

УДК 520.27

РАДИОМЕТР С-ДИАПАЗОНА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ В КОНТИНУУМЕ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2018 П. Г. Цыбулёв^{1*}, Н. А. Нижельский¹, М. В. Дугин²,
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 24 апреля 2018 года; принята в печать 24 июля 2018 года

Описано развитие средств и методов наблюдений в диапазоне 4.7 ГГц на радиотелескопе РАТАН-600. Представлена новая разработка — радиометрический модуль, а также построение на его основе неохлаждаемого приемника прямого усиления, предназначенного для работы в режиме «радиометра полной мощности». Обсуждается конструкция радиомодуля и особенности конструкции радиометра. Показана возможность проведения наблюдений в режиме радиометра полной мощности с расчетной чувствительностью на масштабах времени до 10 секунд. На масштабах времени до 100 секунд чувствительность такого радиометра остается выше, чем у модуляционного.

Ключевые слова: *инструменты: детекторы*

1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках плановой темы НИР на радиотелескопе РАТАН-600 проводятся работы по модернизации комплекса высокочувствительных радиометров континуума с целью повышения их чувствительности и долговременной стабильности, а также улучшения эксплуатационных характеристик, включая надежность, экономичность и простоту в обслуживании.

В этой статье мы расскажем о развитии и о сегодняшнем состоянии радиометра С-диапазона. Характерными особенностями данного радиометра являются достаточно широкая полоса приема (600–800 МГц), техническая возможность достижения низкого коэффициента шума малошумящего усилителя (МШУ), низкий вклад температуры атмосферы и, соответственно, низкая температура системы «антенна+радиометр.» Все эти факторы дают максимальную чувствительность по плотности потока именно в этом диапазоне на РАТАН-600.

Долгое время наблюдения проводились на криорadiометре с центральной частотой 3.95 GHz и полосой 500 МГц [1], однако в связи с помехами от геостационарных спутников мы 15 лет назад перешли на более высокую частоту — 4.8 GHz. С тех пор менялась архитектура радиометра, его элементная база, в пределах ± 100 МГц менялась

центральная частота. Ниже представлены наши разработки и результаты.

2. КРИОРАДИОМЕТР

Криорadiометр диапазона $F_0 = 4.8$ GHz с шириной полосы $B = 800$ МГц был введен в наблюдения на РАТАН-600 в 2003 году. Шумовая температура системы «антенна+радиометр» составляла 39 К на средних углах возвышения антенны, где у РАТАН-600 минимальная антенная температура в этом диапазоне. На входе радиометрической системы был установлен разделитель круговых поляризаций (РКП), имеющий 2 волноводных выхода. Таким образом, система была двухканальной с общим входом и после разделения поляризаций представляла собой 2 независимых радиометра. Два МШУ, с усилением +32 dB каждый, охлаждались гелиевыми криосистемами замкнутого цикла до температуры примерно 15 К. Дальнейшее усиление сигналов +40 dB производилось в неохлаждаемом выходном блоке. Там же располагались полосно-пропускающие фильтры (ППФ), детекторы Шоттки с нулевым барьером и усилители постоянного тока (УПТ).

Оба канала радиометрической системы были построены по схеме радиометра с добавлением шума (РДШ), когда радиометр поочередно, с частотой модуляции (около 120 Hz), принимает сигнал либо от антенны (полупериод «antenna»), либо от источника шумового сигнала (полупериод «reference»),

*E-mail: peter@sao.ru

с последующим вычитанием протектированных сигналов этих полупериодов. Во входных волноводных трактах каждого канала были установлены направленные ответвители для подачи калибровочных шумовых сигналов от общего для двух радиометров твердотельного генератора шума (ГШ), а также сигналов «балансировки» РДШ от двух независимых ГШ для выравнивания шумовых мощностей в полупериодах «antenna» и «reference» перед началом каждого наблюдения.

Система регистрации была построена на основе PCI-модуля, установленного в персональный компьютер, и содержала независимые аналого-цифровые преобразователи (АЦП) для каждого радиометра, а также быстродействующий цифровой сигнальный процессор (ЦСП) для цифрового синхронного детектирования модулированных сигналов радиометров. При этом отдельные полупериоды модуляции регистрировались и записывались на диск компьютера раздельно, что позволяло произвести завершение процедуры синхронного детектирования сигналов радиометров в пост-обработке наблюдательных данных. Такой подход дает возможность увидеть «сырые» данные обоих полупериодов как для контроля стабильности мощности опорного ГШ, так и для исследования избыточных низкочастотных шумов радиометра, имеющих спектр вида $1/f^\alpha$. В работах [2, 3] эти шумы связываются с флуктуациями усиления. Также в задачи системы регистрации входило и управление радиометрами: их автоматическая «балансировка» и формирование сигналов модуляции.

3. НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ РАДИОМЕТР

Изменения в радиометрической системе произошли в 2014 году и вызваны появлением неохлаждаемых маломощных усилителей для данного диапазона MALN-4450-11 производства НПФ «Микран» (Томск) с коэффициентом шума 0.4 dB и усилением +36 dB. Паспортный диапазон этих МШУ составляет 4.4–5.0 GHz, однако в качестве рабочей полосы радиометра с новыми усилителями мы выбрали 4.3–4.9 GHz, что обусловлено обнаруженной нами в то время помехой около 5.1 GHz. Шумовая температура системы «антенна+радиометр» несколько возросла по сравнению с криорадиометром и составила 60 K, но достигнуто это без криоохлаждения (на тот момент применяемые нами криосистемы многократно выработали свой ресурс и были отключены в связи с ухудшением рабочих характеристик). Результирующая чувствительность радиометра в режиме РДШ ухудшилась по сравнению с криорадиометром в 1.78 раз (в 1.16 раз за счет уменьшения ширины полосы и в 1.54 раза за счет увеличения температуры системы T_{sys}). Однако,

как было нами показано в работе [4], современные неохлаждаемые радиометры, построенные на усилителях производства НПФ «Микран», могут работать в режиме радиометра полной мощности с расчетной чувствительностью на масштабах времени до 10 секунд, а на масштабах времени до 100 секунд их чувствительность остается не хуже, чем у модуляционного радиометра. В то же время, характерные времена прохождения радиисточника через неподвижную диаграмму направленности в основном пассажном режиме наблюдений на РАТАН-600 составляют менее 7–10 секунд в зависимости от высоты наблюдений и сектора радиотелескопа. Таким образом, данный радиометр был переведен нами в режим радиометра полной мощности, и это привело к улучшению чувствительности в 1.12 раза по сравнению с предыдущим криорадиометром.

4. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ

Выше описан важный этап модернизации радиометра, которых заключался:

- в переходе от охлаждаемого радиометра к неохлаждаемому;
- в переходе от схемы «радиометра с добавлением шумов» к схеме «радиометра полной мощности».

Однако, достаточно распределенная по пространству конструкция радиометра также потребовала пересмотра.

В то же время на РАТАН-600 уже был получен положительный опыт создания и использования радиометров, построенных по принципу «один радиометр — один модуль» [5]. Речь идет о радиометрической системе MARS-3 диапазона 30 GHz. Модульная конструкция наиболее компактна, позволяет применять простейшие и короткие антенно-фидерные тракты, интегрировать приемники в более сложные наблюдательные комплексы.

Так мы пришли к идее разработки радиометра полной мощности (РПМ) в модульном исполнении для диапазона 4.7 GHz, как и в предыдущем случае — с шириной полосы 600 MHz. Центральная частота была сдвинута на 100 MHz вверх из-за помех от самолетов (радиовысотометры самолетов излучают на частотах около 4.3 GHz, и это приводит к сильным помехам в регистрируемых сигналах). Такой радиометр был спроектирован и изготовлен для нас в НПФ «Микран» (Томск). Блок-схема радиометра приведена на рис. 1.

Изображение модуля представлено на рис. 2. Коэффициент шума радиометра равен 0.4 dB, диапазон напряжений питания составляет 8–12 V, потребляемый ток — около 140 mA.

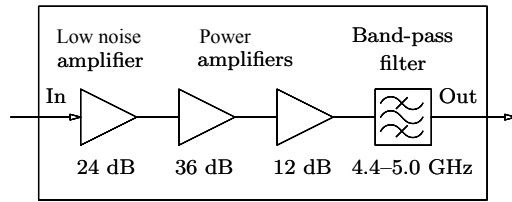


Рис. 1. Блок-схема нового радиометрического модуля диапазона 4.7 GHz.

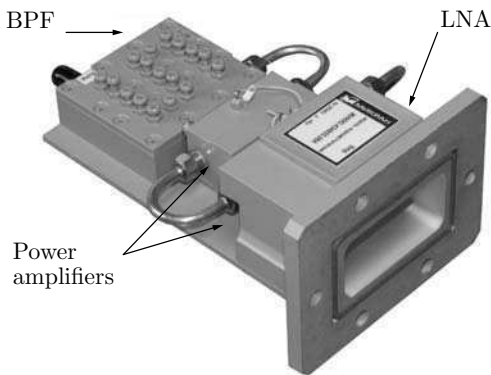


Рис. 2. Внешний вид радиометрического модуля. Здесь BPF — полосно-пропускающий фильтр (Band Pass Filter), LNA — малошумящий усилитель (Low Noise Amplifier).

МШУ модуля — двухкаскадный, выполнен на транзисторах NE334 (компания NEC) с суммарным усилением +24 dB, а также содержит первый полосовой фильтр. В последующих усилителях мощности применены транзисторы VMMK-1218 и усилители VMMK-2503 (компания Avago Technologies). Общее усиление радиомодуля составляет +72 dB, что при расчетной $T_{\text{sys}} \approx 45$ K обеспечивает мощность на выходе $P_{\text{out}} \approx -22$ dBm. На выходе радиомодуля установлен полосовой фильтр на объемных резонаторах с чебышевской характеристикой 9-го порядка, полосой 4.4–5.0 GHz, затуханием в полосе пропускания не хуже –1 dB. Характеристики фильтра представлены на рис. 3.

5. РАДИОМЕТР

На основе нового радиометрического модуля был собран, протестирован в лаборатории и установлен на радиотелескопе новый неохлаждаемый радиометр полной мощности, который в настоящее время используется в круглосуточных наблюдениях по программам РАТАН-600. Ниже описаны конструкция и основные особенности составных частей радиометра.

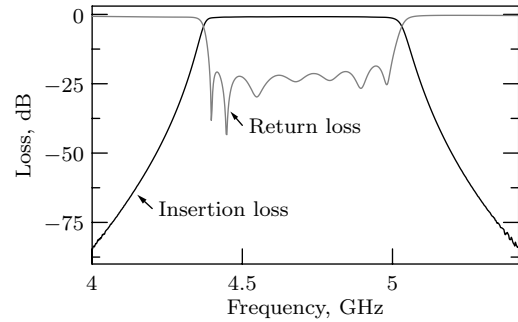


Рис. 3. Характеристики полосно-пропускающего фильтра.

5.1. Сигнальный тракт

Антенно-фидерный тракт состоит из первичного круглого облучателя, отрезка волноводной линии, содержащей переход с круглого сечения на прямоугольное, и волноводного направленного ответвителя для подачи калибровочного сигнала. Далее следует радиометрический модуль, на выходе которого установлен детектор на основе обращенного туннельного диода АСТР-1625NC3 (Aeroflex), работающий в диапазоне 1–18 GHz, с чувствительностью в полосе данного радиометра $\gamma \approx 1300 \mu\text{V}/\mu\text{W}$. Детектор имеет низкое видеосопротивление (около 100 Ω) и отрицательную полярность выпрямленного напряжения, поэтому усилитель постоянного тока построен на операционном усилителе (ОУ) в инвертирующем включении со входным сопротивлением примерно 2 k Ω . В качестве усилителя применен zero-drift ОУ ADA4528 (Analog Devices). Проинвертированный и усиленный выпрямленный сигнал поступает на оцифровку в систему регистрации данных, в составе которой перед АЦП установлен активный фильтр 4-го порядка с характеристикой Бесселя [6] и частотой среза 8 kHz.

5.2. Тракт калибровки

Основное свойство, которым должна обладать система калибровки радиометра, — постоянство мощности калибровочного шумового сигнала, поскольку точность поддержания этой мощности напрямую отражается на точности измерения амплитуды радиоисточников. В основном, мощность ГШ зависит от физической температуры T_{phys} , при которой он находится. Поэтому в системах калибровки применяется термостатирование всех элементов, чувствительных к изменениям T_{phys} : ГШ, пассивные аттенюаторы, p-i-n аттенюаторы и др. Требования к точности термостатирования зависят от температурной чувствительности указанных элементов схемы.

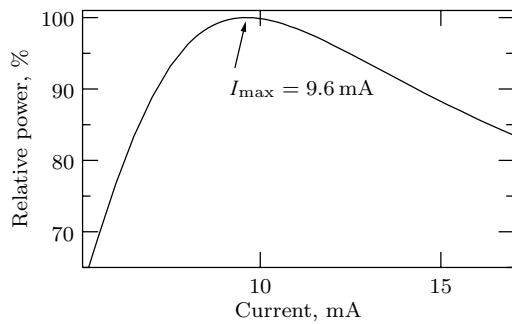


Рис. 4. Зависимость мощности калибровочного генератора шума от протекающего через него тока.

В нашей разработке мы решили полностью исключить из схемы все компоненты, чувствительные к T_{phys} , оставив только ГШ, для которого были проведены дополнительные исследования.

Для калибровки радиометра используется твердотельный ГШ М31305-1 (производства НПП «Исток», Фрязино, Россия) со спектральной плотностью мощности шума (СПМШ) примерно 35 dB. Рассмотрим рис. 4, где представлена зависимость относительной мощности этой модели ГШ, выраженной в процентах, от протекающего через него тока. Кривая зависимости имеет максимум, который для данного экземпляра ГШ достигается при токе $I_{\text{max}} = 9.6$ mA. При токах вдали от I_{max} наблюдается достаточно сильная зависимость мощности ГШ от температуры (около $1\%/1^\circ\text{C}$).

Нами найдено, что если значение тока ГШ выбрать равным I_{max} (или достаточно близким), то зависимость мощности ГШ от температуры крайне слабая и составляет примерно $0.1\%/1^\circ\text{C}$. Причем в нашем эксперименте ток ГШ не стабилизировался и задавался резистором в цепи питания ГШ. Несмотря на это, ГШ показал отклонение мощности от максимальной всего на 2% при изменении температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$ от ее начального значения. Это обстоятельство вместе с удалением из схемы термочувствительных элементов снижает требования к системе термостатирования генератора калибровочного шума. Исследования пяти экземпляров ГШ данной модели показали, что значения тока I_{max} для них лежат в пределах 9.6 ± 1 mA и уточняются индивидуальными измерениями.

Для подачи в основной тракт радиометра шумовой мощности калибровочного ГШ с высокой СПМШ (около 35 dB) нами разработан и изготовлен волноводный направленный ответвитель с переходным ослаблением примерно 50 dB. Эквивалентная шумовая температура калибровочного сигнала равна 7.14 K и найдена путем двухточечной калибровки с применением жидкого азота в согласованной нагрузке с исходной температурой 290 K,

установленной на входе антенно-фидерного тракта радиометра.

Включение ГШ осуществляется подачей на него питающего тока I_{max} от источника стабилизированного напряжения 36 V с помощью твердотельного оптореле, управляемого логическими уровнями напряжений (0 или 4 V) от системы регистрации. За время процедуры калибровки (4 переключения по 3.2 секунды) саморазогрев ГШ протекающим через него током $I_{\text{max}} \approx 9.6$ mA незначителен, и не вносит ошибки в измерения.

6. ИЗМЕРЕНИЯ ШУМА РАДИОМЕТРА

На рис. 5 представлено одновременное измерение спектральной плотности мощности шума радиометра для двух режимов работы: модуляционного и режима «полной мощности».

Для измерений вход радиометрического модуля был закорочен металлической пластиной. При этом получается более низкая температура системы, чем в случае установки на входе согласованной нагрузки. Кроме того, установка согласованной нагрузки на входе дает дополнительные нежелательные температурные дрейфы, связанные с изменениями температуры окружающей среды в лаборатории в ходе длительного 12-часового эксперимента. В то же время, закорачивание входа металлической пластиной дает температуру системы, близкую к удвоенной температуре радиометра. Перед измерениями радиометр был помещен в пассивный термостат и прогрет.

Программное обеспечение системы регистрации данных работает в режиме синхронного детектирования, разделяя запись на 2 полупериода модуляции, хотя сигнал радиометра при этом не модулируется. Это эквивалентно измерениям сигнала модуляционного радиометра, который полностью сбалансирован, то есть мощности шумов в каждом из полупериодов модуляции равны. Сигналы 2-х полупериодов выделяются цифровым синхронным детектором и регистрируются отдельно. Тогда их полусумма даст сигнал радиометра полной мощности (его СПМШ представлена нижней кривой), а их разность — сигнал модуляционного радиометра (его СПМШ — верхняя кривая). Верхняя горизонтальная линия представляет собой оценку уровня СПМШ модуляционного радиометра равную S_{MOD} . Тогда теоретическое значение СПМШ радиометра полной мощности вычисляется делением S_{MOD} на 4 и показано нижней горизонтальной прямой как S_{TRP} .

По рисунку видно, что реальная СПМШ радиометра полной мощности мало отклоняется от ее теоретического значения, что говорит о малости шума вида $1/f^\alpha$, причем показатель степени α существенно меньше единицы на приведенном

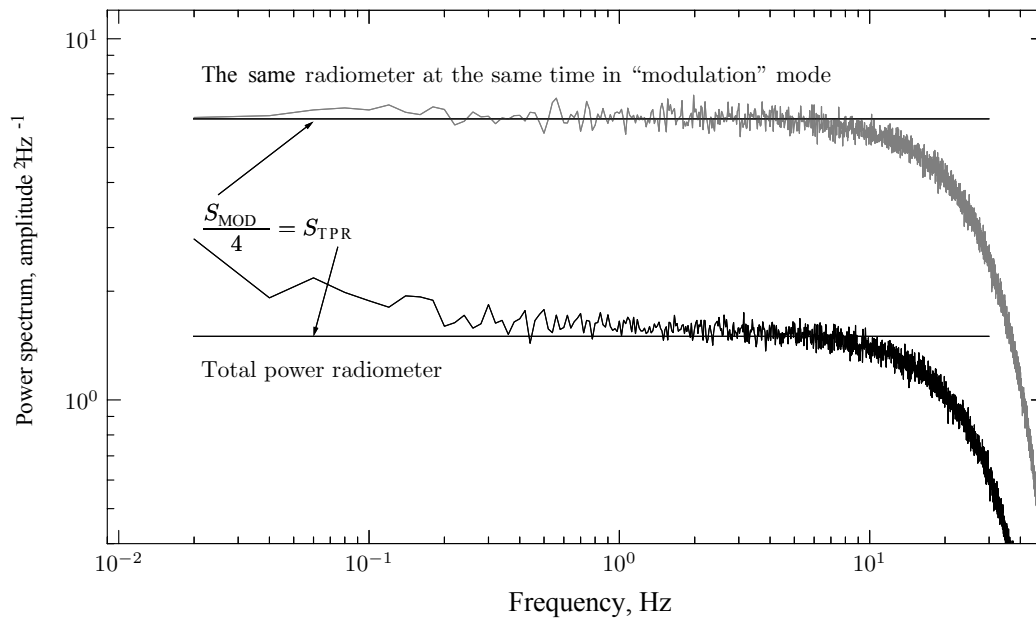


Рис. 5. Спектральные плотности мощности шума (произвольные единицы) одного и того же радиометра одновременно в двух режимах: модуляционном (верхняя кривая) и в режиме полной мощности (нижняя кривая). Здесь S_{MOD} — оценка постоянной СПМШ модуляционного радиометра, выполненная по верхней кривой, S_{TPR} — теоретическое значение «белой» компоненты СПМШ радиометра полной мощности, основанное на оценке S_{MOD} .

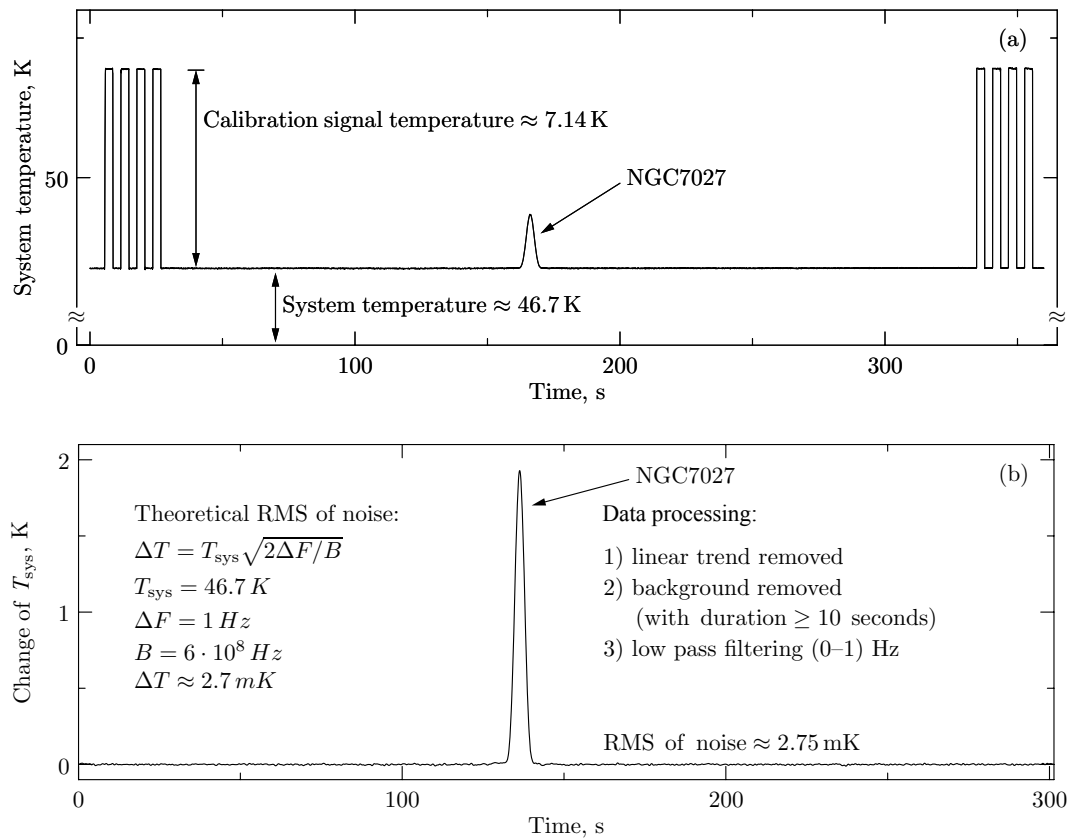


Рис. 6. Пример стандартного наблюдения точечного радиоисточника на РАТАН-600 (а) и нескольких начальных процедур обработки сигнала для оценки шума радиометра (b).

интервале частот. Это обстоятельство и позволяет нам проводить наблюдения радиометром полной мощности вместо модуляционного приема, как ранее.

7. НАБЛЮДЕНИЯ

Новый радиометр включен в наблюдения на РАТАН-600 в первой половине 2017 года. На рис. 6(а) показан пример наблюдения радиоисточника NGC 7027 — стандартная запись наблюдения точечного радиоисточника с помощью системы регистрации радиометров континуума. В начале и в конце записи включается калибровочный сигнал, который автоматически обрабатывается по завершении наблюдения.

Данные с выхода АЦП умножены на коэффициент пересчета в Кельвины, полученный в процессе обработки калибровочного сигнала от ГШ. Смещение «нуля» измерительной системы известно и учтено, так как оно имеет постоянное значение благодаря применению во всем НЧ-тракте ОУ с предельно низким дрейфом «нуля» [6]. Поэтому сигнал радиометра полной мощности с учетом калибровки показывает температуру системы антенна+радиометр, в данном случае около 46.7 К.

Рисунок 6(б) демонстрирует начальный этап стандартной процедуры обработки наблюдения, которая заключается в выделении сигнала в области радиоисточника (без калибровок), вычитании линейного тренда и фоновой кривой с характерными масштабами, превышающими длительность сигнала радиоисточника. После этого в обработке применяется прямоугольная НЧ фильтрация, согласованная с шириной Фурье-образа радиоисточника. В данном примере НЧ фильтрация выполнена с полосой 1 Нз, более широкой, чем это требуется для достижения максимального отношения сигнала от источника к шуму. Сделано это для сравнения расчетной чувствительности в полосе 1 Нз с реализованной. Как видно из приведенных на рисунке вычислений и оценок — расчетная чувствительность практически совпадает с измеренной по записи.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработан новый неохлаждаемый радиометрический модуль, который содержит в себе всю СВЧ часть приемника прямого усиления с центральной частотой 4.7 GHz, полосой 600 MHz, общим усилением 70–72 dB и коэффициентом шума 0.4 dB.

На основе данного модуля разработан и введен в наблюдения радиометр полной мощности. Температура системы с новым радиометром составляет 45–50 К в зависимости от высоты наблюдений на Северном секторе радиотелескопа РАТАН-600.

Достигнута высокая стабильность калибровочного сигнала, на основании которого ежедневно оцениваются амплитуды калибровочных источников. Среднеквадратичное отклонение этих амплитуд в течение месяца не превышает 1% без применения термостабилизации ГШ.

Новый радиометр демонстрирует предельно низкий шум вида $1/f$ в режиме «полной мощности».

В то время как криорadiометр с $F_0 = 4.8$ GHz, $B = 800$ MHz, $T_{\text{sys}} = 39$ К имел в режиме РДШ чувствительность порядка $3.9 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$, новый неохлаждаемый радиометр полной мощности с параметрами $F_0 = 4.7$ GHz, $B = 600$ MHz, $T_{\text{sys}} = 45$ К демонстрирует чувствительность около $2.6 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны за поддержку разработки радиометрического модуля грантом программы ОФН-17 «Межзвездная и межгалактическая среда: активные и протяженные объекты» 2015–2017, тема 16.13 — «Исследование переменного радиоизлучения активных звезд Млечного пути в многочастотных наблюдениях». Работы по лабораторным испытаниям радиомодуля и вводу в работу радиометра выполнены при поддержке гранта РФФИ №14.50.00043 от 30 декабря 2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Б. Берлин, Л. Г. Гассанов, В. Я. Гольнев и др., Радиотехника и электроника **27**(7), 1268 (1982).
2. R. H. Dicke, Review of Scientific Instruments **17**, 268 (1946).
3. M. Tiuri, IEEE Trans on Antennas and Propagation **12**, 930 (1964).
4. P. G. Tsybulev, M. V. Dugin, A. B. Berlin, et al., Astrophysical Bulletin **69**, 240 (2014).
5. A. B. Berlin, Yu. N. Parijskij, N. A. Nizhelskij, et al., Astrophysical Bulletin **67**, 340 (2012).
6. P. G. Tsybulev, Astrophysical Bulletin **66**, 109 (2011).

C-Band Radiometer for Continuum Observations at RATAN-600 Radio Telescope**P. G. Tsybulev, N. A. Nizhelskii, M. V. Dugin, A. N. Borisov, D. V. Kratov, and R. Yu. Udovitskii**

We describe the development of the tools and methods of 4.7-GHz band observations on RATAN-600 radio telescope and present a new design solution—a radiometric unit, and the development of an uncooled tuned receiver based on this unit and meant for operating in the “total power” radiometer mode. We discuss the design of the radio unit and the specificities of the radiometer design. We demonstrate the possibility of conducting observations in the total power radiometer mode at the theoretical sensitivity on time scales up to 10 seconds. The sensitivity of such a radiometer remains higher than that of a Dicke radiometer on time scales up to 100 seconds.

Keywords: *instrumentation: detectors*