

УДК 52—77

СИНТЕЗ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Б. С. Минченко

Описываются алгоритмы построения радиокарт источников, наблюдаемых на радиотелескопе РАТАН-600 методом азимутального апертурного синтеза при ножевой и произвольной диаграммах направленности. Приводятся примеры синтезированных изображений.

Радиотелескоп РАТАН-600, являющийся антенной переменного профиля (АПП), представляет собой систему, в которой сигналы от всех элементов апертуры синфазно складываются в общем фазовом центре, где в каждый момент времени происходит формирование отдельного фрагмента изображения исследуемого объекта. Синтез полного изображения из совокупности фрагментарных происходит при сканировании объекта по различным траекториям.

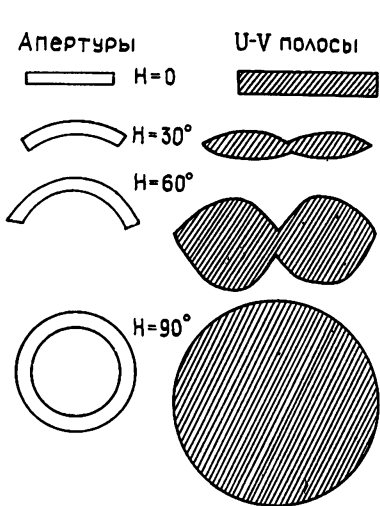


Рис. 1.

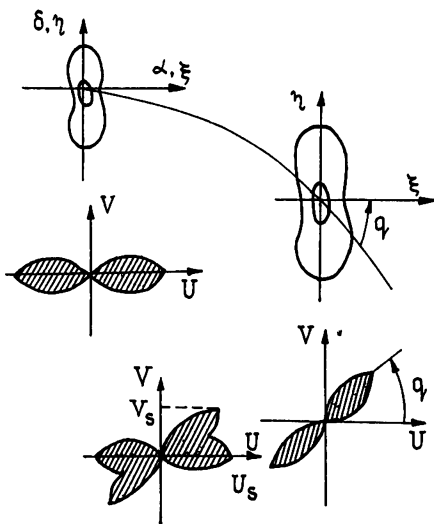


Рис. 2.

Рис. 2. Пассивный азимутальный синтез.

Особенностью радиотелескопа РАТАН-600 как инструмента типа АПП является зависимость формы синфазного раскрыва и, следовательно, размеров двумерной U, V -полосы пропускания от высоты наблюдения. На рис. 1 [1] показаны качественно апертуры и полосы пропускания для нескольких углов места H . Видно, что за исключением случая $H=90^\circ$ при работе с полным круговым отражателем угловое разрешение по склонению хуже, чем по прямому восхождению.

При наблюдениях источника в различных азимутах ориентация диаграммы относительно системы координат, связанной с источником,

меняется и, поскольку вертикальный размер диаграммы всегда больше ее горизонтального размера (кроме случая $H = 90^\circ$), достигаются более высокие угловые разрешения в различных направлениях по исследуемому источнику. Объединяя результаты наблюдений, выполненных в различных азимутах, можно получить синтезированное изображение источника с улучшенным разрешением по склонению.

Возможны две модификации азимутального синтеза. Здесь рассматривается так называемый пассивный синтез, при котором движение диаграммы направленности относительно источника осуществляется лишь за счет суточного вращения неба. Ввиду малых угловых размеров подавляющего большинства радиоастрономических объектов можно полагать, что траектория движения диаграммы по объекту является прямой линией, параллельной оси, вдоль которой отсчитывается прямое восхождение α .

Как видно из рис. 2, при азимутальном синтезе синтезируется разрешение по δ . Вертикальный размер синтезированной апертуры определяется максимальным позиционным углом q , вычисляемым из параллактического треугольника.

Незаполненность апертуры РАТАН-600 приводит к тому, что диаграмма имеет сложную многолепестковую структуру. Однако при наблюдениях на малых высотах или при использовании плоского перископического зеркала форма диаграммы становится близкой к ножевой. Это приводит к двум совершенно различным алгоритмам синтеза изображений источников, которые рассматриваются ниже.

1. СИНТЕЗ С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ

Существующие методы синтеза базируются на допущении, что регистрируемый на выходе радиотелескопа сигнал представляет собой свертку профиля ножевой диаграммы с проекцией наблюдаемого источника на направление сканирования. При этом ножевая диаграмма представляется в виде функции с разделяющимися переменными

$$A(x, y) = A_1(x)A_2(y), \quad (1)$$

причем $A_2(y) = \text{const}$.

Угловые размеры источника должны быть значительно меньше вертикального размера ножевой диаграммы, и, кроме того, источник должен быть изолированным. В рабочем диапазоне РАТАН-600 как раз типичны редкие компактные источники, и условие (1) удовлетворяется.

В этом случае известное уравнение антенного сглаживания

$$T_a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x - \xi, y - \eta) T_b(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (2)$$

где $T_b(\xi, \eta)$ — истинное распределение радиояркости, $A(\xi, \eta)$ — диаграмма направленности по мощности, $T_a(x, y)$ — наблюдаемое распределение, ξ, η — прямоугольные координаты (направляющие косинусы), преобразуется в одномерную свертку:

$$T_a(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x - \xi) T_b(\xi, \eta) d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{\infty} A(x - \xi) \Psi(\xi) d\xi, \quad (2a)$$

$\Psi(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} T_b(\xi, \eta) d\eta$ — проекция T_b на направление вдоль ξ .

По набору функций вида (2a) необходимо построить изображение объекта $T_b(\xi, \eta)$.

Впервые задача синтеза радиоизображений, сглаженных ножевой диаграммой, рассматривалась в [2]. Позже аналогичные задачи синтеза объектов по проекциям были решены и в других областях: медицине, биологии, кристаллографии. Решение всех этих задач основано на теореме о проекциях и сечениях, которая устанавливает, что преобразование Фурье проекции является сечением преобразования Фурье проектируемого объекта. Рис. 3 иллюстрирует эту связь для случая ножевых диаграмм.

Все существующие методы решения можно разделить на две основные группы: синтез в сигнальном пространстве и синтез в пространстве спектров Фурье, причем каждая группа имеет свои преимущества и недостатки. Для РАТАН-600 были разработаны два метода, один из которых полностью реализовывался в пространстве спектров [3], а другой основывался на так называемом синтезе проектирующих функций [4] и работал как со спектрами, так и с самими сигналами. К недостаткам последнего метода следует отнести повышенную чувствительность к шумам и существенную зависимость качества синтезируемого изображения от числа проекций.

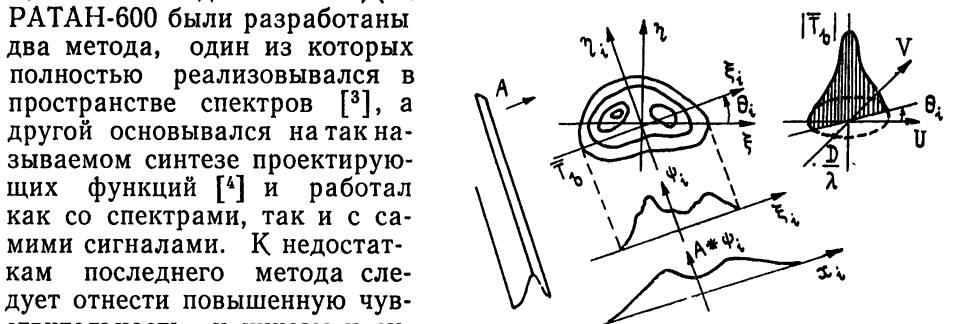


Рис. 3. Отклик при ножевой диаграмме и соответствующий образ на $U-V$ -плоскости.

При наблюдениях на РАТАН-600 обычно синтезируется довольно узкий сектор на $U-V$ -плоскости, и число проекций оказывается недостаточным. Кроме того, машинная реализация метода проектирующих функций при превышении числа отсчетов объема оперативной памяти ЭВМ становится практически невозможной.

В силу указанных причин в качестве базового был выбран первый метод, который впоследствии был дополнен и усовершенствован. Ниже кратко описывается последняя версия алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 4.

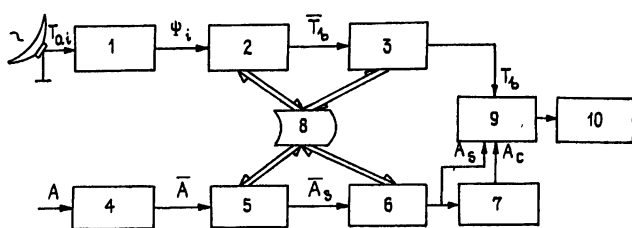


Рис. 4. Блок-схема алгоритма синтеза при ножевой диаграмме направленности:

1—коррекция сканов, 2—интерполяция спектра пространственных частот, 3—обратное двумерное БПФ, 4—БПФ, 5—интерполяция спектра пространственных частот, 6—обратное двумерное БПФ, 7—расчет чистой диаграммы, 8—диск, 9—чистка, 10—графическое отображение.

1. Коррекция сканов. Результатом наблюдения является набор сканов, от которого надо перейти к функциям (2а). Для этого сканы должны пройти первичную обработку, включающую проведение нуля, сглаживание, исправление за постоянную времени интегрирующего звена радиометра, привязку положения каждого скана к началу выбранной системы координат. Начало координат следует выбирать в

центре синтезируемой области неба; в этом случае оно будет находиться в центре каждого скана. Следует также учесть, что при пассивном синтезе ножевая диаграмма перемещается по объекту не перпендикулярно своей большой оси (за исключением наблюдений в меридиане), а вдоль оси ξ . Это приводит к сжатию дискретов в $\cos q$ раз по сравнению с дискретами для меридианного скана.

Выполнив все перечисленные операции со сканами, получаем набор (2а). Для перехода от T_{ai} к проекциям Ψ_i необходимо решить обратную задачу, перейдя к спектрам Фурье,

$$\bar{T}_{ai}(U_i) = \bar{A}(U_i) \bar{\Psi}_i(U_i), \quad (3)$$

где черта сверху означает преобразование Фурье.

Как известно, простое решение методом инверсной фильтрации неустойчиво. Нами использован фильтр, предложенный в [5], коэффициент передачи которого может корректироваться с помощью повторных наблюдений. При однократных наблюдениях для i -го азимута получаем в результате фильтрации

$$\bar{\Psi}_i(U_i) = \bar{T}_{ai}(U_i) \frac{\Phi_m(U_i) - \Phi_n(U_i)}{\bar{A}(U_i) \Phi_m(U_i)}, \quad (4)$$

где $\Phi_m = |\bar{T}_{ai}|^2$ — спектральная плотность мощности сигнала на входе фильтра, \bar{A} — фурье-спектр профиля ножевой диаграммы, Φ_n — спектральная плотность мощности шума. Предполагается, что сигнал и шум некоррелированы и что шум имеет достаточно однородное спектральное распределение. \bar{A} и \bar{T}_{ai} вычисляются с помощью стандартных алгоритмов БПФ.

2. Интерполяция спектра. Вычислив по (4) $\bar{\Psi}_i$, получим значения \bar{T}_b в верхней $U-V$ -полуплоскости в точках U_{ni}, V_{ni} :

$$U_{ni} = (n-1) \cos q_i (1/NX), \quad i=1, 2, \dots, I,$$

$$V_{ni} = (n-1) \cos q (1/NX), \quad n=1, 2, \dots, N/2+1,$$

где I — число азимутов, N — число гармоник спектра скана, X — шаг дискретизации. Для возможности применения алгоритма БПФ необходимо, чтобы \bar{T}_b была задана в узлах прямоугольной сетки. Для пересчета применялась формула простой интерполяции, в которой значение \bar{T}_b в узле определяется как взвешенное среднее четырех ближайших синтезированных отсчетов, лежащих на двух ближайших сечениях (см. рис. 5), причем веса обратно пропорциональны расстояниям от узла до соответствующих синтезированных отсчетов:

$$\begin{aligned} \bar{T}_b(U', V') = & \\ = & \frac{\bar{T}_b(U_1, V_1)/D_1 + \bar{T}_b(U_2, V_2)/D_2 + \bar{T}_b(U_3, V_3)/D_3 + \bar{T}_b(U_4, V_4)/D_4}{1/D_1 + 1/D_2 + 1/D_3 + 1/D_4}, \end{aligned} \quad (5)$$

\bar{T}_b полагается равной нулю во всех узлах, координата V которых превышает граничную синтезированную частоту $V_{гр}$. Интерполяция (отдельно для вещественной и для мнимой частей) проводится таким образом, чтобы матрица \bar{T}_b вычислялась построчно. Это позволяет записывать ее последовательно строка за строкой в файл прямого доступа на магнитном диске. В оперативной памяти отводится место лишь для одной строки. Таким образом, возможно работать с большими матрицами, которые не могут быть размещены целиком в памяти ЭВМ.

3. Обратное двумерное преобразование Фурье. Как хорошо известно, двумерное преобразование Фурье может быть выполнено через последовательность одномерных преобразований: сначала вычисляются БПФ строк исходной матрицы, а затем БПФ столбцов результата первого преобразования. Если исходная матрица не помещается целиком в оперативной памяти и записана в файле прямого доступа последовательно по строкам, после выполнения БПФ строк результирующая матрица, записанная также в файле прямого доступа, должна транспонироваться, после чего вычисляются БПФ ее строк; очевидную трудность в этом случае представляет транспонирование матрицы, целиком не помещающейся в оперативной памяти.

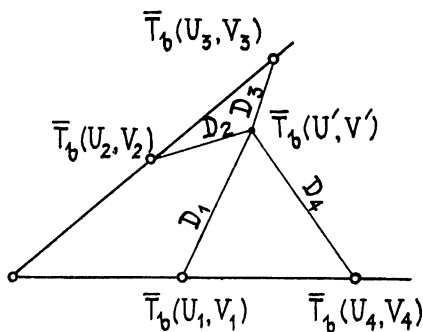


Рис. 5

Нами был разработан алгоритм двумерного БПФ [3], составленный на основе метода транспонирования, требующего в каждый момент прямого доступа лишь к двум строкам матрицы [6]. На матрицу налагаются два несущественных для нас ограничения: она должна быть квадратной и иметь размер 2^L .

Поскольку результат БПФ — матрица T_b — всегда веществен, стандартный алгоритм БПФ неоптимален, так как в общем случае преобразует комплексную матрицу. Созданный нами недавно модифицированный алгоритм двумерного БПФ, основанный на том же методе транспонирования, учитывает вещественность T_b . Он преобразует комплексную матрицу половины спектра размерами $N/2 \times N$ в вещественную размерами $N \times N$, размещаемую в том же файле на месте исходной матрицы. В последней версии алгоритма синтеза применен модифицированный вариант.

Конечным результатом БПФ является матрица синтезированного изображения T_b , записанная по столбцам.

4. Чистка синтезированного изображения. При плохом покрытии U — V -плоскости незаполненные участки, в которых $\bar{T}_b = 0$, вызовут появление в синтезированной диаграмме системы интерференционных лепестков, уровень которых зависит от качества заполнения U — V -плоскости. Это приведет к искажениям синтезированного изображения и вызывает необходимость его коррекции («чистки»). Для этой цели используется известный метод чистки Хегбома [7]. Для выполнения чистки необходимо рассчитать синтезированную («грязную») и «чистую» диаграммы.

Расчет «грязной» диаграммы A_s производится по схеме, аналогичной вычислению T_b , т. е. исходя из спектров \bar{A} , которые являются сечениями \bar{A}_s — спектральной функции радиотелескопа для данного режима наблюдений; путем интерполяции по (5) рассчитываются значения \bar{A}_s в узлах ($\bar{A}_s = 0$ в тех узлах, где мы положили $\bar{T}_b = 0$), далее обратным двумерным БПФ получаем синтезированную «грязную» диаграмму A_s .

«Чистую» диаграмму A_c выбираем в виде двумерной гауссианы с размерами, по половинному уровню совпадающими с соответствующими размерами главного лепестка A_s . Такой выбор A_c соответствует сплошному заполнению U — V -плоскости при тех же граничных частотах по U и V .

Алгоритм чистки состоит из двух последовательных процедур. Первая — разложение синтезированного изображения T_b в сумму «грязных» диаграмм, заключающееся в итерационной процедуре нахождения координат и интенсивностей точечных источников, которые, будучи свернутыми с «грязной» диаграммой, аппроксимируют синтезированное изображение T_b . Вторая процедура заключается в восстановлении очищенного изображения T_c путем свертки найденной суперпозиции точечных источников с «чистой» диаграммой.

Описанный алгоритм синтеза в несколько усеченном виде (без чистки) был применен для построения изображения Солнца по результатам наблюдений, выполненных методом «эстафеты» [8]. На рис. 6 приведена синтезированная «грязная» карта Солнца на волне 2,3 см (размер изображения 256×256). Данное изображение следует рассматривать как экспериментальное, поскольку на этой волне вертикальный размер ножевой диаграммы сравним с угловым размером Солнца, и, следовательно, условие (1) не соблюдается. Вероятно, именно этим объясняются краевые эффекты на изображении. Для центральной части диска координаты активных областей согласуются с данными наблюдений.

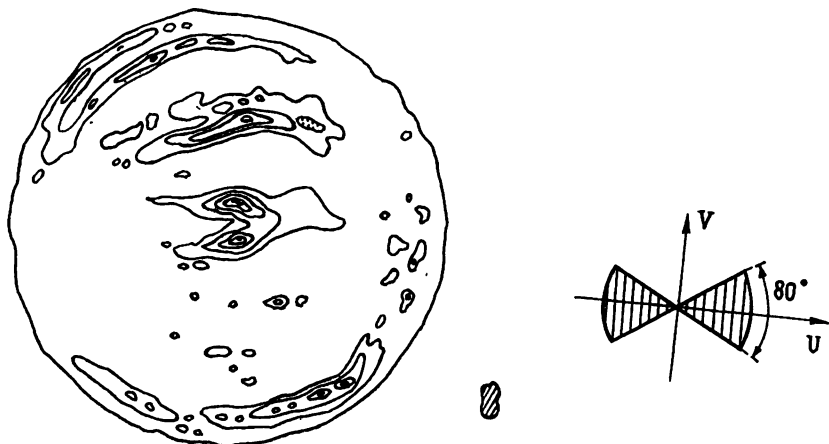


Рис. 6. Изображение Солнца на волне 2,3 см; справа сечение главного лепестка синтезированной диаграммы по уровню 0,5 и синтезированная $U-V$ -полоса.

Синтез полного диска Солнца на РАТАН-600 возможен на более длинных волнах. На более коротких волнах следует выделять интересные наблюдателя активные области, которые могут быть синтезированы после «вычитания» спокойного Солнца.

2. СИНТЕЗ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ДИАГРАММОЙ

В этом режиме вертикальный размер диаграммы сравним с угловым размером источника по δ , и мы должны пользоваться общим выражением (2). В случае ножевых диаграмм (2а) легко решалось в спектральной области, в то время как в общем случае связь спектра отклика со спектром наблюдаемого распределения не столь проста, и в явном виде не могут быть выделены какие-либо точки на $U-V$ -плоскости, соответствующие спектру данного отклика.

В самом общем случае T_b или его спектр получаются решением системы алгебраических уравнений, получающихся при дискретизации (2) или соответствующего выражения для спектров.

Здесь рассматривается режим наблюдений, при котором в каждом азимуте путем сканирования по параллельным траекториям синтезируется изображение в виде прямоугольного растра (карты). Шаг дискретизации по y_i (шаг между сканами) и шаг дискретизации сканов по x_i для каждого азимута должны удовлетворять теореме отсчетов, т. е.

$$\Delta y_i \leq 1/2V_i, \quad \Delta x_i \leq 1/2U_i,$$

где V_i, U_i — граничные частоты парциальной полосы пропускания для i -го азимута.

В результате картографирования, проведенного в каком-либо азимуте, на U — V -плоскости синтезируется область спектра пространственных частот источника, ограниченная соответствующей парциальной полосой антенного фильтра, ориентация которой на U — V -плоскости, а также ее форма и граничные частоты определяются позиционным углом и наклоном источника.

Объединение I парциальных карт (I — число азимутов) дает синтезированную карту T_{as} .

Решение уравнения антенного сглаживания для синтезированного изображения в спектральной области требует проведения весьма большого количества наблюдений на РАТАН-600, так как необходимо в этом случае просканировать объект, сглаженный протяженной по высоте диаграммой (порядка размера диаграммы отдельного элемента отражающей поверхности). Для объектов с малыми угловыми размерами (по сравнению с диаграммой элемента) число сканирований N в одном азимуте может быть оценено как

$$N \geq 4h_{эфф}/h + 1,$$

где $h_{эфф}$ — величина «стрелки» синфазного раскрыва, h — высота элемента отражающей поверхности. Например, для 45° потребуется не менее 17 дней (без учета повторных наблюдений в случае слабых источников).

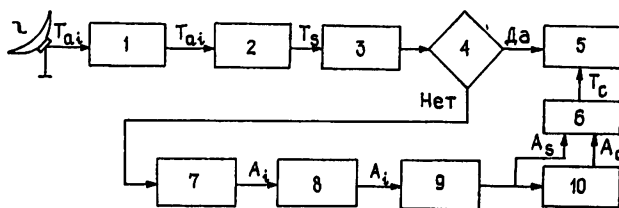


Рис. 7. Блок-схема алгоритма синтеза при произвольной диаграмме направленности:

1—нормировка парциальных карт, 2—дискретный синтез парциальных карт, 3—оценка уровня боковых лепестков, 4—уровень меньше заданного, 5—графическое отображение, 6—чистка, 7—расчет парциальных диаграмм, 8—нормировка парциальных диаграмм, 9—дискретный синтез парциальных диаграмм, 10—расчет чистой диаграммы.

Большие сроки наблюдений вынуждают отказаться от метода преобразования Фурье и применить метод чистки. При этом достаточно ограничиться сканированием области неба, занятой собственно объектом, и тем самым получить большую экономию наблюдательного времени. Ниже описывается алгоритм синтеза, блок-схема которого приведена на рис. 7.

1. Дискретный синтез парциальных карт. Синтезированная карта, объединяющая результаты наблюдений в азимутах, представляется в виде суммы нормированных парциальных карт T_{ai} :

$$T_{as}(x, y) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I T_{ai}(x, y). \quad (6)$$

Интегральные потоки складываемых карт должны быть одинаковы. Сетки отсчетов парциальных карт T_{ai} при суммировании должны быть приведены к одной регулярной сетке. Как видно из рис. 2, все T_{ai} заданы на сетках с одинаковой ориентацией строк, параллельных оси α . Шаг дискретизации в строках одинаков (он задается частотой опроса каналов в системе регистрации), и для совмещения сеток достаточно провести интерполяцию по столбцам, например, с помощью известной интерполяционной формулы:

$$T_{ai}(x, y_0) = \sum_{l=1}^L T_{ai}(x, y_l) \frac{\sin \pi [(y_0 - y_l) \Delta y]}{\pi [(y_0 - y_l) / \Delta y]}, \quad (7)$$

где L — число строк парциальной карты, y_l — ординаты строк. Если для i -й парциальной карты шаг по углу места Δy_i выбран в виде $\Delta y_i = \Delta y_0 / \cos q_i$, где Δy_0 — шаг меридианной карты, q_i — позиционный угол для i -го азимута, то шаг между строками оказывается одинаковым для всех T_{ai} и интерполяция может вообще не потребоваться.

2. Оценка качества синтезированного изображения. По формулам, приведенным в [1], вычисляются площадь синтезированной полосы пропускания и соответствующие оценочные уровни боковых лепестков [10]. На основании полученных оценок принимается решение о чистке изображения или об окончании обработки.

3. Чистка изображения. Синтезированная диаграмма по мощности A_s получается путем суммирования парциальных диаграмм

$$A_s(x, y) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I A_i(x, y), \quad (8)$$

причем $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_i(x, y) dx dy = \text{const}$, $i=1, 2, \dots, I$. Для расчета парциальных диаграмм использован алгоритм [11]. Вычисленные A_i задают

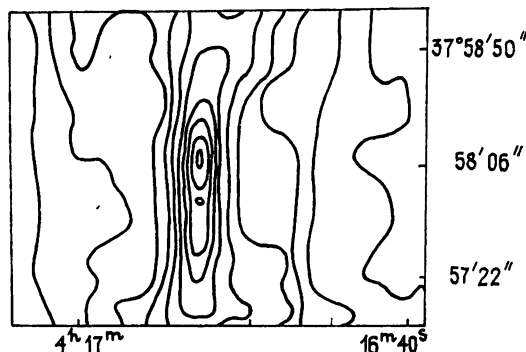


Рис. 8.

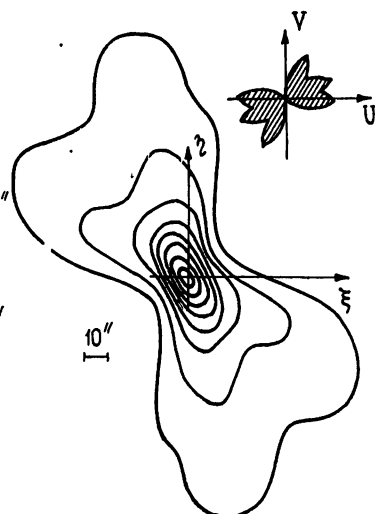


Рис. 9.

ся на сетках с различной ориентацией (так как диаграммы имеют различные позиционные углы). Пересчет парциальных диаграмм на опорную сетку, совпадающую с опорной сеткой для T_{as} , осуществляется с помощью простой линейной интерполяции. Расчет «чистой» диаграммы и процедура чистки аналогичны описанным в разд. 1.

Описанный алгоритм синтеза был применен для построения изображения радиогалактики ЗС III [9]. Наблюдения были проведены в меридиане и азимутах 210 и 270° (соответствующие позиционные углы 27 и 67°). Каждая из парциальных карт имела по семь строк. Для улучшения отношения сигнал/шум проводились повторные наблюдения.

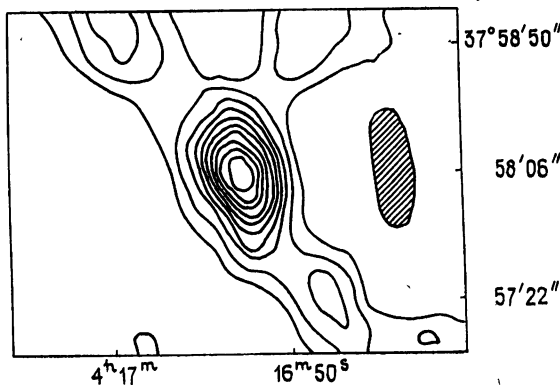


Рис. 10.

Для улучшения отношения сигнал/шум проводились повторные наблюдения. На рис. 8 показана синтезированная «грязная» карта ЗС III ($\lambda=3,9$ см). Этой карте соответствуют показанные на рис. 9 вычисленная синтезированная диаграмма и синтезированная полоса пропускания. Результат чистки карты показан на рис. 10. Заштрихованная область — сечение чистой диаграммы по половинному

уровню. Его размеры $24 \times 42''$, в то время как в меридиане соответствующие размеры составляли $24 \times 90''$. Таким образом, разрешение по δ улучшилось в результате азимутального синтеза в 2,1 раза. Чистка карты позволила выявить структуру источника.

В данной статье автор не имел возможности рассмотреть все имеющиеся методы синтеза радиоизображений с помощью столь гибкого инструмента как RATAN-600. Поэтому описаны лишь те алгоритмы, которые практически апробировались на RATAN-600.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н.—Изв. ГАО АН СССР, 1972, № 188, с. 13.
2. Bracewell R. N.—Austr. J. of Physics, 1956, 9, № 2, p. 198.
3. Минченко Б. С.—Изв. САО АН СССР, 1977, № 9, с. 29.
4. Вайнштейн Б. К., Орлов С. С.—Кристаллография, 1972, 17, № 2, с. 253.
5. Фридман П. А. Диссертация. — Л., 1973.
6. Eklundt J. A.—IEEE Trans. Comput. (Corresp.), 1972, 21, p. 801.
7. Högbom J. A.—Astron. Astrophys. Supplement, 1974, 15, p. 417.
8. Голубчина О. А. и др. — Солнечные данные, 1979, № 4, с. 108.
9. Минченко Б. С. — Изв. САО АН СССР, 1980, № 12, с. 125.
10. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.
11. Гельфрейх Г. Б. — Изв. САО АН СССР, 1977, № 9, с. 89.

Ленинградский филиал Специальной
Астрофизической обсерватории
АН СССР

BRIGHTNESS DISTRIBUTION SYNTHESIS WITH THE RADIOTELESCOPE RATAN-600

B. S. Minchenko

Algorithms for obtaining radiomaps of sources observed with the radiotelescope RATAN-600 by means of the azimuthal aperture synthesis are described for the knife beam pattern and for the arbitrary one. Examples of some synthesized maps are given.