

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.9>

УДК: 520.27, 520.22

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В СУБТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ НА ОПТИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА

В.Ф. Вдовин^{2,1}, А.М. Красильников^{1,2}, Д.Е. Кукушкин¹, М.А. Мансфельд²,
А.С. Марухно^{1,2}, В.А. Столяров¹, М.А. Тарасов³, А.М. Чекушкин³,
Р.А. Юсупов³, М.В. Юшкин¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
369167, Карачаево-Черкесия, п. Нижний Архыз

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

³ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2025

Аннотация. Основной целью представленной работы является экспериментальное доказательство гипотезы, что радиоастрономические наблюдения на оптическом телескопе в субтерагерцовом диапазоне частот, доказанной теоретически и в лабораторном эксперименте, защищенное патентом, держателем которого являются организации – соавторы данной статьи. Использовался наиболее убедительный метод – эксперимент, в рамках которого приемник субтерагерцового диапазона частот был согласован с оптической схемой оптического 6-метрового телескопа БТА САО и наведен на Луну. В результате эксперимента, выполненного 2 ноября 2025 года гипотеза получила подтверждение. Сигнал от Луны был получен при помощи неохлаждаемого детектора, имеющего на порядки худшую чувствительность, чем сверхпроводниковый СИНИС-приемник 3 мм диапазона, в рамках подготовки к измерениям на котором и выполняется проект.

Ключевые слова: субтерагерцовые волны, радиотелескоп, квазиоптика, сверхпроводящий приемник, радиоастрономические наблюдения, толщина скин-слоя.

Финансирование: проект РНФ 23-62-10013

Автор для переписки: Тарасов Михаил Александрович, tarasov@hitech.cplire.ru

Введение

В последние десятилетия активно развивается радиоастрономия субтерагерцовой (0.1-1.0 ТГц) диапазона частот [1,2]. Телескоп горизонта событий (ТГС, ЕНТ) [3] стал самым известным на сегодня в мире глобальным интерферометром субтерагерцового (суб-ТГц) диапазона частот. В мире уже построены десятки обсерваторий оснащенных более чем сотней радиотелескопов этого диапазона, требование к качеству которых следуя критерию $СКО < \lambda/30 - 40$ [4] должно быть не хуже 50 микрон на 0.1 ТГц ($\lambda = 3$ мм) и соответственно 5 микрон на волне в 1 ТГц. Карта ТГС [1] демонстрирует крайне плохое покрытие U-V плоскости глобальным интерферометром в северо-восточной части Евразийского континента. Строго говоря антенн требуемого класса с апертурами хотя бы близкими к 10 метров (самый компактный инструмент в сети ТГС – радиотелескоп SPT на полярной шапке Антарктиды [5]) не существует вообще, даже в проектах высокой степени продвижения. Китай анонсировал подобные проекты, но реально их пока нет, в Корее построена своя сеть из трех телескопов, но расположенных на уровне моря, где наблюдения на суб-ТГц волнах крайне проблематичны, и то лишь в двух длинноволновых суб-ТГц окнах прозрачности атмосферы. ТГС работает в окне 1.3 мм и имеет перспективу на волну 0.8 мм. Для этих телескопов нужно как минимум среднегорье (ок. 3 км и выше) и сухой климат. В России ведутся интенсивные поиски подходящих мест и проработки различных проектов как с точки зрения антенн, так и приемников. В САО РАН совместно с двумя партнерскими организациями – ИРЭ РАН и ИПФ РАН выполняется междисциплинарный проект, поддержанный РНФ (проект 23-62-10013),

посвященный задаче создания прототипа суб-ТГц обсерватории на базе оптического телескопа БТА [6]. Идея запатентована [7] авторами проекта и на этапе 2025 года уже выполнен монтаж суб-ТГц приемника, проверка функционирования его основных узлов и в рамках процесса юстировки квазиоптической схемы суб-ТГц приемника и ее инкорпорирование в оптическую схему телескопа БТА был проведен эксперимент, как проверивший правильность расчетов корректирующей оптики и технической возможности юстировки прибора, так и экспериментальной проверки гипотезы пригодности оптического телескопа для радиоастрономических наблюдений на оптическом телескопе. Формально зеркало БТА не является рефлектором для суб-ТГц волн – оно не металлическое, а стеклянное и его алюминиевое покрытие толщиной около 100 нм много тоньше толщины скин-слоя на этих волнах. Разумеется, прежде чем выходить на наблюдения на телескопе были проведены и оценки, и эксперименты с образцами свидетелями, где измерялся коэффициент отражения тонкого алюминия на стекле, напыленного в едином технологическом цикле с главным зеркалом БТА. Но реальный эксперимент существенно значимее любых оценок и лабораторных экспериментов.

1. Характеристики детектора и тестовый стенд

Для оценки приемного тракта и первых тестовых измерений использовался детектор терагерцового излучения на основе ячейки Голя – ОАП (оптоакустический преобразователь). Детектор Голя является одним из наиболее эффективных детекторов терагерцового излучения. Он имеет высокую чувствительность при комнатной температуре и неселективный фотоотклик в широком диапазоне длин волн. Использовался детектор производства ЗАО «Тидекс» [8]. Комплект поставки включает в себя детекторную головку и блок питания. В работе использовалась версия детектора GC-1P (детектор с HDPE окном). Детектор использовался с модулятором (чоппером – вращающийся диск с прорезями напротив окна приемника) (рис. 1), позволяющим модулировать входящий сигнал с частотой от 1 Гц. Детектор использовался без рупора,

диаметр входного конуса 11 мм, диаметр входного окна 6 мм. Типичная заявленная производителем мощность эквивалентная шуму (МЭШ) такого детектора $1,4 \cdot 10^{-10}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, чувствительность 10^5 В/Вт. Данная чувствительность на порядки ниже, чем у охлаждаемых детекторов, но должна быть достаточно для детектирования суб-ТГц сигнала от ярких объектов солнечной системы. Для сужения полосы входного сигнала использовался ИК фильтр – Zitex®.



Рис. 1. Вид детекторной головки Голея с модулятором в работе.

Для детектирования сигнала использовался синхронный детектор, встроенный в программно-измерительный комплекс IRtecon. Сигнал с детектора и опорный сигнал с модулятора оцифровывался через ЦАП-АЦП NI USB 6001. Данная схема измерения позволяет обходиться без отдельного блока синхронного детектора, но накладывает ограничения на быстродействие таких измерений, связанные со скоростью ЦАП/АЦП, медленного канала передачи данных через USB интерфейс 2.0 и скоростью обработки сигнала компьютером. Основные настройки программного синхронного детектора (рис. 2) – это количество точек за один цикл измерений и количество измерений в секунду (параметр, зависящий от используемого АЦП), которые определяют время на измерение одной точки. Считается, что за период одного такого измерения должно произойти несколько

изменений сигнала на частоте его модуляции. Необходимо также отметить, что в такой схеме измерений, измеряемый сигнал – это разница между сигналом от источника и сигналом от лопасти диска. Сигнал при закрытом состоянии модулятора не равен нулю, так как в ТГц диапазоне частот лопасти являются источником излучения, мощность излучения которого пропорциональна температуре (по формуле Планка для ЧТ). Также для детектора Голея сигнал будет зависеть от частоты модуляции, для наших измерений мы использовали рекомендованную частоту модуляции около 15 Гц.

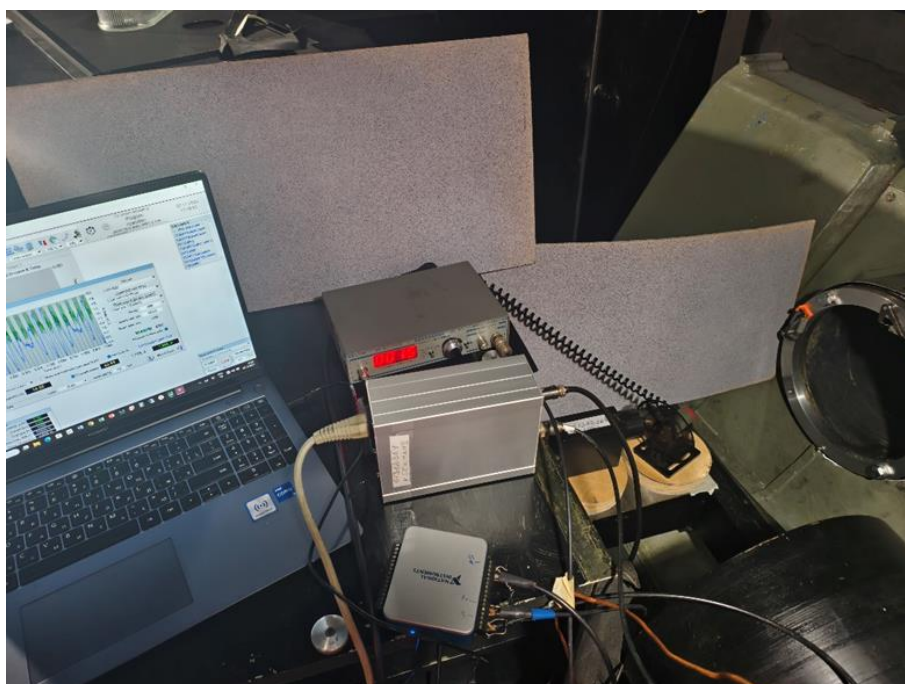


Рис. 2. Фотография экспериментального стенда, развернутого в фокусе Несмита Н1 оптического телескопа БТА САО РАН.

2. Темновые и тестовые измерения

Стенд был собран и первые тестовые измерения были проведены в фокусе Несмита 1 ноября 2025. Как было сказано выше, темновой сигнал при данных измерения больше определяется сигналом от модулятора, который зависит от расстояния до входного конуса и температуры лопастей. Первые измерения проведены до запуска компрессора криостата, и температура в помещении фокуса Несмита была примерно равна температуре подкупольного пространства. Темновой сигнал при таких измерениях составил около 500 ± 20 мкВ.

Для минимизации влияния внешних сигналов, стенд закрывался с боковых сторон листами поглощающего материала – ECCOSORB®. При отклике на внесение в поле зрения детектора руки (рис. 3) был на порядок выше, до уровня 2 мВ.

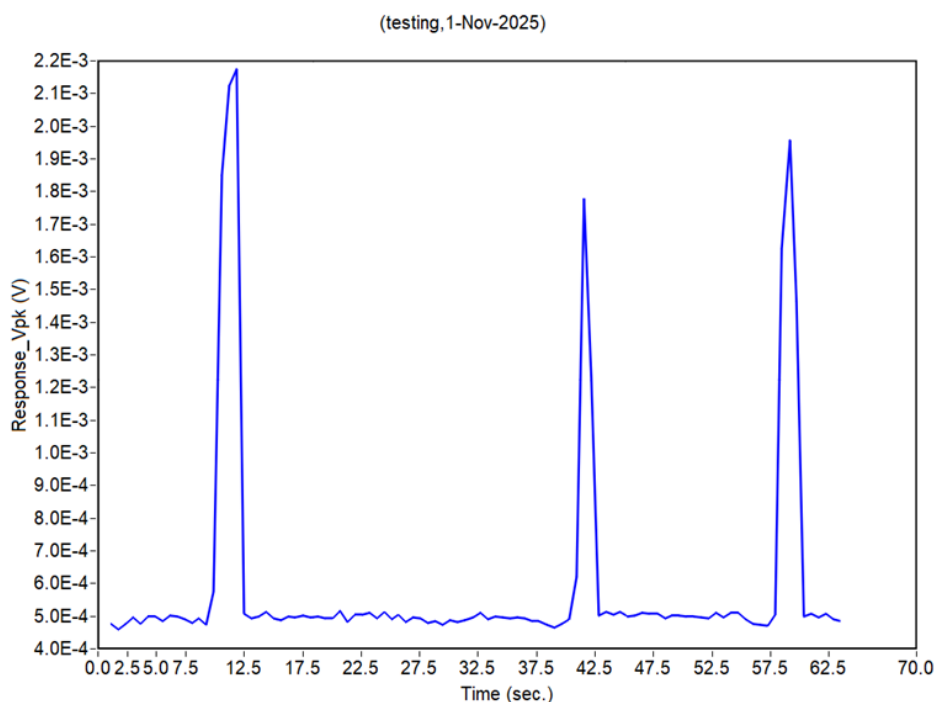


Рис. 3. Темновой сигнал с детектора Голея и сигнал при поднесении руки.

Было измерено пропускание разных вариантов фильтров: ИК фильтры Fluro-Gold, Zitex G106; и полоснопропускающие фильтры в виде полуволновых крестиков на майларе и дуриде, а также медной фольги на частоты 95 ГГц и 220 ГГц, (рис. 4).

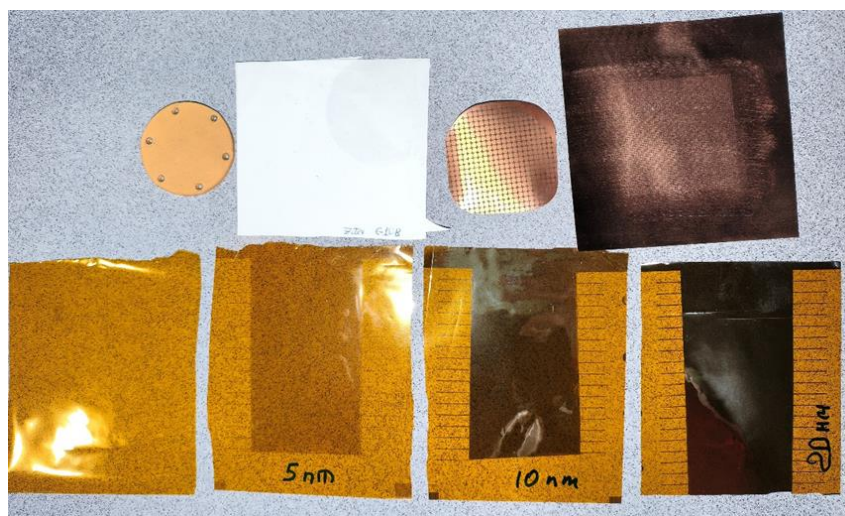


Рис. 4. Вид используемых в работе фильтров (Fluro-Gold, Zitex, 90 ГГц, 220 ГГц) и аттенюаторов на пленках майлара.

3. Измерения сигнала телескопа

Измерения сигнала, поступающего с оптической системы телескопа произведено 2.11.25. Компрессор криостата, охлаждающего СИНИС суб-ТГц приемник, тестирувавшийся во время этих измерений, был выключен, температура воздуха в помещении примерно соответствует температуре в подкупольном пространстве – окружающей среде. При продолжительном наблюдении в одной точке высоко над уровнем горизонта заметен дрейф сигнала (рис. 5). Мы связываем его с изменением температуры модулятора – после открытия купола температура в фокусе Несмита стала понижаться, охлаждался диск модулятора, разница сигналов (температур) становилась меньше. К сожалению, возможности провести более длинные наблюдения и дождаться полной термостабилизации стенда не было. Также измеренный сигнал (100 ± 10 мкВ) содержит большой шум или флуктуации. И может быть связан как с флуктуациями температуры модулятора, так и с флуктуациями входящего сигнала (флуктуациями атмосферы).

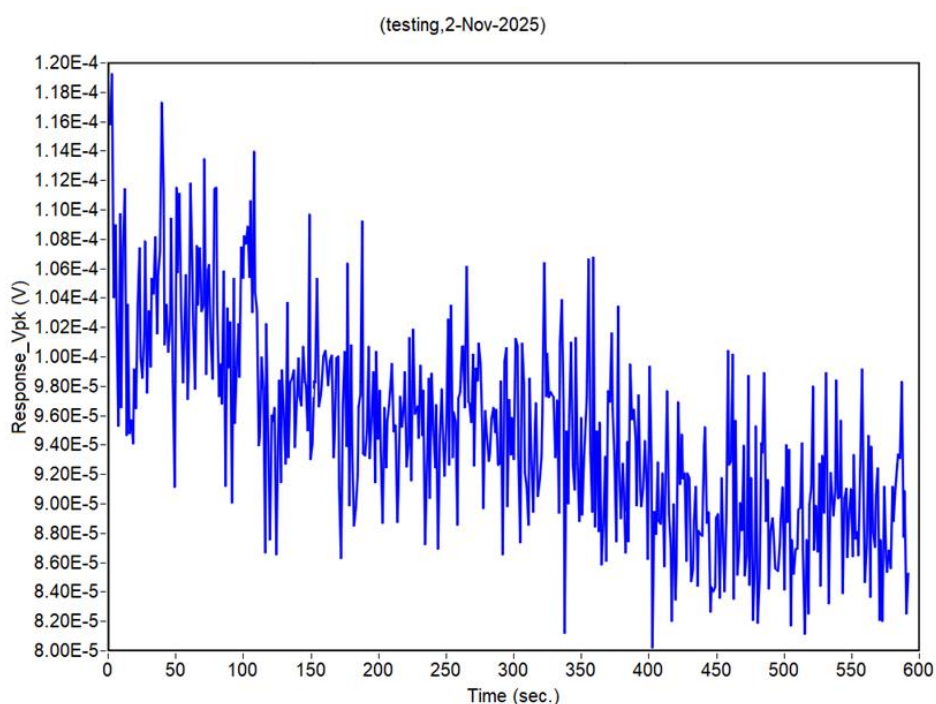


Рис. 5. Наблюдение области неба, в зените в течении 10 минут.

При попытке наблюдения точечного яркого источника (Вега), при движении телескопа через объект изменения сигнал был меньше, чем шум. Было решено

провести измерения протяженного и яркого объекта – Луны. Луна 2 ноября была в фазе 0.88, но во время наблюдений находилась достаточно низко над горизонтом. Начало записи сигнала на рис. 7 18:38:07 МСК. При движении телескопа происходит резкое изменение сигнала. Около Луны наблюдается другой уровень фона, предположительно ниже над горизонтом над уровнем горизонта, больше оптическая толщина, больше поглощения и как следствие больше разностный сигнал $\sim 160 \pm 20$ мВ. При прохождении Луны сигнал становится меньше (110 ± 20 мВ), так как излучение от Луны выше (термодинамическая температура в исследуемой полосе частот выше), чем от окружающего пространства и разностный сигнал становится меньше. Соотношение сигнал/шум примерно 2, но при усреднении, например, по 20 точкам, изменение сигнала более существенное.

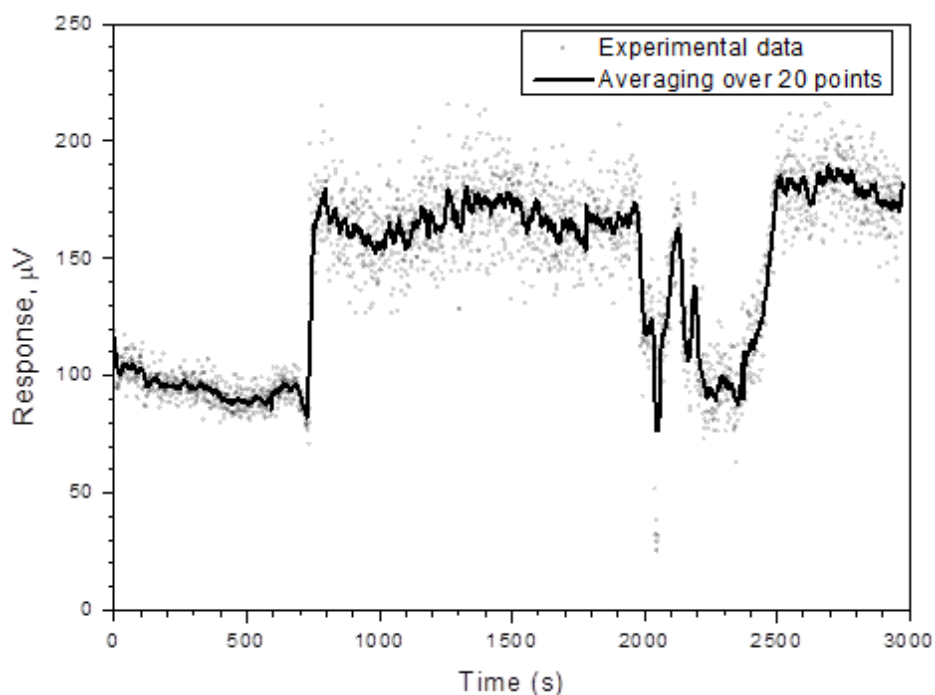


Рис. 6. Изменение сигнала детектора при движении телескопа к Луне и прохождении Луны.

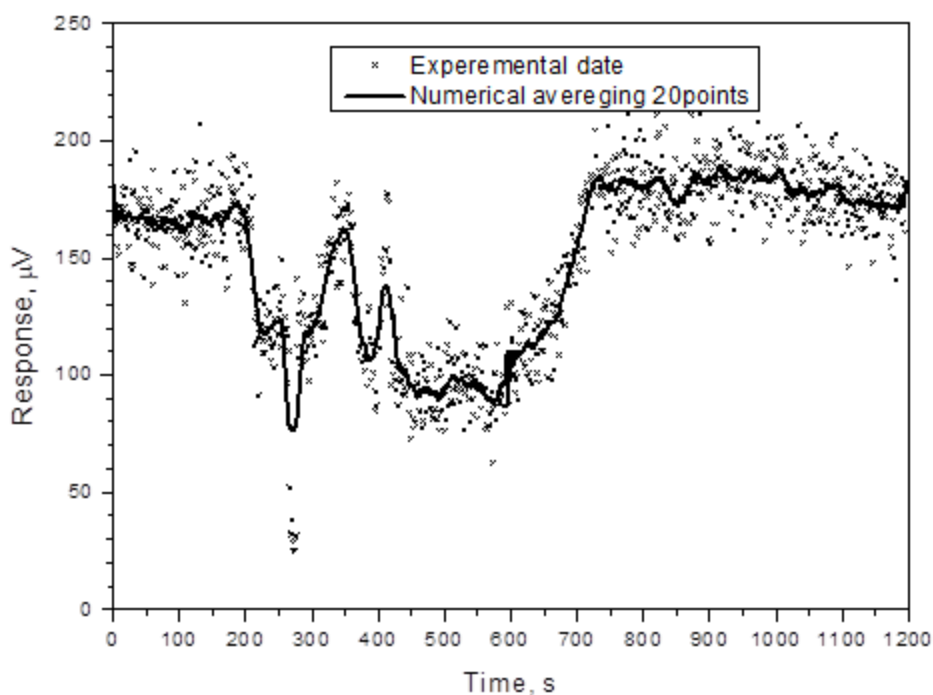


Рис. 7. Прохождение Луны (на 200 с), проезд по поверхности, движение по темной стороне и съезд с Луны (700 с).

Заключение

Выполненный в ноябре 2025 тестовый эксперимент подтвердил справедливость гипотезы о возможности проведения радиоастрономических наблюдений в трех х самых длинноволновых (3, 2 и 1.3 мм) окнах прозрачности атмосферы. Основываясь на этом выводе принято решение продолжить подготовку к рабочим радиоастрономическим наблюдениям на оптическом телескопе БТА в рамках намеченного на наиболее выигрышный с точки зрения суб-ТГц наблюдений мартовского цикла 2026 г., когда прозрачность атмосферы на БТА в суб-ТГц наибольшая. Кроме того, поскольку эксперимент проводился с использованием специально подобранных фильтров на волнах 3 и 1.3 мм, есть уверенность, что наблюдения в окнах ТГС, как в текущей конфигурации (1.3 мм) так и в большей мере перспективной (0.8) на оптическом телескопе могут проводиться, поскольку степень критичности фактора малой по сравнению с толщиной скин-слоя толщины алюминиевого покрытия при переходе к более коротким волнам будет снижаться.

Следует признать, что данная работа уже третья попытка суб-ТГц радиоастрономических наблюдений на БТА. Первая была организована группой сотрудников ИПФ АН СССР под руководством проф. И.И. Зинченко в начале 90-х годов не дошла до измерений в силу известных драматических событий того периода, хотя суб-ТГц приемник и был смонтирован в фокусе БТА. Вернулся к этой идее проф. А.Н. Выставкин в середине нулевых годов, но и здесь дальше лабораторных экспериментов дело не пошло. И вот теперь фактически впервые удалось увидеть суб-ТГц сигнал от астрономического объекта на оптическом телескопе БТА.

Авторы посвящают эту работу памяти инициаторов тематики проекта А.Н. Выставкину, Ю.В. Лебскому и Г.А. Чунтонову и благодарят коллективы организаций исполнителей проекта САО РАН, ИРЭ РАН и ИПФ РАН за поддержку. Работа выполнена на базе трех уникальных научных установок: телескоп БТА САО РАН, УНУ «Криоинтерграл» ИРЭ РАН и УНУ «ЦКП-7» ИПФ РАН, поддерживаемых в рамках проекта Госзадания FFUF-2024-0028 и соответствующих проектов Минобрнауки.

Финансирование: работа профинансирована из средств гранта РФФИ (проект 23-62-10013) и хоздоговоров организаций соисполнителей (ИРЭ РАН и ИПФ РАН), выполненных в них по заказу головной организации мультидисциплинарного проекта – САО РАН.

Литература

1. «ALMA – Atacama Large Millimeter/submillimeter Array»
<https://www.almaobservatory.org/en/home>
2. Likhachev, S.F., Rudnitskiy, A.G., Andrianov, A.S. et al. Subterahertz Astronomy in the Russian Federation: Prospects and Directions. Cosmic Res 62, 117–131 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0010952523700764>

3. Raymond A.M., Palumbo D., Paine S.N. et al. Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2021. V. 253. N. 1. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>
4. Белькович И.В. Расчет эффективности зеркальных антенн с учетом неидеальности поверхности зеркал с применением векторов Римана-Зильберштейна. // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.11.14>
5. <https://www.cfa.harvard.edu/facilities-technology/telescopes-instruments/south-pole-telescope-antarctica>
6. Балега Ю.Ю., Валеев А.Ф., Валявин Г.Г. и др. СИСТЕМА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В СУБТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОПТИЧЕСКОМ 6-МЕТРОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ БТА. // Доклады академии наук. Физика, техника, – 2025 (в печати).
7. Патент «Радиотелескоп субТГц диапазона частот для астрономических исследований, использующий рефлектор оптического телескопа БТА». – Россия. – 2850391. – 12.11.2025. – ИПФ РАН, САО РАН, ИРЭ РАН
8. <https://www.tydexoptics.com/>

Для цитирования:

Вдовин В.Ф., Красильников А.М., Кукушкин Д.Е., Мансфельд М.А., Марухно А.С., Столяров В.А., Тарасов М.А., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Юшкин М.В. Радиоастрономические наблюдения в субтерагерцовом диапазоне частот на оптическом телескопе БТА. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.9>