

Криостатированный блок для дистанционной механической настройки охлаждаемых пассивных устройств СВЧ

© Д. Д. Бронников, Е. Ю. Хвостов, Ю. В. Векшин

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Целью работы является разработка лабораторного криостатированного блока, предназначенного для удалённой механической настройки пассивных СВЧ-устройств в условиях криогенных температур. Основное внимание уделено возможности точной настройки без физического и визуального контакта с устройством, а также перспективе полной автоматизации данного процесса.

В рамках проекта разработаны принципы интеграции сервоприводов в герметичный криостатированный корпус и механизм передачи вращения к настроечным винтам. Передача реализована с помощью специальной цанги, соединённой со штоком с резьбой М4 с мелким шагом, что компенсирует вертикальное перемещение винта. Настройка осуществляется через программное обеспечение, разработанное в среде LabVIEW. Программа обеспечивает позиционирование сервоприводов, чтение их текущего положения, пошаговое перемещение, а также визуализацию параметров СВЧ-устройства (КСВН, потерь) в реальном времени с использованием векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40.

В ходе испытаний была выполнена дистанционная настройка микрополоскового направленного ответвителя S-диапазона, оснащённого пятью настроечными винтами. Опытный образец подтвердил работоспособность системы: настройка успешно выполняется в полностью изолированном объёме, без необходимости физического доступа. Максимальная достигнутая точность позиционирования сервоприводов составила 0.44° , что соответствует 0.6 мкм вертикального перемещения винта.

Будущие направления развития включают внедрение алгоритмов автоматической оптимизации параметров (например, минимизации КСВН и потерь), масштабирование системы для работы с большим числом винтов, а также разработку гибкого вала для применения в условиях плотной компоновки. В перспективе планируется создание универсальной платформы для высокоточной настройки пассивных СВЧ-устройств, эксплуатируемых в криогенном режиме и предъявляющих высокие требования к стабильности параметров.

Ключевые слова: криостатированный блок, пассивное СВЧ-устройство, криогенный, сервопривод, дистанционное управление, автоматизация.

Контакты для связи: Бронников Даниил Дмитриевич (dd.bronnikov@iaaras.ru).

Для цитирования: Бронников Д. Д., Хвостов Е. Ю., Векшин Ю. В. Криостатированный блок для дистанционной механической настройки охлаждаемых пассивных устройств СВЧ // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 72. С. 10–13.
<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.72.10-13>

Cryogenic Chamber for Remote Mechanical Tuning Cooled Passive Microwave Devices

D. D. Bronnikov, E. Y. Khvostov, Yu. V. Vekshin

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

Abstract

The aim of this work is to develop a laboratory cryogenic chamber for remote mechanical tuning of passive microwave (MW) devices under cryogenic conditions. The primary focus is on enabling precise parameter adjustment without physical or visual contact with the device, as well as exploring the potential for full automation of the tuning process.

The project involved the developing principles for integrating servo drives into the hermetically sealed chamber and designing a mechanism to transmit rotation to the tuning screws. The rotation transmission is achieved via a special collet coupled with an M4-threaded rod featuring a fine pitch, which compensates for vertical displacement of the screws. Tuning is carried out using software developed in LabVIEW, which enables precise positioning of the servo drives, real-time monitoring of their current positions, stepwise movement control, and visualization of MW device parameters (VSWR, insertion loss) via a Rohde & Schwarz ZVA40 vector network analyzer.

During testing, remote tuning of an S-band microstrip directional coupler equipped with five tuning screws was successfully carried out. The prototype chamber confirmed the system's functionality: the adjustments were performed entirely within an isolated volume, eliminating the need for physical access. The maximum positioning accuracy of the servo drives was 0.44° , corresponding to a vertical screw displacement of $0.6\text{ }\mu\text{m}$ relative to the microstrip lines.

Future efforts will focus on implementing automatic parameter optimization algorithms (e.g., minimizing VSWR and losses), scaling the system to accommodate a larger number of tuning screws, and designing a flexible shaft for use in densely configured setups. The long-term goal is to create a universal platform for high-precision tuning of passive MW devices operating in cryogenic environments, where stringent demands on parameter stability are critical.

Keywords: cryogenic chamber, tuning, microwave, servo, remote control, automation.

Contacts: Daniil D. Bronnikov (dd.bronnikov@iaaras.ru).

For citation: Bronnikov D. D., Khvostov E. Y., Vekshin Yu. V. Cryogenic chamber for remote mechanical tuning cooled passive microwave devices // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 72. P. 10–13.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.72.10-13>

Введение

По причине крайне низкой интенсивности излучения исследуемых объектов в радиоастрономии применяется охлаждение входных каскадов радиоприёмных устройств (РПУ) с целью увеличения их чувствительности. Поэтому от входных трактов приемной аппаратуры требуется минимальный уровень собственных шумов, непосредственно влияющих на её чувствительность. Такое же требование предъявляется и к пассивным устройствам СВЧ-диапазона, которые часто включены во входные тракты: к направленным ответвителям, мостам, вентилям (циркуляторам) и т. д. Для пассивных СВЧ-устройств, как правило, предусмотрена возможность точной настройки на этапе постпроизводственной доводки. Одним из эффективных решений является использование для настройки управляемых неоднородностей, например, регулировочных винтов.

Согласно данным ([Афонин, 2013](#)), при охлаждении настроенных пассивных СВЧ-устройств происходит термическое смещение проводящих элементов, вызванное эффектом линейного теплового расширения. Это приводит к нарушению согласования и изменению рабочих параметров устройства, особенно заметному на высоких частотах.

На мировом рынке лучших результатов в области автоматизированной настройки СВЧ-устройств с настроечными винтами достигла компания *Space Forest*. Первая версия программного обеспечения для настройки фильтров *Filter Tuning Software* (FTS) ([Space Forest](#)) была представлена еще в 2004 г. Разработанные компанией роботизированные станции позволяют автоматически настраивать микроволновые фильтры на этапе постпроизводственной доводки. Однако из-за крупногабаритности таких станций их интеграция непосредственно в конструкцию криостатируемых блоков (КБ) представляется нетривиальной задачей.

В работе ([Widaa, 2023](#)) предложена концепция перестраиваемых фильтров на основе вставных резонаторов. Разработанные прототипы обладают достаточной компактностью для их размещения в КБ. Однако практическое внедрение данной технологии потребует полной замены всех используемых на текущий момент пассивных СВЧ-устройств на новые, соответствующие этой концепции.

Целью работы является разработка КБ с возможностью бесконтактной настройки охлаждённого СВЧ-устройства. Предполагается, что настройка будет осуществляться с помощью сервоприводов (СП), размещённых внутри корпуса блока и жёстко соединённых с настроечными винтами устройства. Управление сервоприводами будет осуществляться дистанционно посредством персонального компьютера (ПК).

Конструкция КБ

Созданный КБ представляет собой герметичный корпус, который позволяет охлаждать настраиваемое устройство до температуры ~ 20 К (рис. 1).

Конструкция внутри КБ представляет собой несколько параллельных поверхностей (пластин), которые расположены над СВЧ-устройством (7). Все пластины закреплены с помощью установочных стоек. Одна из пластин (5) соединена с азотным экраном, и предназначена для передачи вращения от СП к настроечным винтам. На второй пластине (2) расположены СП.

СВЧ-устройство располагается на 2-ой ступени микроохладителя (МО) (9) посредством кронштейна (8).

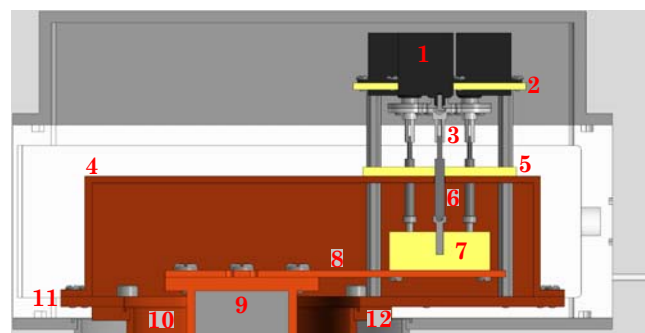


Рис. 1. 3D-модель внутренней части спроектированного КБ: 1 – сервоприводы (СП); 2 – пластина для крепления СП; 3 – цапга; 4 – верх азотного экрана; 5 – пластина фиксации штоков; 6 – штоки с резьбой М4 с мелким шагом; 7 – СВЧ устройство; 8 – кронштейн; 9 – 2-ая ступень МО; 10 – теплоизолирующая труба второй ступени МО; 11 – низ азотного экрана; 12 – фланец для соединения трубы 10 с МО и азотным экраном 11

В конструкции предусмотрен азотный экран (4, 11), изолирующий пространство, где находится СВЧ-устройство от теплового излучения. Тепло отводится от азотного экрана посредством медной трубы (10) и фланца (12), соединённых с первой ступенью МО. Азотный экран состоит из нескольких листов меди, выполненных в виде формованных накладок. Составная конструкция позволяет легко снять часть накладок и зафиксировать регулировочные винты в нужных положениях после процесса настройки и отепления.

Разработана система передачи вращательного движения от СП к настроечным винтам. При ее создании была учтена проблема вертикального смещения винта на величину, кратную шагу резьбы при его вращении.

В процессе настройки вращательное движение сервопривода передаётся на шток (6), жёстко соединённый с настроечным винтом. Шаг резьбы штока соответствует шагу резьбы регулировочного винта, вследствие чего он воспроизводит как вращательное движение, так и вертикальное перемещение винта. Конструктивно предусмотрена прорезь (полоз) в цанге (3), благодаря которой вертикальное перемещение штока не приводит к его разъединению с СП. Шток свободно скользит в вертикальной плоскости, оставаясь при этом жёстко связанным с цангой по горизонтали. Таким образом, в процессе настройки СП и СВЧ-устройство остаются неподвижными, что обеспечивает стабильность системы и исключает механическое воздействие на чувствительные элементы.

Реализация дистанционного управления

Для выполнения дистанционной настройки была разработана программа в среде LabVIEW, состоящая из двух блоков. Первый позволяет управлять СП посредством трех действий: установка в определённую позицию, пошаговое движение и чтение текущей позиции. Второй блок программы позволяет выводить результаты измерений с векторного анализатора цепей (ВАС) Rohde&Schwarz ZVA40 в виде различных графиков.

Важной функциональной особенностью второго блока программы является возможность визуализации целевых параметров в виде графиков от времени, что позволит фиксировать реакцию устройства на изменение положения настроечного винта и мгновенно оценивать результат воздействия, принимая решение о корректности выполненного действия. На рис. 2 коэффициент стоячей волны по напряжению изменяется ступенчато из-за высокой скорости СП.

Блок-схема экспериментального макета для проведения дистанционной настройки представлена на рис. 3. Оператор в процессе настройки выполняет действия только в ПК.

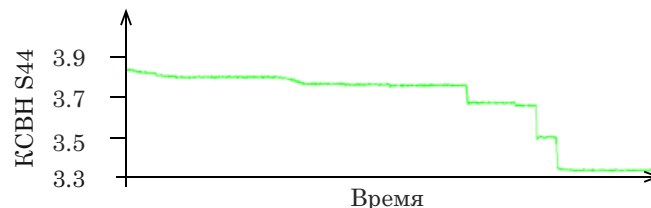


Рис. 2. Пример процесса настройки СВЧ-устройства

Управляющие сигналы от ПК поступают к СП через программатор, который одновременно выполняет как функции преобразователя интерфейса USB/TTL, так и распределителя питания. Питание подаётся от универсального источника, обеспечивающего необходимые уровни напряжения и тока. Сервоприводы и СВЧ-устройство размещены внутри корпуса КБ. В рамках тестовых испытаний охлаждение не применяется, поэтому элементы криогенно-вакуумного оборудования в блок-схему не включены. СП соединены с настраиваемым СВЧ-устройством по методу, описанному в предыдущем разделе. К выводам СВЧ-устройства подключён векторный анализатор цепей через коаксиальные СВЧ-кабели. Анализатор обменивается данными с ПК по Ethernet-интерфейсу. Полученные измерения отображаются в виде графиков во втором блоке программы.

Процесс настройки сводится к тому, что оператор задаёт номер сервопривода, направление и количество шагов, на которое необходимо изменить его положение, — а вместе с ним и положение соответствующего настроечного винта. После выполнения перемещения оператор оценивает результат настройки по графику изменения целевого параметра.

Заключение

В результате проведённых испытаний продемонстрирована возможность дистанционной механической настройки пассивных СВЧ-устройств. Были разработаны основные принципы размещения СП внутри КБ и их соединения с настроечными винтами. Создана программа, обеспечивающая взаимодействие сервопривода и векторного анализатора цепей с персональным компьютером. Также был изготовлен экспериментальный стенд, на базе которого успешно проведена дистанционная настройка микрополоскового направленного ответвителя S-диапазона частот.

На данном этапе созданный макет обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной ручной настройкой:

- настройка осуществляется без физического контакта с СВЧ-устройством, что делает возможной её реализацию в полностью изолированном объёме внутри КБ;

- обеспечена высокая точность позиционирования (минимальный шаг поворота составляет

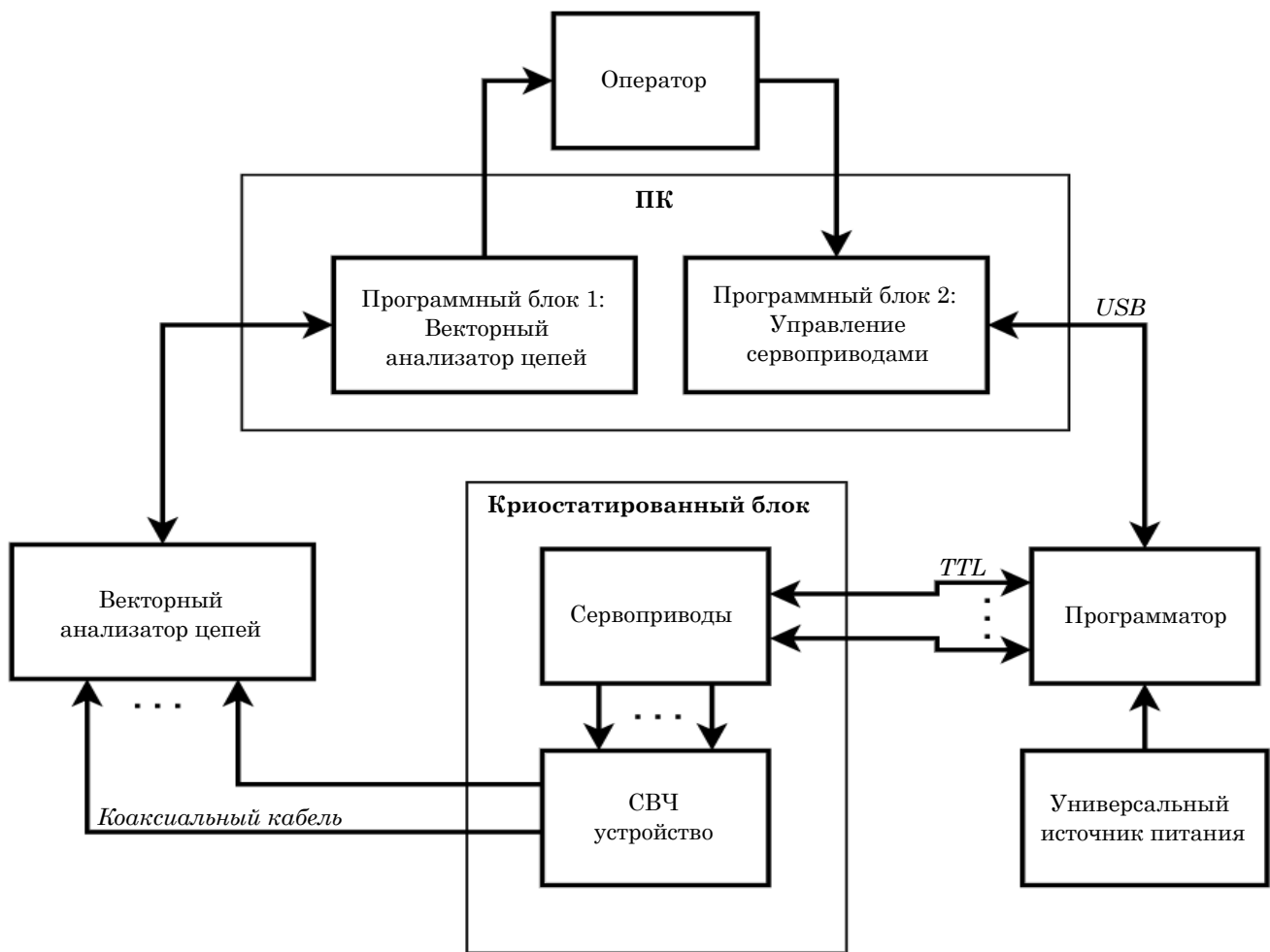


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерений

0.44°, что соответствует 0.6 мкм вертикального перемещения настроечного винта);

— реализована функция возврата к ранее зафиксированным позициям;

— обеспечена жёсткая фиксация текущего положения сервоприводов и винтов.

Таким образом, на данном этапе реализованы ключевые компоненты системы дистанционного управления процессом настройки. В перспективе планируется создать программный модуль, обеспечивающий полностью автоматическую настройку охлаждённого СВЧ-устройства на основе целевых параметров, а также масштабировать конструкцию для работы с большим числом регулировочных винтов. Предполагается создание гибкого передаточного механизма для применения в условиях плотной компоновки.

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

Литература

Афонин А. О., Лексиков А. А., Угрюмов А. В. Исследование свойств микрополосковых электрически управляемых резонаторов на основе полупроводниковых варакторов при криогенных температурах // Наноматериалы и нанотехнологии в аэрокосмической области. Решетневские чтения. 2013. С. 459–460.

SpaceForest / Product: Filter tuning solutions [Электронный ресурс] URL: <https://spaceforest.pl/filter-tuning-solutions/> (дата обращения: 05.05.2025).

Widaa A., Bartlett C., Höft M. Tunable coaxial band-pass filters based on inset resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2023. Vol. 71, no. 1. P. 285–295. doi: 10.1109/TMTT.2022.3222321.