

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 520.272.5

**МОБИЛЬНЫЙ ПОЛНОПОВОРОТНЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

© 2023 г. О. С. Большаков^a, Г. М. Бубнов^a, А. В. Вдовин^a, В. Ф. Вдовин^a, В. О. Гладышев^c,
А. А. Гунбина^a, В. К. Дубрович^b, П. М. Землянуха^a, В. Л. Кауц^c, А. М. Красильников^a,
И. В. Леснов^a, М. А. Мансфельд^a, К. В. Минеев^{a,*}, Е. А. Шарандин^c

^a Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики РАН”
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^b Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН
Россия, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65, к. 1

^c Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

*e-mail: mineevkv@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2022 г.

После доработки 03.07.2022 г.

Принята к публикации 07.07.2022 г.

Представлены результаты разработки радиометрического комплекса для астрономических и атмосферных исследований в 3-миллиметровом диапазоне длин волн. Радиометр собран по модуляционной схеме с механическим обтюратом, реализованным на сверхразмерных квазиоптических волноводах. В качестве антенной системы использована антенна Кассегрена с диаграммой направленности 1° по уровню –3 дБ. Калибровка осуществляется по встроенному генератору шума. Для наблюдений в выделенной области небесной сферы приемная часть комплекса вместе с антенной размещена на двухкоординатном опорно-поворотном устройстве. Управление, сбор и обработка экспериментальных данных осуществляются в удаленном режиме с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

DOI: 10.31857/S0032816222060118, EDN: JOTMOD

ВВЕДЕНИЕ

Крупный успех интернационального проекта “Телескоп горизонта событий” (ТГС) по визуализации сверхмассивных черных дыр [1, 2] привлек дополнительное внимание мировой научной общественности к субтерагерцовой радиоастрономии. На сегодняшний день команда проекта ТГС находится в поисках перспективных мест для размещения астрономических обсерваторий с целью расширения числа плеч РСДБ (радиоинтерфер со сверхдлинной базой) интерферометра для увеличения информативности наблюдений и расширения числа доступных источников на небе [3].

С помощью измерителя атмосферного поглощения МИАП-2 на территориях Российской Федерации и соседствующих государств было проведено несколько циклов измерений параметров прозрачности атмосферы [4–9]. На основе наблюдательных данных были получены результаты, свидетельствующие о наличии нескольких перспективных мест для строительства радиоте-

лескопов, способных подключиться к проекту ТГС.

Большинство из проведенных измерений были краткосрочными в рамках отдельных экспедиций, и экстраполяция результатов измерений на длительные периоды ограничена. Для долговременных измерений, направленных на выявление статистических сезонных тенденций изменения прозрачности атмосферы, необходимо создание дополнительных аппаратных средств, способных сохранять стабильные характеристики на приемлемом уровне в течение долгого времени.

К настоящему времени текущие характеристики МИАП-2 являются далеко не рекордными [10]: ширины диаграмм направленности антенн (с линзой) составляют около 2.5°, диапазон изменения зенитных углов – от 0 до 90°, шумовые температуры приемных модулей ~1300 К для 3-миллиметрового измерительного канала и 5800 К для 2-миллиметрового канала. Данные характеристики ограничивают время накопления сигнала, которое в отдельных случаях может быть меньше ха-

рактрных времен изменений условий в среде. Для получения более качественных результатов измерения атроклимата требуется создание серии многочастотных полноповоротных переносных устройств с превосходящими МИАП-2 характеристиками.

На первый взгляд, очевидным является построение указанных приемных комплексов с криогенными маломощными усилителями (МШУ) на входе, аналогично представленному в статье [11] 3-миллиметровому CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) приемнику с InP НЕМТ предусилителем [12], имеющим шумовую температуру менее 30 К при охлаждении до 24 К. Однако обширные исследования атмосферного поглощения, играющего значимую роль в миллиметровом диапазоне длин волн, показали, что при длинах волн до 3 мм зачастую вклад атмосферы является доминирующим, что делает неэффективным глубокое криогенное охлаждение наземных приемников, находящихся на относительно небольшой высоте над уровнем моря. По этому пути с недавнего времени пошли исследователи CAO РАН на радиотелескопе РАТАН-600 [13], фактически исключив дорогое и сложное в обслуживании криовакуумное оборудование из арсенала инструмента при наблюдениях вплоть до 8 мм, сосредоточившись на совершенствовании цифровых систем регистрации данных и алгоритмах цифровой обработки [14]. Принимая во внимание мировые достижения субтерагерцовой полупроводниковой электроники, а также учитывая опыт коллег из CAO РАН, авторы данной статьи решили пойти по аналогичному пути и отказаться от криостатируемой части в составе измерительных комплексов, ограничившись выбором коммерчески доступных неохлаждаемых приемников.

На первом этапе авторами настоящей статьи был реализован прототип мобильного полноповоротного 3-миллиметрового модуляционного радиометра с шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны не более 1° по уровню -3 дБ. В качестве основного приемного каскада выбран модуль PMMW-10-0001, имеющий собственную шумовую температуру менее 450 К. Для наблюдений в выделенной области небесной сферы приемная часть комплекса вместе с антенной размещена на двухкоординатном (азимут, элевация) опорно-поворотном устройстве. Управление, сбор и обработка экспериментальных данных осуществляются в удаленном режиме с помощью разработанного авторами программного обеспечения. Радиометр снабжен встроенным опорным генератором шума для проведения калибровки, а также системой термостатирования ключевых элементов с поддержанием квазистационарной температуры общего объема внутри внешнего терморазвязывающего кожуха.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Регистрируемое приемной антенной тепловое радиоизлучение представляет собой гауссовый случайный процесс соответствующей интенсивности, подлежащий измерению [15]. На коротком временном интервале такой сигнал можно считать стационарным и эргодическим и для расчета мощности сигнала в ограниченной полосе приема использовать формулу:

$$W = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt, \quad (1)$$

где ω_1 и ω_2 — начальная и конечная частоты полосы приема; $G(\omega)$ — спектральная плотность мощности зарегистрированного шумового процесса; $\xi(t)$ — временная реализация шумового сигнала.

В соответствии с теоремой о среднем величину спектральной плотности внутри частотного диапазона $\Delta\omega$ можно оценить следующим образом:

$$\hat{G}(\omega_i) = \frac{1}{\Delta\omega} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt \right]. \quad (2)$$

Формула (2) отражает фундаментальный принцип экспериментальной оценки спектральной плотности шумового сигнала любой физической природы: линейная фильтрация, квадратичное детектирование, временное накопление сигнала.

Мощность радиометрического сигнала на выходе может быть представлена как:

$$P(0) = \int_0^\infty G_n(\omega) |K(j\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

где $G_n(\omega)$ — спектральная плотность мощности шумового преобразованного сигнала; $|K(j\omega)|$ — амплитудно-частотная характеристика выходного фильтра нижних частот (ФНЧ).

Эффективность выделения ФНЧ постоянной составляющей оценивается по отношению среднеквадратических отклонений (СКО) на выходе σ_i и на входе σ_0 :

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_i} = \sqrt{\frac{\Delta\Omega}{\Delta\omega}} = \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} = \frac{1}{2\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (4)$$

где ΔF — эффективная полоса выходного ФНЧ; Δf — рабочая полоса частот радиометра; τ — постоянная времени ФНЧ.

Флуктуационный порог чувствительности реального радиометрического устройства, учитывающего аддитивный (дробовый, тепловой) и мультипликативный (фликкер-эффект) шумы, можно определить по следующей формуле:

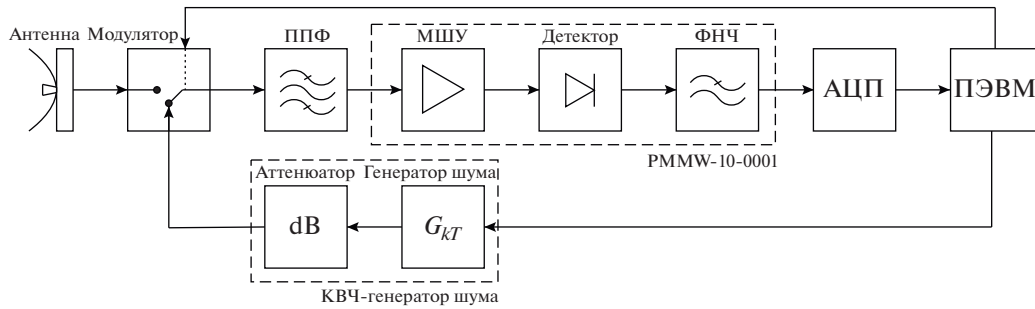


Рис. 1. Структурная схема радиометрического приемника. ППФ — полосно-пропускающий фильтр; МШУ — малошумящий усилитель; ФНЧ — фильтр нижних частот; АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_N^2 + \Delta T_{FN}^2} = T_N \sqrt{\frac{1}{2\Delta f \tau} + \left(\frac{\sigma_{FN}}{G_A}\right)^2}, \quad (5)$$

где T_N — шумовая температура усилителя; σ_{FN} — СКО фликкер-шума; ΔT_{FN} — порог чувствительности, обусловленный только фликкер-шумом; ΔT_N — порог чувствительности, обусловленный шумовой температурой усилителя; G_A — коэффициент усиления усилителя.

Несмотря на предельную чувствительность радиометра полной мощности (компенсационная схема), флуктуации коэффициента усиления вида $1/f$ вносят во второе слагаемое под корнем существенную неопределенность, резко снижая общий порог чувствительности компенсационной схемы. Пренебrecь вкладом σ_{FN} можно лишь в случае регистрации быстротекущих процессов [16], когда на коротком промежутке времени параметры измерительной схемы остаются квазистабильными. В случае долговременных наблюдений целесообразно использовать известную модуляционную схему радиометра Р. Дикке [17].

Флуктуационный порог чувствительности модуляционной схемы в пределе в $\sqrt{2}$ раз хуже компенсационной схемы, однако при высокоскоростном переключении модуляционная схема устраняет паразитное влияние фликкер-шума, что при длительном цикле измерений оказывается наиболее предпочтительным решением. Это явное преимущество модуляционной схемы подвигло авторов настоящей статьи использовать ее в качестве основного режима работы радиометра, структура которого представлена на рис. 1.

ОПИСАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Усилительно-детекторный тракт радиометра был реализован аналогично представленному в [18] пассивному сканеру на коммерчески доступном модуле PMMW-10-0001 (фирмы “Farran”, Ирландия) с малошумящим усилителем высокой частоты на входе, средний коэффициент шума

которого во всей полосе от 75 до 110 ГГц составляет $K = 4$ дБ. Время накопления выходного ФНЧ $\tau = 1$ мкс, что позволяет осуществлять быструю коммутацию сигнала на входе приемного модуля, пренебrecая временем релаксации выходного сигнала в масштабах одной реализации цикла накопления. Оцифровка каждой реализации осуществляется с помощью дифференциального 24-битного АЦП, выполненного на микросхеме AD7766 (фирмы “Analog Devices”, США).

С учетом статистической независимости отсчетов одна реализация оцифрованного сигнала имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{U}_{R_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_0^{\infty} G_{\eta_i}(\omega) |K(j\omega)|^2 d\omega, \quad (6)$$

где N — число независимых отсчетов на входе АЦП в пределах одной квазистационарной реализации.

Обеспечение в модуляторе быстрого переключения между прямым и опорным каналами возможно несколькими способами. Распространенным решением в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн является использование PIN-диодных переключателей, имеющих времена переключения менее 50 нс с переходными процессами не более 10 нс, что позволяет реализовать высокоскоростную и надежную коммутацию. Однако они имеют значительные потери в каналах, порой превышающие 3 дБ, что в формуле Фрииса для расчета общей шумовой температуры системы дает аддитивную добавку к антенной температуре, соизмеримую с температурой окружающей среды.

Несмотря на приемлемые потери (менее 0.5 дБ) в каналах электромеханических волноводных переключателей, их использование недопустимо ввиду крайне невысокой наработки на отказ и больших времен переключения (порядка 0.5–1 с).

Реализованный в изобретении [19] подход с использованием электронной коммутации генератора шума и 10-дБ направленного ответвителя

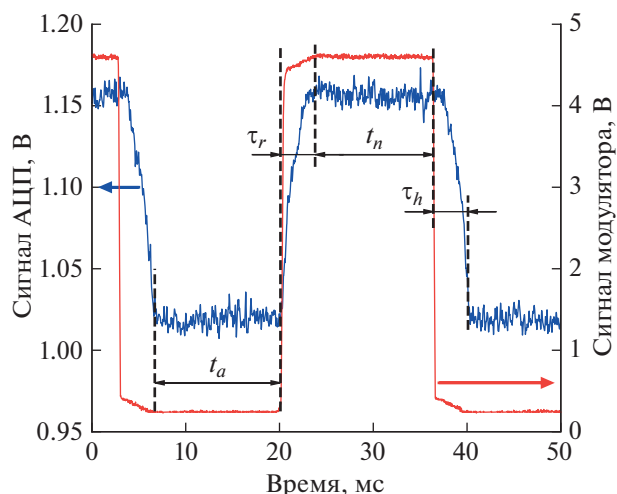


Рис. 2. Осциллограммы работы модулятора.

вкупе с высокоскоростными PIN-модуляторами позволяет достичь необходимой скорости переключения, однако аддитивная добавка со стороны бокового канала в несколько десятков кельвин и не менее 1 дБ прямых потерь значительно снижат качество проводимых радиометрических измерений, особенно когда яркостная температура измеряемого объекта имеет в несколько раз меньший уровень. Увеличение ослабления в боковом канале направленного ответвителя, безусловно, будет способствовать лучшей развязке измерительного и опорного каналов, но это, во-первых, приведет к снижению шумовой температуры опорного источника, а во-вторых, внесет значительную неопределенность в расчет калибровочной сетки радиометра, вызванную одновременной работой прямого и опорного каналов. Такой подход допустим лишь при регистрации объектов, температура которых значительно превышает температуру окружающего пространства, когда подобная неопределенность не превышает нескольких процентов.

С учетом вышеизложенных фактов было принято решение реализовать модуляционный радиометр гибридного типа с оптико-механическим обтюратором в квазиоптическом тракте.

Квазиоптический тракт представляет собой два скрещенных металлических волновода квадратного сечения $14 \times 14 \text{ мм}^2$ длиной 50 мм с расположенным в точке пересечения под углом 45° к апертуре вращающимся металлическим диском, имеющим два четвертных секторальных выреза. Одну половину времени приемный тракт нагружен на прямой канал, другую — на боковой посредством зеркального отражения.

Для снижения возбуждения паразитных мод высших типов пирамидальные рупорные переходы

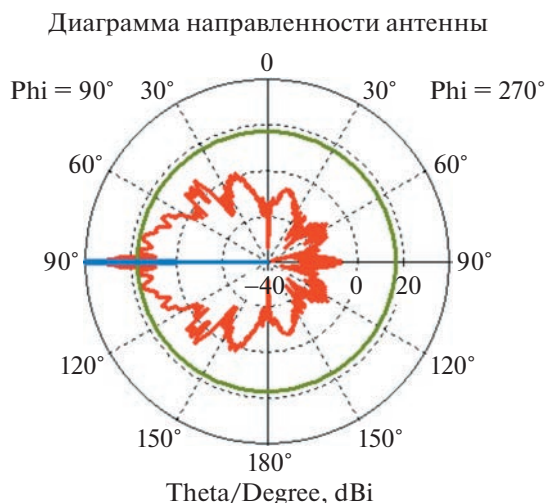


Рис. 3. Результат моделирования диаграммы направленности в CST MWS.

ды со стандартного сечения WR-10 на сверхразмерный волновод сечением $14 \times 14 \text{ мм}^2$ были изготовлены длиной заведомо более 20λ , а общая длина квазиоптической линии от антенны до полосового фильтра составила 250 мм. Численное моделирование в пакете Ansys HFSS показало, что общее ослабление в данном квазиоптическом тракте составляет около 0.15 дБ во всей полосе от 75 до 110 ГГц.

Основной проблемой использования квазиоптического модулятора являются области частичного перекрытия квазиоптического сечения при вращении диска. Согласно зарегистрированной осциллограмме (рис. 2), частота модуляции, контролируемая оптопарой, находится в районе частоты $f_{\text{мод}} = 29.7 \text{ Гц}$, при которой время регистрации антенной измеряемого излучения составляет $t_a = 13 \text{ мс}$ и равно времени регистрации излучения генератора шума t_n . Времена нарастания и спада составляют $\tau_r = \tau_h = 3.2 \text{ мс}$. Отсчеты, соответствующие данным интервалам, из обработки полностью исключаются, что приводит к потере статистических данных, поэтому из всего зарегистрированного сигнала используется только 80% времени.

Следующей проблемой является обеспечение развязки между каналами в течение времени, когда прямой канал полностью открыт, в присутствии мощного сигнала генератора шума с бокового канала. Для успешного решения этой проблемы на 3D-принтере из АБС-пластика с графитовым наполнением был изготовлен и интегрирован в модулятор поглотитель, служащий эквивалентом согласованной нагрузки с коэффициентом отражения порядка $-33 \dots -35 \text{ дБ}$ [20].

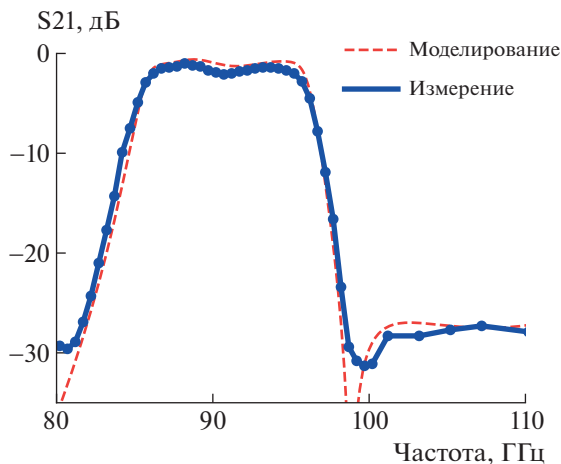


Рис. 4. Ослабление волноводного полосового фильтра.

Антенная система была реализована по классической структуре Кассегрена. Двухзеркальные антенны Кассегрена широко используются в радиоастрономических наблюдениях на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн благодаря наличию узкой диаграммы направленности (ДН) и меньшим по сравнению с обычными рефлекторными антеннами осевым размерам.

Основное параболическое зеркало антенны изготовлено диаметром 200 мм, гиперболический контррефлектор — диаметром 16 мм. В качестве облучателя использовался пирамидальный рупор. Расчет и оптимизация параметров антенны проводились в пакете численного моделирования CST MWS, исходя из обеспечения ширины главного лепестка ДН на центральной частоте $f_0 = 90$ ГГц в 1° по уровню -3 дБ при уровне боковых лепестков не хуже -20 дБ. Результаты моделирования в пакете CST MWS ДН антенны Кассегрена с указанными параметрами приведены на рис. 3.

Полоса приемного модуля прямого усиления PMMW-10-0001 шире 3-миллиметрового окна прозрачности атмосферы, что будет давать систематическую ошибку за счет теплового излучения соседствующих с f_0 полос поглощения молекулярного кислорода с максимумами поглощения вблизи частот 60 и 120 ГГц при проведении астроклиматических измерений. Для ограничения полосы не более 15% от f_0 авторами был изготовлен волноводный полосовой фильтр, который может быть установлен перед приемным модулем. Параметры фильтра оптимизировались в CST MWS, согласно алгоритму, представленному в статье [21]. Результаты моделирования и измерения полосового фильтра на панорамном измерителе P2-124 приведены на рис. 4. Небольшое расхождение измеренного ослабления и расчетного можно объ-

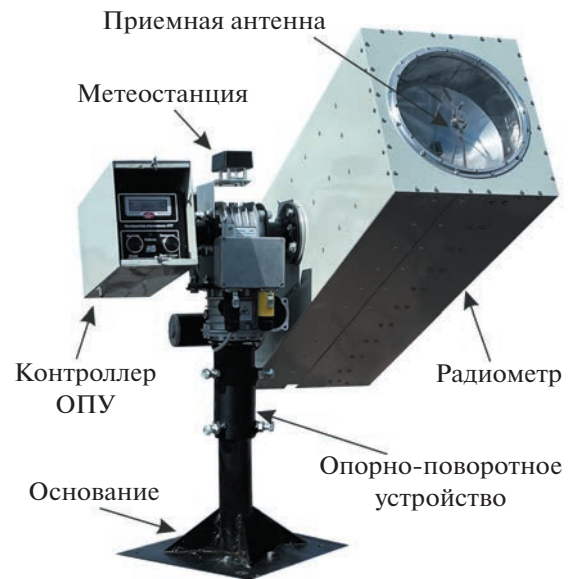


Рис. 5. Внешний вид радиометрического комплекса.

яснить использованием в измерениях на P2-124 пирамидальных переходов со стандартного волноводного сечения 1.2×2.4 мм² на сечение 1.27×2.54 мм² (WR-10).

В качестве высокостабильного опорного источника яркостной температуры в боковом канале используется широкополосный полупроводниковый генератор шума разработки НИФТИ ННГУ (г. Нижний Новгород) [22], откалиброванный по жидкому азоту. Величина спектральной плотности мощности потока излучения генератора шума составляет около 10^{-17} Вт/(см² · Гц). Такая мощность является избыточной для модуля PMMW-10-0001 и будет компрессироваться в усилительно-детекторной секции. Для исключения компрессии и обеспечения работы в рекомендованном производителем диапазоне мощностей в боковом канале установлен аттенуатор, ослабление которого должно подстраиваться по месту для конкретного генератора шума. В данном случае ослабление подобрано для шумовой температуры $T_n = 350$ К, приведенной к входу приемного модуля.

Для поддержания постоянства характеристик ключевых частей в радиометре реализована система термостабилизации на уровне $t = 35^\circ\text{C}$ основных узлов (приемно-усилительного модуля, генератора шума), а также общая термостабилизация радиометра с принудительной циркуляцией воздуха внутри всего объема. Для дополнительного контроля температуры и влажности в месте использования радиометр оснащен цифровой метеостанцией.



Рис. 6. Измерение яркостной температуры неба на крыше главного корпуса ИПФ РАН, г. Нижний Новгород.

Для наблюдения в выделенной области небесной сферы радиометр был установлен на опорно-поворотном устройстве AZ1000VX (фирмы “Радант”, Россия), позволяющем проводить сканирование и сопровождение по азимутальной координате в диапазоне от 0° до 360° и угломестной координате в диапазоне 0° до 90° . Общая фотография радиометра представлена на рис. 5.

С учетом опорно-поворотного устройства габаритные размеры всего комплекса составляют

$610 \times 730 \times 500$ мм, а общая масса не превышает 40 кг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Испытания радиометра проводились в сентябре 2021 г. на крыше Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) (рис. 6). Перед непосредственными измерениями радиометр был откалиброван по эквиваленту черного тела с температурой окружающей среды и жидкого азота.

Экспериментальные результаты измерения яркостной температуры неба при направлении измерительной антенны в зенит приведены на рис. 7.

Для определения предельно достижимой точности были проведены измерения яркостной температуры неба в сухую ясную погоду. При проведении измерений радиометр был направлен строго на север, угол места 80° . В процессе измерений температура окружающей среды изменялась в диапазоне $10.2\text{--}11.1^\circ\text{C}$, относительная влажность составляла 38–41%, давление – 742–743 мм рт. ст. Облачность была 0 баллов, наблюдалась легкая дымка с видимостью около 19–20 км. Время накопления в радиометре было установлено равным 1 мин. Гистограмма распределения случайной ошибки измерения яркостной температуры приведена на рис. 8.

Для определения потенциальной разрешающей способности радиометра при времени накопления 60 с были проведены длительные измерения уровня сигнала с опорного источника яркостной температуры. Гистограмма распределения нестабильности регистрируемой температуры для этого случая приведена на рис. 9.

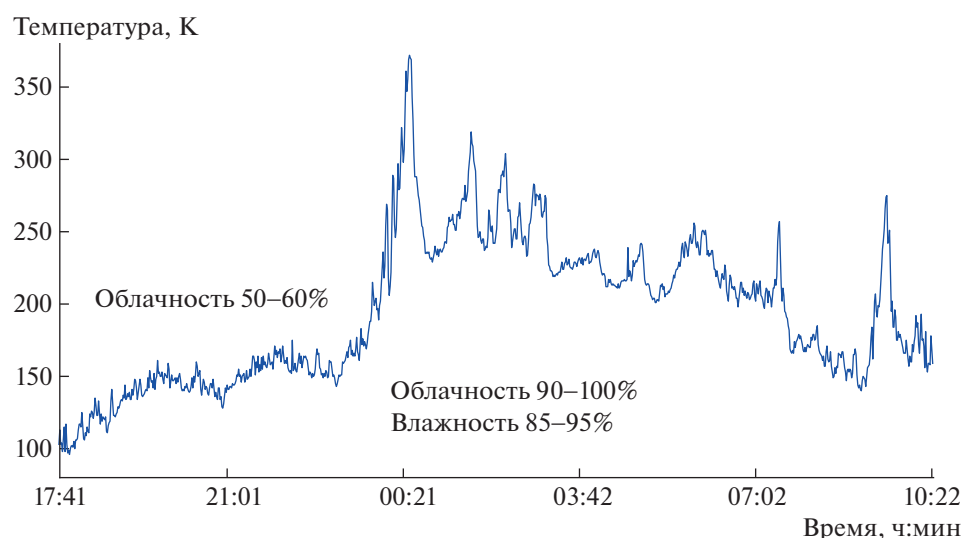


Рис. 7. Результат измерения яркостной температуры неба в сентябре 2021 г. в Нижнем Новгороде.

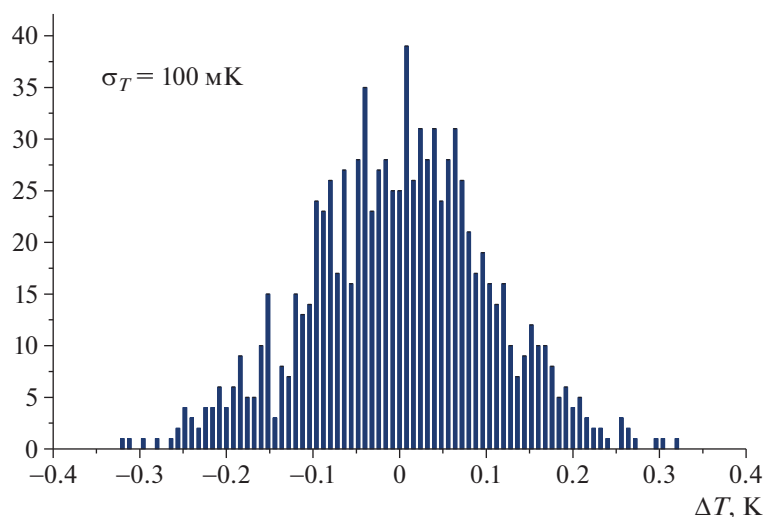


Рис. 8. Гистограмма распределения случайной ошибки измерения яркостной температуры.

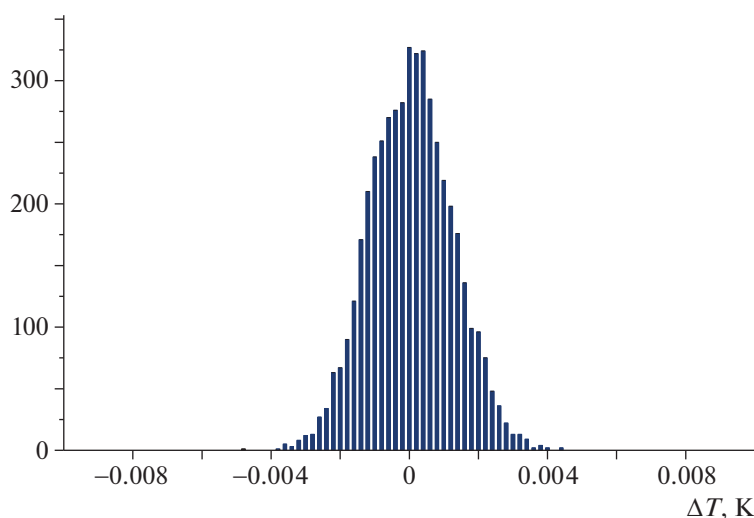


Рис. 9. Гистограмма распределения случайной ошибки измерения яркостной температуры в опорном канале.

Результаты испытаний показали, что при благоприятных погодных условиях и плотной городской застройке среднеквадратичное отклонение ошибки измерения радиационной температуры может достигать порядка 100 мК. Основной вклад в погрешность проведенных измерений вносит изменение состояния атмосферы за время накопления результатов. При длительных наблюдениях в широком диапазоне сканирования по азимуту и углу места яркостная температура, по результатам измерений, изменялась более чем на 200 К.

Разрешающая способность разработанного радиометра составляет порядка 1 мК при времени накопления сигнала 1 мин. На этом основании можно предположить, что при установке в месте с благоприятным астроклиматом радиометрический ком-

плекс потенциально способен зарегистрировать дипольную составляющую яркостной температуры реликтового излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные серии испытаний радиометрического комплекса подтверждают его полную автономную работоспособность и возможность использования в длительном цикле измерений для поиска мест с хорошим микроволновым астроклиматом (высокогорье, полюса холода и т.п.). Флуктуационная чувствительность находится на уровне 1 мК, а распределение случайной величины ошибки близко к нормальному, что указывает на достоверность сделанных оценок.

Описанный конкретный экземпляр радиометрического комплекса, кроме основных экспедиционных задач, также планируется использовать в качестве учебно-демонстрационного пособия при проведении лабораторных работ студентов факультета фундаментальных наук МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке проекта НЦМУ "Центр фотоники", соглашение между ИПФ РАН и МОН № 075-15-2022-316.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Event Horizon Telescope Collaboration // *The Astrophysical Journal Letters*. 2019. V. 875: L4. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0e85>
2. The Event Horizon Telescope Collaboration // *The Astrophysical Journal Letters*. 2022. V. 930: L12. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674>
3. Raymond A.W., Palumbo D., Paine S.N., Blackburn L., Rosado R.C., Doeleman S.S., Farah J.R., Johnson M.D., Roelofs F., Tilanus R.P.J., Weintraub J. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. V. 253. Iss. 1. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc3c3>
4. 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. С. 852. <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9745-7>
5. Агафонов М.И., Бубнов Г.М., Бубукин И.Т., Вдовин В.Ф., Горбунов Р.В., Зинченко И.И., Лапченко В.А., Носов В.И., Панкратов А.Л., Ракуть И.В. // *Астрофизический бюллетень*. 2018. Т. 73 № 3. С. 412.
6. Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Y.Y., Bolshakov O.S., Dryagin S.Y., Dubrovich V.K., Marukhno A.S., Nosov V.I., Vdovin V.F., Zinchenko I.I. // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015. № 1. P. 64. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2380473>
7. Bubnov G.M., Vdovin V.F., Bukov V.Y., Makarov T.A., Il'in G.N., Zinchenko I.I. // 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. IEEE. Montreal, 2017. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS.2017.8105000>
8. Bubnov G.M., Grigor'ev V.F., Zinchenko I.I., Zemlyanukha P.M., Il'in G.N., Kabanov D.M., Nosov V.I., Vdovin V.F. // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2020. № 12. P. 820. <https://doi.org/10.1007/s11141-020-10027-x>
9. Bubnov G.M., Vdovin V.F., Zemlyanukha P.M., Okunev V.S., Grigor'ev V.F. // *EPJ Web of Conferences*. 2018. V. 195. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201819509002>
10. 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>
11. Tang A., Reck T., Shu R., Samoska L., Kim Y., Ye Y., Gu Q., Drouin B.J., Truettel J., Al Hadi R., Xu Y., Sarkozy S., Lai R., Chang M.-C. F., Mehdi I. // 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. IEEE. San Francisco, 2016. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2016.7540357>
12. Samoska L., Varonen M., Reeves R., Cleary K., Gawande R., Kangaslahti P., Gaier T., Lai R., Sarkozy S. // 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest. IEEE. Montreal, 2012. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2012.6258356>
13. Берлин А.Б., Парийский Ю.Н., Нижельский Н.А., Мингалиев М.Г., Цыбулев П.Г., Кратов Д.В., Удовичский Р.Ю., Смирнов В.В., Пилипенко А.М. // *Астрофизический бюллетень*. 2012. Т. 67. № 3. С. 354.
14. Удовичский Р.Ю., Сотникова Ю.В., Мингалиев М.Г., Цыбулев П.Г., Жеканис Г.В., Нижельский Н.А. // *Астрофизический бюллетень*. 2016. Т. 71. № 4. С. 532.
15. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014.
16. Ботов Е.В., Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С., Макарычев Н.А., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Седов А.А. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61. № 5. С. 432. <https://doi.org/10.1007/s11141-018-9899-y>
17. Dicke R. // *The review of Scientific Instruments*. 1946. V. 17. № 7. P. 268.
18. Meng Y., Qing A., Lin C., Zang J., Zhao Y., Zhang C. // *Scientific Report*. 2018. № 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25637-9>
19. Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Орехов Ю.И., Седов А.А. Патент на изобретение № 2018144404 РФ. МПК G01K 11/00, G01K 13/02, G01K 15/00, G01R 29/08, G01R 29/26, G01R 35/00, G01J 5/00 // *Опубл.* 28.08.2019. Бюл. № 25.
20. Домбек Е.М., Землянуха П.М., Паршин В.В., Алексеев Р.А. // XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2022. С. 127.
21. Leal-Sevillano C.A., Montejó-Garai J.R., Ruiz-Cruz J.A., Jesús M. Rebollar // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2012. V. 22. № 9. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2012.2212237>
22. Корнаухов А.В., Максимов Г.А., Анисимов С.И., Гуревич М.Л. // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология*. 2001. № 2. С. 22.