

УДК 520.8.056

## Радиометры континуума радиотелескопа РАТАН-600

П.Г. Цыбулёв<sup>1</sup>, Н.А. Нижельский<sup>1</sup>, В.А. Титов<sup>2</sup>, А.Н. Борисов<sup>1</sup>, Д.В. Кратов<sup>1</sup>,  
Р.Ю. Удовичук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия  
peter@sao.ru

<sup>2</sup> НПФ “Микран”, Томск, 634041, Россия

Поступила в редакцию 14 октября 2023 г.

**Аннотация.** В работе представлены основные направления развития комплексов радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600, а также показано их текущее состояние.

**Ключевые слова:** приемники радиоизлучения, детекторы, радиоастрономия

## 1 Введение

Радиотелескоп РАТАН-600 в настоящее время работает как три независимых радиотелескопа, используя три сектора главного отражателя: северный, западный и южный (или южный сектор с перископом). Радиометры для наблюдений в континууме расположены на четырех приемных комплексах вторичных зеркал № 1, 2, 3 и 4 радиотелескопа. Одной из задач, решаемых в рамках данной работы, является оснащение приемных комплексов максимальным количеством радиометров, что позволяет строить мгновенные спектры космических радиоисточников в широкой полосе частот (5 октав, 1–32.5 ГГц).

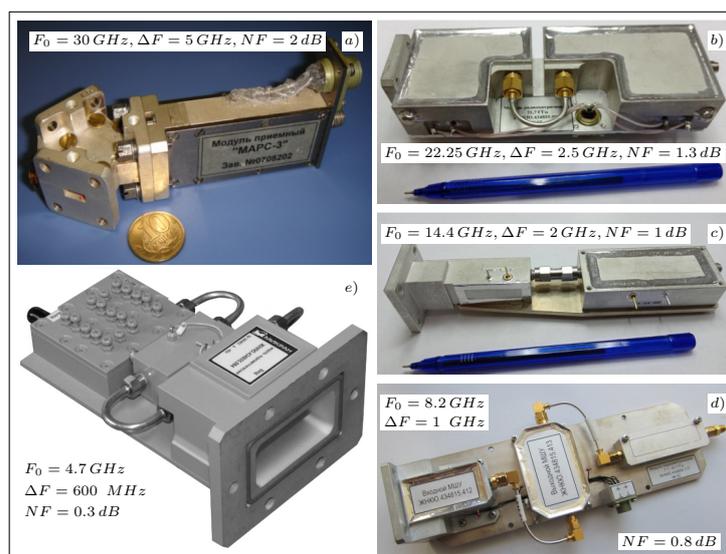


Рис. 1. Модульные радиометры РАТАН-600

Одним из направлений развития комплексов радиометров континуума РАТАН-600 является построение модульных радиометров. Здесь слово “модульный” означает такой тип конструкции, когда радиометр имеет минимально возможные на сегодняшний день размеры и выполнен в виде небольшого СВЧ-модуля с максимальной степенью интеграции (один модуль – один радиометр). Работы в этом направлении были начаты еще в конце 90-х годов под руководством Ю.Н. Парийского и

А.Б. Берлина. В результате была разработана фокальная линейка из 16 радиометров – радиометрическая система МАРС-3, описанная в работе [Berlin et al. \(2012\)](#). Дальнейшим продвижением в “модульном” направлении была разработка модульного радиометра С-диапазона (4.4–5 ГГц), представленного в работе [Tsybulev et al. \(2018\)](#). Разработчик – НПФ “Микран”, г. Томск. Далее, в сотрудничестве с НПФ “Микран” была разработана линейка сантиметровых модульных радиометров диапазонов 21–23.5 ГГц, 13.4–15.4 ГГц, 7.7–8.7 ГГц ([Nizhelskii et al., 2018](#); [Tsybulev et al., 2022](#)).

Перечисленные пять радиометрических модулей с их основными параметрами показаны на рис. 1. Все радиометры континуума построены по общей схеме приемника прямого усиления. Рабочая полоса частот шириной 5–20 % формируется полосно-пропускающим фильтром. На входе радиометра установлен малощумящий усилитель с предельно низким (насколько позволяет современная элементная база) уровнем собственных шумов без охлаждения (при комнатных температурах). На выходе установлен квадратичный детектор на основе низкобарьерного диода с барьером Шоттки либо туннельного диода. Общее усиление радиометра –  $10^6$ – $10^7$ .

## 2 Текущая конфигурация приемных комплексов континуума

По мере разработки, изготовления и поставки на РАТАН-600 новых радиометрических модулей происходила их установка на все четыре действующие приемные комплексы радиотелескопа. В результате в течение нескольких лет новые модульные радиометры были установлены на радиотелескоп, и на сегодняшний день конфигурация приемных комплексов выглядит так, как показано в таблице 1.

**Таблица 1.** Радиометры континуума РАТАН-600 (последние 4 строки относятся к четырехполосному радиометру; в приемной кабине № 5 установлено 4 таких четырехполосных радиометра)

Центральная частота, ГГц	Ширина полосы, МГц	Чувствительность по плотности потока, мЯн	HPBW <sub>x</sub> , arcsec
Вторичное зеркало № 1			
30	5000	100	9
22.25	2500	50	11
14.4	2000	25	13
11.2	1000	15	15.5
8.2	1000	10	22
4.7	600	5	45
2.25	80	40	80
1.25	60	200	110
Вторичное зеркало № 2			
30	5000	200	11
22.25	2500	95	16.5
14.4	2000	50	18
11.2	1000	30	23
8.2	1000	20	30
4.7	600	10	53
Вторичное зеркало № 3			
30	5000	200	11
8.2	1000	20	30
4.7	600	10	53
Вторичное зеркало № 5			
14.4	2000	50	11
2.25	80	40	80
4.475	150	10	35
4.625	150	10	35
4.775	150	10	35
4.925	150	10	35

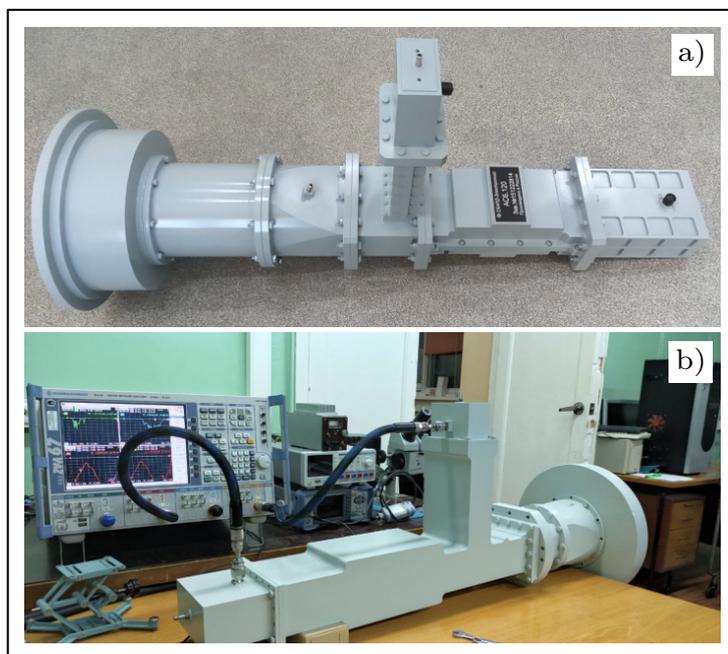
Приемная кабина № 1 содержит 8 радиометров в диапазоне 1.25–30 ГГц, кабина № 2 оснащена шестью радиометрами в диапазоне 4.7–30 ГГц, кабина № 3 – тремя радиометрами (4.7–30 ГГц). Приемная кабина № 5 содержит 6 радиометров (диапазон 2.2–14.4 ГГц), но 4 радиометра диапазона 4.7 ГГц являются 4-канальными со смежными полосами по 150 МГц, так что общее число радиометрических каналов в этом приемном комплексе равно 18.

В процессе оснащения РАТАН-600 новыми радиометрами также решалась задача унификации периферийного оборудования радиометров: источников и систем питания, усилителей постоянного тока на выходах квадратичных детекторов, систем включения калибровочных сигналов радиометров и систем питания калибровочных генераторов шума. Все перечисленные компоненты периферии радиометров выполнены по единым схемам и на одинаковой элементной базе. Системы регистрации данных радиометрических комплексов континуума также нами унифицированы, см. [Tsybulev \(2011\)](#).

### 3 Дециметровые диапазоны

Современная ситуация в дециметровых диапазонах известна радиоастрономам: становится все труднее наблюдать космические радиоисточники из-за ухудшения помеховой обстановки. Источниками помех являются наземные средства связи, транспорт, искусственные спутники Земли, радиолокация и др.

Для строительства радиотелескопа РАТАН-600 выбиралось “радиотихое” место: в 60–70-е годы в месте расположения радиотелескопа в диапазоне 900–3000 МГц не было мешающих излучений. В настоящее время ситуация кардинально изменилась. Особенно это отразилось на наблюдениях в радиоконтинууме, когда требуются достаточно широкие (~10 %) полосы принимаемых частот. Поэтому радиоастрономы вынуждены смещать полосы своих радиометров в оставшиеся, относительно спокойные участки дециметровых диапазонов, сужать полосы приема, строить аналоговые и цифровые системы помехоподавления.



**Рис. 2.** Двухчастотные антенны дециметровых диапазонов 13 и 25 см: а) разработка АО “СКАРД-Электроникс”, г. Курск; б) антенна разработки ФРУП СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино

Одним из актуальных современных способов активного помехоподавления является установка на выходе радиометра цифрового быстродействующего спектроанализатора вместо квадратичного детектора. Спектроанализатор должен иметь достаточное число спектральных каналов и позволять в режиме реального времени удалять радиопомехи, синтезируя при этом широкую полосу приема

путем суммирования только “чистых” спектральных каналов и “чистых” участков каждого канала в отдельности. Это позволит сохранить достаточно широкие полосы частот радиометров. Такой подход основан на относительно узкополосной природе радиопомехи (средств связи) в дециметровом участке длин волн.

Для реализации данного подхода для РАТАН-600 разработаны две дециметровые рупорные антенны, каждая из которых имеет 2 рабочих диапазона: 1400–1500 МГц и 2200–2300 МГц, см. рис. 2. Фазовые центры обоих диапазонов совмещены в данной антенне. Двухчастотность антенны позволяет экономить место на фокальной линии вторичного зеркала радиотелескопа, а также снизить уровень внеосевых аберраций для этих диапазонов. Кроме формирования рабочих полос антенны подавляют мешающие излучения (GSM 900, GSM 1800, 3G), что позволяет не опасаться перегрузок усилителей радиометров. Ширина диаграмм направленности антенн составляет 110 градусов, что соответствует апертуре рабочего сектора главного зеркала РАТАН-600.

Дальнейшим направлением работ в дециметровых диапазонах является разработка и изготовление соответствующих цифровых приемников-спектроанализаторов для возможности активного помехоподавления. Также спектроанализаторы позволят реализовать режим высокоскоростных наблюдений быстрых радиовсплесков.

## 4 Заключение

Все модульные радиометры, перечисленные в работе, установлены на приемных комплексах РАТАН-600 и включены в круглосуточные наблюдения по утвержденным наблюдательным программам. Ведется подготовка к установке двухчастотных дециметровых рупорных антенн и изготовление соответствующей радиометрической аппаратуры. Проводится мониторинг и анализ помеховой ситуации в дециметровых диапазонах, а также ведется обсуждение технического задания на разработку и изготовление цифровых приемников-спектроанализаторов.

**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”.

## Литература

- Berlin A.B., Parijskij Y.N., Nizhelskij N.A., et al., 2012. *Astrophysical Bulletin*, vol. 67, no. 3, pp. 340–352.
- Nizhelskii N., Tsybulev P., Kratov D., et al., 2018. In Verkhodanov O. et al. (Eds.), *Ground-Based Astronomy in Russia: 21st Century*. Nizhnij Arkhyz: Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, p. 31.
- Tsybulev P.G., 2011. *Astrophysical Bulletin*, vol. 66, no. 1, pp. 109–122.
- Tsybulev P.G., Nizhelskii N.A., Dugin M.V., et al., 2018. *Astrophysical Bulletin*, vol. 73, no. 4, pp. 494–500.
- Tsybulev P.G., Nizhelskij N.A., Dugin M.V., et al., 2022. *Astrophysical Bulletin*, vol. 77, no. 4, pp. 516–518.

## Continuum radiometers of the RATAN-600 radio telescope

*P.G. Tsybulev<sup>1</sup>, N.A. Nizhelskii<sup>1</sup>, V.A. Titov<sup>2</sup>, A.N. Borisov<sup>1</sup>, D.V. Kratov<sup>1</sup>, R. Yu. Udovitskiy<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz 369167, Russia  
*peter@sao.ru*

<sup>2</sup> NPF Mikran, Tomsk 634041, Russia

**Abstract.** The paper presents the main directions in developing the continuum radiometer complexes of the RATAN-600 radio telescope, and also their current status is shown.

**Key words:** radio receivers, detectors, radio astronomy