

**МНОГООКТАВНЫЙ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НА РАТАН-600**

В.М. Богод, С.Х. Тохчукова

**MULTI-OCTAVE SPECTRAL-POLARIZATION COMPLEX
FOR STUDYING MICROWAVE EMISSION OF THE SOLAR ATMOSPHERE WITH RATAN-600**

V.M. Bogod, S.Kh. Tokhchukova

В работе описываются возможности модернизированного программно-аппаратурного комплекса солнечных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. Сочетание параметров крупного рефлекторного инструмента и нового расширенного приемного комплекса предоставляет новые возможности для исследований солнечного радиоизлучения. Наличие непрерывного спектрального анализа в широком диапазоне длин волн позволяет просматривать высотную структуру солнечной атмосферы, в которой формируются области мощного энерговыделения. Весьма важен анализ поляризации принимаемого излучения, поскольку он несет в себе информацию о величине и структуре магнитного поля. Получать такую информацию на высотах верхней хромосферы и нижней короны оптическими методами и с помощью наблюдений со спутников довольно трудно, вследствие чего радиоастрономические методы актуальны. Данные многоволновых наблюдений Солнца автоматически передаются в локальную сеть радиотелескопа РАТАН-600, откуда по сети Интернет поступают на сайты www.sao.ru и на выделенный сервер www.spbf.sao.ru, где оперативно обрабатываются и представляются внешнему пользователю в различных форматах через веб-сайт <http://www.spbf.sao.ru/prognoz>.

The paper presents capabilities of the updated hardware-software system for solar observations being a part of the radio telescope RATAN-600. Parameters of the large reflex instrument and a new advanced receiver complex provide new possibilities for studying solar radio emission. Application of continuous spectral analysis over a wide wavelength range allows us to examine the height structure of the solar atmosphere where regions of a strong energy release form. Analysis of polarization of the received emission is of importance, since it provides information on size and structure of the magnetic field. Obtaining such information on the upper chromosphere and lower corona with optical methods and from satellite observations is rather difficult; radioastronomical methods are thus important. Multiwave solar observation data are automatically transferred to the local network of the radio telescope and then to website www.sao.ru and dedicated server www.spbf.sao.ru via Internet. Afterwards they are processed in real-time mode and transferred in different formats to external user through website <http://www.spbf.sao.ru/prognoz>.

Введение

Наличие многооктавного спектрального анализа излучения отдельных плазменных образований солнечной атмосферы весьма важно для создания полной картины происходящих в них активных процессов. Сочетание крупного инструмента и широкодиапазонного спектрального комплекса приемной аппаратуры позволяет получить эффективный набор технических параметров для изучения активной плазмы на уровнях хромосферы и нижней короны. В частности, такие параметры позволяют реализовать методы прямых измерений магнитных полей в короне, представляющие большой интерес для исследователей. Измерения основаны на хорошо развитых механизмах излучения: циклотронном (доминирует в локальных радиоисточниках), тепловом тормозном, плазменном и др. Корональные магнитные поля (< 2500 Гц) в локальных источниках над пятнами в активных областях измеряются с помощью спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600 в диапазоне 0.75–18 ГГц. Регулярность наблюдений позволяет получать ежедневную информацию о состоянии активности и величинах магнитных полей в отдельных активных областях. При этом чем выше спектральное разрешение инструмента, тем точнее оценка магнитного поля и тем меньшие изменения величины магнитного поля он может регистрировать. Спектральное разрешение, достигнутое на солнечном приемном комплексе РАТАН-600, составляет 1 % при пространственном разрешении (15''×15' на са-

мой короткой волне 1.6 см), что является уникальным для крупных радиотелескопов, исследующих отдельные компоненты активных областей. Большое значение имеют также высокая чувствительность инструмента по потоку (несколько янских) и высокая точность измерения степени поляризации (0.3–1.5 %).

Благодаря такому набору параметров в многоазимутальных наблюдениях, проводимых с 2000 г. на РАТАН-600, была обнаружена [Богод, Тохчукова, 2003] немонотонность спектров поляризованного излучения активных областей (АО), производящих мощные вспышки, в отличие от спектров активных областей без вспышек. Как показывают расчеты [Кальтман и др., 2005; Zlotnik et al., 2007; Bogod, Yasnov, 2009], к таким немонотонностям могут приводить неоднородности в высотной структуре АО, инверсии знака магнитного поля, температурные инверсии и др. Эти изменения происходят, согласно наблюдениям, на временных масштабах от нескольких часов до вспышки до нескольких дней до вспышки, поэтому спектрально-поляризационные радионаблюдения могут быть использованы для предсказания мощных солнечных вспышек [Богод, 2006].

Создание многооктавного приемного комплекса на диапазон 0.75–18.0 ГГц

Перекрытие столь широкого диапазона частот от 0.75 ГГц до 18 ГГц (4.5 октавы) в одновременных наблюдениях с подробным спектрально-поляриза-

ционным анализом реализовано впервые на крупном инструменте. Разработка включала в себя поиск и реализацию входных облучателей (рупоров) с предельно широким перекрытием по диапазону частот и обеспечение высокой чувствительности по потоку радиоизлучения и поляризационной точности в одновременных наблюдениях. Этим требованиям сегодня оптимально соответствуют двухзаходные спиральные антенны (рис. 1). Они обладают частотно-независимыми диаграммами направленности, как для правых, так и для левых круговых поляризаций с высокой круговой симметрией. Недостатком такого решения является разнесение облучателей для правой и левой круговых поляризаций, что приводит к некоторым аберрационным искажениям, которые могут быть уменьшены в ходе компьютерной обработки данных. Важной особенностью комплекса является также одновременная регистрация интенсивности и поляризации излучения с высоким спектральным разрешением (около 1 %).

Для минимизации аберрационных искажений при работе в составе радиотелескопа РАТАН-600 входные облучатели (рупоры) размещены на минимальном расстоянии от оси радиотелескопа. Оптимальным является расстояние, не превышающее одной длины волны. В связи с этим все входные рупоры объединены в единую систему облучателей, включающую облучатели правой и левой круговых поляризаций на диапазонах 3–18 ГГц и 0.75–3 ГГц.

Другая часть разработки заключалась в создании адекватного широкополосного усиительного входного блока с набором всех основных радиометрических функций, включая калибровки по интенсивности и по обеим (правой и левой) поляризациям, термостабилизацию и высокую стабильность питающих напряжений, а также устойчивость к существующей помеховой обстановке вблизи радиотелескопа.

На рис. 2 приведена схема входного приемного блока, который функционально представлен в виде составляющих блоков. Они выполняют функции реализации широкополосных входных облучателей в общем диапазоне 0.75–18 ГГц (блок широкополосных спиральных излучателей), широкодиапазонного усиления в двух поддиапазонах (0.75–3.0 ГГц и 3.0–18.0 ГГц) (усилительный блок), переключения поляризаций *R* и *L* и подачи широкодиапазонных калибровок. В дальнейшем усиленный широкополосный сигнал проходит через систему предварительной фильтрации, где он разбивается на 14 субблоков, каждый из которых состоит из восьми узкополосных частотных фильтров со средней шириной полосы около 1 %. На выходе фильтров включены детекторы с низким барьером. В дальнейшем сигналы усиливаются в предварительных усилителях постоянного тока и по-

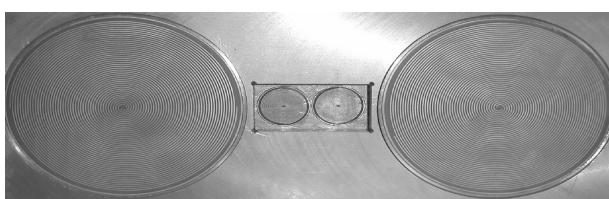


Рис. 1. Пример реализации широкодиапазонных облучателей на двухзаходных спиралях.

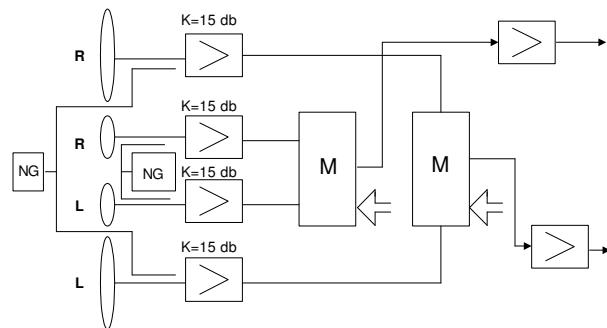


Рис. 2. Схема входного приемного устройства. Показаны усиительные тракты для диапазона 0.75–3 ГГц (снаружи) для правой и левой круговых поляризаций и для диапазона 3–18 ГГц (внутри), подключенные к входным рупорам *R* и *L*. На выходе усиительных каналов находятся переключатели *M* с дальнейшим усилением общего канала и последующей многоканальной фильтрацией. Сигналы от генераторов шума используются для выравнивания коэффициента в режиме непрерывной калибровки.

ступают в многоканальную систему сбора данных, состоящую из 14 радиометрических плат и плат синхронизации и управления. Радиометрическая плата предназначена для приема восьми частотных каналов, каждый из которых представляет собой согласующие цепи с аттенюаторами на ЦАП, цепи распределения сигналов поляризаций, совмещенные с RC-цепями. На выходе каждой из поляризаций подключены многоразрядные сигма-дельта-АЦП (0.1 МГц, 24 бит). Всего используется 224 АЦП. Реализован режим наблюдений полной мощности сигнала (Total Power). Синхронизация всех процессов комплекса и управление ими реализованы на приборах с программируемой логикой (PLD), в частности на FPGA. В программном обеспечении, работающем в FPGA, заложена возможность изменения временной диаграммы сбора данных в диапазоне частот от 1 Гц до 1 кГц.

Для объединения данных, поступающих от радиометрических НЧ-ячеек, использована стандартная шинная архитектура: двунаправленная шина данных, односторонние шины адреса и управления. Данная архитектура позволяет реализовать параллельный прием радиометрических данных и управление параметрами регистрации от внешнего управляющего компьютера. В случае необходимости первичной обработки принятых данных она производится средствами подпрограмм, реализованных в виде отдельных задач на процессоре ARM по командам управления, полученным пошине Ethernet от управляющего компьютера. Запись первичных данных осуществляется на жестком диске компьютера. Одновременно данные поступают в локальную сеть радиотелескопа РАТАН-600, откуда по сети Интернет – на сайты www.sao.ru и www.spbf.sao.ru для обработки и последующего предоставления заинтересованным пользователям.

Данные наблюдений

Увеличение числа каналов (вследствие увеличения спектрального диапазона и разрешения), а также временного перекрытия и частоты регистрации ведет к непрерывному увеличению объема наблюда-

тельных данных. В настоящее время количество отдельных одномерных изображений, получаемых в течение дня при стандартных многоазимутальных наблюдениях, достигает 13664. Такой объем данных невозможно вручную поканально обработать, поэтому актуальна задача автоматизации всех этапов работы – сбора, передачи, занесения в базу данных, контроля качества, хранения, первичной обработки, моделирования и представления данных. Для этих целей создана и развивается единая информационная система наблюдений Солнца на РАТАН-600 на основе выделенного сервера <http://www.spbf.sao.ru/prognoz> с использованием технологий Linux/Apache/Oracle/ Perl, PHP, ION.

На выходе системы регистрации создаются данные в формате RAW, которые преобразуются в FITS-формат и после завершения каждого отдельного наблюдения автоматически переносятся по сети Интернет на специализированный сервер в Санкт-Петербурге. Полученные данные на сервере СПбФ САО РАН автоматически заносятся в базу данных и подвергаются первичной обработке, включающей в себя следующие операции:

- 1) отфильтровка неработающих или сбойных каналов;
- 2) удаление записей ГШ на скане;
- 3) вычитание уровня неба;
- 4) преобразование параметров Стокса R&L в I&V;
- 5) корректировка положения центра Солнца на скане;
- 6) калибровка по спокойному Солнцу.

Обработанные таким образом данные образуют архив второго уровня и доступны в формате FITS для скачивания через веб-интерфейс либо через поиск в базе данных. На сайте через пользовательский веб-интерфейс можно при желании выполнить дальнейшие операции с данными, а именно:

- 1) вычитание уровня спокойного Солнца;
- 2) вычитание соседних частот (для выявления изменений по спектру);
- 3) гаусс-анализ (нахождение локальных источников и вписывание гауссиан с целью определения параметров источников);
- 4) построение спектров различных наблюдаваемых параметров (размер, положение, поток, антенная температура, яркостная температура) источников;
- 5) построение графиков временных рядов (в азимутах в течение дня) antennной температуры выбранного источника;
- 6) фурье- и вейвлет-анализ полученных данных (спектров, временных рядов);
- 7) наложение сканов на двумерные изображения в других диапазонах (SOHO MDI, SSRT, NoRH, и др.) и т. п.

На рис. 3 приведены примеры графического представления данных (многоволновых сканов) на сервере в виде трехмерных изображений.

На рис. 4 приведены примеры сопоставления данных РАТАН-600 с данными других обсерваторий – SOHO MDI и ССРТ.

При автоматической обработке данных осуществляется оперативный контроль качества данных. По за-

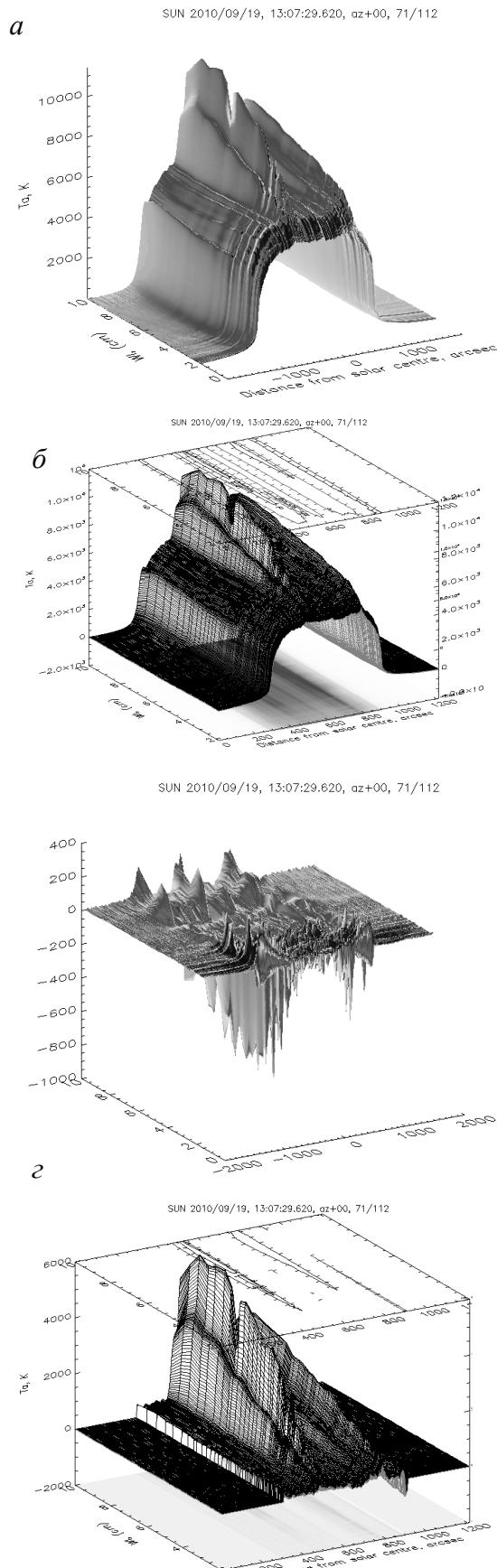


Рис. 3. Примеры представления исходных данных многоволновых наблюдений РАТАН-600 в виде трехмерных изображений. По оси абсцисс отложено расстояние от центра Солнца. По оси ординат – частота: сканы в интенсивности (а, б), в поляризации (в), сканы после вычитания уровня спокойного Солнца (г).

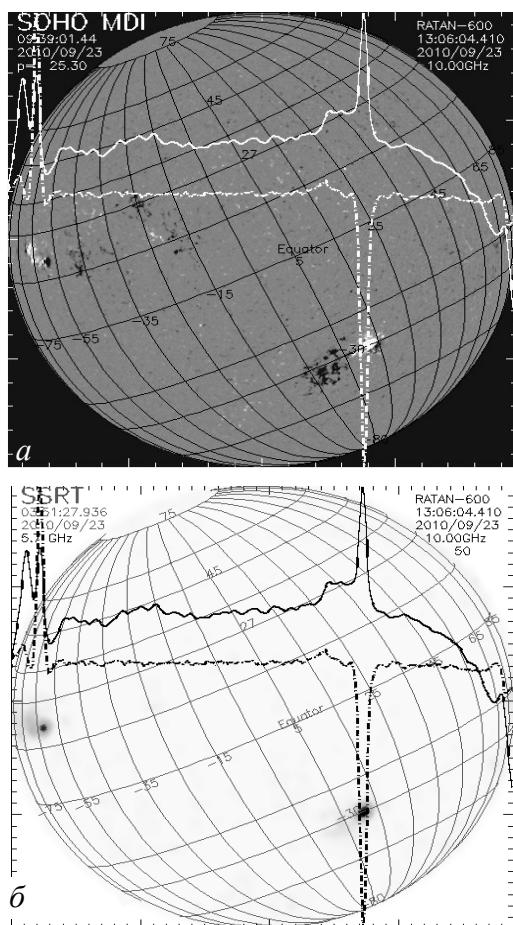


Рис. 4. Наложение скана РАТАН-600 на волне 3 см на магнитограмму SOHO MDI (а) и карту интенсивности ССРТ (б).

данным критериям определяется качество наблюдения в целом и в каждом отдельном канале – наличие на одномерном изображении адекватной записи Солнца, соотношение сигнал/шум в каждом канале, отклонение параметров кривой от среднего и медианного значений, наличие зашумов и т. д. По результатам анализа данных производится рассылка алертов наблюдателям, инженерам, обеспечивающим работу приемной аппаратуры и комплекса регистрации, с информацией о неисправных каналах, а также в случае отсутствия наблюдений по каким-либо причинам. В дальнейшем на этом этапе планируется анализ спектров и рассылка писем в случае обнаружения в спектрах поляризации характерных немонотонностей, свидетельствующих о предвспышечной ситуации в активной области. Для этих целей разрабатывается программное обеспечение для автоматического распознавания заданных особенностей на спектральных кривых. В базе данных предусмотрены таблицы для хранения информации о спектрах интенсивности и поляризации и вычисленных физических параметрах активных областей. Определение параметров в общем случае должно быть основано на моделировании радиоизлучения локальных источников. Соответствующие программы представлены на веб-сервере наряду с веб-интерфейсами для анализа данных, их разнообразного графического представления и поиска в базе данных.

Выводы

Программно-аппаратный комплекс обеспечения наблюдений Солнца на РАТАН-600 в настоящее время включает в себя спектрально-поляризационный комплекс приемной аппаратуры диапазона 0.75–18 ГГц, систему многоканальной регистрации и информационную систему для сбора, передачи, хранения, обработки и представления данных в сети Интернет.

При реализации приемного комплекса были использованы новые идеи в радиометрии, применена новая элементная база и реализованы современные технологии конструирования, такие как:

- 1) применение широкодиапазонных рупоров для RH- и LH-поляризаций;
- 2) параллельный анализ спектра с однопроцентным частотным разрешением;
- 3) высокоскоростная многоканальная регистрация с сигнальным процессором и PLD-приборами. Точная привязка каналов осуществляется с помощью ЦАП-аттенюаторов;
- 4) полная автоматизация наблюдательного процесса в широком динамическом диапазоне;
- 5) применение непрерывной калибровки для обеспечения высокой стабильности всего усиленного тракта.

Достигнутые на данный момент результаты в развитии многооктавного спектрального программно-аппаратного комплекса регистрации и исследования предвспышечной плазмы позволяют рассчитывать на дальнейшие шаги в создании интеллектуальной системы, вплоть до автоматизированного прогноза солнечной активности и выдачи рекомендаций на основе анализа солнечных наблюдений приемного комплекса высокого разрешения радиотелескопа РАТАН-600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богод В.М., Тохчукова С.Х. Особенности микроволнового излучения активных областей, генерирующих мощные солнечные вспышки // Письма в АЖ. 2003. Т. 29, № 4. С. 305–316.

Богод В.М. О прогнозировании восходящих вспышечно-продуктивных активных областей // Известия РАН, Серия физическая. 2006. Т. 70, № 10. С. 1491–1495.

Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Цап Ю.П. О смене знака поляризации микроволнового излучения в пятенных радиоисточниках на Солнце // Астрон. журн. 2005. Т. 82, № 9. С. 838–846.

Bogod V.M., Yasnov L.V. Polarization of Microwave Radio Emission of Flare-Producing Solar Active Regions // Solar Phys. 2009. V. 255. P. 253–271.

Zlotnik E.Ya., Kaltman T.I., Sheiner O.A. Thermal cyclotron radiation from hot coronal loops and peculiarities of the polarization structure of solar microwave emission sources: II. Integrated characteristics // Astron. Lett. 2007. V. 33, Iss. 5. P. 327–339.

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург