

УДК 520.1, 520.27, 520.274

ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ АСТРОНОМИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2024 г. С.Ф. Лихачев¹, А.Г. Рудницкий¹*, А.С. Андрианов¹, М.Н. Андрианов¹, М.Ю. Архипов¹, А.М. Барышев², В.Ф. Вдовин^{1,3}, Е.С. Голубев¹, В.И. Костенко¹, Т.И. Ларченкова¹, С.В. Пилипенко¹, Я.Г. Подобедов¹, Ж.К. Разананирина¹, И.В. Третьяков¹, С.Д. Федорчук¹, А.В. Худченко¹, Р.А. Черный¹, М.А. Щуров¹

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Астрономический институт им. Я.К. Каптейна, Университет Гронингена, Гронинген, Нидерланды

³Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*arud@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 21.03.2023 г.

Принята к публикации 23.03.2023 г.

В работе рассмотрены научные и технические перспективы и возможные направления развития субтерагерцовой астрономии в Российской Федерации. Предложена концепция создания субтерагерцовых инструментов в виде универсальной компактной антенной решетки для размещения на территории России. На базе концепции такой антенной решетки возможна реализация нескольких космических проектов субтерагерцового диапазона нового поколения – космического интерферометра и телескопа, расположенного на поверхности Луны. Наземные антенные решетки смогут выступить в качестве поддержки режима интерферометра со сверхдлинной базой обсерватории «Миллиметр».

DOI: 10.31857/S0023420624010116

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия с интенсивным развитием наземных и космических наблюдательных средств существенно возрос интерес к исследованиям в субтерагерцовом (субТГц) диапазоне спектра (частоты от 100 до 1000 ГГц). Можно выделить целый ряд значимых результатов: изображения сверхмассивных черных дыр в центре нашей Галактики и в галактике М87, полученные Телескопом горизонта событий (Event Horizon Telescope – ЕНТ), успешная работа миссии *Herschel*, запуск *James Webb Telescope*, результаты работы 30-м телескопа IRAM (англ. Institute for Radio Astronomy in the Millimeter Range), интерферометра NOEMA (англ. Northern Extended Millimeter Array) и антенной решетки ALMA (англ. Atacama Large Millimeter Array) [1–6]. Субтерагерцовый диапазон становится для астрономов и астрофизиков источником все большего количества важной научной информации [7, 8]. Наблюдения в этой части спектра затрагивают наиболее актуальные вопросы современной астрофизики: ранняя Вселенная и ее эволюция, процессы образования звезд и планет, спектрометрия сложных

химических соединений, исследование компактных сверхмассивных объектов.

В ближайшем будущем астрофизические исследования и развитие соответствующих наблюдательных инструментов будут связаны с субтерагерцовым диапазоном длин волн и, в частности, с интерферометрией со сверхдлинными базами (РСДБ). Уже сейчас развивается наземная сеть телескопов этого диапазона, создаются новые концепции космических обсерваторий и интерферометров [9–14]. Подтверждением тому служат успешные наблюдения в обсерваториях ЕНТ и обширная программа развития глобальной сети этого проекта [12]. Важным элементом в плане развития сети Телескопа горизонта событий становится сокращение белых пятен на карте покрытия, на сегодняшний день таким пятном является значительное пространство северо-востока Евразии. Отмечен целый ряд перспективных районов России и среднеазиатских республик, где было бы чрезвычайно полезно разместить субтерагерцовую обсерваторию как элемент сети ЕНТ.

Известно, что возможности наземных средств наблюдений на высоких частотах существенно ограничены атмосферой Земли, а геометрия и, соответственно, угловое разрешение наземных интерферометров ограничены физическими размерами Земли. Именно по этой причине речь идет о необходимости развития одновременно и наземных, и космических телескопов, способных наблюдать в субтерагерцовом диапазоне.

На данный момент в РФ практически отсутствуют наземные телескопы, которые могут выполнять наблюдения на частотах выше 100 ГГц. Среди осуществляемых в настоящее время проектов можно назвать разработки Астрокосмического центра (АКЦ ФИАН): космическую обсерваторию «Миллиметр» («Спектр-М») [15, 16] и наземную субТГц-обсерваторию «Суффа» [17].

В настоящей работе рассматривается концепция и направление развития субтерагерцовой астрономии на территории России с точки зрения выбора наиболее актуальных научных задач и оптимальных средств организации и проведения наблюдений. Отметим, что с научной точки зрения необходимость развития субтерагерцовой астрономии в нашей стране, безусловно, востребована еще и для целей обзора и активного последовательного исследования северного полушария небесной сферы.

В соответствии с вышеизложенным предлагается концепция универсальной антенной решетки субтерагерцового диапазона космического и наземного базирования. Рассмотрено размещение наземного варианта на территории России, в том числе для отработки технологии и создания задела для будущих космических обсерваторий.

При этом поиск наиболее подходящих площадок для субтерагерцового телескопа и наземного полигона по отработке технологии космической обсерватории является самостоятельной научной задачей, в первую очередь связанной с изучением астроклимата на площадках-кандидатах, проводимой в настоящее время коллективом авторов в широкой кооперации [18, 19].

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ АСТРОНОМИИ

Перечень научных задач субТГц-астрономии в рамках концепции наземно-космической интерферометрии, включающей наземную, лунную, наземно-космическую и автономную

технологии «космос – космос», чрезвычайно обширен. Сюда можно отнести практически все объекты и процессы, на исследование которых направлены современные крупномасштабные проекты физики, астрофизики и космологии: гравитационно-волновая астрономия [20–22], нейтринная астрофизика и физика космических лучей сверхвысоких (ТэВ и ПэВ) энергий, картографирование сверхмассивных компактных объектов в центрах галактик [23]. Особый интерес представляет реализация интерферометров «Луна – космос» и «космос – космос» в ТГц- и субТГц-области для решения задач, связанных с изучением окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД).

Уникальность субТГц-диапазона состоит в том, что среда во многих объектах на ТГц-частотах обладает более высокой прозрачностью по сравнению как с более коротковолновыми (ИК, оптика), так и более длинноволновыми (сантиметровый, метровый) диапазонами. Это позволяет непосредственно исследовать «центральные машины» астрофизических объектов. Кроме того, в этом диапазоне имеется ряд важных спектральных особенностей, таких как яркие линии атомов, ионов и молекул, получившие название «диагностические линии» из-за их привязанности к определенным физическим процессам или состояниям. Многие объекты, такие как протозвездные облака, межзвездная пыль, галактики с активным звездообразованием и т.д., имеют максимум спектральной плотности излучения в субТГц-диапазоне.

Научные задачи обсуждаемой программы тесно связаны со следующими перспективными направлениями, которые будут определять развитие астрофизики и космологии в ближайшие несколько десятилетий.

- Происхождение и физика сверхмассивных черных дыр

Предполагается изучение как ближайших СМЧД, таких как Sgr A*, M87, двойная СМЧД OJ287, путем РСДБ-наблюдений фотонных колец вблизи их горизонта событий [24, 25], так и поиск и определение физических свойств СМЧД в ранней Вселенной.

Важными задачами этого направления выступают определение темпа аккреции на сверхмассивных черных дырах, их функции светимости и функции масс в пылевых галактиках с высокой скоростью звездообразования¹. Они объединяют

¹ В англоязычной литературе общепринятый термин Dusty Star Forming Galaxies (DSFG).

в себе широкий класс классических инфракрасных галактик, таких как яркие инфракрасные галактики (Luminous Infra-Red Galaxies – LIRGs), субмиллиметровые галактики (SMG), компактные затененные ядра (Compact Obscured Nuclei – CON) с лучевой концентрацией $N(H) \geq 10^{24} \text{ см}^{-2}$ и др. Важно отметить, что в последнее десятилетие эти объекты обнаружены на красных смещениях $z > 6$ (возраст Вселенной $t_H < 850$ млн лет) [26, 27]. Происхождение таких «монстров» в столь молодой Вселенной до сих пор остается неясным [28–30]. Наблюдения субТГц-части спектра их излучения, в которой представлена тепловая эмиссия пыли, линейчатый спектр CO, линия 158 мкм иона CII и ряд других линий, позволят определиться со сценарием образования этих объектов [31, 32]. Физические условия в окрестности СМЧД могут быть изучены с помощью наблюдений мегамазеров в линиях 183 и 321 ГГц [33, 34].

- Звездообразование во Вселенной

Задачей терагерцовой астрономии является измерение (в том числе в программах глубоких обзоров) скорости образования звезд во Вселенной как в хорошо известном пике звездообразования в области красных смещений $z \sim 2-4$ («полдень» Вселенной), так и за его пределами на красных смещениях $z = 2-10$ и, возможно, в более далекой области [32].

Это диктуется тем, что глобальная эволюция звездного нуклеосинтеза за пределами $z \sim 2-3$ практически неизвестна. Результатом исследования этих процессов будет создание полной концепции «звездного» периода эволюции Вселенной, начиная с максимально ранних эпох.

Также субТГц-диапазон идеально подходит для изучения физики процесса звездообразования на масштабах отдельных звезд или скоплений посредством наблюдения объектов в нашей Галактике. До сих пор не известно, как образуются массивные звезды, какую роль в звездообразовании играют филаменты межзвездной среды, как может варьироваться начальная функция масс звезд и т.д. Для решения этих задач требуется построение изображений, спектральные исследования, измерение поляризации и исследование переменности объектов.

- Поиск излучения сложных молекул

На сегодняшний день остается открытым вопрос, где же именно формировались «строительные блоки», из которых образовались первые земные репликаторы – пребиотики. Поиск

и обнаружение пребиотиков и их образующих – ключевая и одна из приоритетных задач современной астрохимии. На данный момент зафиксировано излучение как относительно простых (метанол, метилцианид), так и более сложных органических соединений, например пропаналь $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ [35], цианонафталин $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CN}$ [36] и др., что говорит о принципиальной возможности возникновения пребиотиков еще на этапе формирования планеты или звездной системы в количестве, достаточном для их обнаружения предлагаемыми средствами. «Увидеть» эти молекулярные соединения можно как с помощью наземных радиотелескопов, например IRAM30m и GLT (англ. Greenland Telescope), который работает в диапазоне до 377 ГГц, так и с помощью стратосферных инструментов *SOFIA* (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*²) и *BLAST* (*Balloon-borne Large-Aperture Submillimeter Telescope*³). Эти молекулы, как правило, имеют большое количество переходов между вращательными энергетическими уровнями, попадающими в субТГц-диапазон спектра. Количество линий, которые возможно наблюдать в диапазоне частот от 80 до 345 ГГц, составляет более 2.2 млн⁴.

- Поиск воды в межзвездной среде, в областях звездообразования, в протопланетных дисках⁵

Интерес к этой проблеме самым тесным образом связан с проблемой возникновения жизни во Вселенной [16].

- Поиск искажений в спектре реликтового излучения

Телескоп, или антенная решетка, установленный на поверхности Луны, работающий в режиме одиночного зеркала и обладающий достаточной чувствительностью, позволит решать задачу, связанную с поиском μ -искажений в спектре реликтового излучения [16]. Величина искажений составляет $10^{-6}-10^{-8}$ от амплитуды самого реликтового излучения.

Субтерагерцовый диапазон также важен для исследования скоплений галактик – эффект Сюняева – Зельдовича (Y -искажения), а релятивистские поправки к нему позволяют восстановить физические свойства газа (температуру, давление).

² Обсерватория *SOFIA*: <https://www.sofia.usra.edu/>.

³ Эксперимент *BLAST*: <https://sites.northwestern.edu/blast/>.

⁴ <https://cdms.astro.uni-koeln.de/cgi-bin/cdmssearch>.

⁵ В англоязычной литературе этот класс задач известен как Water trail problem.

- Изучение процессов генерации гамма-излучения и нейтрино с энергиями уровня ТэВ и ПэВ и космических лучей в блазарах.

Пик электромагнитного излучения в них приходится на область субТГц, ТГц, а вариации в гамма- и субТГц- или ТГц-диапазонах, как правило, коррелируют [37].

- Изучение физических свойств и динамики вещества в экстремальных гравитационных полях с помощью наблюдения всплесков электромагнитного излучения, которыми сопровождаются события, вызывающие всплески гравитационных волн [38].

Как видно, спектр перечисленных задач очень широк, и конечный перечень решаемых задач будет напрямую зависеть от параметров обсерватории.

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Повышенный интерес к субтерагерцовой астрономии привел к созданию в последние десятилетия целого ряда обсерваторий с инструментами этого диапазона. Уже действуют десятки радиотелескопов диаметром от нескольких единиц до десятков метров, работающих до определенных длин волн субТГц-диапазона и расположенных в различных точках земной поверхности от Гренландии⁶ до Южного полюса⁷ [6, 12].

На сегодня в России практически нет антенн, способных работать на частотах от 100 ГГц и выше. К таким инструментам условно можно отнести 22-м антенну РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории [39, 40], которая способна работать на длинноволновом краю субТГц-диапазона с эффективностью менее 20%. Аналогичная антенна Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) [39], имеющая несколько худшее качество поверхности, не может ныне использоваться даже на 100 ГГц. Также в окрестностях г. Дмитрова есть две антенны Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана диаметром 7.75 м. Первая из них использовалась в радиоастрономических наблюдениях на частотах до 87.7 ГГц, вторая на протяжении многих лет используется для наблюдений Солнца

и в педагогической учебной практике. Но невысокое качество их поверхности (среднеквадратическое отклонение (СКО) 100 мкм) в совокупности с малой высотой над уровнем моря, характеризующейся высоким атмосферным поглощением, делает их бесперспективными для работы на более высоких частотах за пределами двух первых низкочастотных окон прозрачности атмосферы ($\lambda = 2$ и 3 мм). Следует отметить предложение Института прикладной астрономии РАН⁸ опробовать в миллиметровом диапазоне длин волн три антенны диаметром 13.2 м с анонсированной паспортной точностью поверхности около 50 мкм, что возможно позволит работать в окне прозрачности 1.3 мм. Однако месторасположение указанных антенн на высотах менее 1000 м над уровнем моря также не является перспективным для наблюдений на длинах волн короче 2–3 мм.

Существующие российские антенны субтерагерцового диапазона – Международная радиоастрономическая обсерватория (МРАО) «Суффа» и 10 м антенна космической обсерватории «Миллиметр» [16] – находятся в стадии технологического освоения.

В настоящей работе в рамках оценки перспектив развития субтерагерцовой астрономии в России рассматривается проект универсальной радиоастрономической системы в виде автономной роботизированной мобильной антенной решетки (массив антенн малого диаметра) субтерагерцового диапазона. Неоспоримым преимуществом такого комплекса является его мобильность, возможность его конфигурации с переменным линейным масштабом, а также способность работать как в режиме одиночных антенн, так и в режиме интерферометра с изменяемой проекцией базы. Более того, такая система наземного базирования может стать определяющей в дальнейшем развитии наблюдательных средств космического базирования для астрофизических исследований в субтерагерцовом диапазоне.

В рамках рассматриваемого проекта работы по развитию субтерагерцовой астрономии можно разделить на несколько этапов.

- Этап 1. Изготовление макета антенной решетки.
- Этап 2. Создание опытного образца автономной роботизированной мобильной антенной решетки.

⁶ <https://www.cfa.harvard.edu/spaces/greenland-telescope>.

⁷ <https://www.cfa.harvard.edu/facilities-technology/telescopes-instruments/south-pole-telescope-antarctica>.

⁸ <https://iaaras.ru/quasar/rt-13/antenna/>

- Этап 3. Изготовление и испытания антенной решетки.
- Этап 4. Поиск оптимальной наблюдательной площадки с учетом требований необходимого астроклимата для работы в субтерагерцовом диапазоне и наличием доступной наземной инфраструктуры. Перебазирование антенной решетки на площадку и выполнение технологических испытаний и научных наблюдений.
- Этап 5. Формирование рекомендаций для планирования работ по развитию антенных систем субтерагерцового диапазона в космическом исполнении.

Наземная антенная решетка субтерагерцового диапазона

На первом этапе целесообразно рассмотреть упрощенный вариант – прототип решетки, который будет состоять из нескольких (от 3 до 6) антенн малого диаметра (3–8 м) с приемным комплексом. Это позволит отработать ключевые технологии и решения. В качестве площадки для таких работ может выступать ПРАО Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

На базе разработанного прототипа антенны и несущей платформы представляется возможным создание антенной решетки – полноценной обсерватории субтерагерцового диапазона.

Рассмотрим конфигурацию экспериментальной антенной решетки (ЭАР) для моделирования наземного инструмента апертурного синтеза субтерагерцового диапазона с параметрами:

- малоразмерные полноповоротные параболические антенны, диаметр (D) 3, 5 или 8 м;
- качество поверхности зеркал 40 мкм (СКО);
- количество антенн в последовательности освоения от 3 до 6.

Для выполнения количественных оценок в качестве пункта размещения и наблюдательной площадки было рассмотрено локальное плато г. Маяк (Дагестан, высота над уровнем моря 2352 м). Гора Маяк выбрана из компромиссных соображений комбинации параметров доступной инфраструктуры и удовлетворительного микроволнового астроклимата, который исследовался радиометром МИАП-2 Астрокосмического центра ФИАН в 2021–2022 гг. [19, 41].

На рис. 1 представлен эскиз картографической привязки шести антенн экспериментальной антенной решетки на участке в окрестности г. Маяк. Данная конфигурация инструмента близка

к конфигурации интерферометра с минимальной избыточностью для ограниченного числа антенн.

При расчетах координат векторов базы приняты одинаковые средние значения высот станций над геоидом (в точке пика г. Маяк над средним уровнем моря). Кроме того, ввиду малых локальных размеров антенной решетки, модули их радиус-векторов также приняты одинаковыми. С учетом рассматриваемой топологии можно оценить реализуемые проекции базы между элементами антенной решетки. Тогда ожидаемые заполнения (u, v) плоскости пространственных частот для рассматриваемой антенной решетки, например для источников Sgr A* и M87, будут иметь вид, представленный на рис. 2.

Угловое разрешение антенной решетки, в зависимости от выбранной частоты наблюдений (40–345 ГГц), для максимальной базы внутри решетки (370.2 м) будет лежать в пределах от 4.85" до 0.59". Ширина диаграмм направленности по уровню половинной мощности $\Theta_{1/2}$ (секунды дуги) в зависимости от частоты (длины волны) для антенн с диаметрами 3, 5, 8 м, представленных в табл. 1, определяет соответствующее поле зрения антенной решетки.

Таблица 1

| | $D, \text{ м}$ | 3 | 5 | 8 |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $\nu, \text{ ГГц}$ | $\lambda, \text{ мм}$ | $\varphi, \text{ угл. с}$ | $\varphi, \text{ угл. с}$ | $\varphi, \text{ угл. с}$ |
| 90 | 3.33 | 280 | 168 | 105 |
| 140 | 2.14 | 180 | 108 | 67 |
| 230 | 1.30 | 109 | 66 | 41 |
| 345 | 0.87 | 73 | 44 | 27 |

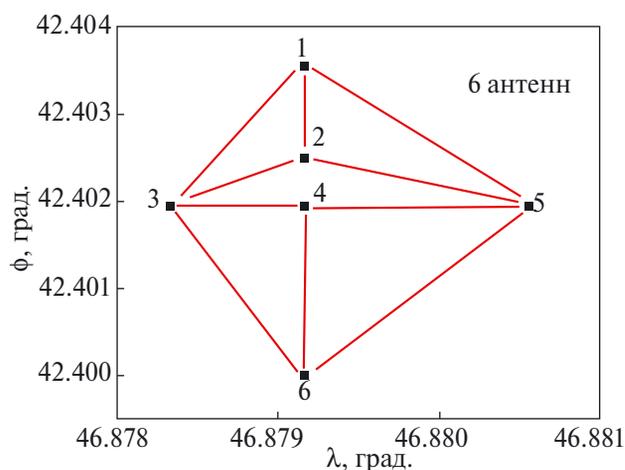


Рис. 1. Эскизная картографическая привязка шести антенн ЭАР на участке плато г. Маяк, Дагестан. По вертикали – широта, по горизонтали – долгота в градусах. Выделены все реализуемые 15 баз ЭАР.

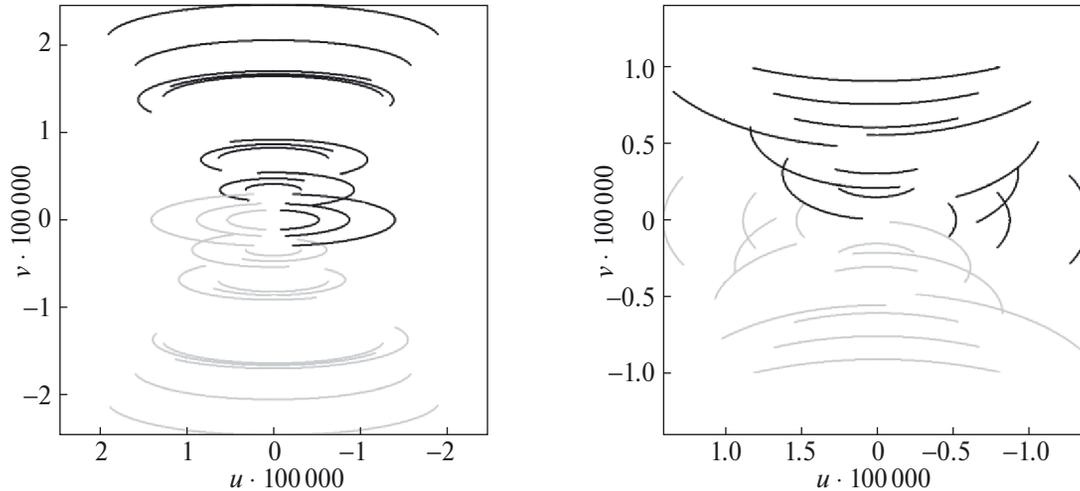


Рис. 2. Пример заполнения (u, v) плоскости при наблюдении радиоисточников M87 (слева) и Sgr A* (справа) на решетке ЭАР. Шкала координат u и v представлена в длинах волн $\lambda \cdot 10^5$ ($\lambda = 1$ мм).

Для оценок чувствительности одной антенны, а также всей решетки были приняты следующие параметры:

- точность поверхности антенны (СКО) 40 мкм; ширина мгновенной полосы приема IF (промежуточная полоса) $\Delta\nu = 8$ ГГц; шумовая температура системы $T_{\text{sys}} = 80, 110, 150, 300$ К для частот 90, 140, 230, 345 ГГц соответственно;

- условный параметр качества атмосферы – содержание в ней водяного пара (PWV – precipitable water vapor), для окон прозрачности 1.3 и 0.8 мм. Благоприятным микроволновый астроклимат считается при $\text{PWV} \leq 3$ мм, что, как правило, надежно достигается на высотах свыше 3000 м над уровнем моря, что и заложено в приведенные ниже оценки;

- в соответствии с рабочей частотой и ожидаемыми флуктуациями атмосферы время τ когерентного накопления сигнала составит около 100, 60, 20, 10 с при наблюдениях с антенной решеткой в континууме на частотах 90, 140, 230, 345 ГГц соответственно.

С учетом принятых параметров флуктуационная чувствительность в континууме по плотности потока dS антенной решеткой составит 7.1–100.9 мЯн для частот 90–345 ГГц в случае использования антенн диаметром 3 м; 2.6–36.3 мЯн в случае антенн с диаметром 5 м; 1.0–14.2 мЯн в случае антенн диаметром 8 м.

В свою очередь оценка чувствительности решетки при совместных РСДБ-наблюдениях с ALMA будет лежать в пределах 0.4–1.1 мЯн на

частоте 90 ГГц, 1.6–4.3 мЯн на частоте 230 ГГц и 3.8–10.2 мЯн на 345 ГГц для диаметра антенны 3, 5 и 8 м соответственно.

Рассматриваемая антенная решетка, даже с антеннами диаметром 3 м, с помощью коррелятора может использоваться для спектрального анализа автокорреляционных спектров всей антенной решетки в режиме полной мощности. Для повышения чувствительности здесь могут использоваться приемники с диаграммной модуляцией и большие интервалы интегрирования (до 10^3 с и выше). В этом случае спектральная чувствительность в одном канале шириной 1 км/с по лучевой скорости и временем интегрирования 1800 с может составить 30, 24, 20, 20, 34, 62 Ян при наблюдениях на частотах 22, 40, 90, 140, 230 и 345 ГГц соответственно.

Наземная антенная решетка в упрощенном варианте из антенн диаметром 3–5 м сможет выполнять наблюдения транзиентных объектов, например мониторинг вспышек в молодых звездных объектах, построение субТГц кривых блеска послесвечений гамма-всплесков, а также исследовать спектры некоторых тел Солнечной системы. При участии других наземных антенн, в частности при работе решетки в составе международного телескопа next-generation Event Horizon Telescope (ngEHT) в режиме РСДБ, станет возможным участие в исследовании тени двойных СМЧД, наблюдениях первого фотонного кольца. При увеличении диаметра и количества антенн решетка будет обладать достаточной чувствительностью для поиска воды в областях звездообразования и протопланетных дисках,

поиска излучения сложных молекул, изучения звездообразования в нашей и других галактиках.

Выбор местоположения наземной площадки

Для эффективной реализации потенциала субтерагерцовой обсерватории необходимо провести поиск и выбор оптимальных площадок для размещения рассматриваемых антенных систем.

Изучение влияния атмосферы Земли на распространение электромагнитного излучения субТГц-радиочастот имеет продолжительную историю: построены сравнительно достоверные модели плоскостной атмосферы [42] и выделены основные компоненты, ответственные за атмосферное поглощение (они же при наличии условий для возникновения турбулентности ответственны и за рассеяние). Это в первую очередь кислород и вода. Изучению микроволнового астроклимата посвящены многочисленные работы, объем которых заметно возрос в последние два года [18, 19]. Атмосферу в субТГц-диапазоне можно рассматривать в виде последовательности окон относительной прозрачности, расположенных в окрестности длин волн в 3, 2, 1.3, 0.8 мм и т.д., разделенных мощными линиями поглощения водяного пара и кислорода. Поглощение радиоизлучения в этих линиях может достигать значений 100 дБ/км. Именно этот факт мотивирует исследователей подниматься выше в горы, где поглощение ниже, либо запускать космические обсерватории или инструменты в высотные слои атмосферы (*SOFIA*, *BOOMERanG*, *OLIMPO*) [43].

Ограничиваясь длинами волн 1.3 и 0.8 мм (230 и 340 ГГц соответственно), можно предположить, что высота размещения обсерватории желательна не ниже 3000 м. На более низких площадках соблюдение требования $PWV \sim 3$ мм для окон прозрачности 1.3 и 0.8 мм довольно редкое событие, и оптическая толща атмосферы (вертикальное поглощение) лучше 0.1 Неп недостижима в пределах сколько-нибудь значительных промежутков времени. Между тем периоды возможных наблюдений должны составлять значимую часть времени ($\sim 80\%$), что особо важно для интерферометрии. Но даже большая высота не гарантирует качество микроволнового астроклимата. Опыт показывает, что наиболее предпочтительны места с осадками 200–300 мм в год и ниже. Так, например, облачность и значительные осадки (свыше 1000 мм в год) делают практически бесперспективной самую высокую вершину Европы – Эльбрус [19]. Большое значение

имеет наличие ясного неба, эту информацию можно получить из метеорологических баз данных. Резюмируя, делаем вывод, что крайне привлекательными будут площадки с 320–350 безоблачными днями, которых немало и на Кавказе, и в Сибири. Села Гуниб (г. Маяк) и Чираг (г. Курапаг) в Дагестане, несомненно, в этом списке так же, как и пик Хулугайша в Саянах.

Учитывая современные тенденции по развитию одновременных многочастотных наблюдений и алгоритмов на их базе для компенсации фазовых флуктуаций сигналов в субтерагерцовом диапазоне, вызванных атмосферой Земли, требования к астроклимату площадок (PWV , количество солнечных дней в году, минимальная высота) для наземных субтерагерцовых инструментов в ближайшем будущем могут смягчиться [44].

Для экспериментального исследования атмосферного поглощения в конкретных географических точках, представляющих интерес для размещения субТГц-инструментов, используются как наземные средства (радиометры водяного пара, лидары и т.д.), так и данные дистанционного зондирования Земли.

Конкретный выбор места размещения потребует дополнительных решений на основе результатов экспедиционных исследований в нескольких географических локациях в рамках существующих оптимальных предложений.

Перспективы использования лунной поверхности

Исследование Луны и использование ее поверхности постепенно входят в перечень наиболее приоритетных направлений исследований ведущих космических держав. Актуальными становятся перспективные научные инструменты, которые могли бы быть размещены на поверхности Луны или на окололунных орбитах [45–47]. С научной точки зрения кроме собственно селективных исследований особую значимость приобретают телескопы, способные наблюдать в диапазонах электромагнитного спектра, недоступных на поверхности Земли.

В области радиоастрономии к таким диапазонам относятся низкочастотный (частота ниже < 10 МГц, метровые волны) и высокочастотный (> 100 ГГц, включая дальний инфракрасный диапазон) [48–50]. В первом случае научным наблюдениям мешают существенные ограничения ионосферы и техногенный шум радиоэфира, во втором случае ограничения связаны с поглощением и флуктуациями излучения при прохождении сигналов в атмосфере.

Спектр научных задач для лунной обсерватории определяется эффективной приемной площадью антенных систем и возможностями самих приемников излучения. Самым предпочтительным представляется диапазон длин волн $\sim 30\text{--}3000$ мкм (от 100 ГГц до 10 ТГц) – недостижимый или труднодоступный для наземных наблюдений.

В зависимости от средств доставки на поверхность Луны общий облик обсерватории может быть представлен двумя вариантами. В первом варианте обсерватория осуществляет посадку на поверхность как самостоятельный аппарат, в состав которого входит посадочный модуль (одноразовый). Во втором варианте обсерватория может доставляться на поверхность с использованием универсального многоразового модуля, предназначенного для многофункциональной активности на Луне из состава *Cislunar Transportation Facility* и *Lunar Transportation and Operation Facility* проекта *Международной научной лунной станции (МНЛС или ILRS)*⁹.

Лунная антенная решетка, работая совместно с наземной сетью телескопов в режиме РСДБ, позволит получить высокодетальные изображения теней черных дыр с разрешением до 30 раз лучше, чем наземная сеть в отдельности, что станет большим шагом вперед в изучении этой тематики. Возможности решетки по решению задач из разд. 1 будут зависеть от достижимой чувствительности и от того, каким комплексом

приемной аппаратуры она будет оборудована. Большая часть этих задач может быть решена с помощью гетеродинных приемников. Для исследования спектральных искажений реликтового излучения необходим специальный спектрометр. Для некоторых задач по темам звездообразования и физики сверхмассивных черных дыр нужны измерения поляризации.

Ниже рассмотрим несколько вариантов перспективной обсерватории субтерагерцового диапазона, расположенной на поверхности Луны.

Обсерватория внутри темного кратера

У такого расположения для обсерватории имеется явное преимущество – низкая температура окружающего фона. Это существенно снижает требования к пассивной и активной криосистемам оптической системы и приборов. Однако такое расположение имеет и негативную сторону – существенное усложнение энергоснабжения аппарата в течение всего срока службы. Это связано с тем, что стандартное решение для космических аппаратов – солнечные батареи – не могут эффективно использоваться. Еще один источник электричества – радиоизотопный генератор (РИТЭГ) для оценочного уровня потребляемой электрической мощности 100–150 Вт будет иметь неприемлемые габариты, массу и стоимость, а также существенное

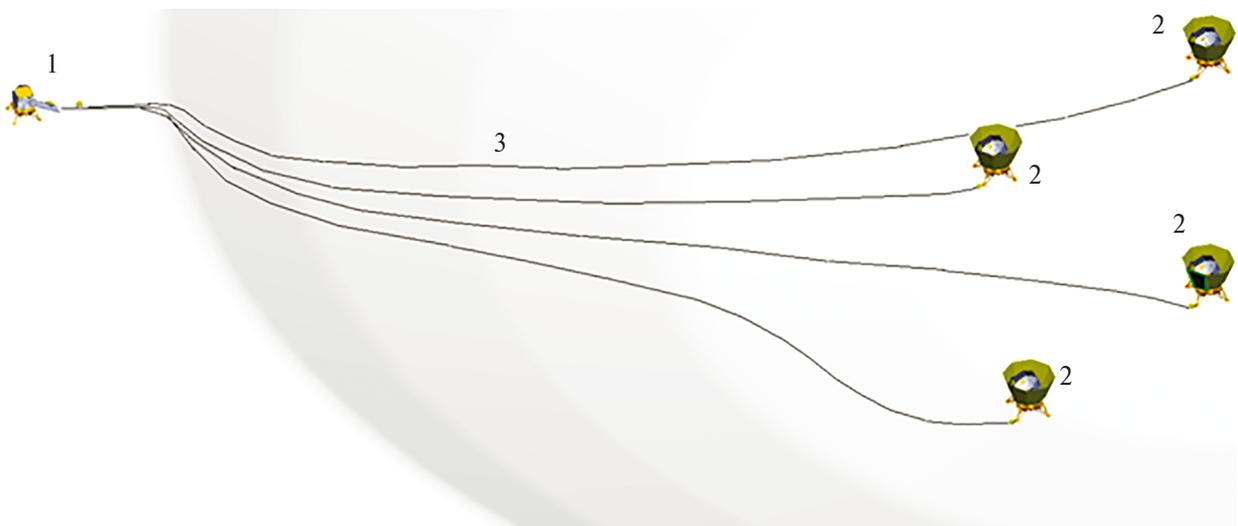


Рис. 3. Концепция антенной решетки, расположенной в кратере Луны: 1 – служебный модуль, 2 – антенные модули, 3 – интерфейсные кабели.

⁹ <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6812150/content.html>

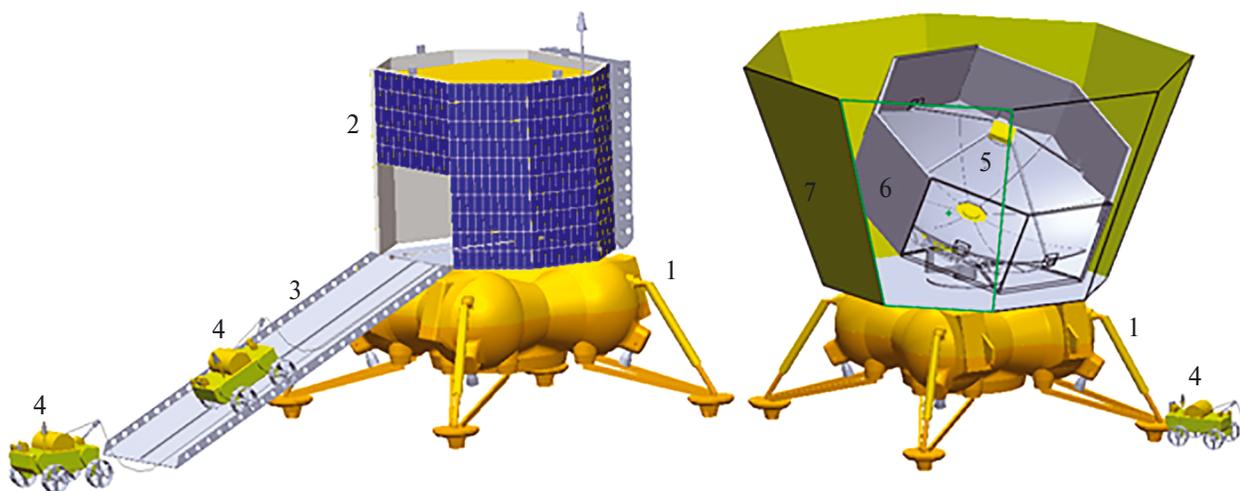


Рис. 4. Общий вид обсерватории в темном кратере. Слева – служебный модуль, справа – антенный. 1 – посадочный блок, 2 – солнечные батареи, 3 – пандус, 4 – роботизированная интерфейсная тележка, 5 – зеркальная система, 6 – бленда, 7 – дополнительный теплозащитный экран.

тепловыделение. Также немаловажным является аспект ядерной безопасности [51].

Вариантом, реализующим преимущества расположения обсерватории в темном кратере, является многокомпонентная схема со служебным модулем. Антенный модуль совершает посадку внутри кратера, а служебный – в зону, освещаемую солнцем. Его задача заключается в генерации и передаче электроэнергии для антенных модулей, синхронизации радиосистем (в режиме интерферометра) и обмена научными и служебными данными с орбитальным лунным модулем. На рис. 3 изображен вариант антенной решетки, располагаемой в кратере Луны.

Интерфейс между антенными и служебным модулями осуществляется с помощью кабелей, которые прокладываются с использованием роботизированных интерфейсных тележек. Пример внешнего вида такой системы представлен на рис. 4.

Существенные недостатки такой схемы связаны с критической зависимостью от служебного модуля и сложностью стыковки с использованием роботизированных интерфейсных тележек. Также чрезвычайно важным становится выбор места посадки, в котором реализуются требуемые условия размещения как служебного модуля, так модулей обсерватории.

Обсерватория на освещенной поверхности Луны

Размещение в приполярной зоне на освещаемом участке снимает проблему обеспечения электроэнергией аппарата и позволяет сделать его автономным. Теоретически аппарат может освещаться и боковым солнечным светом, в реальности же этот интервал будет ограничен местным затенением от элементов рельефа, а также будет определяться координатами места посадки (отличными от полюса). При проектировании обсерватории для обеспечения ее энергопитания, с одной стороны, и глубокого охлаждения, с другой, нужно учитывать движение Солнца по небесной сфере. Возможный вид такой обсерватории показан на рис. 5.

В рассматриваемой конфигурации допустимо присутствие Солнца в угле с раствором $\sim 135^\circ$ относительно вертикальной оси аппарата для обеспечения стабильной засветки панелей солнечных батарей и отсутствия засветки зеркальной системы и радиатора. В случае возможной засветки охлаждаемых элементов аппарата солнцем, опорно-поворотное устройство антенны должно обеспечивать доворот зеркальной системы, экрана, панелей солнечных батарей и радиатора для исключения этого эффекта.

Указанные требования накладывают дополнительные ограничения на циклограмму научных наблюдений.

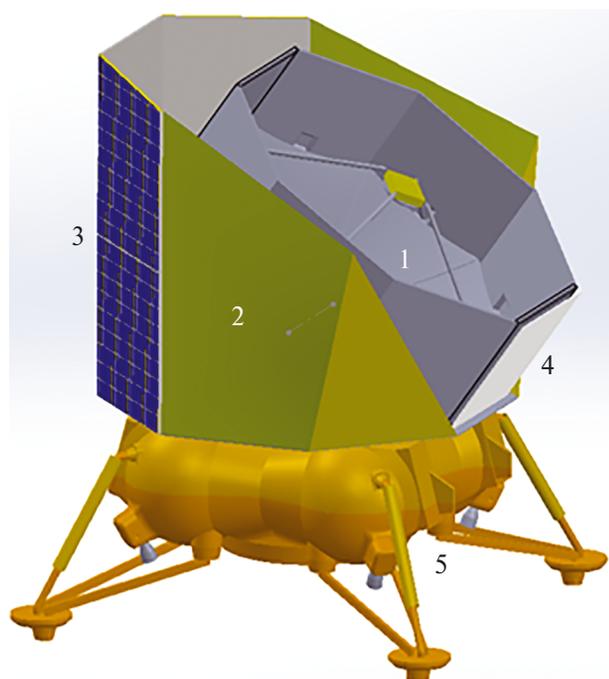


Рис. 5. Общий вид системы, размещаемой на освещенной поверхности Луны: 1 – зеркальная система, 2 – теплозащитный экран, 3 – солнечные батареи, 4 – радиатор, 5 – посадочный блок.

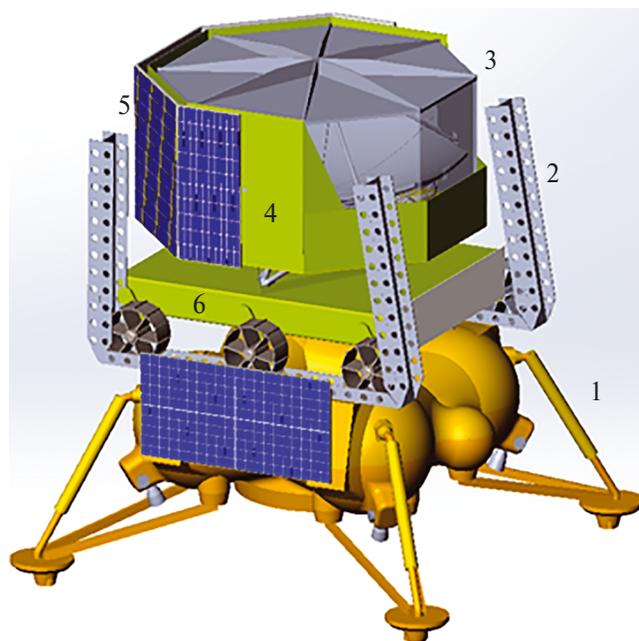


Рис. 6. Общий вид системы на базе подвижных платформ: 1 – универсальный многоразовый блок, 2 – пандус, 3 – бленда зеркальной системы с отделяемой крышкой, 4 – теплозащитный экран, 5 – солнечные батареи, 6 – мобильная платформа.

Обсерватория на базе подвижных платформ

Рассмотрим возможный вид обсерватории для данной транспортной схемы, представленной на рис. 6.

Основными отличиями программы развертывания будут: этап перегрузки обсерватории с универсального многоразового модуля на поверхность Луны и последующее его перемещение в требуемую локацию. Первый этап несет технические риски из-за больших габаритов перемещаемой обсерватории (сопоставимой с габаритами самого модуля).

Размещение обсерватории на подвижной платформе должно учитывать взаимное положение обсерватории и Солнца для обеспечения электропитания и отсутствия засветки зеркальной системы. Подвижность обсерватории облегчает решение этой задачи. Для проведения научных наблюдений вариант с подвижными антеннами позволяет менять размеры и ориентацию баз элементов антенной решетки.

Космический интерферометр субтерагерцового диапазона

Другое перспективное направление, которое может использовать опыт создания универсальной антенной решетки, это космический интерферометр, или интерферометр «космос – космос». Концептуально он представляет собой систему из нескольких орбитальных радиотелескопов, работающих в режиме РСДБ. Преимуществом такой системы, в отличие от других, является возможность создания интерферометра с размером базы многократно превышающим диаметр Земли. С учетом опыта проектов «*Радиоастрон*» и «*Миллиметрон*» могут быть реализованы проекции баз 300 тыс. – 1.5 млн км и более. Такая возможность позволит достичь предельно высокого углового разрешения, необходимого для исследования сверхкомпактных астрономических объектов, например черных дыр, внегалактических мазерных источников и нейтронных звезд.

В качестве примеров концепции таких космических интерферометров можно привести проекты *Cookie*, *Event Horizon Imager (EHI)*

[52–56] и *TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics (THEZA)* [57].

Такая космическая система, в отличие от антенной решетки, расположенной на поверхности Луны, сможет решить задачу наблюдения близких окрестностей СМЧД в динамике. Наиболее подходящим и ближайшим объектом в этом случае является Sgr A*. Переменность изображения источника составляет порядка ~220 с [23, 58]. Подобные наблюдения возможны в так называемом режиме мгновенного снимка (*snapshot*). Чтобы синтезировать относительно качественное изображение, необходимо получить мгновенное заполнение плоскости пространственных частот (u, v) с максимально возможным количеством пространственных частот.

По предварительным оценкам, чувствительность (SEFD – System Equivalent Flux Density) одного элемента космического интерферометра с диаметром антенны 4.4 м может составлять порядка 50 000 и 70 000 Ян на частотах 230 и 690 ГГц соответственно, с мгновенной полосой пропускания шириной 5 ГГц. При предполагаемом времени интегрирования ~450 с флуктуационная чувствительность по плотности потока dS составит ~30 мЯн [55].

Важным моментом в реализации космического интерферометра станет решение задачи поиска оптимальной геометрии для полноценной реализации наблюдений в режиме мгновенного снимка, что неразрывно связано с подбором

соответствующих орбитальных параметров и построением оптимальной топологии интерферометра. Для реализации космического интерферометра, состоящего из группировки космических телескопов, необходимо рассматривать различные типы и комбинации орбит с учетом всех ограничений и требований.

ЗЕРКАЛЬНАЯ СИСТЕМА

Субтерагерцовый диапазон длин волн требует относительно высокой точности и формостабильности рефлектора (десятки микрон среднеквадратичного отклонения), особенно в условиях глубокого охлаждения, а в случае размещения на поверхности Луны или в космическом пространстве – еще и малой удельной массы конструкции. Перспективным решением такой комплексной задачи является использование сегментированного зеркала из высокомодульного углепластика на формостабильном каркасе. Такое решение базируется на опыте, полученном в ходе работ по проекту «Миллиметрон» [59]. На рис. 7 представлен общий вид зеркальной системы.

Сегменты (панели) зеркала устанавливаются на каркас и приводятся в рабочее состояние с использованием юстировочных узлов. В зависимости от окончательного выбора рабочего диапазона юстировочные узлы могут быть выполнены в виде активных электромеханических актюаторов для настройки зеркала при достижении

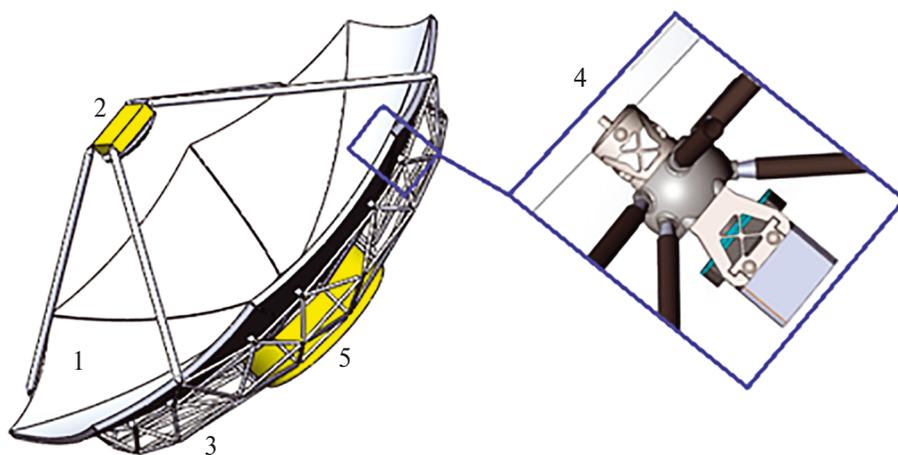


Рис. 7. Общий вид зеркальной системы: 1 – панели главного зеркала, 2 – вторичное зеркало, 3 – каркас, 4 – актюатор, 5 – контейнер с приемниками.

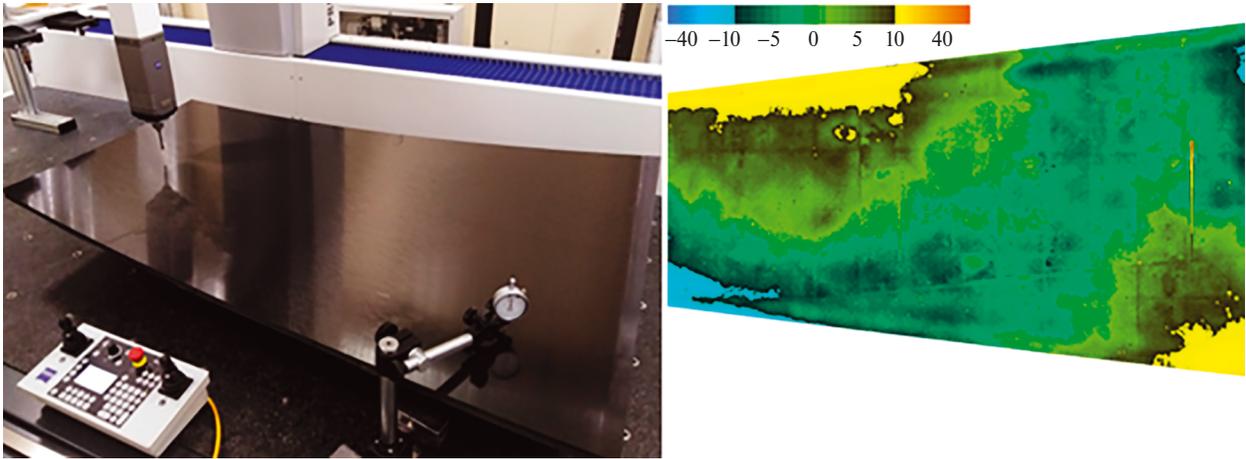


Рис. 8. Слева – панель «Миллиметрона» при измерении на контрольно-измерительной машине (КИМ), справа – поле отклонений (СКО – 7.2 мкм).

эксплуатационной температуры поверхности антенны [60]. В случае адаптивного зеркала в состав обсерватории потребуется ввести систему контроля формы и адаптации поверхности.

В рамках работ по проекту «Миллиметронтрон» приобретен опыт создания высокоточных панелей из углепластика – элементов поверхности для антенн субтерагерцового диапазона (рис. 8).

В условиях эксплуатации на Земле антенна размещается в подвижном укрытии, обеспечивающем работу в составе решетки с изменяемой базой. Пример такой антенны представлен на рис. 9.

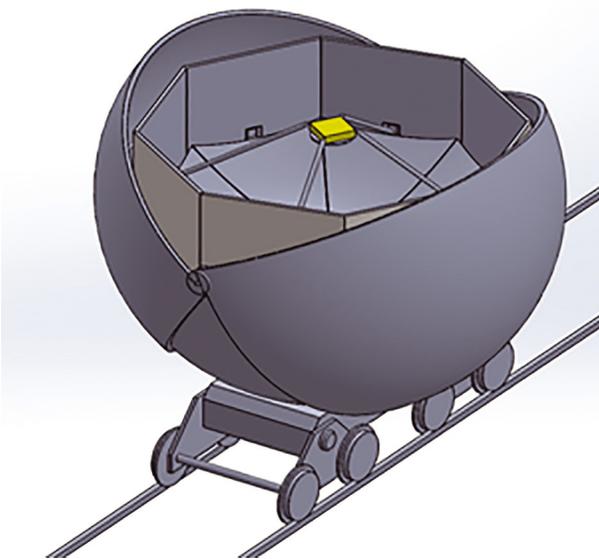


Рис. 9. Концепция обсерватории в подвижном укрытии для использования на Земле.

ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При эксплуатации антенной решетки на Земле, используются известные стандарты проводной или беспроводной связи между элементами решетки. Для передачи больших массивов данных между элементами решетки в условиях отсутствия атмосферы (открытый космос или поверхность Луны) целесообразно применять квантовые системы приемопередачи – лазеры. Скорость передачи данных при этом составит около 40–80 Гбит/с с ортогональным поляризационным разнесением.

Накопленные в памяти телескопов научные данные необходимо передать в коррелятор. И если на Земле это не представляет особых трудностей, то для передачи значительных массивов данных между лунным модулем и наземными станциями слежения возможно использовать миллиметровый диапазон радиоволн, в частности диапазон E (71–76, 81–86 ГГц). В этом случае применение указанного диапазона для передачи данных обеспечивает минимальную вероятность ошибки при толщине тропосферы 10–11 км. Скорость передачи информации в этом случае может составлять значения порядка 17–20 Гбит/с.

Благодаря размещению антенн на Луне, в связи с отсутствием атмосферы, геометрическая задержка для корреляционной обработки наблюдений вычисляется с большой точностью. Это действует для корреляции данных относительно малые вычислительные ресурсы, которые могут быть организованы как на базе специально запрограммированной ПЛИС (программируемая

логическая интегральная схема), так и на базе процессоров общего назначения. Скорость передаваемых на наземную станцию слежения данных в этом случае не превысит десятки мегабит в секунду, что на несколько порядков меньше относительно скорости передачи необработанной информации на Землю. Таким образом, размещение системы корреляционной обработки в составе космического интерферометра или на лунной поверхности может оказаться эффективным способом уменьшения объема и скорости передачи научных данных на Землю. Тогда можно реализовать передачу данных как в сантиметровом диапазоне на несущей частоте 15 ГГц, так и в миллиметровом диапазоне радиоволн. Преимуществом последнего является большее усиление приемопередающих антенн при определенной флуктуации и некотором затухании радиоволн в тропосфере. Однако следует учитывать, что такой подход к бортовой корреляционной обработке и к сокращению объема передаваемых данных гораздо проще реализовать для интерферометра на поверхности Луны, чем для интерферометра «космос – космос».

БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ

Баллистико-навигационное обеспечение интерферометра «космос – космос» мало чем отличается от подобной задачи для наземно-космических интерферометров (например, «Радиоастрон» и «Миллиметрон») и в первую очередь связано с проведением высокоточных траекторных измерений космических аппаратов и точным восстановлением их орбитальных параметров.

В случае лунной посадочной миссии баллистическое сопровождение будет включать в себя несколько этапов. На примере опыта выведения и посадки аппаратов «Луна-17» и «Луна-21» сначала космический аппарат выводится с помощью ракеты-носителя и разгонного блока на траекторию полета к Луне.

Время полета до Луны составляет примерно 4.5 сут. На орбите спутника Луны космический аппарат находится около 4 сут. Примерно через двое суток после выведения на селеноцентрическую орбиту выполняется первая орбитальная коррекция, предназначенная для формирования орбиты для посадки на поверхность Луны. При необходимости на третьи сутки полета по орбите искусственного спутника Луны (ИСЛ) может быть проведена вторая орбитальная коррекция параметров селеноцентрической орбиты. На

четвертые сутки полета по селеноцентрической орбите осуществляется маневр посадки. Посадка будет выполняться в два этапа.

В окончательном виде процесс выведения космического аппарата и его посадки на поверхность Луны будет зависеть от массово-габаритных параметров самого аппарата, запасов топлива, а также от непосредственно выбранной области посадки аппарата.

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Для работы интерферометра на каждой индивидуальной станции необходимо иметь набор когерентных приемников, а также водородный стандарт частоты. В РФ имеется большой задел по созданию как наземных, так и бортовых высокостабильных водородных стандартов частоты [61].

Что касается приемников, если говорить о наблюдениях в космосе или на поверхности Луны, наибольшей чувствительностью на частотах до нескольких терагерц обладают приемники на основе сверхпроводниковых смесителей [62]. В частности, на частотах примерно до 1.3 ТГц лучшими являются смесители с туннельным переходом сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) [63], а на больших частотах – смесители на болометре с разогретыми электронами (Hot Electron Bolometer – НЕВ) [64].

СИС-смесители продемонстрировали рекордную чувствительность на наземных телескопах [65, 66], в аэростатных экспериментах [67], а также в бортовом космическом исполнении [62]. Шумовая температура СИС-приемников всего в несколько раз превышает квантовый предел, составляя в двухполосном режиме менее 100 К на частоте около 600 ГГц и достигая 1000 К на частоте около 1.2 ТГц. Однако шумовая температура резко увеличивается при частотах гетеродина выше частоты щели для используемого сверхпроводника (0.7 ТГц для Nb и около 1.4 ТГц для NbTiN). Ширина полосы выходного сигнала СИС-смесителей, влияющая на допустимую полосу принимаемого интерферометром сигнала, без труда достигает 8 ГГц (SEPIA) [68] и может составлять 16 ГГц [69, 70].

На частотах выше 1.3 ТГц НЕВ-смеситель имеет наименьшую шумовую температуру, при этом требуя малого уровня мощности генератора гетеродина. Так, шумовая температура, измеренная в двухполосном режиме, достигла для нитридниобиевых (NbN) квазиоптических НЕВ-смесителей 650 К и на частоте 2.52 ТГц при шумовой полосе более 7 ГГц [71]. Столь высокая

Таблица 2

| Частота, ГГц | Технология приемника | Шумовая температура приемника, К |
|--------------|----------------------|----------------------------------|
| 50 | HEMT | 20 |
| 100 | HEMT | 40 |
| 230 | СИС | 50 |
| 345 | СИС | 70 |

чувствительность НЕВ-смесителей в ТГц-диапазоне обеспечила их применение на телескопе, установленном на борту самолета, проект *SOFIA*, проводившем астрономические наблюдения в диапазоне от 1 до 5 ТГц [72, 73]. Для лучшего пикселя в бортовом матричном приемнике на 1.9 ТГц шумовая температура достигала 600 К. В космической обсерватории *Herschel* канал 1.4–1.9 ТГц также был основан на НЕВ-смесителях [62]. Опорные генераторы для приемников на НЕВ-смесителях можно изготавливать как на основе цепочек умножителей [62], так и на основе синхронизированных по фазе квантовых каскадных лазерах [74]. Оба подхода дают возможность синхронизировать отдельные станции интерферометра.

Возможность изготовления НЕВ- и СИС-смесителей продемонстрирована в отечественных разработках [71, 75, 76], что позволит использовать эти технологии для лунного телескопа.

Следует отметить, что для работы НЕВ- и СИС-смесителей требуется охлаждение до 4 К, а для HEMT-усилителя (HEMT – High Electron Mobility Transistor) достаточно температуры около 20 К. При более высокой температуре (от 100 до 300 К) возможно использование приемников на основе смесителей на диодах Шоттки. Это позволяет отказаться от криогенной температуры, однако чувствительность таких приборов уступает сверхпроводниковым НЕВ- и СИС-смесителям примерно на порядок.

Если говорить о наземных наблюдениях, то гетеродинные приемники необходимы для работы предлагаемого интерферометра, в том числе в РСДБ-наблюдениях. Наиболее чувствительные приемники в субТГц-диапазоне частот (около 100–1000 ГГц), успешно используемые ведущими мировыми обсерваториями, такими как *ALMA*, *NOEMA*, *APEX* [77], основаны на смесителях с туннельным переходом СИС. Эта технология позволяет достигать рекордно низкой двухполосной шумовой температуры, а именно уровня 2–4 квантовых пределов, hf/k (h – постоянная Планка; f – частота; k – постоянная Больцмана). Приемники для частот до 120 ГГц конструируют с использованием прямых HEMT-усилителей [78].

Для оценки чувствительности антенн с криогенными приемниками можно пользоваться уровнями шумовой температуры, приведенными в табл. 2. Представленные уровни однополосных шумовых температур соответствуют лучшим мировым результатам.

Приемники предполагается разрабатывать и создавать на базе отечественных разработок [79]. Ширина полосы промежуточной частоты предполагается не менее 8 ГГц. Приведенные приемники будут иметь либо круговой, либо линейный разделитель поляризаций для их независимого детектирования.

На входе приемников планируется создать оптическую схему, разделяющую частотные диапазоны для возможности проведения одновременного измерения разными каналами. Это позволит осуществить в дальнейшем многочастотный синтез изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Субтерагерцовый диапазон на текущий момент представляет наибольший интерес у астрономов во всем мире и затрагивает важнейшие проблемы современной астрофизики, связанные с исследованием ранней Вселенной и ее эволюции, звездообразованием, поиском сложных химических соединений и следов жизни за пределами Земли, исследованием компактных сверхмассивных объектов. Ожидается, что интерес к этой области электромагнитного спектра будет только расти, вследствие чего создание инструментов и проведение наблюдений в субтерагерцовом диапазоне будут актуальными в ближайшие несколько десятилетий.

В работе предложена концепция создания субтерагерцовых инструментов в виде универсальной компактной антенной решетки.

Изготовление и размещение такого инструмента на территории России станет отправной точкой для создания новых и отработки уже

существующих технологий. Появится существенный задел для новых космических средств субтерагерцовой астрономии, рассмотренных в настоящей работе, – космического интерферометра и лунной антенной решетки. Более того, такие антенные решетки станут наземным плечом для режима РСДБ обсерватории «Миллиметрон». Таким образом, предлагаемые концепции развития наземных и космических средств субтерагерцовой астрономии позволят приблизиться к решению практически всех ключевых научных задач для этого диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Catalano A., Adam R., Ade P.A.R. et al.* The NIKA2 Instrument at 30-m IRAM Telescope: Performance and Results // *J. Low Temperature Physics*. 2018. V. 193. Iss. 5–6. P. 916–922. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac61df>
2. *Pilbratt G., Griffin M., Barthel P. et al.* The Herschel Space Observatory development, operation and post-operations: lessons learned // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. 2020. V. 11443. Art. ID 1144309. <https://doi.org/10.1117/12.2561116>
3. *Diaz-Garcia S., Lisenfeld U., Perez I. et al.* Molecular gas and star formation within 12 strong galactic bars observed with IRAM-30 m // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. V. 654. Art. ID A135. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140674>
4. *Franceschi R., Birnstiel T., Henning T. et al.* Mass determination of protoplanetary disks from dust evolution // *Astronomy and Astrophysics*. 2022. V. 657. Art. ID A74. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141705>
5. *Chen C.-C., Liao C.-L., Smail I. et al.* An ALMA Spectroscopic Survey of the Brightest Submillimeter Galaxies in the SCUBA-2-COSMOS Field (AS2CO-SPEC): Survey Description and First Results // *Astrophysical J.* 2022. V. 929. Iss. 2. Art. ID 159. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac61df>
6. *Trinca A., Schneider R., Maiolino R. et al.* Seeking the growth of the first black hole seeds with JWST // *arXiv e-prints*. 2022. arXiv:2211.01389.
7. *Akiyama K., Alberdi A., Alef W. et al.* Event Horizon Telescope Collaboration First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // *Astrophysical J. Letters*. 2019. V. 875. Iss. 1. Art. ID L1. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>
8. 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 // *Astrophysical J. Letters*. 2022. V. 930. Iss. 2. Art. ID L12. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674>
9. *Hong X., Shen Z., An T. et al.* The Chinese space Millimeter-wavelength VLBI array-A step toward imaging the most compact astronomical objects // *Acta Astronautica*. 2014. V. 102. P. 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.05.026>
10. *Palumbo D., Johnson M., Doeleman S. et al.* Next-generation Event Horizon Telescope developments: new stations for enhanced imaging // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 2018. V. 231. Art. ID 347.21.
11. *Kudriashov V., Martin-Neira M., Barat I. et al.* System Design for the Event Horizon Imaging Experiment Using the PECMEO Concept // *Chinese J. Space Science*. 2019. V. 39. Iss. 2. Art. ID 250. <https://doi.org/10.11728/cjss2019.02.250>
12. *Raymond A.W., Palumbo D., Paine S.N. et al.* Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope // *Astrophysical J. Supplement*. 2021. V. 253. Iss. 1. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>
13. *Gurvits L.I., Paragi Z., Casasola V. et al.* THEZA: TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics // *Experimental Astronomy*. 2021. V. 51. Iss. 3. P. 559–594. <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09714-y>
14. *Gurvits L.I., Paragi Z., Amils R.I. et al.* The science case and challenges of space-borne sub-millimeter interferometry // *Acta Astronautica*. 2022. V. 196. P. 314–333. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.04.020>
15. *Kardashev N.S., Novikov I.D., Lukash V.N. et al.* Review of scientific topics for the Millimetron space observatory // *Physics Uspekhi*. 2014. V. 57. Iss. 12. P. 1199–1228. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201412c.1319>
16. *Novikov I.D., Likhachev S.F., Shchekinov Yu.A. et al.* Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization // *Physics Uspekhi*. 2021. V. 64. Iss. 4. P. 386–419. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038898>
17. *Artemenko Yu.N., Balega Yu. Yu., Baryshev A.M. et al.* New stage of the Suffa submm observatory in Uzbekistan project // *Proc. ISSTT 2019–30th Intern. Symp. Space Terahertz Technology*. 2019. P. 196–201.
18. *Bubnov G., Vdovin V., Khaikin V. et al.* Analysis of variations in factors of specific absorption of subterahertz waves in the Earth's atmosphere // *7th All-Russian Microwave Conf. (RMC)*. 2020. P. 229–232. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312314>
19. *Balega Yu., Bubnov G., Glyavin M. et al.* Atmospheric Propagation Studies and Development of New Instrumentation for Astronomy, Radar, and Telecommunication Applications in the Subterahertz Frequency Range // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. Iss. 11. Art. ID 5670. <https://doi.org/10.3390/app12115670>
20. *Abramovici A., Althouse W.E., Drever R.W.P. et al.* LIGO: The Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory // *Science*. 1992. V. 256. Iss. 5055. P. 325–333. <https://doi.org/10.1126/science.256.5055.325>

21. *Caron B., Dominjon A., Drezzen C. et al.* The Virgo interferometer // *Classical and Quantum Gravity*. 1997. V. 14. Iss. 6. P. 1461–1469. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/14/6/011>
22. *Danzmann K. and LISA Study Team.* LISA – an ESA cornerstone mission for a gravitational wave observatory // *Classical and Quantum Gravity*. 1997. V. 14. Iss. 6. P. 1399–1404. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/14/6/002>
23. *Akiyama K, Alberdi A, Alef W. et al.* First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation // *Astrophysical J. Letters*. 2019. V. 875. Iss. 1. Art. ID L2. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0c96>
24. *Andrianov A., Chernov S., Girin I. et al.* Flares and their echoes can help distinguish photon rings from black holes with space-Earth very long baseline interferometry // *Phys. Rev. D*. 2022. V. 105. Iss. 6. Art. ID 063015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.063015>
25. *Tiede P., Johnson M. D., Pesce D. W. et al.* Measuring Photon Rings with the ngEHT // *arXiv e-prints*. 2022. arXiv:2210.13498.
26. *Mortlock D.J., Warren S.J., Venemans B.P. et al.* A luminous quasar at a redshift of $z=7.085$ // *Nature*. 2011. V. 474. Iss. 7353. P. 616–619. <https://doi.org/10.1038/nature10159>
27. *Banados E., Venemans B.P., Mazzucchelli C. et al.* An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5 // *Nature*. 2018. V. 553. Iss. 7689. P. 473–476. <https://doi.org/10.1038/nature25180>
28. *Volonteri M.* The Formation and Evolution of Massive Black Holes // *Science*. 2012. V. 337. Iss. 6094. Art. ID 544. <https://doi.org/10.1126/science.1220843>
29. *Tal A., Priyamvada N.* Rapid growth of seed black holes in the early universe by supra-exponential accretion // *Science*. 2014. V. 345. Iss. 6202. P. 1330–1333. <https://doi.org/10.1126/science.1251053>
30. *Woods T.E., Agarwal B., Bromm V. et al.* Titans of the early Universe: The Prato statement on the origin of the first supermassive black holes // *Publ. Astronomical Society of Australia*. 2019. V. 36. Art. ID e027. <https://doi.org/10.1017/pasa.2019.14>
31. *Hickox R. C., Alexander D.M.* Obscured Active Galactic Nuclei // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2018. V. 56. P. 625–671. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-051803>
32. *Spinoglio L., Alonso-Herrero A., Armus L. et al.* Galaxy Evolution Studies with the SPace IR Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA): The Power of IR Spectroscopy // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. 2017. V. 34. Art. ID e057. <https://doi.org/10.1017/pasa.2017.48>
33. *Humphreys E. M. L., Vlemmings W. H. T., Impellizzeri C. M. V. et al.* Detection of 183 GHz H₂O megamaser emission towards NGC4945 // *Astronomy and Astrophysics*. 2016. V. 592. Art. ID L13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629168>
34. *Hagiwara Y., Horiuchi S., Doi A. et al.* A Search for Submillimeter H₂O Masers in Active Galaxies: The Detection of 321 GHz H₂O Maser Emission in NGC4945 // *Astrophysical J.* 2016. V. 827. Iss. 1. Art. ID 69. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/827/1/69>
35. *Researchers Use NRAO Telescope to Study Formation of Chemical Precursors to Life* // *National Radio Astronomy Observatory Press Release*. August 2006. <https://www.nrao.edu/pr/2006/gbtmolecules>.
36. *McGuire B.A., Loomis R.A., Burkhardt A.M. et al.* Detection of two interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons via spectral matched filtering // *Science*. 2021. V. 371. Iss. 6535. P. 1265–1269. <https://doi.org/10.1126/science.abb7535>
37. *Plavin A.V., Kovalev Y.Y., Kovalev Yu.A. et al.* Directional Association of TeV to PeV Astrophysical Neutrinos with Radio Blazars // *Astrophysical J.* 2021. V. 908. Iss. 2. Art. ID 157. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abceb8>
38. *Abbott B.P., Abbott R., Abbott T.D. et al.* Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB170817A // *Astrophysical J. Letters*. 2017. V. 848. Iss. 2. Art. ID L13. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c>
39. *Cogdell J.R., McCue J.J.G., Kalachev P.D. et al.* High-resolution millimeter reflector antennas // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1970. V. 18. P. 515–529. <https://doi.org/10.1109/TAP.1970.1139725>
40. *Антюфеев А. В., Зубрин С. Ю., Мышенко В. В. и др.* Исследование параметров антенны РТ-22 КРАО на длине волны 3.42 мм // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2009. Т. 14. № 4. С. 345–352.
41. *Balega Yu. Yu., Bataev D.K., Bubnov G.M. et al.* Direct Measurements of Atmospheric Absorption of Subterahertz Waves in the Northern Caucasus // *Physics-Doklady*. 2022. V. 67. Iss. 1. P. 1–4. <https://doi.org/10.1134/S1028335822010013>
42. *Liebe H.J., Rosenkranz P.W., Hufford G.A.* Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum – New laboratory measurements and line parameters // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1992. V. 48. Iss. 5–6. P. 629–643. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(92\)90127-P](https://doi.org/10.1016/0022-4073(92)90127-P)
43. *Paiella A., Ade P.A.R., Battistelli E.S. et al.* In-Flight Performance of the LEKIDs of the OLIMPO Experiment // *J. Low Temperature Physics*. 2020. V. 199. Iss. 1–2. P. 491–501. <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02372-y>
44. *Rioja M.J., Dodson R., Asaki Y.* The Transformational Power of Frequency Phase Transfer Methods for ngEHT // *Galaxies*. 2023. V. 11. Iss. 1. Art. ID. 16. <https://doi.org/10.3390/galaxies11010016>
45. *Mimoun D., Wiczorek M.A., Alkalai L. et al.* Farside explorer: unique science from a mission to the far-

- side of the Moon // *Experimental Astronomy*. 2012. V. 33. Iss. 2–3. P. 529–585. <https://doi.org/10.1007/s10686-011-9252-3>
46. Zarka P., Bougeret J.-L., Briand C. et al. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon // *Planetary and Space Science*. 2012. V. 74. Iss. 1. P. 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.08.004>
 47. Sachkov M., Shugarov A., Schmagin V. et al. The concept of lunar-based astrophysical telescope for International Lunar Research Station (ILRS) // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. 2022. V. 12181. Art. ID. 121812V. <https://doi.org/10.1117/12.2629619>
 48. Jester S., Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets // *New Astronomy Reviews*. 2009. V. 53. Iss. 1–3. P. 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2009.02.001>
 49. Lazio J., Carilli C., Hewitt J. et al. The lunar radio array (LRA) // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. UV/ Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts IV*. 2009. V. 7436. Art ID. 74360I. <https://doi.org/10.1117/12.827955>
 50. Wolt M.K., Aminaei A., Zarka P. et al. Radio astronomy with the European Lunar Lander: Opening up the last unexplored frequency regime // *Planetary and Space Science*. 2012. V. 74. Iss. 1. P. 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.09.004>
 51. Гафаров А. А., Долгуничев К. Д. Обеспечение радиационной безопасности космических радиоизотопных генераторов // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2016. Т. 32. № 2. С. 78–84.
 52. Martin-Neira M., Li W., Andres-Beivide A. et al. “Cookie”: A Satellite Concept for GNSS Remote Sensing Constellations // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. V. 9. Iss. 10. P. 4593–4610. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2585620>
 53. Kudriashov V., Falcke H., Gurvits L. et al. System design progress in the event horizon imaging using the concept of space-to-space VLBI from medium earth orbits // *Proc. 42nd COSPAR Scientific Assembly*. 2018. V. 42. Art. ID. E1.8–17–18
 54. Kudriashov V., Martin-Neira M., Barat I. et al. System Design for the Event Horizon Imaging Experiment Using the PECMEO Concept // *Chinese J. Space Science*. 2019. V. 39. Iss. 2. P. 250–266. <https://doi.org/10.11728/cjss2019.02.250>
 55. Roelofs F., Falcke H., Brinkerink C. et al. Simulations of imaging the event horizon of Sagittarius A* from space // *Astronomy and Astrophysics*. 2019. V. 625. Art. ID. A124. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732423>
 56. Kudriashov V., Martin-Neira M., Roelofs F. Event Horizon Imager (EHI) mission concept utilizing medium Earth orbit sub-mm interferometry // *Chinese J. Space Science*. 2021. V. 41. Iss. 2. P. 211–233. <https://doi.org/10.11728/cjss2021.02.211>
 57. Gurvits L.I., Paragi Z., Casasola V. et al. THEZA: TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics // *Experimental Astronomy*. 2021. V.51. Iss. 3. P. 559–594. <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09714-y>
 58. Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Shchurov M.A. et al. High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around Lagrange point L2 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. V. 511. P. 668–682. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac079>
 59. Golubev E.S., Kotsur E.K., Arkhipov M. Yu. et al. Primary mirror panels of the Millimetron Space Observatory // *Proc. SPIE. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*. 2020. V. 11451. Art ID. 114510K. <https://doi.org/10.1117/12.2562838>
 60. Yusov A.V., Kozlov S.A., Ustinova E.A. et al. Testing high-precision electromechanical actuators used for adjustment of deployable antennas of astronomy space missions // *Cryogenics*. 2021. V. 118. Art. ID. 103346. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2021.103346>
 61. Демидов Н.А., Беляев А.А., Поляков В.А. и др. Бортовой водородный стандарт частоты для космической обсерватории «Миллиметрон» // *Измерительная техника*. 2018. Т. 8. С. 36–39. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it-2018-8-36-39>
 62. de Graauw T., Helmich F.P., Phillips T.G. et al. The Herschel-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI) // *Astronomy and Astrophysics*. 2010. V. 518. Art. ID. L6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014698>
 63. Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths // *Reviews Modern Physics*. 1985. V. 57. Iss. 4. P. 1055–1113. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.1055>
 64. Goltsman G.N., Semenov A.D., Gousev Y.P. et al. Sensitive picosecond NbN detector for radiation from millimeter wavelengths to visible light // *Superconductor Science and Technology*. 1991. V. 4. Iss. 9. Art. ID. 453. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/4/9/020>
 65. Wootten A., Thompson R.A. The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array // *Proceedings of the IEEE*. 2009. V. 97. Iss. 8. P. 1463–1471. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2020572>
 66. Chenu J.-Y., Navarrini A., Bortolotti Y. et al. The Front-End of the NOEMA Interferometer // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. V. 6. Iss. 2. P. 223–237. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2525762>
 67. de Lange G., Birk M., Boersma D. et al. Development and characterization of the superconducting in-

- tegrated receiver channel of the TELIS atmospheric sounder // *Superconductor Science and Technology*. 2010. V. 23. Iss. 4. Art. ID. 045016. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045016>
68. *Hesper R., Khudchenko A., Baryshev A.M. et al.* A High-Performance 650-GHz Sideband-Separating Mixer—Design and Results // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2017. V. 7. Iss. 6. P. 686–693. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2017.2758260>
69. *Kojima T., Kroug M., Uemizu K. et al.* Performance and Characterization of a Wide IF SIS-Mixer-Preamplifier Module Employing High-J c SIS Junctions // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2017. V. 7. Iss. 6. P. 694–703. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2017.2758260>
70. *Baryshev A.M., Hesper R., Mena F.P. et al.* The ALMA Band 9 receiver. Design, construction, characterization, and first light // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. V. 577. Art. ID. A129. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425529>
71. *Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M. et al.* Low noise and wide bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers // *Applied Physics Letters*. 2011. V. 98. Iss. 3. Art. ID. 033507. <https://doi.org/10.1063/1.3544050>
72. *Putz P., Honingh C.E., Jacobs K. et al.* Terahertz hot electron bolometer waveguide mixers for GREAT // *Astronomy & Astrophysics*. 2012. V. 542. Art. ID. L2. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201218916>
73. *Risacher C., Güsten R., Stutzki J. et al.* First Supra-THz Heterodyne Array Receivers for Astronomy with the SOFIA Observatory // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. V. 6. Iss. 2. P. 199–211. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2508005>
74. *Khudchenko A., Pavelev D.G., Vaks V.L. et al.* Overview of Techniques for THz QCL phase-locking // *European Physical J. Web of Conferences*. 2018. V. 195. Art. ID. 04003. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819504003>
75. *Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B. et al.* Superconducting integrated receiver for TELIS // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2005. V. 15. Iss. 2. P. 960–963. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.850138>
76. *Khudchenko A., Baryshev A.M., Rudakov K.I. et al.* High-Gap Nb-AlN-NbN SIS Junctions for Frequency Band 790–950 GHz // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. V. 6. Iss. 1. P. 127–132. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2504783>
77. *Gusten R., Booth R.S., Cesarsky C. et al.* APEX: the Atacama Pathfinder Experiment // *Ground-based and Airborne Telescopes*. 2006. V. 6267. Art. ID. 626714. <https://doi.org/10.1117/12.670798>
78. *Yagoubov P., Mroczkowski T., Belitsky V. et al.* Wideband 67–116 GHz receiver development for ALMA Band 2 // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V. 634. Art. ID. A46. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936777>
79. *Rudakov K.I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V. et al.* THz Range Low-Noise SIS Receivers for Space and Ground-Based Radio Astronomy // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. Iss. 21. <https://doi.org/10.3390/app112110087>