РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи
УДК 520.27:520.87/88

ОПЕЙКИНА Лариса Викторовна

РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 В РЕЖИМЕ РАДИОГЕЛИОГРАФА

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2005

Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Гельфрейх Георгий Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Байкова Аниса Талгатовна

кандидат физико-математических наук, доцент Нагнибеда Валерий Георгиевич

Ведущая организация:
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск

Защита состоится "...." .... 2005 г. в "...."час. "...."мин. на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 по присуждению ученой степени доктора физико- математических наук при Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, Карачаево-Черкессия, пос.Нижний Архыз, САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН

Автореферат разослан "...." .... 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук Майорова Е.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Изучение солнечной активности и соответствующих плазменных процессов в атмосфере Солнца дает важную информацию для прогнозирования воздействия Солнца на Землю, понимания природы звездной активности и для ряда других разделов астрофизики и физики плазмы. Радиоастрономические методы диагностики солнечной плазмы позволяют получить данные о физическом состоянии и процессах в атмосфере Солнца, недоступные наблюдениям в других диапазонах. Для решения большинства задач солнечной радиоастрономии необходимо получать двумерные изображения всего диска Солнца с высоким пространственным, временным, спектральным разрешением, большим динамическим диапазоном, с возможностью измерения поляризационных характеристик и регистрацией широкого спектра пространственных гармоник. Но ни один из действующих сейчас радиотелескопов не удовлетворяет всем этим требованиям одновременно[1].

Число телескопов, строящих двумерные изображения Солнца в микроволновом диапазоне с пространственным разрешением порядка единиц и десятков секунд дуги, невелико. Основными являются две специализированные солнечные антенные решетки — Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) и радиогелиограф в Nobeyama (NoRH). На этих инструментах проводятся ежедневные наблюдения Солнца в течении всего светового дня, с хорошим временным разрешением, и они дают значительное количество новой информации о радиоизлучении солнечной атмосферы. Но существенным недостатком этих телескопов является то, что наблюдения на них проводятся на очень небольшом числе длин волн.

Еще один солнечный интерферометр, Owens Valley Solar Array (OVSA), позволяет наблюдать на многих волнах, но из-за малого числа составляющих его антенн имеет плохое заполнение uv-плоскости. Эпизодически наблюдения Солнца проводятся на универсальных телескопах апертурного синтеза VLA и WSRT, но количество длин волн здесь также невелико, поле зрения охватывает небольшую часть диска, а для регистрации необходимых пространственных гармоник требуется время и применение сложных методик синтеза. Таким образом, необходимо дальнейшее совершенствование инструментов, что отражается в существующих проектах по улучшению характеристик перечисленных телескопов (например, проект увеличения числа длин волн для ССРТ) и созданию новых специализи-

[1] White S.M. New radio instrumentation for the study of sunspots and starspots. Astron. Nachr., 2002, **323**, pp.265-270.

рованных солнечных телескопов (FASR). Но даже с учетом FASR, число радиогелиографов мало, и они не могут обеспечить непрерывные наблюдения.

РАТАН-600[2], поставляя достаточно полную информацию о спектре и поляризации микроволновых источников на Солнце, обладает в настоящее время высоким пространственным разрешением лишь по одной координате и весьма ограниченными возможностями построения двумерных изображений. Проект радиогелиографа РАТАН-600[3] направлен на преодоление этих трудностей. При успешной его реализации он может обеспечить двумерное картографирование Солнца на ряде длин волн сантиметрового диапазона с пространственным разрешением порядка десятка угловых секунд по обеим координатам, временным — порядка нескольких минут, причем для отдельных активных областей возможно "мгновенное" построение изображений, с хорошим заполнением uv-плоскости и большим полем зрения. При этом не потребуется реконструкция антенны, а оснастить новой аппаратурой нужно будет всего лишь один фокус. Долготное расположение РАТАН-600 вдали от основных солнечных решеток повышает значимость получаемой с его помощью информации при проведении кооперативных программ и делает актуальным усовершенствование методов ее получения. Использование данных различных радиотелескопов позволяет организовать непрерывный мониторинг динамичных объектов солнечной атмосферы и исключить артефакты при исследовании их структуры, вызванные применением сложных методов обработки.

Режим радиогелиографа — это принципиально новый способ работы РАТАН-600, не имеющий точных аналогов на других телескопах. Основными особенностями этого режима являются наблюдения на несфазированной антенне и сканирование источника с помощью быстрого изменения диаграмм направленности с частотой. Частотное сканирование применяется на некоторых антенных решетках, например, на ССРТ. Но при этом используется зависимость положения от частоты только для главных дифракционных максимумов. Асинфазные разваленные диаграммы направленности, насколько нам известно, до сих пор не использовались в радиоастрономии.

Таким образом, актуальность данной работы определяется, во-первых,

---

[2]Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н., Есепкина Н.А. Радиотелескоп РАТАН-600// Изв. ГАО, 1972, **188**, с.3-12.

[3]Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Пустильник Л.А. Предложения по использованию радиотелескопа РАТАН-600 в программах 22-го цикла солнечной активности. Препринт САО РАН, 1988, No.22.

возможностью создать на базе РАТАН-600 инструмент, который решает проблему получения многоволновых двумерных радиоизображений Солнца, и который необходим для увеличения числа одновременно участвующих в исследованиях Солнца радиогелиографов. Во-вторых, тем, что режим радиогелиографа — это одно из немногих решений, позволяющих осуществлять на РАТАН-600 быстрое картографирование с высоким пространственным разрешением для источников со средними высотами. И, в третьих, интересом к малоизученным способам получения радиоизображений, таким как частотное сканирование и использование сложных псевдослучайных аппаратных функций, а также к более полному изучению возможностей антенн переменного профиля (АПП), к которым относится РАТАН-600.

Поскольку ранее подобные способы работы РАТАН-600 не исследовались, то в данной работе необходимо было получить представление обо всех основных составляющих процесса построения изображения этим способом, что потребовало как детального изучения характеристик антенной системы, так и поиска эффективных для данной задачи способов получения и восстановления изображений. Первоначальное исследование режима было целесообразно провести с помощью математического моделирования, с последующей экспериментальной проверкой правильности модельных представлений. Решению этих задач и посвящена данная диссертация.

Цель работы:

1. Разработать комплекс компьютерных программ, позволяющих моделировать работу РАТАН-600 в режиме радиогелиографа, а также проводить и обрабатывать наблюдения.

2. С помощью моделирования изучить различные режимы работы радиогелиографа и его характеристики. Определить оптимальные установки антенны и параметры приемной аппаратуры. Исследовать свойства диаграмм направленности радиотелескопа.

3. Исследовать различные методы восстановления применительно к изображениям, полученным в режиме радиогелиографа.

4. Провести наблюдения, позволяющие оценить возможность получения изображений радиоисточников и соответствие модели радиогелиографа реальной антенной системе.

Научная новизна результатов определяется тем, что данный метод ранее в радиоастрономии не применялся и не исследовался. Получена также новая информация о работе АПП.

1. Разработаны алгоритмы и программы для моделирования, планирования и обработки наблюдений в новом режиме работы РАТАН-600.
2. Проведены расчеты и анализ установок антенны РАТАН-600 в более широких пределах изменений параметров, чем это делалось ранее.
3. Впервые проведены расчеты и анализ диаграмм, получаемых при асинфазном облучении главного зеркала. Изучены особенности изменения диаграмм направленности с частотой в установках антенны с нарушением таутохронности хода лучей.
4. Решена задача восстановления изображений, имеющих нестандартные особенности, такие как пространственная неинвариантность, псевдослучайность аппаратной функции, большая размерность и неполнота данных. Сделаны модельные оценки качества изображений различных источников, которые могут быть получены в режиме радиогелиографа.
5. Проведены первые наблюдения Солнца и других астрономических объектов в режиме радиогелиографа. Получено экспериментальное подтверждение правильности метода и результатов моделирования.

Научное и практическое значение. Результаты работы существенно уточнили и детализировали исходные представления о работе РАТАН-600 в режиме радиогелиографа и позволили провести наблюдения. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для проведения штатных наблюдений в режиме радиогелиографа, а также для обработки других данных, получаемых на РАТАН-600.

Достоверность полученных результатов определяется корректным применением методов расчета, совпадением результатов аналитического рассмотрения, компьютерного моделирования и наблюдений.

На защиту выносится:

1. Разработка и реализация комплекса программ, обеспечивающих построение радиоизображений космических объектов в режиме радиогелиографа РАТАН-600. Модификация алгоритма расчета диаграммы направленности, позволяющая в несколько раз повысить точность и скорость счета.

2. Результаты компьютерного моделирования характеристик антенны и диаграмм направленности в режиме радиогелиографа, оптимизация установок антенны и оценка параметров радиометров.

3. Результаты моделирования восстановления изображений с помощью корреляционного метода и метода максимальной энтропии для изображений, полученных в режиме радиогелиографа, особенностью которых является пространственная неинвариантность, сложность аппаратной функции и малое отношение сигнал/шум.

4. Результаты экспериментального исследования метода радиогелиографа РАТАН-600, подтвердившие на практике возможность применения нового режима работы радиотелескопа и правильность результатов моделирования.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на XXII Всесоюзной конференции "Радиотелескопы и интерферометры" (Ереван, 15-17 мая, 1990), XXV, XXVI, XXVII Радиоастрономических конференцях (Пущино, 20-24 сентября, 1993; Санкт-Петербург, 18-22 сентября, 1995; Санкт-Петербург, 10-14 ноября, 1997), научном семинаре секции РАН "Радиофизические исследования солнечной системы" (Санкт-Петербург, 7-9 октября 1996), международной конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии" (Санкт-Петербург, 17-22 сентября, 2000), Всероссийской астрономической конференции (Санкт-Петербург, 6-12 августа, 2001), Российской конференции памяти А.А. Пистолькорса "Радиотелескопы РТ-2002" (Пущино, 9-11 октября, 2002), на научных семинарах САО РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 81 наименования, содержит 173 страницы основного текста, в том числе 67 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор инструментов для построения изображений Солнца в микроволновом диапазоне, обоснована актуальность создания радиогелиографа на базе РАТАН-600, отмечены основные особенности этого метода наблюдений. Определены задачи данной работы, оценена новизна и практическая ценность полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе дано описание общих принципов работы радиогелиографа, рассмотрен расчет установок антенны и выбор установок с оптимальными характеристиками.

Как уже было сказано, режим радиогелиографа предназначен для получения двумерных изображений радиоисточников. На РАТАН-600 при использовании стандартных или близких к ним способов наблюдений получить изображения с достаточно высоким пространственным и временным разрешением не удается. Препятствием к получению высокого пространственного разрешения является требование таутохронности лучей, собираемых в фокусе, что ограничивает размеры установки антенны, а необходимость перестановок антенны для сканирования источника затягивает процедуру получения изображений на многие часы и сутки. В режиме радиогелиографа предложено отказаться от требования таутохронности, и это решает сразу обе проблемы: увеличивает размеры апертуры антенны, позволяя реализовать максимально возможную для РАТАН-600 пространственную разрешающую способность, и приводит к быстрому изменению формы диаграммы направленности с изменением частоты наблюдений, что позволяет получить все необходимые сканы источника одновременно.

В режиме радиогелиографа могут быть сформированы диаграммы направленности разного типа. На выбранной частоте наблюдений и кратных ей частотах можно получить диаграмму с одним главным лепестком (однолепестковую, синфазную). Для этого используется зонирование — выравнивания фазы поля на антенне с помощью приведения разности хода лучей к целому числу длин волн. Но при изменении частоты наблюдений фазирование нарушается и диаграмма направленности разваливается. Разваленные диаграммы состоят из большого числа лепестков малой амплитуды, распределенных в пределах большой области на небе. Размер этой области определяется величиной синфазного элемента антенны и в сотни раз превышает ширину отдельного лепестка диаграммы. Многолепестковые асинфазные диаграммы имеют преимущества при картографировании протяженных источников, так как каждая такая диаграмма может охватывать сразу весь источник. Именно это обстоятельство в сочетании с частотным сканированием дает возможность строить “мгновенные” изображения. Поэтому для некоторых задач имеет смысл использовать и даже намеренно формировать асинфазные диаграммы направленности, задавая, например, псевдослучайное распределение фазы поля. При таком фазовом распределении на всех частотах будут формироваться диаграммы одного типа, что делает данный режим наблюдений независимым от длины волны.

Этот способ работы телескопа может быть реализован благодаря тому, что главный кольцевой отражатель РАТАН-600 состоит из 900-т отдельных элементов (щитов), и возможны независимые перемещения как самих элементов, так и вторичных зеркал внутри антенны. Каждый щит антенны рассматривается как плоское зеркало, отражающее излучение источника в произвольно заданный фокус. Таким образом, для заданного положения источника можно выбрать фокус, при котором установка будет иметь требуемые характеристики, например, максимальное количество щитов. С помощью небольших перемещений щитов по радиусу можно на выбранной частоте задать необходимое фазовое распределение.

Для расчета установок антенны в режиме радиогелиографа потребовалась разработка специального алгоритма, отличного от алгоритма расчета установок для стандартных режимов работы РАТАН-600. Алгоритм сделан на основе подхода, предложенного в работе[4], в соответствии с которым положение каждого щита расчитывается исходя из произвольно заданных положений источника и фокуса, а длины оптического пути лучей, отраженных от щитов, корректируются так, чтобы обеспечить заданное распределение фазы поля в апертуре. Расчет установок для стандартных режимов наблюдений является частным случаем такого способа расчета антенны.

Произвольное задание положения фокуса и фазового распределения приводит к большому разнообразию установок антенны, и возникает задача выбора установок с оптимальными характеристиками. Положение фокуса, при заданном положении источника, определяет количество щитов в установке, их распределение по кольцу и величину разности хода между лучами. Фазовое распределение поля в режиме радиогелиографа задается таким образом, что практически не влияет на эти параметры. Выбор оптимальных установок следует делать с учетом всех характеристик, но в данной работе мы ограничиваемся только рассмотрением полного числа щитов в установке. Установки с наибольшим числом щитов обеспечивают высокое пространственное разрешение, максимальную собирающую площадь, хорошее заполнение uv-плоскости и значительную разность хода

[4] Гельфрейх Г.Б. Радиоастрономический способ юстировки антенн переменного профиля. Изв. ГАО, 1972, **188**, с.139-148.

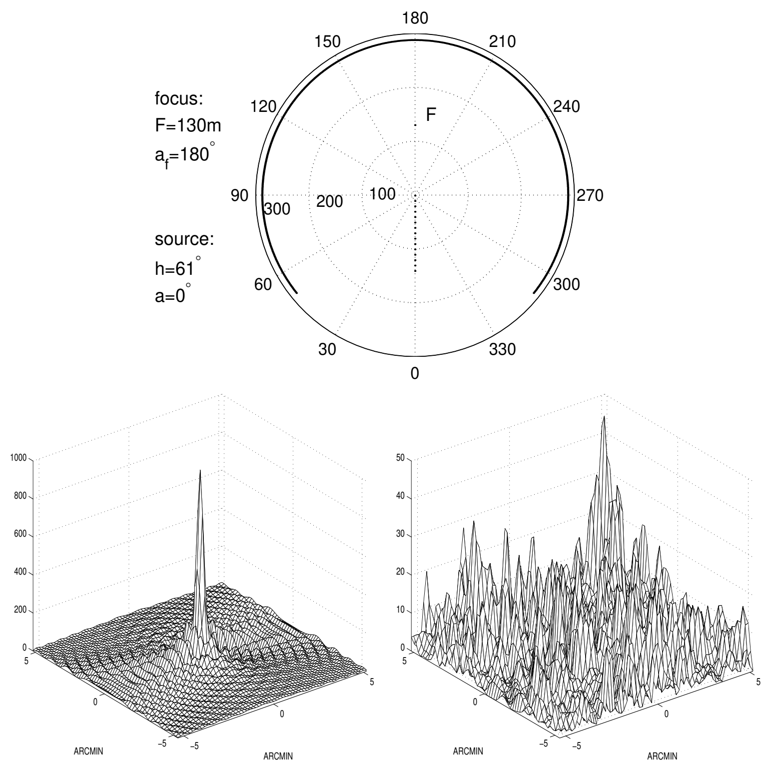

Рис. 1: Пример установки антенны в режиме радиогелиографа и диаграмм направленности при синфазном и асинфазном распределениях поля.

между лучами, необходимую для реализации частотного сканирования.

Нами подробно рассмотрена зависимость числа щитов в установках от положения источника и фокуса для идеальной модели антенны. Показано, что в наблюдениях источников с высотой $\gtrsim 50^\circ$ можно использовать более половины элементов антенны. При наблюдениях на высоте $\sim 70^\circ$, являющейся максимальной для Солнца на РАТАН-600, в установках будет участвовать более 700 щитов. В таких установках по одной из координат будет реализована максимальная для данного телескопа разрешающая способность, а по другой, близкая к ней. Схема установки антенны для $h = 61^\circ$, и соответствующие ей диаграммы направленности для зонированного и асинфазного распределения поля показаны на рис.1. Наблюдать Солнце и другие источники на установках с большим числом щитов возможно в пределах ± 0.5 часа от меридиана.

В работе также рассмотрено изменение количества щитов в установках, вызванное отклонением рабочего состояния антенны от идеальной модели.

Во второй главе приведен алгоритм расчета диаграмм направленности радиогелиографа, рассмотрены характеристики диаграмм и способы их оценки. Основное внимание уделено тем характеристикам, которые важны для применения частотного сканирования и корреляционного метода построения изображений. К ним относятся амплитуда и распределение лепестков диаграммы в пространстве, характер и скорость изменения диаграмм с изменением частоты, корреляционные функции диаграмм.

Диаграммы радиогелиографа рассчитываются с помощью интерферометрического алгоритма, предложенного в работе[5]. Этот алгоритм позволяет получать диаграммы для произвольных установок антенны, легко учитывая изменения поля от щита к щиту. В данной диссертации алгоритм был модифицирован. В частности, разработан более точный способ учета размеров щита, который распространяет интерферометрическую методику расчета на всю поверхность щита. На ряде примеров продемонстрирована необходимость такого уточнения при расчете далеких лепестков диаграмм направленности. Несмотря на то, что данный алгоритм относительно прост в вычислительном отношении, необходимость расчета большого числа диаграмм размерностью в сотни тысяч точек заставляет искать способы его ускорения. Для этого была рассмотрена модификация алгоритма, основанная на приближенном вычислении фазы поля с использованием линейной интерполяции. Показано, что применение этой модификации увеличивает скорость счета в несколько раз, при этом ошибки не превышают нескольких процентов от величины основных лепестков диаграммы. Поэтому ускоренный метод может использоваться, по крайней мере, для модельных расчетов.

Хотя мы в данной работе, в основном, используем скалярный вариант расчета диаграммы, но нами также были получены формулы для расчета поляризации поля в раскрыве радиогелиографа с учетом того, что в фокусе находится облучатель типа VI, собирающий излучение всего кольца[6]. Написана программа, реализующая расчет поля, и показано наличие

[5]Гельфрейх Г.Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы направленности антенны типа РАТАН-600 с учетом аберраций и поляризационных эффектов. Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, **9**. 89-98.

[6]Есепкина Н.А., Парийский Ю.Н. Особенности работы антенн переменного профиля

паразитных поляризационных эффектов в установках радиогелиографа.

Для выбора оптимальных способов наблюдений необходимо уметь оценивать и варьировать характеристики диаграмм направленности. Характеристики диаграмм зависят от геометрии антенной установки, от типа распределения фазы поля и размера синфазного элемента n_s, где n_s – число соседних щитов, выставляемых синфазно. Амплитуда лепестков, их распределение в пространстве и величина поля зрения определяются, в основном, последними двумя параметрами. Наиболее интересным для нас типом распределения фазы является псевдослучайное, при котором формируются шумоподобные диаграммы. Лепестки шумоподобных диаграмм случайным образом заполняют большое поле зрения, что, например, наилучшим образом удовлетворяет условиям применения корреляционного метода, который был специально предложен для получения изображений в режиме радиогелиографа в работе[7].

Меняя n_s можно варьировать амплитуду лепестков и поле зрения диаграмм. При увеличении n_s поле зрения уменьшается, а амплитуда лепестков растет. Амплитуда шумоподобных диаграмм характеризуется величиной $\frac{n_s}{N}a_s$, где a_s — амплитуда главного лепестка синфазной диаграммы для соответствующей конфигурации антенны. Эта величина представляет собой среднее значение амплитуды, при этом десятки наиболее мощных лепестков имеют амплитуду в несколько раз бо́льшую. Поле зрения можно определить как область, в пределах которой сконцентрирована основная доля мощности диаграммы. Для диаграмм, показанных на рис.1 ($\lambda = 8$см), характерный размер такой области составляет $30'$ для синфазной диаграммы и 1° – для асинфазной диаграммы с $n_s = 3$. Размер поля зрения меняется с n_s медленно. Увеличение n_s приводит также и к изменению типа распределения лепестков. Если $N/n_s < 50$, где N полное число щитов в установке, то диаграмма утрачивает шумоподобную структуру.

Особый интерес для построения изображений представляют характеристики изменения диаграммы направленности с изменением частоты. Скорость изменений определяется величиной разности хода лучей, а тип изменений — зависимостью аберрационной функции (разности хода) от координат в плоскости апертуры (x, y). В данной работе для установок антенны в режиме радиогелиографа была получена следующая аберрационная функция:

при наблюдении вблизи зенита. Изв. ГАО, 1972, **188**, с.58-62

[7]Богод В.М., Гребинский А.С. Корреляционные методы формирования изображений для многоэлементных радиотелескопов. Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1997, **40**, No.7, с.801-816.

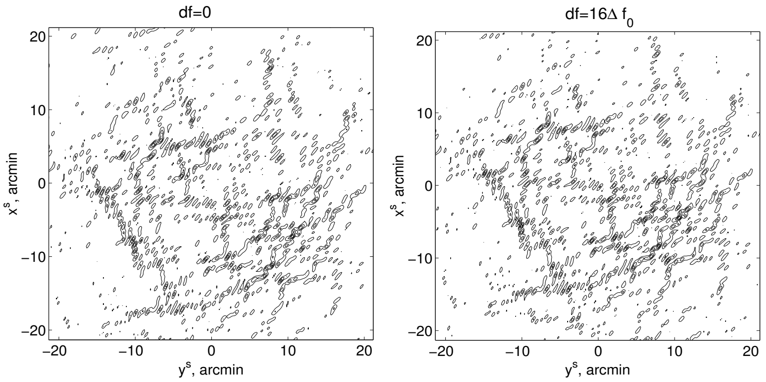

Рис. 2: Смещение асинфазной диаграммы без изменения формы при изменении частоты в установке с линейной аберрационной функцией.

$$\Delta D_k = ctg(h)x_k + \sqrt{\Big(\frac{x_k}{\sin(h)} - F\cos\gamma\Big)^2 + \Big(y_k + F\sin\gamma\Big)^2} - D_{min}$$

где h — высота источника, F — расстояние от центра антенны до фокуса, k — номер щита, γ — угол между азимутом источника и азимутом, противоположным направлению на фокус, D_{min} — константа для заданной установки. Первое слагаемое для любых установок — это линейная функция координат, которая приводит только к смещению диаграммы без изменения ее формы. Тип аберраций определяется вторым слагаемым, которое представляет собой расстояние от щитов до фокуса. Можно показать, что для установок, имеющих большую разность хода лучей, вид аберрационной функции зависит только от геометрии установки (положения источника, фокуса, расположения щитов), и не зависит от фазового распределения. Таким образом, синфазные и асинфазные диаграммы при одинаковых конфигурациях антенны будут одинаковым образом меняться с частотой.

При рассмотрении частотных аберраций мы основное внимание уделили случаям, когда ΔD_k является линейной функцией координат, и диаграмма направленности смещается в пространстве без изменений. Например, второе слагаемое практически равно константе, если фокус установки находится в центре окружности ($F = 0$). В этом случае диаграммы будут смещаться вдоль круга высот (ось x) на величину $d\Theta = ctg(h)df/f$, где f — частота наблюдений, df — изменение частоты. Пример такого поведения диаграмм приведен на рис.2, где показаны асинфазные диаграммы, расчитанные для двух частот, отличающихся примерно на 50МГц ($f = 3.75$ГГц).

Линейность аберрационной функции сохранится и при небольших отклонениях фокуса от центра, когда второе слагаемое также будет достаточно хорошо аппроксимироваться линейной функцией координат (x, y). При этом направление и скорость смещения диаграммы будут меняться в зависимости от положения фокуса. Еще один вариант линейной зависимости ΔD_k реализуется в установках антенны, по положению фокуса и числу щитов близких к стандартным. В этом случае диаграммы смещаются вдоль линии движения источника, что делает соответствующие установки непригодными для частотного сканирования.

В установках, оптимальных для наблюдений Солнца, аберрационные функции будут отличаться от линейных. При изменении частоты форма диаграмм направленности будет меняться, при этом шумоподобные диаграммы останутся шумоподобными, а при развале синфазной диаграммы будут формироваться диаграммы с регулярным распределением лепестков.

Важными характеристиками, необходимыми для разработки радиометров, являются ширина полосы частот (Δf) и оптимальное для проведения частотного сканирования расстояние между частотными каналами (df). В данной работе выбраны и обоснованы следующие способы оценки этих величин: $\Delta f = 75/\Delta D$ МГц, $df = 2\Delta f$, где ΔD[м] — максимальная разность хода лучей для главного направления диаграммы. Расчеты показывают, что в установках радиогелиографа, которые выбираются по критерию максимального количества щитов, ширина полосы частот составляет несколько МГц. Величины Δf и df не зависят от длины волны и структуры диаграммы.

Автокорреляционные функции шумоподобных диаграмм и их одномерных сечений имеют единственный узкий максимум при нулевом пространственном смещении. Корреляция между диаграммами, полученными в разных установках антенны при различных реализациях фазы поля, а также между различными одномерными сечениями диаграмм, практически отсутствует (значения коэффициентов корреляции меньше 0.1). Диаграммы с такими корреляционными характеристиками удовлетворяют условиям применения корреляционного метода построения изображений. Однако взаимная корреляция диаграмм, сформированных на разных частотах, определяется видом частотных аберраций и заметно отличается от нуля при некоторых значениях смещения. Это следует учитывать при проведении наблюдений.

На выбор диаграмм, оптимальных для наблюдений, влияет уровень искажений диаграмм, обусловленных ошибками в установке антенны. Модельные расчеты, имитирующие формирование диаграмм при ошибках установки щитов по радиусу и невыставлении отдельных щитов, показывают, что при существующей точности установки антенны, даже максимально разваленные шумоподобные диаграммы не будут существенно искажаться при наблюдениях на сантиметровых волнах.

В третьей главе рассмотрены способы получения изображений и методы их обработки. Приводятся результаты моделирования восстановления изображений, полученных при различных вариантах работы радиогелиографа, для источников различного типа.

Для построения изображений в режиме радиогелиографа можно использовать разные способы получения данных — сканирование источника с помощью перестановок антенны, частотное сканирование, а также сочетание этих способов. При этом на основной частоте наблюдений можно сформировать диаграмму направленности требуемого вида. Способ сканирования и тип диаграммы определяют варианты работы радиогелиографа. Как уже было сказано, основным способом картографирования, позволяющим быстро получать изображения протяженных источников, находящихся на средних высотах, является частотное сканирование с асинфазными диаграммами направленности. Оценки показывают, что этим способом при использовании сотни частотных каналов можно получать изображение Солнца за несколько минут, а изображение небольшой области размером порядка несколько минут дуги — практически мгновенно. Чувствительность единичного изображения по антенной, яркостной температуре и плотности потока зависит от антенной конфигурации, структуры диаграммы направленности и длины волны. Для конфигурации гелиографа, показанной на рис.1, оценки чувствительности по яркостной температуре при наблюдениях Солнца на волне 8см для синфазной диаграммы дают значения порядка 600K, а для асинфазной 6000K.

Для любого из вариантов получения изображения, включая наблюдения с относительно простыми однолепестковыми диаграммами, необходимо восстановление изображений. Эта задача для режима радиогелиографа имеет особенности. В общем случае она является пространственно-неинвариантной и отличается сложностью аппаратной функции, большими размерами кадров, на которых заданы функции, малым отношением сигнал/шум (ОСШ). Возможно также, что потребуется восстановление изображений по неполному набору исходных данных.

Рассмотрено несколько методов восстановления изображений. Во-первых, это уже упоминавшийся выше корреляционный метод. Он сводится к представлению искомого изображения через разложение по базисным функциям, в качестве которых выступают диаграммы направленности. Качество восстановленного изображения зависит от свойств базисных функций и их числа. Диаграммы должны быть шумоподобными, с автокорреляционными функциями, имеющими единственный узкий максимум, и отсутствием корреляции между различными диаграммами и их отдельными сечениями, а количество базисных функций должно быть как можно бо́льшим. Метод интересен тем, что являясь линейным и неитерационным, не требует больших вычислительных затрат и демонстрирует преимущества асинфазных диаграмм направленности. Однако модельные расчеты с использованием реальных диаграмм направленности радиогелиографа показывают, что для достижения хорошего качества изображений требуется больше базисных функций, чем может быть получено в течение ежедневного сеанса наблюдений.

Основным методом, используемым нами для восстановления изображений радиогелиографа, является метод максимальной энтропии (ММЭ)[8]. Для этого метода подробно рассмотрено качество восстановления модельных изображений при различных уровнях шума на грязной карте, различной структуре источника и диаграммы направленности, разных вариантах получения изображения, неточно заданной диаграмме и неполных данных. Моделирование демонстрирует эффективность метода максимальной энтропии в применении к данной задаче.

На рис.3 приведена модель источника (а), его грязное изображение (б), полученное с помощью частотного сканирования, и результаты восстановления корреляционным методом (в) и ММЭ (г) при уровне шума на грязном изображении 10% от максимума сигнала. Видно, что метод максимальной энтропии дает значительно лучшее качество изображения.

Для сравнения с предыдущими методами рассмотрено восстановление моделей с помощью винеровской фильтрации, которая часто используется в задачах восстановления изображений, но для режима радиогелиографа может быть применена только в некоторых частных случаях установки антенны. Расчеты показывают, что, по крайней мере, при небольшом уровне шума ММЭ дает лучшее качество, чем винеровская фильтрация.

[8]Байкова А.Т. Численное решение задачи восстановления изображений в радиоастрономии методом максимальной энтропии. Препринт ИПА АН СССР, 1990, No.13.

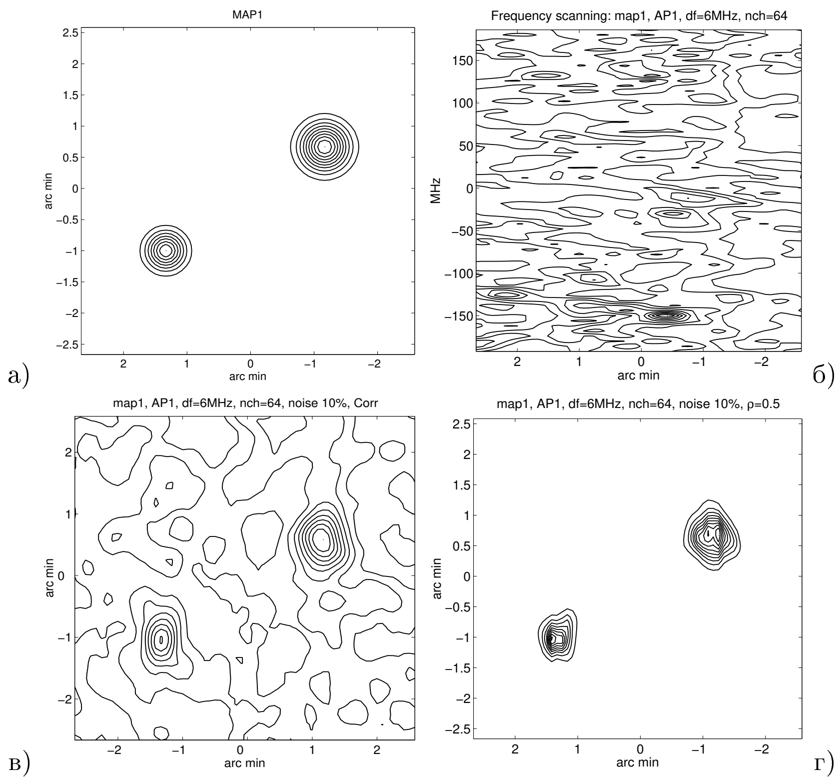

Рис. 3: а– модель источника; б– грязное изображение; в,г– результаты его восстановления корреляционным методом и ММЭ.

Результаты восстановления с помощью ММЭ и винеровской фильтрации также показывают, что изображения простых источников могут быть восстановлены при малом отношении сигнал/шум на изображении. Удовлетворительное качество восстановления с помощью ММЭ имело место при ОСШ=1, а при применении оптимальной винеровской фильтрации основные детали источника восстанавливались при ОСШ=0.3.

В четвертой главе описаны особенности получения данных, параметры аппаратуры и результаты пробных наблюдений в режиме радиогелиографа. Целью наблюдений было показать возможность практической реализации режима радиогелиографа и оценить соответствие расчетных и

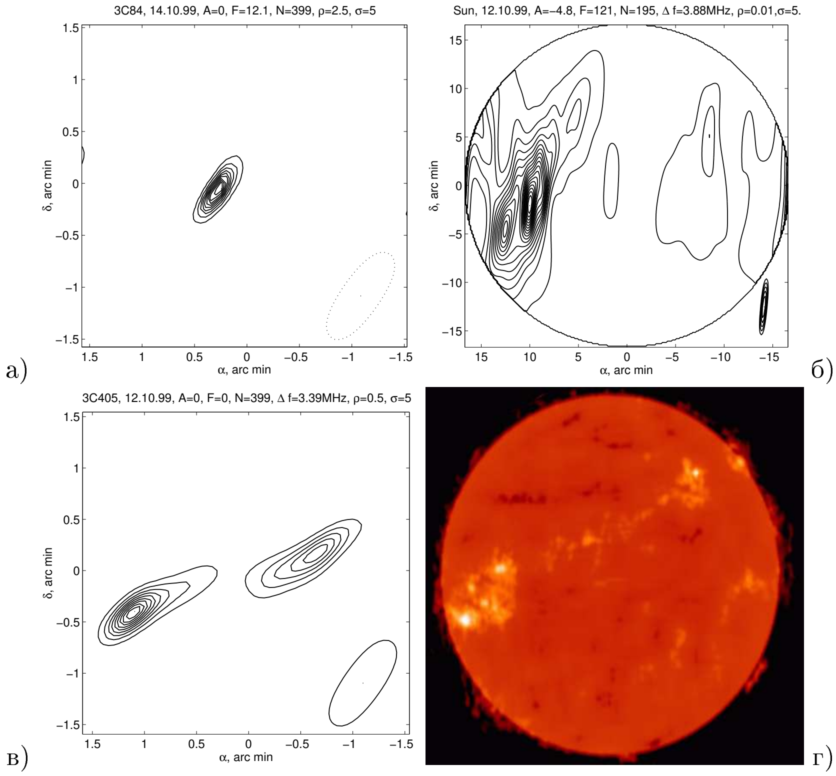

Рис. 4: Примеры изображений 3C84 (а), Лебедь А (в) и Солнца (б), полученных в режиме радиогелиографа РАТАН-600.

реальных диаграмм направленности. Для наблюдений использовался 32-х канальный спектроанализатор с центральной частотой 3.75ГГц, расстоянием между каналами 2.5МГц и полосой одного канала 1МГц. Наблюдались источники 3C84, Лебедь А, Крабовидная туманность и Солнце.

Результаты наблюдений околозенитных источников, 3C84 и Лебедь А, демонстрируют качественное согласие основных деталей лепестковой структуры расчетных и наблюдаемых диаграмм направленности и подтверждают правильность модельных представлений об изменениях диаграмм с частотой. Имеется соответствие между наблюдениями и расчетом как для синфазных, так и для асинфазных диаграмм направленности.

С помощью частотного сканирования получены двумерные изображения источников, примеры которых приведены на рис.4. Каждое изображение получено за несколько минут при одном прохождении источника через набор диаграмм направленности, формирующихся в разных частотных каналах. Следует отметить, что показанное на рис.4в изображение источника Лебедь А получено в асинфазном режиме наблюдений. Для сравнения с изображением Солнца, построенном с помощью радиогелиографа (рис.4б), на рис.4г приведено радиоизображение на волне 1.76см, полученное в этот же день на радиогелиографе в Nobeyama (взято из архива solar.nro.nao.jp/norh/html/daily/). Изображения восстанавливались с помощью метода максимальной энтропии. Все изображения правильно воспроизводят наиболее яркие детали источников.

Результаты моделирования и наблюдений, полученные в данной работе, говорят о перспективности применения на РАТАН-600 метода радиогелиографа, для чего требуется дальнейшее изучение и совершенствование этого режима.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. На примере РАТАН-600 исследован новый способ построения изображений, сочетающий в себе частотное сканирование и использование несинфазного облучения антенны.

2. Создана компьютерная модель радиогелиографа РАТАН-600, позволяющая рассчитывать большое число разнообразных установок антенны и соответствующих им диаграмм направленности, оценивать их характеристики, имитировать наблюдения и восстанавливать изображения радиоисточников. Помимо моделирования, созданный пакет программ может применяться для проведения и обработки наблюдений.

3. С помощью моделирования проанализированы параметры различных установок антенны и характеристики диаграмм направленности. Подробно рассмотрена зависимость количества элементов в установках от положения источника и фокуса для разных моделей антенны, и показано, что в наблюдениях Солнца может быть использовано более 2/3 поверхности главного отражателя. Для диаграмм направленности при различных вариантах распределения фазы поля в

апертуре сделаны оценки амплитуды лепестков, величины поля зрения, корреляционных характеристик. Обоснованы простые способы оценки ширины полосы частот и расстояния между каналами радиометра, позволяющие вычислить эти величины для большого числа различных установок и выбирать наиболее подходящие для наблюдений. Показано, что обычные ошибки в установке антенны не будут заметно искажать асинфазные диаграммы при наблюдениях на сантиметровых волнах.

4. На основе анализа зависимости фазовой функций поля от координат в апертуре рассмотрены изменения диаграмм направленности радиогелиографа с частотой. Показано, что в установках с большой разностью хода тип изменений диаграмм направленности с частотой не зависит от фазового распределения на основной частоте и определяется геометрией установки (положением фокуса, расположением щитов). Выделены установки с линейной аберрационной функцией, в которых форма диаграмм направленности не меняется с частотой. Внимание к таким установкам связано с тем, что, во-первых, появляется возможность свести задачу построения изображения к пространственно-инвариантной и упростить обработку, во-вторых, некоторые из таких установок непригодны для получения изображений и их следует избегать.

5. Оценена возможность применения корреляционного метода для получения изображений в режиме радиогелиографа. Исследовано качество восстановления модельных изображений с помощью метода максимальной энтропии. Показано, что для радиогелиографа метод максимальной энтропии дает более качественные результаты, чем корреляционный метод. ММЭ можно использовать для любых вариантов картографирования в режиме радиогелиографа, он позволяет получить удовлетворительные результаты при малом отношении сигнал/шум (~ 1) и неполном наборе исходных данных.

6. Проведены первые наблюдения Солнца и других радиоисточников в режиме радиогелиографа, которые подтвердили возможность быстрого получения изображений с помощью данного метода и на примере околозенитных источников показали соответствие наиболее мощных лепестков расчетных и наблюдаемых диаграмм направленности как для синфазного, так и для асинфазного способа наблюдений.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1*. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Гребинский А.С., Опейкина Л.В. Корреляционный радиогелиограф на базе РАТАН-600 // Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1995, **39**, No.5, с.527-537.

2*. Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Grebinskij A.S., Opeikina L.V. The Radio Heliograph of RATAN-600 / In:"Second Advances in Solar Physics Euroconference: Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions", Alissandrakis C.E, Schmieder B. (eds.), ASP Conference Series, 1998, **vol.155**, p.279-283.

3*. Gelfreikh G.B., Opeikina L.V. Investigation of parameters of antenna settings for radioheliograph operation // Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2000, **50**, p.104-114.

4*. Gelfreikh G.B., Opeikina L.V. Frequency scanning with RATAN-600 as a radioheliograph // Bull. Spec. Astrophys. Obs., 2002, **53**, p.95-108.

5*. Гельфрейх Г.Б., Опейкина Л.В. Анализ диаграммы направленности РАТАН-600 в режиме радиогелиографа с облучателем типа VI: Тез. докл., XXII Всесоюзная конференция "Радиотелескопы и интерферометры", Ереван, 1990, с.89.

6*. Гельфрейх Г.Б., Опейкина Л.В. Моделирование работы РАТАН-600 в режиме радиогелиографа. Препринт САО РАН, 1992, No.96, 31с.

7*. Гельфрейх Г.Б., Опейкина Л.В., Богод В.М. Радиогелиограф РАТАН-600: Тез. докл., XXV Радиоастрономическая конференция, Пущино, 1993, с.162.

8*. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Гребинский А.С., Опейкина Л.В. Расчеты многолепестковых диаграмм в различных режимах работы радиогелиографа РАТАН-600: Тез. докл., XXVII Радиоастрономическая конференция "Проблемы современной радиоастрономии", Санкт-Петербург, 1997, т.3, с.46-47.

9*. Богод В.М., Гребинский А.С., Опейкина Л.В. О корреляционном методе синтеза изображений в режиме радиогелиографа на РАТАН-600: Тез. докл., XXVII Радиоастрономическая конференция "Проблемы современной радиоастрономии", Санкт-Петербург, 1997, т.3, с.48-49.

10*. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Гребинский А.С., Комар Н.П., Опейкина Л.В., Перваков А.А. Картографирование объектов в режиме радиогелиографа РАТАН-600: Тез. докл., Международная конференция "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии", Санкт-Петербург, 2000, с.203-204.

11*. Опейкина Л.В., Гельфрейх Г.Б. Частотное сканирование в режиме радиогелиографа РАТАН-600: Тез. докл., Всероссийская астрономическая конференция, Санкт-Петербург, 2001, с.135.

12*. Опейкина Л.В., Тохчукова С.Х., Богод В.М. Реализация многоволнового картографирования на РАТАН-600: Тез. докл., Российская конференция памяти А.А. Пистолькорса "Радиотелескопы РТ-2002 (антенны, аппаратура, методы)", Пущино, 2002, с.84.

13*. Опейкина Л.В. Построение изображений в режиме радиогелиографа РАТАН-600: Тез. докл., Российская конференция памяти А.А. Пистолькорса "Радиотелескопы РТ-2002 (антенны, аппаратура, методы)", Пущино, 2002, с.83.

14*. Опейкина Л.В. Режим радиогелиографа РАТАН-600. Получение и восстановление изображений. Препринт САО РАН, 2003, No.181, 30с.

Личный вклад автора. Во всех исследованиях автор принимал участие в постановке задачи, анализе и интерпретации результатов. Автору принадлежит разработка комплекса программ и выполнение компьютерного моделирования. Работы по применению метода максимальной энтропии к восстановлению изображений, полученных в режиме радиогелиографа, выполнены без соавторов. В работах, написанных в соавторстве, автором:

[3*, 5*, 6*, 7*, 8*] — решена задача выбора оптимальных установок антенны для наблюдений в режиме радиогелиографа, усовершенствован алгоритм расчета диаграммы направленности и проанализированы свойства диаграмм для различных вариантов работы радиогелиографа, сделаны оценки параметров приемной аппаратуры;

[1*, 2*, 9*] — оценена возможность применения корреляционного метода для восстановления изображений, получаемых в режиме радиогелиографа;

[10*] — проведены и обработаны наблюдения, рассмотрены особенности частотного сканирования;

[4*, 11*] — проделано аналитическое рассмотрение частотных аберраций диаграмм направленности радиогелиографа, даны рекомендации по проведению частотного сканирования и выбору полосы частот и расстояния между каналами радиометра;

[12*] — рассмотрена возможность многоволнового картографирования в режиме радиогелиографа.

Бесплатно

Опейкина Лариса Викторовна

Радиотелескоп РАТАН-600 в режиме
радиогелиографа

Зак. N166с Уч. изд. л. – 1.3 Тираж 100

Специальная астрофизическая обсерватория РАН