

АЗИМУТАЛЬНЫЙ АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ СОЛНЦА НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 В РЕЖИМЕ «ЮГ С ПЕРИСКОПОМ»

В. С. Минченко

Описан алгоритм построения двумерных радиоизображений Солнца на РАТАН-600 по результатам наблюдений в различных азимутах на южном секторе с перископом.

An algorithm of obtaining two-dimensional radiomaps of the Sun with the RATAN-600 using azimuthal observations in the southern sector and periscope is described.

Как известно, в режиме «юг+перископ» диаграмма направленности радиотелескопа РАТАН-600 имеет ножевую форму, и для синтеза двумерных изображений из совокупности наблюдений в различных азимутах могут быть применены алгоритмы построения объекта по его проекциям [1—3]. Подобный алгоритм был предложен и опробован на моделях источников [4], однако специфика радиоастрономических наблюдений на РАТАН-600, и в частности специфика наблюдений Солнца, не учитывалась. Между тем практический синтез на РАТАН-600 должен учитывать целый ряд особенностей самого инструмента и методики наблюдений на нем, без учета которых нельзя добиться корректных результатов.

Перечислим те особенности, присущие наблюдениям Солнца на южном секторе с перископом, которые необходимо «запрограммировать» при создании алгоритма.

1. Синтез полного диска Солнца по проекциям возможен только на длинных волнах рабочего диапазона РАТАН-600. На коротких волнах вертикальный размер «ножа» диаграммы сравним или даже меньше углового диаметра Солнца. Следовательно, на коротких волнах можно синтезировать лишь часть солнечного диска. При этом синтезируемая область не должна включать в себя край диска и, кроме того, в периферию диаграммы не должны попадать посторонние источники. Эти ограничения становятся очевидными, если вспомнить, что ножевая диаграмма должна проектировать двумерное изображение на направление сканирования и при этом проекция свертывается с профилем ножевой диаграммы. Реальная ножевая диаграмма имеет огибающую, определяемую диаграммой элемента отражающей поверхности.

2. В режиме пассивного синтеза, при котором диаграмма движется по источнику только за счет вращения неба, движение диаграммы происходит под углом $90^\circ + r$ к ее большой оси (позиционный угол r определяет наклон «ножа» и связан со склонением δ и азимутом параболы южного сектора выражением $\sin r = -\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} A_p$, при $\delta > 0$, $A_p < 0$ — для утренних наблюдений; $A_p > 0$ — для вечерних. Для случая $\delta_\odot > 0$ утренние азимуты соответствуют положительным углам r (1-й квадрант на $U-V$ -плоскости), вечерние азимуты — отрицательным r (4-й квадрант). Для $\delta_\odot < 0$ картина обратная (рис. 1). Движение диаграммы под углом $90^\circ + r$ приводит к растяжению проекций в $\cos r$ раз.

3. Геометрия системы позволяет получить весьма малый диапазон позиционных углов r , т. е. на $U-V$ -плоскости синтезируется узкий сектор.

4. Неточность установки отражателя антенны приводит к тому, что сканируемая область попадает не в центр «ножа» диаграммы.

С учетом данных моментов на основе алгоритма [4] был разработан алгоритм построения изображений Солнца (или его части), который описан в настоящей статье.

Описание алгоритма. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2. Обоснование метода синтеза изображения по наблюдательным данным приводилось в [4]. Здесь только напомним, что в основе метода лежит синтез двумерного спектра пространственных частот объекта по набору одномерных спектров $\bar{A} \cdot \bar{\Psi}$, где $\bar{A} = FA$ — спектр профиля ножевой диаграммы A ; $\bar{\Psi} = F\Psi$ — спектр проекции Ψ источника на направление сканирования; F означает оператор Фурье. Само изображение объекта получается обратным двумерным преобразованием Фурье от синтезированного спектра.

Поясним теперь работу алгоритма. Исходная информация находится в специальном архиве мониторингной системы [5]. Она представляет собой отклики ис-

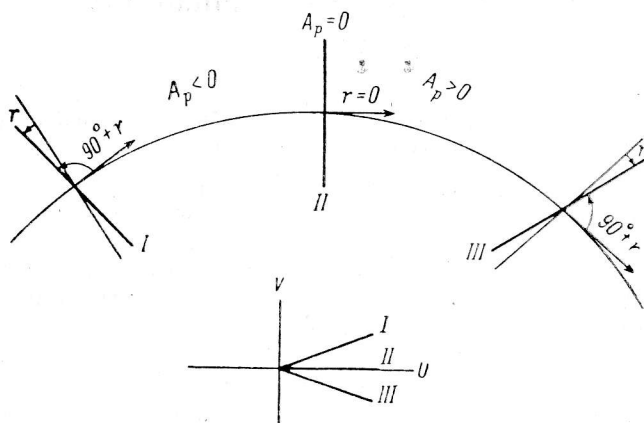


Рис. 1. Схема пассивного азимутального синтеза на южном секторе с перископом.

точника (Солнца) на сканирование диаграммой под разными позиционными углами, выраженные в градусах антенной температуры. Кроме того, архив содержит информацию о телескопе, источнике, условиях наблюдения (положение облучателя, азимуты, склонение, длина волны, шаг дискретизации и т. д.).

Отклики (сканы) вводятся поочередно. С учетом последующего применения специального алгоритма двумерного БПФ для больших матриц (превышающих объем оперативной памяти) число отсчетов сканов дополняется нулями до ближайшей степени 2.

Если синтезируется не весь диск (случай коротких волн), определяется амплитуда «спокойного» Солнца. Затем выполняется переупорядочение и сжатие сканов. При сжатии точка момента кульминации на всех сканах остается на месте (сохраняя тем самым временную привязку), в то время как все интервалы между отсчетами, которые одинаковы для всех азимутов на данной волне, уменьшаются в $\cos r$ раз. Начало координат следует выбирать в центре синтезируемой области (в этом случае оно будет находиться в центре каждого скана), с тем чтобы при последующей интерполяции двумерного спектра избежать дополнительных ошибок, вызванных появлением фазовых составляющих в спектрах сканов). Переупорядочение и заключается в переносе начала координат с момента начала записи в момент кульминации. Данные при этом преобразуются, как показано на рис 3.

Если синтезируется часть диска, необходимо вычистить «спокойное» Солнце. Тогда синтез активных областей выполняется на фоне пустого неба, без пьедестала «спокойного» Солнца. Для удаления пьедестала принимаем модель «спокойного» Солнца в форме равномерно освещенного диска с радиусом, равным радиусу радиосолнца, свернутого с диаграммой радиотелескопа. Полагая, что диаграмма одинакова для всех азимутов, вычисляем (один раз при обработке одного скана) реальную двумерную диаграмму, центральная часть «ножа» которой находится в пределах синтезируемой области Солнца. Расчет производится по методу [6]. Двумерная свертка с диском вычисляется с помощью про-

граммы, составленной В. Н. Боровик. Из каждого скана вычитается с учетом амплитудного масштаба результат этой свертки, а также рассеянный фон, вызванный погрешностями антенны, расчет которого приводится в [7].

Из скана выбирается интересующий нас участок или окно (стробирование), число его отсчетов дополняется до степени 2, затем расширенное окно переупорядчивается согласно рис. 3 и вычисляется БПФ, дающее сечение на $U-V$ -плоскости.

При синтезе полного диска переход к сечениям на $U-V$ -плоскости выполняется сразу после сжатия сканов.

Ввиду вещественности сканов вычисляются лишь половины их спектров.

Очевидно, что потоки на всех азимутах должны быть одинаковыми, но из-за неточ-

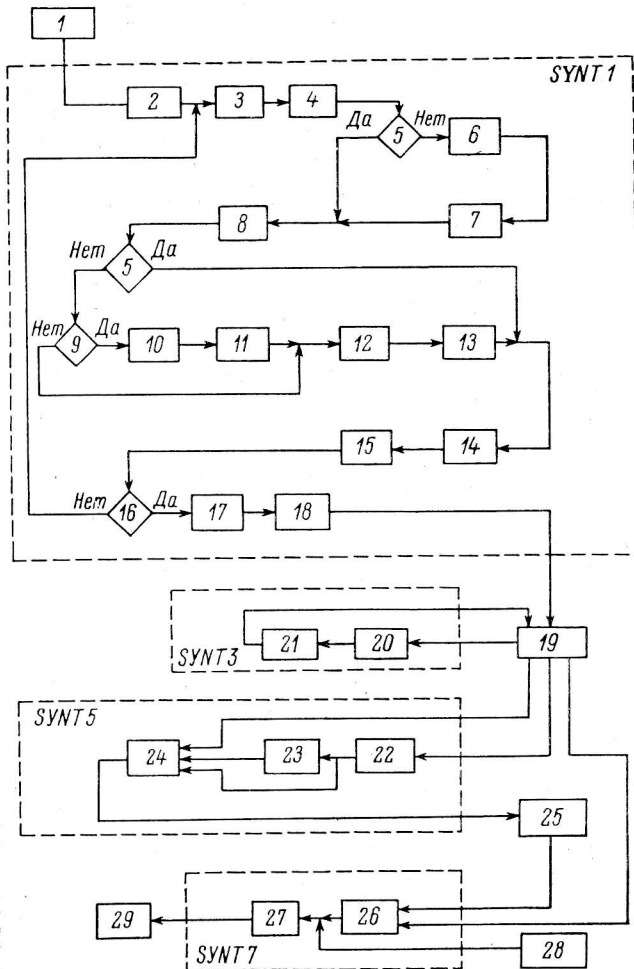


Рис. 2. Блок-схема алгоритма синтеза изображений.

1 — архив; 2 — ввод вспомогательной информации; 3 — ввод скана; 4 — расширение скана до ближайшей степени 2ⁿ; 5 — весь диск синтезируется?; 6 — выбор точки, где Солнце «спокойное»; 7 — определение амплитуды «спокойного» Солнца; 8 — переупорядочение и сжатие скана; 9 — обрабатывается первый скан?; 10 — расчет двумерной диаграммы; 11 — свертка диаграммы с равномерно освещенным диском; 12 — вычитание «спокойного» Солнца и рассеянного фона; 13 — стробирование скана; 14 — переупорядочивание для БПФ; 15 — БПФ; 16 — все сканы обработаны?; 17 — привязка сканов по потокам; 18 — интерполяция двумерного спектра на верхней $U-V$ -полушарности; 19 — рабочий файл GSO.WRK; 20 — обратное двумерное БПФ; 21 — обратное переупорядочивание матрицы изображения; 22 — расчет синтезированной диаграммы; 23 — расчет «чистой» диаграммы; 24 — очистка; 25 — рабочий файл TEST 12; 26 — ввод изображений и вспомогательной информации; 27 — графическое отображение изолиниями; 28 — библиотека ГРАФОР; 29 — графопостроитель.

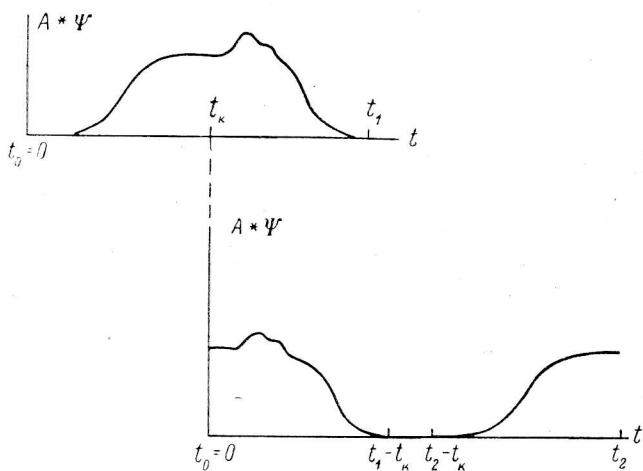
ности установки отражателя антенны область синтеза будет попадать не в центр «ножа», что нарушит это условие. Наилучшая установка антенны дает максимальный поток, к которому должны быть приравнены все остальные потоки. Привязка потоков выполняется в спектральной области.

Полученные отсчеты являются отсчетами двумерного спектра пространственных частот в точках, лежащих на семействе прямых. Интерполяция двумерного спектра на регулярную прямоугольную сетку производится по простой формуле, в которой значение в узле вычисляется как взвешенное среднее четырех ближайших синтезированных отсчетов, лежащих по 2 на двух сечениях, между которыми находится узел. Веса обратно пропорциональны расстояниям от этих отсчетов до узла. Интерполяция, проводимая отдельно для вещественных и для мнимых составляющих, производится только на верхней $U-V$ -полушарности, причем спектр полагается равным нулю во всех узлах, координата V которых превышает граничную синтезированную частоту $V_{гп}$. Так как суммарное число комплексных отсчетов на $U-V$ -полушарности весьма велико, то спектр вычисляется построчно и комплексная строка после вычисления заносится на диск в специальный рабочий файл GSO.WRK.

Обратное двумерное БПФ от половины двумерного комплексного спектра дает синтезированное (т. н. «грязное») изображение, которое располагается

в том же файле GSO. WRK на месте исходного спектра последовательно по столбцам. После БПФ осуществляется обратный перенос начала координат в угол изображения, при этом матрица изображения преобразуется, как показано на рис. 4, т. е. к привычной форме.

Обычно изображение нуждается в коррекции. В настоящей версии алгоритма используется метод чистки [8]. Для чистки необходимо вычислить синтезированную («грязную») и «чистую» диаграммы. Синтезированная диаграмма рассчитывается по той же схеме, что и изображение. Вычисляется профиль ножевой диаграммы, берется его БПФ, дающее сечение двумерной спектральной функции радиотелескопа. Так как профиль диаграммы в азимутах не меняется, сечения на других позиционных углах будут аналогичными. Для соответствия синтезированной диаграммы синтезированной карте используется аналогичная интерполяция. Обратное двумерное БПФ дает синтезированную диаграмму по



мощности. Чистая диаграмма берется в виде двумерной гауссианы с размерами луча по половинному уровню, совпадающими с размерами главного лепестка синтезированной диаграммы. Из ряда разновидностей чистки используется алгоритм

Рис. 3. Переупорядочение скана для БПФ.

Вверху — исходный скан; t_0 — начало; t_k — момент кульминации, t_1 — конец; внизу — переупорядоченный скан, дополненный нулями до 2^N в интервале t_1-t_k , t_2-t_k .

WINDOW CLEAN, при котором чистится не вся область, а некоторое окно в ней, задаваемое пользователем, которое содержит источники (напомним, что наша двумерная область расширена нулями). Весовой коэффициент γ может меняться от итерации к итерации. Очищенное изображение записывается в другой рабочий файл TEST12, так как исходное синтезированное изображение необходимо сохранить.

Графическое отображение карт в виде изолиний общепринято в радиоастрономии. Синтезированная («грязная») или чистая карта считывается в память вместе с данными, необходимыми для полноты представления (координаты, шаг между дискретами, размеры луча и т. д.). Программы графического отображения взяты из известной библиотеки ГРАФОР. Работа алгоритма заканчивается выдачей изображений на графопостроитель.

Структура алгоритма. Алгоритм синтеза построен по модульному принципу. Каждый модуль представляет собой подпрограмму, выполняющую некоторые операции из всего процесса обработки. Все подпрограммы в виде загрузочных модулей находятся в специальной библиотеке MBS.LOAD. Там же находятся вызывающие программы. Вообще говоря, достаточно иметь одну вызывающую программу, которая в процессе выполнения синтеза вызывала бы необходимые в данный момент подпрограммы. Однако по ряду причин оказалось целесообразным разделить алгоритм на части. В настоящей версии имеется 4 вызывающих модуля с именами SYNT1, SYNT3, SYNT5, SYNT7, которые запускаются на исполнение поочередно в перечисленном порядке. На блок-схеме (рис. 2) границы модулей обозначены штриховыми линиями. Поясним необходимость такого деления алгоритма.

Модуль SYNT1. При расчете амплитуды «спокойного» Солнца и величины рассеянного фона принимаются следующие допущения: 1) Солнце считается «спокойным» на границе выбранного окна на диске; 2) рассеянный фон по методу [7] рассчитывается из условия, что распределение яркости по источнику равномерно. Отсюда видно, что границы окна следует выбирать тщательно, не

допуская, чтобы активная область попадала на какую-либо из них. Ошибку в определении фона можно уменьшить, введя поправочный коэффициент, чуть меньший 1, который учитывает фактическую неравномерность распределения по источнику. Следовательно, необходимо иметь возможность корректировать положение границ окна и величину поправки. Пользователь имеет возможность распечатать любой скан после удаления «спокойного» Солнца и фона и в случае необходимости запустить модуль SYNT1 повторно с уточненными данными.

М о д у л ь SYNT3. Выделение модуля вызвано следующими причинами: 1) в ряде случаев не требуется последующей чистки синтезированной карты, и, следовательно, обработка на этом заканчивается; 2) при работе с относительно небольшими изображениями (например, 64×64), матрицы которых могут быть размещены целиком в памяти ЭВМ, целесообразно отказаться от использова-

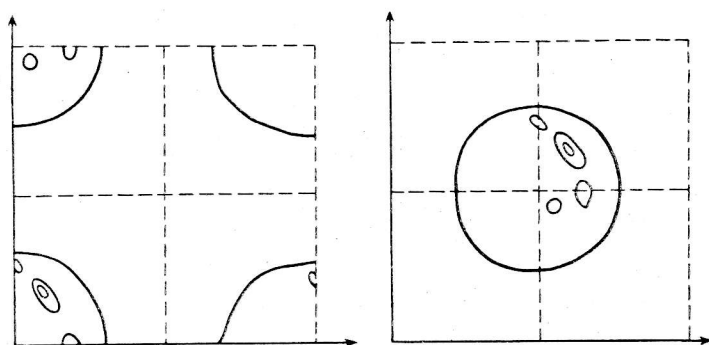


Рис. 4. Обратное переупорядочение карты после двумерного БПФ.

ния диска при выполнении двумерного БПФ, так как многократные обращения к диску увеличивают время счета. В этом случае следует использовать стандартную программу вычисления двумерного БПФ, также имеющуюся в библиотеке и вызываемую внутри модуля SYNT3M, который в данном случае заменит в общей схеме модуль SYNT3.

М о д у л ь SYNT5. Этот модуль реализует традиционный вариант чистки изображений. Однако следует предусмотреть возможность применения других модификаций чистки или даже других методов, например метода максимальной энтропии. Следовательно, нужно предусмотреть возможность замены модуля SYNT5.

Разбиение алгоритма предоставляет также возможность подключения дополнительных модулей, благодаря чему пользователь сможет изменять методы обработки. Укажем некоторые возможности, которые уже программируются.

М о д у л ь SYNT2. Предполагается использование дополнительных измерений спектра пространственных частот этого же источника, полученных на других телескопах с целью улучшения качества заполнения $U-V$ -плоскости и в особенности улучшения синтезированного разрешения по δ . В модуле будет производиться суперпозиция двумерных спектров. Запуск SYNT2 будет происходить после запуска SYNT1.

М о д у л ь SYNT4 должен запускаться при условии включения в схему вычислений модуля SYNT2. Предназначен для расчета синтетической диаграммы, соответствующей $U-V$ -плоскости, синтезированной в модуле SYNT2. Включается перед модулем SYNT5, который теперь должен запускаться с дополнительного входа (не требуется расчет синтезированной диаграммы одиночного телескопа).

М о д у л ь SYNT6 заменит модуль SYNT5 при необходимости применить модифицированный метод чистки вместо стандартного.

Апробация алгоритма. Специфика наблюдений Солнца, как видно из рис. 2, учитывается лишь в модуле SYNT1. Остальные модули вызывают достаточно универсальные подпрограммы, которые используются и в совершенно других

Заключение. Модельные эксперименты и приведенный пример подтверждают работоспособность алгоритма. Алгоритм прост в эксплуатации, требует минимального количества данных, вводящихся пользователем извне.

Автор благодарен Г. Б. Гельфрейху за поддержку работы и А. Н. Коржавину за многие полезные обсуждения.

Литература

1. Bracewell R. N. Strip integration in radio astronomy. — *Austr. J. Physics*, 1956, 9, N 2, p. 198—217.
2. Bracewell R. N., Riddle A. C. Inversion of fan-beams scans in radio astronomy. — *Astrophys. J.*, 1967, 150, N 2, p. 427—435.
3. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — *Изв. ГАО*, 1972, 188, с. 13—39.
4. Минченко Б. С. Синтез двумерных радиоизображений с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Автореф. канд. дис. М., 1979. 21 с.
5. Андрианов С. А., Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Комплекс программ первичной обработки солнечных наблюдений на РАТАН-600. — В кн.: Тезисы докладов на XI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. Ереван, 1982, с. 386—387.
6. Гельфрейх Г. Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы направленности антенны РАТАН-600. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1976, 9, с. 89—98.
7. Крат О. И. Восстановление свертки диаграммы рассеянного фона и источника на записи протяженного источника. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1982, 15, с. 106—109.
8. Högbom J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. — *Astron. a. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1974, 15, p. 417—426.

Поступила в редакцию 30.11.83