

УДК 520.8.056

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ РАДИОМЕТР ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

© 2023 А. М. Рипак^{1*}, В. М. Богод¹, С. А. Гренков², М. К. Лебедев¹¹ Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, 196140 Россия² Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 14 апреля 2023 года; после доработки 8 сентября 2023 года; принята к публикации 12 сентября 2023 года

Разработка методов устранения влияния помех становится принципиальным вызовом для любых радиоастрономических исследований. В настоящей работе мы сообщаем о разработке и создании нового спектрометра, предназначенного для наблюдений за Солнцем на радиотелескопе РАТАН-600, способного исключать радиопомехи с использованием статистического алгоритма, основанного на оценке спектрального куртозиса. Описывается конструкция аналогового внешнего интерфейса и работа системы цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС. Достигнутое максимальное спектральное разрешение составляет 122 кГц в полосе частот 1.0–3.0 ГГц. Выходной спектр имеет от 64 до 8192 элементов разрешения по частоте в зависимости от требований наблюдателя, скорость вывода составляет до 120 спектров в секунду. Результаты испытаний и первых наблюдений за Солнцем показывают, что используемый метод может успешно обнаруживать и подавлять помехи от большинства локальных источников радиопомех.

Ключевые слова: радиометрия: спектральное и временное разрешение: помехи: методы: цифровая фильтрация

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных технологий приема радиоизлучения в наземной радиоастрономии способствует прогрессу в ряде физических направлений. Среди них проблема нагрева солнечной короны, процессы высвобождения магнитной энергии, поиск «быстрых радиовсплесков», поиск рекомбинационных и циклотронных линий, наблюдения квазипериодических пульсаций в солнечных и звездных вспышках, точные поляризационные измерения источников синхротронного излучения, комплексные исследования активных областей на Солнце, увеличение точности прогноза солнечной активности, быстрая радиофотометрия и др. (Bogod, 2020).

Получение новой астрофизической информации невозможно без применения новых технологических решений при создании приемной аппаратуры. В радиоастрономии большое значение имеет достижение высоких показателей по чувствительности, ширине охватываемого диапазона частот, спектральному разрешению и скорости обработки многопараметрических данных. Для таких крупных

инструментов, как РАТАН-600, становится существенным поддержание их высоких характеристик и создание высокочувствительной аппаратуры. Решения на основе новых технологий улучшают практически все важные параметры радиометрии. Однако технологии приносят и явные минусы в виде загрязненности радиоэфира разного рода инструментальными помехами. При этом существенно ограничиваются возможности радиоастрономии даже для наблюдений таких мощных объектов, как Солнце (Bogod, 2011).

На РАТАН-600 накоплен богатый опыт борьбы с помехами. С изменением помеховой обстановки изменялись и методы борьбы с ними. Если в 1980-е и начале 1990-х годов основными видами помех были импульсные и кратковременные шумовые выбросы, которые успешно подавлялись методом временной селекции по критерию превышения сигналом порогового значения (Tsybulev et al., 2007), то с развитием мобильной связи, спутниковых систем, телевидения, появления бытовых СВЧ-приборов, характер действующих помех стал долговременным и пришлось разрабатывать и применять более изощренные методы их подавления. Подход к подавлению стал уже частотным и частотно-временным. Например, для широкополос-

*E-mail: anatoly.ripak@gmail.com

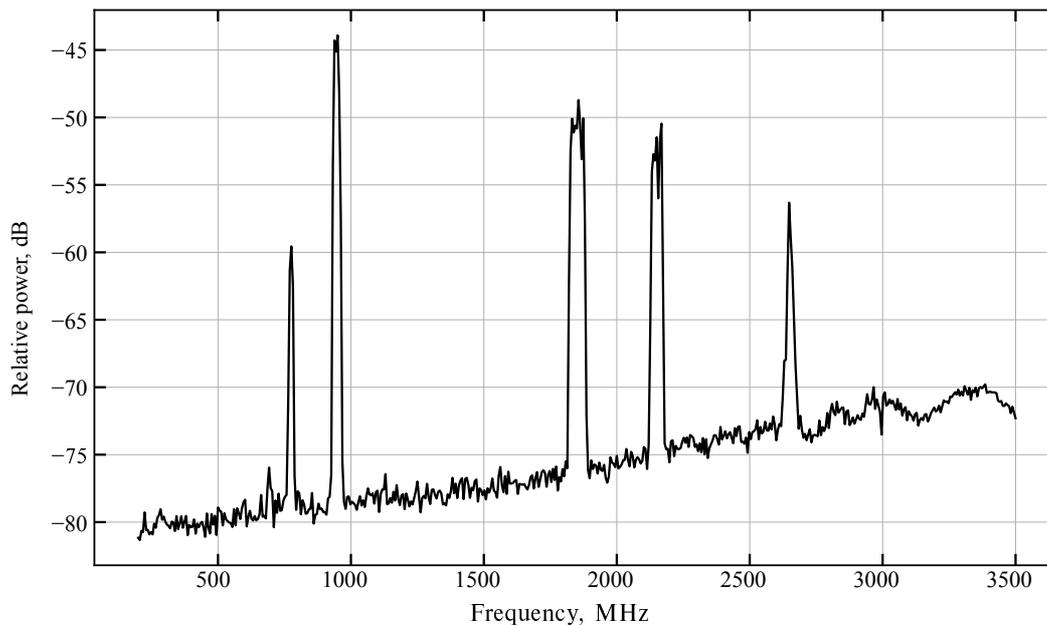


Рис. 1. Помеховая обстановка на РАТАН-600 в дециметровом диапазоне длин волн по состоянию на март 2023 г.

ного солнечного радиометра дециметрового диапазона основным стал частотно-селективный метод. Он заключался в разбиении широкого диапазона на относительно узкополосные каналы шириной 70 МГц и исключения каналов, в которых наблюдались помехи. Однако «освоение» помехами новых частот (рис. 1) и повышение их мощности привело к тому, что существенный вклад в работу радиометра стали вносить интермодуляционные искажения, которые перекрыли практически весь дециметровый диапазон и сказались на работе большей части каналов солнечного радиометра, что вынудило остановить его использование для наблюдений. В 2016 году был введен в эксплуатацию 80-канальный спектрально-радиометрический комплекс ССПК-16, рабочие частоты которого лежат в диапазоне 3–18 ГГц (Storozhenko et al., 2020). Число выходов в радиометре определяется делением широкой полосы радиометра на «узкие» каналы банком СВЧ-фильтров. Однако из-за того, что выделение узких каналов осуществляется аналоговыми фильтрами, система имеет естественное ограничение как по числу каналов (фактически по частотному разрешению), так и по общей ширине полосы наблюдения. Дальнейшее развитие систем подавления помех на РАТАН-600 видится в применении того же метода частотно-временного подавления помех, однако выполненного на современной аппаратной базе с применением методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) в широкой полосе частот (не менее 2 ГГц) с высоким разрешением в частотной и временной областях, дополненных исследованием статистических характеристик принимаемых сиг-

налов в реальном времени с целью выделения помеховых составляющих и их адаптивной фильтрации. В практике использования российских радиоастрономических инструментов направление подавления помех с адаптивной фильтрацией пока не получило должного развития, хотя шаги в этом направлении сделаны. Следует особо отметить систему цифровой обработки радиоастрономических сигналов в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» (ИПА РАН) для исключения влияния радиопомех. Указанная система работает как в модуляционном режиме, так и в режиме без модуляции, позволяя получить 1024 спектральных канала (интервал частотного разрешения 1 МГц при полосе 1024 МГц) с накоплением от 0.5 с и выше (Grenkov and Koltsov, 2015). Однако в данной системе и ее программном обеспечении не была решена задача автоматической чистки радиометрических данных от нестабильных радиопомех, которые сильно искажают результаты радиометрических наблюдений на высокочувствительных инструментах. Эта задача особенно актуальна при работе с разрешением по времени менее 0.1 с для РАТАН-600, обладающего высокой чувствительностью. В данном случае требуются достаточно надежные автоматические способы обнаружения как слабых, так и нестабильных радиопомех. В мировой практике решения автоматического обнаружения помех существуют и применяются, в частности, на радиотелескопе KSRBL (Korean Solar Radio Burst Locator) в Республике Корея (Dou et al., 2009). Здесь для решения задачи автоматизации «чистки» от помех с негауссовой статистикой применен так называемый метод куртозиса, который детально

описан в (Nita et al., 2007). Здесь используется высокое разрешение сигнала как в частотной, так и во временной области в широкой полосе частот. Статистические характеристики сигналов для анализа помех определяются в реальном времени и проходят адаптивную фильтрацию.

Авторами статьи была выполнена работа по созданию радиометра на 1–3 ГГц с цифровой высокоскоростной помехоустойчивой системой сбора данных для радиотелескопа РАТАН-600. Для выполнения поставленных задач, помимо требований к ширине полосы обрабатываемого сигнала, к создаваемой системе предъявлено еще два существенных требования:

- разрешение по частоте не хуже 150 кГц;
- предельное разрешение по времени не хуже 0.01 с/спектр.

Эти два требования являются взаимосвязанными в силу того, что при фиксированной частоте дискретизации сигнала применение дискретного преобразования Фурье приводит к ухудшению разрешения по частоте с улучшением разрешения по времени и наоборот. Поэтому конкретные значения разрешений — результат компромисса при решении двух задач. Первая — выделение и эффективное подавление помех, которая зависит от разрешения по частоте, а также накопления реализаций для определения статистических свойств принимаемого сигнала. Вторая — актуальные исследования физики быстрых процессов солнечной активности, в частности, микровсплесков, для которой наиболее важным параметром является разрешение по времени. Более подробно взаимосвязь этих требований освещена в разделе 5.

2. АНАЛОГОВАЯ ЧАСТЬ РАДИОМЕТРА

Блок-схема аналоговой части радиометра, на два входа которого поступают сигналы левой и правой поляризации, приведена на рис. 2. Сразу отметим, что данный радиометр является радиометром полной мощности и не содержит квадратичного детектора с последующим фильтром низких частот. Функции получения сигнала, пропорционального мощности принимаемого СВЧ-сигнала, и выделения низкочастотной составляющей в данном случае возложены на цифровую часть радиометра. Эквивалентность этих двух способов обработки радиоастрономического сигнала показана в работе Koltsov et al. (2013).

Радиоастрономический сигнал принимается коническим рупором с четырьмя ребрами, изготовленным ОАО «Скард Электроникс» (г. Курск), обеспечивающим разделение сигнала на две поляризации — вертикальную и горизонтальную. Гибридный четвертьволновый трансформатор, встроенный в конструкцию рупора, трансформирует их

в сигналы левой и правой круговых поляризаций. Приемный рупор рассчитан на работу в диапазоне 1–3 ГГц, его угол облучения по уровню –10 дБ составляет 80–120 градусов, неравномерность АЧХ по портам выхода (левой и правой поляризации) не более 3 дБ и различие сигналов портов на фиксированной частоте не более 0.3 дБ при подаче на его вход вертикально или горизонтально поляризованного сигнала. Рупор на рис. 2 условно обозначен двумя антеннами — для сигнала левой и сигнала правой круговых поляризаций. Сигналы левой и правой поляризации усиливаются малошумящими усилителями (МШУ) и поступают на переключатель, который в режиме наблюдений двух поляризаций поочередно подключает их для дальнейшего усиления и преобразования. Для контроля усиления радиометра во входной тракт через ответвитель –20 дБ впрыскивается сигнал с шумовой температурой от 600 до 1300 К от термостатированного генератора шума с температурным коэффициентом изменения уровня избыточного шума порядка $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Режекторные фильтры на частоты 1.85, 2.15 и 2.63 ГГц с шириной полосы подавления по уровню –30 дБ от 80 до 150 МГц, стоящие после предварительных усилителей, подавляют помехи от работы сотовых станций операторов мобильной связи (см. рис. 1). Фильтр высоких частот (ФВЧ) с частотой среза 1 ГГц отсекает наиболее загрязненный помехами диапазон частот ниже 1 ГГц. Фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой среза 3 ГГц ограничивает рабочий диапазон частот сверху. Установка этих фильтров позволила ослабить наиболее мощные помехи и избежать опасности перегрузки радиометра и появления сильных интермодуляционных составляющих в полосе наблюдения радиометра.

Примененный 10-разрядный АЦП EV10AQ190 позволяет оцифровывать сигнал в полосе 1–3 ГГц, работая в двух зонах Найквиста с тактовой частотой 2 ГГц. Это определило структуру аналогового тракта после режекторных фильтров и усиления сигнала МШУ3 и МШУ4. После усилителей тракт разветвляется трехдецибелным делителем на две части, из которых ФНЧ на 2 и 3 ГГц и ФВЧ на 1 и 2 ГГц выделяют сигналы в полосах 1–2 ГГц и 2–3 ГГц, что соответствует второй и третьей зонам Найквиста при оцифровке. Регулируемые аттенюаторы позволяют подобрать общее усиление тракта так, чтобы не перегружать АЦП по уровню сигнала и иметь возможность работать как с Солнцем, включая его вспыхивающую активность, так и с опорными радиоисточниками, что необходимо для калибровки инструмента по потоку. Для контроля мощности и вида сигнала, поступающего на АЦП, для каждого частотного канала предусмотрена схема, включающая встроенный индикатор мощности

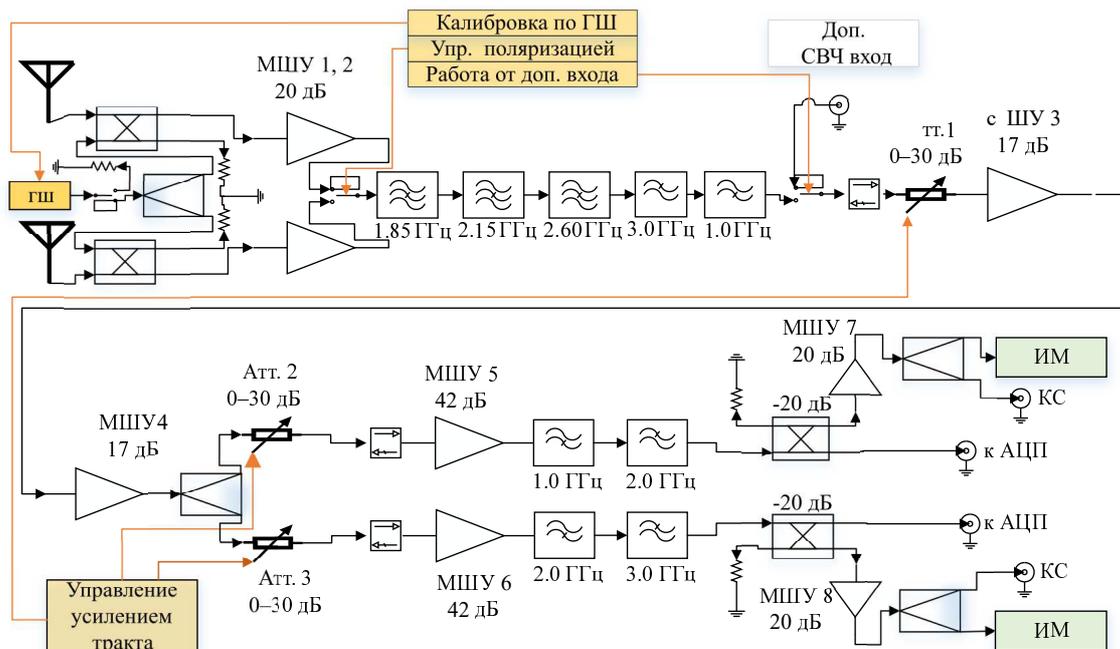


Рис. 2. Аналоговая часть радиометра. ИМ — индикатор мощности; КС — выход контроля сигнала.

ИМ и разъем контроля сигнала КС для подключения внешних измерительных приборов.

3. ЦИФРОВАЯ ЧАСТЬ РАДИОМЕТРА

Аппаратно-цифровая часть представляет собой две платы: плата FMC126 от компании 4DSP с 10-разрядным АЦП EV10AQ190 и плата VC707 с ПЛИС Virtex-7 XC7VX485T-2FFG1761C компании Xilinx. Функциональная схема цифровой части, которую в дальнейшем для определенности будем называть двухканальным цифровым модулем обработки данных (ЦМОД) представлена на рис. 3.

Сигнал на входе каждого из двух частотных каналов 1–2 ГГц и 2–3 ГГц преобразуется в цифровой поток данных с частотой выборки 2×10^9 выб/с, который передается на вход цифровой части радиометра по 20 линиям интерфейса стандарта low-voltage differential signaling (LVDS), тактируемого внутренним сигналом с частотой 1 ГГц, сформированным на основе сигнала от внешнего стабилизированного кварцевого генератора с частотой 2 ГГц (две выборки за период внутреннего тактирующего сигнала). Стандартные блоки последовательно-параллельного преобразования и демультимплексор переупорядочивают данные таким образом, что в дальнейшую обработку с частотой 250 МГц поступают блоки данных по 80 бит (восемь последовательных выборок).

Таким образом, на устройство преобразования в спектр (широкополосное БПФ) одновременно поступает восемь отсчетов АЦП за такт. Широкопо-

лосное БПФ состоит из восьми параллельных каналов, каждый из которых содержит стандартный блок 2048-точечного потокового БПФ по основанию 2 и фазовращатель, и блока параллельного восьмиточечного БПФ по основанию 8, который выдает восемь очередных значений комплексного спектра на каждом такте. Восьмиканальный вычислитель мощности и квадрата мощности преобразует значения комплексного спектра в значения его квадрата модуля, т. е. мощности, а также выполняет дополнительное возведение этих значений в квадрат. Поскольку входной сигнал представляет собой оцифрованные значения входного напряжения и, следовательно, является вещественным, его спектр представляет собой четную функцию, поэтому половина из 16 384 значений дискретного спектра отбрасывается. Восьмиканальные аккумуляторы отсчетов построены на базе кольцевых буферов в блочной памяти и суммируют поступающие на их входы значения мощности и квадрата мощности, отсортированные по номерам спектральных каналов. Накопление реализаций спектра и их квадратов в аккумуляторах происходит до тех пор, пока счетчик реализаций спектра не достигает значения длины интервала накопления. В этот момент на выходной шине выставляется сигнал готовности очередной порции данных (среднего спектра мощности и среднего спектра квадрата мощности), после чего данные поступают на вычислитель спектрального куртозиса (Lebedev et al., 2022) и фильтр компонентов, параметром настройки которого является порог чувствительности

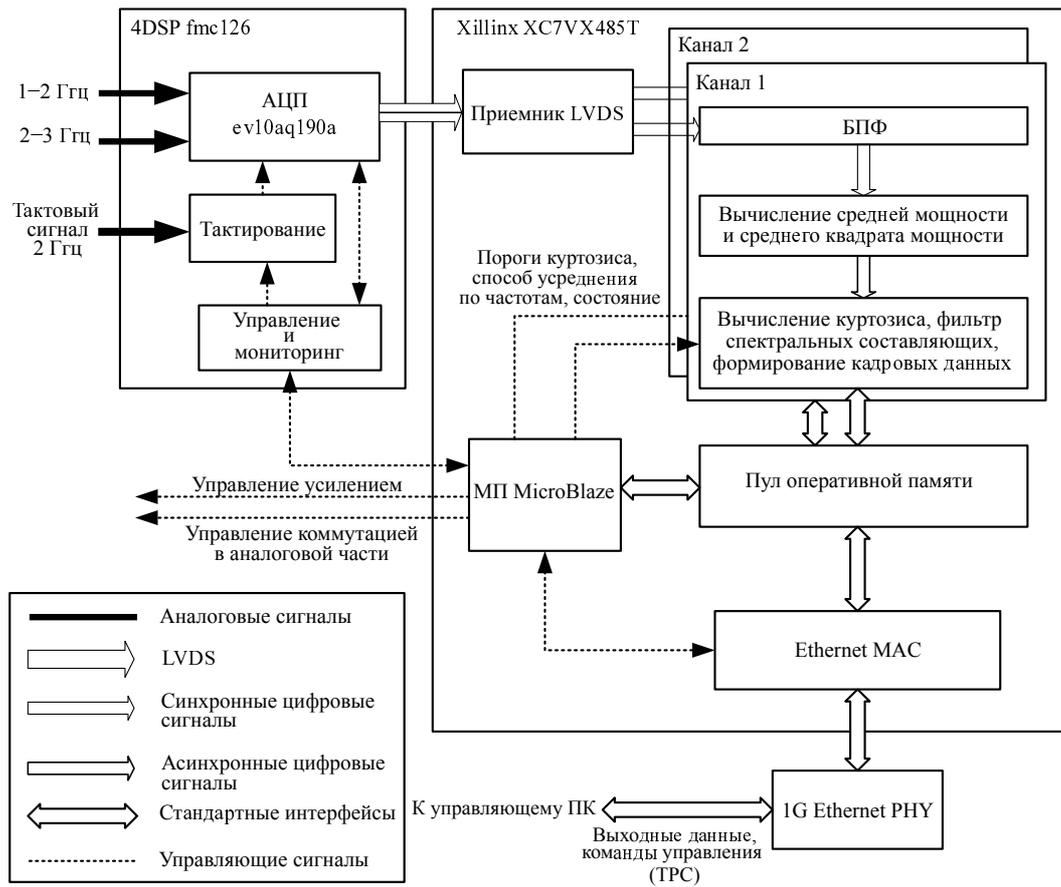


Рис. 3. Цифровая часть радиометра.

(порог отклонения спектрального куртозиса от 1, по которому считается, что в спектральный канал попала помеха). Все спектральные компоненты, для которых значение куртозиса выходит за границы порога, помечаются специальным битовым флагом. Значения спектра в 8192 каналах в целях сокращения объема данных могут усредняться по спектральным полосам шириной от 2 до 64 каналов в зависимости от потребностей наблюдателя. Полученные данные поступают в буфер в оперативной памяти устройства.

Управление ЦМОД осуществляется микропроцессорным ядром MicroBlaze. Платформа без операционной системы на его основе содержит реализацию стека TCP/IP и простой http-сервер, обеспечивающий передачу команд управления и диагностики. Управляемый микропроцессорной системой блок подсистемы Ethernet обеспечивает формирование ethernet-фреймов, а также их передачу и прием на физическом уровне сети. При формировании фреймов с пакетами, в которых содержатся выходные данные, подсистема обращается к буферу данных в оперативной памяти в режиме прямого доступа, не создавая нагрузки

на процессор. Для передачи данных используется протокол TCP, гарантирующий их целостность. Команды управления и диагностика передаются через тот же Ethernet-интерфейс, что и данные.

4. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ ПО ПРИЗНАКУ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАУССА

Применение методов, основанных на анализе статистических характеристик спектров принимаемых случайных сигналов, в которых присутствуют радиопомехи, базируется на том, что полезный, исследуемый сигнал имеет гауссову природу. Помеха имеет негауссову природу и вносит искажение в статистические характеристики сигнала с помехой. Исследуется функция вероятности распределения спектральной плотности мощности выходного сигнала радиотелескопа. Шумы системы и исследуемого источника имеют гауссово распределение с нулевым средним значением. Если к такому идеальному сигналу (без помех) применить преобразование Фурье, то мнимая и вещественные части коэффициентов Фурье на частотах анализа будут

независимыми гауссовыми процессами с нулевыми средними значениями. Мгновенный спектр мощности представляет собой квадрат модуля коэффициента Фурье и имеет экспоненциальное распределение типа χ^2 с двумя степенями свободы. Любое изменение входного сигнала, обусловленное наличием радиопомехи, приведет к изменению статистики выходного сигнала радиотелескопа. Распределение мгновенного спектра мощности станет нецентральной (несимметричной). Результаты усреднения за некоторый промежуток времени мощностных спектров позволяют выявить характеристики функций распределения, по которым можно судить о наличии или отсутствии радиопомехи на конкретной частоте анализа и корректировать в спектральной области результаты измерения для исключения влияния помехи. Представим выходной сигнал радиотелескопа в следующем виде:

$$r(t) = x_{\text{sig}}(t) + x_{\text{sys}}(t) + x_{\text{RFI}}(t),$$

где $x_{\text{sys}}(t)$ — собственные шумы радиотелескопа, $x_{\text{sig}}(t)$ — шумовой сигнал от источника (полезный сигнал), $x_{\text{RFI}}(t)$ — радиопомеха. Проведя преобразование Фурье на интервале времени $[0, T]$ получим мгновенные комплексные спектры выходного сигнала:

$$\begin{aligned} S(f) &= \int_0^T r(t) \cos(2\pi ft) dt \\ &+ j \int_0^T r(t) \sin(2\pi ft) dt \\ &= S_{\text{re}}(f) + jS_{\text{im}}(f). \end{aligned} \quad (1)$$

Спектр мощности по интервалу T запишется как $P(f)_T = S(f)\overline{S(f)}$, что соответствует операции квадратичного детектирования. Если перейти к ортонормированному базису составляющих на частотах анализа $f_k = k/T$, $k = 0, \dots, N - 1$, и определить $S_k = S(f_k)$, то величина $P_k = P(f_k)_T$ на каждой частоте анализа f_k является наложением квадрата огибающей гармонического колебания со случайной фазой (помеха), если его комплексный спектр на этой частоте отличен от нуля, и узкополосного стационарного гауссова процесса. Функция распределения этой величины на каждой частоте анализа f_k — χ^2 -распределение с двумя степенями свободы. Для нее вводится понятие куртозиса (Nita et al., 2007):

$$V_k^2 = \sigma_k^2 / \mu_k^2, \quad (2)$$

где $\mu_k = \langle P_k \rangle$, $\sigma_k^2 = \langle P_k^2 \rangle - \langle P_k \rangle^2$. Здесь угловые скобки обозначают статистическое усреднение по бесконечному ансамблю. Для гармонического сигнала $V_k^2 = 0$, для гауссова процесса $V_k^2 = 1$. В силу предположения об эргодичности анализируемого

сигнала усреднение производится по M последовательным временным реализациям и среднеквадратическое отклонение

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{V}_k^2) &= 24/M, \quad k = 0, \dots, N/2, \\ \text{Var}(\hat{V}_k^2) &= 4/M, \quad k = 1, \dots, N/2 - 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь крышка сверху над величиной означает ее усреднение по конечному числу реализаций. В примененной в данной работе статистической обработке $M = 1024$. При таком значении M для гауссова процесса отклонение куртозиса от единицы не превысит 1×10^{-2} с доверительной вероятностью больше 0.99.

5. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАДИОМЕТРА

5.1. Разрешение по частоте и по времени

Для того, чтобы выявлять и устранять по критерию куртозиса сигналы с негауссовой статистикой, основываясь на опыте применения метода (Dou et al., 2009), мы выбрали разрешение по частоте 122 кГц. На одну зону Найквиста шириной 1 ГГц в этом случае приходится 2^{13} отсчетов по частоте спектра мощности анализируемого сигнала, для вычисления которых требуется $N = 2^{14}$ временных отсчетов, которые берутся с частотой дискретизации $f_s = 2$ ГГц. Поскольку для определения статистических характеристик сигнала мы берем 1024 выборки, то на получение одного спектра с разрешением 122 кГц нам потребуется время $\Delta t = NM/f_s \approx 8.3886 \times 10^{-3}$ с. Это и есть наилучшее разрешение по времени созданной системы.

Стандартным рабочим разрешением по частоте, т. е. тем разрешением, с которым будут представляться данные, мы, исходя из соображений разумной достаточности, приняли значение 976 кГц. Каждый отсчет спектра мощности с таким разрешением будет являться средним по восьми частотным отсчетам, отстоящих друг от друга на 122 кГц. Следует отметить, что изменить рабочее разрешение по частоте, как в сторону увеличения, так и уменьшения, не представляет труда — перед началом наблюдения просто необходимо установить его желаемое значение.

5.2. Динамический диапазон и чувствительность

Динамический диапазон аппаратно определяется глубиной регулировки усиления, которая составляет 60 дБ, и динамическим диапазоном десятиразрядного АЦП (7.2–7.7 эффективных разрядов).

Усиленный в аналоговом тракте и поданный на вход АЦП сигнал не должен по амплитуде превышать величину $U_{\text{pp}}/2$, где U_{pp} — допустимый

размах напряжения на входе АЦП. Для шумового нормально распределенного гауссова сигнала должно выполняться соотношение $U_{pp} \geq 6 \sigma_{U_{ADC}}$, где $\sigma_{U_{ADC}}$ — среднеквадратичное значение шумового гауссова сигнала на входе АЦП. Этому среднеквадратичному значению шумового напряжения соответствует максимальная допустимая мощность шумового сигнала на входе АЦП

$$P_{ADC \max} = \sigma_{U_{ADC}}^2 / R_{ADC} = U_{pp}^2 / (36 R_{ADC}), \quad (4)$$

где $R_{ADC} = 50 \text{ Ом}$ — входное сопротивление усилителя АЦП. Для АЦП со средним числом эффективных разрядов 7.5 максимальный динамический диапазон по мощности $D_P = 2^{15} \approx 3.2 \times 10^4$, по напряжению $D_U = 1.8 \times 10^2$. Минимальное среднеквадратичное напряжение, которое будет фиксировать АЦП,

$$\sigma_{U_{ADC \min}} = U_{pp} / (2 D_U),$$

и ему соответствует минимальная регистрируемая шумовая мощность на входе АЦП

$$P_{ADC \min} = U_{pp}^2 / (4 D_U^2 R_{ADC}). \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что эффективный динамический диапазон АЦП при работе с шумовым сигналом

$$D_{P \text{ noise}} = P_{ADC \max} / P_{ADC \min} = D_P / 9.$$

Для рассматриваемого радиометра диапазон $D_{P \text{ noise}} = 3.5 \times 10^3$ или примерно 35 дБ. В результате суммарный аппаратный динамический диапазон радиометра составляет с учетом глубины регулировки усиления не менее 90 дБ.

Физически динамический диапазон определяется отношением максимальной шумовой мощности (температуры T_{\max}), при которой не перегружается предварительный усилитель, к минимально обнаружимой мощности исследуемого шумового источника (температуры δT). При температуре системы радиометр — антенна $T_{\text{sys}}(f) = (150-300) \text{ К}$ и $\Delta f = 1.0 \text{ МГц}$, $\tau = 0.01 \text{ с}$ чувствительность радиометра $\delta T = (4.5-9) \text{ К}$, относительная чувствительность радиометра $\delta T / T_{\text{sys}} = 3 \times 10^{-2}$.

На входе предварительный усилитель обеспечивает выходную мощность не менее 20 мВт при уровне компрессии -1 дБ и коэффициенте усиления примерно 20 дБ. Этому соответствует входная мощность предварительного усилителя $2 \times 10^{-4} \text{ Вт}$, которая и будет максимально допустимой мощностью на входе приемника радиометра. При полной полосе усиления предварительного усилителя в 2 ГГц такую мощность обеспечивает шумовой источник с эквивалентной температурой $T_{\max} = 7 \times 10^9 \text{ К}$.

Соответственно, $T_{\max} / \delta T = (0.8...1.5) \times 10^9$ или 90 дБ при значениях $\Delta f = 1.0 \text{ МГц}$, $\tau = 0.01 \text{ с}$.

Итак, при проектном максимальном разрешении по времени 10 мс и рабочем разрешении по частоте 1 МГц физически достижимый динамический диапазон соответствует реализованному аппаратно. Естественно, что при уменьшении разрешения по частоте и увеличении времени накопления, физически достижимый динамический диапазон будет увеличиваться. При времени накопления 1 с и разрешении по частоте 100 МГц он может составить 10^{11} или 110 дБ.

5.3. Шумовая температура радиометра

Для определения собственной шумовой температуры приемника радиометра проводилось два измерения его шумового спектра:

- с согласованной нагрузкой на входе приемника;
- с короткозамкнутым входом приемника.

На рис. 4 приведены результаты расчетов шумовой температуры в зависимости от частоты анализа радиометра, выполненные по данным измерений, выполненных в разные дни при значениях ослабления аттенюатора *Amm. 1* (см. рис. 2) 0 и -5 дБ . Измерения показали идентичность каналов левой и правой поляризации усилителя, разница их шумовых температур при одинаковом значении частоты в среднем не превышала 5%. В зоне действия режекторных и антиэлайзинговых фильтров параметр не определялся. Аппроксимация полученных данных отражает общую тенденцию изменения шумовой температуры приемника от частоты. Наиболее вероятной причиной квазипериодических по частоте отклонений рассчитанной температуры приемника от этой кривой является неидеальное согласование приемника по входу, которого трудно добиться в столь широком диапазоне частот. В целом можно считать, что шумовая температура приемника радиометра находится в пределах от 30 до 100 К.

5.4. Низкочастотный спектр шумовой температуры на входе радиометра

Низкочастотный (НЧ) спектр температуры шумов на входе радиометра — это, по сути, спектр шумовой дорожки радиометра. Чем он ниже, тем выше чувствительность радиометра. На рис. 5 представлены НЧ-спектры входной шумовой температуры при согласованной нагрузке на входе приемника радиометра на частотах 1200, 1380, 2265, 2800 МГц — семейство кривых 1. Указанные НЧ-спектры для разных частот радиометра по существу оказались неразличимыми, поэтому они и представлены для наглядности семейством кривых. Наличие в них фликерной составляющей ограничивает время накопления τ радиометра при работе со слабыми источниками, поскольку рост

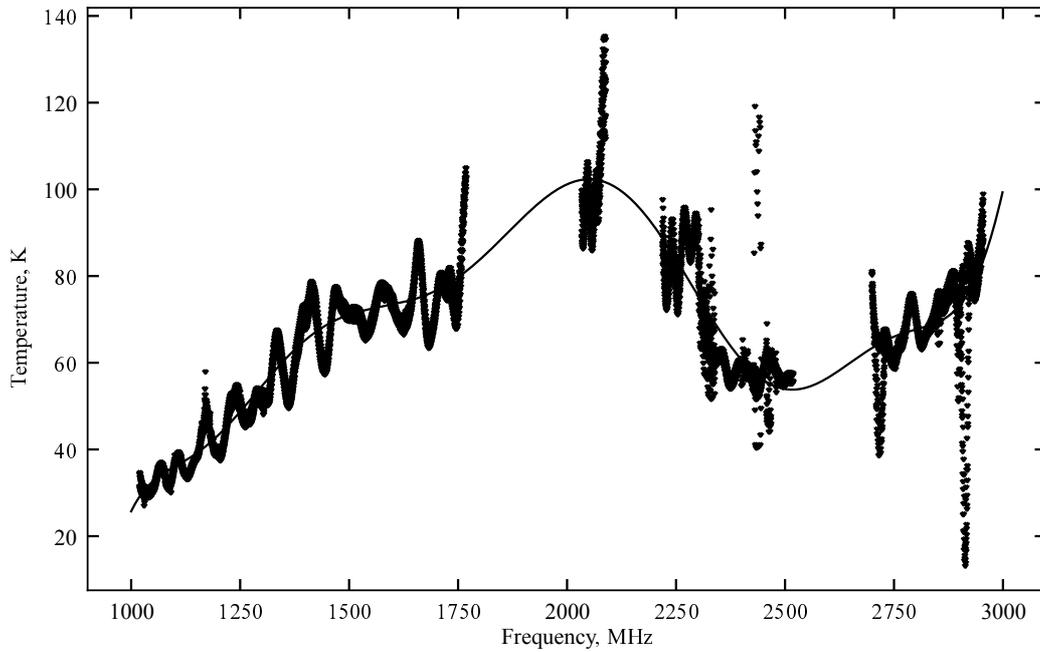


Рис. 4. Температура собственных шумов приемника радиометра. Точками показаны экспериментальные данные, сплошная линия — их аппроксимация по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения полиномом 11-го порядка.

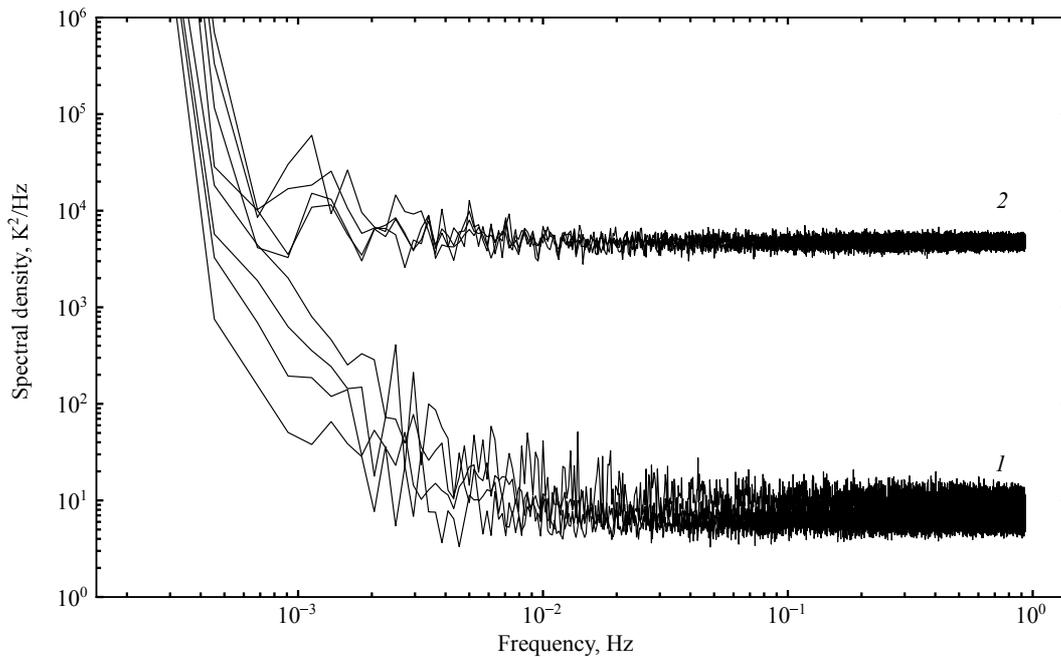


Рис. 5. Низкочастотные спектры входной шумовой температуры на частотах 1200, 1380, 2265, 2800 МГц при согласованной нагрузке на входе приемника — семейство кривых 1, при подключении эталонного ГШ — семейство кривых 2.

НЧ составляющей спектра шумовой температуры на входе приемника на частотах анализа ниже $1/(2\pi\tau)$ может перекрыть сигнал от наблюдаемого источника и чувствительность радиометра при таких временах накопления вместо роста может снизиться. Частота перегиба $F_{1/f}$ (частота, на которой начинает проявляться $1/f$ -шум) представ-

ленного НЧ спектра составляет примерно 10^{-2} Гц. Поэтому для рассматриваемого радиометра время накопления при наблюдении слабых источников не рекомендуется увеличивать сверх величины $\tau_{1/f} = 1/(2\pi F_{1/f}) = 15$ с.

Для сравнения на рис. 5 представлены НЧ спектры входной шумовой температуры при под-

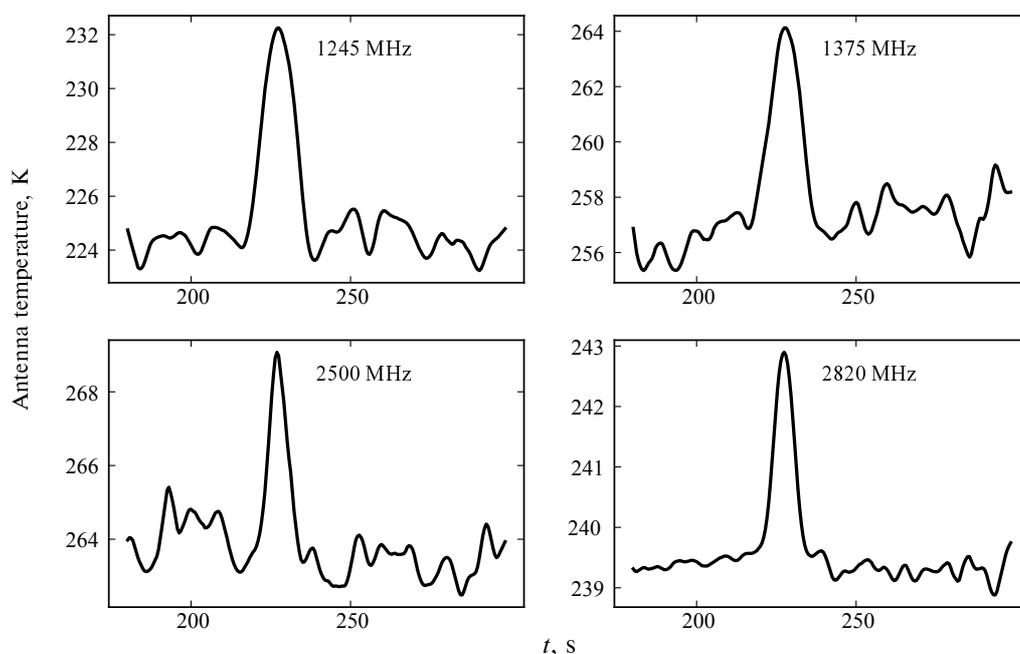


Рис. 6. Наблюдение источника ЗС 273 в антенных температурах на разных частотах. Время накопления 0.53 с, ширина полосы частот 64 МГц.

ключении ко входу приемника эталонного ГШ ($T_{\text{ГШ}} = 9200\text{--}9800\text{ К}$ в зависимости от частоты) на частотах 1200, 1380, 2265, 2800 МГц — семейство кривых 2. Частота перегиба $F_{1/f}$ для эталонного ГШ сдвинулась влево в сторону меньших частот примерно на порядок, что свидетельствует о том, что $1/f$ -шум для кривых 1 на рис. 5 не связан с нестабильностью коэффициента усиления радиометра.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Все наблюдения, приведенные ниже в данной статье, выполнены на антенной системе «Юг + Плоский» РАТАН-600.

6.1. Наблюдение источника ЗС 273 и Крабовидной туманности

Наблюдения точечных источников на созданном комплексе нужны прежде всего для калибровки радиометра по потоку. Пример наблюдения источника ЗС 273 на четырех частотах показан на рис. 6. По оси ординат на этом и последующих двух рисунках отложена антенная температура в кельвинах. Частоты наблюдения указаны в правых верхних углах изображений сканов. Представленные на рис. 6 сканы обработаны фильтром с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) седьмого порядка. Источнику соответствуют антенные температуры от 3 К (на высоких частотах) до 7 К (в нижнем частотном диапазоне), однако с точностью

до 10% эту температуру можно определить на одной частоте $f = 2820\text{ МГц}$.

Наблюдения точечных источников показали, что качество результатов очень сильно зависит от азимута наблюдения, частоты и, самое главное, общей помеховой обстановки во время наблюдений. В условиях сильных помех на шумовой дорожке появляются импульсные, пакетные выбросы на частотах вне зоны действия известных помех, что говорит о присутствии интермодуляционного переноса помех и засорения его продуктами практически всего диапазона наблюдений. Это иллюстрируют представленные на рис. 7 сканы шумовых дорожек непосредственно перед прохождением источника ЗС 273. Чтобы увидеть в полной мере присутствие помех и их характер, для представленных на рисунке данных не применялась дополнительная обработка КИХ-фильтром. Тем не менее, как видно из данных на рис. 6, на некоторых частотах, в том числе и представленных на рисунке, есть возможность провести калибровку радиометра по потоку.

Интермодуляционный перенос помех не позволяет наблюдать относительно слабые источники, но что касается наблюдений Крабовидной туманности, не говоря уже о Солнце, то картина совершенно другая, и уровень интерференционного переноса помех по диапазону слабо влияет или практически не влияет на качество результатов. Для иллюстрации на рис. 8 приведены обработанные КИХ-фильтром седьмого порядка сканы наблюдений Крабовидной туманности на тех же

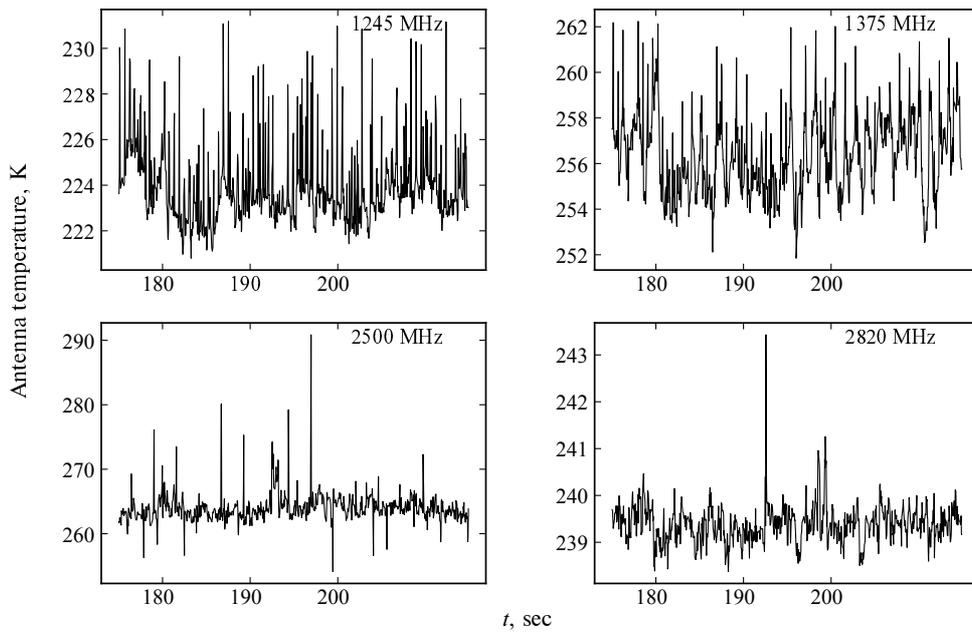


Рис. 7. Шумовая дорожка в антенных температурах на разных частотах перед прохождением источника 3С 273. Время накопления 0.032 с, ширина полосы частот 64 МГц.

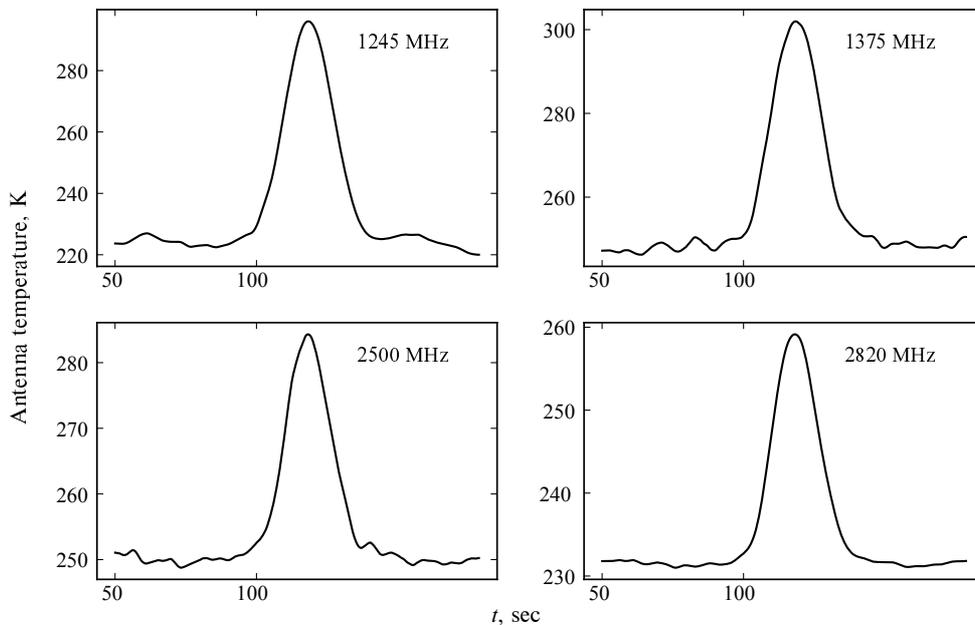


Рис. 8. Наблюдение Крабовидной туманности в антенных температурах на разных частотах. Время накопления 0.53 с, ширина полосы частот 64 МГц.

частотах и при том же разрешении, что и для источника 3С 273.

6.2. Наблюдения Солнца и работа методов чистки помех

Созданный нами цифровой радиометр позволил проводить систематические наблюдения Солнца практически независимо от сложившейся помеховой обстановки во всех доступных для наблюдения

азимутах. В результате статистической обработки оцифрованного сигнала «на лету», выполняемой ПЛИС цифровой части радиометра, данные не удовлетворяющие критерию

$$0.95 \leq V_k^2 \leq 1.05, \quad (6)$$

бланкируются по частоте и времени. Отклонение значения куртозиса V_k^2 (2) от единицы, равное

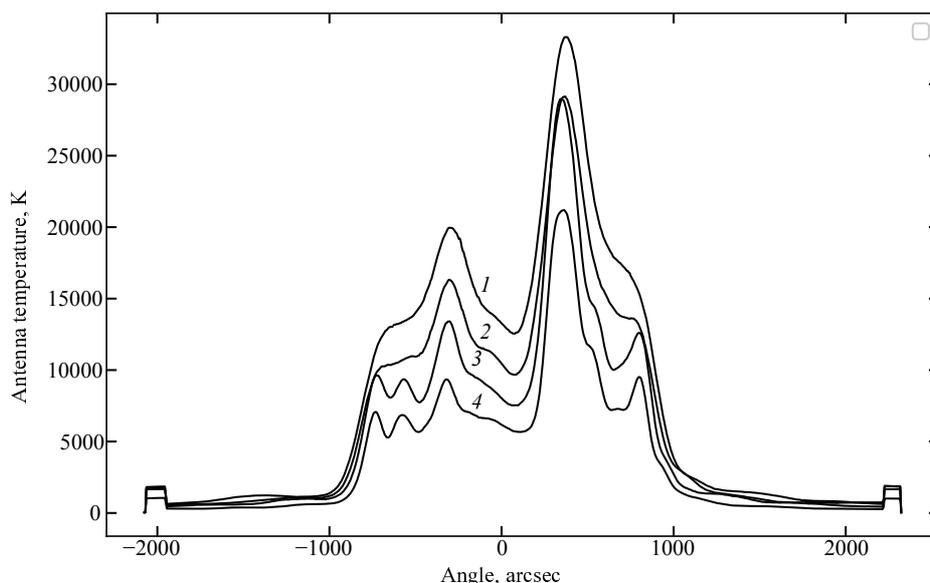


Рис. 9. Сканы Солнца в антенных температурах. Кривым 1, 2, 3, 4 соответствуют частоты 1200, 1380, 2265, 2800 МГц. Время накопления 0.53 с, ширина полосы частот 3.9 МГц.

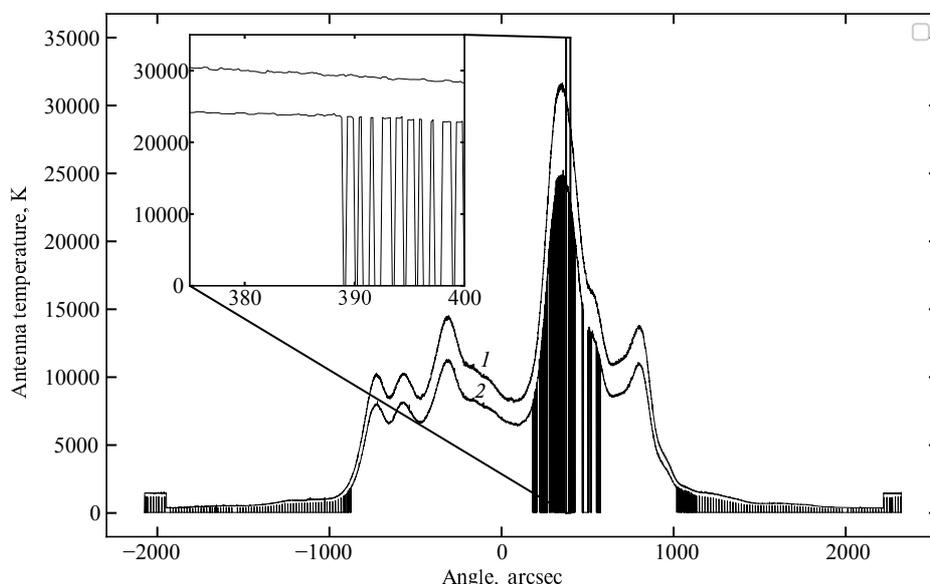


Рис. 10. Сканы Солнца в антенных температурах. Кривым 1, 2 соответствуют частоты 2410, 2460 МГц. Время накопления 0.016 с, ширина полосы частот 3.9 МГц.

0.05, выбрано эмпирически с учетом оценки его среднеквадратичного отклонения (3).

На рис. 9 представлены сканы для разных частот одного из наблюдений. Во время этого наблюдения помеховая обстановка была относительно спокойной и помехи на некоторых частотах проявлялись только при малых уровнях сигнала на входе радиометра в отсутствие Солнца. Мощный сигнал от Солнца «забивал» относительно слабые помехи, при том, что самые мощные помехи от передатчиков операторов мобильной связи вырезаны

режекторными фильтрами, их возможные интермодуляционные составляющие сильно ослаблены и не проявляются при прохождении Солнца. Сканы на этом рисунке «благополучные» и на них не видно результатов работы алгоритма статистической чистки, действие которого иллюстрирует рис. 10.

На рис. 10 приведены сканы прохождения Солнца на частотах 2410 и 2460 МГц во время действия относительно сильных помех и, как мы полагаем, их интермодуляционных искажений в предварительном усилителе приемника, и показан

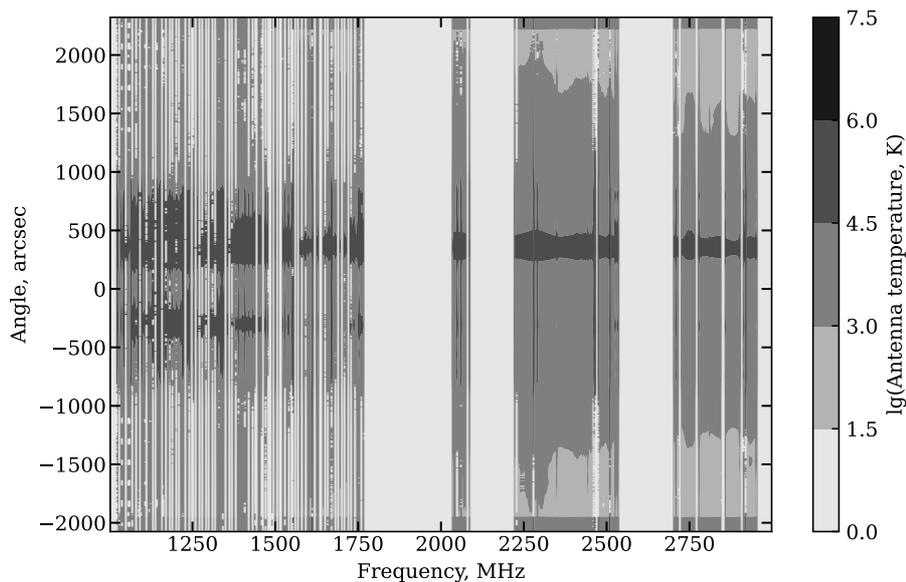


Рис. 11. Спектрограмма прохождения Солнца. Шкала антенных температур в черно-белых тонах представлена справа. Время накопления 0.26 сек, ширина полосы частот 3.9 МГц.

результат обработки данных по критерию (6). На частоте 2460 МГц помехи проявлялись как при малых уровнях сигнала в отсутствие Солнца, так и во время прохождения Солнца. Видно, что метод успешно бланкирует помехи на частоте 2460 МГц (кривая 2 и выноска ее участка 375–400 угловых секунд в угловых координатах относительно кульминации Солнца) вместе с радиоизлучением Солнца, а на близкой частоте 2410 МГц (кривая 1) следы его работы не обнаруживаются ввиду отсутствия негауссова сигнала на этой частоте.

Полная картина работы режекторных фильтров и метода куртозиса при прохождении Солнца представлена на рис. 11, на котором в координатах «частота – время» в черно-белых тонах отражена антенная температура принимаемого радиометром сигнала. Помимо светло-серых вертикальных полос строго по краям рисунка — результата работы антиэлайзинговых фильтров, имеются три сплошные широкие светлые полосы — результат работы режекторных фильтров и вкрапления в виде светлых отрезков вертикальных областей и тонких линий, точек. Последнее — результат адаптивной статистической фильтрации помех «на лету» методом куртозиса.

В статье Ovchinnikova et al. (2022) описана дополнительная методика обработки данных методом главных компонент, которая позволяет выявить и удалить помехи со статистикой близкой к гауссовой, не обнаруженные методом куртозиса. Такие помехи могут быть вызваны многоканальной передачей цифровых данных, для которой характерна статистика близкая к гауссовой.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание цифрового помехоустойчивого радиометра дециметрового диапазона означает переход на приемную аппаратуру нового поколения с высоким частотным и временным разрешением в диапазоне 1–3 ГГц для мультиобъектных наблюдений. Достигнуты следующие характеристики:

- максимальное спектральное разрешение составляет 122 кГц в полосах частот 1.0–2.0 ГГц и 2.0–3.0 ГГц;
- число частотных каналов в полосе 1 ГГц — от 1 до 8192, в зависимости от требований наблюдателя, выходная скорость — до 120 спектров в секунду;
- реализована возможность удаления радиопомех с использованием статистического алгоритма, основанного на оценке спектрального куртозиса.

Результаты работы указывают, что на РАТАН-600 могут быть доступны наблюдения различных объектов в предельных режимах как по частотному перекрытию, так и по частотному разрешению при максимальной чувствительности и высоком временном разрешении. Таким образом, создан новый аппаратный комплекс со статистическими алгоритмами устранения помех из данных наблюдений. Разработан новый подход к обработке многочастотных наблюдений. Проведенные первые серии наблюдений на РАТАН-600 показывают, что новый прибор по чувствительности и частотному разрешению является эффективным инструментом для получения новой информации о строении солнечной короны и протекающих в ней процессах (Bogod et al., 2023).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны коллективу организации ООО «Скард Электроникс» (г. Курск) за изготовление приемного рупора дециметрового диапазона в срок и в соответствии с техническим заданием. Наблюдательные данные получены на уникальной научной установке радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. M. Bogod, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 190 (2011).
2. V. M. Bogod, 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 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020), pp. 399–404.
3. V. M. Bogod, M. K. Lebedev, N. E. Ovchinnikova, et al., *Cosmic Research* **61** (1), 27 (2023).
4. Y. Dou, D. E. Gary, Z. Liu, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121** (879), 512 (2009).
5. S. A. Grenkov and N. E. Koltsov, *Radiophysics and Quantum Electronics*, **58** (7), 520 (2015).
6. N. E. Koltsov, S. A. Grenkov, and L. V. Fedotov, *Приборы и техника эксперимента* **5**, 66 (2013).
7. M. K. Lebedev, N. E. Ovchinnikova, V. M. Bogod, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022, Nizhny Arkhyz, Russia, 2022*, <https://pos.sissa.it/425/006/>.
8. G. M. Nita, D. E. Gary, Z. Liu, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **119** (857), 805 (2007).
9. N. E. Ovchinnikova, M. K. Lebedev, V. M. Bogod, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022, Nizhny Arkhyz, Russia, 2022*, <https://pos.sissa.it/425/007/>.
10. A. Storozhenko, V. Bogod, S. Shlenzin, 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 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020), pp. 405–406.
11. P. G. Tsybulev, A. B. Berlin, N. A. Nizhel'Skij, et al., *Astrophysical Bulletin* **62** (2), 193 (2007).

RFI-Resistant Decimeter Band Radiometer for the RATAN-600 Radio Telescope

A. M. Ripak¹, V. M. Bogod¹, S. A. Grenkov², and M. K. Lebedev¹

¹Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Branch, Saint Petersburg, 196140 Russia

²Institute of Applied Astronomy RAS, Saint Petersburg, 191187 Russia

The development of methods for the radio frequency interference mitigation becomes a fundamental challenge for any radio astronomy research. In this paper, we report on the development and creation of a new spectrometer designed for solar observations at the RATAN-600 radio telescope, capable of excising radio interference using a statistical algorithm based on the spectral kurtosis estimation. The implementation of the external analog interface and the operation of the digital signal processing system based on the FPGA are described. The maximum spectral resolution reached is 122 kHz in the frequency band of 1.0–3.0 GHz. The output spectrum has from 64 to 8192 frequency bins, depending on the requirements of the observer, the output rate is 120 spectra per second. The test results and the first observations of the Sun show that the research method can successfully detect and suppress interference from most of the local radio interference sources.

Keywords: *radiometry: spectral and temporal resolution: noise: methods: digital filtering*