

УДК 520.8.056

МОДУЛЬНЫЕ РАДИОМЕТРЫ САНТИМЕТРОВЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В КONTИНУУМЕ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2022 П. Г. Цыбулев^{1*}, Н. А. Нижельский¹, М. В. Дугин², В. А. Титов²,
П. В. Призов¹, А. Н. Борисов¹, Д. В. Кратов¹, Р. Ю. Удовицкий¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²ЗАО НПФ «Микран», Томск, 634041 Россия

Поступила в редакцию 8 августа 2022 года; после доработки 31 августа 2022 года; принята к публикации 3 сентября 2022 года

Представлены три новые разработки — радиометрические модули сантиметровых диапазонов, а также конструкция каждого радиомодуля. Показано применение новых разработок при построении на их основе неохлаждаемых радиометров полной мощности. Реализованные на практике параметры новых радиометрических модулей близки к предельным на настоящий момент значениям для неохлаждаемых СВЧ-усилителей. Новые радиометры предназначены для широкого использования в наблюдениях в континууме на радиотелескопе РАТАН-600. Данный подход является универсальным и перспективным для применения на любом радиотелескопе.

Ключевые слова: *приборы: детекторы*

1. ВВЕДЕНИЕ

На радиотелескопе РАТАН-600 продолжается серия работ по модернизации комплексов высокочувствительных радиометров континуума. Массовое применение в радиоастрономических наблюдениях относительно недорогих модульных неохлаждаемых радиометров (комплексы «МАРС-3» и радиометры диапазона 4.7 ГГц, см. Berlin et al. (2012), Tsybulev et al. (2018)) показало рентабельность этого направления для радиотелескопа РАТАН-600. В данной работе представлены новые разработки совместно с НПФ «Микран» (г. Томск), модульных неохлаждаемых широкополосных радиометров трех диапазонов: 22.25, 14.5 и 8.2 ГГц с полосами приема 2.5, 2 и 1 ГГц соответственно.

В настоящее время радиотелескоп РАТАН-600 проводит наблюдения по трем независимым программам. Для этого используется три сектора кругового главного зеркала: Северный, Южный и Западный. На каждом из этих секторов имеется вторичное зеркало (на Южном секторе их два) с приемной кабиной, где установлены комплексы радиометров континуума. Такая конфигурация эквивалентна трем независимым радиотелескопам с горизонтальным раскрытием антенны 250 м и задействует четыре приемных комплекса радиометров. Оснащение этих комплексов, требующее большого

количества радиометров высокой чувствительности различных частот — одна из задач, решаемых в рамках данной работы. Все радиометры континуума РАТАН-600 в настоящее время построены по схеме «радиометра полной мощности» (РПМ). Это приемники прямого усиления с высоким, 60–65 дБ СВЧ-усилением, полоса приема которых задается полосно-пропускающим фильтром.

Новые неохлаждаемые радиометры континуума строятся на основе радиометрических модулей разработки НПФ «Микран». Эти модули являются основными строительными блоками радиометров и включают в себя СВЧ-часть радиометра: малошумящий усилитель, усилители мощности и полосно-пропускающий фильтр. Внешними по отношению к модулю являются: на входе — рупорная антенна (Ant на рис. 1) с последующим трактом калибровки (на рисунке не показан), на выходе — квадратичный детектор, усилитель низкой частоты и система регистрации (на рис. 1 Det, DC Amp и DAS соответственно).

2. РАДИОМЕТР ДИАПАЗОНА 1.35 СМ

Долгое время на РАТАН-600 в этом диапазоне использовался криогенный радиометр с охлаждением малошумящего усилителя (МШУ) до температуры 16 К. Радиометр был модуляционного типа для устранения шума вида $1/f$. В 2010 г.

*E-mail: peter@sao.ru

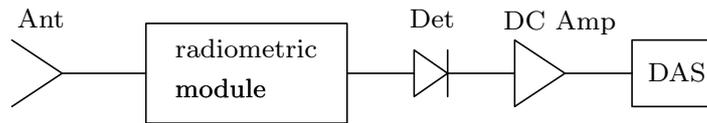


Рис. 1. «Радиометр полной мощности» на основе радиометрического модуля. Обозначены антенна (Ant), квадратичный детектор (Det), усилитель низкой частоты (DC Amp) и система регистрации (DAS).

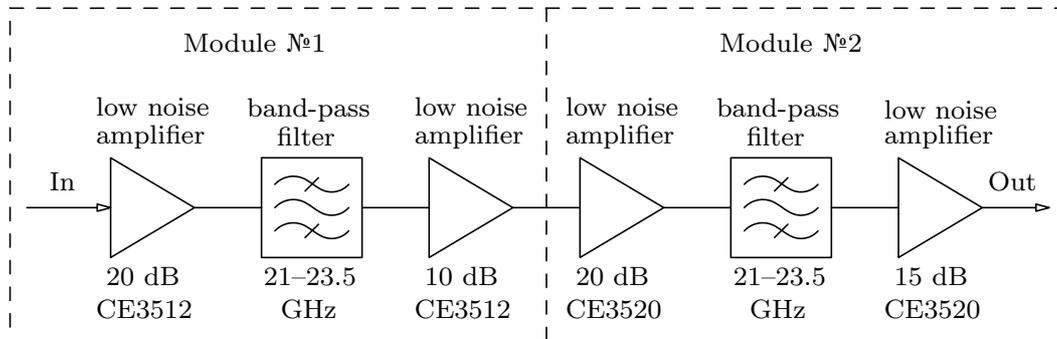


Рис. 2. Блок-схема радиометрического модуля диапазона 22.25 ГГц.

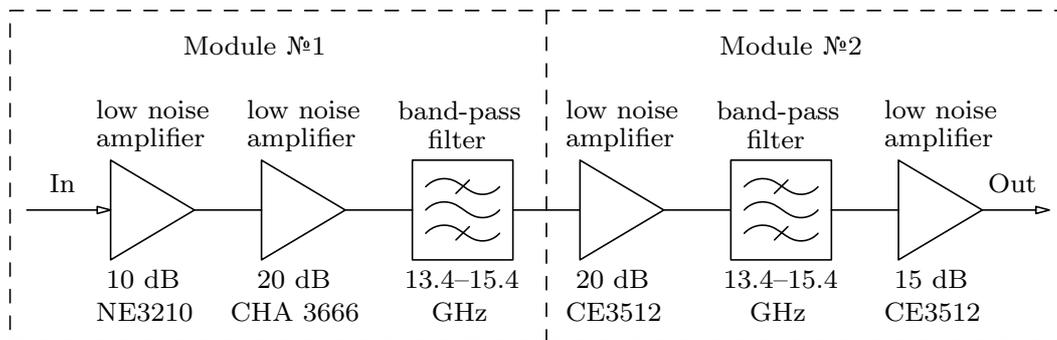


Рис. 3. Блок-схема радиометрического модуля диапазона 14.4 ГГц.

на смену ему пришли неохлаждаемые радиометры на маломощных усилителях MALN210235 (НПФ «Микран»), построенные по схеме РПМ. Чувствительность новых радиометров сравнима с чувствительностью криорадиометра на масштабах времени нескольких секунд за счет изменения схемы построения радиометра с модуляционной на РПМ.

На НПФ «Микран» разработан для РАТАН-600 новый радиометрический модуль этого диапазона, имеющий компактную конструкцию.

Блок-схема радиометрического модуля показана на рис. 2. Как видно из рисунка, конструктивно модуль состоит из двух субмодулей. Характеристики радиометра, построенного на основе данного радиомодуля следующие: коэффициент шума 1.3 дБ, общее усиление около 65 дБ, рабочий диапазон 21–23.5 ГГц. Модуль имеет волноводный вход (волновод 11×5.5 мм) и коаксиальный выход 3.5 мм («розетка»). Питание радиометрического модуля осуществляется от источника постоянного

тока от +8 до +12 В, общий потребляемый ток не превышает 140 мА. Габаритные размеры модуля (Д×В×Ш) 140×50×30 мм, масса 485 г.

3. РАДИОМЕТР ДИАПАЗОНА 2.08 см

Этот диапазон на радиотелескопе РАТАН-600 должен прийти на смену или в дополнение к традиционному для нас диапазону 2.7 см (10.7–11.7 ГГц), в котором на сегодняшний день имеется огромное количество источников помех (спутники). Блок-схема соответствующего радиометрического модуля представлена на рис. 3.

Конструктивно данный модуль, как и предыдущий, выполнен в виде двух субмодулей, соединенных между собой коротким коаксиальным трактом 3.5 мм. Характеристики модуля: коэффициент шума 1 дБ, коэффициент усиления 65 дБ, рабочий диапазон 13.4–15.4 ГГц. Вход волноводный, волновод 16×8 мм, КСВН по входу 1.4. Выход

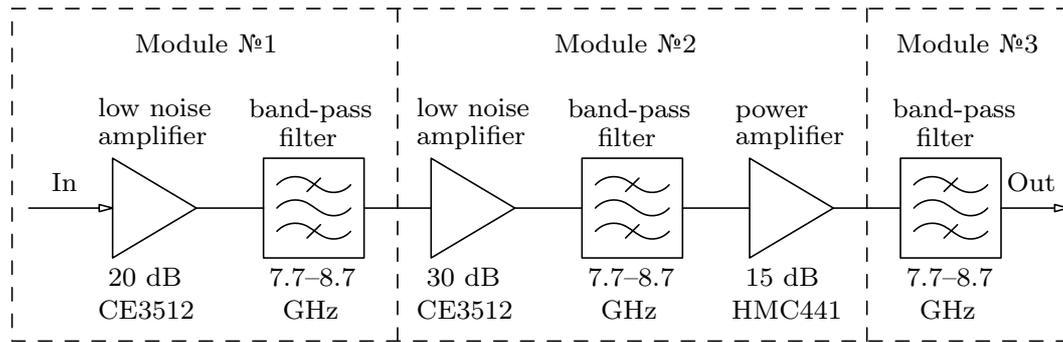


Рис. 4. Блок-схема радиометрического модуля диапазона 8.2 ГГц.

коаксиальный, 3.5 мм, гнездо, КСВН по выходу 1.2. Напряжение питания радиомодуля — от +8 до +12 В, потребляемый ток 160 мА. Габаритные размеры модуля (Д×В×Ш) 160×35×35 мм.

4. РАДИОМЕТР ДИАПАЗОНА 3.6 СМ

Диапазон частот 7.7–8.7 ГГц является традиционным для РАТАН-600. Ранее в нем применялись охлаждаемые радиометры. С 2010 г. был совершен переход на неохлаждаемые, с использованием МШУ MALN7987-12 разработки НПФ «Микран», с одновременным изменением схемы модуляционного радиометра на «радиометр полной мощности». Сейчас ведется изготовление нового радиометрического модуля на этот диапазон. Блок-схема модуля представлена на рис. 4. Конструктивно он выполнен из трех submodule, соединенных между собой короткими отрезками коаксиального тракта 3.5 мм. Коэффициент шума модуля не превышает 0.7 дБ. Вход волноводный, 28.5×12.6 мм, выход коаксиальный, 3.5 мм. Напряжение питания — от +8 до +12 В, потребляемый ток — не более 160 мА.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ разработаны и изготовлены широкополосные радиометрические модули диапазонов 22.25 ГГц (ширина полосы 2.5 ГГц) и 14.4 ГГц (ширина полосы 2 ГГц). В настоящее время собраны и протестированы в лаборатории соответствующие радиометры. Радиометр 22.25 ГГц на базе нового радиометрического модуля уже используется в наблюдениях на РАТАН-500 в течение 5 месяцев. Измеренные на практике характеристики (чувствительность порядка $5 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$, долговременная стабильность) полностью соответствуют расчетным. Идет подготовка к установке на радиотелескопе радиометров диапазона 14.4 ГГц.

Разработан модуль диапазона 8.2 ГГц (ширина полосы 1 ГГц). В настоящее время радиометрические модули этого диапазона находятся в стадии изготовления.

В качестве системы регистрации данных для новых радиометров используется система ERDAS¹ (Tsybulev 2011). Она позволяет оцифровывать сигналы радиометров в полосе частот от 0 до 8 КГц и используется нами для широкого круга наблюдательных задач.

Необходимо заметить, что детектор не входит в конструкцию модуля (см. блок-схемы радиометрических модулей на рис. 2–4). Это сделано для нескольких целей:

- Для возможности построения различных вариантов радиометра, когда между модулем и детектором необходимо включить другое СВЧ-устройство. Например, модульные радиометры, представленные в работе Tsybulev et al. (2018) применяются нами в том числе и в многоканальном варианте, когда широкая полоса радиометра 600 МГц делится с помощью банка фильтров на четыре смежных полосы по 150 МГц с последующим квадратичным детектированием сигналов. На выходе такой системы требуется уже не один, а четыре детектора. Также, при необходимости, между радиометрическим модулем и детектором возможна установка аттенюатора для более точного выбора рабочего диапазона входных мощностей для детектора.
- Для возможности замены вышедшего из строя детектора, которые иногда выходят из строя либо полностью, либо частично. При частичном выходе из строя наблюдается изменение видеосопротивления детектора с одновременным появлением в нем шума вида $1/f$.

¹Embedded Radiometric Data Acquisition System

Руководствуясь этими соображениями, в радиометрах, построенных на основе данных радиометрических модулей, мы используем дискретные детекторы, выполненные в корпусе для коаксиального тракта 3.5 мм.

Данные разработки позволяют оснастить все приемные комплексы континуума радиотелескопа RATAN-600 новыми радиометрами.

Важно отметить реализованные на практике значения коэффициентов шума новых радиометрических модулей. По нашим измерениям они равны 1.3 дБ, 1 дБ и 0.7 дБ в диапазонах 1.35 см, 2.08 см и 3.6 см соответственно. Такие значения очень близки к предельным значениям для неохлаждаемых СВЧ-усилителей, которые в принципе достижимы на сегодняшний день в мире.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Centimeter Band Modular Radiometers for Continuum Observations at RATAN-600 Radio Telescope

P. G. Tsybulev¹, N. A. Nizhelskij¹, M. V. Dugin², V. A. Titov², P. V. Prizov¹, A. N. Borisov¹, D. V. Kratov¹, R. Yu. Udovitskiy¹

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

²Micran, Tomsk, 634041 Russia

We present three new design solutions—centimeter-band radiometric units and the design of each radio unit. We demonstrate the development of an uncooled tuned receiver based on this unit which is meant for operating in the total-power radiometer mode. In practice the parameters of the new radiometric units are currently close to the limit values for uncooled microwave amplifiers. The new radiometers are designed to be used for continuum observations at the RATAN-600 radio telescope. This approach is universal and promising to be applied at any radio telescope.

Keywords: *instrumentation: detectors*

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на RATAN-600 проводятся при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Поддержка научного оборудования осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. B. Berlin, Y. N. Parijskij, N. A. Nizhelskij, et al., *Astrophysical Bulletin* **67** (3), 340 (2012).
2. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 109 (2011).
3. P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskii, M. V. Dugin, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (4), 494 (2018).