

Широкополосный компактный приемный фокальный блок радиотелескопа на базе охладителя Стирлинга

© М. Б. Зотов¹, Ю. В. Векшин¹, С. И. Иванов^{1,2}, И. А. Поздняков¹, Е. С. Халеенкова^{1,2}

¹ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Компактные передвижные радиотелескопы позволяют расширить возможности существующей постоянно действующей национальной радиоинтерферометрической сети «Квазар-КВО» (Институт прикладной астрономии РАН). Улучшение углового разрешения при различных углах склонения объектов ближнего и дальнего космоса обуславливает необходимость применения радиоинтерферометров с адаптивно меняющимся географическим положением радиотелескопов.

Критически важным элементом компактного радиотелескопа является приемная система с криогенным охлаждением первых каскадов входных трактов, отвечающая требованиям к линейным размерам и массе. Для приемной системы мобильного радиотелескопа (с диаметром зеркала 2.5 м) предложено осуществить охлаждение входных каскадов с помощью компактного охладителя Стирлинга, позволяющего криостатировать широкополосный приемный фокальный блок до температуры 140 К.

Несмотря на то что температура охлаждения криогенных систем на основе охладителя Стирлинга не достигает температур водородного уровня, как это технически реализовано в стационарных полноповоротных радиотелескопах РТ-32 и РТ-13, охладитель находит свою область применения в компактных системах, где важны размеры криогенной системы. Актуальной задачей становится исследование криогенных приемных устройств на основе охладителя Стирлинга с достижением минимального уровня шумовой температуры.

В данной работе приведены результаты измерения шумовой температуры широкополосного компактного фокального приемного блока радиотелескопа при низких температурах, достижимых при использовании компактного охладителя Стирлинга. Представлен анализ измерений шумовой температуры двух вариантов технической реализации приемной системы. Шумовая температура разработанного фокального приемного блока в рабочем диапазоне частот (3–15.5 ГГц) не выше 200 К, в диапазоне 5–11 ГГц — ниже 100 К. Также приведены результаты измерения нестабильности уровня выходного шума фокального приемного блока и анализ дисперсии Аллана на основании данных измерений.

В статье представлены результаты оценки возможности проведения РСДБ-наблюдений с использованием компактного радиотелескопа в составе действующей РСДБ-сети «Квазар-КВО». Компактный радиотелескоп диаметром 2.5 м, оснащенный разработанной приемной системой, дает возможность проводить успешные геодезические РСДБ-наблюдения совместно с радиотелескопами РТ-32 комплекса «Квазар-КВО».

Ключевые слова: мобильный радиотелескоп, широкополосная приемная система, шумовая температура, дисперсия Аллана, охладитель Стирлинга.

Контакты для связи: Халеенкова Елизавета Сергеевна (es.haleenkova@iaaras.ru).

Для цитирования: Зотов М. Б., Векшин Ю. В., Поздняков И. А., Иванов С. И., Халеенкова Е. С. Широкополосный компактный фокальный приемный блок радиотелескопа на базе охладителя Стирлинга // Труды ИПА РАН. 2026. Вып. 76. С. 17–24.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.76.17-24>

Broadband Compact Focal Plane Receiver Unit of a Radio Telescope Based on a Stirling Cryocooler

M. B. Zotov¹, Yu. V. Vekshin¹, S. I. Ivanov^{1,2}, I. A. Pozdnyakov¹, E. S. Haleenkova^{1,2}

¹Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

²SPbPU, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Utilizing compact mobile radio telescopes (with primary dish diameter less than 5 m) will expand the capabilities of the existing national radio interferometric network “Quasar-KVO” (Institute of Applied Astronomy RAS). Radio interferometers equipped with radio telescopes capable of adaptively changing their geographic position will enable improved angular resolution at various declinations of near and deep space objects.

A receiving system with a cryogenically cooled frontend is a critical component of the compact radio telescope. This system must be both compact and light weight. Cooling for the mobile radio telescope's receiving frontend is provided by a compact Stirling cryocooler, allowing the broadband focal receiving unit to be cooled down to 140 K.

Although cryogenic systems temperature based on a Stirling cryocooler does not reach the hydrogen temperatures, as it is technically implemented in larger radio telescopes such as RT-32 and RT-13, the Stirling cryocooler is well-suited for compact systems where minimizing the size of the cryogenic system is essential. Therefore, research into cryogenic receivers based on Stirling cryocoolers is increasingly relevant for achieving the lowest possible noise temperatures.

This paper presents a technique for measuring the noise temperature of a radio telescope broadband, compact focal receiving unit at low physical temperatures. It was achieved using a compact Stirling cryocooler. Results and analysis of noise temperature measurement are provided for two receiver configurations. The developed unit achieves a noise temperature of no greater than 200 K across the operating frequency band (3–15.5 GHz), and no more than 100 K within the 5–11 GHz range. Additionally, results regarding output noise level instability and Allan variance analysis are presented based on the measured data.

Keywords: mobile radio telescope, broadband receiving system, noise temperature, Allan variance, Stirling cryocooler.

Contacts: Elizaveta S. Haleenkova (es.haleenkova@iaaras.ru).

For citation: Zotov M. B., Vekshin Yu. V., Pozdnyakov I. A., Ivanov S. I., Haleenkova E. S. Broadband compact focal plane receiver unit of a radio telescope based on a Stirling cryocooler // Transactions of IAA RAS. 2026. Vol. 76. P. 17–24. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.76.17-24>

Введение

Повышение эффективности наблюдений объектов ближнего и дальнего космоса методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) и, прежде всего, улучшение углового разрешения при различных углах склонения источников радиоизлучения, требуют использования радиоинтерферометров с адаптивно меняющимся географическим положением радиотелескопов (Thompson et al., 2017). Для существующей постоянно действующей национальной радиоинтерферометрической сети «Квазар-КВО» (Институт прикладной астрономии РАН) требуемую для решения практических задач конфигурацию баз РСДБ можно достичь путем включения новых радиоастрономических инструментов, в том числе передвижных, с радиотелескопом компактного (с диаметром основного зеркала менее 5 м) исполнения, что существенно сэкономит временные и финансовые затраты.

Передвижные РСДБ-станции можно условно разделить на две категории — мобильные и транспортабельные станции. Мобильные станции позволяют осуществлять быстрое развертывание и позиционирование. Они могут быть смонтированы на автомобильных прицепах и быстро приводиться в рабочее состояние. Обычно такие станции оборудуются малыми антеннами диаметром 3–5 м.

Транспортабельные станции предназначены для более длительного использования в удаленных и труднодоступных местах (на островах, в горных районах и проч.). Они транспортируются, как правило, в контейнерах и доставляются на место железнодорожным и/или морским транспортом, а на заключительном этапе — автомобильными трейлерами. По прибытии на место антенна собирается и устанавливается на заранее подготовленное

место на твердом грунте, а контейнеры переоборудуются под лабораторные и жилые помещения.

В 2025 г. в ИПА РАН впервые в России был разработан действующий прототип передвижной (транспортабельной) РСДБ-станции с двухзеркальным полноповоротным радиотелескопом РТ-4 с диаметром основного зеркала 4.23 м, способным работать совместно с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО» в режиме РСДБ (Иванов и др., 2025).

Такой радиотелескоп позволит в перспективе расширить возможности координатно-временного и навигационного обеспечения, в том числе улучшит наземную поддержку системы ГЛОНАСС, а также позволит решать новые научные и практические задачи астрометрии, астрофизики, космической геодезии и астрономии.

Полностью мобильные РСДБ-системы на данный момент в Российской Федерации отсутствуют. Одной из основных сложностей в разработке мобильного радиоастрономического инструмента является техническая реализация приемной системы, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к системам компактного радиотелескопа. Для повышения чувствительности таких радиотелескопов необходимо использование сверхширокополосных приемных систем и применение криогенного охлаждения сверхвысококачастотных (СВЧ) усилителей и входных трактов (Wilson, 2018).

Для стационарных радиотелескопов РТ-32, РТ-13 и прототипа передвижной РСДБ-станции (Иванов и др., 2025), входящих в состав действующей национальной радиоинтерферометрической сети, уменьшение уровня шума входных каскадов приемной системы достигается использованием микрокриогенной многоступенчатой системы замкнутого цикла охлаждения до водородного уровня температур, работа которой основана на замкнутом газовом цикле Джибфорда-МакМагона.

С учетом требований к приемной системе, ограничивающих линейные размеры и вес, использование такой криогенной системы в мобильных радиотелескопах невозможно.

В приемной системе мобильного полноповоротного радиотелескопа криостатирование входных каскадов может быть осуществлено с помощью компактного охладителя Стирлинга, позволяющего охлаждать и контролировать температуру одного из основных узлов приемной системы — широкополосного компактного приемного фокального блока (ШКПФБ) до температуры 140 К.

Ключевыми показателями качества приемных устройств, во многом определяющих эффективность их работы и область применения, являются количественные характеристики шума, в том числе шумовая температура или коэффициент шума ($F_{ш}$) приемной системы радиотелескопа (Heymann, Matthias, 2022; Ivanov et al., 2024). Величина шумовой температуры является фундаментальным ограничивающим фактором для таких рабочих параметров приемных устройств как чувствительность, отношение сигнал/шум (ОСШ) и др. Температура охлаждения криогенных систем на основе компактного охладителя Стирлинга не позволяет достигать температур водородного уровня, а охлаждаемые малошумящие усилители (ОМШУ) работают не в оптимальном режиме. Таким образом, исследование приемных устройств с использованием компактных криогенных блоков с охладителем Стирлинга с целью достижения минимального уровня шумовой температуры является актуальной задачей и должно дать ответ на вопрос

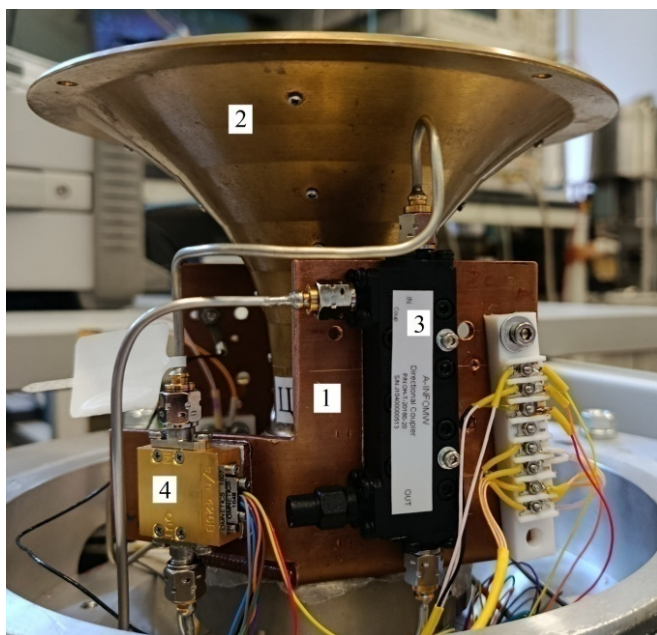
о возможности реализации таких приемных систем.

Нестабильность уровня мощности выходного шума приемного устройства также является ключевой характеристикой приемных систем радиотелескопов (Есепкина и др., 1973), так как ограничивает период накопления принимаемого сигнала и ухудшает чувствительность и отношение сигнал/шум.

Разработка широкополосного компактного фокального приемного блока с охладителем Стирлинга

Условие мобильности радиотелескопа накладывает ограничения на конструкцию, в первую очередь на габариты приемной и криогенной систем. Все элементы фокального блока, включая широкополосный облучатель, необходимо расположить в ограниченном объеме таким образом, чтобы добиться наибольшей эффективности охлаждения и не допустить влияния на диаграмму направленности радиотелескопа. Внешний вид разработанного широкополосного компактного фокального приемного блока с охладителем Стирлинга (ШКПФБ(С)) представлен на рис.1а.

ШКПФБ(С) осуществляет прием радиоизлучения двумя каналами, настроенными на сигналы двух ортогональных линейных поляризаций. Диапазон рабочих частот составляет 3–16 ГГц. Основными элементами блока являются широкополосный облучатель (2), направленный ответвитель (НО, 3) и охлаждаемый малошумящий



а)



б)

Рис. 1. а) ШКПФБ(С) без защитного металлического кожуха; б) ШКПФБ(С), в защитном кожухе с радиопрозрачным вакуумным окном

усилитель (ОМШУ, 4). Все элементы входного тракта располагаются на медном фланце, выполненном в форме пространственного хладовода, соединенного с охлаждающей платформой микрокриогенной системы Стирлинга. Для обеспечения вакуума в полости криостата ШКПФБ(С) оснащается радиопрозрачным окном (рис. 1b). Габаритные размеры ШКПФБ(С) вместе с корпусом, радиопрозрачным окном и охладителем Стирлинга не превышают в диаметре 40 см и в высоту 60 см.

Широкополосный облучатель (Роев, Чернов, 2015) представляет собой четырехгребневый расширяющийся рупор, принимающий сигналы двух ортогональных линейных поляризаций. Направленные ответвители, установленные перед усилителями, обеспечивают смешивание принимаемых СВЧ-сигналов с сигналами амплитудной и фазовой калибровок, поступающими в тракт от генератора шума и генератора пикосекундных импульсов. ОМШУ усиливает сигнал во всем диапазоне частот не менее чем на 30 дБ. Для соединения элементов между собой используются полужесткие кабели, в которых в качестве материала изоляции применяется твердый или микропористый фторопласт-4 (PTFE). Внешний экран выполнен в виде сплошной медной или алюминиевой трубки, обеспечивает экранное затухание на уровне 120 дБ в диапазоне частот до 18 ГГц. Схема ШКПФБ(С) аналогична схеме широкополосного криогенного приемного фокального блока для радиотелескопа РТ-13 (Векшин и др., 2023).

Охладитель Стирлинга

В настоящее время во всех обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» (Ипатов, 2013) на радиотелескопах для охлаждения приемных систем используются микрокриогенные системы (МКС) с замкнутым газовым циклом Джибфорда-МакМагона (Иванов и др., 1997). Данная система имеет две ступени охлаждения и включает несколько моду-

лей: компрессорная установка, микроохладители и панель управления. МКС позволяет охлаждать элементы до 10 К. Однако, большие размеры, сложность в эксплуатации и техническом обслуживании МКС Джибфорда-МакМагона обуславливает нецелесообразность ее использования в компактных мобильных радиотелескопах. Поэтому для разработанного ШКПФБ(С) было принято решение использовать новую систему охлаждения. В качестве такой криогенной системы был выбран охладитель Стирлинга модели SC-UE15R (рис. 2a). Его преимуществами являются небольшие габаритные размеры, масса и простота в обслуживании. Криогенная система представляет собой единый блок с линейными размерами 18×16×43.5 см. Масса выбранной модели охладителя SC-UE15R составляет менее 9 кг. Охлаждающая способность МКС зависит от температуры поверхности охлаждающей платформы охладителя и температуры окружающей среды, не менее 42.5 Вт. В экспериментальных исследованиях использование медного фланца как хладовода ШКПФБ(С) при вакуумировании рабочей камеры до величины остаточного давления 0.1 Па позволяет варьировать и контролировать температуру криостатирования приемного блока в диапазоне температур 300–140 К.

В комплекте с микроохладителем Стирлинга заводом-изготовителем поставляется модуль управления и питания. Этот модуль позволяет в ручном режиме управлять процессом охлаждения посредством переключателей, отвечающих за режим работы охладителя.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения тока для достижения минимальной температуры хладовода ШКПФБ(С) за минимальный интервал времени: 10 мА при 300 К, 12 мА при 270 К, 16 мА при 250 К и 20 мА при 190 К.



a)



b)

Рис. 2. а) Охладитель Стирлинга SC-UE15R; б) модуль управления

Для автоматизации и контроля процесса охлаждения был разработан новый модуль управления (рис. 2б). Созданный модуль позволяет автоматически регулировать величину тока, что определяет динамику процесса охлаждения ШКПФБ(С). Микроконтроллер в текущий момент времени регистрирует температуру датчика, расположенного на хладоводе ШКПФБ(С). По полученным данным выбирается значение силы тока.

Проведенные тестовые измерения МКС Стирлинга с разработанным модулем позволили обеспечить выход ШКПФБ(С) на криогенный режим охлаждения со стабильной температурой хладовода около 140 К за 1 ч 10 мин. Другие преимущества разработанного модуля — возможность дистанционного управления и наблюдения за текущими параметрами охладителя, а также безопасный режим работы устройства, так как при слишком резком изменении тока охладитель может выйти из строя.

Измерение шумовой температуры

Как отмечалось выше, одним из основных показателей качества приемников является его шумовая температура $T_{\text{ш}}$ (Heymann, Matthias, 2022; Ivanov, 2024). Наиболее распространенным методом измерения шумовой температуры $T_{\text{ш}}$ является классический метод Y-фактора (Алмазов-Долженко, 2000). Этот метод лежит в основе опции измерения шумовой температуры и коэффициента усиления с помощью современных анализаторов спектра (АС). В качестве источника шума с двумя калиброванными уровнями выходного сигнала в комплект АС Keysight PXA N9030A входит внешний источник шума N4002A серии SNS. У источников шума серии SNS зависимость от частоты коэффициента избыточного шума (ENR) автоматически загружается в АС при проведении процедуры калибровки перед измерением $T_{\text{ш}}$. Кроме того, в источник шума встроен термистор для непрерывного слежения и передачи в анализатор спектра текущего значения температуры для автоматической коррекции результатов измерений.

Однако, при измерении $T_{\text{ш}}$ радиоастрономических приемников при криогенных температурах с низким уровнем собственного шума и с малой погрешностью часто возникают требования к измерению параметров шума в условиях рассогласования СВЧ-устройств при их каскадном соединении (Ivanov et al., 2024; Simbierowicz et al., 2021). Особенно остро проблема измерения шумовой температуры приемного устройства при криогенных температурах с помощью АС возникает в том случае, когда входным устройством является широкополосный облучатель, как это показано на рис. 3. В этом случае использование стандартного метода измерения шумовой температуры с использованием калиброванных источников шума типа N4002A и процедуры калибровки анализаторов спектра становится невозможным.

В качестве источника шума для ШКПФБ(С) используется широкоапертурный низкотемпературный генератор шума (ШНГШ) — согласованная нагрузка, имеющая 2 режима температуры $T_c = 78$ К («холодная» нагрузка) и $T_h = 295$ К («горячая» нагрузка). ШНГШ представляет собой экранированный объем в виде полого металлического цилиндра. Диаметр цилиндра составляет 39 см, высота — 17.5 см. Для теплоизоляции используются стенки из пеноплекса толщиной 3.5 см. Полость заполнена радиопоглощающим материалом типа Мох-70. В полость цилиндра (рис. 3) заливается жидкий азот при температуре 78 К, который полностью покрывает радиопоглотитель, таким образом реализуется режим «холодной» нагрузки. Уровень спектральной плотности мощности на выходе ШКПФБ(С) в режимах «горячей» и «холодной» нагрузок измеряется в рабочей полосе частот 3–16 ГГц с помощью анализатора спектра Keysight PXA N9030A.

СВЧ-сигналы двух соответствующих ортогонально поляризованных компонент с двух выходов рупора подаются на два идентичных канала ШКПФБ(С), в состав которых входят направленный ответвитель (НО) и малозумящий усилитель (МШУ) (рис. 3). Измерение шумовой температуры

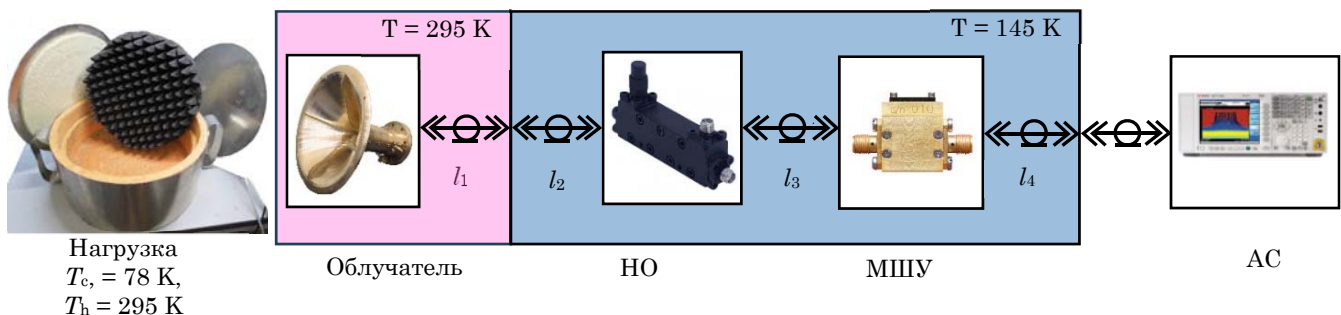


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения шумовой температуры ШКПФБ(С)

ШКПФБ(С), охлажденного до температуры 145 К, проводилось в два этапа. В первом эксперименте облучатель размещался вне криостата, как это показано на рис. 3 и имел температуру около 295 К. Соединение СВЧ-элементов выполнено с помощью полужесткого коаксиального радиочастотного кабеля с фторопластовым диэлектриком и наружным экраном в виде трубки, выполненной из меди (l_1, l_3) или нержавеющей стали (l_2, l_4) (рис. 3). На втором этапе эксперимента рупор размещался внутри криостата и охлаждался до температуры 145 К вместе с другими компонентами приемного канала. Такой сценарий исследований позволяет оценить влияние охлаждения облучателя и входных трактов до ОМШУ на шумовую температуру приемной системы, что представляет как теоретический, так и практический интерес. Сама процедура измерения шумовой температуры требует проведение калибровки с помощью «холодного» и «теплого» источников шума с известными шумовыми температурами и электродинамическими параметрами согласования элементов СВЧ-цепи. Погрешность такой калибровки, как правило, учитывается приближенно, что делает целесообразным проведение экспериментальных исследований шумовых характеристик ШКПФБ(С) для разных вариантов размещения облучателя.

На рис. 4 представлены графики результатов измерения двух шумовых температур $T_{1ш}$ и $T_{2ш}$ ШКПФБ(С) соответственно для вариантов, когда облучатель размещается вне криогенного блока и внутри него. Рабочим частотным диапазоном измерения шумовой температуры выбран диапазон частот от 3 ГГц до 16 ГГц, что является рабочим диапазоном частот широкополосных приемных систем радиотелескопов РТ-13 ([Векшин и др., 2023](#)).

Из приведенных функциональных зависимостей видно, что шумовая температура ШКПФБ(С) $T_{2ш}$ для варианта, когда облучатель размещается внутри криогенного блока и имеет температуру $T_{обл} = 145$ К, достигает величины 73 К при частоте 7 ГГц и 250 К — при частоте 16 ГГц. Для варианта, когда облучатель размещается вне криогенного блока и имеет температуру $T_{обл} = 295$ К, величина шумовой температуры ШКПФБ(С) $T_{1ш}$ в четыре раза выше, чем $T_{2ш}$: 310 К — при частоте 7 ГГц и более 1000 К — при частоте 16 ГГц.

Исследование стабильности выходного шума ШКПФБ(С)

Помимо анализа шумовой температуры было проведено исследование стабильности выходного шума ШКПФБ(С). Оно необходимо для оценки достигаемой чувствительности, определения преобладающего типа шумов и оптимального периода

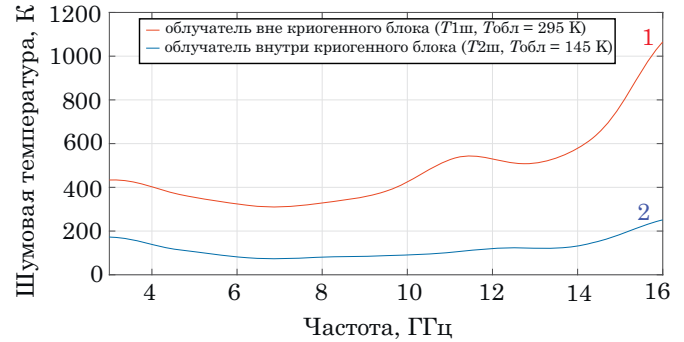


Рис. 4. Шумовая температура ШКПФБ(С)

накопления сигнала. Наиболее полный анализ статистических свойств нестационарного случайного сигнала предоставляет двухвыборочное отклонение Аллана, рассчитываемое по выборке выходного сигнала ШКПФБ(С) большой длительности.

На рис. 5 представлены расчеты относительного отклонения Аллана мощности выходного сигнала ШКПФБ(С).

При расчете отклонения Аллана интервал времени усреднения τ составляет от 0.1 с до 100 с, в котором относительное отклонение Аллана остается почти постоянной величиной равной 10^{-4} . Такое поведение функциональной зависимости отклонения Аллана от параметра τ говорит о преобладании низкочастотных фликкер-шумов в выходном сигнале. Ранее проведенные исследования стабильности ШКПФБ с охладителем Джиффорда-МакМагона показали аналогичный результат ([Векшин и др., 2018](#)). Таким образом, преобладание низкочастотных фликкер-шумов является характерным свойством применяемого типа усилителей СВЧ-сигналов при криогенных температурах.

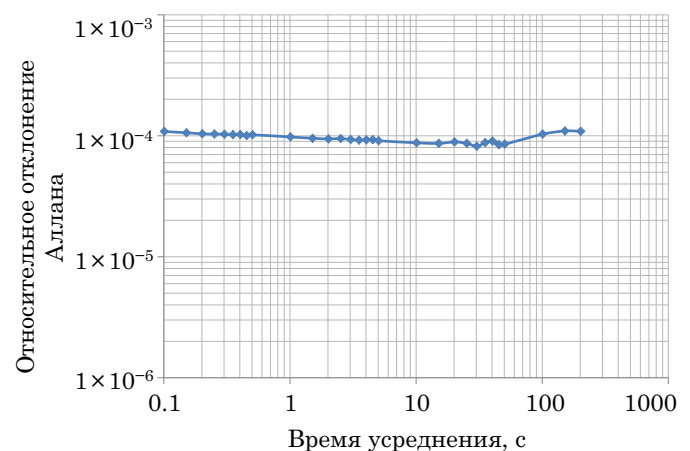


Рис. 5. Относительное отклонение Аллана мощности выходного сигнала ШКПФБ(С)

Таблица

Значения параметров

η	SNR	d_1 , м	d_2 , м	КИП ₁	КИП ₂	$T_{\text{сис1}}$, К	$T_{\text{сис2}}$, К	t	Δf , ГГц	F , Ян
0.88	12	2.5	32	0.7	0.6	120	40	60 с	1	0.18

Оценка потока источников для РСДБ-наблюдений с компактным радиотелескопом

Для оценки возможности проведения РСДБ-наблюдений необходимо рассчитать минимальный поток источника, который возможно будет наблюдать при совместных РСДБ-наблюдениях с использованием компактного радиотелескопа с разработанной приемной системой. Целесообразно для таких наблюдений использовать радиотелескопы РТ-32, дающие высокую чувствительность по потоку благодаря своим размерам. На данный момент наиболее подходящим для такого режима наблюдений является X-диапазон частот. Ширина полосы регистрации в таком случае может быть 1 ГГц.

Формула для нахождения отношения сигнал-шум корреляционного отклика:

$$SNR = \frac{\eta F \cdot 10^{-26} \cdot d_1 d_2}{8k} \sqrt{\frac{КИП_1 КИП_2}{T_{\text{сис1}} T_{\text{сис2}}}} \sqrt{2 \Delta f t} \quad (1)$$

где η — коэффициент, учитывающий инструментальные потери чувствительности, k — постоянная Больцмана, d_1 и d_2 — диаметры антенн, F — плотность потока радиоисточника, Δf — ширина полосы регистрации, t — время накопления, КИП₁ и КИП₂ — коэффициенты использования поверхности, $T_{\text{сис1}}$ и $T_{\text{сис2}}$ — шумовая температура системы.

Значение SNR = 12 позволит добиться точности определения задержки лучше 100 пс, что даст сантиметровую точность определения координат. Таким образом, используя пороговое значение SNR = 12, из соотношения (1) можно вычислить минимальный поток источников для РСДБ-наблюдений с компактным радиотелескопом диаметром 2.5 м, оснащенный разработанной приемной системой. Все используемые числовые значения параметров представлены в таблице.

Шумовая температура приемной системы складывается из температуры ШКПФБ (100 К) и температуры антенны (20 К).

Стоит отметить, что минимальный поток квазаров для геодезических наблюдений равен 0.4 Ян, таким образом компактный радиотелескоп, оснащенный приемной системой с разработанным ШКПФБ(С), может быть задействован в геодезических РСДБ-наблюдениях с радиотелескопами РТ-32 комплекса «Квазар-КВО».

Заключение

Разработан широкополосный компактный фотоприемный блок с охладителем Стирлинга,

и проведены измерения его шумовой температуры. Приемный блок вместе с криогенной системой имеет следующие размеры: $35.6 \times 35.6 \times 53.3$ см. Охлаждение облучателя в составе криогенного блока приемной системы до температуры 145 К позволяет уменьшить шумовую температуру ШКПФБ(С) в четыре раза по сравнению с шумовой температурой ШКПФБ(С), где облучатель размещен вне криогенного блока. Шумовая температура разработанного ШКПФБ(С) в рабочем диапазоне частот (3–15.5 ГГц) составила не более 200 К, а в диапазоне 5–11 ГГц — не более 100 К. ШКПФБ с классическим охладителем Джибфорда-МакМагона имеет шумовую температуру менее 40 К в диапазоне частот (3–15.5 ГГц), однако облучает значительно большими габаритами.

Проведенные исследования показывают, что криогенная система на основе охладителя Стирлинга может эффективно использоваться для маломощных высокочувствительных приемных систем компактных мобильных радиотелескопов, в том числе в составе радиоинтерферометров с адаптивной сверхдлинной базой.

Литература

- Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ. М.: Научный мир, 2000. 240 с.
- Векшин Ю. В., Евстигнеев А. А., Лавров А. П. Анализ стабильности выходных сигналов макета широкополосной приемной системы радиотелескопа // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 18–25.
- Векшин Ю. В., Зотов М. Б., Лавров А. С. и др. Широкополосная приемная система для радиоинтерферометра нового поколения // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 3. С. 98–107.
- Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М: Наука, 1973. 416 с.
- Иванов Д. В., Зотов М. Б., Векшин Ю. В. и др. Передвижная РСДБ-станция комплекса «Квазар-КВО» // Одиннадцатая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2025), 21–25 апреля 2025 г., Санкт-Петербург: тезисы докладов. СПб.: ИПА РАН, 2025.
- Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А. и др. Приемники радиоинтерферометрической сети Квазар // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 242–256.
- Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru> (дата обращения: 20.09.2025).
- Ипатов А. В. Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // УФН. 2013. Вып. 183:7. С. 769–777.

Роев А. А., Чернов В. К. Сверхширокополосный облучатель радиотелескопа глобальной сети VGOS // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 32. С. 59–64.

Ivanov S.I., Lavrov A.P., Zotov M.B., Khvostov E.Yu., Vekshin Yu.V. Measuring the noise figure of a cooled broadband radio astronomy receiver. Proceedings of the 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Saint Petersburg, 2024. P. 106–109. Doi: 10.1109/EExPolytech62224.2024.10755757.

Heymann P. Matthias R. A Guide to noise in microwave circuits. Devices, circuits, and measurement. 2022, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J.

Simbierowicz S., Vesterinen V., Milem J., et al. Characterizing cryogenic amplifiers with a matched temperature-variable noise source // Rev. Sci. Instrum. 2021. Vol. 92 (3): 034708.

Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Jr. Interferometry and synthesis in radio astronomy. Springer International Publishing AG, 2017.

Wilson T. L. Tools of Radio astronomy – problems and solutions. Springer International Publishing, 2018.