

УДК 621.396.62:520.272.5

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ДЕЦИМЕТРОВЫЙ РАДИОМЕТР НА ОСНОВЕ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ С СОВМЕЩЕННЫМ ФАЗОВЫМ ЦЕНТРОМ

© 2026 П. Г. Цыбулев^{1*}, Н. А. Нижельский¹, М. А. Ушаков², М. С. Турыгин²,
Д. В. Кратов¹, Р. Ю. Удовицкий¹, П. В. Призов¹, А. Н. Борисов¹, А. А. Хапаев¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,
Нижний Архыз, 369167 Россия

²Акционерное общество «Конструкторское бюро радиотехники и электроники», Москва, 141190 Россия

Поступила в редакцию 13 апреля 2026 года; после доработки 29 апреля 2026 года; принята к публикации 9 июня 2026 года

В статье представлены результаты разработки и внедрения нового двухчастотного радиометра дециметровых диапазонов 21 и 13 см. Дан обзор и краткий анализ предыдущих технических решений по конструкциям дециметровых радиометров, которые должны работать в условиях сложной и быстро меняющейся помеховой обстановки. Данная разработка имеет несколько особенностей. Это и конструкция входа радиометров, построенного на основе рупорной антенны с совмещенным фазовым центром для обоих диапазонов, и требование узкополосности входных малошумящих усилителей, и возможность установки в радиометры спектроанализаторов для реализации алгоритмов частотно-временного помехоподавления, а также наблюдений и поиска транзиентных космических событий (пульсары, быстрые радиовсплески).

Ключевые слова: приборы: приемники

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиоастрономические наблюдения в дециметровых диапазонах на сегодняшний день предъявляют повышенные требования к построению радиометрической приемной аппаратуры. В первую очередь это связано с возрастающим влиянием радиопомех искусственного происхождения от средств наземной и космической связи, радиолокации, различных наземных и космических служб и др. Для радиоастрономии Сектором радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-R) выделен ряд узких диапазонов в сантиметровой и дециметровой областях радиоспектра¹⁾. Как правило, это атомарные и молекулярные спектральные линии. Причем выделенные ширины полос слишком узкие для радионаблюдений с высокой чувствительностью (минимально обнаружимый сигнал обратно пропорционален квадратному корню из ширины полосы).

Первые работы на РАТАН-600 по борьбе с помехами представлены в публикации Gorbachev et al. (1987), где речь шла об импульсных помехах естественной (гроза) и искусственной (автотранспорт, связь) природы. Предложенный авторами

метод борьбы с короткими импульсами с помощью аналогового радиотехнического устройства был реализован на практике и показал хорошие результаты.

В быстро меняющейся помеховой обстановке дальнейшее развитие методы помехозащиты получили в работах Berlin and Friedman (1996), Bulaenko et al. (1997), Tsybulev et al. (2007), Kratov et al. (2010). Среди них можно выделить два основных подхода: выбор диапазонов (достаточно широких), удаленных по частоте от сильных источников радиоизлучения, и цифровую фильтрацию помех внутри выбранного рабочего диапазона.

Метод фильтрации, применявшийся на РАТАН-600 в конце 1990-х годов, получил название «частотно-временное помехоподавление». Его суть заключалась в построении аналогового банка фильтров, с помощью которого широкую полосу радиометра разбивали на несколько смежных диапазонов (субполос). Сигналы в каждой субполосе детектировались квадратичным детектором, оцифровывались, и далее во временной области производился поиск и зануление помеховых участков. Затем выполнялась обратная процедура — синтез полной полосы радиометра. В настоящее время этот метод получил в радиоастрономии логическое развитие: вместо банка аналоговых фильтров используется цифровой спектральный

*E-mail: peter@sao.ru

¹⁾https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/ra/R-REC-RA.314-11-202312-I!!PDF-R.pdf

анализ всей полосы приемника с заданным частотным и временным разрешением.

Кроме борьбы с помехами, когда нужно удалить испорченные участки как по частоте, так и по времени, для радиоастрономов важна другая задача: поиск транзиентных событий, например быстрых радиовсплесков (fast radio bursts, FRB). В этом случае импульсы на выходе приемника могут быть уже полезным сигналом, который нужно отделить от помех (в том числе импульсных).

Радиометры, решающие эти и многие другие задачи, должны отвечать определенным требованиям, о чем пойдет речь в следующих главах.

2. ДЕЦИМЕТРОВЫЕ ДИАПАЗОНЫ РАТАН-600 В НАЧАЛЕ 2000-х

С конца 1990-х до начала 2000-х годов на РАТАН-600 работали три радиометра дециметровых диапазонов. Все они были приемниками прямого усиления, построенными по схеме «радиометр с добавлением шумов» (РДШ; Noise Added Radiometer, NAR). Для реализации алгоритмов частотно-временного помехоподавления (Tsybulev et al., 2007) полоса каждого радиометра была разбита на определенное число «узких» смежных полос (подканалов):

- радиометр диапазона 49 см: полоса 542–670 МГц (относительная ширина полосы — около 21%), восемь субканалов;
- радиометр диапазона 31 см: полоса 900–1020 МГц (относительная ширина полосы — 12.5%), четыре субканала;
- радиометр диапазона 13 см: полоса 2100–2500 МГц (относительная ширина полосы — 17.4%), восемь субканалов.

Алгоритмы частотно-временного помехоподавления были реализованы с помощью модулей цифровой обработки сигналов (ЦОС) на основе быстродействующих цифровых сигнальных процессоров.

В 2010 году мы завершили проект «ОКТАВА» (Mingaliev et al., 2010), который объединил все указанные диапазоны в одной сверхширокополосной конструкции (500–3000 МГц). В качестве широкополосной была выбрана антенна типа ELEVEN (Olsson et al. 2006, Технологический университет Чалмерса, Гетеборг, Швеция). В данном проекте вся рабочая полоса частот (0.5–3 ГГц) усиливалась широкополосными маломощными усилителями WBA0235A фирмы WapTcom Inc., после чего разделялась на три диапазона: 49, 31 и 13 см.

Установка приемного комплекса «ОКТАВА» на радиотелескопе и первые наблюдения выявили ряд проблем. Основная из них заключалась в

перегрузке входных усилителей мощными помехами от сетей мобильной связи. При этом усилители WBA0235A по характеристикам являются «безусловно стабильными» (unconditionally stable). Перегрузка приводила к паразитной генерации как внутри рабочей полосы, так и за ее пределами. При таком широкополосном приеме это стало неустранимой проблемой проекта. Стоит отметить, что он стартовал, когда мобильная связь в районе РАТАН-600 отсутствовала.

Кроме того, имелись проблемы с адаптацией антенны ELEVEN к геометрии фокальной линии вторичного зеркала РАТАН-600.

3. ИЗМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ДЕЦИМЕТРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Вскоре стало ясно, что нужно вернуться к узкополосным решениям, отказавшись от усиления сильно зашумленных участков радиоспектра, и, кроме того, выбрать более «тихие» диапазоны.

Таким образом, вместо полосы 900–1020 МГц была выбрана полоса 1220–1270 МГц с относительной шириной 4% (радиометр диапазона 24 см), а вместо полосы 2100–2500 МГц — 2210–2290 МГц с относительной шириной 3.5% (радиометр диапазона 13.3 см). От одной сверхширокополосной антенны ELEVEN пришлось снова перейти к отдельным рупорным антеннам диапазонов 24 и 13.3 см, исключив диапазон 49 см.

Однако широкополосные усилители в радиометрах 24 и 13.3 см (в том числе на их входах) остались, и это долгое время приводило к проблемам, связанным с перегрузкой входных маломощных усилителей (МШУ).

4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ АНТЕНН ДЛЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОМЕТРОВ

Проблемы, перечисленные в предыдущей главе, требовали новых решений как для входных антенн радиометров, так и для приемно-усилительных трактов, поскольку качество наблюдательных данных радиометров 24 и 13.3 см нередко оказывалось неудовлетворительным.

В 2020 году нами принято решение о разработке новой рупорно-волноводной двухдиапазонной антенны с совмещенным фазовым центром для приемника с двумя диапазонами: 1400–1500 и 2200–2300 МГц. На рис. 1 представлен частотный состав комплексов радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600, а также показаны планируемые изменения в дециметровой части вторичного зеркала № 1.

В 2022 году первая двухдиапазонная рупорная антенна была разработана и изготовлена для нас

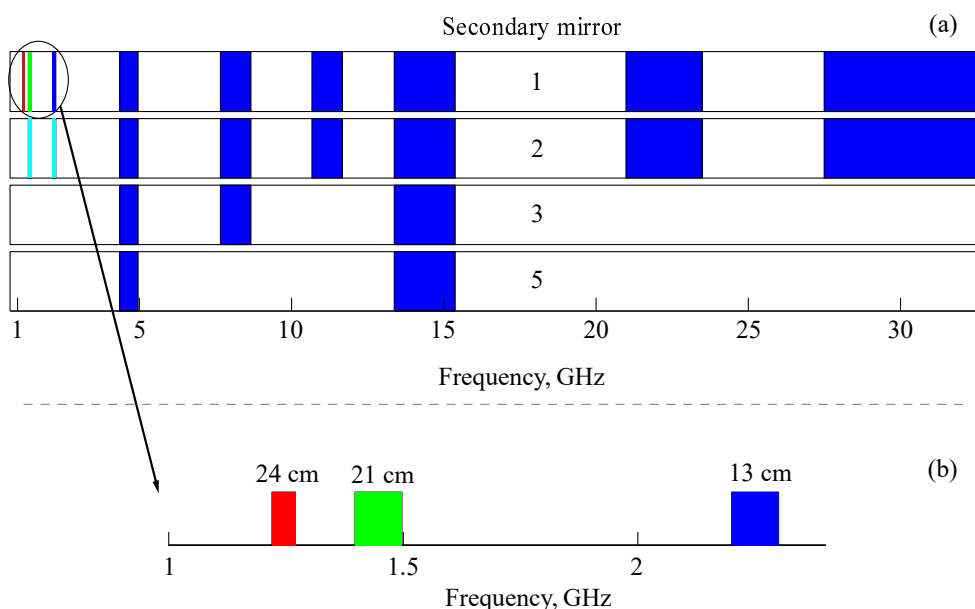


Рис. 1. Рабочие полосы комплексов радиометров континуума ПАТАН-600: (а) все приемные комплексы континуума ПАТАН-600 (вторичные зеркала 1, 2, 3 и 5); (б) дециметровые диапазоны вторичного зеркала № 1 в крупном масштабе. Красным цветом показан диапазон радиометра 24 см, от которого мы запланировали перейти к диапазону, выделенному зеленым цветом, и условно обозначенному как 21 см (включает в себя спектральную линию нейтрального водорода). Диапазон 13.3 см остался, его полоса расширена до 100 МГц.

во ФГУП СКБ ИРЭ РАН (Tsybulev et al., 2022). Диаграмма направленности антенны приведена на рис. 2. Вот ее характеристики:

- диапазон (канал) 21 см — 1400–1500 МГц;
- диапазон 13 см — 2200–2500 МГц;
- развязка между каналами — 45 дБ;
- ширина ДН по уровню 10% около 100°;
- уровень боковых лепестков меньше — 17 дБ.
- потери менее 0.15 дБ.

Конструктивно антенна состоит из рупорного облучателя диапазона 1300–2500 МГц, волноводного диплексера 1300–1400 и 2300–2500 МГц, двух коаксиально-волноводных переходов и защитного кожуха с устройствами герметизации и радиопрозрачным окном для обоих диапазонов частот.

Обращают на себя внимание низкие потери в тракте антенны (меньше 0.15 дБ), что соответствует шумовой температуре не более 10 К для обоих диапазонов. Это обеспечено рупорно-волноводной конструкцией антенны.

Также видно, что планируемая полоса радиометра, условно названного «радиометр диапазона 13 см» (2200–2300 МГц), является более узкой, чем соответствующий диапазон антенны (2200–2500 МГц).

Одна из особенностей данной рупорной антенны — уменьшенный коэффициент передачи для диапазонов связи (GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100).

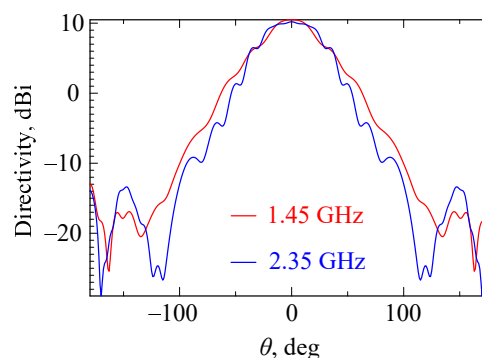


Рис. 2. Расчетная диаграмма направленности рупорной антенны в двух диапазонах.

Фирмой «АО СКАРД Электроникс», г. Курск, для нас разработана вторая антенна с аналогичными параметрами.

5. НОВЫЕ ДЕЦИМЕТРОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

В рамках этого проекта разработаны и изготовлены два радиометра:

- радиометр диапазона 21 см, полоса 1400–1500 МГц (относительная ширина полосы около 7%);
- радиометр диапазона 13 см, полоса 2200–2300 МГц (относительная ширина полосы приблизительно 4.4%).

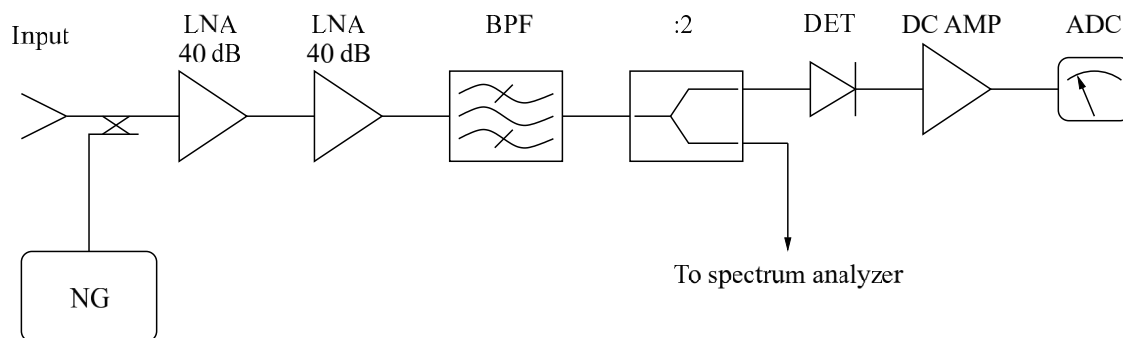


Рис. 3. Блок-схема каждого из двух радиометрических каналов. Здесь NG — генератор шума, LNA — малошумящий усилитель, BPF — полосно-пропускающий фильтр, DET — квадратичный детектор, DC AMP — усилитель постоянного тока, ADC — аналого-цифровой преобразователь.

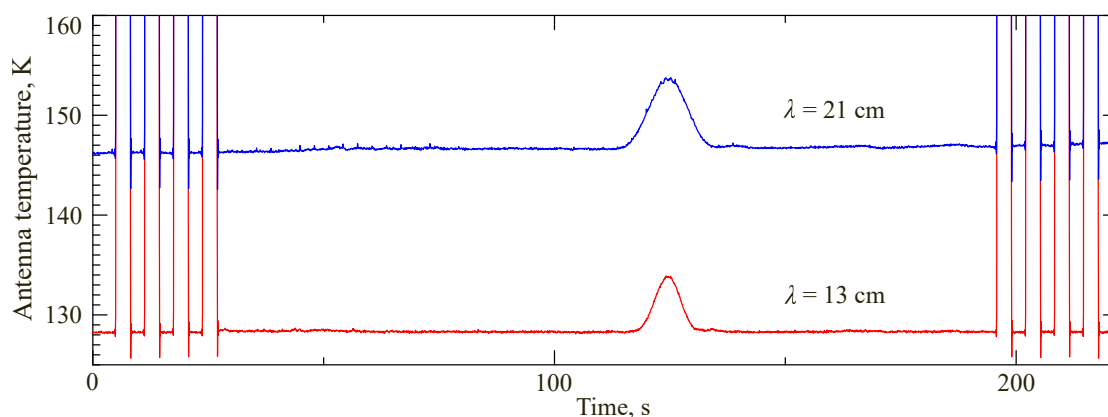


Рис. 4. Запись сигнала радиисточника ЗС 286 («raw data»).

Каждый радиометр построен по схеме «радиометр полной мощности» и конструктивно является приемником прямого усиления. Блок-схема приемников представлена на рис. 3 (для упрощения не показаны ферритовые изоляторы в приемном тракте). Малошумящие усилители являются узкополосными, что позволяет работать в мощном окружении диапазонов сотовой связи.

Радиометры снабжены двумя СВЧ-выходами. На одном из них установлен стандартный квадратичный детектор с дальнейшей НЧ-фильтрацией и регистрацией высокоскоростной системой (Tsybulev, 2011). Другой выход предназначен для подключения в будущем цифрового спектроанализатора (Nizhelskii et al., 2020), с помощью которого предполагается решать две задачи: частотно-временное помехоподавление в условиях сложной помеховой обстановки (Kratov et al., 2025) и поиск транзитных событий (например, быстрых радиовсплесков).

6. НАЧАЛО НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В октябре 2025 года новый двухчастотный радиометр был включен в штатные наблюдения на

РАТАН-600. На рис. 4 показаны «сырые» записи наблюдения радиисточника ЗС 286 (прохождение через неподвижную диаграмму направленности) на Северном секторе РАТАН-600. На записях показаны включения калибровочных сигналов в начале и в конце наблюдения — они нужны для учета возможных изменений коэффициента усиления приемников (калибровочные «ступеньки» на рисунке показаны не полностью). Также на графике приведены эквивалентные шумовые температуры (ЭШТ) систем «радиотелескоп + радиометр». Как видно из рисунка, ЭШТ на волне 13 см составляет примерно 130 К, а на волне 21 см — около 150 К.

На рис. 5 представлены обработанные записи, показанные на предыдущем рисунке. Для каждой из них отношение сигнал/шум (S/N) максимизировано с помощью соответствующего программного фильтра нижних частот (ФНЧ). Частота среза ФНЧ выбирается индивидуально и соответствует максимальной частоте в спектре мощности от кривой прохождения радиисточника через неподвижную ДН. Эта частота отсчитывается по уровню мощности 0.01 (предельная фильтрация прямоугольным фильтром без искажения формы сигнала). Для высоты источника ЗС 286 частоты

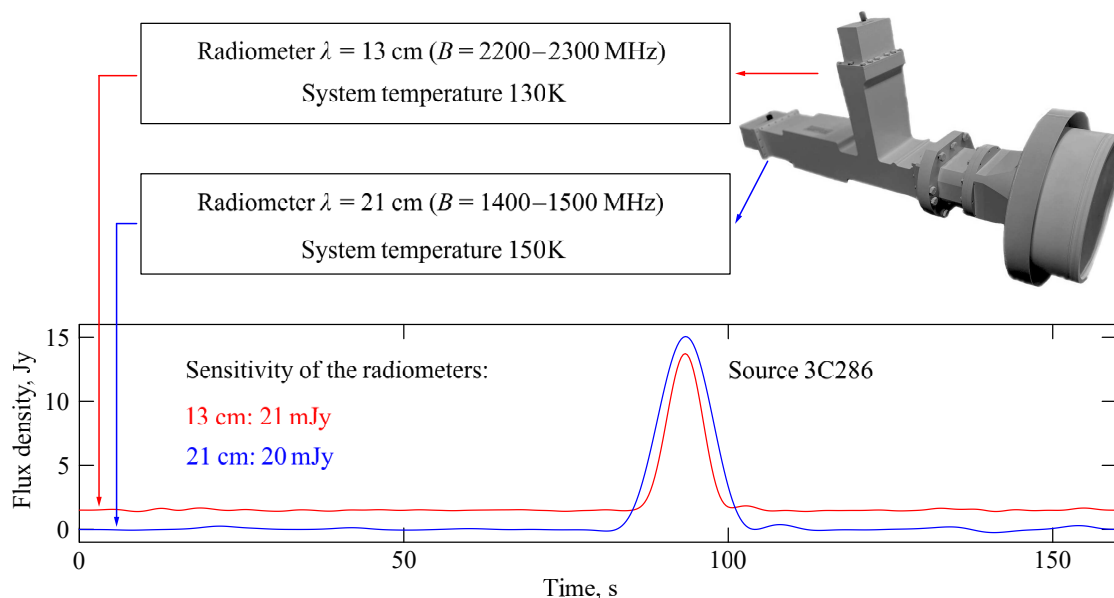


Рис. 5. Обработанные записи сигнала радиоисточника 3C 286: параметры радиометрических каналов и оценки чувствительностей по плотности потока. Также представлен внешний вид двухчастотной рупорной антенны.

среза ФНЧ радиометров с длинами волн 13 и 21 см составляют соответственно 0.16 Гц (время интегрирования $\tau \approx 3.1$ с) и 0.11 Гц ($\tau \approx 4.5$ с). На рисунке также приведены оценки чувствительности радиометров по спектральной плотности потока при указанной НЧ-фильтрации: примерно 21 мЯн на волне 13 см и около 20 мЯн на волне 21 см. Это предельная чувствительность систем «радиотелескоп + радиометр» на данной высоте при наблюдении в транзитном режиме на одном секторе РАТАН-600.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе демонстрируется возможность наблюдений в дециметровых диапазонах на РАТАН-600 в достаточно широких полосах приема при сложной помеховой обстановке как в рабочих диапазонах, так и вблизи них. Первые наблюдения показали, что регистрацию сигнала можно выполнять обычным радиометром полной мощности без применения частотно-временных методов помехоподавления.

Дальнейшее развитие радиометров путем добавления в схему спектроанализаторов позволит наблюдать с минимальными потерями и с расчетной чувствительностью.

Таким образом, нами разработан, изготовлен и внедрен в штатную эксплуатацию новый двухчастотный дециметровый радиометр, который позволил возобновить наблюдения на РАТАН-600 в дециметровых диапазонах с высокой чувствительностью по плотности потока (около 20 мЯн). Самая длинная волна (24 см) заменена на 21 см (точнее,

20.6 см). Качество наблюдений (S/N , стабильность) резко возросло.

Ключевыми преимуществами нового радиометрического комплекса являются совмещенный фазовый центр двух диапазонов и единый входной рупор. Совмещенный фазовый центр обеспечивает одновременное наблюдение в обоих диапазонах (а не последовательное, как было ранее из-за разноса рупоров на фокальной линии). Единый входной рупор (вместо двух отдельных) позволяет экономить место на фокальной линии вторичного зеркала и снижает уровень aberrаций за счет выноса меньшего рупора из фокуса.

Область применения комплекса — астрофизические наблюдения космических радиоисточников разной природы: от объектов Солнечной системы до галактических объектов и далеких радиогалактик. В ближайшей перспективе станут доступны спектральные наблюдения нейтрального водорода в Млечном Пути и соседних галактиках. Планируется реализация активного цифрового помехоподавления и проведение наблюдений быстропеременных процессов (пульсары, быстрые радиовсплески).

В настоящее время ведется разработка аналогичного двухчастотного радиометра для радиометрического комплекса вторичного зеркала № 2 — с использованием второй дециметровой двухдиапазонной антенны, имеющей совмещенный фазовый центр.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. B. Berlin and P. A. Friedman, in *Proc. on 25-th General Assembly of Intern. Union of Radio Science (URSI), Lille, France, 1996*, (Oxford University Press, Oxford, 1996), p. 750.
2. E. V. Bulaenko, S. V. Tuzenko, and P. A. Friedman, *Instruments and Experimental Equipment* **2**, 160 (1997).
3. A. A. Gorbachev, V. I. Danilov, and Y. I. Modeev, *Instruments and Experimental Equipment* **4**, 83 (1987).
4. D. Kratov, N. Nizhelskij, P. Tsybulev, and R. Udovitskiy, in *Proc. on Modern Observational Cosmology dedicated to the 60th Anniversary of O. V. Verkhodanov, SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic, 2025*, id. 7. DOI:10.26119/2025-moc07
5. D. V. Kratov, A. Berlin, N. A. Nizhelskij, et al., in *Proc. Third Workshop on RFI Mitigation in Radio Astronomy (RFI2010), Groningen, Netherlands, 2010*, id. 22. DOI:10.22323/1.107.0022
6. M. G. Mingaliev, A. B. Berlin, N. A. Nizhelskij, et al., in *Proc. Third Workshop on RFI Mitigation in Radio Astronomy (RFI2010), Groningen, Netherlands 2010*, id. 18. DOI:10.22323/1.107.0018
7. N. A. Nizhelskii, P. G. Tsybulev, D. V. Kratov, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 432–435 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020a). DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_432
8. R. Olsson, P.-S. Kildal, and S. Weinreb, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **54** (2), 368 (2006). DOI:10.1109/TAP.2005.863392
9. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 109 (2011). DOI:10.1134/S199034131101010X
10. P. G. Tsybulev, A. B. Berlin, N. A. Nizhelskij, et al., *Astrophysical Bulletin* **62** (2), 193 (2007). DOI:10.1134/S1990341307020071
11. P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskij, M. V. Dugin, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 516 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040174

A Dual-Frequency Decimeter-Wave Radiometer Based on a Horn Antenna with a Common Phase Center

P. G. Tsybulev¹, N. A. Nizhelskij¹, M. A. Ushakov², M. S. Turygin², D. V. Kratov¹, R. Yu. Udovitskiy¹, P. V. Prizov¹, A. N. Borisov¹, and A. A. Khapaev¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Joint Stock Company Design Bureau of Radioengineering and Electronics, Moscow, 141190 Russia

The paper presents the results of the development and implementation of a new dual-frequency decimeter-wave radiometer operating at wavelengths of 21 and 13 cm. An overview and brief analysis of previously proposed technical solutions for the design of decimeter-wave radiometers intended to operate under conditions of a complex and rapidly varying interference environment are given. The proposed radiometer has several distinctive features. These include the input assembly based on a horn antenna with a common phase center for both wavelength bands, the use of narrowband low-noise amplifiers at the receiver input, and the possibility of incorporating spectral analyzers into the radiometer for implementing frequency-time interference suppression algorithms, as well as for observations and searches for transient cosmic radio sources (pulsars and fast radio bursts).

Keywords: *instrumentation: detectors*