

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.39 + 520.272.5

КОНЦЕПЦИЯ РАДИОМЕТРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ОКНЕ 1.3 ММ

© 2024 г. В. Ф. Вдовин^а, А. М. Зарезин^б, П. М. Землянуха^а, А. В. Котов^а,
И. В. Леснов^а, А. С. Марухно^а, К. В. Минеев^{а, *}, В. М. Муравьев^б,
В. И. Носов^а, В. А. Сальков^а

^аИнститут прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^бИнститут физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
Россия, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, 2

*e-mail: mineevkv@mail.ru

Поступила в редакцию 23.07.2024 г.

После доработки 07.08.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

Представлена концепция неохлаждаемого субтерагерцевого радиометра, предназначенного для оценки атмосферного поглощения в окне прозрачности атмосферы 1.3 мм, работоспособного в условиях горных экспедиций. Оценка атмосферного поглощения осуществляется на основе радиометрических измерений яркостной температуры неба. Проведен сравнительный анализ двух типовых схем реализации приемного тракта радиометра (супергетеродинная схема и схема прямого усиления) на современной субтерагерцевой электронно-компонентной базе; сделаны оценки шумовой температуры и флуктуационной чувствительности обеих схем. Приведены результаты проектирования рупорно-линзовой антенны с диаграммой направленности в 3° по уровню –3 дБ на частоте 230 ГГц. Описана общая структура высокочастотной части радиометра, включая конструктивные особенности, необходимые для обеспечения непрерывных измерений в широком диапазоне климатических условий.

DOI: 10.31857/S0032816224050197 EDN: ERMXVW

1. ВВЕДЕНИЕ

Нарастающий интерес мирового радиоастрономического сообщества к наземным наблюдениям в субтерагерцевом (субТГц) диапазоне частот, а именно, в окнах прозрачности атмосферы 1.3 мм и 0.8 мм, где находится множество спектральных линий атомов и молекул, стимулирует к поиску местности, подходящей для строительства новой отечественной субТГц-радиообсерватории. Прозрачность атмосферы в субТГц-диапазоне, в первую очередь, определяется количеством осажденных паров воды, меньших в засушливом климате и на больших высотах от уровня моря. Умеренный климат на большей части территорий Российской Федерации не предполагает наличия усло-

вий, пригодных для размещения современного субТГц-инструмента. Оценки атмосферного поглощения на возвышенностях высотой более 2000 м, сделанные командой проекта “Телескоп горизонта событий” (ТГС) на основе десятилетней ретроспективы метеорологических данных MERRA2 [1], не включили в перечень площадок ТГС нового поколения ни одного подходящего места в РФ, где бы мог быть размещен телескоп, работающий в окнах прозрачности 1.3 мм и 0.8 мм, способный присоединиться к проекту ТГС в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой. Однако в российском сегменте северо-восточной Евразии есть целый ряд мест, как обладающих потенциально привлекательным астроклиматом, так и выгодно допол-

няющих поверхность Земли с точки зрения заполнения UV -плоскости радиоинтерферометра. Среди площадок, где уже анонсировано строительство радиотелескопов, в ТГС нового поколения из близких к России пока представлена только Суффа в Узбекистане, где расположена строящаяся Международная радиоастрономическая обсерватория Суффа. Обсерватория Суффа начала строиться в 80-х годах с радиотелескопа РТ-70 с диаметром основного зеркала 70 м, но стройка была остановлена и заморожена в 1990 г. В декабре 2022 года на Российско-Узбекистанском научном семинаре [2] были намечены планы по возобновлению строительства адаптивного 70-метрового радиотелескопа миллиметрового диапазона, который, по прогнозам президента Академии наук Республики Узбекистан академика Б.С. Юлдашаева, может повысить на 15% разрешающую способность ТГС. До настоящего времени стройка так и не возобновлена. Стоит также упомянуть, что у РФ имеются два радиотелескопа-предшественника похожей конструкции: в селе Галёнки (Приморский край) и в Евпатории (Крым), но они могут работать на частотах лишь до 40 ГГц и они изначально были спроектированы на более низкие частоты. Модернизация их приемных систем на более высокочастотный диапазон нецелесообразна, во-первых, ввиду того, что требования к среднеквадратическому отклонению (СКО) поверхности зеркала возрастают, а, во-вторых, из-за большого влагосодержания воздуха, характерного для указанных мест.

Оценка перспективных площадок на основе реанализа климатических моделей по спутниковым данным несет в себе большую неопределенность за счет низкого пространственного разрешения (до 50 км), неизбежно приводящего к интегральному усреднению показателей прозрачности атмосферы на возвышенности и у подножия высокогорья. В работах [3–5] показано, что коэффициенты корреляции астроклиматических параметров атмосферы, измеренных разными способами и полученных в результате реанализа, различны и тем меньше, чем более изрезана горная местность. Поэтому для формирования достоверной картины необходимо получать точечные оценки в месте предполагаемого размещения обсерватории с помощью радиометрических измерений.

В докладе [6] мы отмечали, что перспективными для строительства субТГц-обсерватории

являются горы Кавказа в районах Северной Осетии и Дагестана [7]. Благодаря большому числу ясных дней и низкому уровню осадков интересен склон горы Маяк (2350 м) в окрестности селения Гуниб (Дагестан), где в 2022 году был проведен полугодовой непрерывный цикл измерений [8]. Привлекательно выглядят площадки в Сибири, гора Мус-Хая (2959 м) в Якутии [9] и пик Хулугайша (3015 м) в Саянах, где в мае 2024 г. завершился полугодовой цикл исследований атмосферного поглощения в окне прозрачности 3 мм, и в соответствии с предобработанными данными можно ожидать поглощение на уровне 0.05 Нп/км, что весьма близко к результатам оценок на плато Суффа [10]. Тем не менее экстраполяционный пересчет поглощения окна прозрачности 3 мм на востребованные для ТГС окна в 1.3 мм и 0.8 мм, например через известную рефракционную модель Ханса Либе [11], сопряжен с большой неопределенностью вертикального профиля физических параметров атмосферы, поэтому единственным надежным источником являются прямые радиометрические измерения яркостной температуры неба в интересующем частотном диапазоне. Идеальный вариант – организация измерений с применением сверхпроводниковых болометрических детекторов, имеющих мощность эквивалентного шума (NEP) не более 10^{-17} Вт/Гц^{1/2} [12].

В апреле 2024 года в Нижнем Архызе состоялось Всероссийское рабочее совещание “Разработка прототипа отечественной субтерагерцевой обсерватории в составе оптического телескопа”, подготовленное Специальной астрофизической обсерваторией Российской академии наук, посвященное практическому внедрению приемной системы на основе криогенных СИНИС-детекторов [13] на оптический инструмент “Большой Телескоп Альт-Азимутальный” [14] с целью проведения исследований в субТГц-диапазоне. Однако габаритное и сложное в обслуживании криовакуумное оборудование [15], необходимое для работы сверхпроводниковых болометров, изначально не приспособлено к условиям горных экспедиций, поэтому, в первую очередь, требуется разработка портативного неохлаждаемого радиометра, позволяющего проводить оценку атмосферного поглощения непосредственно в окне прозрачности 1.3 мм с перспективой последующего расширения его функционала на окно 0.8 мм.

В научной программе будущей космической обсерватории “Миллиметр” (“Спектр-М”) [16] предполагается работа в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой с наземными субТГц-станциями. Однако российская радиоастрономия объективно отстает от мировых тенденций (в России на обширной территории нет ни одного радиотелескопа, работающего в субТГц-диапазоне). В обзорной статье [17] авторы проекта отмечают, что изготовление и размещение субТГц-антенной решетки на территории РФ станет отправной точкой для создания новых и отработки уже существующих технологий. Это еще раз подтверждает актуальность и своевременность разработки субТГц-технических средств для оценки прозрачности атмосферы.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования радиометра является собственное излучение (яркостная температура) атмосферы в окне прозрачности 1.3 мм. Радиометр должен регистрировать слабое шумовое электромагнитное излучение (со спектром, близким к излучению абсолютного черного тела) внутри определенного телесного угла с установленного пространственного направления в заданной полосе частот, мощность которого, с учетом формулы Найквиста, определяется по формуле

$$P = kT_A \Delta f, \quad (1)$$

где T_A – антенная температура, эквивалентная яркостной температуре объекта наблюдения, k – постоянная Больцмана, Δf – полоса регистрируемых радиометром частот.

Диапазон антенных температур можно рассматривать от фоновой температуры окружающей среды $T_A = 300$ К, характерной для случая плотной облачности и/или высокой влажности, до $T_A = 10$ К, соответствующей почти идеальному (сухому) астроклимату высоко в горах (или на летательном аппарате). Фундаментальный предел характеризуется величиной $T_A = 2.7$ К, соответствующей яркостной температуре реликтового фона. Ограничения на ширину частотной полосы Δf накладывает, во-первых, ширина самого окна прозрачности атмосферы 1.3 мм (210–280 ГГц), граничащая с широкими и интенсивными линиями поглощения воды, а во-вторых, полоса пропускания самого при-

емного тракта, включая модулятор и антенно-фидерную систему. И если поиск оптимального варианта антенной системы является чисто технической задачей, требующей отдельного внимания к конструктивным особенностям, то вопросы выбора схемотехнического решения неохлаждаемого приемного тракта в субТГц-диапазоне частот, а также реализация модуляционного режима как наиболее предпочтительного, позволяющего устранить влияние нестабильности коэффициента усиления при длительных измерениях, являются первостепенными.

Кроме всего перечисленного выше, также необходимо предусмотреть возможность автономной (от бензогенератора или от аккумуляторных батарей) работы в сложных метеорологических условиях. Суточный ход температуры на горных вершинах может претерпевать изменения более 30°C, а за полный годовой сезон от –40 до +40°C. И не столь критичны температурные перепады, как выпадение конденсата и намерзание инея.

По своим техническим возможностям ближайшим аналогом является радиометр RPG-TAU225 (Radiometer Physics, Германия), работающий в области 225 ГГц, построенный по супергетеродинной схеме с полосой промежуточных частот (ПЧ) 4 ГГц. 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, которое может различаться в несколько раз 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-TAU225 находит применение в составе уже действующих обсерваторий для мониторинга текущего объективного состояния астроклимата, но не является мобильным и тем более полевым решением. Предлагаемый авторами настоящей статьи инструмент, в первую очередь, предназначен для работы в экспедиционных условиях на перспективных площадках, где, как правило, еще ничего нет, в том числе и стационарной электросети.

3. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ПРИЕМНОГО ТРАКТА

Традиционно приемники микроволновых радиометров строятся по двум типовым схемам: приемник прямого усиления без преобразования частоты и супергетеродинный приемник с преобразованием сигнала в область ПЧ. Иногда реализуется и преобразование на нулевую частоту (гомодинная схема), но для высокочувствительных измерений малых уровней сигналов она наименее предпочтительна.

В радиометре МИАП-2 (двухканальный микроволновый измеритель атмосферного поглощения) [18], с помощью которого были произведены обозначенные во Введении измерения [7–10], трехмиллиметровый приемный канал реализован по схеме прямого усиления с шумовой температурой в области 1300 К, а двухмиллиметровый канал содержит супергетеродинный приемник с шумовой температурой 5800 К. Эти показатели на текущий момент далеко не рекордные. В нашей недавней разработке [19] общая шумовая температура радиометра с учетом антенной системы и модулятора составила значение чуть менее 1000 К, при этом сам приемный модуль PMMW10–0001 (Farran, Ирландия) имел шумовую температуру около $T_{rx} = 450$ К, в то время как в диапазоне окна прозрачности 1.3 мм у аналогичного модуля данный производитель может гарантировать только $T_{rx} = 2000$ К.

Для начальной оценки собственной шумовой температуры гетеродинной схемы можно ограничиться эквивалентными шумами преобразовательного элемента (смесителя), численно равными потерям на преобразование K_{SSB} в предположении идеального гетеродина, фазовыми шумами которого можно пренебречь. Регистрация сигнала ПЧ осуществляется высокоскоростным аналого-цифровым преоб-

разователем (АЦП), полоса которого соответствует всей полосе ПЧ. В табл. 1 представлены типовые характеристики коммерчески доступных серийно выпускаемых субТГц-смесителей, детекторов Шоттки, широкополосных малошумящих усилителей (МШУ) и вентилях от ведущих мировых производителей по состоянию на второй квартал 2024 г.

Возьмем из табл. 1 смеситель с минимальным $K_{SSB} = 8$ дБ, два идентичных типовых МШУ в тракте ПЧ, работающих в диапазоне от 0.1 до 20 ГГц с коэффициентом шума $NF = 1.5$ дБ и коэффициентом усиления $G = 20$ дБ, тогда для случая идеального согласования в соответствии с формулой Фрииса

$$T_{rx} = (L - 1)T_0 + L \left(T_1 + \frac{T_1}{K_1} + \frac{T_2}{K_1 K_2} + \dots + \frac{T_N}{K_1 K_2 \dots K_N} \right), \quad (2)$$

где $L = 10^{0.1K_{SSB}}$ – потери на преобразование в смесителе, $K_i = 10^{0.1G_i}$ и $T_i = T_0(10^{0.1NF_i} - 1)$ – коэффициенты шума и шумовые температуры МШУ в тракте ПЧ для $i = 1, 2, \dots, N$, $T_0 = 290$ К – температура окружающей среды, взятая равной номинальной температуре, собственная шумовая температура супергетеродинного субТГц-приемника составляет примерно $T_{rx} \approx 2300$ К. Данное значение является нашей оценкой сверху.

Предельная флуктуационная чувствительность модуляционного радиометра рассчитывается по формуле

$$\Delta T = \sqrt{2} \frac{T_A + T_{rx}}{\sqrt{\Delta F \tau}}, \quad (3)$$

где T_A – антенная температура, ΔF – рабочая полоса частот, τ – время интегрирования (накопления) сигнала, а множитель $\sqrt{2}$ характеризует снижение чувствительности модуляционной схемы по сравнению с компенсационной.

Таблица 1. Сравнение смесителей

Производитель	Страна	Модель	Рабочий диапазон частот, ГГц	Потери на преобразование, дБ	Диапазон ПЧ, ГГц	Диапазон частот гетеродина, ГГц
МВЭЙВ	Россия	MWAVE-MIX-220330	220–330	–9 ÷ –11	0–20	220–330
Radiometer Physics	Германия	RPG SHM 170-260	170–260	–8 ÷ –10	0–18	85–130
Farran	Ирландия	SPM-04-0001	180–250	–8 ÷ –10	0.01–4	90–125
AT Microwave	Китай	AT-SHM-190240	190–240	–11 ÷ –13	0–40	95–120

При условии $\Delta F = \Delta f = 8$ ГГц с учетом зеркального канала, температуры $T_A = 50$ К, характерной для умеренной облачности, и $\tau = 1$ с получаем, что предельная флуктуационная чувствительность субТГц-модуляционного радиометра, пересчитанная к входу супергетеродинного приемника, составляет $\Delta T = 40$ мК.

Для оценки потенциальных возможностей схемы прямого усиления необходимо начать со стороны детекторной части, пересчитав уровни сигналов ко входу приемника, тем самым определив количество требуемых каскадов усиления из условия

$$P_{D_{\max}} \approx 10 \lg \left(\frac{P_{out}}{10^{-3}} \right), \quad (4)$$

где $P_{D_{\max}}$ [дБм] – максимальный уровень линейного участка детектора, P_{out} [Вт] – мощность на выходе усилительной секции из N каскадов, определяемая по формуле

$$P_{out} = k\Delta f \left[T_A \frac{K_1 K_2 \dots K_N}{L_1 L_2 \dots L_{N-1}} + T_1 \frac{K_1 K_2 \dots K_N}{L_1 L_2 \dots L_{N-1}} + T_{L_1} \frac{K_2 \dots K_N}{L_1 L_2 \dots L_{N-1}} T_2 \frac{K_2 \dots K_N}{L_2 \dots L_{N-1}} + \dots \dots + T_{L_{N-1}} \frac{K_N}{L_{N-1}} + T_N K_N \right], \quad (5)$$

где $K_i = 10^{0.1G_i}$ и $T_i = T_0(10^{0.1NF_i} - 1)$ для $i = 1, 2, \dots, N$ – коэффициенты шума и шумовые температуры МШУ; $L_j = 10^{0.1L_j}$ и $T_{L_j} = (L_j - 1)T_0$ для $j = 1, 2, \dots, N-1$ – вносимые вентилями потери и их аддитивные вклады в собственную шумовую температуру приемника.

Руководствуясь табл. 2–4, выберем детектор с чувствительностью $S = 2000$ мВ/мВт и максимальным уровнем линейного участка $P_{D_{\max}} = -20$ дБм, установим коэффициенты усиления МШУ $G = 15$ дБ с коэффициентами шума $NF = 8$ дБ и используем развязывающие вентили с вносимыми потерями $IL = 2.3$ дБ. Для

Таблица 2. Сравнение детекторов Шоттки

Производитель	Страна	Модель	Рабочий диапазон частот, ГГц	Чувствительность, мВ/мВт	Динамический диапазон, дБм
Smiths Interconnect	США	DET-04	170–260	600	< -20
TeraHUB	Китай	M-210ZBD	120–320	800	< -20
VDI	США	WR4.3ZBD-F	170–260	1900	< -25
AT Microwave	Китай	AT-PD-210260T	210–260	2000	-50 ÷ -20

Таблица 3. Сравнение МШУ

Производитель	Страна	Модель	Рабочий диапазон частот, ГГц	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент шума, дБ
SAGE Millimeter	США	SBL-2142641585-0404-E1	210–260	13–15	8–9
Radiometer Physics	Германия	RPG LNA 210-260	210–260	15–20	7–10
TeraHUB	Китай	M-195LNA	195–230	20–22	7.7–8.5
AT Microwave	Китай	AT-LNA-210260-1508E	210–260	13–15	8–9

Таблица 4. Сравнение вентиляей

Производитель	Страна	Модель	Рабочий диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	Развязка, дБ
Micro Harmonics	США	FR43	170–260	1.7–3.2	18–22
Mi-Wave	США	115H/387	170–260	5	25
SAGE Millimeter	США	STF-04-S1	170–260	4	30
Smiths Interconnect	США	WBI-04	170–260	2.5	20

увеличения флуктуационной чувствительности ориентируемся на всю рабочую полосу регистрации $\Delta f = 40$ ГГц. При таких параметрах потребуется три усилительных каскада.

Если в формуле (5) выражение в квадратных скобках разделить на коэффициент передачи, стоящий при T_A , то оставшая часть будет характеризовать собственную шумовую температуру приемника прямого усиления:

$$T_{rx} = T_1 + \frac{T_{L_1}}{K_1} + \frac{T_2}{K_1} L_1 + \frac{T_{L_2}}{K_1 K_2} L_1 + \dots$$

$$\dots + \frac{T_{L_{N-1}}}{K_1 K_2 \dots K_{N-1}} L_1 L_2 \dots L_{N-1} +$$

$$+ \frac{T_N}{K_1 K_2 \dots K_N} L_1 L_2 \dots L_{N-1}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (6) собственная шумовая температура субТГц-приемника прямого усиления будет равна примерно $T_{rx} \approx 1700$ К, а предельная флуктуационная чувствительность модуляционного субТГц-радиометра для $T_A = 50$ К и $\tau = 1$ с, пересчитанная ко входу приемника прямого усиления, составит $\Delta T = 15$ мК.

Из наших оценок следует, что оба варианта пригодны для построения радиометра, предназначенного для анализа прозрачности атмосферы в окне 1.3 мм, но благодаря меньшему количеству субТГц-узлов супергетеродинная схема оказывается экономически более целесообразной.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СУБТГЦ-СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМНИКА

В эксперименте по определению собственной шумовой температуры супергетеродинного приемника с центральной частотой $f_0 = 230$ ГГц и полосой приема 8 ГГц (с учетом зеркального канала) использовалась элементная база компании МВЭЙВ (Россия, Черноголовка – www.emwave.ru). Основная схема измерений выходной мощности сигнала соответствовала представленной на рис. 1. Мощность сигнала на выходе приемника измерялась несколькими способами:

- на выходе каскада усилителей ПЧ измерителем СВЧ-мощности Agilent E4418B с детекторной головкой HP 8481A (рис. 2);
- на выходе каскада усилителей ПЧ высокоскоростным осциллографом Rohde & Schwarz RTO 1044.

Входным сигналом для исследуемого приемника являлся широкополосный тепловой шум от модели чернотельной нагрузки, представляющей собой пенопластовую кювету с вспененным графитсодержащим материалом, находящимся при температурах окружающей среды $T_{hot} = (295 \pm 1)$ К и жидкого азота $T_{cold} = (77.0 \pm 0.5)$ К.

В качестве задающего генератора опорного СВЧ-сигнала для умножителя частоты на 18 (модуля расширения частотного диапазона МВЭЙВ 220–330 ГГц) в канале гетеродина использовался генератор HP 83623B, частота которого устанавливалась равной $f = 230/18$ ГГц

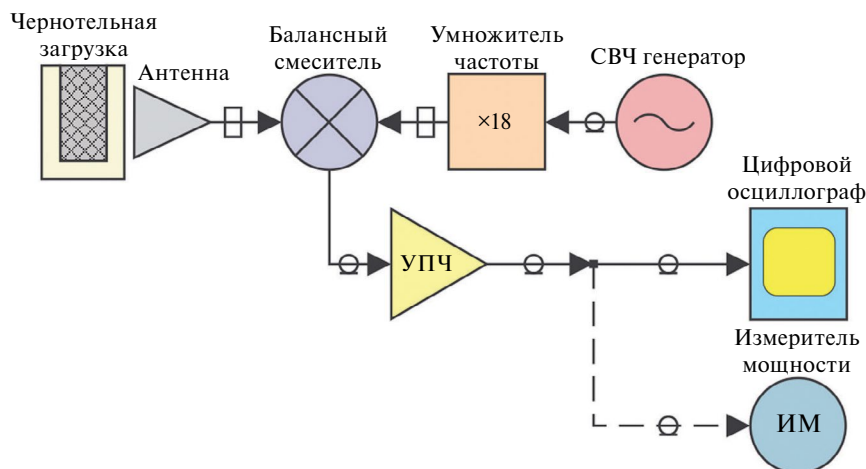


Рис. 1. Схема измерений мощности сигнала на выходе приемника.

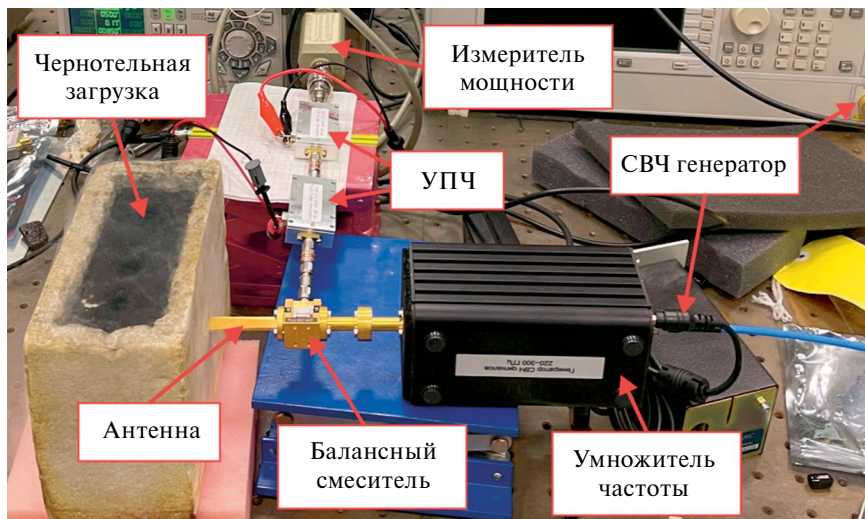


Рис. 2. Измерение выходной мощности на выходе ПЧ.

(около 12.8 ГГц) при уровне выходной мощности $P_{ref} = 7$ дБм. В тракте ПЧ на выходе смесителя использовались МШУ МВЭЙВ 10 МГц – 4 ГГц с коэффициентом шума 0.6 дБ и коэффициентом усиления 40 дБ.

Расчет собственной шумовой температуры в предположении линейности характеристики приемника проводился методом Y-фактора по формуле

$$T_N = \frac{T_{hot} - Y \cdot T_{cold}}{Y - 1}, \quad (7)$$

где

$$Y = \frac{P_{hot}}{P_{cold}}, \quad (8)$$

где P_{hot} – зарегистрированная мощность, соответствующая теплой нагрузке (чернотельная нагрузка при температуре окружающей среды), P_{cold} – зарегистрированная мощность, соответствующая холодной нагрузке (чернотельная нагрузка, залитая жидким азотом).

График зарегистрированной мощности при охлаждении чернотельной нагрузки до температуры жидкого азота представлен на рис. 3. Отклонения графика на рис. 3 от монотонно

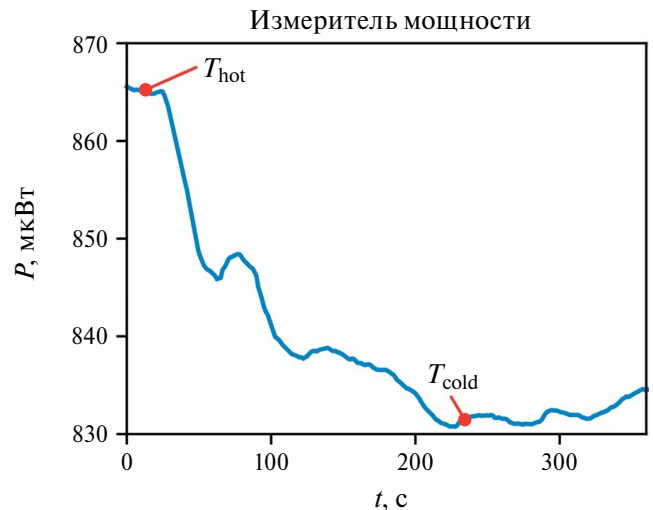


Рис. 3. Мощность на выходе ПЧ при охлаждении чернотельной нагрузки.

убывающей зависимости вызваны периодической доливкой жидкого азота в кювету. Результаты расчета шумовой температуры приведены в табл. 5.

Относительная погрешность измерения мощности, т.е. паспортная относительная погрешность головки измерителя мощности на границе рабочего диапазона полосы ПЧ приемника

Таблица 5. Результаты оценки шумовой температуры приемника при измерении мощности на ПЧ

Схема измерений	Мощность, мкВт		Y	T_N , К
	P_{hot}	P_{cold}		
Измеритель СВЧ-мощности	865 ± 1	831 ± 2	1.04	5300 ± 500
Высокоскоростной осциллограф	352 ± 3	332 ± 3	1.06	3600 ± 700

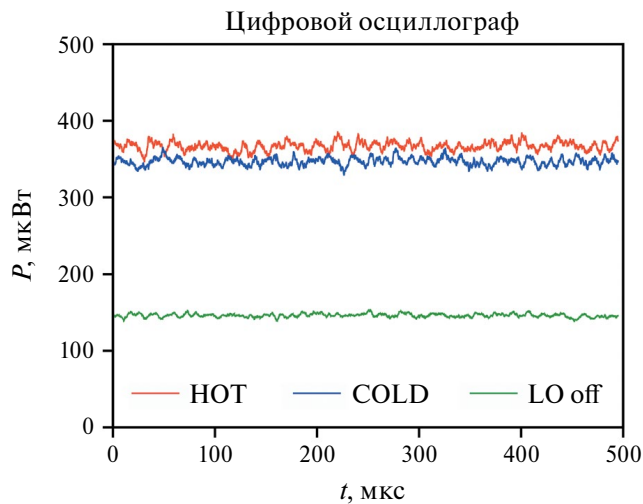


Рис. 4. Зависимость мощности сигналов на выходе ПЧ: HOT (красный) – теплая нагрузка, COLD (синий) – холодная нагрузка, LO off (зеленый) – теплая нагрузка при выключенном сигнале гетеродина, но включенных усилителях ПЧ (собственные шумы усилительного тракта ПЧ).

($f = 4$ ГГц), составляет $\delta_p = 2.8\%$. Однако абсолютные значения мощности при определении T_N менее значимы, чем их относительное изменение, поэтому за доверительный интервал при расчете погрешности определения собственной шумовой температуры приемника T_N вместо δ_p бралось СКО P , которое и указано в табл. 5 в виде абсолютной погрешности измерений.

Схема измерений выходной мощности на выходе каскада усилителей ПЧ высокоскоростным осциллографом была аналогичной той, которая представлена на рис. 2, за исключением замены головки измерителя мощности на кабельную сборку, соединенную со входом осциллографа сопротивлением 50 Ом. Параметры записи: частота дискретизации $f_d = 10$ Гвыб./с, длина реализации сигнала – 500 мкс (предел записи на один канал у используемого осциллографа).

На рис. 4 представлены зависимости мощности, взятые по всей длине реализации сигнала и усредненные в скользящем окне длительностью 5 мкс (50 тыс. точек). Результаты расчета приведены в табл. 5. Мощность в единицы СИ пересчитывалась как мощность переменного тока

$$\bar{P} = \frac{\overline{U^2}}{2 \cdot R}, \quad (9)$$

где $\overline{U^2}$ – усредненный по всей длине реализации сигнала квадрат амплитуды; $R = 50$ Ом – входное сопротивление канала осциллографа.

Согласно табл. 5, наилучшее значение шумовой температуры $T_N = 3600$ К получилось при измерении сигнала ПЧ цифровым осциллографом. Расхождения в абсолютных значениях мощности между двумя схемами измерений соответствуют вносимым потерям в дополнительной кабельной сборке, соединяющей выход ПЧ и вход осциллографа. Несоответствие шумовых температур даже с учетом доверительных интервалов объясняется большой паспортной погрешностью головки измерителя мощности δP , которой при расчете погрешности оценки шумовой температуры мы пренебрегли. Если пересчитать в абсолютные величины, то абсолютная погрешность составит $\Delta P = 24$ мВт, а это 70% всего диапазона изменения мощности на выходе ПЧ при измерении теплой и холодной нагрузок. В данном эксперименте мы руководствовались результатами, полученными с помощью высокоскоростного цифрового осциллографа, а результаты с измерителем СВЧ-мощности рекомендуем интерпретировать только как качественное подтверждение работоспособности схемы.

Спектры зарегистрированных сигналов, построенные с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), изображены на рис. 5. Зарегистрированные сигналы представляют собой случайные процессы со стремящимся к нулю интервалом корреляции, поэтому при анализе БПФ можно ограничиться прямоугольным временным окном.

Из графиков спектров следует, что основная мощность сосредоточена в полосе до 1.2 ГГц. Согласно измерениям МШУ на векторном анализаторе цепей PLANAR Кобальт С4220, это связано с повышенным коэффициентом усиления МШУ в данной области. Если ограничиться только обозначенной частотной полосой (произвести низкочастотную фильтрацию), то на результат расчета шумовой температуры это никак не повлияет, а вот значение флуктуационной чувствительности модуляционного радиометра при условии $\Delta F = 2.4$ ГГц с учетом зеркального канала, $T_A = 50$ К и $\tau = 1$ с, пересчитанное ко входу супергетеродинного приемника, составит $\Delta T = 105$ мК, что в 3 раза хуже ожидаемого.

Снизить общую шумовую температуру можно путем установки перед смесителем МШУ ($G = 15$ дБ, $NF = 8$ дБ) с вентилем ($IL = 2.3$ дБ)

сразу после антенны, тогда общая шумовая температура будет составлять $T_{rx} \approx 1700$ К, что эквивалентно схеме приемника прямого усиления. Вклад первого каскада усиления является определяющим, поэтому к нему предъявляются наиболее жесткие требования по шумовым характеристикам. Тем не менее даже с учетом того, что $\Delta F = 8$ ГГц, флуктуационная чувствительность супергетеродинной схемы будет составлять $\Delta T = 30$ мК, что в два раза хуже, чем у схемы прямого усиления.

Установка дополнительного каскада усиления приводит к общему удорожанию схемы, и затраты становятся сопоставимыми со схемой прямого усиления. Наличие объективных недостатков в виде необходимости использования гетеродина, имеющего собственные фазовые шумы, которые мы в расчете не учитывали, а также низкой флуктуационной чувствительности за счет более узкой рабочей полосы склоняет чашу весов в пользу построения субТГц-радиометра по схеме прямого усиления.

5. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СУБТГЦ-РАДИОМЕТРА С ПРИЕМНИКОМ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Прогресс в развитии технологий нанoeлектроники позволяет обеспечить стабильность коэффициента усиления современных МШУ на достаточно высоком уровне. В схеме модуляционного радиометра больше не требуется организации высокоскоростного переключения между антенной и опорной нагрузкой, что позволяет обойтись простым механическим модулятором с частотой переключения в несколько Гц. Безусловно, электронный вариант модулятора выглядит гораздо предпочтительней, но компактного и надежного широкополосного субТГц-переключателя с малыми вносимыми потерями, способного долговременно поддерживать стабильные характеристики в сложных климатических условиях, мы не выявили. Большинство технических решений имеют ослабление от 3 дБ и выше, что эквивалентно наличию в приемном тракте паразитного радиоконтрастного объекта, имеющего яркостную температуру, в несколько раз превышающую яркостную температуру объекта исследования.

Если в диапазоне длин волн 3 мм механический модулятор легко реализуется на сверхраз-

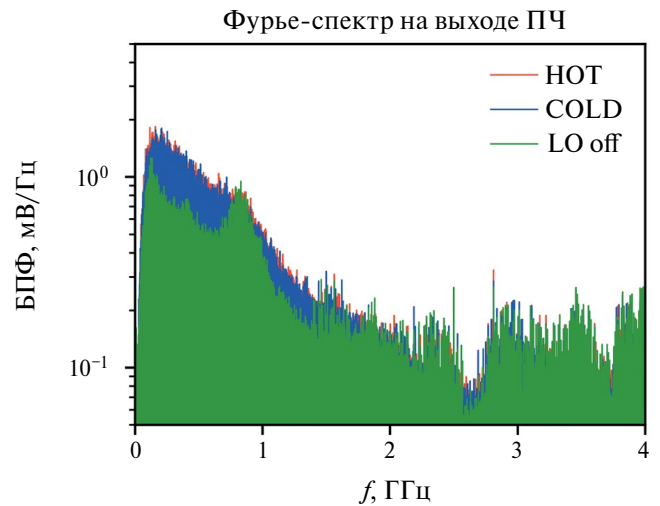


Рис. 5. Спектр сигналов на выходе ПЧ, зарегистрированных осциллографом.

мерных волноводах и непосредственно интегрируется в приемный тракт, как было сделано в одной из наших разработок [19], то на длине волны 1.3 мм подобное решение дополнительно добавит потери в квазиоптическом тракте, соизмеримые с электронным переключателем. По нашему мнению, один из возможных разумных компромиссов — размещение модулятора снаружи между антенной системой и поворотным зеркалом, обеспечивающим сканирование по зенитному углу от 0 до 90°, необходимое для определения вертикального поглощения атмосферы по методу атмосферных разрезов в предположении плоскостной атмосферы [20].

Принимая во внимание все изложенное выше, мы создали схему субТГц-радиометра для оценки прозрачности атмосферы в окне 1.3 мм, представленную на рис. 6.

Несмотря на явные преимущества широко используемых в радиоастрономии двухзеркальных антенн, позволяющих в достаточно ограниченных габаритных размерах сформировать узкую диаграмму направленности антенны (ДНА) карандашного типа, в создаваемом приборе от них было решено отказаться. Наличие области затенения контррефлектора у двухзеркальных антенн делает их применение неоптимальным в компоновке с механическим модулятором, вынесенным за пределы волноводного тракта. С одной стороны, простейшим решением является использование пирамидального или конусообразного рупора. С другой стороны, добиться у обычного рупо-

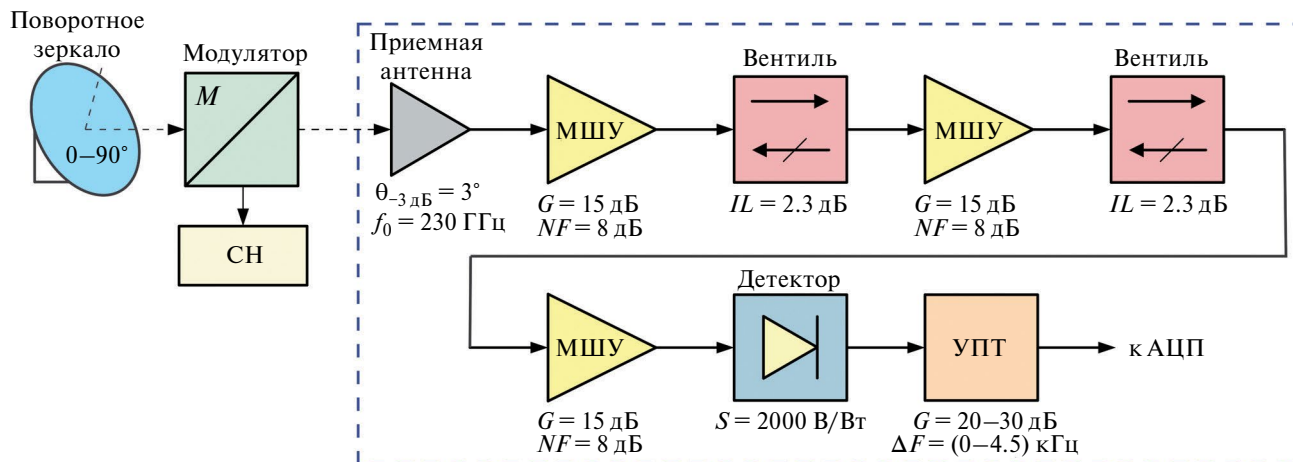


Рис. 6. Структурная схема субТГц-радиометра для оценки прозрачности атмосферы в окне 1.3 мм.

ра требуемой ширины ДНА по уровню -3 дБ в районе 3° , 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, в разумных габаритах невозможно. Одним из вариантов решения проблемы формирования узкой ДНА является использование корректирующей линзы. Удобный вариант с точки зрения изготовления – плосковыпуклая диэлектрическая линза гиперболического профиля. Для расчета эффективного облучения всей поверхности линзы использовалась методика [21], предназначенная для проектирования расфазированных рупоров с изломом. В технике подобные рупоры за счет лучшего коэффициента усиления (на $2-2.5$ дБ больше, чем у пирамидальных рупоров аналогичных размеров) нашли широкое применение в качестве облучателей главных зеркал, поэтому при расчете геометрии ставилась задача оптимального облучения поверхности линзы заданного диаметра.

Было рассмотрено три варианта исполнения рупорно-линзовой антенной системы, эскиз

которой представлен на рис. 7, с различными диаметрами линз (табл. 6). Размер питающего порта волновода взят стандартный – WR-4.3 (1.092×0.546 мм²), диэлектрическая проницаемость линзы задавалась формулой $\epsilon = 2.2$ (Фторопласт Ф4). Диаграммы направленности в обеих плоскостях для центральной частоты $f_0 = 230$ ГГц из рассматриваемого диапазона, рассчитанные в пакете электродинамического моделирования CST MWS, представлены на рис. 8, 9.

Из соображений миниатюризации общего изделия был выбран вариант антенны с линзой с фокусным расстоянием 30 мм с просветлением ее границы параллельной треугольной гофрировкой, где шаг гофрировки $d = 0.71$ мм и ее

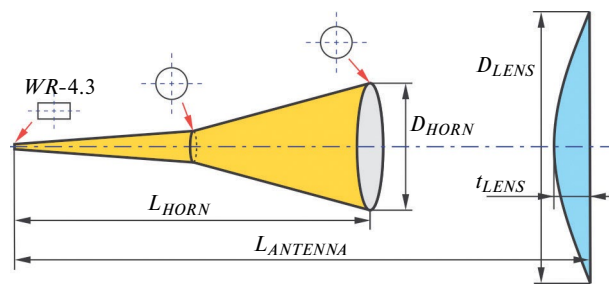


Рис. 7. Эскиз рупорно-линзовой антенной системы.

Таблица 6. Параметры рупорно-линзовой антенной системы

D_{LENS} , мм	D_{HORN} , мм	L_{HORN} , мм	$L_{ANTENNA}$, мм	t_{LENS} , мм	Gain, дБи	θ_E	θ_H
30	16.08	45.56	71.53	4.1	35.8	3.1°	2.9°
40	18.57	52.18	92.37	5.36	38.3	2.3°	2.3°
60	17.95	35.1	92.88	10.08	41.6	1.5°	1.5°

высота $h = 0.43$ мм были рассчитаны в соответствии с теорией [22].

Во избежание конденсации влаги весь приемный тракт должен быть размещен в герметичном отсеке, находящемся под избыточным давлением (достаточно величины порядка 1.1 атм). В качестве газа-заполнителя может выступать сильно обезвоженный воздух, азот или другой инертный газ. Разность давлений снаружи и внутри будет сигнализировать о сохранении герметичности. Эскизный чертеж субТГц-приемного тракта в герметичном отсеке представлен на рис. 10. Здесь фторопластовая линза

антенной системы играет роль радиопрозрачного герметичного окна.

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 классических аналоговых схем синхронного детектирования, которые широко использовались в модуляционных радиометрах до появления многоразрядных АЦП, но и передать функцию интегрирования математическому алгоритму программы обработки.

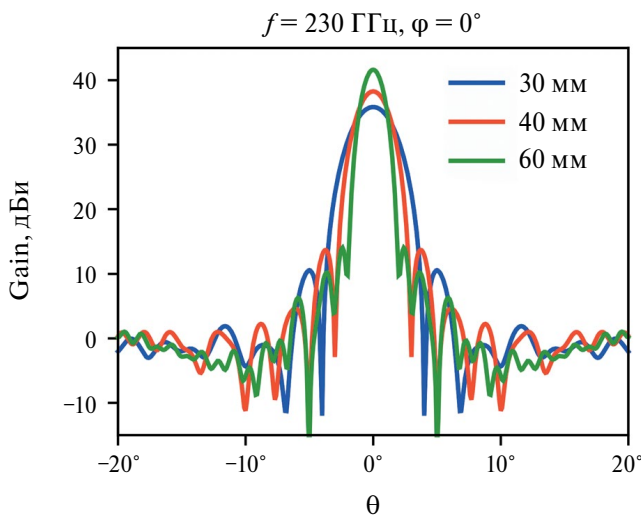


Рис. 8. ДНА в *E*-плоскости.

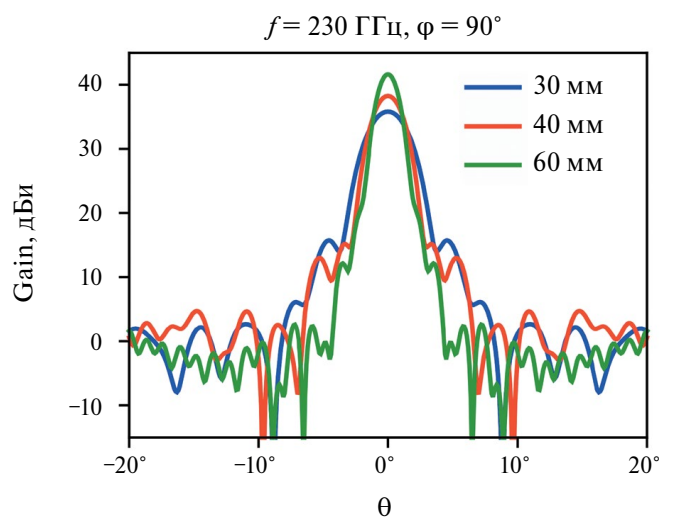


Рис. 9. ДНА в *H*-плоскости.

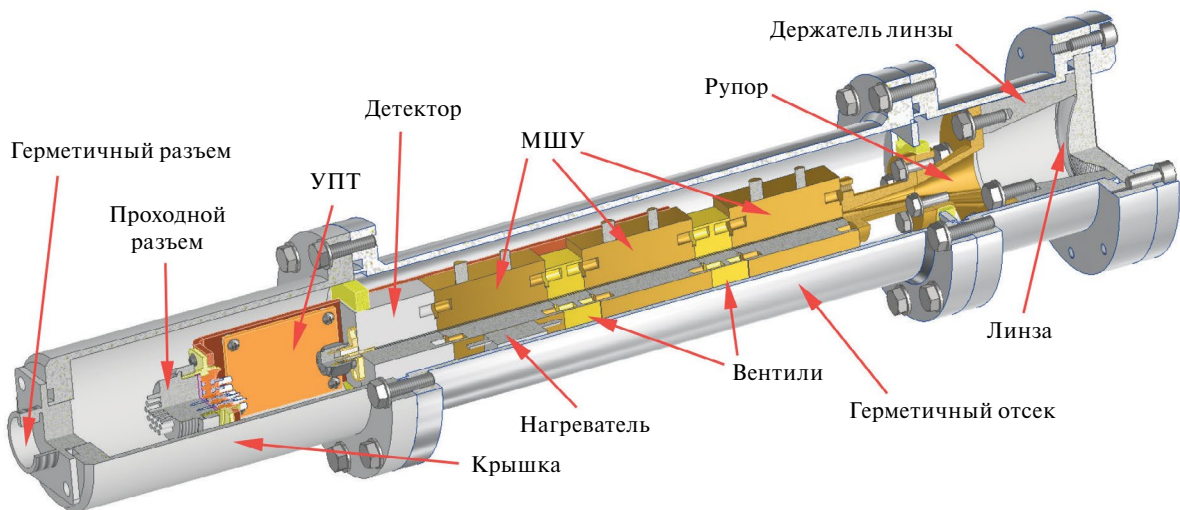


Рис. 10. Приемный тракт в герметичном отсеке.

Важные структурные новшества по сравнению с приборами, созданными более 15 лет назад, предлагаются и в части цифровой обработки. Современные нейросетевые алгоритмы [23, 24] и самообучающиеся методы позволят не только эффективно извлекать информацию из зашумленного сигнала и помех, но и по набору метео- и видеоданных, 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 не убранный своевременно с радиопрозрачного кожуха снег).

Для обеспечения сбора дополнительных данных прибор будет оснащен мини-метеостанцией, инфракрасным 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 работ, частично разрабатываются заново.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы проанализировано современное состояние неохлаждаемой электронно-компонентной субТГц-базы и предложена концепция радиометра для оценки прозрачности атмосферы в окне 1.3 мм. По завершению разработки радиометра планируется серия тестовых экспедиций для сравнения новых результатов с уже полученными ранее с помощью двух экземпляров МИАП-2.

Создаваемый прибор, кроме радиоастрономических приложений, может найти широкое применение в решении задач оценки местности при построении систем беспроводной субТГц-связи нового поколения 6G [25, 26], где существенное затухание сигнала в атмосфере играет немаловажную роль. Исследованию этой проблемы посвящено большое число наших публикаций, результаты которых обобщены в работах [7, 27], а также публикаций других научных коллективов, среди которых необходимо выделить работы [28], где в лабораторных условиях оценивалось влияние осадков, и [29], где приводятся результаты многолетних исследований рас-

пространения субТГц-волн в условиях плотной городской застройки. Нельзя не отметить и обширные не прямые исследования: дистанционное зондирование со спутника, измерения с тропосферных зондов, метод тропосферных задержек по сигналам GNS и оценку с помощью моделирования параметров атмосферы [1, 3–5, 30]. 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. В обзоре 2019 года [31] классики 5G-коммуникаций прогнозировали повсеместное внедрение беспроводных систем субТГц- и ТГц-диапазона в период с 2025 по 2035 год, предполагая активное их применение в различных сферах народного хозяйства, включая высокоскоростную компьютерную и сотовую связь стандартов 6G и выше, роботизированное управление, беспилотный транспорт, системы голографии и виртуальной реальности высокого разрешения, а также навигационные и радиолокационные приложения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-00006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Raymond A.W., Palumbo D., Paine S.N., Blackburn L., Rosado R.C., Doelemann S.S., Farah J.R., Johnson M.D., Roelofs F., Tilanus R.P.J., Weintraub J.* // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. V. 253. № 1. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>
2. 2-ой Российско-Узбекистанский научный семинар. Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии. М.: РАН, 2023.
3. *Землянуха П.М., Домбек Е.М., Марухно А.С., Вдовин В.Ф.* // *Астрофизический бюллетень*. 2024. Т. 79. № 2. С. 350.
4. *Shikhovtsev A.Yu., Khaikin V.B., Kovadlo P.G., Baron P.* // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36. P. 78. <https://doi.org/10.1134/S1024856023020148>

5. *Huang L., Mo Z., Liu L., Zeng Z., Chen J., Xiong S., He H.* // *Earth and Space Science*. 2021. V. 8. № 5. <https://doi.org/10.1029/2020EA001516>
6. *Большаков О.С., Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., Землянуха П.М., Леснов И.В., Марухно А.С., Минеев К.В., Носов В.И., Сальков В.А.* // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”, 2023. С. 72.
7. *Балега Ю.Ю., Батаев Д.К.-С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Землянуха П.М., Лолаев А.Б., Леснов И.В., Марухно А.С., Марухно Н.А., Муртазаев А.К., Хайкин В.С., Худченко А.В.* // *ДАН. Физика, технические науки*. 2022. Т. 502. № 1. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S2686740022010023>
8. *Вдовин В.Ф., Марухно А.С.* // Сборник научных трудов XI Всероссийской научной конференции “Системный синтез и прикладная синергетика”. пос. Нижний Архыз, Россия, 2022. С. 381.
9. *Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Yu.Yu., Bolshakov O.S., Dryagin S.Yu., Dubrovich V.K., Marukhno A.S., Nosov V.I., Vdovin V.F., Zinchenko I.I.* // *The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology*. Moscow, Russia, 2014. P. 76. <https://doi.org/10.1109/TTNZ.2014.2380473>
10. *Бубнов Г.М., Артеменко Ю.Н., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.Б., Зинченко И.И., Носов В.И., Никифоров П.Л., Шанин Г.И., Раупов Д.А.* // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2016. Т. 59. № 8-9. С. 852.
11. *Liebe H.J.* // *Int. J. Infrared Milli Waves*. 1989. V. 10. P. 631. <https://doi.org/10.1007/BF01009565>
12. *Zmuidzinas J., Richards P.L.* // *Proceedings of the IEEE*. 2004. V. 92. № 10. P. 1597. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.833670>
13. *Тарасов М.А., Гунбина А.А., Лемзяков С., Фоминский М.Ю., Чекушкин А.М., Якопов Г.В., Вдовин В.Ф., Эдельман В.С.* // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2021. Т. 48. № 9. С. 10.
14. *Минин В.А., Ефремов Ю.Н., Балега Ю.Ю.* // *Природа*. 2009. № 2(1122). С. 18.
15. *Balega Y., Bolshakov O., Chernikov A., Gunbina A., Edelman V., Efimova M., Eliseev A., Krasilnikov A., Lapkin I., Lesnov I., Mansfeld M., Markina M., Pevzner E., Shitov S., Smirnov A., Tarasov M., Tyatushkin N., Vdovin A., Vdovin V.* // *Photonics*. 2024. V. 11. P. 257. <https://doi.org/10.3390/photonics11030257>
16. *Новиков И.Д., Лихачёв С.Ф., Шекинов Ю.А., Андрианов А.С., Барышев А.М., Васюнин А.И., Вибе Д.З., де Граау Т., Дорошкевич А.Г., Зинченко И.И., Кардашёв Н.С., Костенко В.И., Ларченкова Т.И., Лихачёва Л.Н., Ляховец А.О., Новиков Д.И., Пилипенко С.В., Пуланова А.Ф., Рудницкий А.Г., Смирнов А.В., Шематович В.И.* // *УФН*. 2021. Т. 191. № 4. С. 404. <https://doi.org/10.3367/UFN.2020.12.038898>
17. *Лихачев С.Ф., Рудницкий А.Г., Андрианов А.С., Андрианов М.Н., Архипов М.Ю., Барышев А.М., Вдовин В.Ф., Голубев Е.С., Костенко В.И., Ларченкова Т.И., Пилипенко С.В., Подобедов Я.Г., Разананирина Ж.К., Третьяков И.И., Федорчук С.Д., Худченко А.В., Черный Р.А., Шууров М.А.* // *Космические Исследования*. 2024. Т. 62. № 1. С. 121. <https://doi.org/10.31857/S0023420624010116>
18. *Носов В.И., Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Марухно А.С., Никифоров П.Л., Федосеев Л.И., Швецов А.А.* // *ПТЭ*. 2016. № 3. С. 49. <https://doi.org/10.7868/S0032816216020117>
19. *Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин А.В., Вдовин В.Ф., Гладышев В.О., Гунбина А.А., Дубрович В.К., Землянуха П.М., Кауц В.Л., Красильников А.М., Леснов И.В., Мансфельд М.А., Минеев К.В., Шарандин Е.А.* // *ПТЭ*. 2023. № 1. С. 112. <https://doi.org/10.31857/S0032816222060118>
20. *Кисляков А.Г.* // *Радиотехника и электроника*. 1968. Т.13. № 7. С. 1161.
21. *Тимофеева А.А.* // *Электросвязь*. 1977. № 5. С. 28.
22. *Власов С.Н., Копосова Е.В.* *ЖТФ*. 1993. Т. 63. № 7. С. 123.
23. *Пирогов Л.Е., Замлянуха П.М.* // *Астрономический журнал*. 2021. Т. 98. № 2. С. 102. <https://doi.org/10.31857/S0004629921010047>
24. *Bubnov G., Zemlyanukha P., Dombek E., Vdovin V.* // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2015. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2015/1/012024>
25. *Petrov V., Kurner T., Hosako I.* // *IEEE Communications Magazine*. V. 58. № 11. P. 28. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000273>
26. Standard IEEE 802.15.3d-2017
27. *Balega Y., Bubnov G., Glyavin M., Gunbina A., Danilevsky D., Denisov G., Khudchenko A., Lesnov I., Marukhno A., Mineev K., Samsonov S., Shanin G., Vdovin V.* // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. P. 5670. <https://doi.org/10.3390/app12115670>
28. *Ma J., Shrestha R., Moeller L., Mittleman D.M.* // *APL Photon*. 2018. V. 3. P. 051601. <https://doi.org/10.1063/1.5014037>
29. *Xing Y., Rappaport T.S.* // *IEEE Communications Letters*. 2021. V. 25. № 12. P. 3755. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3117900>
30. *Шиховцев А.Ю., Хайкин В.Б., Миронов А.П., Ковadlo П.Г.* // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35. № 1(396). С. 67. <https://doi.org/10.15372/AOO20220110>
31. *Rappaport T.S., Xing Y., Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A., Trichopoulos G.C.* // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 78729. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>