

УДК 621.382.2+УДК 536.483

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СВЕРХПРОВОДИКОВЫХ ПРИЕМНИКОВ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. Д. Баранов¹, О. С. Большаков^{1,2}, В. Ф. Вдовин^{1,2}, А. И. Елисеев¹, Д. В. Коротаев¹,
В. П. Кошелец³, И. В. Леснов^{1,2}, А. С. Мухин^{1,2}, М. Ю. Торгашин³

¹ Институт прикладной физики РАН

² Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева

³ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Статья получена 26 мая 2015 г.

Аннотация. Проведены исследования вариаций тока сверхпроводникового смесителя ТГц диапазона волн и собственной температурной нестабильности оконечной ступени охладителя криорефрижератора замкнутого цикла гелиевого уровня температур, построенного на принципе пульсационной трубы, применяемого для криостатирования сверхпроводниковых приемников. Выявлены периодические пульсации с характерными для циклически работающего охладителя частотами. Теоретически и экспериментально исследованы методы сглаживания температурных пульсаций и оценена эффективность пассивного инерциального метода. В результате предложенного комплекса мер в ~ 20 раз снижена степень влияния работы охладителя на режим по постоянному току охлаждаемого смесителя. Сформулированы предложения для разработчиков высокочувствительной сверхпроводниковой приемной аппаратуры ТГц волн, использующей механические системы охлаждения.

Ключевые слова: сверхпроводниковые приемники ТГц волн, криогенные температуры, системы термостабилизации, криорефрижераторы, космические телескопы.

Abstract. Temperature fluctuations of the current of superconducting THz mixer and temperature instability of a cold head of closed cycle pulse tube helium refrigerator have been investigated. Spectrum of periodic temperature pulsations with

characteristic frequencies cyclically operating cooler have been studied. Theoretical and experimental smoothing techniques of temperature fluctuations and evaluated the efficacy of passive inertial method have been developed. As a result of the proposed package of measures the degree of influence of the cooling mode DC-cooled mixer is reduced ~ 20 times. Some technical solutions for development of high sensitive superconducting THz receivers with mechanical coolers have been formulated.

Key words: THz waves, superconducting receivers, cryogenics, refrigerators, thermal stabilization, space telescope.

Введение

Сверхвысокочувствительные гетеродинные приёмники терагерцового диапазона частот (ТГц) для радиоастрономических и атмосферных исследований обычно строятся на основе смесителей сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) [1,2] и требуют глубокого и стабильного криогенного охлаждения. В частности, в астрономических миссиях Herschel [3] и Boomerang [4] а также в приемнике для атмосферных исследований [5] для этой цели используется криостат с жидким гелием. Однако такой подход не обеспечивает долгосрочного цикла наблюдений без дозаправки жидким гелием. Для наземных обсерваторий проблема перезаправки криоагентом стоит не так остро, в отличие от космических миссий, где исчерпание гелия означает прекращение функционирования обсерватории. Поэтому, как для наземных испытаний, так и для долгосрочных космических полётов рефрижераторы замкнутого цикла являются очень привлекательными и всё чаще применяются в практике построения высокочувствительных приемников ТГц волн. Однако, механические охладители имеют свои недостатки, ставшие предметом исследования в настоящей работе. В частности наблюдаются вибрации компрессоров и охладителей, создающие микрофонный эффект. Имеются значительные колебания температуры. Поэтому на практике наилучшие результаты лабораторных измерений приёмников, охлаждаемых криорефрижераторами, достигаются при выключении компрессоров без

температурных и механических колебаний в течение коротких периодов времени, когда температура еще не начинает расти. Понятно, что такой режим практически невозможен для работающего приемника и годится лишь для демонстрации предельных возможностей приемника в лабораторных тестах. Перечисленные проблемы криорефрижераторов были исследованы и частично решены при создании аппаратуры миссии Plank [6] но, в основном с точки зрения устранения влияния компрессоров. Эти же проблемы, станут критическими для готовящейся миссии Миллиметрон [7,8], где на борту предполагается одновременная работа более десятка механических охладителей. В системах с охлаждением жидким криоагентом нет подобных проблем, и температурная стабильность, на фоне отсутствия механических вибраций, достигается путём регулирования давления паров гелия над поверхностью жидкости в криостате. Однако для механических рефрижераторов нет столь простого решения. Проблема температурной стабилизации, разумеется, рассматривается производителями рефрижераторов, и в комплект поставки предлагается термостабилизированная опция, однако и она далеко не решает проблемы, специфичные для сверхвысокочувствительных сверхпроводниковых приемников, и как будет показано ниже, подходы производителей и потребителей к оценкам достигаемых параметров стабильности порой расходятся в результатах на порядки [9], в частности в данном случае после дискуссии с представителями одного из производителей (Oxford Instruments) с авторами настоящей статьи, сделано предположение, что расхождение обусловлено ограниченностью характеристик использованной ими измерительной аппаратуры и несовершенством методик. Поэтому необходимы детальные исследования каждой конкретной конфигурации охладитель - охлаждаемый приемник для достижения приемлемых характеристик последних. Недооценка же данного эффекта может привести к фактическому снижению чувствительности приемника, как это продемонстрировано на Рис 1, где видны флуктуации тока СИС - смесителя, синхронизованные с работой охладителя, при этом флуктуации такого

масштаба драматически влияют на режим рабочей точки смесителя и его работу как преобразователя предельно слабых ТГц сигналов [10].

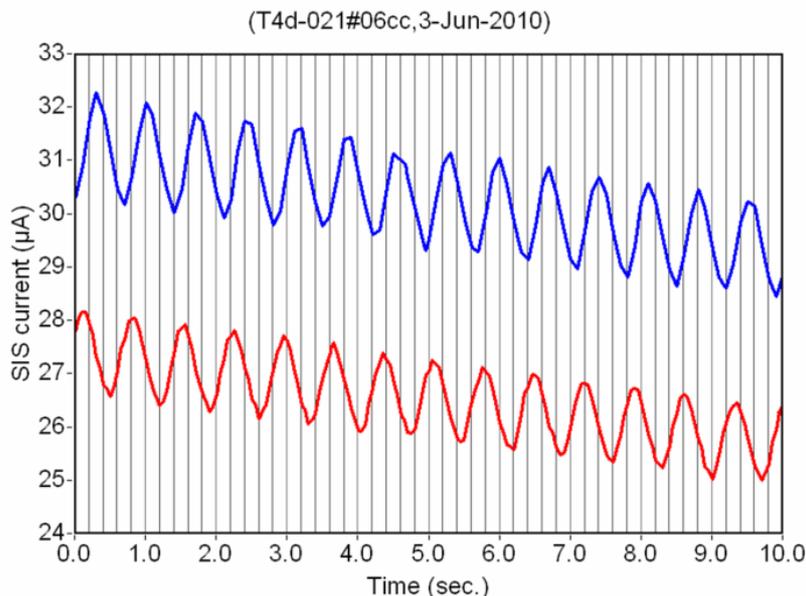


Рис. 1 Флуктуации тока СИС смесителя, вызванные температурными флуктуациями.

Одной из целей исследования ставилось определение уровня колебаний температуры, создаваемых собственными механизмами охладителя в точках предполагаемого расположения приёмников электромагнитного излучения и устранение температурной неустойчивости.

1. Методы стабилизации температуры криостатирования СИС-смесителя

Методы термостабилизации сверхпроводникового смесителя сводятся к двум основным типам стабилизации температуры холодного фланца оконечной ступени охладителя: пассивной и активной. Основной активный метод - стандартная электронная стабилизация с термодатчиком и нагревателем, которые через цепь обратной связи стабилизируют температуру на некоем заданном уровне, заведомо на более высоком по отношению к номинальной температуре охладителя с использованием управления алгоритмом- PID. Вариантом активного метода, учитывая периодичность основных флуктуаций температуры, вызванных периодичностью термодинамического цикла пульсационной трубы, является компенсация температурных флуктуаций

методом генерации температурных синусоидальных флуктуаций на нагревательном элементе фиксированной частоты и фазой, противоположной флуктуациям охладителя. Последний вариант не отрабатывает медленных изменений температуры, связанных с изменениями условий окружающей среды, также серьезным образом влияющих на работу криорефрижераторов замкнутого цикла, в том числе на его температуру криостатирования и хладопроизводительность. Однако и полноценная следящая система термостабилизации помимо потери в температуре криостатирования, имеют и другой системный дефект. Теплопроводность и теплоемкость основных конструкционных материалов, из которых изготавливаются элементы ТГц приемников претерпевают существенные (на порядки) изменения при рабочих температурах гелиевых охладителей. Это приводит к необходимости их учета в инерционности цепи обратной связи системы термостабилизации, причем даже если использовать сам СИС – переход как датчик температуры велика вероятность недостижения устойчивой стабилизации. В процессе работы на макетах выявлены и другие трудности реализации метода электронной стабилизации. В частности, выявлено влияние так называемого шума АЦП видимого на графиках в виде «полочек» и «уровней», сформулированы требования к более точному АЦП пригодному для системы контроля температуры, способному обеспечить адекватную работу активной системы стабилизации такого рода.

В связи с этими проблемами весьма привлекательными представляются пассивные системы термостабилизации, исследованию которых посвящена представленная работа. Упомянутые выше газовые системы стабилизации, которые используются в комплекте поставки коммерческих охладителей, реализуют в криорефрижераторах тот же принцип, что и стабилизация в криостатах с жидким гелием. При этом на оконечной ступени охладителя устанавливается дополнительный модуль с герметичной ёмкостью, в которой находится гелий под высоким давлением, который при охлаждении переходит в жидкую фазу, частично заполняя ёмкость, поддержание же постоянным

давления над поверхностью жидкой фазы обеспечит постоянство температуры системы, тем самым сглаживая температурные флуктуации генерируемые охладителем. Температура газа при этом определяется в упрощённом виде соотношением (1) и при постоянстве массы и объема однозначно задает температуру как линейную функцию давления:

$$pV \sim RTm/M, \quad (1)$$

где: p -давление, V -объём, T - абсолютная температура, R - универсальная газовая постоянная, M -молярная масса рабочего газа, m -масса газа.

Очевидно, что усложненный аналог такого рода системы является хорошим вариантом обеспечения режима адекватной для работы СИС – смесителя ТГц диапазона частот стабилизации, однако, здесь есть и свои трудности, в частности, поскольку плотность жидкого и газообразного гелия отличается в сотни раз, то давление газа, способного при ожижении заполнить буферную емкость, в неработающем состоянии может достигать 700 атмосфер. Это довольно сложно реализовать и поэтому такого рода стабилизаторы требуют дополнительной магистрали и емкости для запитки при охлаждении и стравливания гелия при выключении. Возможным решением, особенно для радиотелескопа Миллиметрон, могла бы стать реализация отдельного ожижительного контура относительно малой емкости, который и обеспечит охлаждение элементов приемника и антенны по сходной с миссией Hershel схеме, но без танка с гелием в два кубометра объема. Рефрижераторы же будут работать в режиме ожижителя.

Заметно более простой представляется инерционная схема стабилизации, которая предполагает создание фильтра температурных пульсаций, аналогичного RC-электрическому фильтра электрических флуктуаций определенного частотного диапазона. В данном случае в качестве «ёмкости» C (конденсатора) выступает вставка большой массы, например медная, в качестве сопротивления R предполагается тепловое сопротивление - тонкая теплоизолирующая плёнка из материала низкой теплопроводности — майлар.

Примерная модель такого фильтра-аналога описывается формулой (2). Оценка частоты среза теплового фильтра в исследуемой конфигурации и размерах даёт частоту среза в $\sim 0,33$ Гц, что гарантированно должно позволить сгладить все флуктуации с частотой в 0,33 Гц и выше.

$$F = 1/2\pi RC, \quad (2)$$

где F -частота среза, R -сопротивление, C -ёмкость

2. Описание проводимых экспериментов

Для исследования эффекта температурных флуктуаций и эффективности предлагаемого метода сглаживания температуры был создан экспериментальный стенд. Стенд построен на базе низкотемпературной холодильной установки - криорефрижератора замкнутого цикла CRYOMECH PT410 RM (Pulse Tube).

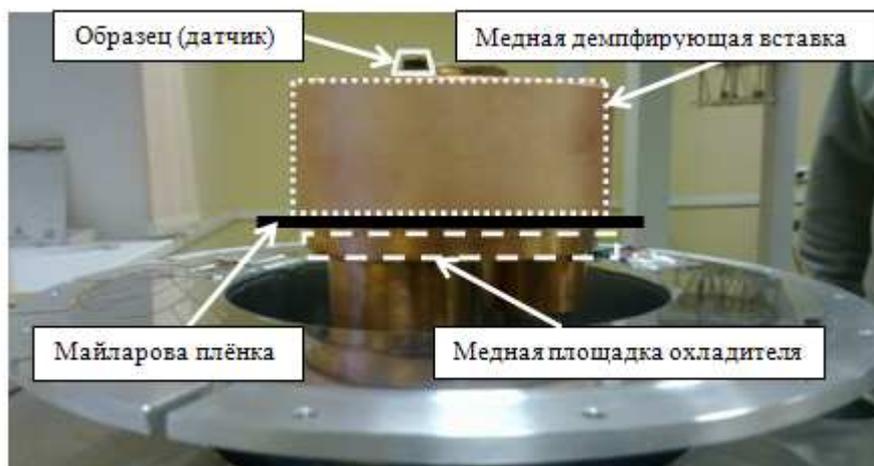


Рис 2. Схема установки для исследования температурных флуктуаций

В криостате на «холодной» ($T \sim 4$ К) ступени был установлен комплект оборудования для измерений, состоящий из термодатчика Lake Shore DT-470-D1-13 с диапазоном измерения от 1.4К до 475К. Для снятия данных был разработан аппаратно программный комплекс на основе шасси: ni pxi – 1082 C

платой: DAC/ADC пі рхі – 6251. Структурная схема эксперимента представлена на Рис 2.

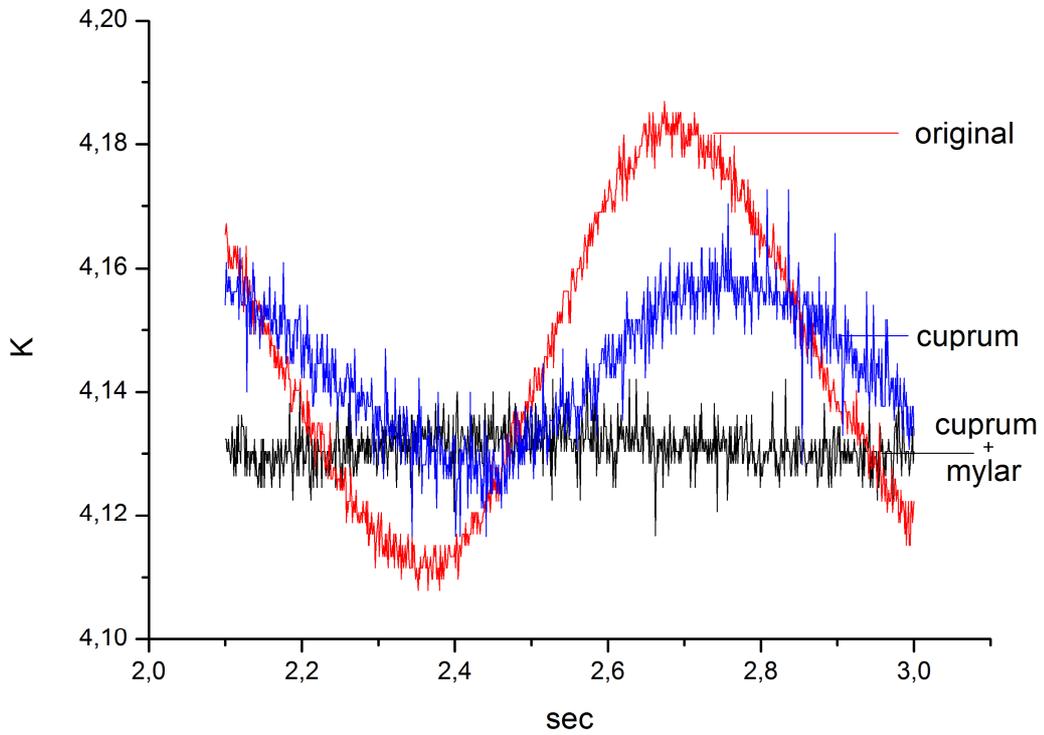


Рис. 3 Временная реализация температурных флуктуации при разных комплектациях

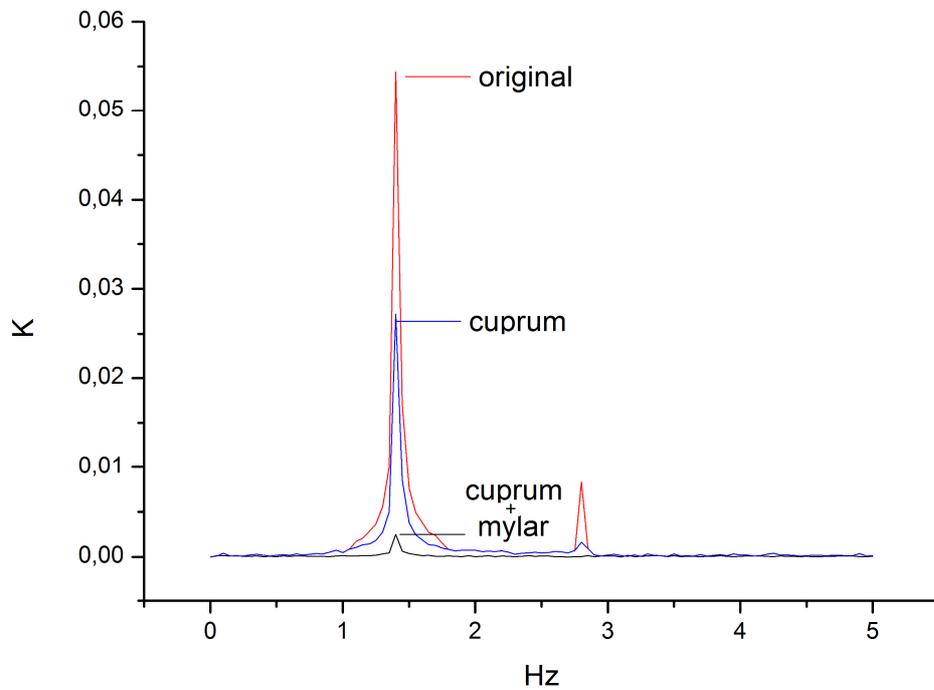


Рис. 4 Спектр температурных флуктуаций при разных комплектациях

Эксперимент 1. На второй ступени (4К) рефрижератора диаметром 94 мм, устанавливался термодатчик. Время выхода системы на режим на «холостом ходу», т.е. без нагрузки составило 60 мин. Спектр колебаний температуры при работающей системе (Рис. 4), пики на графике -флуктуации синхронные с работой охладителя. На частоте 1,4Гц уровень достигает 0,054К. Диапазон колебаний температуры при усреднении составил 0,07К. Вместе с тем очевидно, что временные реализации картины определяются инерционностью всей системы, и доказательство реальности факта воспроизведения приведенных флуктуаций непосредственно на СИС-переходе, размещенном внутри смесителя, обладающего своей тепловой инерционностью, является лишь приведенная выше картина флуктуаций тока СИС смесителя синхронного с представленными здесь тепловыми флуктуациями головки охладителя, жестко коррелированными с работой пульсационной трубы охладителя. Здесь важно обратить внимание, что благодаря возможности разнесения на значительное расстояние охладителя и компрессора, (последний, представляя собой двигатель мощностью 7 КВА, является на порядки более мощными источниками вибраций и температурных воздействий), в работе исследованы самые тонкие эффекты в работе охладителя. Но для миссии Миллиметрон следует помнить об ограниченности пространства в условиях космического корабля и необходимости учета и влияния компрессора на режим работы приемников и всей оптики космической обсерватории.

Эксперимент 2. На вторую ступень охладителя устанавливается медный цилиндр диаметром 94 мм и высотой 40 мм. Сверху на неё крепится термодатчик. Время выхода системы на режим, с медной демпфирующей вставкой весом 2,6 кг. составило 83 мин. На той же частоте 1,4Гц уровень температурных флуктуаций достигает 0,025К. Так же наблюдался всплеск на частоте второй гармоники 2,8 Гц. Диапазон колебаний температуры при усреднении составил 0,06К. В терминах представленной выше электрической аналогии в данном эксперименте не реализован классический **RC** фильтр, а

лишь чистая буферная ёмкость, повысившая инерционность и отчасти сгладившая флуктуации.

Эксперимент 3. Фактическая реализация полного *RC* фильтра. Между второй ступенью охладителя и медной демпфирующей вставкой поместили плёнку из майлара толщиной 8 мкм, крепление конструкции *RC* фильтра также выполнено термоизолирующим крепежом, как и в предыдущих тестах сверху медной вставки установлен температурный датчик. Время выхода на режим, с медной вставкой и плёнкой майлара составило 83 мин. По существу это и есть цена достигнутой стабилизации – увеличение времени выхода на режим за счет дополнительного теплового сопротивления. Достигнутый эффект - диапазон колебаний температуры при усреднении составил 0.012 К. Самый большой всплеск от работы охладителя в этой конфигурации достигает лишь 0.0025К. Для сравнения данные всех трёх экспериментов приведены на Рис. 3 и Рис. 4

Как отмечалось выше, весьма существенным негативным фактором при использовании механических холодильников для охлаждения высокочувствительных приемников также являются механические вибрации и связанные с ними микрофонные эффекты. В данной работе не представлены детальные исследования виброакустических характеристик механических охладителей, проведенные совместно с представителями центра гидроакустики ИПФ РАН [11]. Однако, эти исследования были выполнены и позволили надежно идентифицировать полученные флуктуационные эффекты именно как тепловые, а не микрофонные.

3. Анализ полученных данных

По полученным данным было посчитано ослабление амплитуды температурных колебаний. Представленные усовершенствования конструкции криостата можно представить аналогом температурного фильтра низких частот. На основании этой модели и данных эксперимента были теоретически выведены предположительные частота среза для двух экспериментов относительно исходной комплектации: для медной вставки в районе: 1,28 Гц, для медной вставки с майларовой плёнкой: 0,33 Гц. На Рис. 5 представлена

температурно –частотная характеристика ТЧХ (аналог АЧХ) для описанных выше двух случаев. Ослабление температурных осцилляций представлено в Таблице 1.

Таблица 1.

Частота(Гц)	1,41167	2,82361
Вставка (дБ)	-3,34454	-7,14665
Вставка+ майлар (дБ)	-13,3445	-26,80942

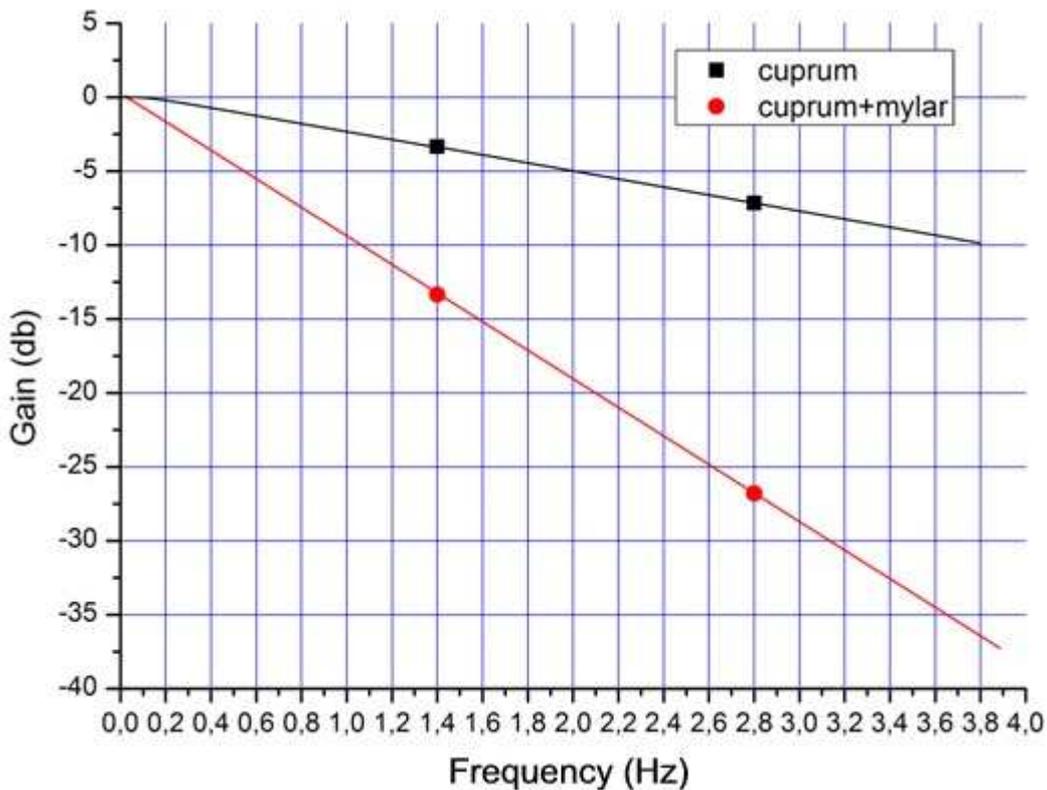


Рис 5. Амплитудно-частотная характеристика для разной комплектации.

Полученные значения температурных флуктуаций позволяют реализовать на практике высокоэффективную и стабильную систему охлаждения сверхпроводникового приемника ТГц излучения, обладающего самой высокой чувствительностью для долговременных лабораторных и природных наземных применений. При этом значения температурных флуктуаций стали заметно ниже флуктуационного порога чувствительности, что и являлось пределом

обоснованного снижения температурных флуктуаций. Представленные в работе соображения будут полезны для разработчиков криостатируемой аппаратуры обсерватории Миллиметрон в части формирования криодизайна системы охлаждения на основе рефрижераторов замкнутого цикла с использованием системы активной газовой термостабилизации на основе буферной стабилизирующей емкости ограниченного объема при контролируемом давлении и работе криорефрижераторов в режиме ожижителя. Такого рода режим обеспечит и дополнительное преимущество сохранение стабильности температуры инструментария в условиях медленных изменений теплового режима обсерватории. Среди них: эволюции спутника относительно Земли и Солнца в полете, меняющие засветку элементов обсерватории, переходные процессы при включении/выключении отдельных элементов приемного комплекса и, наконец, обеспечение финального участка захлаживания антенны и приборов на этапе, когда эффективность радиационного охлаждения становится низкой (ниже $\sim 30\text{K}$).

Заключение

Изучены температурные флуктуации холодной головки криорефрижератора замкнутого цикла на основе пульсационной трубы. Они представляют собой для конкретной исследованной конфигурации системы— осцилляции с амплитудой $0,054\text{K}$ и частотой 1.4Гц (частота работы пульсационной трубы). Использование метода инерционной термостабилизации позволяет, как показано теоретически и подтверждено экспериментально, сгладить флуктуации в ~ 20 раз на частоте работы охладителя. Можно сделать вывод об эффективности принятых решений в части пассивной стабилизации температурных флуктуаций.

Также рассмотрены подходы по реализации активных (электронных и газовых) способов термостабилизации, сформулированы соображения для конструирования активной системы охлаждения инструментария космической обсерватории Миллиметрон.

Благодарности

Авторы признательны коллегам из Oxford Instruments, центра Гидроакустики ИПФ РАН, а также сотруднику ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН М.А.Тарасову за полезные дискуссии и помощь в выполнении экспериментов. Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования по постановлению №220 от 24 ноября 2010 г. Проект № 11.G34.31.0029, а также гранта МОН по госзаданию НГТУ 3.2054.2014/К.

Литература

1. “A two-frequency two-polarization superconducting receiver for radio-astronomical investigations in the millimetric wave band” Vdovin V.F., Eliseev A.I., Zinchenko I.I., Koshelets V.P., Kuznetsov I.V., Lapkin I.V., Mujunen A., Oinaskallio E., Peltonen J., Pilipenko O.M., Urpo S., Filippenko L.V., Shitov S.V., Shtanyuk A.M., "Journal of Communications Technology and Electronics" Vol. 50. 9. 2005. P. 1118-1122
2. HCL and Clo in activated arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra De Lange A., De Lange G., Selig A., Landgraf J., Birk M., Vogt P., Wagner G., Kiselev O., Koshelets V., Friedl-Vallon F., Maucher G., Oelhaf H. Atmospheric Measurement Techniques . Vol. 5. № 2 . 2012. P. 487-500.
3. “Herschel Space Observatory mission overview” Goran L. Pilbratt Proc. SPIE 4850, IR Space Telescopes and Instruments, 586 (March 4, 2003)
4. “Cosmological parameters from the first results of Boomerang” A. E. Lange et al. Phys. Rev. D 63, 042001 – Published 19 January 2001
5. Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмиллиметрового диапазона длин волн для атмосферных исследований Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., Дмитриев

- П.Н., Ермаков А.Б., Киселёв О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В., Ягубов П.А. "Известия высших учебных заведений. Радиофизика" Том 50, № 10-11, 2007 С. 935-940
6. "Development of high efficiency pulse tube cryocoolers for space-borne infrared applications" Haizheng Dang; Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies II, edited by Cunlin Zhang, Xi-Cheng Zhang, He Li, Sheng-Cai Shi, Proc. of SPIE Vol. 8562, 85620K, 2012 SPIE. doi: 10.1117/12.999356; Proc. of SPIE Vol. 8562 85620K-1
 7. Arkhipov M.Yu., Baryshev A.M., Kardashev N.S., et al. Deployable antennas for space radio telescope: radioastron and millimetron missions // Proc. of the 30th ESA Antenna Workshop. Noordwijk, Netherlands, 2008.
 8. Текущий этап разработки приёмного комплекса космической обсерватории «Миллиметрон» Смирнов А.В., Барышев А.М., ДЕ Бернардис П., Вдовин В.Ф., Гольцман Г.Н., Кардашёв Н.С., Кузьмин Л.С., Кошелец В.П., Выставкин А.Н., Лобанов Ю.В., Рябчун С.А., Финкель М.И., Хохлов Д.Р. "Известия высших учебных заведений. Радиофизика" Т. 54, № 8-9, 2011 С. 617-630
 9. International Workshop on "Cryogenic Nanodevices" Simon Mitchinson. Cryogen Free Dilution Refrigerators. The Cryogenic Nanosensors Workshop, Björkliden, Kiruna, Sweden, 17-24.03, 2013, p.15
 10. Торгашин М. Ю. "Разработка и исследование джозефсоновских генераторов терагерцового диапазона на основе распределенных туннельных переходов", автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 2013
 11. A.Artelny, I.Lesnov, M.Torgashin at al. The Cryogenic Nanosensors Workshop, Björkliden, Kiruna, Sweden, 17-24.03, 2013, P.13