

Реализация метода многоазимутальных наблюдений Солнца на РАТАН-600

С. Х. Тохчукова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия

Аннотация. Автоматизация южного сектора РАТАН-600 и перископического отражателя позволила увеличить эффективность солнечных исследований на радиотелескопе и развить метод многоазимутальных наблюдений. В сочетании с многоволновым солнечным приемным комплексом этот метод дает возможность изучать динамические характеристики солнечных структур в широком диапазоне радиоволн и проводить двумерное картографирование Солнца одновременно на многих длинах волн. В настоящее время достигнуто временное разрешение 4 минуты в течение 4 часов при наблюдениях в интервале азимутальных углов от $+30^\circ$ до -30° . В данной работе представлены программно-методические разработки для реализации режима многоазимутальных наблюдений.

Implementation of the method of multiazimuth observations of the Sun at RATAN-600

S. Kh. Tokhchukova

Special Astrophysical Observatory RAS

Abstract. Automation of the South sector and the Periscopic reflector of RATAN-600 increased the efficiency of solar investigations with the radiotelescope and made it possible to develop a method of multiazimuth observations. In combination with the multiwave solar receiver complex, this method provides a possibility to study dynamic characteristics of solar structures in a wide range of radiowaves and to carry out two-dimensional mapping of the Sun simultaneously at many wavelengths. The time resolution of 4 minutes within 4 hours of observations is now achieved, in azimuthal range from $+30^\circ$ up to -30° . The methods and programmes developed for the implementation of the multiazimuth observations mode are presented in this paper.

1 Введение

При исследовании Солнца радиоастрономическими методами перед исследователями стоит задача получения изображения с хорошим пространственным, временным и спектральным разрешением в широком диапазоне, с высокой чувствительностью по потоку излучения и степени поляризации. Существующие на сегодняшний день крупные радиотелескопы (VLA, СССР, WSRT, OVRO, Nobeyama, РАТАН-600) позволяют исследовать структуру солнечных образований с пространственным разрешением до $3 - 15''$. Каждый из этих инструментов имеет свои ограничения, определяющие его круг задач. РАТАН-600 (Парийский и др., 1972) является рефлекторной антенной с переменным профилем отражающей поверхности, с большой эффективной площадью ($400-600 \text{ м}^2$ в одном секторе) и рабочим диапазоном от 50 см до 8 мм, что является преимуществом по сравнению с интерферометрическими системами. В сочетании с Панорамным Анализатором Спектра (ПАС) (Богод и др., 1993) радиотелескоп является уникальным инструментом для солнечных исследований, позволяющим вести параллельный прием в широком диапазоне волн с 5%-ным спектральным разрешением, с высокой чувствительностью по потоку (несколько миллианских) и высокой точностью измерения степени поляризации (доли процента). В то же время главными недостатками РАТАН-600, как инструмента для исследований Солнца, являются относительно низкое временное разрешение и одномерность получаемых изображений. До настоящего времени РАТАН-600 использовался, в основном, для получения одномерных 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 (Парийский и др., 1972), параллельный околоразенитный синтез (Парийский, 1986), режим радиогелиографа (Гельфрейх и др., 1992) и др. Здесь мы рассматриваем более детально режим многоазимутальных наблюдений на ЮП.

Наблюдения Солнца проводятся на ЮП с 1976 г. в режиме пассажного инструмента регулярно один раз в день, в местный полдень (около 9:13 UT, или точнее, с учетом уравнивания времени, от 8:57 до 9:27 UT). В июле 1982 г. была проведена первая пробная серия наблюдений в азимутах $\pm 8^\circ$ от меридиана (Богод и др., 1982). При этом были уточнены формулы, ранее полученные Шиврисом (1980) для расчета высоты установки плоского отражателя и момента прохождения источника через диаграмму радиотелескопа, с учетом рефракции и изменения координат источника в период наблюдений. Был предложен интерактивный алгоритм для расчета параметров установки антенны, который используется и в настоящее время. На основе наблюдений, проведенных 19 июля 1982, были построены первые двумерные изображения активной области на Солнце на волне 2 см (Минченко, 1986). 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, ресурсами их оперативной памяти. Синтезируемый сектор позиционных углов составил $\pm 12^\circ$. Качество полученных карт было невысоким, что затрудняло использование их для астрофизических исследований. Программы были написаны на языке Фортран и время вычислений на ЭВМ ЕС для построения одной карты составляло ~ 20 минут.

Позднее Ниндос и др. (1995) использовали для азимутального картографирования Солнца на РАТАН-600 методику синтеза изображений в пространстве сигналов. Для коррекции изображения была использована, как и в первом случае, стандартная процедура чистки CLEAN (алгоритм Хегбома). Исходным материалом послужили наблюдения в 11 азимутах (от 20° до -20°), выполненные в августе 1985 года. Были построены карты активной области на 4 длинах волн (2.7, 3.2, 4.0, 8.2 см). Программы были написаны на языке Фортран в операционной

системе DOS. Количество отсчетов на входных сканах было ограничено 128-ью, с целью сокращения объема используемой оперативной памяти компьютера и времени вычислений.

В последние годы появились новые возможности для проведения частых и качественных многоазимутальных наблюдений на ЮП благодаря автоматизации плоского отражателя (Жеканис, 2001 г.) и частичной автоматизации 3-го облучателя (Хайкин и др., 1999 г.), на котором был установлен высокоточный привод Movitrac 31C фирмы SEWEURODRIVE, управляемый от компьютера или пульта. Установленный на облучателе солнечный многоволновый комплекс с единым фазовым центром в широком диапазоне радиоволн дает возможность строить одновременные карты на 30 длинах волн в диапазоне от 2 до 15 см.

Кроме того, возросшие возможности вычислительной техники уже не накладывают ограничения на объем 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 объем информации (до 61 (азимут) \times 36 (длин волн) = 2196 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 задачи по исследованию быстропеременных процессов в солнечной атмосфере.

Начиная с 1999 г. было проведено несколько серий наблюдений во всем 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 на веб-странице Группы Солнечных Исследований (ГСИ), http://www.sao.ru/sun/obs_table.html.

В марте 2002 г. впервые были проведены наблюдения с интервалом между двумя последовательными кульминациями 4 минуты, и интервалом между установками, равным одной минуте. Такая частота регистрации излучения Солнца является практически предельной для наблюдения всего диска в режиме прохождения, с неподвижным облучателем и кареткой, поскольку время прохождения Солнца через ДНА составляет около 2.5 мин, 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 временное 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). Экспериментальные наблюдения в других режимах, например, слежение в режиме Радио-Шмидт, без переустановок кругового отражателя (Хайкин и др., 1999), показали, что эти режимы менее перспективны для РАТАН, так как при этом ухудшаются основные его качества, такие как сочетание высокой чувствительности по плотности потока, пространственной разрешающей способности и координатной точности.

Для обеспечения многоазимутальных наблюдений и обработки данных были внесены необходимые изменения в существующее программное обеспечение (ПО). Кроме того, было разработано новое ПО для решения следующих задач:

- реализация многоволнового азимутального синтеза радиоизображений;
- обеспечение расчета диаграмм направленности для каждой волны;
- обеспечение корректной обработки многоволновых и многоазимутальных данных для изучения динамики солнечных структур;

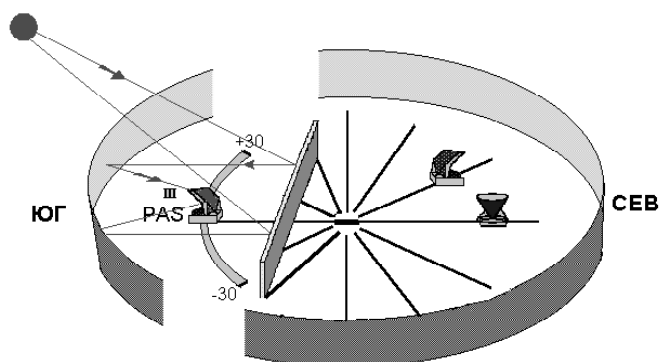


Рис. 1: Схема работы РАТАН-600 в режиме южный сектор с плоским отражателем.

- реализация возможностей тестовых антенных измерений;
- обеспечение эффективного сопоставления данных РАТАНа с данными других инструментов и спутников с применением языка IDL, который принят в качестве стандарта в международных солнечных наблюдениях;
- другие служебные функции.

В данной работе описывается ПО, разработанное для этих целей в среде программирования IDL ¹ и на языке C++.

2 Методические особенности многоазимутальных наблюдений Солнца в антенной системе южный сектор с перископомическим отражателем.

Южный сектор кругового отражателя РАТАН-600 образует перископическую систему вместе с плоским зеркалом, состоящим из 124 плоских отражающих элементов размером 3.1×8.5 м, которые могут наклоняться от вертикали до 70° . Протяженность 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.

¹ IDL (Interactive Data Language, коммерческий продукт, <http://www.rsinc.com/>) является развитой средой для математической обработки данных и их графического представления. Система мультиплатформна, то есть работает как под UNIX/VMS, так и под Windows/Macintosh. Для IDL разработана астрономическая библиотека (The IDL Astronomy User's Library, Landsman, W. B. Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, ASP Conference Series, Vol. 77, 1995, R.A. Shaw, H.E. Payne, and J.J.E. Hayes, eds., p. 437., <http://idlastro.gsfc.nasa.gov/homepage.html> – поддерживается NASA), которая включает процедуры чтения/записи в формате FITS ((Wells et al., 1981)) и специализированная для обработки солнечных данных система SolarSoftWare (SSW), которая прежде всего была предназначена для унификации обработки данных SOHO и YОНКОН (Data Analysis with the SolarSoft System, Freeland, S. L.; Handy, B. N. Solar Physics, v. 182, Issue 2, p. 497-500 (1998)). По сравнению с другими, специализированными для астрономии, системами для обработки данных, такими как AIPS (Astronomical Image Processing System – специализирована для обработки интерферометрических данных, н-р VLA и VLBA) и IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) IDL более широко используется для обработки солнечных данных. В частности, это основная система для обработки данных Nobeyama и ССРТ (IDL Library Developed in the Institute of Solar-Terrestrial Physics (Irkutsk, Russia), Konovalov, S. K.; Altyntsev, A. T.; Grechnev, V. V.; Lisyian, E. G.; Rudenko, G. V.; Magun, A. Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, A.S.P. Conference Series, Vol. 125, 1997, Gareth Hunt and H. E. Payne, eds., p. 447), что и определило выбор данной системы программирования для картографирования Солнца на РАТАН-600.

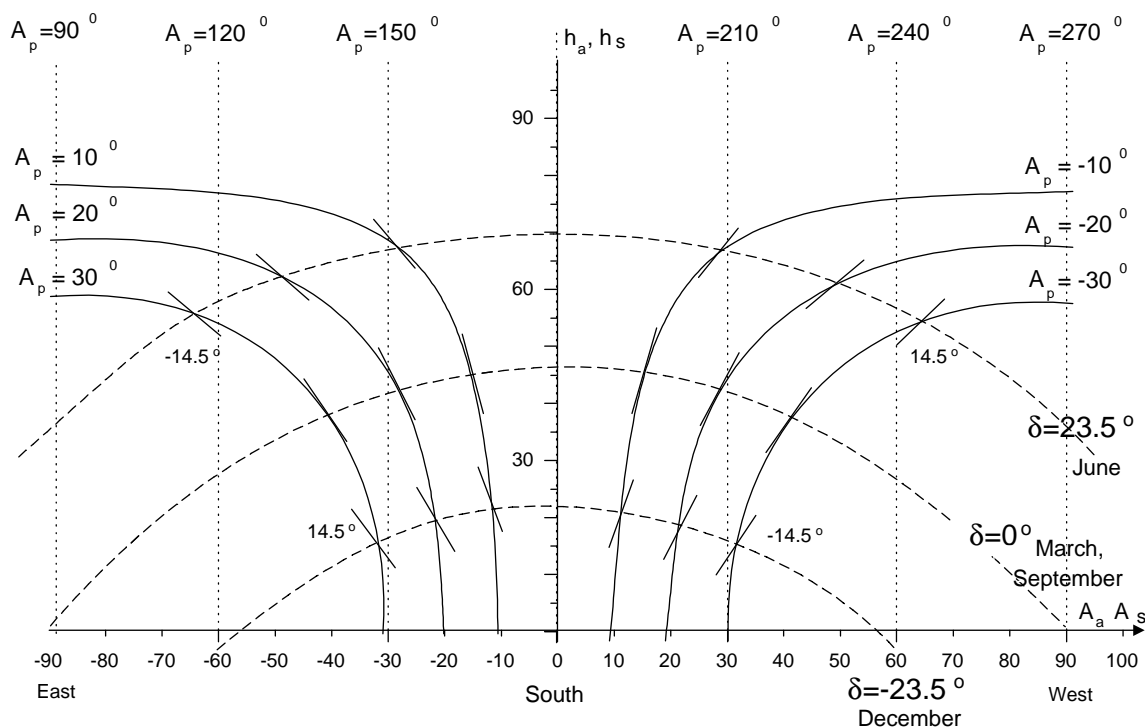


Рис. 2: Траектории источника (пунктирные полукруги) и центра луча ДНА (сплошные линии) при различных значениях склонения источника. Показано, что при $\delta = 0^\circ$ ориентация луча ДНА относительно источника не меняется. При значениях склонения $\delta \simeq \pm 23^\circ$ значения позиционных углов меняются в пределах $\pm 14.5^\circ$, при наблюдениях в диапазоне азимутов $\pm 30^\circ$.

Кабина со вторичным зеркалом (облучатель) может двигаться по этим рельсовым путям, обеспечивая наблюдения в пределах азимутов $\pm 30^\circ$ от юга (рис. ??). В системе ЮП в азимутах сохраняется ножевая диаграмма при больших углах места (в режимах наблюдения без плоского отражателя вертикальный размер диаграммы быстро уменьшается при увеличении высоты источника).

Рис. ?? иллюстрирует особенности солнечных наблюдений в системе ЮП, связанные с изменением ориентации ножевой диаграммы относительно траектории Солнца (Шиврис, 1980). Из рисунка 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 значения позиционных углов достигают максимальных значений, что благоприятствует построению двумерных карт стабильных областей на Солнце.

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

Для взаимной привязки сканов в азимутах следует учитывать изменения параметров антенны (эффективной площади и размера ДНА) в азимутах. 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 (Шиврис, 1980). На рис. ?? приведен график этой зависимости.

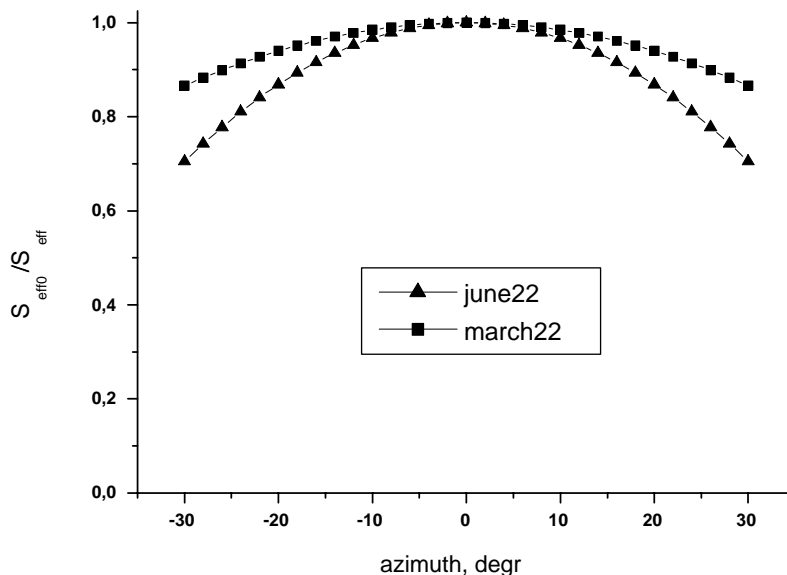


Рис. 3: Относительное (по сравнению с меридианом) падение эффективной площади в азимутах. В период равноденствия (22 марта) в крайних азимутах уменьшение площади составляет около 15%, а в период солнцестояния — 30%.

В периоды равноденствия, когда угол наклона плоского отражателя от вертикали практически не меняется, эффективная площадь уменьшается пропорционально косинусу азимута облучателя и в крайних азимутах падает на 15%. В периоды солнцестояния это падение увеличивается до двух раз. Сказанное особенно справедливо для длинных волн. На коротких волнах косинус высоты плоского отражателя не участвует в уменьшении эффективной площади, поскольку вертикальный размер принимающей поверхности ограничивается вертикальным размером зеркала облучателя (5,5 м). Для солнечных склонений высота облучателя заведомо меньше высоты плоского отражателя (7,4 м), умноженного на косинус высоты. Это приводит к тому, что на коротких волнах работает верхняя кривая, независимо от периода наблюдений (то есть и в равноденствие, и в солнцестояние). Калибровка по полному потоку позволяет осуществлять взаимную привязку азимутов, но на практике наблюдаются некоторые расхождения с расчетными параметрами (рис. ??). Наибольшие расхождения имеются в крайних восточных азимутах, от -30° до -26° . Здесь падение антенной температуры по сравнению с меридианом составляет до 30% в равноденствие, вместо ожидаемых 15%. В остальных азимутах расхождение составляет не более 5%.

Причины этой и других ошибок бывает трудно выявить из-за сложности используемой трехзеркальной антенной системы. Некоторые ошибки (например, в расчетах времени кульминации и метках для установки облучателя в азимут) были выявлены при наблюдениях и минимизированы, а другие (например, вынос ДНА по высоте) рекомендуется 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 в данный азимут. Точность установ-

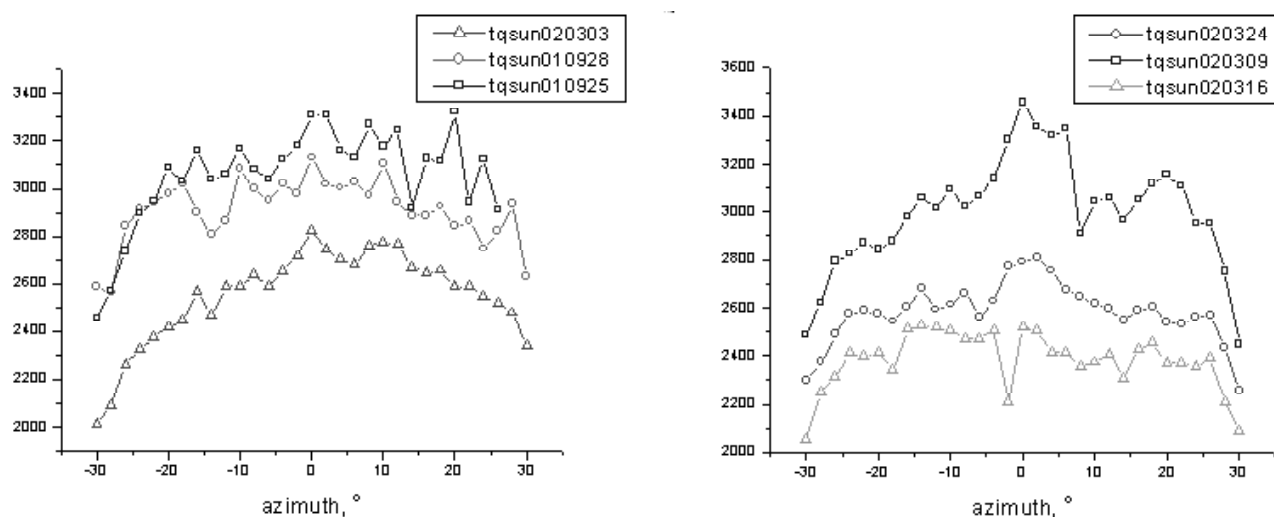


Рис. 4: Изменение антенной температуры спокойного Солнца в азимутах на волне 3.21 см: слева) при установках с сокращенной апертурой (109 щитов); справа) при установках с полной апертурой (166 щитов).

ки кругового отражателя определяется, прежде всего, точным определением мест нулей отражающих элементов и точностью юстировки отражающей поверхности. К такого рода ошибкам особенно чувствительны короткие волны. В период наблюдений геодезическая юстировка была проведена только для 125-ти отражательных элементов из 166, которые участвуют в центральной установке. В наблюдениях в азимутах участвовало всего 225 щитов южного сектора. Не участвовали в наблюдениях 92 элемента соседних секторов, прилегающих к южному, которые входят в расчетную установку. Из них 30 элементов планируется ввести в действие к будущим сериям многоазимутальных наблюдений, что увеличит число щитов в крайних азимутах на 13%, сдвинув границу азимутов с полной апертурой с 12° до 18° (см. рис. ??).

Выпадение из установки крайних щитов, кроме уширения диаграммы, также приводит к уменьшению эффективной площади антенны. Для протяженного источника, которым является спокойное Солнце, это влияние малозаметно. Для точечных источников уменьшение сигнала может быть значительным (пропорционально квадрату количества невыставленных щитов). Однако из-за косинусоидального распределения мощности в раскрыве вторичного зеркала (облучателя), и такого же распределения в раскрыве совмещенного облучателя в фокусе вторичного зеркала, эффективно облучаемое количество щитов меньше, и влияние неустановки крайних щитов относительно мало.

Ошибки установки плоского отражателя сказываются на качестве наблюдений минимальным образом. Обнаруженный (лабораторией антенных юстировок) разворот всего плоского отражателя по азимуту, приводивший к образованию бокового лепестка диаграммы, уменьшен до приемлемых значений.

Ошибки установки облучателя в данный азимут наиболее явно видны в данных наблюдений, поэтому их легко выделить и контролировать. Перестановки облучателя в настоящее время осуществляются управлением от пульта при участии операторов. Пробные наблюдения в режиме автоматического управления от компьютера показали, что расстояние, проходимое облучателем по рельсам, соответствует ожидаемому угловому перемещению с точностью около 0.01%, что дает ошибку до 1.5 см при перемещении между установками. Для исключения систематических ошибок была составлена карта мест реперов на дуговых рельсовых путях, которая представляет собой таблицу расстояний между азимутами в инкрементах привода.

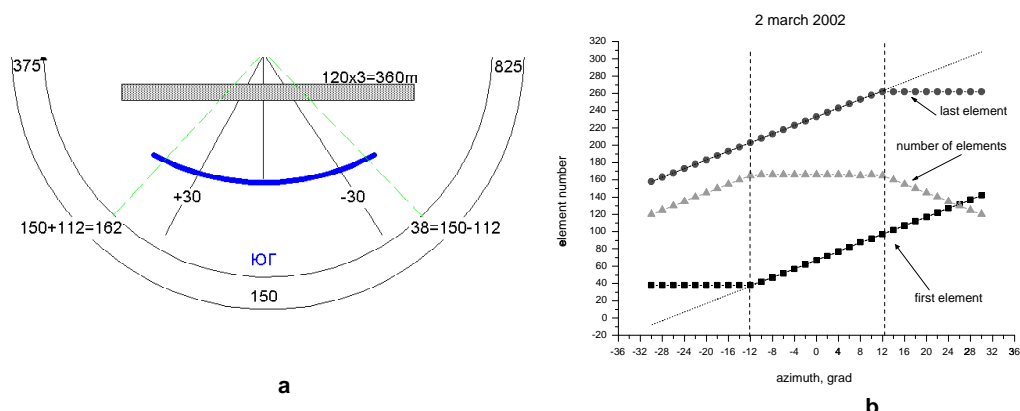


Рис. 5: а): схема расположения элементов южного сектора. б): номера и количество отражательных элементов кругового зеркала, участвующих в азимутальных установках. Здесь показаны номера первого и последнего щитов, участвующих в реальных азимутальных установках (верхняя и нижняя линии), и общее количество щитов в каждой установке (средняя линия). В крайних азимутах (начиная с $\pm 14^\circ$) остаются неустановленными от 5 до 45 элементов западного сектора и столько же восточного (показано пунктирными линиями), что составляет 28% от общего количества щитов, которые должны участвовать в каждой установке.

Эта таблица используется программой управления приводом, которая была написана для реализации 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 от компьютера, и местами реперов, приведена на веб-странице ГСИ <http://www.sao.ru/sun>, в Справочнике по наблюдениям Солнца на РАТАН-600, далее см. Инструкцию для наблюдателя на облучателе ЭЗ).

Другой источник ошибок заключается в температурных изменениях положений реперов, которые могут доходить до значений больше 1 см. Более стабильные выносные репера пока установлены только через каждые 4° . Планируется их установка через каждые 2° , что должно улучшить точность установки облучателя. Дальше следуют ошибки горизонтирования вторичного зеркала. При наблюдениях с интервалом между азимутальными наблюдениями 1 мин не хватает времени для горизонтирования с участием операторов. Для таких наблюдений необходимо применять автоматическое горизонтирование (такая система реализована на 1-ом облучателе).

Таким образом, совокупность ошибок установки облучателя в азимут, расчета времени кульминации, наведения кругового и плоского отражателя по азимуту могут приводить к абберациям, а также к тому, что расчетное время кульминации может не совпадать с моментом прохождения центра Солнца на скане. На рис. ?? приведены результаты измерения совокупной ошибки наведения по азимуту, по смещению максимума локального источника от положения в меридиане после коррекции положения реперов.

Если предположить, что ошибка обусловлена точностью установки облучателя в азимут, то среднеквадратичное отклонение составляет, в переводе на расстояние по рельсам, около 3 мм. Ошибки такой величины не приводят к заметным абберациям. Для восстановления центра источника в программе WorkScan (Гараимов, 1997) обычно используется процедура

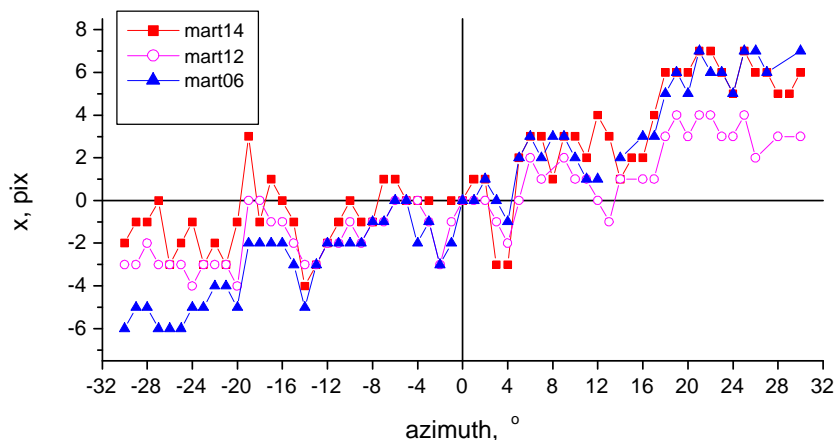


Рис. 6: График смещения максимума локального источника на Солнце относительно положения в меридиане. По вертикальной оси отложено количество отсчетов. 1 отсчет равен примерно 5 секундам дуги на небе. На графике приведены данные за три дня — 6, 12 и 14 марта 2002 г. Наклон кривых обусловлен смещением источников за счет вращения Солнца. Величина отклонений от наклонной прямой определяется действием ошибок установки облучателя в фокус и ошибок фокусировки и наведения антенны.

выравнивания по краям скана. Если на краях Солнца есть источники, этот метод работает неточно. В разработанном нами ПО в этом случае используется выравнивание по максимуму сигнала от стабильного локального источника на Солнце (утилита `az_centr.pro`).

Что касается ошибок наведения антенны по высоте, эти ошибки меньше влияют на качество наблюдений, поскольку размер ДНА в большей части рабочего диапазона длин волн больше размера Солнца. Но величину этих ошибок также следует измерять и учитывать ее при вычислении потоков от локальных источников на коротких волнах. Использование методики, описанной в разделе 7, показало, что существует систематический вынос ДНА по высоте около $-(4-6)$ минут дуги на всех волнах и всех азимутах. К такого рода ошибкам может приводить, например, недостаточно точный счет эфемерид (например, из-за неточного учета рефракции), или неточное определение мест нулей отражательных элементов. Для выяснения причины выноса ДНА необходимо провести наблюдения калибровочных источников в азимутах. Для более точных вычислений потоков от ЛИ (особенно в азимутах) на коротких волнах (меньше 4 см) необходимо учитывать, что за время прохождения диска Солнца через ДНА (2.5 мин) высота Солнца изменяется. В утренних азимутах она увеличивается, а в послеобеденных 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 NW-SE утром и SW-NE после полудня. Позиционный угол $q = -\arcsin(\tan A \tan \delta)$ летом увеличивает этот наклон, а зимой уменьшает на величину до $h1 = r \cdot \sin(q) = 16 \cdot \sin 14.5 = 4$ угловые минуты.

Для наблюдений с высоким временным разрешением число отражательных элементов было уменьшено с 166 до 109, что уменьшило влияние диаграммных ошибок и уменьшило время наведения антенны. Измерения размеров точечного источника на Солнце показали, что размеры ДНА сохраняются в большом интервале азимутальных углов и лишь в крайних азимутах (от -26° до -30°) она заметно уширяется по сравнению с меридианом. Для задач картографирования рекомендуется эти азимуты пока не использовать, до улучшения качества этих

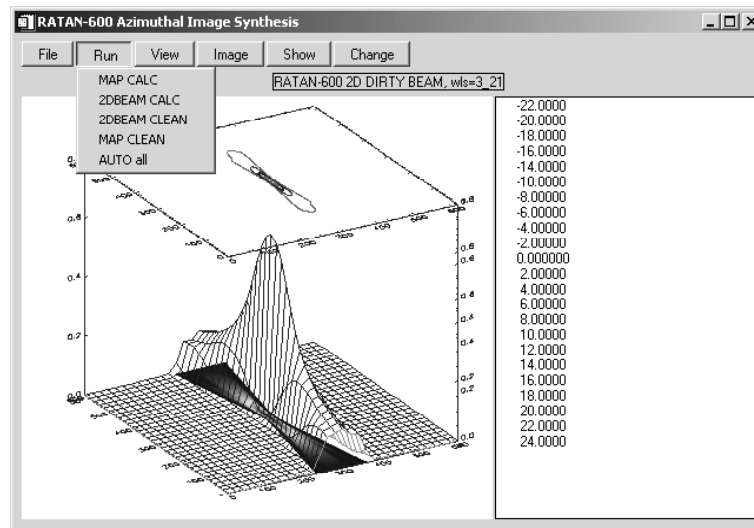


Рис. 7: Общий вид главного окна программы RAIS. В окне для рисования (слева) отображена синтезированная ДНА на волне 3.21 см. В окне для вывода текстовой информации (справа) выведен список используемых азимутальных углов.

наблюдений с помощью юстировок и включения в наблюдение элементов смежных секторов.

3 Описание программы RAIS (RATAN-600 Azimuthal Image Synthesis)

3.1 Основные концепции

В настоящей работе создан новый пакет программ для азимутального картографирования, который мы старались освободить от ряда принципиальных ограничений, имевшихся в предыдущих версиях, и сделать максимально удобным для пользователя. Автор придерживался следующих основных концепций, которые отличают данное ПО:

- автоматизация всех этапов вычислений, включая наличие пакетного режима работы;
- удобство для пользователя (наличие дружественного графического интерфейса);
- универсальность (отсутствие ограничений, например, на тип объекта, поддержка общепринятых форматов и т.п.);
- открытость для развития программы (возможность добавления новых процедур без значительных изменений в основной программе);
- возможность экспериментирования и проведения модельных вычислений.

Ниже перечисляются свойства программного пакета, за счет которых реализованы указанные выше концепции.

- Интеграция пакета со стандартной программой обработки WorkScan для солнечных данных РАТАН-600. Предварительная обработка данных, включая калибровку, вычитание спокойного Солнца, сглаживание и другие стандартные процедуры, проводятся в программе WorkScan.

- Программа имеет удобный графический интерфейс (GUI — graphical user interface) и организована в форме IDL widget (рис 1).
- Использование FITS-формата для записи входных и выходных файлов. Для входных файлов обязательны некоторые поля (см. ниже), создаваемые программой WorkScan.
- Возможность картографирования не только Солнца, но и других объектов (например, Луны, Крабовидной туманности), для которых есть набор сканов под разными позиционными углами.
- Отсутствие ограничений на количество точек, на количество сканов или длин волн. Пользователь выбирает только каталог с данными и длину волны. Остальные параметры и эфемериды считываются из FITS-заголовка файла данных или вычисляются автоматически.
- Диаграмма направленности вводится в любом масштабе по оси x . Программа автоматически приводит ее к масштабу скана. Нет необходимости специально вычислять диаграмму с тем же шагом, что и сканы. В отдельном каталоге находится банк данных по диаграммам на всех длинах волн, на которых производится регистрация.
- Возможность построения карт не только из сканов, полученных на ЮП, но и по данным, полученным в других режимах наблюдений, например, в режиме эстафеты с зонированием (Голубчина, 1986) на северном (а также западном и восточном) секторе (далее СЕВ). Последняя методика осуществлена на РАТАНе впервые (Голубчина и др., 2002).
- Автоматическое сохранение в FITS-формате ряда промежуточных результатов (например, “грязная карта”, “грязная” диаграмма), что дает возможность остановить вычисления на любом этапе, а затем продолжить в другое время.
- Возможность записи в графическом формате (GIF, PS) полученных на экране изображений.
- Поскольку качество получаемых карт зависит от правильного подбора параметров чистки и соответствия расчетных диаграмм реальным, в программе можно экспериментировать, подбирая параметры (меню Change).
- Возможность работы в пакетном режиме, без визуализации выполняемых процессов, с построением карт на всех волнах, для которых в указанном каталоге существуют заголовочные файлы с именами типа 9_35GHz.0hd (например, подкаталоги OBS во вторичном архиве ²).

3.2 Методика использования программы RAIS

Синтез двумерного распределения яркости по одномерным профилям, полученным при сканировании объекта ножевыми лучами, математически осуществляется довольно просто. В основе процедуры построения синтезированного изображения лежит алгоритм суммирования соответствующих значений одномерных профилей (Агафонов и др., 1989):

² Независимо от первичного архива данных РАТАН-600 (Кононов и др., 2001) в ГСИ поддерживается вторичный архив обработанных данных TREATMENT. В этом архиве хранятся данные двух уровней обработки: 1) данные, преобразованные из исходного формата в формат FITS, с коррекцией за переключения усиления, хранятся в каталогах YYYY/YMMM/MMDD, и 2) те же данные, обработанные пакетным файлом prim.pkf и процедурой az-ghz.pro с разбивкой данных по частотам, — в подкаталогах OUT.

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

Полученная “грязная” карта (ГК) $g(x, y)$ эквивалентна свертке исходного объекта $f(x, y)$ с синтезированной диаграммой h :

$$g(x_0, y_0) = \int \int h(x - x_0, y - y_0) f(x, y) dx dy + n(x_0, y_0), \quad (2)$$

где $n(x_0, y_0)$ — случайный шум.

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

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

- 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).

Для начала работы нужно открыть HD-файл с многоазимутальными данными на одной частоте (Меню File->Open Ghz file...).

Для построения карт на всех волнах в пакетном режиме надо открыть каталог со сканами (Меню File->Open Ghzs dir +autorun).

Если загружены данные на одной волне, можно запустить автоматическое выполнение всех 4 процедур командой меню Run-> Auto-all. Если какие-то процедуры уже выполнены и имеются сохраненные на диске FITS-файлы (например, с ГК), можно запускать следующие процедуры. Так, если проведена чистка с одним значением усиления и результат не устраивает, нужно поменять усиление и запустить MAP CLEAN заново. Или поэкспериментировать, меняя размер ДНА и уровень, на котором в него вписывается двумерная гауссиана.

Команды меню VIEW позволяют показать результаты вычислений — одномерные и двумерные диаграммы и карты, с помощью разных способов отображения — в виде контурных, цветных, черно-белых карт, наложения контурных карт на цветные изображения и т.д.

Можно также просмотреть точки, в которых диаграмма вычиталась из “грязной” карты, и остатки от вычитания (residuals). Пользователь может выбрать “чистую” карту с добавленными остатками или без них.

Команды меню SHOW показывают различные параметры сканов — набор позиционных углов, азимутов, времен, склонений и т.п.

Команды меню CHANGE предназначены для изменения параметров чистки, размеров диаграмм и т.д.

Все выполняемые программой процессы отображаются в графическом окне: добавление каждого сечения в ГК, вписывание двумерной гауссианы в ядро ГД, вычитание ГД из максимумов, места этих максимумов и др. (рис. ??).

На рис. ??а показаны одномерные сканы полного диска Солнца на волне 2.24 см для 19 декабря 2001 г. На следующем рис. ??б в большем масштабе по горизонтали представлена активная область в восточном полушарии, сканированная под разными позиционными углами. Видно, что источник, сигнал которого в первом азимуте состоит из одного пика и протяженного фона, к последнему азимуту постепенно разрешается на три источника примерно

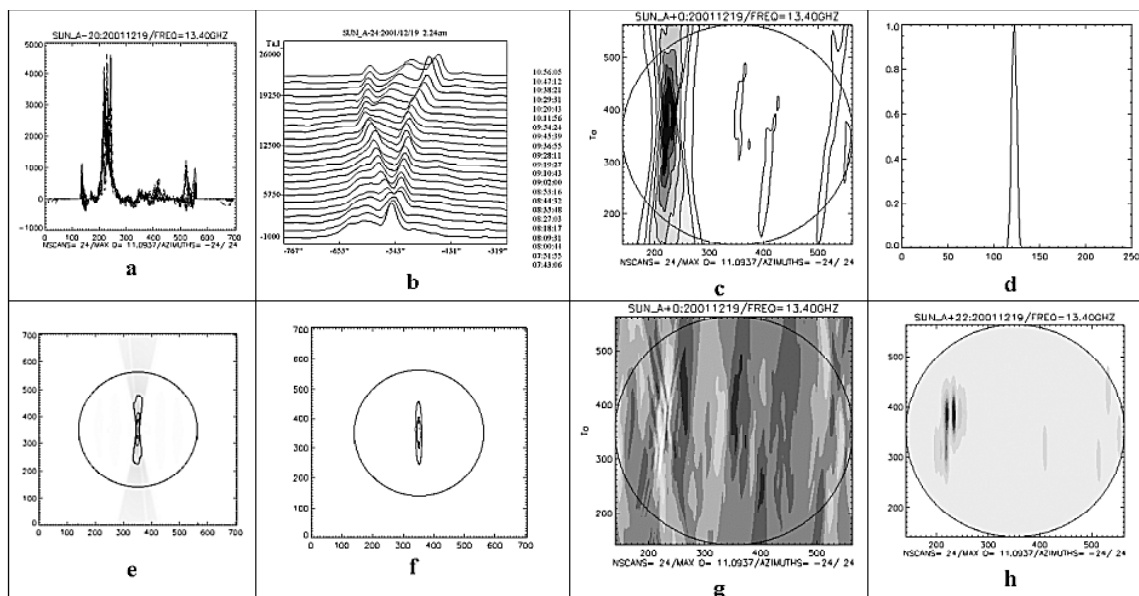


Рис. 8: Визуализация этапов картографирования: a,b) одномерные сканы всего диска и отдельной активной области; c) “грязная” 2D-карта; d) одномерная ДНА для ЮП; e) синтезированная 2D ДНА; f) чистая 2D ДНА; g) остатки от вычитания источников из “грязной” карты (residuals). Стандартное отклонение составляет 1.5 % от максимума исходной карты. h) чистая 2D-карта Солнца.

одинаковой яркости. Полученная ГК представлена на рис. ??c. Из-за того, что синтезированная диаграмма имеет боковые лепестки (см. рис. ??d), источники также получают с подобными лепестками, т.е. “грязные”. Алгоритм чистки лепестков процедурой CLEAN состоит в том, что программа находит места максимумов, вычитает из них “грязную” диаграмму и добавляет (с заданным усилением) “чистую” диаграмму. “Грязная” двумерная диаграмма (ГД) вычисляется таким же способом, что и “грязная” карта, но вместо сканов суммируется одномерная диаграмма, поворачиваемая под теми же углами. “Чистая” двумерная диаграмма (ЧД) получается путем вписывания двумерной гауссианы в ядро “грязной” диаграммы (рис. ??f). На волне 3.21 см размер синтезированной диаграммы составляет $20'' \times 155''$. Вертикальный размер ЧД будет тем меньше, чем больше сектор позиционных углов. Для ЮП этот сектор ограничивается геометрией системы, поскольку при угле раскрытия рельсовых путей от $+30$ до -30° максимальный сектор позиционных углов составляет около $\pm 14.5^\circ$. Таким образом, вместо ножевой диаграммы мы получаем ограниченный размер по двум координатам, но при этом источники вытянуты по вертикали. Что касается углового разрешения между сканами, для точного восстановления двумерного распределения радиояркости Солнца необходимо иметь 150 сечений через равные угловые промежутки (Минченко, 1979). Поскольку в нашем случае сектор составляет 30° , вместо 180° при полном заполнении uv-плоскости, для картографирования достаточно использовать 25 сканов между азимутами $+30^\circ$ и -30° , а при наблюдениях в азимутах от $+20^\circ$ до -20° достаточно 18 сканов. Наблюдения через 2° по азимуту обеспечивают именно такое количество сканов.

При наблюдениях на СЕВ в режиме эстафеты сектор возможных позиционных углов больше, чем на ЮП, но горизонтальный размер диаграммы также больше, из-за меньшего раскрытия апертуры (в наблюдениях участвует около 55 щитов, что в три раза меньше, чем в

обычных установках на ЮП). При этом синтезированные источники на СЕВ получаются более симметричными.

Подбор параметров чистки — усиления и уровня шума — зависит от структуры объекта, и осуществляется пользователем субъективно, на основе априорной информации. Большие значения усиления сокращают счетное время, но приводят к искажению изображения — дроблению на отдельные сильные компоненты. При слишком малых значениях усиления количество итераций увеличивается, но при этом происходит накопление арифметических ошибок. В общем случае можно рекомендовать на более коротких волнах использовать меньшие значения усиления (0.3–0.5), а на более длинных волнах — большие значения (0.5–0.7). Правильный выбор параметров чистки важен, но количество итераций в нашем случае всегда остается в пределах 100, тогда как для систем с высоким двумерным разрешением (VLA, Nobeyama) количество итераций превышает 1000. Поэтому улучшение качества карт зависит в большей степени от качества исходных сканов и их правильной взаимной привязки. Применение процедуры восстановления центра Солнца на записи по компактному источнику (а не по производной на краях) одновременно осуществляет коррекцию положения источников за счет вращения Солнца. В этом случае, чтобы отключить повторный сдвиг сканов на расчетные значения смещения, надо установить значение `Change-> rotation correct =1`. Если же используются сканы, центрированные по производной на краях Солнца (Луны), этот флаг должен быть установлен равным нулю. При этом надо иметь в виду, что разные точки на скане, в зависимости от удаленности от меридиана, смещаются за 4 часа наблюдений на разное расстояние. Поскольку для коррекции используется единый сдвиг, то эта процедура также дает мелкие ошибки. Для уменьшения такого рода ошибок целесообразнее картографировать не все Солнце целиком, а отдельные активные области. Источники вблизи меридиана восстанавливаются лучше, чем источники на лимбе Солнца.

Следующим фактором, влияющим на качество синтезированных двумерных изображений, являются ошибки при вычитании спокойного Солнца. Использование для этой цели метода вписывания шаблона спокойного Солнца (диск равномерной яркости, свернутый с диаграммой РАТАН-600) в этом случае малоэффективно, потому что такая процедура дает большие источники на краях. Особенно этот эффект существенен в годы максимума активности, поскольку возрастание экваториальной активности приводит к отличию формы Солнца от формы круглого диска. Для того, чтобы выделить активные области в пределах диска Солнца, лучше применять шаблон, который можно создать путем сглаживания кубическими сплайнами (указав 10–15 точек на диске в функции `Scan->Smooth->Cube Spline`) и медианного сглаживания в программе `WorkScan`. Другой метод заключается в загрузке нескольких сканов на одной и той же волне за 5–10 близких дней и выделении нижней огибающей (меню `Transform->Group scan min`).

3.3 Входные данные

Для работы с пакетом программ для азимутального картографирования данные наблюдений должны быть предварительно обработаны программой `Workscan`.

3.3.1 Предварительная обработка данных

Предварительная обработка в `WorkScan` включает следующие процедуры.

1. Калибровка сканов. Для калибровки по полному потоку используются данные с поляриметров Нобейама (<ftp://solar.pro.nao.ac.jp/pub/norp/data/daily/>). Чтобы работала функция меню `CalibrFullFlux`, в подкаталоге `sunflux` каталога `WorkScan` должны быть файлы с потоками на соответствующую дату. Если эти файлы отсутствуют, их необходимо

создать, скачав с web-страницы <http://www.sao.ru/~sun>, или преобразовать в нужный формат данные со станции Нобеяма. Начиная с 2002-го года, эти данные стали доступны в Интернете в конце каждого месяца (раньше данные были доступны только в конце года).

2. Сглаживание. Рекомендуется выполнять операцию сглаживания (медианное или гауссовое) по количеству точек, соответствующему 0.3 размера диаграммы (вводить значение -0.3)
3. Восстановление положения центра диска Солнца. Производится в случае, если произошел сбой времени, или если в расчете времени кульминаций в азимутах была ошибка. В последнем случае положение центра Солнца можно восстановить по его краям, при отсутствии источников на лимбе.
4. Вычитание уровня спокойного Солнца. Перед этой процедурой рекомендуется занести нужную волну на всех азимутах в отдельный каталог, создать для этого набора header-файл (можно вручную, можно утилитой ChoosedScan из пакета программ WorkScan). Затем загрузить эту волну обратно в WorkScan и проверить совпадение центра и уровня спокойного Солнца на всех сканах. После этого провести операцию вычитания уровня спокойного Солнца.

Пункты 1–3 можно также выполнить в WorkScan с помощью пакетного файла prim.pkf следующего содержания:

```
[Init]
AppHide=0
AppExit=0
OutFile=MyLog.txt
OutPrefix=
FileMask=obs*.?hd
InDir=d:\011221_1
OutDir=d:\011221_1\out
[Files]
file1.wsf
file2.fit
file3.0hd
[Commands]
ViewWorkI=1
ViewWorkV=1
FlagAllScan=0
FlagAllScan=1
IVtoRL=1
ViewDataI=1
ViewDataV=1
FindScanGreatGHz=13.400
CalcCenterVscan=1
CopyWorkSheetToData
FindScanGreatGHz=4
CalibrFullFlux
SaveWorkSheet=0 0
```

Рекомендуется исключать из процедуры картографирования частоты меньше 3 ГГц, поскольку на этих частотах вертикальный размер синтезированной ДНА больше диска Солнца. Для удаления частот нужно добавить в пакетный файл строки типа:

```
FindScanGHz=01.015
+ScanDelete
```

на каждую удаляемую волну.

После этого следует сгруппировать данные по частотам с помощью процедуры az-ghz.pro в IDL, и затем вычесть спокойное Солнце.

3.3.2 Формат данных

Программа RAIS считывает входные сканы в формате HD. Данный формат представляет собой набор файлов в FITS-формате, каждый из которых содержит скан в отдельном азимуте и отдельной длине волны, и заголовочного файла, в котором перечислены названия этих FITS-файлов. Файлы могут быть сгруппированы по частоте, дате или азимуту. Такая группировка

выполнена во вторичном архиве. Перегруппировка также может быть произведена утилитой Choosed Scan из пакета WorkScan.

FITS-шапка сканов должна содержать следующие необходимые поля:

NAXIS1 = 710 / LENGTH OF DATA AXIS 1
 NAXIS2 = 2 / LENGTH OF DATA AXIS 2
 PMCSUN = 347.50 / POST MERIDIUM CENTER
 DATE-OBS= '2001/12/19' /
 TIME-OBS= '09:28:11.100' / UT
 OBJECT = 'SUN_A-4' /
 RADIUS = 976 / OPTICAL SOLAR RADIUS (ARCSECOND)
 AZIMUTH = 0.00000000 / Azimuth of observ.
 ALTITUDE= 22.796167374 / Altitude of source
 ANGLE = 8.170000076 / Angle of decl.
 CDELTA1 = 4.6205 / ARCSEC
 OBS-FREQ= 7.830 / GHz
 THETA-DG= 27.91 / DIMENSION OF DIAGRAMM (ARCSECOND)
 TQSUN = 6226 / Ta[K]
 FLUX_L = 0.127 / KOEF. Ta[K] ->Intensity[Jy/arc.sec.]
 BSCALE1 = 2.807371e-01 /
 BZERO1 = 8.374995e+03 /
 BSCALE2 = 5.457768e-02 /
 BZERO2 = -1.066118e+03 /

Данные должны быть записаны в виде параметров Стокса I, V. Тип данных должен быть I2 (BITPIX 16) binary или I8 (BITPIX 64) ASCII text. После выбора header файла необходимо указать параметр картографирования — интенсивность или поляризацию (переменная i_v). По умолчанию программа работает с параметром I.

Для штатных наблюдений на северном секторе значения азимутов наблюдений считываются из поля OBJECT. Тип наблюдений также определяется значением этого поля. В настоящее время поддерживается обработка двух типов наблюдений — south (наблюдения на ЮП) и north (наблюдения в режиме эстафеты, СЕВ). Если поле OBJECT начинается с больших букв SUN, то данные считаются типа south, если маленькими буквами sun — то типа north. Для расчета позиционного угла q , под которыми ДНА сканирует объект, необходимо знать эфемериды, т.е. азимут и склонение источника. Для наблюдений СЕВ значение позиционного угла вычисляется предварительно в программе Geltows.exe, которая преобразует данные из формата регистрации в формат WorkScan, по формуле: $q = \frac{\arcsin(\cos \phi)}{\cos \delta \cdot \sin A}$, и вписывается в поле ANGLE. Это поле изначально предназначалось в программе WorkScan для хранения позиционного угла P , под которым центральный солнечный меридиан наклонен от вертикали в картинной плоскости. Для ЮП это поле заполняется углом P , а угол q вычисляется при картографировании по формуле:

$q = -\arcsin(\tan A \tan \delta)$, где A — азимут вершины параболы, δ — склонение источника.

При регистрации на ЮП в настоящее время в заголовок файла данных из эфемерид Солнца записываются только высота в меридиане, время прохождения в данном азимуте и позиционный угол P . При картографировании также необходимо знать склонение источника в каждом азимуте. Однако его значение в период прохождения через все используемые азимуты меняется незначительно (сотые доли процента), и в первом приближении можно использовать для всех азимутов значение склонения в меридиане. Поэтому мы пока не стали изменять формат заголовка данных для включения в него поля склонения. Для наблюдений в азимутах в программу регистрации (Шатилов, 1995) и программы обработки (Шатилов, 1986, Гараймов, 1997) введены необходимые изменения. В частности, в программе регистрации устранена

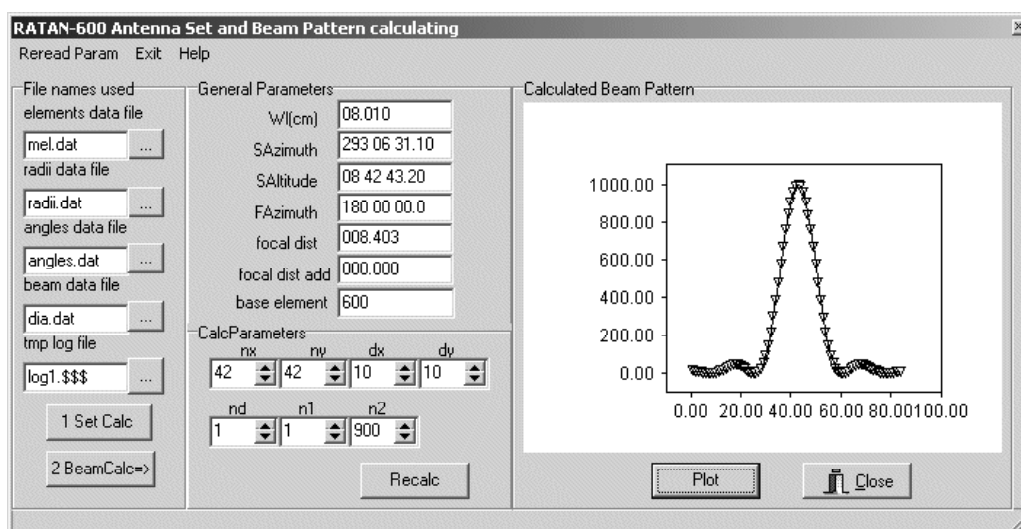


Рис. 9: Общий вид окна программы расчета ДНА РАТАН-600 Beamsu.

ошибка, приводившая к частому сбою времени при загрузке следующего задания. В программе WorkScan увеличено количество одновременно загружаемых сканов с 60 до 100. Изменена схема формирования имен файлов, поскольку старая позволяла именовать только 40 наблюдений с одинаковой датой.

3.4 Расчет одномерных диаграмм направленности антенны

3.4.1 Программа расчета ДНА для северного сектора РАТАН-600

Для расчета диаграмм направленности антенны (ДНА) при наблюдениях на северном секторе используется программа Beamsu. Программа написана на C++ Builder в ОС Windows и имеет оконный интерфейс, в котором можно редактировать входные параметры и просматривать одномерные сечения рассчитанных диаграмм (рис. ??). В программе реализован алгоритм, разработанный Гельфрейхом (1977). Для начала работы нужно в каталоге, в котором находится программа, создать входной файл с именем input.dat, содержащий две строки в формате:

```
wl ag am as hg hm hs afg afm afs f nd n1 n2 nx ny dx dy dnn drnn df
8.01 293 6 31.1 8 42 43.2 180 0 0.0 8.403 1 1 900 42 42 10.0 10.0 600 0.0 0.0
```

Первая строка описывает имена переменных и является комментарием. Во вторую нужно записать значения этих переменных. Здесь:

wl — длина волны,

ag, am, as — градусы, минуты, секунды дуги азимута источника,

hg, hm, hs — градусы, минуты, секунды дуги высоты источника над горизонтом,

afg, afm, afs — градусы, минуты, секунды дуги азимута фокальной точки,

f — расстояние фокальной точки до центра антенны в горизонтальной плоскости в метрах,

nd — шаг вычисления диаграммы,

n1, n2 — номера первого и последнего щитов в синфазной установке,

nx, ny — количество точек по осям,

dx, dy — размер ячеек сетки,

dnn — номер опорного щита,

drnn — добавка к радиусу опорного щита,

df — сдвиг частоты.

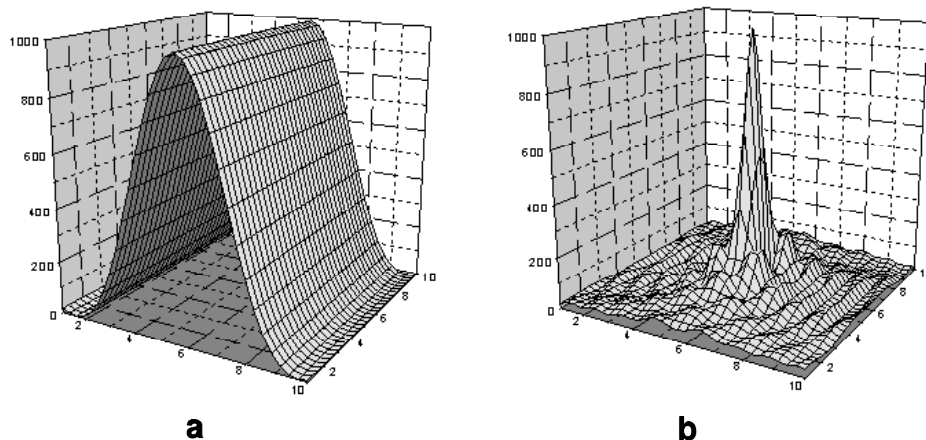


Рис. 10: ДНА РАТАН-600 для различных режимов наблюдения, рассчитанные программой Beamsu: а) при наблюдении Солнца на СЕВ в режиме эстафеты; б) в случае наблюдения Солнца в режиме гелиографа с синфазной установкой.

Изменение расстояний между числами не имеет особого значения, однако важно не перепутать форматы чисел (целые с вещественными). При первом запуске программа считывает параметры из файла, далее их можно редактировать в окне программы.

Для расчета двумерной ДНА надо последовательно нажать кнопки 1Set Calc и 2Beam Calc. При нажатии на первую кнопку происходит расчет уставок антенны. Результаты записываются в файлы, имена которых задаются в группе параметров File names used. По умолчанию даются имена mel.dat (таблица с флагами установки элементов кругового отражателя: если 1, щит участвует в установке), radii.dat (радиусы установки щитов), angles.dat (азимутальные углы). При нажатии на вторую кнопку создается файл dia.dat с двумерной диаграммой. Между этими двумя шагами при необходимости можно изменить значения переменных в группе General parameters и пересчитать диаграмму, нажав кнопку Recalc. При работе программы для каждой установки создается лог-файл logN.###, в который записываются используемые при счете параметры, а также сообщения об ошибках, если они возникнут. При расчете диаграмм для нескольких установок в режиме эстафеты (или эстафеты с зонированием) нужно изменять названия файла, в который будет записываться рассчитанная ДНА (например, dia01.dat, dia02.dat и т.д.), а также скорректировать координаты источника и фокуса. Изменять входной файл input.dat или перезагружать его при этом не нужно.

Программа RAIS использует центральное сечение диаграммы, рассчитанной по программе Beamsu. Это сечение записывается в файл goldia.dat и отображается в графическом окне программы при нажатии на кнопку Plot. Полученный файл goldia.dat следует скопировать в каталог с входными сканами для картографирования.

3.4.2 Расчет ДНА для антенной системы ЮП

Для наблюдений в системе ЮП расчет ДНА производится программой br1 (Верходанов, 1995), которая установлена, в частности, на серверах rs.ratan.sao.ru и brown.nord.nw.ru. Эта программа имеет около 20 ключей запуска, которые подробно описаны в manual. Изучать использование ключей в данном случае нет необходимости, поскольку RAIS в начале работы при загрузке набора сканов создает командный файл, содержащий строку с нужными ключами. Например, файл для длины волны 3.83 см имеет имя br3_83 и содержит строку:

```
br1 -d -F beam3_83cm.dat -S0.2 -H22.7962 -N-1 -W3.83142 -k
```

Если программа обнаружит в рабочем каталоге сканы на нескольких длинах волн, она

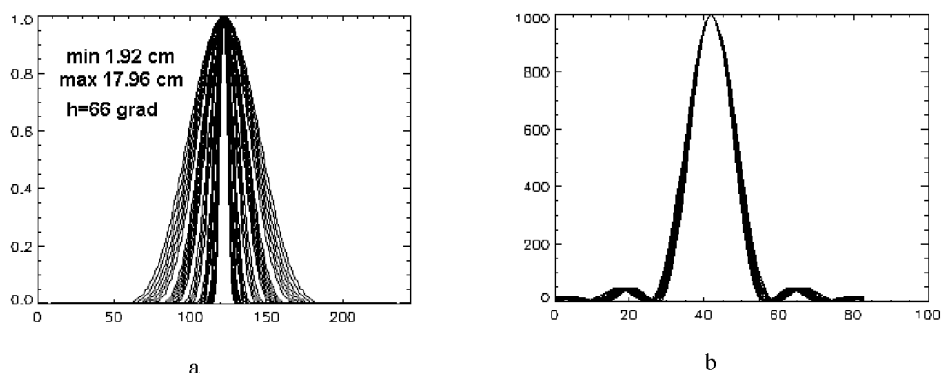


Рис. 11: Одномерные ДНА, рассчитанные программой br1: а) для ЮП на 30 длинах волн от 1.92 см до 17.96 см; б) для СЕВ на волне 8.01 см для различных установок в режиме эстафеты.

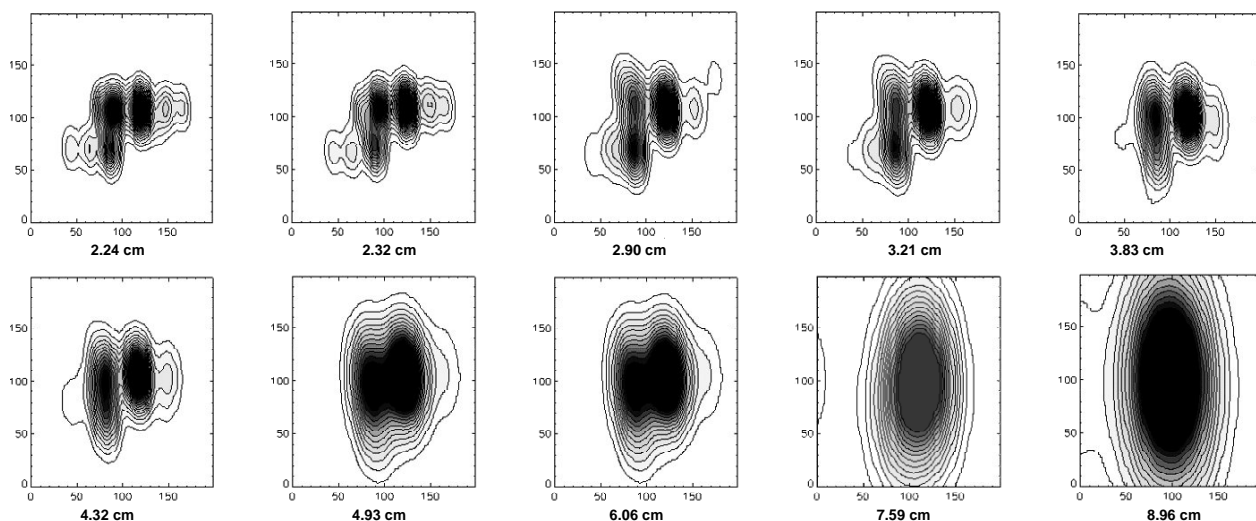


Рис. 12: Карты активной области на Солнце на 10 длинах волн от 2.24 см до 8.1 см по наблюдениям на ЮП.

создает еще один файл, с именем br2, в котором содержатся командные строки для расчета ДНА на всех найденных длинах волн. Нужно скопировать этот файл на сервер, добавить файлу атрибут “исполняемый” и запустить на выполнение. В результате будут созданы файлы с расчетными ДНА в формате FITS с именами типа beam3_83cm.fit (рис. ??а). Эти файлы следует скопировать обратно в каталог со сканами.

В принципе, нет необходимости рассчитывать диаграммы каждый раз заново, поскольку в режиме ЮП диаграмма направленности на одной и той же волне в используемом нами приближении не меняется. Изменение происходит только в шаге между отсчетами в регистрации, из-за разной скорости прохождения Солнца через ДНА. Так, в дни летнего и зимнего солнцестояния полное время прохождения Солнца через все используемые азимуты составляет 4.5 часов, а в дни равноденствия — 4 часа. Коррекция шага ДНА выполняется уже в самой программе картографирования. В связи с этим в программе используется банк данных, рассчитанных на все длины волн ДНА. Если программа не находит нужной ДНА в текущем каталоге, она берет ее из каталога по умолчанию (например, beams), указанном в

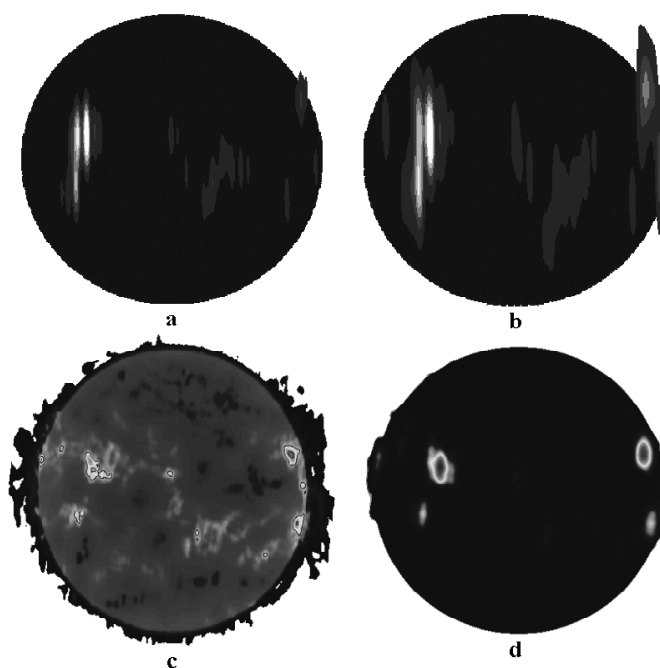


Рис. 13: Сопоставление карт Солнца на волне 2.32 см (а), и 3.21 см (b), полученных на ЮП РАТАН-600, с картами радиогелиографов Нобейма (с) на волне 1.76 см и ССРТ (d) на волне 5 см. Источники на картах РАТАН-600 вытянуты по высоте, однако положения источников определены довольно хорошо. Двойной (тройной) источник в северо-восточном полушарии обнаруживает более многокомпонентную структуру на короткой волне 1.76 см и одинарный максимум на более длинных волнах.

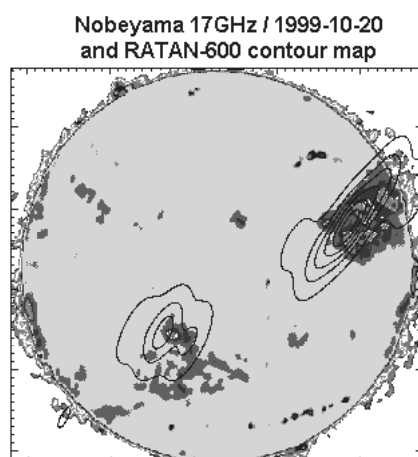


Рис. 14: Наложение контурной карты Солнца, полученной на СЕВ РАТАН-600 на волне 8.1 см, на карту, полученную на Нобейма на волне 1.76 см.

RAIS. Необходимость пересчета ДНА для ЮП может возникнуть только при использовании нестандартных установок, например, при наблюдениях с сокращенной апертурой.

4 Результаты картографирования

На рис. ??, ??, ?? представлены примеры полученных двумерных карт, построенных по наблюдениям на ЮП и в режиме эстафеты с зонированием. Проведено сопоставление полученных двумерных изображений Солнца с картами Нобяма и ССРТ, которое свидетельствует о хорошем восстановлении двумерного распределения радиояркости в используемом нами методе.

5 Методика разделения источников на одной вертикали с помощью выноса ДНА

Использование ножевой диаграммы в антенной системе ЮП удобно для получения информации о всей активности на Солнце, однако весьма важно иметь возможность для разделения потоков излучения источников, расположенных в разных местах вертикального луча диаграммы. Ниже предлагается метод разделения потоков двух источников x и y , основанный на последовательном наведении центра вертикальной диаграммы на две разные широты Солнца в северном и южном полушарии. При этом в суммарный поток f источники складываются с весовыми коэффициентами a и b , определяемыми уровнем участка ДНА, которым они сканируются (см. рис. ??). Имея два скана, можно разделить потоки с помощью системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} a_1 \cdot x + b_1 \cdot y &= f_1 \\ a_2 \cdot x + b_2 \cdot y &= f_2, \end{aligned}$$

которая решается просто.

Определим зависимость коэффициентов уравнения от величины выноса по высоте Δh , на волне λ , для источника на заданной широте φ . Ограничимся приближением, в котором вертикальная ДНА РАТАН-600 задается функцией:

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\theta}\right)^2}, \quad (3)$$

где $\theta = 0.75\lambda[cm]$ — полуширина ДНА в минутах дуги,

l — координата по вертикали в минутах дуги, отсчитываемая от вершины гауссианы.

В системе координат с центром в центре Солнца для первого источника имеем: $l_1 = \Delta h - h_{\varphi_1}$,

где $h_{\varphi_1} = R_{\odot} \cos(90 - \varphi_1) \cos P$ — координата источника с учетом позиционного угла P .

Тогда: $a_1 = e^{-\left(\frac{-\Delta h_1 - R_{\odot} \cos(90 - \varphi_1) \cos P}{0.75\lambda}\right)^2}$.

Отсюда получаем: чтобы источник, находящийся на широте $\varphi_1 = 45^\circ$, попал на уровень ДНА $\frac{2}{3}$ на волне $\lambda = 4$ см, вынос по высоте должен составлять:

$$\Delta h = 12.34'.$$

Написана процедура на IDL (`h_split.pro`), которая автоматически разделяет потоки на всех длинах волн. Входные данные задаются в двух файлах, каждый из которых состоит из трех колонок: частота, суммарный поток в интенсивности I при данном выносе ДНА и суммарный поток в поляризации V . В результате выполнения программы создается один файл из 5 колонок: 1) частота, 2) поток I первого источника, 3) поток I второго источника, 4) поток V первого источника, 5) поток V второго источника.

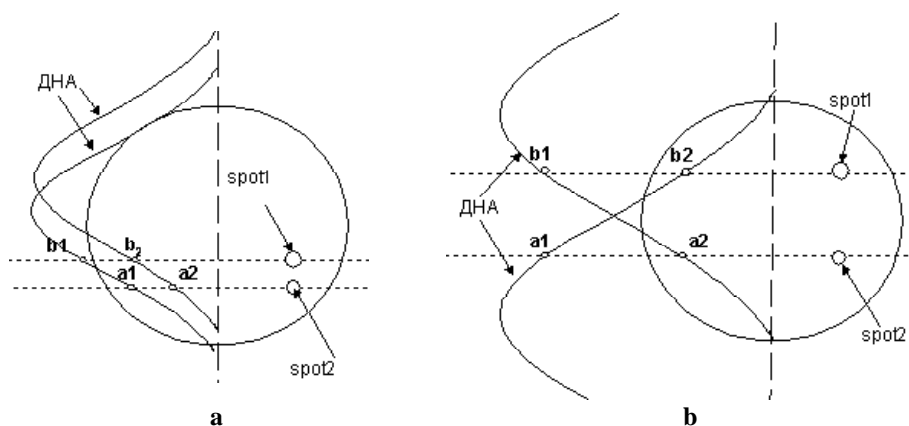


Рис. 15: Схема разделения источников на одной вертикали путем сканирования с разными выносами ДНА: а) на короткой волне — источники находятся в одном полушарии; б) на более длинной волне — источники находятся в разных полушариях.

Проведение многоазимутальных наблюдений попеременно с двумя значениями выноса ДНА по высоте даст возможность исследовать динамику областей, совпадающих по высоте, что недоступно при азимутальном апертурном синтезе или при обычных наблюдениях с несмещенной диаграммой.

Данная методика также помогает решить другую задачу — определить величину выноса по высоте центра вертикальной ДНА РАТАН-600. Для этого нужно пронаблюдать Солнце с заданными выносами ДНА по высоте, выбрать стабильный источник на скане, и по относительному изменению его потока определить величину выноса.

6 Программное обеспечение для исследования временных вариаций излучения солнечных структур и сопоставления с данными других обсерваторий

Для обработки данных многоазимутальных наблюдений использовались дополнительные программные разработки, которые опишем ниже.

6.1 Программа FITSRAT для сопоставления данных РАТАН-600 с данными других обсерваторий

В последние годы, в связи с бурным развитием всемирной компьютерной сети, большая часть солнечных данных стала доступна в сети Интернет, на сайтах наземных и космических обсерваторий, а также сборных сайтах, таких как SEC Data library (<http://www.sel.noaa.gov/Data/index.html>) и SOHO Synoptic/Summary Database. С 2002 г. международный бюллетень Solar-Geophysical Data уже не публикуется и пользователям предлагается PDF версия в Интернете.

Большой объем информации ставит задачу быстрого и эффективного сопоставления данных РАТАН-600 с данными других обсерваторий, представления этих данных в графическом виде, удобном для восприятия и анализа, и оценки основных параметров источников на Солнце.

Для этих целей в ГСИ разработана программа FITSRAT на IDL с использованием процедур Astrolib, предназначенная для детального сопоставления данных РАТАН-600 с данными

Нобеяма, ССРТ, SOHO MDI и других обсерваторий. Программа предоставляет следующие возможности.

- Просмотр 1D и 2D данных в формате FITS и их различное графическое представление: в виде контурных карт, изображений в различных палитрах, трехмерные изображения и т.д.
- Оценки параметров: яркостных температур, потоков, величин магнитных полей, координат источников и т.п.
- Простые операции над изображениями: вычитание постоянного уровня, масштабирование и т.п.
- Поворот на позиционный угол, свертка с диаграммой РАТАН-600 и преобразование двумерных изображений с Нобеяма и ССРТ в сканы I&V, которые можно считать в программу WorkScan для детального сопоставления и анализа.
- Преобразование SOHO MDI магнитограмм в сканы для WorkScan с фильтрацией слабых полей, для сопоставления с поляризационными данными РАТАН-600.

Как и все GUI, написанные на IDL, эту программу легко модифицировать и, при необходимости, добавлять новые процедуры.

Использование этой программы для детального сопоставления многоволновых данных РАТАН-600 с данными ССРТ и Нобеяма позволило обнаружить инверсию знака поляризации, связанную с формированием волокна в высотной структуре АО (Тохчукова и др., 2002).

6.2 Программа WAVERAT для вейвлет-анализа данных РАТАН-600

Для анализа временных вариаций по данным многоазимутальных наблюдений РАТАН-600 используется модификация программы Wavelet, которая была разработана сотрудниками ССРТ для вейвлет-анализа временных рядов. Графический интерфейс не изменен, за исключением того, что в меню включен пункт RATAN с выпадающим подменю. Добавлены две процедуры, которые позволяют вводить данные для вейвлет-анализа, выбирая длину волны и точку на скане. Процедура az_centr.pro совмещает сканы по указанному источнику (по максимуму или минимуму) и создает временной ряд антенной температуры выбранной точки на скане. При выполнении этой процедуры создаются 4 графических файла и 3 файла с данными:

- ◊ наложение всех сканов в азимутах на данной волне в формате GIF (I,V в одном и том же масштабе);
- ◊ временные ряды антенной температуры в каналах I,V указанной точки на скане в виде данных (DAT) и графическом формате (GIF);
- ◊ смещение источника в азимутах от положения в меридиане в формате DAT и GIF.

В начале текста процедуры задаются параметры, с которыми запускается программа:

- ◄ координата точки, в окрестности которой ищется экстремум для совмещения сканов (для восстановления центра Солнца, или для восстановления положения источников за счет вращения Солнца);
- ◄ окрестность точки, в которой ищется экстремум;
- ◄ знак экстремума (минимум или максимум);

- ◁ координата точки (в отсчетах от найденного места экстремума), для которой вычисляется временной ряд;
- ◁ допустимая разница между центром Солнца и центром записи (если это значение превышено, за центр Солнца принимается центр записи);
- ◁ флаг калибровки (если 1, производится калибровка сканов по точке с минимальной температурой);
- ◁ флаг режима работы без записи в файлы;
- ◁ флаг автономной работы или вызова из Waverat.

Эти и другие параметры можно менять, в зависимости от того, работает процедура автономно или вызывается из Waverat. Если она вызывается из Waverat, предпочтительнее установить ключи, чтобы процедура обработала только одну длину волны, не записывала сканы на диск после восстановления центра Солнца, и не создавала графических файлов. В этом режиме также предпочтительней, чтобы значения координат локального источника, по которому совмещаются сканы, и источника, яркость которого анализируется, запрашивались в интерактивном режиме. После окончания работы процедуры (меню Scans) надо задать параметры вейвлет-анализа (в основном окне) и нажать ОК. Пример полученных вейвлет-спектров приведен на рис. ?? . Так же как и RAIS, программа Waverat работает с предварительно обработанными данными вторичного архива солнечных данных РАТАН-600.

6.3 Результаты обработки и перспективы исследования

Анализ временных вариаций излучения источников на масштабах времени минуты–часы — еще не полностью освоенное на РАТАН-600 направление исследований. Наблюдения Солнца проводились в режиме эстафеты, с промежутком между наблюдениями 20 мин в 1980 г., 14 мин в 1981–1989 гг. и 9 мин в 1999 г. (Голубчина, устное сообщение). Исследования синхронных уярчений, проведенные в режиме эстафеты, могут быть продолжены на ЮП, со значительно более высоким разрешением и в широком диапазоне волн.

На рис. ?? приведен пример наблюдений на ЮП в 61 азимуте. Представлено наложение сканов в интенсивности и круговой поляризации, и динамика максимума антенной температуры двух локальных источников на скане. Видно, что в ведущем пятне в период наблюдения произошел микровсплеск, тогда как хвостовое пятно было относительно спокойным.

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 (Bogod et. al., 2002). Дальнейшие исследования в этом направлении и сопоставление с данными других диапазонов могут продвинуть представления о том, как начинается вспышка, и помочь выбрать наиболее реалистичный сценарий вспышки из множества теоретических разработок.

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

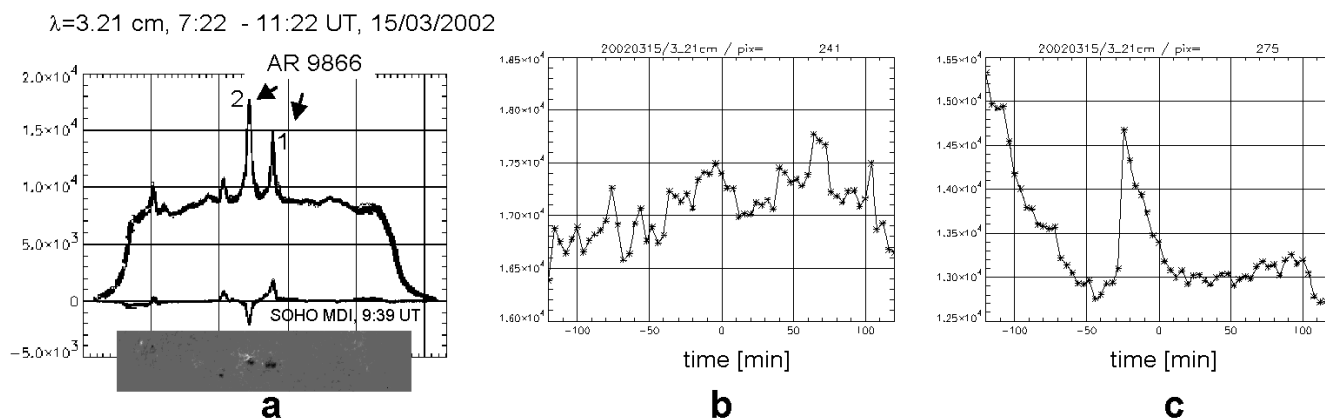


Рис. 16: а) Наложение 60 азимутальных сканов и сопоставление с магнитными полями SOHO MDI. Стандартное отклонение антенной температуры точки на спокойном солнце составляет 1%. б, в) Изменение антенной температуры в азимутах: в) — ведущее пятно (источник 1 на рисунке слева), б) — хвостовое пятно (источник 2).

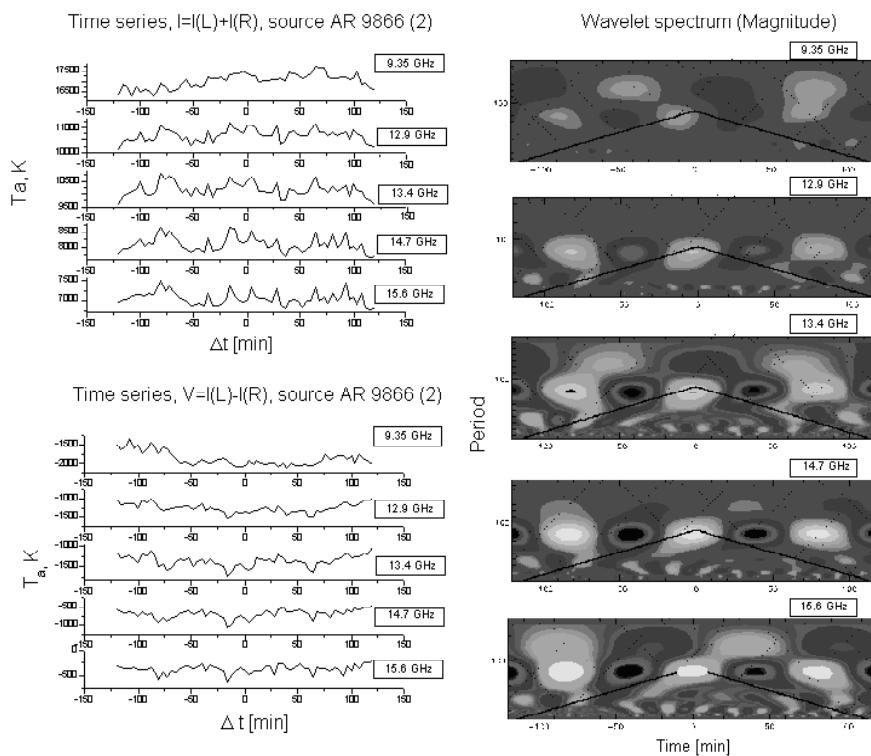


Рис. 17: Временные ряды (слева) и вейвлет-спектр источника (справа) на нескольких частотах. На спектрах в большинстве случаев виден период 80 минут.

7 Заключение

Реализация режима многоазимутальных наблюдений на ЮП позволила выполнить следующее.

1. Впервые на РАТАН-600 проведено несколько серий наблюдений Солнца в азимутах от 30° до -30° , с временным разрешением до 4 минут (промежуток времени между сканами 1 мин) в течение 4–4.5 часов.
2. Для обеспечения проведения многоазимутальных наблюдений внесены изменения в существующее ПО, и создано новое ПО для обработки и анализа данных многоазимутальных наблюдений, которое включает:
 - ▷ анализ вариаций излучения различных образований на Солнце,
 - ▷ многоволновое картографирование.
3. Получены двумерные изображения Солнца на 10 длинах волн в диапазоне 2–10 см, и проведено их сравнение с картами Нобейма и ССРТ, которое показало, что восстановление двумерного распределения яркости достаточно хорошее.
4. Предложена методика разделения источников, совпадающих по высоте, при сканировании квазилинейными участками ножевой диаграммы разных уровней.
5. По данным наблюдений Солнца оценены ошибки наведения антенны в азимутах на ЮП. Некоторые ошибки откорректированы, по другим даны рекомендации по методике коррекции при обработке, а также отмечены работы, которые необходимо проделать для улучшения качества наблюдений.
6. Использование разработанного программного обеспечения позволило обнаружить колебания излучения Солнца с несколькими периодами, самый устойчивый из которых равен 80 минутам.

Реализация данного режима наблюдений открывает перспективы для других (не солнечных) направлений исследований на РАТАН-600.

Благодарности. Автор выражает благодарность Богоду В.М. за внимательное чтение и полезное обсуждение работы, Жеканису Г.В. за оперативную разработку нового режима управления антенной, которая сделала возможным наблюдения с временным разрешением до 4 минут, Голубчиной О.А. за полезное обсуждение методик расчета диаграмм РАТАН-600, и всем сотрудникам Группы Солнечных Исследований за помощь в проведении наблюдений и тестировании программного обеспечения.

Список литературы

- Парийский Ю.Н., Шиврис О.Н., Изв. ГАО., 1972, **188**, 3-11
- Богод В.М., Ватрушин С.М., Абрамов-Максимов В.Е., Цветков С.В., Дикий В.Н., 1993, Препринт САО №.84
- Богод В.М., Минченко Б.И., Петров З.Е., Зверев Ю.К., Коржавин А.Н., Дикий В.И., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., 1983, Результаты совместных наблюдений Солнца на радиотелескопах РАТАН-600 (южный сектор с перископом в 5 азимутах) и VLA (США) в июле 1982 года. Отчет САО
- Парийский Ю.Н., 1986, Препринт САО №.33л.
- Гельфрейх Г.Б., Опейкина Л.В., 1992, Препринт САО №.96
- Шиврис О. Н., 1980, Изв.САО, **12**, 134-140

- Минченко Б.С., 1986, Изв. САО, **21**, 91-97
- Минченко Б.С., 1979, канд. дисс.
- Ниндос и др. (Nindos A., Alissandrakis C.E., Gelfreikh G.B., Borovik V.N., Korzhavin A.N., Bogod V.M.), 1996, Solar Physics, **165**, 41-59
- Хайкин и др. (Khaikin V.B., Majorova E.K., Efimov I.G., Victorov O.A., Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh.), 1999, in Proceeding of the VIII Russian-Finnish Symposium on Radioastronomy, 125-128
- Жеканис Г.В., 2001, отчет САО за 2001 г.
- Гараимов В.И., 1997, Препринт САО No.127Т
- Голубчина О.А., 1986, Изв. САО **21**, 75-84
- Голубчина и др. (Golubchina O.A., Zhekanis G.V., Bogod V.M., Plyaskina T.A., Komar N.P., Garaimov V.I., Tokhchukova S.Kh.), 2002, Rom.Astron.J. (in press)
- Агафонов М.И., Подвойская О.А., 1989, Изв. Вузов, Радиофизика, т.32, No.6, 742-751
- Шатилов В.А., 1986, Изв.САО, **25**, 168-175
- Шатилов В.А., 1995, Программное обеспечение солнечных наблюдений: регистрация, обработка, архив. (<http://www.ratan.sao.ru/sun/manual/shatl1.html>)
- Гельфрейх Г.Б., 1977, Изв.САО, **9**, 89-93
- Верходанов О.В., 1995, Препринт САО No.106
- Богод, Тохчукова (Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh.), Microwave manifestations of solar active regions producing powerful flares, 2002, A&A (in press)
- Тохчукова, Богод (Tokhchukova S., Bogod V.), Detection of the long-term microwave "darkening" before the July 14, 2000 flare, 2002, Solar Physics, (in press)
- Кононов В.К., Павлов С.В., Мингалиев М.Г., Верходанов О.В., Нижельская Е.К., Хубиева Н.В., 2001, Препринт САО No.164