

Разработка сканирующего микроволнового радиометра для астрономических и атмосферных исследований

О.С. Большаков, Г.М. Бубнов, А.В. Вдовин, В.Ф. Вдовин, А.А. Гунбина, П.М. Землянуха, А.М. Красильников, И.В. Леснов, М.А. Мансфельд, К.В. Минеев, В.И. Носов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в докладе представлены результаты разработки радиометрического комплекса для астрономических и атмосферных исследований в 3 мм диапазоне длин волн. Радиометр собран на основе малошумящего УВЧ по модуляционной схеме с механическим обтюратором на сверхразмерных квазиоптических волноводах. Для наблюдений в выделенной области небесной сферы приемная система радиометра размещена на двухкоординатном опорно-поворотном устройстве. Управление, сбор и обработка экспериментальных данных осуществляются в удаленном режиме с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

Ключевые слова: радиометр, миллиметровый диапазон, яркостная температура, атмосферное поглощение.

1. Введение

Новый виток интереса мировой общественности к миллиметровой и субмиллиметровой радиоастрономии породил недавний успех коллаборации проекта «Телескоп горизонта событий» (ТГС). В их заглавной статье 2019 года [1] было представлено первое детальное изображение черной дыры и подробно описан процесс его получения на основе большого массива радиоастрономических данных.

На сегодняшний день, команда проекта ТГС находится в поисках перспективных мест для размещения астрономических обсерваторий с целью улучшения качества визуализации наблюдаемых с помощью ТГС космических объектов. В статье [2] проведен обширный анализ спутниковых метеоданных с целью определения потенциально возможных площадок, способных вести наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, в перечне которых фигурирует и плато Суффа, где размещена МРАО «Суффа», принадлежащая российскому Астрокосмическому центру Физического института Академии Наук. Однако не во всех своих оценках авторы статьи приняли во внимание реальные высоты. Например, плато Суффа находится на высоте в 2400 м над уровнем моря, в то время как симуляция была проведена лишь для высот в 2000 м, тем самым авторы косвенно добавили не менее 0,01 Нп дополнительного атмосферного поглощения. Кроме этого, авторы не подкрепили свои результаты реальными измерениями астроклимата на плато Суффа [3], проведенными российскими учеными с помощью двухканального измерителя атмосферного поглощения МИАП-2. В [3] приведены результаты годового наблюдения интегрального влагосодержания в окнах прозрачности вблизи 2 и 3 мм, и дано заключение, что наблюдения в субмиллиметровом диапазоне будут наиболее эффективными с ближайшей от плато Суффа вершины, высота которой достигает около 3 400 м, в то время как для миллиметровых РСДБ-наблюдений достаточно будет модернизации радиотелескопа РТ-70, подведомственному МРАО «Суффа».

Кроме наблюдений на плато Суффа, с помощью МИАП-2 на территории Российской Федерации были проведены несколько циклов измерений параметров

прозрачности атмосферы и получены результаты, открывающие еще несколько перспективных мест для строительства радиотелескопов, способных подключиться к проекту ТГС. Большинство из проведенных измерений были краткосрочными в рамках отдельных экспедиций, поэтому кратковременные наблюдения необходимо было экстраполировать на длительный период и вести речь только о средних ожидаемых значениях поглощения в точке измерений. Для долговременных измерений, направленных на выявление статистических сезонных тенденций изменения прозрачности атмосферы, необходимо создание дополнительных радиометрических средств, способных сохранять стабильные характеристики на приемлемом уровне в течение длительного времени.

2. Флуктуационная чувствительность

Флуктуационная чувствительность радиометра – одна из ключевых характеристик, определяющих точность проводимых измерений. Флуктуационный порог чувствительности реального радиометра, учитывающий аддитивный и мультипликативный шум, можно определить по следующей формуле [4]:

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_N^2 + \Delta T_{FN}^2} = T_N \sqrt{\frac{1}{2\Delta f \cdot \tau} + \left(\frac{\sigma_{FN}}{G_A}\right)^2} \quad (1)$$

где T_N – шумовая температура усилителя, σ_{FN} – СКО фликкер-шума, ΔT_{FN} – порог чувствительности, обусловленный только фликкер-шумом, ΔT_N – порог чувствительности, обусловленный шумовой температурой усилителя, G_A – коэффициент усиления усилителя.

Несмотря на предельную чувствительность радиометра полной мощности (компенсационная схема), флуктуации коэффициента усиления вида $1/f$ вносят во второе слагаемое под корнем существенную неопределенность, резко снижая общий порог чувствительности компенсационной схемы. Пренебречь вкладом σ_{FN} можно лишь в случае регистрации быстропротекающих процессов, когда на коротком промежутке времени параметры измерительной схемы остаются квазистабильными. В случае долговременных наблюдений целесообразно использовать известную модуляционную схему радиометра Р. Дикке [5], которая и была положена в основу построения радиометрического комплекса, структура которого представлена на рисунке 1. Стоит отметить, что в пределе флуктуационная чувствительность модуляционной схемы в $\sqrt{2}$ раз хуже, чем у компенсационного радиометра, однако, такая схема позволяет устранить паразитное влияние фликкер-шума, что при длительном цикле наблюдений оказывается наиболее предпочтительным.

3. Технические решения

Представленный на рисунке 1 радиометрический комплекс построен на коммерчески доступном приемнике прямого усиления РММВ-10-0001 ф. Farran с интегрированным малощумящим усилителем (МШУ) 3 мм диапазона длин волн на входе (приемно-детекторный модуль на схеме). Для астроклиматических задач и астрономических наземных применений на небольшой высоте над уровнем моря целесообразно было отказаться от глубокого криогенного охлаждения в силу ряда причин: во-первых, доминирующий вклад фоновой атмосферы в антенную температуру на миллиметровых волнах часто может оказываться преобладающим, во-вторых, у современных неохлаждаемых 3 мм рНЕМТ МШУ собственная шумовая температура не превышает 450 К во всей полосе от 75 до 110 ГГц, и, в-третьих,

криовакуумное оборудование на порядок увеличивает стоимость разработки и обслуживания измерительного комплекса, что резко ограничивает его мобильность, особенно в условиях альпинистских экспедиций.

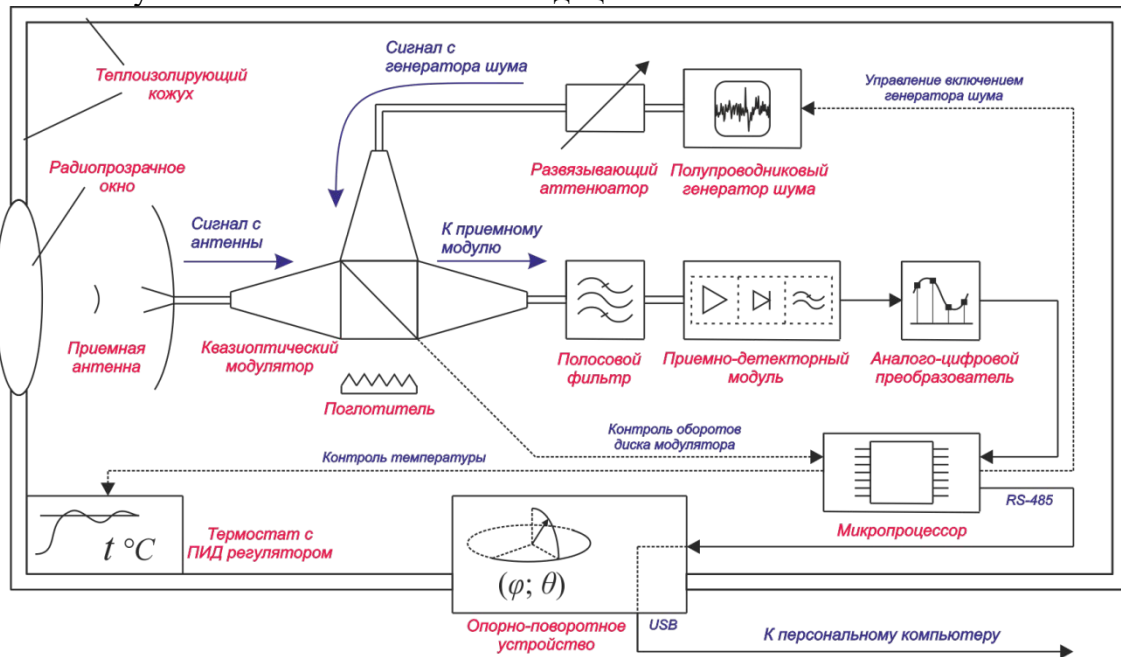


Рисунок 1. Структурная схема радиометрического комплекса

Согласно формуле (1), расчетная пороговая флуктуационная чувствительность такого радиометра при регистрации в полосе $\Delta f = 35$ ГГц с постоянной времени $\tau = 1$ с должна быть не хуже $\Delta T = 2,5$ мК.

Для выделения отдельных полос регистрации на основе метода, описанного в [6], в пакете CST MWS были спроектированы, а затем изготовлены три полосовых волноводных фильтра, частотные характеристики которых приведены на рисунке 2. Результаты измерений полосовых фильтров на панорамном измерителе P2-124 подтвердили заявленные характеристики.

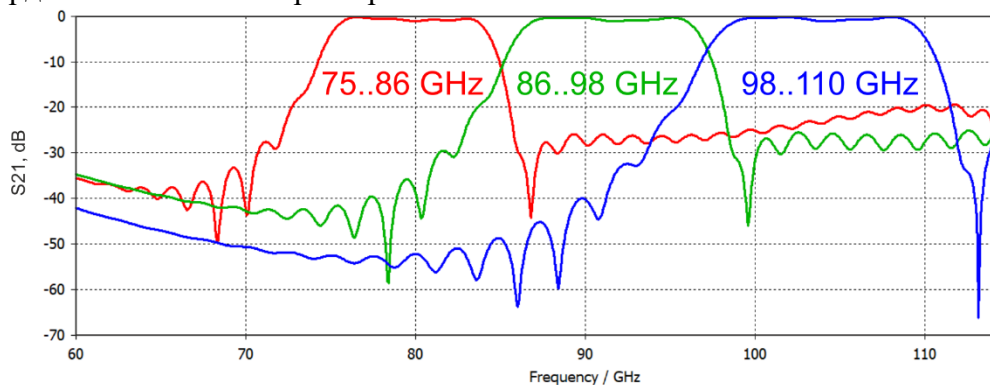


Рисунок 2. Частотные характеристики полосовых фильтров, полученные в CST MWS

В качестве антенной системы использована антенна Кассегрена диаметром 200 мм с диаграммой направленности $\pm 1^\circ$ по уровню -3 дБ. Калибровка радиометра осуществляется по встроенному полупроводниковому генератору шума.

Для поддержания стабильности характеристик измерительной схемы реализована система термостабилизации с принудительной рециркуляцией воздуха внутри всего объема.

Для наблюдения в выделенной области небесной сферы радиометр установлен на опорно-поворотном устройстве, позволяющем проводить полноповоротное

сканирование по азимуту и углу места.

Управление, сбор и обработка экспериментальных данных осуществляются в удаленном режиме с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

Общие фотографии радиометрического комплекса представлены на рисунке 3.

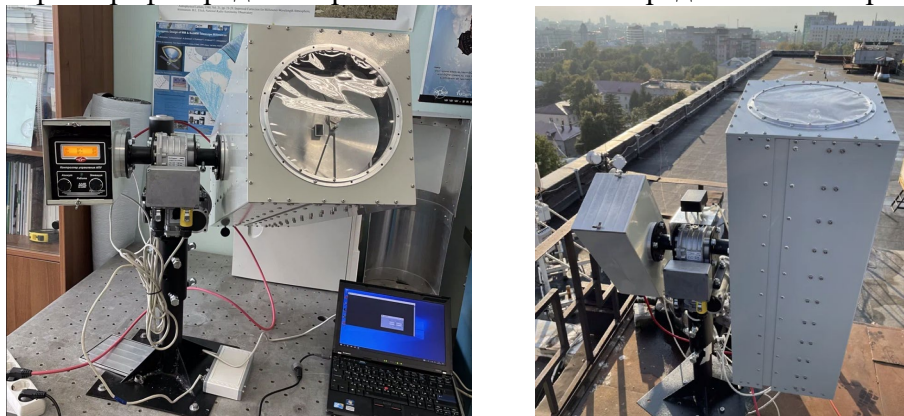


Рисунок 3. Фотографии радиометрического комплекса. Слева – в лаборатории, справа – на крыше Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)

4. Лабораторные испытания

На первом этапе лабораторных испытаний с помощью разработанного радиометрического комплекса в компенсационном режиме были проведены измерения эквивалента чернотельной нагрузки (пенопластовая кювета, наполненная радиопоглощающим материалом), находящейся при комнатной температуре 295 К и температуре жидкого азота 77 К. Графики полученных зависимостей представлены на рисунке 4.

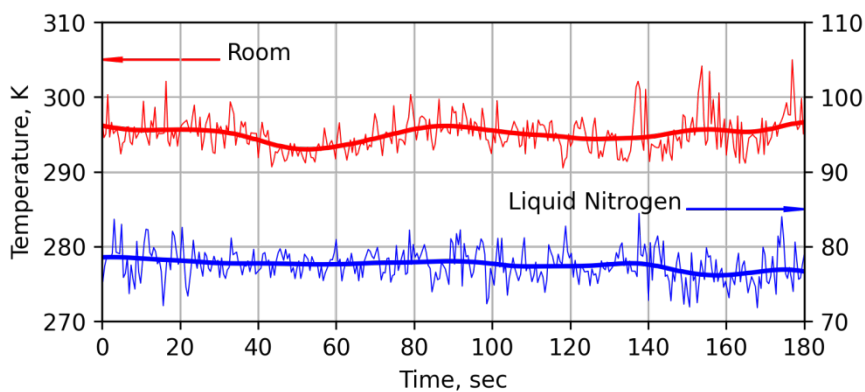


Рисунок 4. Измерения чернотельного источника при комнатной температуре и температуре жидкого азота в условиях лаборатории

Как видно из рисунка 4, параметры приемного тракта значительно флуктуируют. СКО при измерении теплой чернотельной нагрузки с усреднением $\tau = 1$ с составляет $\sigma_{hot} = 2,1$ К, холодной $\sigma_{cold} = 1,4$ К. Использование модуляционного режима должно улучшить данные показатели на 2 порядка.

На рисунке 5 приведены результаты следующего этапа измерений, где использовался штатный модуляционный режим. График показывает зависимость естественного нагревания чернотельной нагрузки с температуры жидкого азота до комнатной температуры за 3 часа наблюдений. В этом случае СКО холодной чернотельной нагрузки уже составило $\sigma_{cold} = 0,09$ К (СКО рассчитано на начальном участке графика).

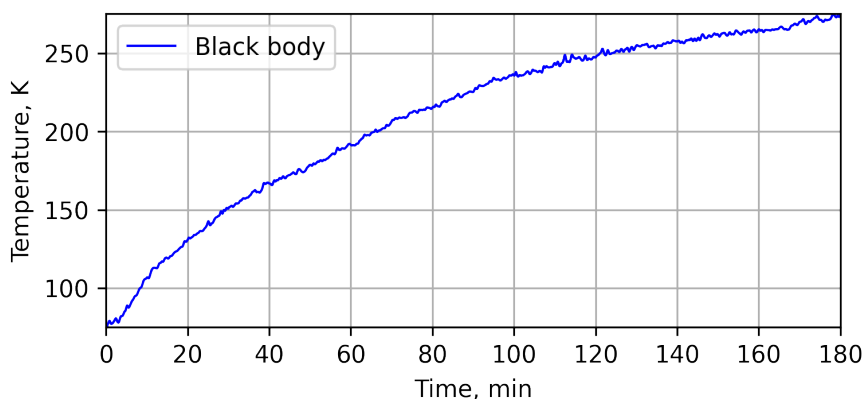


Рисунок 5. Измерение естественного нагревания чернотельного источника с температуры жидкого азота до комнатной температуры в условиях лаборатории

Медленные флуктуации температуры, наблюдаемые при отеплении, могут быть вызваны неравномерным градиентом температуры в объеме чернотельной нагрузки вследствие кипения жидкого азота, конвективных перемешиваний теплых и холодных струй воздуха, а также дополнительным затуханием сигнала на каплях водного конденсата.

5. Заключение

В результате проделанной работы был разработан экспериментальный макет программно-аппаратного комплекса сканирующего микроволнового радиометра 3 мм диапазона длин волн. Радиометр планируется использоваться для определения корректных данных об атмосферном поглощении на территории Российской Федерации и территориях соседствующих государств (Азербайджан, Узбекистан, Таджикистан и Норвегия). Полученные результаты позволят предметно вести разговор о выборе местности для построения миллиметровых и субмиллиметровых радиотелескопов и дальнейшем векторе развития отечественной радиоастрономии, а также об участии РФ в мировых проектах по созданию радиоинтерферометров со сверхдлинной базой.

Работа выполнена в рамках госзадания (тема **0030-2021-0001**).

Список литературы

1. Akiyama K. et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2019. – 875:L4 (52pp)
2. Raymond A.M. et al. Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2021. – 253:5 (17pp)
3. Бубнов Г.М. и др. Результаты наблюдения астроклимата в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн на плато Суффа // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2016. – Т. 59 – № 8. – С. 852.
4. Шарков, Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. / Е. А. Шарков. – Т.1. – М.: ИКИ РАН, 2014. – 544 с.
5. R. Dicke The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // *The review of Scientific Instruments* – 1946. – V.17. – N 7. – pp.268-275.
6. Carlos A. et al. Rebolgar Low-Loss Elliptical Response Filter at 100 GHz // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2012. – V. 22. – N. 9. – pp.459-461