**ПАНОРАМНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА
В ДИАПАЗОНЕ 1–3 ГГц**

Богод В.М., Лебедев М.К., Рипак А.М.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

**PANORAMIC SPECTRAL COMPLEX FOR SOLAR MICROWAVE
OBSERVATIONS IN THE 1–3 GHz BAND**

Bogod V.M., Lebedev M.K., Ripak A.M.

Special Astrophysical Observatory of the RAS, St. Petersburg, Russia

Here we present the first results of solar observations with a new spectral complex with a relative spectral resolution of 10^{-4} – 10^{-5} with panoramic coverage of the decimeter range (1–3 GHz) and in the time interval (1 msec–4 hours). This range is optimal for studying the processes occurring in the upper layers of the corona, in which the loop structure of magnetic fields is still preserved. All the variety of manifestations of radiation from the solar corona plasma requires instrumentation for studying with a high spectral resolution in a wide range of radio waves.

The RATAN-600 radio telescope is a convenient tool for such studies. The combination of a large effective area in this instrument while obtaining a detailed spectrum of intensity and polarization in a wide wavelength range makes it relevant for a wide range of solar radio astronomy problems. The use of new equipment with high-speed registration opens up the study of dynamic characteristics in a number of tasks, such as: (i) In-depth diagnostics of the preflare state of solar plasma and the flare process; (ii) Understanding of the processes of confinement of hot plasma in magnetic traps; (iii) Measurements of critical magnetic field gradients from spectral-polarization observations of sources above the neutral line; (iv) Creation of an adequate sunspot model based on the mechanisms of formation of emission spectra in a wide range of heights.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-55-58

Все многообразие проявлений излучения плазмы солнечной короны требует инструментария для изучения с высоким спектральным разрешением в широком диапазоне радиоволн. При этом важен одновременный анализ как слабых проявлений на уровне спокойного Солнца, до мощных вспышечных извержений, так и анализ длительных колебаний до сверхкоротких излучений корональных струй и квазипериодических пульсаций (КПП). С другой стороны, является актуальным изучение процессов магнитного перезамыкания в вершинах арочных структур в короне [1], которые создают возмущения солнечного ветра и корональные выбросы масс, воздействующие на около земные процессы Космической погоды.

Радиотелескоп РАТАН-600 является удобным инструментом для таких исследований [2]. Сочетание большой эффективной площади в этом инструменте при одновременном получении детального спектра интенсив-

ности и поляризации в широком диапазоне волн делает его актуальным для большого ряда задач солнечной радиоастрономии.

Применение новой аппаратуры с высокоскоростной регистрацией открывает исследования динамических характеристик в ряде задач, таких как: (i) Глубокая диагностика предвспышечного состояния солнечной плазмы и вспышечного процесса; (ii) Понимание процессов удержания горячей плазмы в магнитных ловушках; (iii) Измерения критических градиентов магнитного поля по спектрально-поляризационным наблюдениям источников над нейтральной линией; (iv) Создание адекватной модели пятна на основе механизмов формирования спектров излучения в широком диапазоне высот.

Особый комплекс задач связан с реализацией высокого спектрального разрешения в диапазоне 1–3 ГГц. К ним относятся наблюдения короткопериодических КПП во вспышках на звездах и Солнце. Изучение их характерных особенностей и сравнительный анализ позволит определять механизмы вспышечного энерговыделения и создаст наблюдательный базис для диагностики плазмы вспышечных областей. Будет развита диагностика динамических процессов (МГД-волн, ударных волн, квазипериодических быстрых пульсаций) в солнечной хромосфере в широком диапазоне высот и выяснение их вклада в нагрев хромосферы.

Здесь мы приводим первые результаты солнечных наблюдений с новым спектральным комплексом с относительным спектральным разрешением $10^{-4} - 10^{-5}$ с панорамным перекрытием дециметрового диапазона (1–3 ГГц) и во временном интервале до 4-х часов с максимальным разрешением 8 мсек. Этот диапазон является оптимальным для изучения процессов, происходящих в верхних слоях короны, в которых еще сохраняется петельная структура магнитных полей.

Основные принципы работы панорамного спектроанализатора

Принцип работы панорамного спектроанализатора протестирован в дециметровом диапазоне 1–3 ГГц, который является наиболее засоренным инструментальными помехами. В этом диапазоне присутствует достаточное количество необходимых быстродействующих цифровых микросхем, с помощью которых отрабатываются методы цифровой обработки радиоастрономического сигнала с целью подавления помех промышленного и бытового происхождения и достижения высоких разрешений как по времени (до 8 мс), так и по частоте (до 122 кГц). Методы реализуются посредством применения следующих основных программных и аппаратных средств:

- высокоскоростной 10-ти разрядный АЦП EV10AQ190, позволяющий оцифровывать сигнал со скоростью 4 ГигаВыборки/сек;
- высокопроизводительная ПЛИС с производительностью не менее 4 GMAC/s (MAC – Multiply-and-Accumulate operation per second – количе-

- ство операций суммирования и умножения в секунду) при работе с 16- разрядными числами;
- быстрое преобразование Фурье и статистическая обработка спектра принимаемого сигнала с целью выявления и отбраковки негауссовых составляющих (реализованы в среде Vivado для размещения на ПЛИС высокой производительности);
 - реализация аналоговой части, включающей установку широкополосного рупора для двух круговых поляризаций с малыми шумами и малыми смещениями фазового центра по частоте;
 - установка малошумящих входных усилителей с большим динамическим диапазоном, система фильтров ограничивающих влияние особо мощных помех (мобильная связь, телевидение и др.);
 - установка системы калибровочных сигналов для работы в широком динамическом диапазоне (до 10^{-9}).

Помимо описанной выше аппаратной части, создана программная часть регистрации и хранения собранных данных и сформировано их место хранения с учетом того, что суточный объем записей от дециметровой части комплекса может составить до 10 Гбайт [3].

Аналоговая часть радиометрического комплекса

Блок-схема аналоговой части комплекса, на 2 входа которого с антенны поступают сигналы левой и правой поляризаций, приведена на рисунке. Отметим, что схема выполнена на основе радиометра полной мощности и не содержит квадратичного детектора с последующим фильтром низких частот. Функции получения сигнала пропорционального мощности принимаемого СВЧ сигнала и выделения низкочастотной составляющей возложены на цифровую часть радиометра. Здесь, на входах по правой и левой поляризаций установлены фильтры высоких частот (ФВЧ) с частотой среза 1 ГГц, которые устраняют наиболее загрязненный помехами диапазон частот ниже 1 ГГц. Далее сигналы через направленные ответвители поступают на входные усилители, за которыми находятся системы режекторных фильтров на частоты 1.85, 2.15, 2.6 ГГц с шириной полосы подавления примерно 80 МГц по уровню -30 дБ, которые подавляют помехи от работы сотовых станций операторов мобильной связи. Установка этих фильтров позволила ослабить наиболее мощные помехи и избежать опасности перегрузки радиометра и появления интермодуляционных составляющих в полосе наблюдения радиометра. Необходимое усиление в каналах обеспечивается многофункциональным усилителем (МШУ), который позволяет также вводить в тракт калибровочный шумовой сигнал и усиливает сигналы с левой и правой поляризациями и подключает с частотой модуляции один из них к тракту для дальнейшего усиления и обработки. В тракте МШУ находятся управляемые аттенюаторы и индикаторы для контроля уровня мощности.

Рисунок. Основные узлы панорамного радиометрического комплекса полной мощности для двух поляризаций в диапазоне 1–3 ГГц.

Перечень основных достигнутых параметров

- Частотный диапазон: 1–3 ГГц,
- Частотное разрешение: 122 кГц.
- Временное разрешение: 8 мксек.
- Временное усреднение до 8 минут
- Температура собственных шумов входных усилителей: менее 100 К.

Работа поддержана Миннауки РАН.

Литература

1. Nakariakov, V.M.; Anfinogentov, S.; Storozhenko, A.A.; et al. // Astrophys. J., 2018, V. 859, I.2, article id. 154, 8 pp., <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfb9>
2. Bogod V.M. // Proceedings of the All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century” pp. 399-404, DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2 2020 399
3. Lebedev M.K., A.M. Ripak, V.M. Bogod // Proceedings of the All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century” pp. 413-416, DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2 2020 399