

Разработка радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности 1,3 мм

О.С. Большаков¹, В.Ф. Вдовин¹, А.А. Гунбина¹, П.М. Землянуха¹, И.В. Леснов^{1,2}, А.С. Марухно^{1,3}, К.В. Минеев^{1,2}, В.И. Носов¹, В.А. Сальков²

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

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

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Аннотация: В связи обширным интересом радиоастрономии и телекоммуникаций нового поколения к освоению субтерагерцового диапазона и отсутствием верифицированной информации из прямых измерений атмосферного поглощения на длинах волн 1,3 мм и короче на перспективных площадках восточной части Северного полушария в ИПФ РАН ведется разработка портативного радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности атмосферы 1,3 мм, пригодного для проведения длительного цикла измерений в экспедиционных условиях. Обоснована актуальность разработки, приведена структурная схема радиометра с описанием используемых технических решений, сделана оценка шумовых характеристик и флуктуационной чувствительности, выполнен подбор основных компонент элементной базы.

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

1. Введение

На протяжении последних 12 лет исследовательская группа Института прикладной физики РАН в кооперации с ведущими научными учреждениями РФ (АКЦ ФИАН, САО РАН, Радиобсерватория РТ-70, НГТУ им. Р.Е. Алексеева и др.) проводит прямые измерения атмосферного поглощения в субтерагерцовых (субТГц) окнах прозрачности (окна 3 и 2 мм). В качестве основного инструмента используется измеритель атмосферного поглощения МИАП-2 [1], созданный в двух экземплярах в ИПФ РАН при поддержке ЗАО ГИКОМ, представляющий собой переносной двухканальный радиометрический комплекс, способный в автономном режиме вести наблюдения в различных погодных условиях (рисунок 1). География проводимых исследований не ограничивается только территорией РФ и охватывает соседствующие государства от Узбекистана до архипелага Шпицберген [2]. На основе накопленных данных о сезонных изменениях качества астроклимата были выявлены наиболее перспективные площадки для установки субтерагерцовой антенны, в том числе пригодной для астрономических наблюдений в окне прозрачности Телескопа Горизонта Событий вблизи 230 ГГц [3], а также для ее использования в дальней космической связи и радиолокации, активно продвигающихся в субТГц диапазон.

Согласно нашим исследованиям, перспективными площадками для строительства субТГц радиотелескопа являются горы Кавказа в районах Северной Осетии и Дагестана и окрестности плато Суффа в Узбекистане.

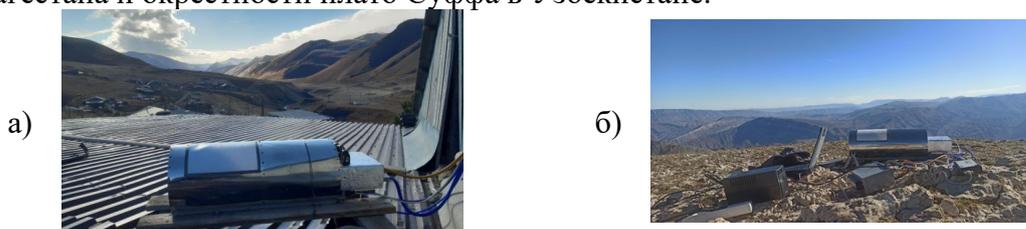


Рисунок 1. Измерение атмосферного поглощения с помощью МИАП-2: а) Дагестан, поселок Чираг, высота 2270 м, б) Дагестан, поселок Гуниб, гора Маяк, высота 2350 м

Благодаря большому числу ясных дней и низкому уровню осадков весьма перспективен даже склон горы Маяк (высота около 2350 м) в окрестности селения Гуниб (Дагестан), где в 2022 году был проведен полугодовой непрерывный цикл измерений [4]. Есть несомненный интерес и к некоторым площадкам в Сибири (Мус-Хая в Якутии и Хулугайша в Саянах) [5].

К сожалению, прямой экстраполяционный пересчет значений атмосферного поглощения, измеренных в 3 и 2 мм окнах прозрачности, несет значительную и непредсказуемую ошибку, что не позволяет в полной мере оценить потенциальные возможности площадки в окне 1,3 мм. В связи с отсутствием верифицированной информации об атмосферном поглощении в окне прозрачности 1,3 мм на территории РФ и восточной части Северного полушария (Узбекистан, Таджикистан, Азербайджан, Иран и Армения) начата разработка портативного радиометра для исследования статистических сезонных тенденций изменения прозрачности атмосферы непосредственно на длине волны 1,3 мм, способного сохранять стабильные характеристики в течение длительного времени и пригодного для долговременных экспедиционных измерений (не менее полугода).

2. Постановка задачи

Объектом исследования создаваемого радиометра является собственное излучение (яркостная температура) атмосферы в окрестности частоты $f_0 = 230$ ГГц. Оптимальное значение ширины диаграммы направленности антенны по уровню -3 дБ должно находиться в районе 5° , что будет обеспечивать интегральное усреднение локальных неоднородностей атмосферы, но в то же время позволит выделить интересующий участок наблюдения области неба и эффективно использовать близкие к уровню горизонта углы.

Для обеспечения возможности определения вертикального поглощения атмосферы не только по методу абсолютной калибровки [6] в предположении плоскостной биэкспоненциальной атмосферы, но и по методу атмосферных разрезов [7], необходимо сканирование по углу места от 0° до 90° . Для снижения систематической ошибки за счет исключения теплового излучения соседствующих с f_0 полос поглощения водяного пара частотную полосу приема необходимо ограничить до $\Delta f = 10$ ГГц. Таким образом, максимальный диапазон мощностей на входе радиометра будет находиться в пределах от -94 дБм (мощность излучения реликтового фона с $T_{\text{я}} = 2,7$ К) до -74 дБм (окружающий воздух с $T_{\text{я}} = 300$ К). На волне 1,3 мм можно ограничиться диапазоном измеряемых яркостных температур от 7-10 К, что соответствует почти идеальному (сухому) астроклимату высоко в горах (или на летательном аппарате – самолет, аэростат), до 100-200 К, характерных для умеренной облачности. Разумеется, зачастую яркостная температура на 1,3 мм будет достигать и 300 К, характерных для плотной облачности и/или высокой влажности.

3. Выбор схемотехнического решения

Близким по техническим характеристикам является радиометр RPG-TAU-225 [8] (Radiometer Physics, Германия), работающий на 225 ГГц по гетеродинной схеме с 4 ГГц полосой ПЧ. Производители заявляют, что его шумовая температура менее 1400 К, что в указанном частотном диапазоне выглядят вполне оптимистично. Однако, на наш взгляд, в техническом описании они обозначили скорее теоретический предел, чем реальное значение собственной шумовой температуры, полученное в ходе прямых измерений. Оно до нескольких раз может отличаться за счет нестабильности коэффициента усиления усилительно-преобразовательной секции и иных неучтенных факторов. Тем не менее, указанный выше параметр был взят за основу разработки схемотехнического решения. Важно подчеркнуть, что RPG-TAU-225 хорошо работает

в составе уже построенных обсерваторий для мониторинга текущего состояния астроклимата, но не является мобильным и тем более полевым решением. Создаваемый нами прибор, в первую очередь, предназначен для работы в экспедиционных условиях на перспективных площадках, где, как правило, ничего нет, включая подвода электроэнергии.

Приняв во внимание мировой прогресс в изготовлении маломощных усилителей (МШУ), детекторов и других узлов, было принято решение о реализации в радиометре приемного тракта прямого усиления, аналогичного 3 мм каналу МИАП-2. Анализ рынка доступных к заказу микроволновых модулей 210-260 ГГц в I квартале 2023 года показал следующие предельные характеристики: коэффициент шума МШУ – 6 дБ при усилении в 20 дБ; возвратные потери вентиля – 2 дБ при развязке 20 дБ; чувствительность детекторов – 2000 В/Вт при входной мощности от -50 до -20 дБм.

Исходя из допустимого уровня мощности на входе детектора, приемный тракт радиометра должен содержать не менее трех каскадов усиления при условии, что выделение рабочей полосы частот $\Delta f = 10$ ГГц будет производиться после второго каскада. При этом максимальную мощность на входе радиометра необходимо рассчитывать для всей полосы частот первого МШУ $\Delta F = 50$ ГГц, которая для антенной температуры $T_A = 300$ К составит $P_{вх} = -67$ дБм.

Известно, что предельной чувствительностью обладают схемы радиометров полной мощности (компенсационные радиометры), но их нестабильность вносит существенную неопределенность, значительно снижая общую флуктуационную чувствительность. Для долговременных наблюдений целесообразно реализовать модуляционный радиометр по схеме Дикке [9], чувствительность которого в пределе хоть и в $\sqrt{2}$ раз хуже компенсационного, но модуляционный режим позволяет устранить паразитное влияние температурной нестабильности коэффициента передачи и фликкер-шум, что в длительном цикле оказывается предпочтительным и не требует экстраординарных усилий по термостабилизации приемного тракта.

Низкочастотная часть после детектора может быть построена по любой схеме с прецизионным усилителем постоянного тока и аналого-цифровым преобразованием. Цифровая обработка позволяет не только отказаться от классической аналоговой схемы синхронного детектирования, которые широко использовались в модуляционных радиометрах до появления высокоскоростных АЦП, но и передать функцию интегрирования математическому алгоритму программы обработки.

В качестве модулятора предполагается использование механического обтюлятора, реализованного на сверхразмерных волноводах и интегрированного между рупорной антенной и приемным трактом, аналогично радиометру предыдущей нашей разработки [10], но с тем отличием, что в качестве опорного источника яркостной температуры рассматривается термостабилизированная согласованная нагрузка, а не электронный генератор шума. Общая структурная схема радиометра приведена на рисунке 2.

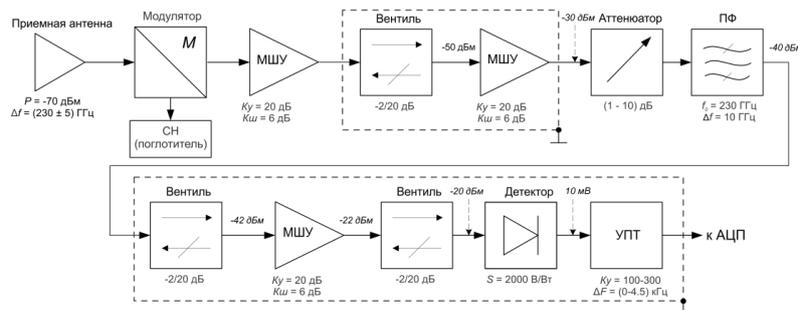


Рисунок 2. Общая структурная схема радиометра

Важные структурные новшества по сравнению с приборами, созданными более 12

лет назад, предлагаются и в части цифровой обработки. Современные нейросетевые алгоритмы [11, 12] и самообучающиеся методы позволят не только эффективно извлекать информацию из зашумленного сигнала и помех, но и по набору метео и видео данных, собираемых прибором одновременно с прямыми измерениями яркостной температуры неба, восстанавливать наиболее вероятную картину атмосферного поглощения в выпавшие по тем или иным причинам периоды. Среди которых, по опыту эксплуатации приборов МИАП-2, можно назвать и отключение электричества, и сбой в работе в механики, и своевременно неубранный с радиопрозрачного кожуха снег.

Для обеспечения сбора дополнительных данных прибор будет оснащен мини-метеостанцией, ИК датчиком облачности, подогреваемым термостабилизатором и бортовым компьютером для сбора данных с постоянным доступом в Интернет для контроля работы в удаленном режиме. Частично эти технологии уже привнесены в МИАП-2 в виде текущих доработок, частично будут разработаны заново.

4. Оценка основных технических параметров

В соответствии с формулой Фрииса эквивалентная шумовая температура радиометра, приведенная к входу приемника (до модулятора), составила $T_{ш} < 900$ К, что соответствует предельной флуктуационной чувствительности $\Delta T = 0,01$ К при времени усреднения $\tau = 1$ с. Если оценить общие потери в модуляторе и приемной антенне в 2 дБ, тогда $T_{ш} = 1600$ К, а $\Delta T = 0,02$ К при том же времени усреднения.

Предполагается, что из трех возможных вариантов МШУ в качестве первого каскада будет выбран усилитель, обладающий наилучшими характеристиками и достаточной развязкой входа и выхода, чтобы исключить наличие перед ним вентиля. В противном случае, дополнительные 2 дБ потерь в вентиле ухудшают общую шумовую температуру схемы до 2600 К, что ставит под вопрос целесообразность выбранного схемотехнического решения по сравнению с гетеродинным приемником.

5. Заключение

По завершению разработки радиометра для исследования астроклимата в окне прозрачности 1,3 мм планируется серия тестовых экспедиций для сравнения новых результатов с уже полученными ранее с помощью двух МИАП-2.

Создаваемый прибор кроме радиоастрономических приложений может найти широкое применение в решении задач оценки местности при построении систем беспроводной субТГц связи поколения 6G [13, 14], где существенное затухание сигнала в атмосфере играет немаловажную роль. Исследованию этой проблемы посвящено большое число наших публикаций, результаты которых обобщены в работах [15] и [16], а также других научных коллективов, среди которых необходимо выделить работы [17], где в лабораторных условиях оценивалось влияние осадков, и [18], где приводятся результаты многолетних исследований распространения субТГц волн в условиях плотной городской застройки. Нельзя не отметить и обширные не прямые исследования: дистанционные зондирование со спутника, измерения с тропосферных зондов, метод тропосферных задержек по сигналам GNSS и оценка с помощью моделирования параметров атмосферы [19, 20]. Сопоставление прямых измерений, для которых и создается прибор, позволит верифицировать эти данные и обеспечит их корректное использование для оценки возможностей тех или иных площадок. Выводы, сделанные нами по результатам исследований, находятся в полном соответствии с выводами других авторов: субТГц диапазон крайне перспективен не только для радиоастрономии, но и для создания каналов радиосвязи.

Один из классиков 5G и основоположников 6G (7G) коммуникаций Т.С. Раппапорт вместе со своими коллегами в обзоре [21] прогнозирует повсеместное

внедрение беспроводных систем субТГц и ТГц диапазона в период с 2025 по 2035 год и предполагает их активное применение для различных хозяйственных сфер, включая высокоскоростную компьютерную и сотовую 6G и выше связь, роботизированное управление, беспилотный транспорт, системы голографии и виртуальной реальности высокого разрешения, а также навигационные и радиолокационные приложения.

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

Список литературы

1. Носов В. И. и др. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – №. 3. – С. 49–56.
2. Bubnov G. M. et al. Analysis of the Millimeter-Band Astroclimate at the Caucasus Mountain Observatory // Conference: Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century. – 2020. – V. 1. – P. 184–188.
3. Farah J. et al. Selective Dynamical Imaging of Interferometric Data // The Astrophysical Journal Letters. – 2022. – 930:L18 (21 pp.).
4. 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
5. 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.
6. Кисляков А.Г. и др. Эффективная температура космического реликтового излучения на волне 3,58 мм // Астрономический журнал. – 1971. – Т.48. – Вып. 1. – С. 39.
7. Кисляков А.Г. Об измерении поглощения радиоволн в атмосфере по ее тепловому излучению // Радиотехника и электроника. – 1968. – Т.13. – №7. – С. 1161.
8. <https://www.radiometer-physics.de/> (дата обращения: 02.04.2023 г.).
9. Dicke R. The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // The review of Scientific Instruments. – 1946. – V.17. – № 7. – P. 268-275.
10. Большаков О. С. и др. Мобильный полноповоротный радиометрический комплекс для астрономических и атмосферных исследований // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 1. – С. 112-119.
11. Пирогов Л. Е., Замлянуха П.М. Использование метода главных компонент для оценки параметров плотного ядра L1287 при вписывании модельных спектральных карт в наблюдаемые // Астрономический журнал. – 2021. – Т. 98. – № 2. – С 102-115.
12. Bubnov G. el al. Machine learning methods for Precipitable Water Vapor estimation by radiometric data in millimetre wavelength // Journal of Physics: Conference Series (6th International Conference on Metamaterials and Nanophotonics METANANO 2021). – 2021. – . 2015 012024 (6 pp.).
13. Petrov V., Kurner T., Hosako I. IEEE 802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G // IEEE Communications Magazine. – V. 58. – N. 11. – P. 28-33.
14. Standard IEEE 802.15.3d-2017.
15. Балега Ю. Ю. и др. Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 502. – № 1. – С. 5-9.
16. Balega Y. et al. Atmospheric Propagation Studies and Development of New Instrumentation for Astronomy, Radar, and Telecommunication Applications in the Subterahertz Frequency Range // Applied Sciences. – 2022. – 12:5670 (17 pp.).
17. Ma J. et al. Channel performance for indoor and outdoor terahertz wireless links // APL Photon. 3. – 2018. – 051601 (28 pp.).
18. Xing Y., Rappaport T. S. Millimeter Wave and Terahertz Urban Microcell Propagation Measurements and Models // IEEE Communications Letters. – 2021. – V. 25. – N. 12. – P. 3755-3759.
19. 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).
20. Шиховцев А.Ю. и др. Статистический анализ содержания водяного пара на Северном Кавказе и в Крыму // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. – № 1 (396) . – С. 67-73.
21. 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.