

УДК 520.244.272.5

СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ НА РАТАН-600

© 2023 г. В. М. Богод¹*, М. К. Лебедев¹, Н. Е. Овчинникова¹, А. М. Рипак¹, А. А. Стороженко¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН (Санкт-Петербургский филиал),
Санкт-Петербург, Россия

*vbog_spb@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 30.07.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Современные исследования радиоизлучения Солнца осложняются непрерывным усилением мощности и многочастотностью внешних помех, которые часто полностью перекрывают важные диапазоны частот. Многие актуальные задачи в солнечной радиоастрономии нуждаются в больших эффективных площадях радиотелескопов, высоких разрешениях по частоте и по времени, точных пространственных измерениях и большом динамическом диапазоне. Становится актуальной смена концепции приемной регистрирующей аппаратуры. В работе рассматриваются актуальные задачи физики солнечной короны в сочетании с оптимальными методами наблюдений на крупных инструментах. Рассмотрены особенности и трудности сочетания высоких параметров: динамического, пространственного, временного, частотного разрешений. Предложенные решения наблюдательно-го комплекса нового поколения реализуют возможности интеллектуального выбора условий регистрации в многооктавном режиме с многоканальностью более 8000 каналов/ГГц с временным разрешением до 8 мс/спектр. Становится доступным мультиобъектный режим наблюдений от мощных вспыхивающих объектов до слабых структур различной природы. Высокоскоростная обработка данных позволяет реализовать on-line режим устранения помех, который основан на быстром статистическом анализе спектра с выделением негауссовых (помеховых) структур. Предложены методы скоростного анализа данных большого объема (метод главных компонент) и их представления для пользователя. Приведены примеры работы комплекса в диапазоне 1–3 ГГц. Рассматриваются перспективы нового подхода для мультиобъектных радиоастрономических наблюдений при реализации режима слежения на РАТАН-600: от рекомбинационных линий до широкодиапазонных спектров, от слабоконтрастных флуктуаций до быстрых изменений во вспышках и др.

DOI: 10.31857/S0023420623010016, EDN: FHGJCF

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт спектральных исследований радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 указывает на важные проблемы, возникающие при изучении сложных по структуре активных областей (АО) на Солнце. Здесь проявляется действие различных механизмов, таких как: тепловое излучение от окружающего пятна флоккул, волокон, трехмерной структуры петель; циклотронное излучение над пятнами; гиротронное излучение между пятнами; возбуждаемое высокоэнергичными электронами плазменное излучение во всплесках; и др. В предвспышечном и вспышечном состояниях, АО непрерывно сотрясается под воздействием различных квазипериодических колебаний.

Нестационарные процессы в короне представляют собой ключевой элемент геоэффективной солнечной активности. Проблема нагрева нестационарной короны Солнца и звезд остается од-

ной из главных нерешенных проблем современной плазменной астрофизики. Принято считать, что нагрев осуществляется маломощными энергетическими выделениями, связанными или с микро- и нововспышками, или диссипацией магнитогидродинамических волн, или же их комбинацией.

РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 ДЛЯ ЗАДАЧ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

РАТАН-600 сегодня является рефлекторным радиотелескопом с умеренным пространственным разрешением, его основные преимущества состоят в большой мгновенной эффективной поверхности, широкой рабочей полосе частот (от 700 МГц до 40 ГГц), высокой точности поляризационных измерений и регулярности наблюдений [1]. Большая мгновенная принимающая поверхность радиотелескопа РАТАН-600 в сочетании с многооктавным диапазоном частот и высоким быстродействием позволяет наблюдать

нестационарные процессы в широком интервале интенсивностей от микро- и нановспышек до мощных вспышек. Среди основных направлений по тематике солнечной короны преобладают задачи широкодиапазонной радиоспектроскопии: процессы магнитного пересоединения в арочных структурах [2, 3, 4]; процессы, связанные с зарождением активности и магнитной природой генерации на ее ранней стадии [5]; механизмы, отвечающие за возникновение и существование долгоживущих нетепловых структур [6]; тонкие спектральные структуры в солнечной короне, связанные с квазипериодическими пульсациями, (струями и surges) [7], природой шумовых бурь и квазилинейчатым излучением [8–11].

Сегодня на инструменте ведутся работы по реализации режима слежения и частых азимутальных наблюдений в интервале ± 2 часа от местного полудня. Улучшение этих параметров достигается созданием приемной аппаратуры с панорамным перекрытием рабочей полосы частот с высоким быстродействием и широким динамическим диапазоном. Это делает возможным реализацию современных методов устранения промышленных помех и открывает новые возможности для тонких спектральных исследований излучения короны Солнца.

Одной из принципиальных трудностей для всех радиоастрономических инструментов является сложность изучения механизмов излучения слабых корональных структур на фоне высокой яркости (свыше 10^6 К), которая резко повышает уровень шумов принимающей аппаратуры, и делает невозможным регистрацию маломощных объектов. Наличие панорамного анализа данных с высоким относительным частотным разрешением 10^{-5} и большой динамический диапазон нового приемного комплекса РАТАН-600 предоставляет возможность проводить диагностику плазмы по данным радиоспектроскопии, проверять модельные оценки по магнитному пересоединению, связанные с определением доли энергии, выделяемой пересоединением, идущей на прямой нагрев плазмы, макроскопические течения (например, струи) и нетепловые частицы, и др.

МНОГООКТАВНАЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЯ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Анализ современной радиоприемной аппаратуры для исследования структуры радиоизлучения солнечной короны [1] показывает, что специфика аппаратуры разделилась на три направления:

1) радиотелескопы-рефлекторы, которые обладают сплошной поверхностью, широкой многократной полосой приема и, как следствие, высокой

чувствительностью по яркостной температуре. Сегодня крупные рефлекторные инструменты практически не используются в регулярных наблюдениях Солнца. Исключением является радиотелескоп РАТАН-600, на котором регулярные многоволновые наблюдения Солнца проводятся с 1975 г.

2) радиотелескопы-интерферометры, которые обладают высоким двумерным пространственным разрешением и возможностью длительно сопровождать Солнце.

3) множество одиночных зеркал с пространственным разрешением, превышающим размер диска Солнца, которые предназначены для измерения общего потока излучения на различных отдельных частотах с целью мониторинга активности Солнца.

Природа радиоизлучения является довольно сложной для адекватного ее изучения средствами солнечной радиоастрономии, несмотря на высокую чувствительность радиоволн к проявлению тонкой структуры радиоизлучения короны. Это происходит из-за высокой яркостной температуры короны (свыше 10^6 К), необходимости большого динамического диапазона, подробного спектрального и поляризационного анализа.

В дополнении к этому, необходимо развивать следующие параметры, важные для эффективности крупного рефлекторного инструмента:

- многопрограммность;
- мультиобъектность;
- широкодиапазонность и предельное спектральное разрешение;
- высокое временное разрешение;
- адекватное устранение промышленных помех.

Активное использование диапазона 1–3 ГГц для мобильной связи, бытовой техники и авиационных целей практически закрыло радиоастрономические наблюдения на этих частотах. Для решения поставленных выше вопросов предложена и начата реализация новой концепции приемной техники [12, 13], которая основана на высокоскоростном считывании данных на АЦП до 6 ГГц без использования переноса радиосигнала в область низких частот (рис. 1).

АНАЛОГОВАЯ ЧАСТЬ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Сигнал принимается рупорным коническим облучателем с биортогональной круговой поляризацией АС6.201.02 диапазона 1–3 ГГц производства АО “Скард-Электроникс” (г. Курск). Входные малошумящие усилители (МШУ) реализованы на микросхемах и обеспечивают шумо-

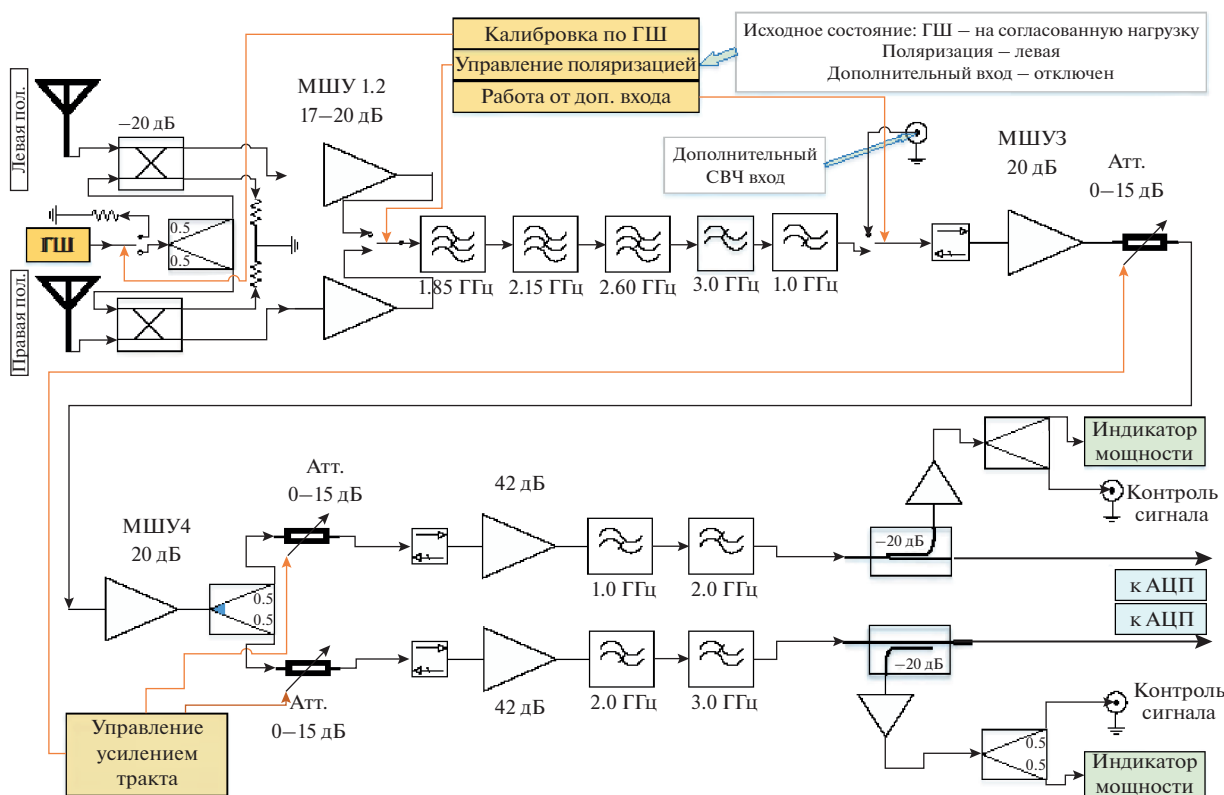


Рис. 1. Схема аналоговой части спектрального комплекса.

вую температуру усилителя в диапазоне 40–70 К. Выходы этих усилителей соединены со входами переключателя, обеспечивающего поочередное подключение сигнала с левой и правой поляризациями к измерительному тракту радиометра.

Блок фильтров, следующий за переключателем, состоит из ФНЧ с частотой среза 3 ГГц и ФВЧ с частотой среза 1 ГГц и режекторных фильтров с центральными частотами 1.85, 2.15, 2.63 ГГц и полосами подавления по уровню –30 дБ шириной от 120 до 150 МГц. Последние предназначены для подавления сигналов передатчиков мобильной связи, чтобы исключить перегрузку усилительного тракта радиометра. Регулировка усиления радиометра осуществляется аттенюаторами ослаблением до 31.5 дБ каждый с цифровым управлением и шагом перестройки 0.5 дБ. Усилители производства ОАО “Микран” повышают уровень радиоастрономического сигнала примерно до –10 дБм, что соответствует режиму работы входных усилителей АЦП без перегрузки при пиковых значениях сигнала.

На выходе после набора усиления сигнал делится на два канала, формирующих две зоны Найквиста в диапазонах 1–2 и 2–3 ГГц. Усилители производства ОАО “Микран” повышают уровень радиоастрономического сигнала примерно

до –10 дБм, что соответствует режиму работы входных усилителей АЦП без перегрузки при пиковых значениях сигнала. Для контроля уровня сигнала и индикации выходной мощности в каналах предусмотрены ответвители, а вспомогательные усилители компенсируют коэффициент ответвления, составляющий примерно –20 дБ от основного канала.

Для контроля калибровки радиометра предусмотрен внутренний генератор шума на основе лавинно-пролетного диода с впрыскиванием во входной тракт радиометра сигнала с шумовой температурой порядка 100–200 К (в зависимости от частоты). Спектральная характеристика калибровочного сигнала табулирована.

ЦИФРОВАЯ ЧАСТЬ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В основе схемы приемного комплекса работает принцип радиометра полной мощности, который в отличие от [14] основан на высокоскоростном цифровом считывании без использования квадратичного детектирования. Применен высокоскоростной 10-разрядный АЦП ev10aq190, который тактируется стабилизированным кварцевым генератором с низким джиттером, работаю-

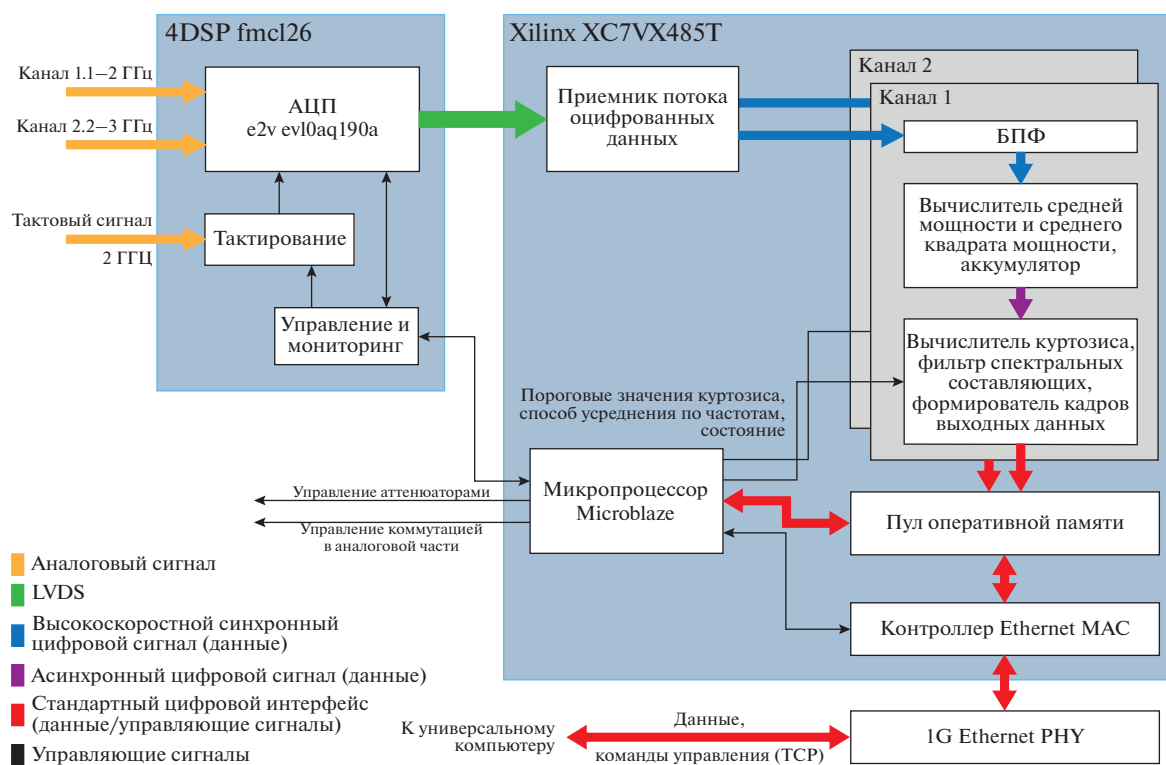


Рис. 2. Схема цифровой части спектрального комплекса.

щим на частоте 2 ГГц, что обеспечивает частоту дискретизации 2 Гвыб/с (рис. 2).

Спектрометр работает в режиме неполной выборки, используя 2-ю и 3-ю зоны Найквиста для диапазонов 1.0–2.0 и 2.0–3.0 ГГц соответственно. Выход АЦП демультиплексирован на два канала. Вся последующая обработка сигналов реализована на оценочной плате Xilinx VC707, несущей ПЛИС Virtex XC7VX485T. Блок-схема основного конвейера обработки показана на рис. 2. Аппаратное обеспечение ПЛИС выполняет массивную параллельную обработку, чтобы удовлетворить требования к пропускной способности. Преобразование Фурье длиной 16384 точек выполняется параллельно на 8 стандартных ядрах Xilinx XFFT по 2048 точек каждое, затем результаты сдвигаются по фазе, и заключительный этап преобразования выполняется на специально разработанном 8-точечном 8-канальном ядре БПФ. Следующий блок в конвейере накапливает значения мощности и квадрата мощности в частотных каналах, усредняя их по каждому 1024 спектрам мощности, и дополняет их оценочными значениями спектрального куртозиса (см. ниже). Чтобы уменьшить объем данных, формирователь выходного потока может усреднять значения мощности по 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 частотным каналам, предоставляя информацию.

Достигнутые параметры спектрального комплекса:

- частотное разрешение: 122 кГц (10^{-5});
- число частотных каналов 8192/ГГц;
- временное разрешение: 8 мс/спектр;
- температура входных шумов аппаратуры: менее 100 К (на стенде);
- температура калибровочных шумов: 20 К;
- неравномерность частотной характеристики по диапазону: 3 дБ;
- динамический диапазон (с учетом автоматики): 90 дБ;
- коэффициент усреднения: по частоте 10^4 – 10^5 , по времени 10^4 ;
- полное усреднение: 10^9 .

Оценки указывают на высокую чувствительность в диапазоне 1–3 ГГц к наблюдениям источников на диске Солнца. Например, при полосе 10 МГц и постоянной времени 1 с на диске Солнца с антенной температурой в $6 \cdot 10^3$ К и площади антенны 10^3 м² чувствительность к регистрации слабых сигналов будет около 10^{-4} s.f.u. На практике регистрация слабых структур является труднодоступной из-за помех или наличия ярких объектов, на фоне которых они неразличимы. Однако хорошее заполнение спектра и обработка при по-

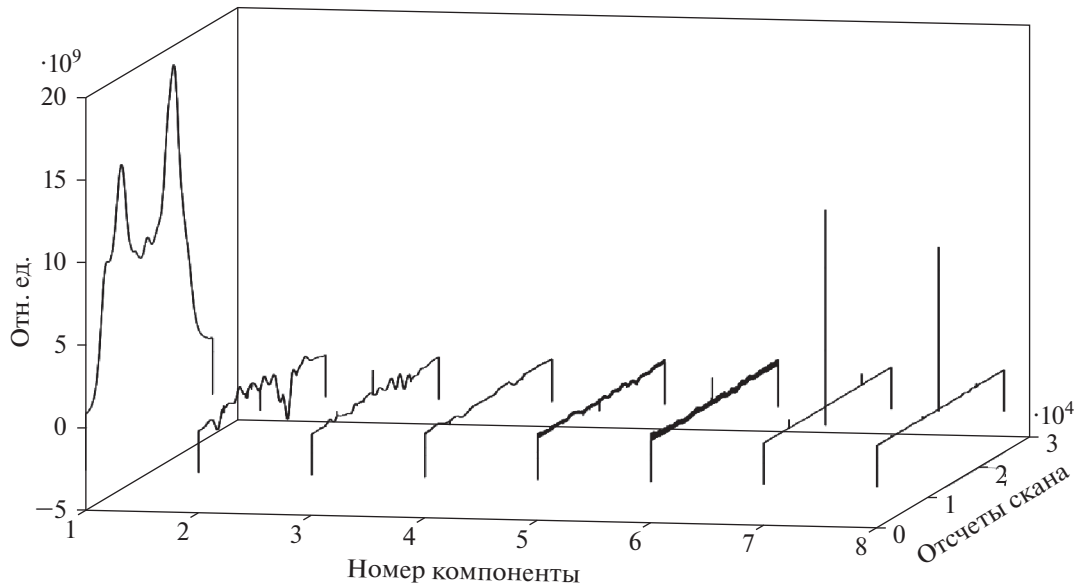


Рис. 3. Разложение одномерного скана диска Солнца по нескольким главным компонентам. Ось X – отсчеты скана, ось Y – номера компонент, ось Z – относительные амплитуды в безразмерных единицах.

мощи метода главных компонент позволяют анализировать свойства микро- и нановсплесков.

При использовании усреднения по частоте до 10^9 Гц и по времени до 10^2 с чувствительность по антенной температуре достигает 10^{-3} К или 10^{-3} Ян. Таким образом, эти параметры позволяют вести мультиобъектные наблюдения на РАТАН-600.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Применение методов, основанных на анализе статистических характеристик спектров принимаемых случайных сигналов, в которых присутствуют радиопомехи, базируется на предположении о том, что полезный исследуемый сигнал природного происхождения имеет гауссову статистику. Помеха искусственного происхождения имеет негауссову природу и вносит искажение в статистические характеристики сигнала. Исследуется функция вероятности распределения спектральной плотности мощности выходного сигнала радиотелескопа. Шумы системы и исследуемого источника имеют гауссово распределение с нулевым средним изменению статистики выходного сигнала радиотелескопа. Распределение мгновенного спектра мощности станет нецентральным (несимметричным).

Результаты усреднения мощностных спектров за некоторый промежуток времени 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. Общая архитектура цифрового спектрометра, использующего средство оценки спектрального эксцесса куртозиса (СК) как 4-й нормированный центральный момент распределения случайной величины. Для его вычисления применяется быстроедействие работы АЦП и сигнального процессора.

Спектрометр выполняет цифровое преобразование Фурье для входящих кадров данных, каждый из которых имеет длину N отсчетов. Затем по полученным M спектрам мощности в каждом спектральном канале k вычисляется оценка величины спектрального куртозиса:

$$V_k^2 = \frac{\sigma_k^2}{\mu_k^2},$$

где $\mu_k = \langle \hat{P}_k \rangle$ и $\sigma_k^2 = \langle \hat{P}_k^2 \rangle - \langle \hat{P}_k \rangle^2$ – оценки для среднего значения и дисперсии мощности в k -м спектральном канале. Для гауссова процесса $V_k^2 = 1$. Оценки μ_k и σ_k^2 вычисляются в эксперименте по результатам конечного количества измерений.

Усреднение ведется по M реализациям-выборкам длиной N . Для вычисления средних значений по M реализациям используются обозначения:

$$S_1 = \sum_{i=1}^M \hat{P}_{ki}; \quad S_2 = \sum_{i=1}^M \hat{P}_{ki}^2.$$

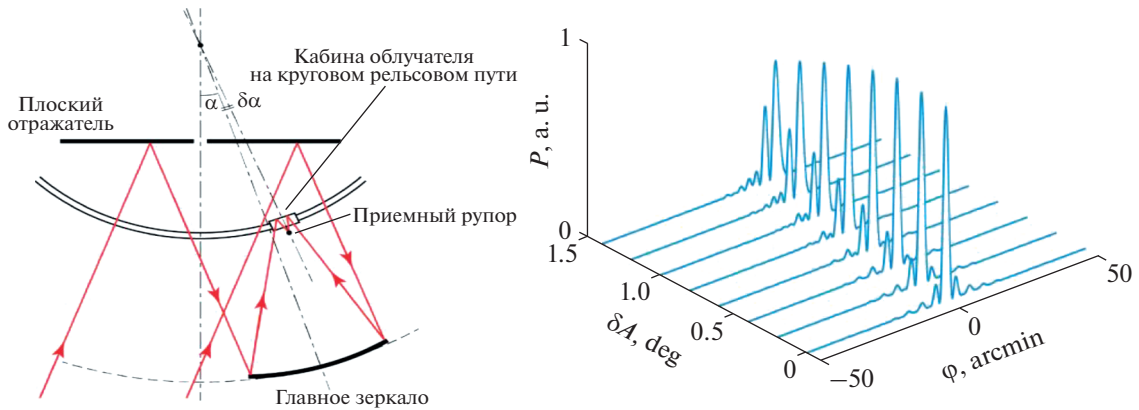


Рис. 4. Режим сопровождения на РАТАН-600. Слева: схема движения приемной кабины по дуговым рельсам в азимутальной системе главного зеркала и Плоского отражателя; справа: диаграммы системы Юг + Плоский при различных значениях выноса зеркала приемной кабины из фокуса.

Тогда оценки среднего значения и дисперсии приобретают следующий вид:

$$\mu_k = \frac{1}{M} S_1; \quad \sigma_k^2 = \frac{MS_2 - S_1^2}{M(M-1)},$$

а оценка для спектрального куртозиса [15] —

$$V_k^2 = \frac{M}{M-1} \left(M \frac{S_2}{S_1^2} - 1 \right).$$

Метод спектрального куртозиса успешно опробован на Owens Valley Solar Array при работе с тремя параболами диаметром 1.8 м и на Korean Solar Radio Burst Locator (KSRBL), для которого авторы в Center for Astronomical Signal Processing and Electronics Research (CASPER) создали измерительный цифровой комплекс с программным обеспечением [16].

МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Метод главных компонент [17], впервые предложенный еще К. Пирсоном в 1901 г., или разложение по эмпирическим ортогональным функциям, применяется к данным, записанным в виде матрицы. При анализе главных компонент выбирается направление максимального изменения данных, называемой первой главной компонентой. После исключения первой главной компоненты определяется следующее направление, максимизирующее остаточную вариацию (*ортогональный* разброс данных вокруг первой прямой), и т.д. Таким образом, факторы последовательно выделяются один за другим. Так как каждый последующий фактор определяется так, чтобы максимизировать изменчивость, оставшуюся от предыдущих, то факторы оказываются независимыми друг от друга, другими словами, некоррелированными или ортогональными. При

помощи такого ортогонального базиса можно описать основные параметры, определяющие исходный массив данных. Так как моды отсортированы по их вкладу в общую энергию, крупномасштабные структуры представляются небольшим количеством первых главных компонент.

В применении к данным солнечного радиоизлучения таким образом выявляется медленно меняющаяся составляющая, а также помеховые и шумовые составляющие, позволяя мгновенно выделить быстрые процессы в ограниченном спектральном диапазоне в отдельных активных областях Солнца.

РЕЖИМ СЛЕЖЕНИЯ

Режим слежения является перспективным для радиотелескопа РАТАН-600, поскольку он позволяет проводить исследования динамики излучения радиоисточников (вспышки на Солнце и звездах, блазары и др.). С другой стороны, можно значительно увеличивать чувствительность наблюдений, применяя временное накопление сигнала. Возможен также ряд смешанных режимов. Режим слежения реализуется на Южном секторе с Перископом и схематически представлен на рис. 4 [18].

Для реализации процесса слежения создана система АСУ облучателя, которая должна решать следующие задачи [19]:

- контроль параметров антенной системы — скорость облучателя, положение облучателя, скорость каретки, положение каретки, уклон облучателя от горизонтали по двум угловым координатам γ и β ;

- поддержка реализации следующих вариантов наблюдений — слежение облучателем со сканированием кареткой области наблюдения, слежение со скольжением каретки, слежение за заданной координатой.

ВЫВОДЫ

Для наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 создан мультиобъектный спектрометр нового типа со следующими возможностями:

1) Достигнутое максимальное спектральное разрешение составляет 122 кГц в полосах частот 1.0–2.0 и 2.0–3.0 ГГц.

2) Выходной спектр в полосе 1 ГГц может иметь от 64 до 8192 частотных каналов, в зависимости от требований наблюдателя, с выходной скоростью 120 спектров/с.

3) Реализована возможность удаления радиопомех с использованием статистического алгоритма, основанного на оценке спектрального эксцесса (куртозиса).

4) Реализована высокоскоростная обработка данных с выделением тонкой структуры сигнала и помех методом главных компонент.

5) Показано, что метод главных компонент открывает новый параметр анализа солнечных структур на глубину спектральной изменчивости.

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. Данная концепция может быть использована при создании приемных устройств для задач исследования несолнечных объектов.

Применение новой аппаратуры и высокоскоростной регистрации открывает исследования динамических характеристик в ряде задач, таких как:

– глубокая диагностика предвспышечного состояния солнечной плазмы и вспышечного процесса.

– процессы удержания горячей плазмы в магнитных ловушках.

– измерения критических градиентов магнитного поля по спектрально-поляризационным наблюдениям источников над нейтральной линией.

– создание адекватной модели пятна на основе механизмов формирования спектров излучения в широком диапазоне высот.

Часть наблюдательных данных получена на уникальной научной установке радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН; работа по обработке наблюдательных данных выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-250 (13.МНПМУ.21.0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khaikin V.B., Storozhenko A.A., Bogod V.M. Radioheliographs and Radio Reflectors in Solar Plasma Studies // Astrophysical Bulletin. 2019. V. 74. P. 221–233. <https://doi.org/10.1134/S1990341319020111>
2. Bogod V.M. Prospects for Ground-Based Solar Radio Astronomy in Russia // Proceedings of All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century”. Nizhny Arkhyz. 2020. P. 399–404. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_399
3. Bogod V.M., Yasnov L.V. Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements // Solar Physics. 2016. V. 291. P. 3317–3328. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0936-8>
4. Bogod V.M., Kaltman T.I. The magnetosphere of solar active region by radio observations in a wide wavelength range // Astronomical & Astrophysical Transactions. 2019. V. 31. № 3. <https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.008>
5. Bastian T., Gary D.E., Fleishman G.D. et al. Measuring Coronal Magnetic Fields with the Jansky Very Large Array and RATAN Telescopes // American Geophysical Union, Fall Meeting 2019. Abstract #SH41B-05.
6. Yasnov L.V., Bogod V.M., Gofman A.A. Spectrum and physical conditions in microflare generation regions at decimeter-wave frequencies // Astrophysical Bulletin. 2017. V. 72. № 1. P. 58–66. <https://doi.org/10.1134/S1990341317030075>
7. Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Storozhenko A.A. et al. Quasi-periodic Pulsations in a Solar Microflare // The Astrophysical Journal. 2018. V. 859. № 2. P. 154. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfb9>
8. Karlický M., Rybák J., Monstein C. Fourier Power Spectra of Solar Noise Storms // Solar Physics. 2018. V. 293. № 10. P. 143. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1367-5>
9. Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. О возможности наблюдений линий водорода // Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 8. С. 694–704. <https://doi.org/10.31857/S0004629921080041>
10. Khersonskii V.K., Varshalovich D.A. The possibility of observing recombination lines in solar radiation // Астрономический журнал. 1980. Вып. 57. С. 621–623.
11. Dravskikh A.F., Peterova N.G., Topchilo N.A. Profile of the 9.85-GHz Neutral Hydrogen Line // Astronomy Reports. 2019. V. 68. № 3. P. 229–237. <https://doi.org/10.1134/S1063772919030028>
12. Bogod V.M., Lebedev M.K., Ovchinnikova H.E. и др. Спектрорадиометрия солнечной короны на крупных инструментах // Сб. докладов Всероссийской конференции “Физика солнечной плазмы”. ИКИ 7–11 февраля 2022.
13. Lebedev M.K., Ripak A.M., Bogod V.M. High-Speed Spectroradiometry using a Statistical Method of RFI Suppression for Radio Observations with RATAN-600 // Proceedings of the All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century”, Nizhny Arkhyz, Russia, September 21–25, 2020. P. 413. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_399
14. Tsybulev P.G. New-generation data acquisition and control system for continuum radio-astronomic obser-

- vations with RATAN-600 radio telescope: Development, observations, and measurements // *Astrophysical Bulletin*. 2011. V. 66. Iss. 1. pp. 109–122. <https://doi.org/10.1134/S199034131101010X>
15. *Nita G.M.* Spectral kurtosis statistics of transient signals // *MNRAS*. 2016. V. 458. P. 2530–2540. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw550>
16. *Yujiang Dou, Gary D.E, Zhiwei Liu et al.* The Korean Solar Radio Burst Locator (KSRBL) // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2009. V. 121. № 879. P. 512–526. <https://doi.org/10.1086/599624>
17. *Bro R., Smilde A.K.* Principal component analysis // *Analytical Methods*. 2014. V. 6. P. 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/c3ay41907j>
18. *Storozhenko A., Lebedev M., Ovchinnikova N. et al.* Tracking mode in the southern sector with the periscope of the RATAN-600 radio telescope // *Proceedings of all-Russian conference, September 21–25, 2020 Nizhny Arkhyz, 2020 at Special Astrophysical Observatory of RAS*. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_407
19. *Стороженко А.А., Богод В.М., Лебедев М.К. и др.* Система автоматического управления приемным зеркалом РАТАН-600 для режима слежения // *XXV Всероссийская ежегодная конференция “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”*, Санкт-Петербург, 4–8 октября 2021 г. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2021-249-252>