

Техническая реализация субТГц радиометра для исследования астроклимата

В.Ф. Вдовин¹, П.М. Землянуха¹, А.В. Котов¹, И.В. Леснов^{1,2}, А.С. Марухно^{1,3}, К.В. Минеев^{1,2}, В.И. Носов¹, В.А. Сальков^{1,2}, А.А. Швецов¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

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

³ Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Аннотация: В докладе представлены первые технические результаты разрабатываемого в ИПФ РАН портативного субТГц радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности атмосферы 1,3 мм, пригодного для проведения длительного цикла измерений в экспедиционных условиях. Актуальность разработки продиктована потребностью астрономического сообщества в получении прямых оценок атмосферного поглощения в субТГц окнах прозрачности на территории Российской Федерации.

Ключевые слова: радиометр, астроклимат, атмосферное поглощение, окно прозрачности

1. Введение

Стремительное развитие микро и нанoeлектроники продвигает телекоммуникации в субТГц и ТГц диапазоны [1, 2], создаются новые направления в университетах, расширяется номенклатура серийно выпускаемых электронных устройств: генераторов, усилителей, детекторов и т.п. Впрочем, астрономы начали активное освоение данного участка спектра еще со второй половины прошлого века [3], а изобретение интерферометрического метода аппретурного синтеза определило вектор развития радиоастрономии на многие десятилетия вперед.

На сегодняшний день самым крупномасштабным кластером субТГц телескопов, объединенных в единую РСДБ-сеть, является Международный проект «Телескоп горизонта событий» (ТГС), открывший возможность наблюдения тени черной дыры с угловым разрешением, сопоставимым с её горизонтом событий. Первые результаты по исследованию сверхмассивных черных дыр в центрах галактик Мессье 87 и нашего Млечного Пути опубликованы в работах [4, 5]. К настоящему моменту коллаборация ТГС насчитывает около дюжины обсерваторий, расположенных по всему Земному шару, но поиск новых потенциальных площадок не прекращается. Согласно обзору [6] в мире работают десятки субТГц телескопов, но на территории РФ нет подходящего инструмента, способного подключиться к ТГС. Конечно, в научной программе будущей космической обсерватории «Миллиметрон» («Спектр-М») [7] предполагается работа в составе ТГС, но без соответствующего наземного субТГц телескопа российская радиоастрономия объективно отстает от мировых тенденций.

В прошлом докладе [8] мы отмечали, что перспективными для строительства субТГц обсерватории являются горы Кавказа в районах Северной Осетии и Дагестана и окрестности плато Суффа в Узбекистане. Благодаря большому числу ясных дней и низкому уровню осадков интересен склон горы Маяк (2350 м) в окрестности селения Гуниб (Дагестан), где в 2022 году был проведен полугодовой непрерывный цикл измерений [9]. Привлекательно выглядят площадки в Сибири, гора Мус-Хая (2959 м) в Якутии [10] и пик Хулугайша (3015 м) в Саянах, где в мае 2024 г. завершается полугодовой цикл исследований атмосферного поглощения в 3 мм окне прозрачности (рисунок 1), и в соответствии с предобработанными данным можно ожидать поглощение на уровне 0,05 Нп/км, что весьма неплохо. Тем не менее, прямой пересчет

поглощения 3 мм окна прозрачности на востребованные для ТГС окна в 1,3 мм и 0,8 мм, например, через известную рефракционную модель Х. Либе [11], сопряжен с большой и неконтролируемой ошибкой экстраполяции, поэтому единственным надежным и достоверным источником являются прямые измерения. Идеальный вариант – организация измерений с применением сверхпроводниковых болометрических детекторов, имеющих мощность эквивалентного шума (NEP) не более 10^{-17} Вт/Гц^{1/2}, но габаритное и сложное в обслуживании криовакуумное оборудование абсолютно непригодно к условиям горных экспедиций. В связи с этим уже упомянутые успехи современной электроники побудили нас к разработке неохлаждаемого субТГц радиометра, позволяющего проводить оценку атмосферного поглощения непосредственно в окне прозрачности 1,3 мм с перспективой последующей модернизации на 0,8 мм окно. Частично его концепт был представлен в [8], поэтому в настоящем докладе сосредоточимся на описании его ключевых особенностей и заострим внимание на технических деталях приемника и антенной системы.

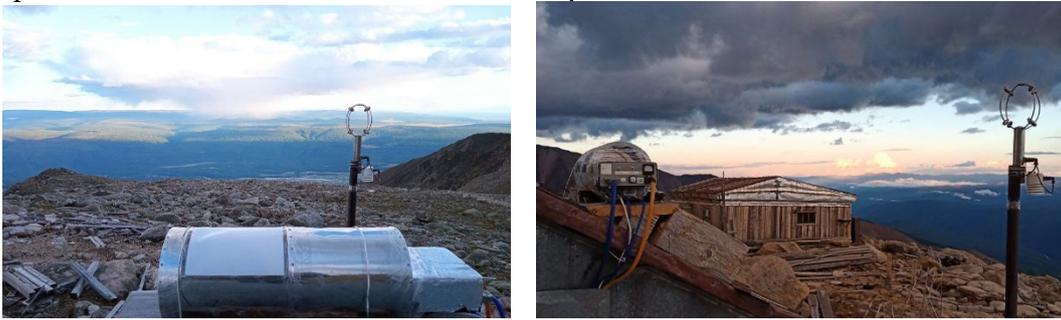


Рисунок 1. Измерения с помощью МИАП-2 на пике Хулугайша (высота 3015 м), площадка Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, цикл 2023-2024 гг.

2. Определение технических требований

Объектом исследования радиометра является собственное излучение (яркостная температура) атмосферы в окне прозрачности 1,3 мм. При использовании частотного диапазона $\Delta F = 50$ ГГц мощность на входе будет в пределах от $P_{\text{вх max}} = -67$ дБм, что эквивалентно антенной температуре $T_A = 300$ К, характерной для плотной облачности и/или высокой влажности, до $P_{\text{вх min}} = -81$ дБм или $T_A = 10$ К, что соответствует почти идеальному (сухому) астроклимату высоко в горах (или на летательном аппарате), поэтому главным требованием, от которого отталкивается дальнейший выбор технических решений, является мобильность прибора и его автономная работа в жестких климатических условиях. Температура на горных вершинах может претерпевать изменения более 30 °С только в течение суток, а за полный годовой сезон от -40 до +40 °С. И не столь критичны температурные изменения, как выпадение конденсата и намерзание инея. Сечение стандартного волновода WR-4.3 в рабочем диапазоне 210-260 ГГц уже настолько мало ($1,092 \times 0,546$ мм), что при наличии даже небольшой влаги затухание кратно возрастает, и полученные результаты наблюдений становятся непригодны для последующей обработки.

Коммерчески доступные субТГц детекторы Шоттки имеют чувствительность 2000 В/Вт на участке от -50 до -20 дБм входной мощности, что в совокупности с дополнительными 2-3 дБ потерями в развязывающих и согласующих устройствах требуют использования не менее трех каскадов усиления. Типовые характеристики малошумящих усилителей (МШУ) в диапазоне 210-260 ГГц: коэффициент усиления $G = 15$ дБ, коэффициент шума $NF = 7-7.5$ дБ.

Диаграмма направленности антенны (ДНА) должна быть достаточно широкой для обеспечения интегрального усреднения локальных неоднородностей атмосферы, но, в то же время, достаточно узкой для эффективного использования близких к уровню

горизонта зенитных углов в методе атмосферных разрезов (в предположении плоскостистой атмосферы). Оптимальным, на наш взгляд, является ширина главного лепестка ДНА в районе $2.5\text{-}3^\circ$ по уровню -3 дБ. Подобные значения закладывались при проектировании радиометра МИАП-2 [12].

Заключительным требованием является высокая транспортабельность, позволяющая альпинисту в одиночку поднять прибор на вершину горы.

3. Приемный тракт радиометра

Для долговременных радиометрических наблюдений предпочтительной является классическая схема модуляционного приемника Дикке, откалиброванного по холодной/горячей нагрузке (чернотельному эквиваленту или электронному эталону) в приближении Релея-Джинса. Такая схема пусть и снижает в $\sqrt{2}$ раз результирующую флуктуационную чувствительность (по сравнению с радиометром полной мощности), но дает возможность исключить неконтролируемый уход коэффициента усиления усилительно-преобразовательной части. Стабильность современных усилительных элементов достаточно высока и не требует организации высокоскоростного переключения между антенной и опорной нагрузкой, что позволяет обойтись простым механическим модулятором с частотой переключения в несколько Гц. Безусловно, электронный вариант переключателя выглядит предпочтительней, но компактного и надежного широкополосного субТГц переключателя с малыми вносимыми потерями, способного долговременно поддерживать стабильные характеристики в сложных климатических условиях, нами найдено не было. Большинство представленных решений имеют ослабление от 3 дБ и выше, что эквивалентно наличию паразитного радиоконтрастного объекта, имеющего яркостную температуру на порядок превышающую яркостную температуру объекта исследования.

Принимая все вышеизложенное во внимание и учитывая наши ранние оценки, схема субТГц радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности $1,3$ мм приобрела вид, представленный на рисунке 2.

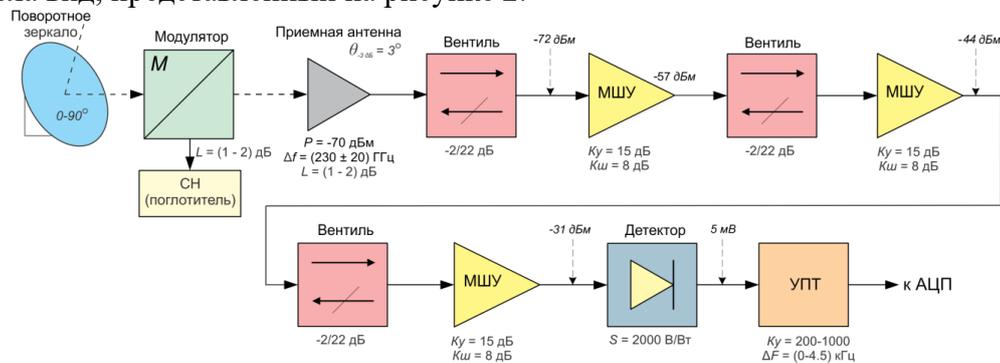


Рисунок 2. Структурная схема субТГц радиометра для исследования астроклимата

4. Антенная система

Несмотря на явные преимущества широко используемых в радиоастрономии двухзеркальных антенн, позволяющих в достаточно ограниченных габаритных размерах сформировать узкую ДНА игольчатого типа, в проектируемом приборе от них было решено отказаться. Если в 3 мм диапазоне длин волн механический модулятор легко реализуется на сверхразмерных волноводах и непосредственно интегрируется в приемный тракт, как было сделано в одной из наших разработок [13], то на длине волны $1,3$ мм подобное решение дополнительно добавит потери в квазиоптическом тракте, соизмеримые с электронным переключателем. Единственный, по нашему мнению, разумный компромисс – это размещение

модулятора снаружи между антенной и поворотным зеркалом, обеспечивающим сканирование по зенитному углу. Наличие области затенения контррефлектора у двухзеркальных антенн в такой компоновке делает их применение неоптимальным.

На первый взгляд, очевидным решением является использование пирамидального или конусообразного рупора, но добиться у обычного рупора требуемой ДНА в разумных габаритах невозможно, поэтому необходимо использование корректирующей линзы (рисунок 3). Простой и удобный вариант с точки зрения изготовления – плосковыпуклая диэлектрическая линза гиперболического профиля. Для расчета эффективного облучения всей поверхности линзы использовалась методика [14], предназначенная для проектирования расфазированных рупоров с изломом. В технике подобные рупоры за счет лучшего коэффициента усиления (на 2-2.5 дБ лучше, чем у пирамидальных рупоров тех же размеров) нашли широкое применение в качестве облучателей главных зеркал, поэтому при расчете геометрии ставилась задача оптимального облучения поверхности линзы заданного диаметра.

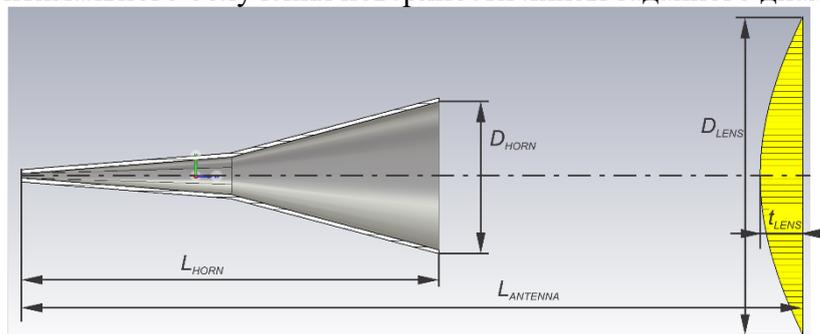


Рисунок 3. Эскиз антенной системы

Было исследовано три варианта исполнения антенны с тефлоновыми линзами толщиной 30, 40 и 60 мм (таблица 1). Их ДНА в обеих плоскостях, полученные в пакете электродинамического моделирования, представлены на рисунке 4. Из соображений миниатюризации конечного изделия был выбран вариант антенны с 30 мм линзой. Просветление линзы выполнено гофрировкой ее границы [15].

Таблица 1. Геометрические параметры антенн (размеры в мм)

D_{LENS}	D_{HORN}	L_{HORN}	$L_{ANTENNA}$	t_{LENS}
30 мм	16,08	45,56	71,53	4,1
40 мм	18,57	52,18	92,37	5,36
60 мм	17,95	35,1	92,88	10,08

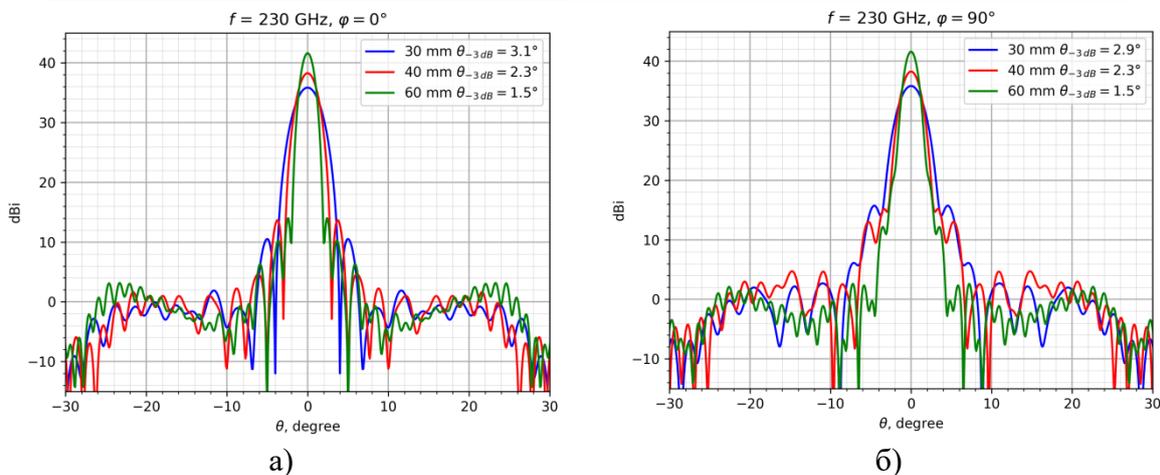


Рисунок 4. Диаграмма направленности антенны в E (а) и H (б) плоскостях

5. Заключение

Пятнадцатилетний опыт использования радиометра МИАП-2 позволяет предусмотреть дополнительный функционал уже на этапе разработки: организация независимой термостабилизации приемника, оснащение мини-метеостанцией, ИК датчиком облачности, широкоугольной камерой, бортовым компьютером сбора данных с постоянным доступом в Интернет для контроля работы в удаленном режиме.

Ответ на ключевой вопрос о величине собственной шумовой температуры радиометра можно будет дать только после цикла лабораторных исследований по завершению. По предварительным оценкам, сделанным на основе измерений имеющихся электронных компонент, шумовая температура не должна превышать 3000 К, что чуть хуже наших предыдущих расчетов [8], но вселяет определенный оптимизм в успешное окончание разработки с последующим проведением серии натуральных испытаний и сравнением полученных результатов с имеющимися.

Работа выполнена в рамках **проекта РФФ №23-79-00006**.

Список литературы

1. D. Shakya et al., Exploring Millimeter-Wave and Terahertz Circuits and Systems With a Novel Multiuser Measurement Facility: Multiuser Terahertz Measurement Facility (THz Lab) // IEEE Microwave Magazine.– 2024.– V. 25, N. 2.– P. 68-79
2. Rappaport T. S. et al. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond // IEEE Access. – 2019. – V.7. – P. 78729-78757
3. Уилсон Т.Л., Рольфс К., Хюттемейстер С. Инструменты и методы радиоастрономии. Перевод с англ. под ред. С.А. Трушкина. – 5-е издание. – М. ФИЗМАТЛИТ.– 2012. – 567 с.
4. The Event Horizon Telescope Collaboration et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole// The Astrophysical Journal Letters. – 2019.– 875:L4.– 52 pp.
5. The Event Horizon Telescope Collaboration et al. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way // The Astrophysical Journal Letters.– 2022.– 930:L12.– 21 pp.
6. Raymond A.M. et al. Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2021. – 253:5.– 17 pp.
7. Новиков И.Д. и др. Задачи научной программы космической обсерватории Миллиметром // Успехи физических наук. – 2021.– Т. 191, №4 .– С. 404–443
8. Большаков О.С. и др. Разработка радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности 1,3 мм // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – 2023. – С. 72-76
9. Вдовин В. Ф., Марухно А. С. Перспективы строительства субтерагерцового радиотелескопа на Северном Кавказе // Сборник научных трудов XI Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», пос. Нижний Архыз, Россия. – 2022. – С. 381-383
10. Bubnov G. M. et al. Search for New Sites for THz Observations in Eurasia // The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, Moscow, Russia. – 2014. – P. 76
11. Liebe, H.J. MPM – An atmospheric millimeter-wave propagation model. // Int J Infrared Milli Waves.– 1989.– V. 10.– P. 631–650
12. Носов В. И. и др. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №. 3. – С. 49–56.
13. Большаков О.С. и др. Мобильный полноповоротный радиометрический комплекс для астрономических и атмосферных исследований // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 1. – С. 112–119
14. Тимофеева А.А. Определение геометрических размеров рупорных облучателей с диаграммами направленности близкими к оптимальным // Электросвязь.– 1977.– №5.– С. 28-33
15. Власов С.Н., Копосова Е.В. Просветление раздела диэлектриков гофрированием их грани // Журнал технической физики. – 1993. – Т.63, №7.– С. 123-130