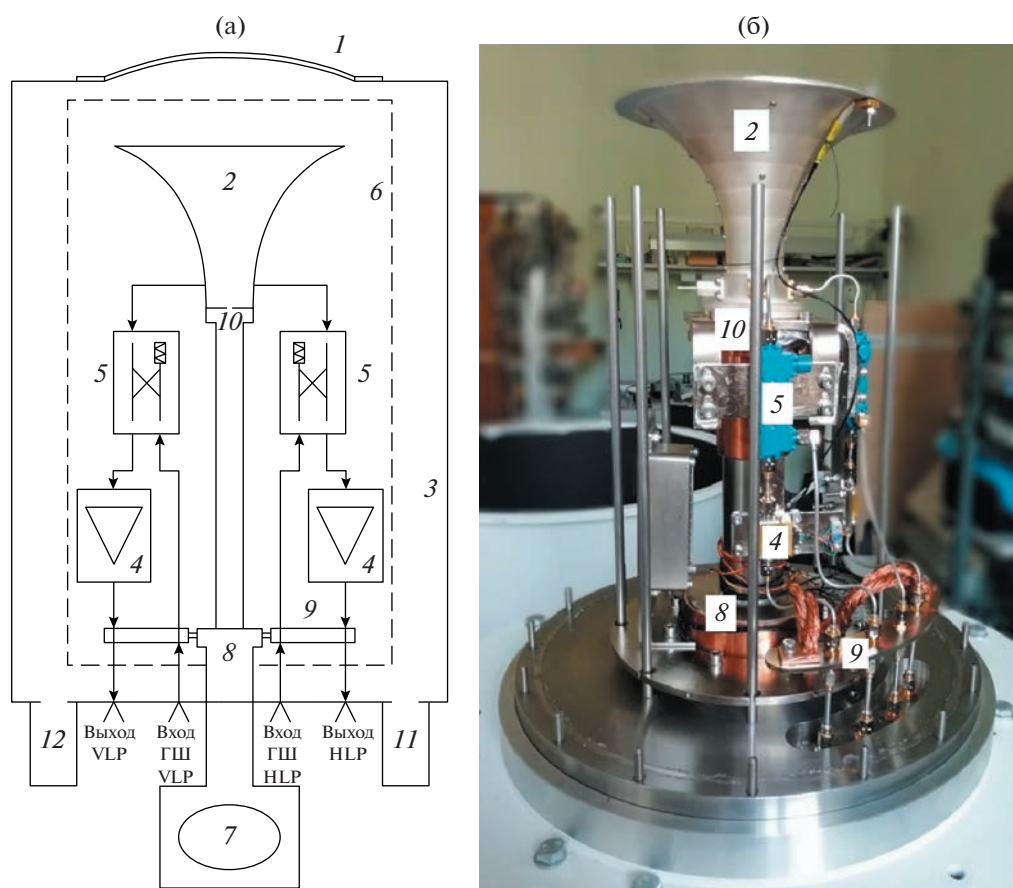


Рис. 2. Широкополосный криогенный приемный фокальный блок: **а** — функциональная схема блока; **б** — внешний вид блока без криостата. 1 — вакуумное окно, 2 — облучатель, 3 — криостат, 4 — охлаждаемые малошумящие усилители, 5 — направленный ответвитель, 6 — азотный экран, 7 — микроохладитель, 8 — первая ступень микроохладителя, 9 — тепловая развязка СВЧ-кабелей, 10 — вторая ступень микроохладителя, 11 — вакуумный вентиль, 12 — вакуумный датчик.

лости криостата осуществляется при помощи вакуумного датчика Пирани 12.

Температура 1-й ступени стабилизируется на уровне не выше 40 К, температура облучателя — не выше 20 К, температура малошумящих усилителей — не выше 15 К. График выхода ШКПФБ на криогенный режим показан на рис. 3. Время выхода ШКПФБ на криогенный режим составило менее 3 ч от запуска вакуумного насоса до стабилизации температуры на основных узлах ШКПФБ. Измерения проводились с помощью диодных датчиков температуры DT-670 производства Lake Shore в соответствующих точках.

Коэффициент усиления ШКПФБ составляет около 38 дБ с неравномерностью не более ± 2 дБ в диапазоне 3–16 ГГц (рис. 4, кривая 1). Шумовая температура ШКПФБ в диапазоне 3–16 ГГц изменяется от 21 К на нижних частотах до 37 К на верхних (рис. 4, кривая 2). Основной вклад в увеличение шумовой температуры ШКПФБ вносят элементы, расположенные перед охлаждаемыми малошумящими усилителями, такие как ответви-

тель, облучатель, соединяющие их отрезки коаксиального кабеля, а также вакуумное окно и инфракрасный фильтр. Имея небольшие собственные потери, они дают существенный прирост эквивалентной шумовой температуры, приведенной к входу элемента, установленного за ними. Например, для частоты 9.5 ГГц собственные шумы охлаждаемого малошумящего усилителя, пересчитанные на вход через ослабление всех элементов, установленных перед ним, увеличатся почти на 3 К. Охлажденный ответвитель с подключенными к нему кабелями имеет вклад в шумовую температуру около 3.4 К. Охлажденный до 20 К облучатель имеет шумовую температуру 2.5 К, а вакуумное окно, находящееся при комнатной температуре, добавляет еще около 3.5 К. Инфракрасный фильтр выполнен из радиопрозрачного материала и имеет очень малую толщину (0.2 мм), соответственно потери сигнала оцениваются в сотые доли децибела. Находясь при температуре порядка 80 К, инфракрасный фильтр вносит незначительный вклад (порядка 0.5 К) в общую шу-

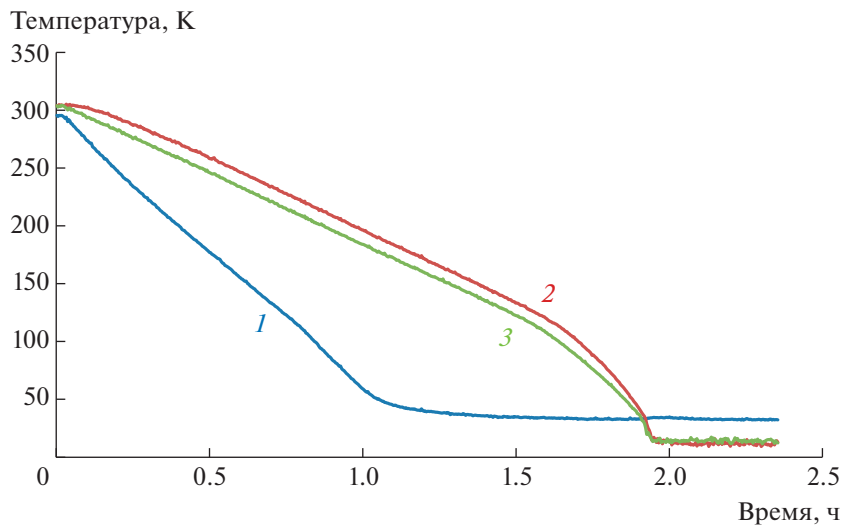


Рис. 3. График выхода широкополосного криогенного приемного фокального блока на криогенный режим: 1 — температура 1-й ступени, 2 — температура облучателя, 3 — температура малошумящих усилителей.

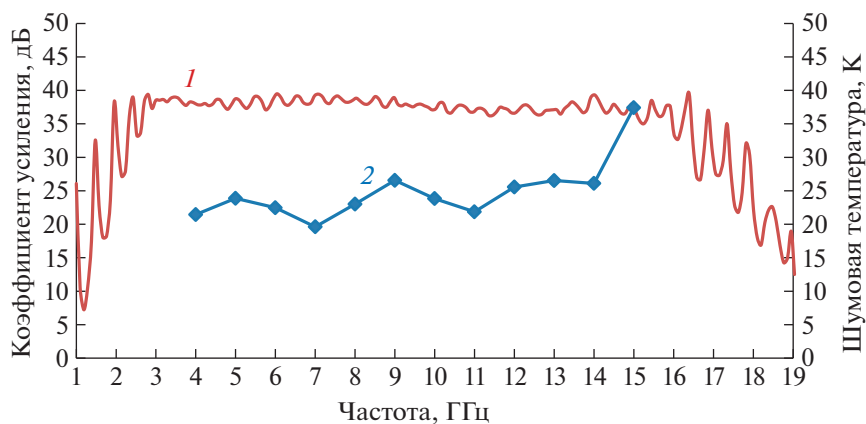


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления (1) и шумовой температуры (2) от частоты для широкополосного криогенного приемного фокального блока.

мовую температуру ШКПФБ. Таким образом, для приведенной частоты расчетное значение шумовой температуры ШКПФБ равно 20.4 K при шумовой температуре охлаждаемого малошумящего усилителя 8 K. С ростом частоты потери в диэлектрике возрастают, что обуславливает тренд на увеличение шумовой температуры. Точка 1-дБ компрессии по входу (уровень входной мощности, при котором коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ от своего постоянного значения) для ШКПФБ составляет –52 дБм.

С выхода ШКПФБ сигналы, соответствующие вертикальной и горизонтальной поляризациям, поступают на блоки делителей (БД), где разделяются на четыре равных сигнала (см. рис. 1). Коэффициент передачи БД составляет 5 дБ. Затем сигналы, соответствующие вертикальной и гори-

зонтальной поляризациям, попарно поступают на входы четырех широкополосных блоков преобразователей частоты (ШБПЧ). Функциональная схема блока представлена на рис. 5.

В ШБПЧ осуществляются усиление, фильтрация и двойное преобразование частоты сигналов обеих поляризаций. В каждом ШБПЧ из диапазона 3–16 ГГц входного СВЧ-сигнала выбирается участок полосы частот шириной 2 ГГц (поддиапазон), который преобразуется к промежуточной полосе частот (ПЧ) 0–2 ГГц. При этом первое преобразование в полосу ПЧ₁ осуществляется с помощью перестраиваемого в полосе 27–38 ГГц гетеродина Г₁. Полосно-пропускающий фильтр (ППФ, 22–24 ГГц) задает рабочую полосу и подавляет зеркальный канал, расположенный достаточно далеко. Второе преобразование осу-

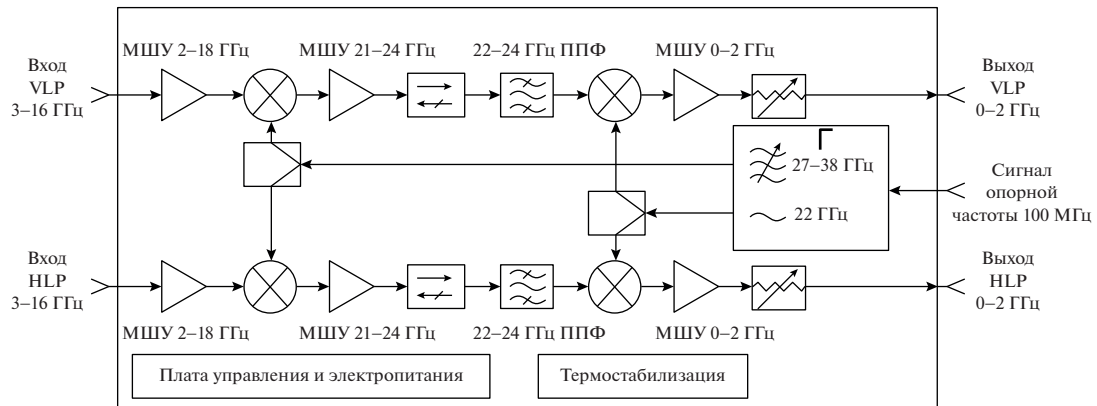


Рис. 5. Функциональная схема широкополосного блока преобразователей частоты. МШУ — малошумящий усилитель; ППФ — полотно-пропускающий фильтр; Г — гетеродин; VLP и HLP — вертикальная и горизонтальная линейные поляризации.

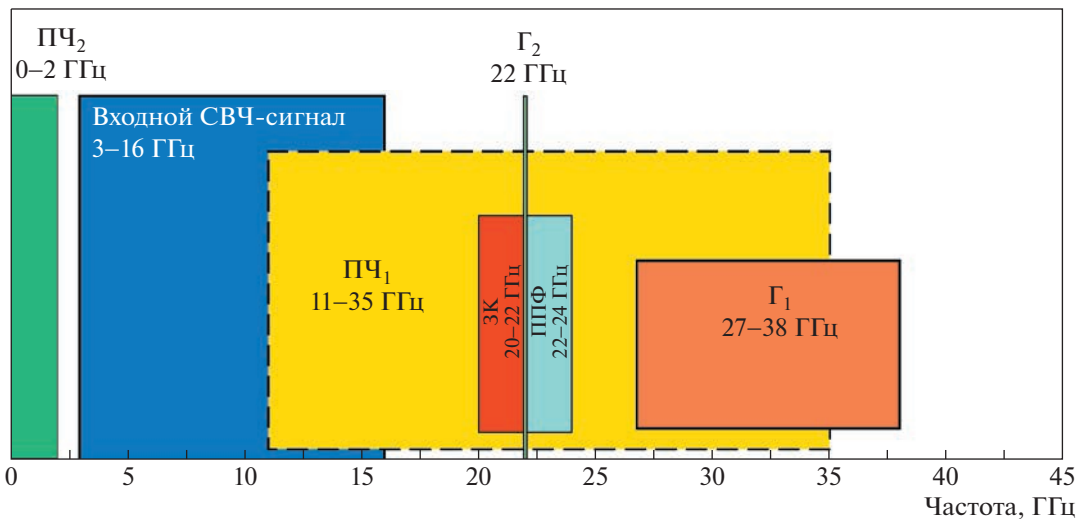


Рис. 6. Частотные преобразования широкополосного блока преобразователей частоты. Г₁ — перестраиваемый гетеродин 27–38 ГГц; Г₂ — фиксированный гетеродин 22 ГГц; ППФ — полотно-пропускающий фильтр 22–24 ГГц; ПЧ₁ и ПЧ₂ — промежуточная частота после первого и второго преобразования соответственно; ЗК — зеркальный канал.

шествляется на фиксированной частоте 22 ГГц гетеродина Г₂ и обеспечивает преобразование в необходимую полосу ПЧ₂ 0–2 ГГц (см. рис. 6).

Коэффициент усиления ШБПЧ составляет не менее 45 дБ во всей полосе входных частот 3–16 ГГц (рис. 7). Точка 1-дБ компрессии по выходу ШБПЧ составляет 13 дБм. Для увеличения динамического диапазона в ШБПЧ предусмотрена регулировка коэффициента усиления с помощью аттенюатора в диапазоне 0–31 дБ с шагом 1 дБ. Зеркальный канал и комбинационные составляющие ослабляются более чем на 35 дБ. Шумовая температура ШБПЧ не превышает 2000 К (во всем рабочем диапазоне входных частот 3–16 ГГц), что, с учетом коэффициентов усиления ШКПФБ (38 дБ) и БД (5 дБ), дает вклад не более

0.1 К в шумовую температуру ШПС. Среднеквадратичное отклонение вносимых фазовых шумов ШБПЧ в диапазоне отстроек 10 Гц–10 МГц не превышает 2.5°, что даст снижение отношения сигнал/шум корреляционного отклика радиointерферометра не более 0.1%.

Широкополосный блок генератора шума обеспечивает формирование сигналов амплитудной и фазовой калибровок в полосе частот 3–16 ГГц. Источником амплитудного калибровочного сигнала служит генератор шума на лавинно-пролетном диоде M41318 производства НПП “Исток”. В тракте ШБГШ размещен направленный ответвитель, через который происходит ввод внешнего сигнала фазовой калибровки от генератора пикосекундных импульсов (ГПИ). Амплиту-

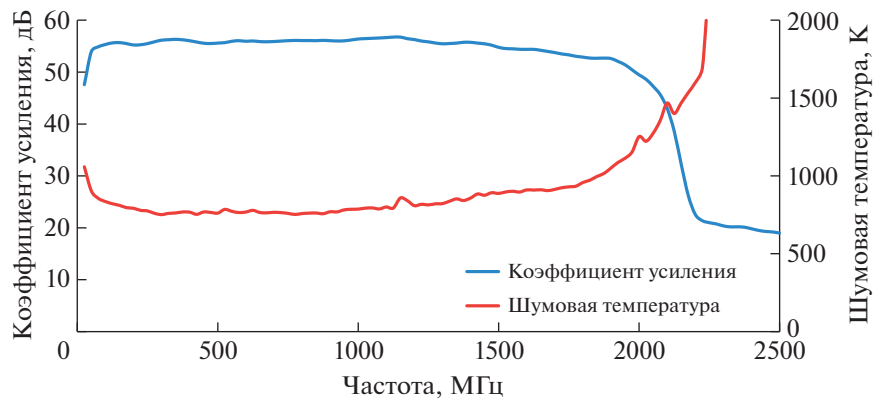


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления и шумовой температуры от частоты для широкополосного блока преобразователей частоты (для полосы входных частот 8–10 ГГц).

ды сигналов фазовой и амплитудной калибровок регулируются цифровыми 5-разрядными аттенюаторами. С помощью широкополосного резистивного делителя сигнал разделяется на два идентичных канала, соответственно для обеспечения калибровки VLP и HLP канала ШПС. Спектральная плотность мощности шума сигнала амплитудной калибровки составляет не менее 7000 К, что, с учетом переходного ослабления направленного ответвителя (20 дБ), обеспечивает уровень калибровочного сигнала не менее 70 К на входе ШКПФБ (при нулевом ослаблении аттенюатора).

Синхронизация гетеродинов приемных каналов осуществляется от системы частотно-временной синхронизации (СЧВС) РСДБ-радиотелескопа. На выходе ШПС имеет 8 сигналов ПЧ — по

четыре для горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций (см. рис. 1). Эти сигналы поступают на систему преобразования сигналов (СПС) [8] для последующей регистрации. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13 приведены в табл. 1.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Центральным элементом системы управления и электропитания является концентратор Ethernet. Он объединяет все блоки ШПС в единое информационное пространство, объединенное с локальной вычислительной сетью радиотелескопа РТ-13. Управление ШПС и контроль параметров ее работы осуществляются с помощью специального программного обеспечения, расположенного на центральном компьютере управления РТ-13.

Блок питания обеспечивает ШБПЧ и ШБГШ первичным питающим напряжением +24 В, а также выполняет ряд функций управления и диагностики. Каждый выход для питания может быть включен или выключен независимо от остальных. По каждому выходу ведется контроль тока потребления. Блок питания имеет дополнительный интерфейс для обмена данными с промышленным измерителем вакуума. Кроме того, блок питания осуществляет контроль температуры и влажности воздуха в полости ШПС с помощью внешнего датчика, а также управление вакуумным клапаном.

Блок питания входных усилителей осуществляет питание блоков делителей и охлаждаемых малошумящих усилителей, расположенных в ШКПФБ. Также блок питания входных усилителей осуществляет контроль температур ключевых узлов ШКПФБ: облучателя, малошумящих усилителей и первой ступени микроохладителя.

Таблица 1. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13

Параметр	Значение
Рабочий диапазон входных частот, ГГц	3–16
Рабочий диапазон выходных частот, ГГц	0.05–2.05
Поляризации	2 линейные ортогональные
Количество каналов	8 (по 4 для каждой поляризации)
Шумовая температура (средняя), К	25
Коэффициент усиления, дБ	93
Диапазон регулировки коэффициента усиления, дБ	31
Точка 1-дБ компрессии по выходу, дБм	13
Температура, К, облучателя и малошумящих усилителей не более	20

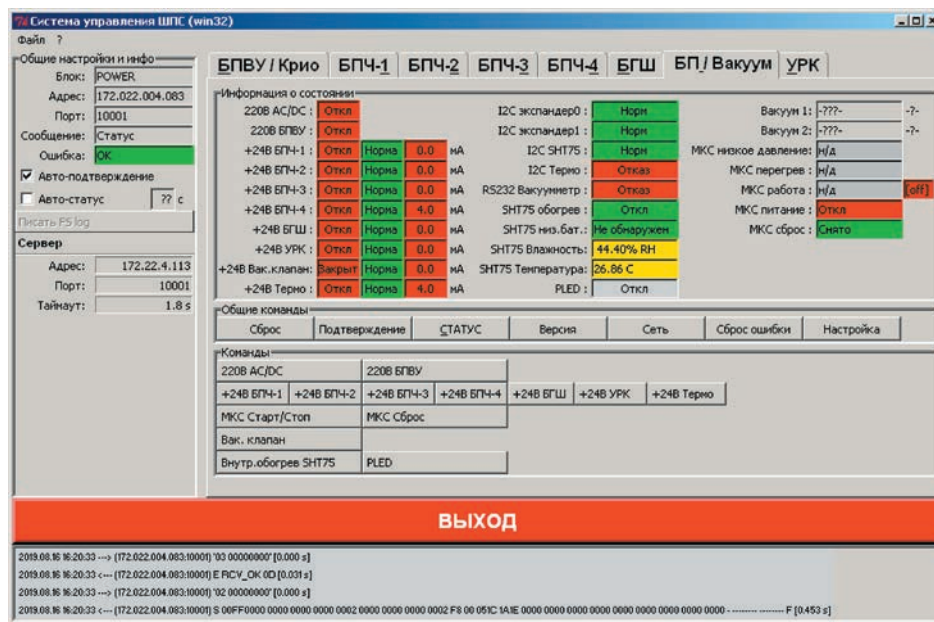


Рис. 8. Окно программы управления широкополосной приемной системы.

Управление и питание блоков обеспечивается платами системы управления и электропитания, расположенными в каждом блоке. Платы имеют интерфейс Ethernet и ряд источников питания для обеспечения работы блоков. Например, изменение частоты гетеродина в ШБПЧ осуществляется путем обмена данными между платой и гетеродином по интерфейсу SPI. Также в блоках расположены датчики для контроля температуры основных СВЧ-узлов.

Для упорядочивания обмена данными между устройствами ШПС и центральным компьютером управления РТ-13 разработан протокол обмена данными. Аппаратная идентификация устройств осуществляется средствами контроллеров Ethernet автоматически по MAC-адресам с помощью протокола ARP. Обмен информацией между устройствами осуществляется по протоколу UDP пользовательской надстройкой, обеспечивающей гарантированную доставку сообщений с контролем их целостности. На программном уровне устройства идентифицируются по их уникальным IP-адресам.

Для управления ШПС и контроля работы ее узлов используется программа управления ШПС. Она написана на языке Python 2.7 с использованием библиотеки для создания графических интерфейсов TkInter.

Программа имеет интуитивно понятный графический интерфейс (см. рис. 8). Каждая вкладка элемента notebook соответствует блоку ШПС. С помощью кнопок и полей ввода оператор может передавать команды блокам ШПС и изменять такие их настройки, как частота гетеродина, ослаб-

ление аттенуаторов и т.п. Ответные сообщения блоков расшифровываются и выводятся на экран в виде индикаторов, сообщающих состояние узлов блоков ШПС и измеренные датчиками значения различных параметров. Для удобства оператора введена простая система цветовой маркировки индикаторов, которая помогает быстро обнаруживать отказы узлов и выход параметров работы за пределы допустимых значений.

Наличие в составе системы управления и электропитания большого количества разнообразных датчиков, контролирующих параметры работы узлов ШПС, обуславливает ее широкие возможности по диагностике неисправностей.

Одной из наиболее распространенных неисправностей, возникающих в радиоэлектронной аппаратуре, является обрыв, возникающий в цепях вследствие той или иной причины. Следствием обрыва в одном из элементов узла является уменьшение потребления тока этим узлом. В системе управления и электропитания широко используются датчики тока. Они определяют как потребление тока блоками ШПС в целом, так и потребление отдельных узлов этих блоков. Благодаря этому можно установить не только неисправный блок, но и какой узел неисправен в пределах одного блока.

ШПС предполагается использовать в обсерваториях РСДБ-сети "Квазар-КВО", разнесенных друг от друга на расстояния в тысячи километров. Исходя из этого, важным условием является возможность дистанционного контроля параметров и диагностики неисправностей ШПС, в том числе с использованием сети Internet. Это позволяет

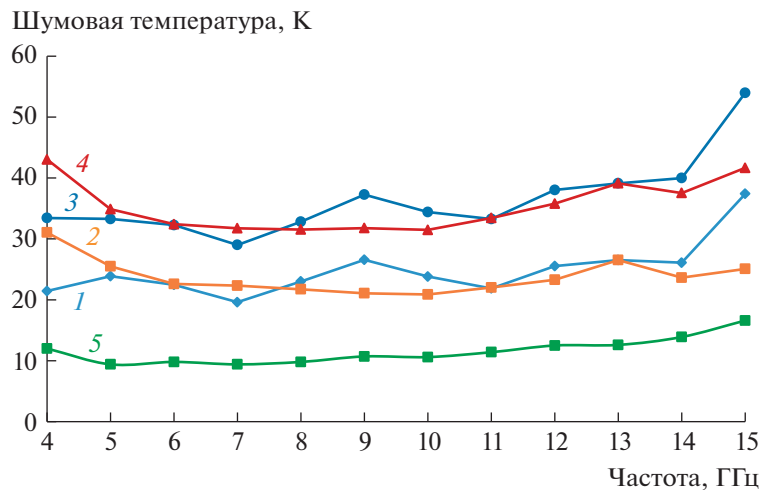


Рис. 9. Результаты измерений шумовой температуры PT-13 с широкополосной приемной системой (зенит): 1 – $T_{пр}$, HLP; 2 – $T_{пр}$, VLP; 3 – $T_{сист}$, HLP; 4 – $T_{сист}$, VLP; 5 – расчет T_a . HLP и VLP – каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

сэкономить значительные финансовые и временные ресурсы, которые специалисты затратили бы при необходимости непосредственной диагностики аппаратуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ШПС НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-13

ШПС была установлена и испытана на радиотелескопе РТ-13 обсерватории “Светлое”. Измерены параметры РТ-13 с ШПС в диапазоне 3–16 ГГц путем перестройки гетеродина с шагом 1 ГГц, ширина полосы выходных частот – 2 ГГц. Первая точка соответствует полосе 3–5 ГГц, а последняя – 14–16 ГГц, на графиках результатов измерений приведены центральные частоты полос. Шумовая температура $T_{пр}$ ШПС и сигнал амплитудной калибровки T_{cal} были измерены по методу двух отсчетов [9]. В качестве “холодной” нагрузки использовалась антенная система установленного в зенит радиотелескопа, а в качестве “теплой” – радиопоглощающий материал, помещенный на поверхность вакуумного окна криостата ШПС. Температура радиопоглощающего материала контролировалась с помощью пирометра. Шумовая температура антенны T_a РТ-13 в зените рассчитывалась по методике, приведенной в работе [10], как интеграл по сфере от произведения расчетной нормированной диаграммы направленности антенны и яркостных температур грунта и неба на основе метеоданных (температура, влажность, давление). Шумовая температура системы радиотелескопа $T_{сист} = T_{пр} + T_a$ на заданном угле места РТ-13 определялась по измеренному значению калибровки T_{cal} . На рис. 9 представлены расчет T_a в зените (график 5), результаты измерений

шумовой температуры $T_{пр}$ ШПС для каналов горизонтальной HLP (график 1) и вертикальной VLP (график 2) поляризаций, результаты измерений шумовой температуры системы $T_{сист}$ для каналов HLP и VLP (графики 3 и 4) в зените. Шумовая температура $T_{пр}$ в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 27 К, а в диапазоне 3–16 ГГц – 37 К. Шумовая температура $T_{сист}$ в диапазоне 5–14 ГГц не превышает 40 К, а в диапазоне 3–16 ГГц – 54 К.

Эквивалентная плотность потока системы (SEFD) и коэффициент использования поверхности антенны (КИП) определялись по сигналу радиоисточника CasA, согласно формулам, приведенным в работе [11]. Результаты измерений представлены на рис. 10 и 11. SEFD РТ-13 с ШПС (см. рис. 10) в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 1700 Ян, а в диапазоне 3–16 ГГц – 2100 Ян. КИП РТ-13 с ШПС (см. рис. 11) составляет 0.5–0.7 (ниже, чем с трехдиапазонной приемной системой (0.7–0.8), [11]), что связано с особенностями широкополосного облучателя. Данные расчета КИП 13-метрового радиотелескопа с аналогичным облучателем, Quad-Ridged Horn (QRFH), приведенные в работе [12], представлены графиком 3 на рис. 11. Как видно из рисунка, КИП соответствует расчетному. Это свидетельствует о достоверности независимых измерений шумовых температур и SEFD радиотелескопа, из которых рассчитывается КИП. Ширина диаграммы направленности РТ-13 соответствует расчетной и меняется от 22° до 5° при изменении центральной частоты с 3.5 до 15.5 ГГц.

Стоит отметить, что добиться предельных параметров во всем широком диапазоне частот приемной системы крайне сложно. Неблагоприятная

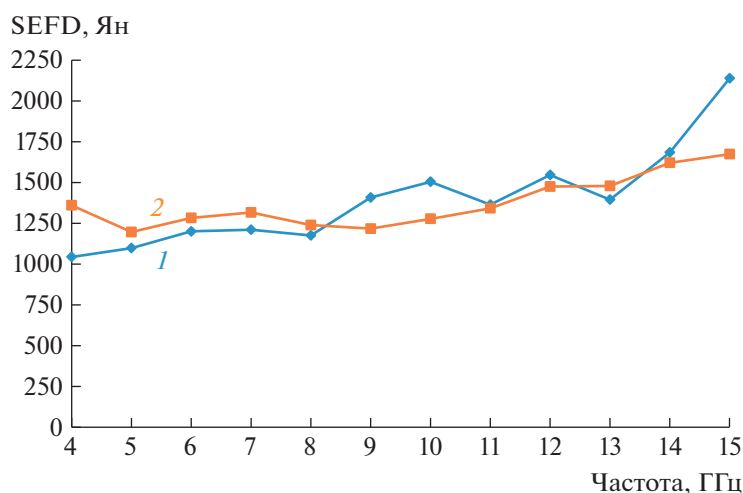


Рис. 10. Результаты измерений системной эквивалентной плотности потока РТ-13 с широкополосной приемной системой по источнику CasA (угол места 55°): 1 — HLP; 2 — VLP. HLP и VLP — каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

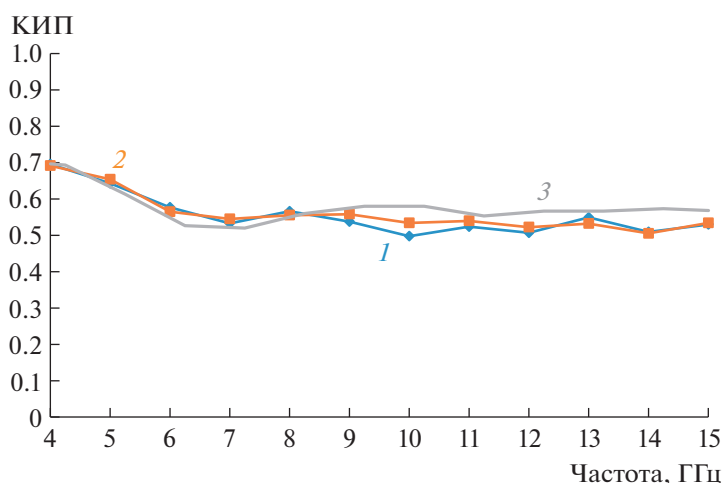


Рис. 11. Результаты измерений коэффициента использования поверхности антенны РТ-13 с широкополосной приемной системой по источнику CasA (угол места 55°): 1 — HLP; 2 — VLP; 3 — расчет Onsala. HLP и VLP — каналы горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций.

помеховая обстановка, а также конструктивные особенности широкополосной приемной системы приводят к ухудшению параметров на краях рабочего диапазона частот. В табл. 2 обобщены данные измерений параметров РТ-13 с широкополосной приемной системой для полос 5–14 и 3–16 ГГц. Набор параметров для полосы 5–14 ГГц характеризует качество приемной системы, а для полосы 3–16 ГГц позволяет оценить ухудшение параметров при переходе к более широкой полосе, обусловленное конструктивными и технологическими трудностями работы в широкой полосе частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПА РАН разработана, изготовлена и испытана широкополосная приемная система, способная осуществлять прием сигналов от космических источников в двух ортогональных линейных поляризациях в диапазоне частот 3–16 ГГц с шириной полосы выходных частот 2 ГГц. В 2020 году ШПС была установлена на радиотелескоп РТ-13 в обсерватории “Светлое”. Возможность работы ШПС в поддиапазонах шириной 2 ГГц в пределах входной полосы удобна для оценки характеристик антенной системы РТ-13 и исследования излучения космических радиоисточников.

Таблица 2. Результаты измерений параметров радиотелескопа РТ-13 с широкополосной приемной системой

Характеристика	Значение в диапазонах 5–14 ГГц (3–16 ГГц)	
	HLP	VLP
Поляризация		
Шумовая температура приемника, К	27 (37)	27 (31)
Шумовая температура системы, К	40 (54)	39 (43)
Эквивалентная плотность потока системы, Ян	1700 (2100)	1620 (1680)
Коэффициент использования поверхности антенны	0.5–0.7	0.5–0.7

В обсерватории “Светлое” проведены радиометрические измерения параметров широкополосной приемной системы в составе радиотелескопа РТ-13 во всем рабочем диапазоне частот 3–16 ГГц. Шумовая температура приемной системы в большей части диапазона 5–14 ГГц не превышает 27 К, а SEFD радиотелескопа РТ-13 с приемной системой — 1700 Ян. На краях диапазона 3–16 ГГц параметры ухудшаются до 37 К и 2100 Ян соответственно.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности проведения успешных радиоинтерферометрических наблюдений на радиотелескопах РТ-13 в составе РСДБ-комплекса “Квазар-КВО” в диапазоне частот 3–16 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petrachenko B., Niell A., Behrend D., Corey B., Böhm J., Charlot P., Collioud A., Gipson J., Haas R., Hobiger T., Koyama Y., MacMillan D., Malkin Z., Nilsson T., Pany A. et al.* // Progress Report of the VLBI2010 Committee.
2. *Ипатов А.В.* // УФН. 2013. Т. 183. № 7. С. 769–777. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201307i.0769>
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.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 79.
4. *Евстигнеев А.А., Векшин Ю.В., Евстигнеева О.Г., Зотов М.Б., Лавров А.С., Мардышкин В.В., Поздняков И.А., Хвостов Е.Ю., Шахнабиев И.В.* // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 46. С. 50. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.46.50-56>
5. *Роев А.А., Чернов В.К.* // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 32. С. 59.
6. *Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshev V., Pozdnyakov I.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 49.
7. https://lownoisefactory.com/wp-content/uploads/2022/03/lmf-inc4_16c.pdf
8. *Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Носов Е.В., Федотов Л.В.* // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 1. С. 34.
9. ГОСТ 8.475-82. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приемных устройств. Методика выполнения измерений.
10. *Чернов В.К.* // Тезисы докладов Восьмой всероссийской конференции “Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение” (КВНО-2019). 15–19 апреля 2019 г. СПб.: ИПА РАН, 2019. С. 192.
11. *Vekshin Yu., Chernov V., Ivanov D., Kharinov M., Khvostov E., Mardyshev V., Mikhailov A.* // Труды ИПА РАН. 2017. Вып. 41. С. 135.
12. *Flygare J., Pantaleev M., Conway J., Lindqvist M., Helldner L., Dahlgren M., Hass R., Forkman P.* // IVS-2018 General Meeting Proceedings. NASA/CP-2019-219039. 2019. P. 4246.