УДК 520.24+520.274.3+52-17

МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫЙ РЕЖИМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЮЖНОМ СЕКТОРЕ РАТАН-600 С ПЕРИСКОПИЧЕСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

В. М. Богод[1], *Г. Н. Жеканис*[1], *М. Г. Мингалиев*[1], *С. Х. Тохчукова*[2]

Данная работа посвящена развитию возможностей радиотелескопа РАТАН-600 путём внедрения в регулярное пользование режима многоазимутальных наблюдений на южном секторе с перископическим отражателем. Этот метод делает возможным изучение динамики переменных радиоисточников на временны́х интервалах с длительностью до нескольких минут и на порядок увеличивает количество переменных радиообъектов при проведении обзоров неба. В настоящее время проведено более десятка серий наблюдений Солнца в новом режиме на многоволновом приёмном комплексе и получены новые астрофизические результаты. Разработано программное обеспечение для многоволнового картографирования Солнца и вейвлет-анализа временны́х рядов. Достигнутые характеристики режима: временно́е разрешение 4 минуты в течение до 4,5 часов при наблюдениях в интервале азимутальных углов от 30° до -30°.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании переменных радиоисточников в широком диапазоне частот и характерных временны́х масштабов возникают задачи частых наблюдений. В течение 2000–2003 гг. на РАТАН-600 разработан и внедрён в регулярное пользование режим многократных азимутальных наблюдений на южном секторе с перископом (ЮП). Указанные наблюдения открывают новые возможности не только при исследовании такого переменного объекта, как Солнце, но и при проведении крупных обзоров переменных радиоисточников. В перспективе развитие данного режима может привести к развитию многоволновых наблюдений пульсаров, что весьма важно, учитывая большую эффективную площадь рефлекторной системы. В данной работе режим наблюдений был применён для исследования Солнца с повышенным временны́м разрешением. Известно, что в солнечной радиоастрономии перед исследователями стоит задача получения изображения с хорошим пространственным, временны́м и спектральным разрешением в широком диапазоне, с высокой чувствительностью по потоку излучения и степени поляризации. Существующие на сегодняшний день крупные радиотелескопы (VLA, CCPT, WSRT, OVRO, NoRH, РАТАН-600) позволяют исследовать структуру солнечных образований с пространственным разрешением до $3\div15''$. Каждый их этих инструментов имеет свои ограничения, определяющие его круг задач. РАТАН-600 [1] является рефлекторной антенной с переменным профилем отражающей поверхности, с большой эффективной площадью ($400\div600$ м^2 в одном секторе) и рабочим диапазоном длин волн от 50 см до 8 мм, что является преимуществом по сравнению с интерферометрическими системами. В сочетании с панорамным анализатором спектра (ПАС) [2] радиотелескоп является уникальным инструментом для солнечных исследований, позволяющим вести параллельный приём в широком диапазоне длин волн с 5-процентным спектральным разрешением, высокой чувствительностью по потоку (несколько миллиянских) и высокой точностью измерения степени поляризации (доли процента). В то же время главными недостатками РАТАН-600 как инструмента для исследований Солнца являются относительно низкое временно́е разрешение и одномерность получаемых изображений. До настоящего времени РАТАН-600 использовался в основном для получения одномерных изображений (сканов) радиоисточников в режиме прохождения. Однако конструкция телескопа позволяет реализовать множество различных режимов наблюдений, включая несколько методов картографирования (азимутальный апертурный синтез двумерных изображений на круговом отражателе и в антенной системе ЮП [1], параллельный околозенитный синтез [3], режим радиогелиографа [4]. Здесь мы рассматриваем более детально режим многоазимутальных наблюдений на ЮП.

Наблюдения Солнца проводятся на ЮП с 1976 года в режиме пассажного инструмента регулярно один раз в день, в местный полдень (около 9:13 UT, или, точнее, с учётом уравнения времени, от 8:57 до 9:27 UT). В июле 1982 года была проведена первая пробная серия наблюдений в интервале азимутов от -8° до 8° от меридиана [5]. При этом были уточнены формулы, полученные ранее Шиврисом [6], для расчёта высоты установки плоского отражателя и момента прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа с учётом рефракции и изменения координат источника в период наблюдений. Был предложен итеративный алгоритм для расчёта параметров установки антенны, который используется по настоящее время. На основе наблюдений, проведённых 19 июля 1982 года, были построены первые двумерные изображения активной области на Солнце на длине волны 2 см [7]. Восстановление одномерных проекций двумерного распределения радиояркости может быть реализовано как в пространстве сигналов, так и в пространстве фурье-спектров. Выбор второго способа в то время был обусловлен возможностями существовавших ЭВМ, точнее, ограничен ресурсами их оперативной памяти. Синтезируемый сектор позиционных углов при этом составил $\pm 12^\circ$. Качество полученных карт было невысоким, что затрудняло их использование для астрофизических исследований.

Позднее для азимутального картографирования Солнца на РАТАН-600 использовали методику синтеза изображений в пространстве сигналов [8]. Для коррекции изображения, как и в первом случае, была использована стандартная процедура чистки CLEAN (алгоритм Хегбома).

В последние годы появились новые возможности для проведения частых и качественных многоазимутальных наблюдений на ЮП благодаря автоматизации плоского отражателя [9] и частичной автоматизации 3-го облучателя [10], на котором был установлен высокоточный привод «Movitrac 31C» фирмы «Seweurodrive», управляемый с компьютера или пульта. Установленный на облучателе солнечный многоволновый комплекс с единым фазовым центром в широком диапазоне длин радиоволн даёт возможность строить одновременные карты на 30 длинах волн в диапазоне от 2 до 15 см.

Кроме того, возросшие возможности вычислительной техники уже не налагают ограничения на объём вычислений, необходимый для картографирования на ЮП. Основными задачами при современном картографировании на РАТАН-600 становятся повышение качества изображений и удобство пользования программным обеспечением.

С другой стороны, большой объём информации (измерения при 61 азимуте на 36 длинах волн дают 2 196 сканов Солнца в день) делает актуальной задачу автоматизации процесса обработки и представления данных в виде, удобном для восприятия и анализа.

При проведении многоазимутальных наблюдений, кроме задач по картографированию, важное место занимают исследования быстропеременных процессов в солнечной атмосфере.

Начиная с 1999 года было проведено несколько серий наблюдений во всём диапазоне азимутов (от 30° до -30°), доступных на ЮП, в месяцы, близкие к летнему и зимнему солнцестоянию (июнь–июль, декабрь) и к весеннему и осеннему равноденствию (сентябрь–октябрь, март–апрель). Таблица наблюдений приведена в сети Интернет на странице группы солнечных исследований (ГСИ) [11].

В марте 2002 года впервые были проведены наблюдения с интервалом между двумя последовательными кульминациями 4 минуты и интервалом между последовательными установками антенной системы, равным 1 минуте. Такая частота регистрации излучения Солнца является практически предельной для наблюдения всего диска в режиме прохождения, с неподвижными облучателем и кареткой, поскольку время прохождения Солнца через диаграмму направленности антенны (ДНА) составляет около 2,5 минут, а время установки кругового отражателя с помощью автоматической системы управления (АСУ) в настоящее время составляет около 1 минуты.

В принципе, для исследования отдельных локальных источников на Солнце можно повысить временно́е разрешение до 2 минут между кульминациями, но при этом теряется возможность калибровки по полному потоку, в связи с чем налагаются повышенные требования на стабильность аппаратуры в период наблюдений (до 4 часов).

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ЮЖНОГО СЕКТОРА С ПЕРИСКОПИЧЕСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Южный сектор кругового отражателя РАТАН-600 образует перископическую систему вместе с плоским зеркалом, состоящим из 124 плоских отражающих элементов размером $3{,}1 \times 8{,}5$ м, которые могут отклоняться от вертикали на угол до 70°. Протяжённость плоского отражателя около 400 м. Он ориентирован точно в направлении восток—запад и отстоит от центра радиотелескопа на 104 м к югу. Между плоским зеркалом и южным сектором главного зеркала радиотелескопа находится круговой рельсовый путь, радиус кривизны которого составляет 160 м. Кабина со вторичным зеркалом (облучатель) может двигаться по этим рельсовым путям, обеспечивая наблюдения в пределах азимутов ±30° от направления на юг (рис. 1). В системе ЮП для указанного диапазона азимутов сохраняется ножевая диаграмма направленности при больших углах места (в отличие от режимов наблюдения без плоского отражателя, когда вертикальный размер диаграммы быстро уменьшается при увеличении высоты источника).

Рис. 2 иллюстрирует особенности солнечных наблюдений с помощью системы ЮП, связанные с изменением ориентации ножевой диаграммы относительно траектории Солнца [6]. Из рис. 2 видно, что в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствию, ориентация луча диаграммы относительно оси Солнца сохраняется, что удобно для наблюдения переменных процессов. С другой стороны, в периоды летнего и зимнего солнцестояния позиционные углы достигают максимальных значений, что благоприятствует построению двумерных карт стабильных областей на Солнце.

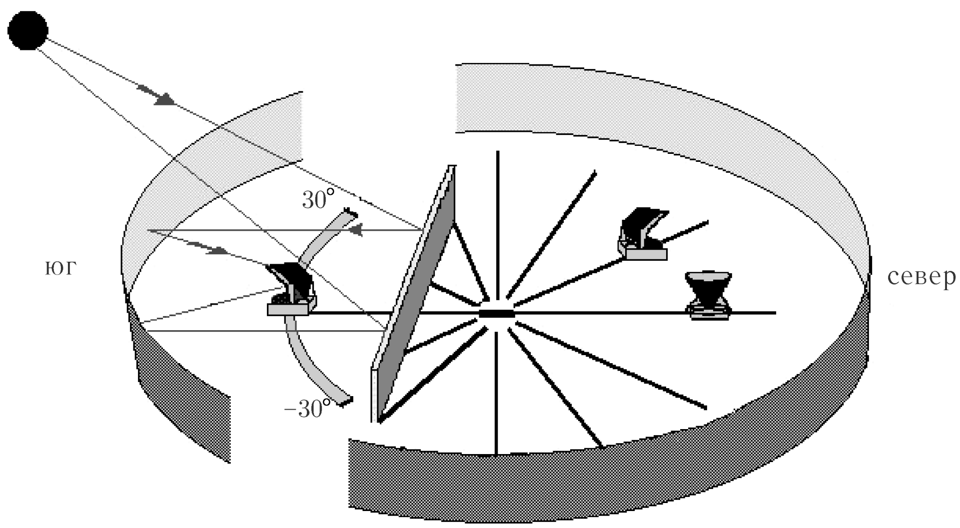

Рис. 1. Схема работы РАТАН-600 при использовании антенной системы южного сектора с плоским отражателем

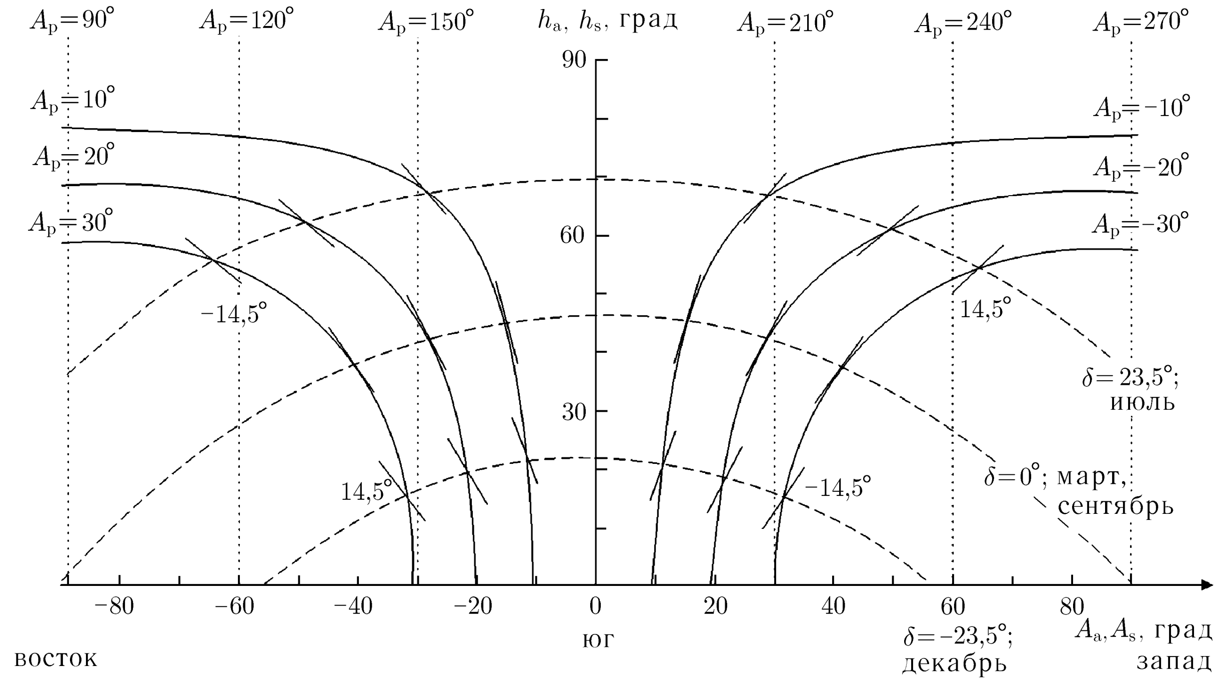

Рис. 2. Траектории источника (пунктирные полуокружности) и центра ДНА (сплошные линии) при различных склонениях источника δ. В точках пересечения этих кривых прямыми отрезками показаны ориентации вертикальных диаграмм направленности антенны. Показано, что при $\delta = 0°$ ориентация ДНА относительно источника не меняется. При склонениях $\delta \approx \pm 23°$ позиционные углы меняются от $-14{,}5°$ до $14{,}5°$ при наблюдениях в диапазоне азимутов от $-30°$ до $30°$. Здесь $A_{\rm p}$ — азимут вершины параболы, вдоль которой устанавливаются элементы кругового отражателя телескопа, $A_{\rm a}$ и $h_{\rm a}$ — азимут и угол наклона центра диаграммы направленности антенны, $A_{\rm s}$ и $h_{\rm s}$ — азимут и угол места источника

Следует отметить, что метод азимутального картографирования пригоден лишь для изучения стабильных (невспышечных) образований, тогда как многоазимутальные наблюдения с наименьшим временны́м интервалом необходимы для наблюдений быстропеременных процессов, колебаний солнечной атмосферы и всплесков.

Для взаимной привязки изображений, полученных для разных азимутов, следует учитывать азимутальные изменения параметров антенны (эффективной площади антенны и размера ДНА). Что касается размера ДНА, в первом приближении он должен быть постоянным. Эффективная площадь антенны изменяется пропорционально произведению косинуса угла наклона плоского отражателя от вертикали и косинуса азимута облучателя [6]. На рис. 3 приведён график этой зависимости. В периоды равноденствия, когда угол наклона плоского отражателя от вертикали практически не меняется, эффективная площадь антенны уменьшается пропорционально косинусу азимута облучателя и при крайних азимутах падает на 15 %. В периоды солнцестояния это падение увеличивается до 30 %. Сказанное особенно справедливо для длинных волн. На коротких волнах косинус угла наклона плоского отражателя не влияет на уменьшение эффективной площади антенны, поскольку вертикальный размер принимающей поверхности ограничивается вертикальным размером зеркала облучателя, который равен 5,5 м. Для солнечных склонений высота облучателя заведомо меньше высоты плоского отражателя (7,4 м), умноженного на косинус угла его наклона. Это приводит к тому, что на коротких волнах работает верхняя кривая на рис. 3 независимо от периода наблюдений (т. е. и в равноденствие, и в солнцестояние). Калибровка по полному потоку излучения позволяет осуществлять взаимную привязку азимутов,

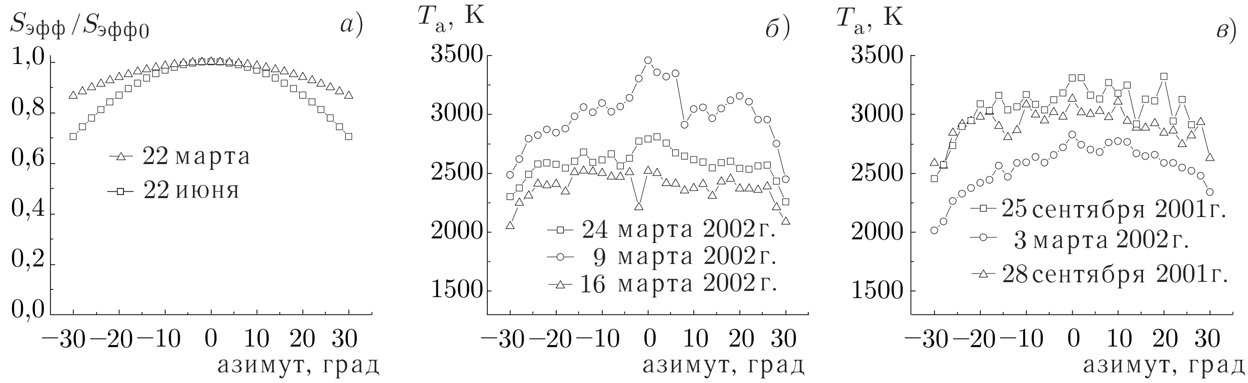

Рис. 3. (*а*) Расчётное относительное (по сравнению с меридианом) падение эффективной площади антенны $S_{\text{эфф}}$ при наблюдениях в различных азимутах. В периоды равноденствий (март, сентябрь) для крайних азимутов происходит уменьшение эффективной площади, достигающее 15 %, в период солнцестояний (декабрь, июнь) — до 30 %. (*б*) Изменение антенной температуры $T_{\text{а}}$ при наблюдениях спокойного Солнца при различных азимутах на длине волны 3,21 см для установок с сокращённой апертурой (109 щитов). (*в*) Изменение антенной температуры для установок с полной апертурой (166 щитов)

но на практике существуют некоторые расхождения с расчётными параметрами (рис. 3). Наибольшие расхождения проявляются в крайних восточных азимутах, от -30° до -26°. Здесь падение антенной температуры по сравнению с меридианом составляет до 30 % в равноденствие вместо ожидаемого падения на 15 %. Для остальных азимутов расхождение составляет не более 5 %.

Причины этой и других ошибок бывает трудно выявить из-за сложности используемой трёхзеркальной антенной системы. Некоторые ошибки (например, в расчётах времени кульминации и метках для установки облучателя в азимут) были выявлены при наблюдениях и минимизированы, а другие (например, смещение ДНА по высоте) следует учитывать при обработке. Ниже описываются основные виды ошибок, влияющих на качество наблюдений, и методики их определения по наблюдениям Солнца. Все ошибки можно разбить на две основные группы: 1) ошибки установки антенной системы по азимуту; 2) ошибки наведения антенной системы по высоте.

Первая группа складывается из ошибок наведения кругового отражателя, ошибок установки плоского отражателя и ошибок установки облучателя на данный азимут. Точность установки кругового отражателя определяется, прежде всего, точным определением мест нулей отражающих элементов и точностью юстировки отражающей поверхности. К такого рода ошибкам особенно чувствительны короткие волны.

Ошибки установки плоского отражателя сказываются на качестве наблюдений минимальным образом. Обнаруженный разворот всего плоского отражателя по азимуту, который приводил к образованию бокового лепестка диаграммы, уменьшен до приемлемых значений.

Ошибки установки облучателя на данный азимут наиболее явно видны в данных наблюдений, поэтому их легко выделить и контролировать. Перестановки облучателя в настоящее время управляются с пульта при участии операторов. Пробные наблюдения в режиме автоматического управления с использованием компьютера показали, что расстояние, проходимое облучателем по рельсам, соответствует ожидаемому угловому перемещению с точностью около 0,01 %, что даёт ошибку до 1,5 см при перемещении между установками. Для исключения систематических ошибок была составлена карта положений реперов на дуговых рельсовых путях, которая представляет собой таблицу расстояний между азимутами в инкрементах оборота двигателя привода. Эта таблица используется программой управления приводом, которая была написана для реализации

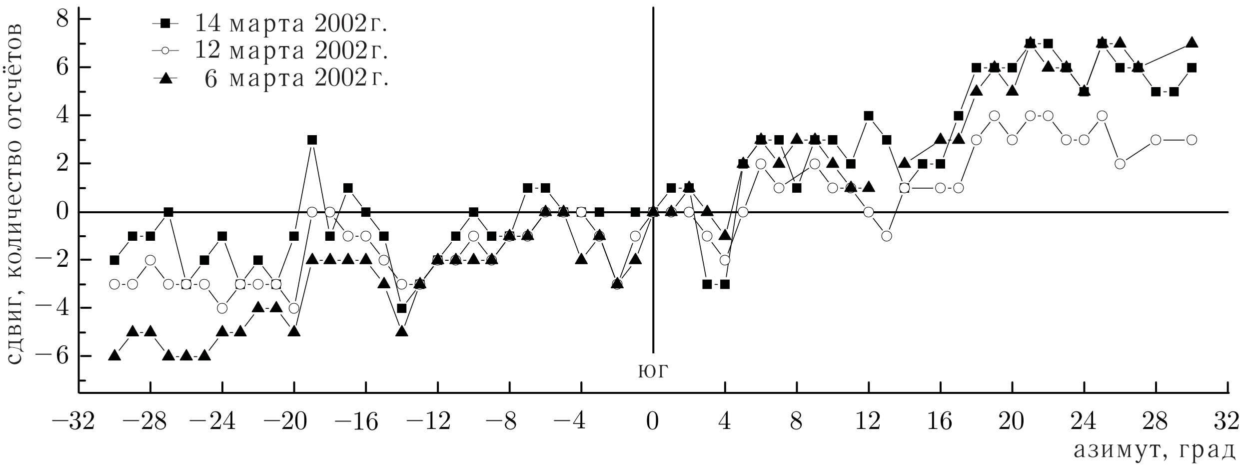

Рис. 4. График смещения максимума локального источника относительно меридиана при азимутальных наблюдениях. По вертикальной оси отложено количество отсчётов; 1 отсчёт равен примерно 5 секундам дуги на небе. Наклон кривых обусловлен смещением источника за счёт вращения Солнца. Величина отклонений от наклонной прямой определяется суммарным влиянием ошибок установки облучателя в фокус и ошибок фокусировки и наведения антенны

автоматических перестановок облучателя при многоазимутальных наблюдениях. Однако шумы, связанные с люфтами, не позволили реализовать необходимую точность установки для наблюдений на коротких волнах. Поэтому возможности точного цифрового привода в настоящее время полностью не используются, нужна более сложная система управления с обратной связью (информация, связанная с управлением приводом с использованием компьютера и положением реперов, приведена в Интернете на странице группы солнечных исследований [12], в «Справочнике по наблюдениям Солнца на РАТАН-600», см. «Инструкцию для наблюдателя на облучателе № 3»).

Другой источник ошибок заключается в температурных изменениях положений реперов, которые могут превышать 1 см. Более стабильные выносные реперы пока установлены только через каждые 4°. Планируется их установка через каждые 2°, что должно улучшить точность установки облучателя. Следует также упомянуть ошибки установки вторичного зеркала в горизонтальной плоскости (горизонтирования). При интервале между азимутальными наблюдениями 1 минута не хватает времени для горизонтирования с участием операторов. В этом случае необходимо применять автоматическую установку зеркала (такая система реализована на облучателе № 1).

Таким образом, совокупность ошибок установки облучателя на определённый азимут, расчёта времени кульминации, наведения кругового и плоского отражателей по азимуту может приводить к аберрациям, а также к тому, что расчётное время кульминации может не совпадать с моментом прохождения центра Солнца при сканировании. На рис. 4 приведены результаты измерения совокупной ошибки наведения по азимуту при смещении максимума локального источника от меридиана после коррекции положения реперов.

Если предположить, что ошибка обусловлена точностью установки облучателя по азимуту, то среднеквадратичное отклонение составляет (в переводе на расстояние по рельсам) около 3 мм. Ошибки такой величины не приводят к заметным аберрациям. Для восстановления центра источника в программе «WorkScan» [13] обычно используется процедура выравнивания по краям скана. Если на краях Солнца есть источники, этот метод работает неточно. В разработанном нами программном обеспечении в этом случае используется выравнивание по максимуму сигнала от стабильного локального источника на Солнце.

Что касается ошибок наведения антенны по высоте, они меньше влияют на качество наблюдений, поскольку размер ДНА в большей части рабочего диапазона длин волн больше размера Солнца. Но эти ошибки также следует измерять и учитывать их при вычислении потоков излучения от локальных источников на коротких волнах. По специальной методике было установлено, что существует систематическое смещение ДНА по высоте, которое составляет от -4 до -6 минут дуги на всех длинах волн и при всех азимутах. К такого рода ошибкам может приводить, например, недостаточно точный расчёт эфемерид (например, из-за неточного учёта рефракции) или неточное определение мест нулей отражательных элементов. Для выяснения причины смещения ДНА необходимо провести наблюдения калибровочных источников при различных азимутах. Для более точных вычислений потоков излучения локальных источников на коротких волнах (меньше 4 см) необходимо учитывать, что за время прохождения диска Солнца через ДНА (приблизительно 2,5 минут) высота Солнца изменяется. В утренние часы она увеличивается, а в послеобеденные — уменьшается, проходя вблизи моментов солнцестояния около 10 угловых минут по высоте за время одного наблюдения. Из-за этого ДНА пересекает Солнце не по прямой, а по некоторой кривой, в направлении северо-запад—юго-восток утром и юго-запада—северо-восток после полудня. Позиционный угол $q = -\arcsin(\operatorname{tg} A \operatorname{tg} \delta)$ летом увеличивает этот наклон, а зимой уменьшает на величину до $h_1 = R_\odot \sin q = 16 \sin(14{,}5^\circ) = 4$ угловые минуты, где $R_\odot$ — угловой радиус Солнца.

Для наблюдений с повышенным временны́м разрешением число отражательных элементов было снижено с 166 до 109, что уменьшило влияние диаграммных ошибок и время наведения антенны. Измерения размеров точечного источника на Солнце показали, что размеры ДНА сохраняются в большом интервале азимутальных углов, и лишь при крайних азимутах (от -26° до -30°) возможно заметное уширение диаграммы по сравнению со значением в меридиане. Для задач картографирования рекомендуется не использовать эти азимуты, пока качество изображения не будет улучшено с помощью юстировки и включения в процесс наблюдения элементов смежных секторов.

2. МНОГОВОЛНОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ С АЗИМУТАЛЬНЫМ СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ

Для обработки данных многоазимутальных наблюдений разработано новое программное обеспечение в среде IDL с использованием стандартного формата FITS и библитотек ASTROLIB. Данная программа RAIS [14] имеет графический интерфейс, работает как в пакетном, так и в интерактивном режимах и открыта для модификации пользователем. Программа позволяет строить карты всего диска Солнца с использованием в качестве входных данных как наблюдений на ЮП, так и в других режимах, в частности в режиме «эстафета с зонированием» [15]. Методика картографирования включает синтез двумерного распределения яркости по одномерным профилям, полученным при сканировании объекта лучами с ножевой диаграммой направленности. В основе процедуры построения синтезированного изображения лежит алгоритм суммирования соответствующих значений одномерных профилей [16]:

$$g(x,y) = \sum g_{qi}\,(x \cos q_i + y \sin q_i). \tag{1}$$

Полученная «грязная» карта $g(x,y)$ эквивалентна свёртке исходного изображения объекта $f(x,y)$ с синтезированной диаграммой h:

$$g(x_0,y_0) = \iint h(x-x_0, y-y_0) f(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y + n(x_0,y_0), \tag{2}$$

где $n(x_0,y_0)$ — случайный шум.

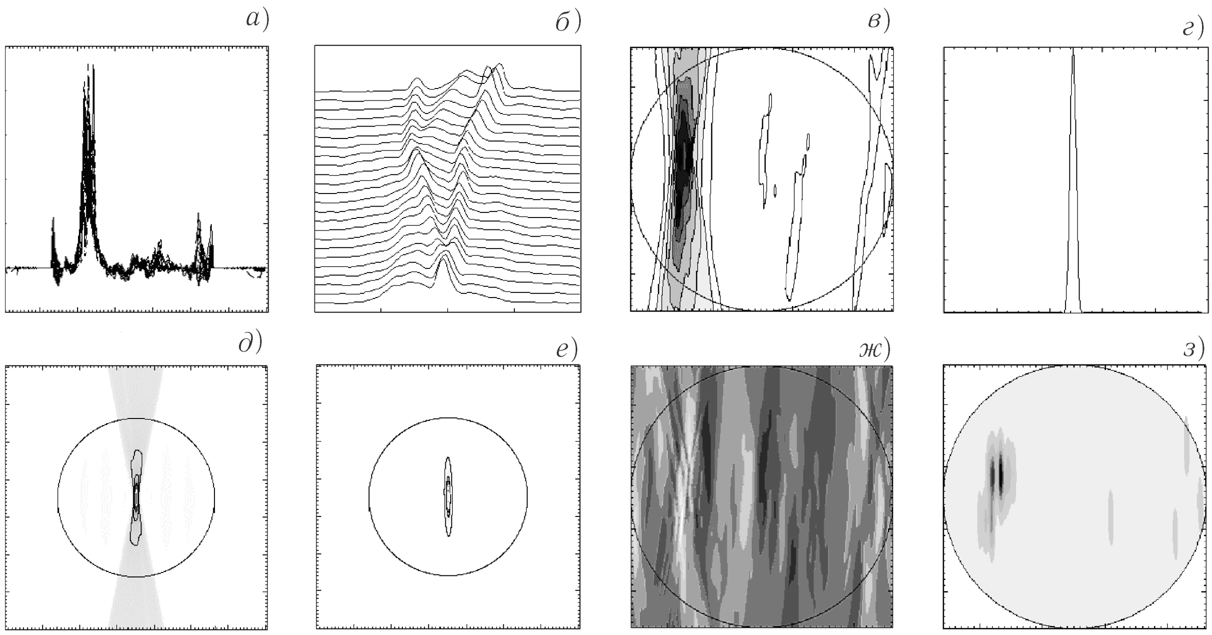

Рис. 5. Визуализация основных этапов картографирования: (*а*) одномерные сканы Солнца. Размер по горизонтали на 20 % превышает размер оптического диска; (*б*) сканы отдельной активной области. Размер по горизонтали — около 7 минут дуги; (*в*) «грязная» двумерная карта. Сплошным кругом изображён оптический диск Солнца; (*г*) одномерная диаграмма на длине волны 2,24 см. Полуширина диаграммы составляет около 20 секунд дуги; (*д*) «грязная» синтезированная двумерная диаграмма; (*е*) «чистая» двумерная диаграмма; (*ж*) остатки после вычитания источников из «грязной» карты («residuals»). Стандартное отклонение составляет 1,5 % от максимума исходной карты; (*з*) «чистая» двумерная карта Солнца

Восстановление исходного распределения яркости f в математическом смысле является задачей обращения линейного уравнения Фредгольма первого рода типа свёртки. Эта задача в данном случае решается с помощью алгоритма CLEAN.

Соответственно, процесс построения карты состоит из четырёх основных процедур-команд (рис. 5):

— синтезирование «грязной» карты (команда MAP CALC);
— построение «грязной» синтезированной диаграммы (2D BEAM CALC);
— вычисление «чистой» двумерной диаграммы (2D BEAM CLEAN);
— чистка «грязной» карты (MAP CLEAN).

На рис. 5*а* показаны одномерные сканы полного диска Солнца на длине волне 2,24 см, полученные 19 декабря 2001 г. На следующем рис. 5*б* в большем масштабе по горизонтали представлена активная область в восточном полушарии, сканированная под разными позиционными углами. Видно, что источник, сигнал которого при первом азимуте состоит из одного пика и протяжённого фона, к последнему азимуту постепенно разрешается на три источника примерно одинаковой яркости. Полученная «грязная» карта представлена на рис. 5*в*. Из-за того, что синтезированная диаграмма имеет боковые лепестки, изображения источников также получаются с подобными лепестками, т. е. «грязные». Алгоритм чистки лепестков процедурой CLEAN состоит в том, что программа находит максимумы яркости на изображении, вычитает из них «грязную» диаграмму направленности и добавляет (с заданным усилением) «чистую» диаграмму. «Грязная» двумерная диаграмма вычисляется таким же способом, что и «грязная» карта, но вместо сканов суммируется одномерная диаграмма, поворачиваемая под теми же углами распределения. «Чистая» двумерная

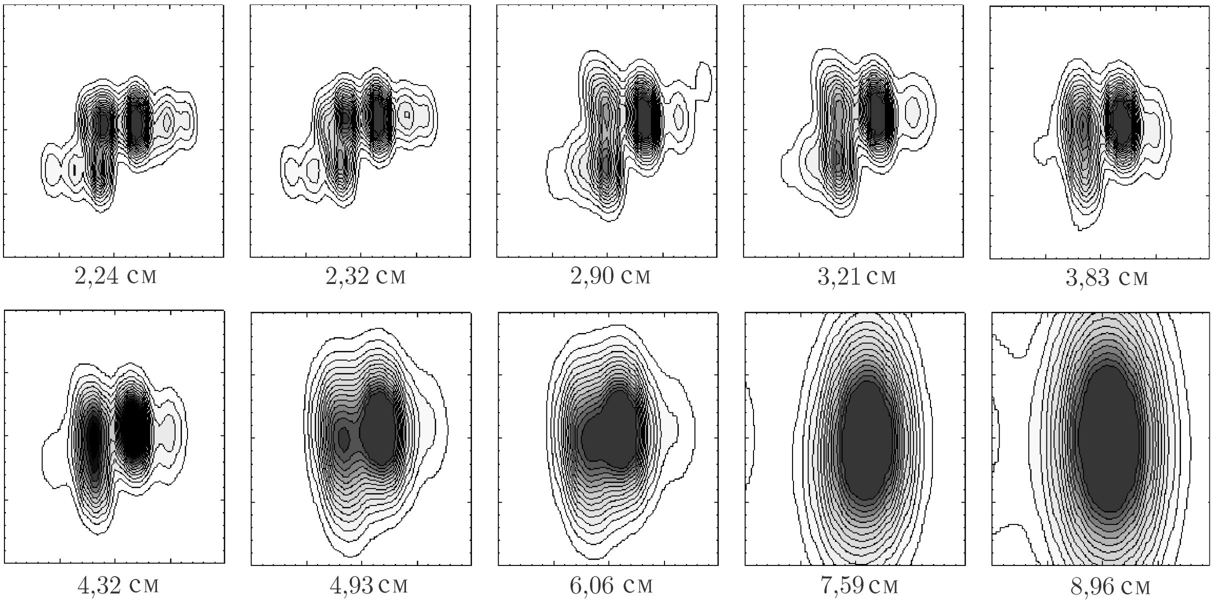

Рис. 6. Синтезированные карты активной области на Солнце на 10 длинах волн от 2,24 до 8,96 см по наблюдениям на ЮП РАТАН-600. Размер каждого изображения по горизотали около 4 минут дуги, по вертикали — 8 минут дуги

диаграмма получается путём вписывания двумерного гауссового распределения в ядро «грязной» диаграммы (рис. 5*е*). На длине волны 3,21 см размер синтезированной диаграммы составляет $20'' \times 155''$. Вертикальный размер «чистой» диаграммы будет тем меньше, чем больше сектор позиционных углов. Для ЮП этот сектор ограничивается геометрией системы, поскольку при угле раскрыва рельсовых путей от 30° до -30° максимальный сектор позиционных углов составляет приблизительно от $-14{,}5^\circ$ до $14{,}5^\circ$. Таким образом, вместо ножевой диаграммы мы получаем ограниченный размер диаграммы по двум координатам, но при этом источники вытянуты по вертикали. Что касается углового разрешения между одномерными изображениями, для точного восстановления двумерного распределения радиояркости Солнца необходимо иметь 150 сечений через равные угловые промежутки [17]. Поскольку в нашем случае сектор составляет 30° вместо 180° при полном заполнении uv-плоскости, для картографирования достаточно использовать 25 сканов между азимутами 30° и -30°, а при наблюдениях в интервале азимутов от 20° до -20° достаточно 18 сканов. Наблюдения через 2° по азимуту обеспечивают именно такое количество изображений. Следует помнить ещё об одном важном факторе, влияющем на качество синтезированных двумерных изображений — это точность вычитания уровня излучения спокойного Солнца. На рис. 6 приведён пример многоазимутального картографирования активной области на Солнце на 10 длинах волн сантиметрового диапазона.

3. НАБЛЮДЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Анализ временны́х вариаций излучения источников на масштабах от минут до часов — ещё не полностью освоенное на РАТАН-600 направление исследований.

На рис. 7 приведён пример наблюдений на ЮП на 61 азимуте. Представлены наложение одномерных распределений интенсивности I и круговой поляризации V, а также динамика максимума антенной температуры двух локальных источников на скане. Видно, что в ведущем пятне в период наблюдения произошёл всплеск, тогда как хвостовое пятно было относительно стабильным.

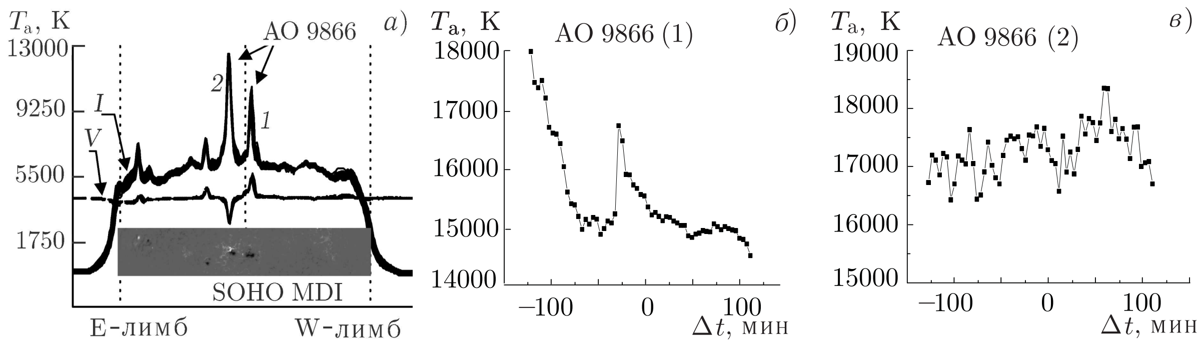

Рис. 7. (*а*) Наложение 61 азимутального скана и сопоставление с магнитными полями по данным SOHO MDI. Стандартное отклонение антенной температуры точки на спокойном Солнце составляет 1 %. Изменение антенной температуры по азимуту: (*б*) — ведущее пятно (источник *1* на рисунке слева), (*в*) — хвостовое пятно (источник *2*)

Благодаря многоазимутальным наблюдениям различные виды инверсии круговой поляризации, которые раньше периодически наблюдались в излучении активных областей, были зарегистрированы в их динамике, и отмечена их связь с предвспышечным состоянием мощных активных областей [18]. Дальнейшие исследования в этом направлении и сопоставление с данными других диапазонов могут развить представления о том, как начинается вспышка, и помочь выбрать наиболее реалистичный сценарий вспышки из множества теоретических разработок.

Метод также даёт уникальные возможности для исследования колебаний магнитных полей в хромосфере и короне. Высокая чувствительность и разрешение телескопа в сочетании со спектральным разрешением ПАС в диапазоне длин волн 1÷4 см позволяют регистрировать даже небольшие изменения магнитных полей на уровне хромосферы, переходной области и короны. Вейвлет-анализ многоазимутальных данных позволил обнаружить колебания радиояркости активных областей с разными периодами, из которых наиболее заметны 80 и 50 минут (рис. 8). Большой интерес также представляет исследование колебаний с периодом около 3 минут. Возможно, дальнейшее развитие режима наблюдений и уменьшение промежутка между моментами наблюдений до 2 минут позволит получить новые данные о природе этих колебаний.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация режима многоазимутальных наблюдений на ЮП позволила выполнить следующее.

1) Впервые на РАТАН-600 проведено несколько серий наблюдений Солнца в интервалах азимутов от 30° до −30° с временны́м разрешением до 4 минут (промежуток времени между сканами 1 минута) в течение 4÷4,5 часов.

2) Для обеспечения проведения многоазимутальных наблюдений внесены изменения в существующее программное обеспечение и создано новое программное обеспечение для обработки и анализа данных многоазимутальных наблюдений, которое включает:

— анализ вариаций излучения различных образований на Солнце,

— многоволновое картографирование.

На основе наблюдений в новом режиме получен ряд астрофизических результатов [18, 20]. Реализация данного режима наблюдений открывает также перспективы для других (не солнечных) направлений исследования переменных радиоисточников на РАТАН-600.

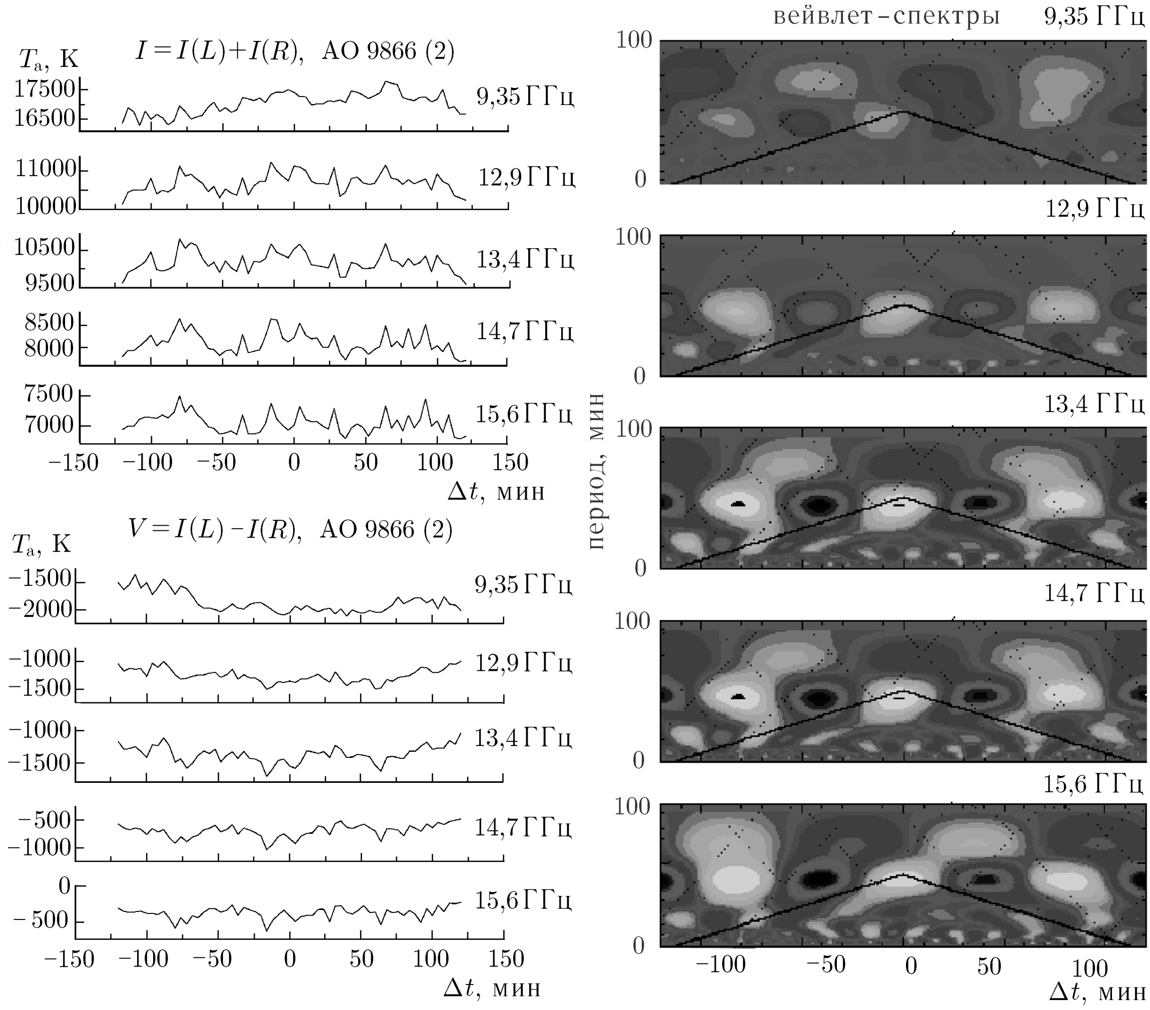

Рис. 8. Временные ряды параметров Стокса I и V локального источника в хвостовой части АО 9866 (слева) и вейвлет-спектры этого же источника на нескольких частотах из коротковолновой части диапазона ПАС [2] (справа). Сплошными линиями на спектрах нарисован косинус достоверности периодов. На спектрах в большинстве случаев виден период 80 минут, однако длина реализации недостаточна для однозначного утверждения о достоверной регистрации этих колебаний. Для вейвлет-анализа данных использовалась модификация программы [19]

Авторы выражают благодарность РФФИ (гранты № 02–02–16430, 03–02–06714, 02–07–90247) и ИНТАС (проекты № 00–0181 и 00–0543), финансовая поддержка которых была существенна при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. // Изв. ГАО. 1972. Т. 188. С. 3.
2. Богод В. М., Ватрушин С. М., Абрамов-Максимов В. Е., Цветков С. В., Дикий В. Н. Панорамный радиометрический анализатор спектра диапазона 3,5 ГГц–18 ГГц с цифровой обработкой информации: Препринт № 84 САО РАН. Нижний Архыз, 1993.
3. Парийский Ю. Н. РАТАН-600 и апертурный синтез: Препринт № 33Л САО АН СССР. Нижний Архыз, 1986.

4. Гельфрейх Г. Б., Опейкина Л. В. Моделирование работы РАТАН-600 в режиме радиогелиографа: Препринт № 96 САО РАН. Нижний Архыз, 1992.
5. Богод В. М., Минченко Б. И., Петров З. Е., Зверев Ю. К. и др. Результаты совместных наблюдений Солнца на радиотелескопах РАТАН-600 (южный сектор с перископом в 5 азимутах) и VLA (США) в июле 1982 года: Отчёт САО. 1983.
6. Шиврис О. Н. // Изв. САО. 1980. Т. 12. С. 134.
7. Минченко Б. С. // Изв. САО. 1986. Т. 21. С. 91.
8. Nindos A., Alissandrakis C. E., Gelfreikh G. B., et al. // Solar Physics. 1996. V. 165. P. 41.
9. Жеканис Г. В. // Тезисы конференции «Радиотелескопы РТ-2002. Антенны, аппаратура, методы», 9–11 октября 2002. С. 45.
10. Khaikin V. B., Majorova E. K., Efimov I. G., et al. // Proceedings of the VIII Russian-Finnish Symposium on Radioastronomy. 1999. P. 125.
11. http://www.sao.ru/hq/sun/obs_table.html.
12. http://www.sao.ru/hq/sun.
13. Гараимов В. И. Обработка массивов одномерных векторов данных в ОС Windows. Программа Work Scan — версия 2.3: Препринт № 127Т САО РАН. Нижний Архыз, 1997.
14. Тохчукова С. Х. Реализация метода многоазимутальных наблюдений Солнца на РАТАН-600: Препринт № 174 САО РАН. Нижний Архыз, 2002.
15. Golubchina O. A., Zhekanis G. V., Bogod V. M., et al. // Solar Researches in the South-Eastern European Countries: Present and Perspectives, 24–28 April 2001, Bucharest, Romania. Editura Academiei Romane, 2002. P. 18.
16. Агафонов М. И., Подвойская О. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 6. С. 742.
17. Минченко Б. С. Синтез двумерных изображений с помощью радиотелескопа РАТАН-600: Дисс. . . . канд. физ.-мат. наук. 1979.
18. Богод В. М., Тохчукова С. Х. // Письма в Астрон. журн. 2003. Т. 29, № 4. С. 263.
19. Sych R. A., Yan Y.-H. // Chinese J. of Astronomy and Astrophysics. 2002. V. 2. P. 183.
20. Tokhchukova S., Bogod V. // Solar Physics. 2003. V. 212, No. 1. P. 99.

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз, Россия;
[2] Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 6 июня 2003 г.

MULTI-AZIMUTH REGIME OF OBSERVATIONS AT THE RATAN-600 SOUTHERN SECTOR WITH PERISCOPE REFLECTOR

V. M. Bogod, G. N. Zhekanis, M. G. Mingaliev, and S. Kh. Tokhchukova

This paper is aimed at the development of capabilities of the RATAN-600 radiotelescope by putting the regime of multi-azimuth observations at the southern sector with periscope reflector into regular operation. This method makes it possible to study the dynamics of variable radio sources at time scales down to a few minutes and increase by one order of magnitude the number of variable sources observed during sky surveys. At present, over ten series of observations of the Sun are performed in the new regime, and new astrophysical results are obtained. The software for multi-wavelength mapping of the Sun and wavelet analysis of time series is developed. The following characteristics of the regime are achieved: a temporal resolution of 4 min during a time interval of up to 4.5 h for observations at azimuth angles in the interval from 30° to −30°.