

БЫСТРОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Б. С. Минченко

Описывается методика наблюдений, позволяющая с минимальными затратами времени получать двумерные изображения источников радиоизлучения. Разработан алгоритм коррекции синтезируемых радиокарт. Приводятся результаты обработки наблюдений, сделанных на РАТАН-600.

An observational method minimizing the time necessary to obtain two-dimensional images of radiosources is described. An algorithm of correcting the synthesised radio maps is developed. Some results of processing the observations obtained with the radio-telescope RATAN-600 are given.

Обычный способ получения двумерных радиоизображений (радиокарт) источников при работе с одним сектором РАТАН-600 состоит в последовательности проходов исследуемого объекта через неподвижную диаграмму направленности, причем при отдельном прохождении диаграмма нацелена на определенный угол места. Единичное прохождение дает, следовательно, одну строку радиокарты. Количество синтезируемых строк определяет число дней наблюдений, кроме того, для каждого наблюдения требуется соответствующая установка отражателя антенны.

Метод быстрого картографирования, описываемый ниже, позволяет существенно уменьшить число дней, необходимых для снятия радиокарт, и соответственно установок отражателя антенны. Однако этот метод может быть использован лишь при изучении достаточно компактных объектов (например, изолированных радиоисточников, небольших групп пятен на Солнце), причем чем меньше объект, тем больший выигрыш во времени может быть достигнут. В некоторых случаях можно получить двумерное изображение объекта за одно наблюдение с одной установкой антенны.

Опишем методику наблюдений. Известно, что в конструкции радиотелескопа РАТАН-600 предусмотрена возможность сканирования диаграммой в небольших пределах как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях путем перемещения облучателя вдоль и поперек фокальной оси соответственно [1]. Это обстоятельство и лежит в основе метода. Как и обычно, антенна перед наблюдением устанавливается на расчетный угол места. Для обеспечения нескольких проходов по объекту за одно наблюдение первичный облучатель выносится из фокуса перпендикулярно к фокальной оси радиотелескопа в нужном направлении (в западном для северного сектора РАТАН-600). После прохождения объекта через диаграмму необходимо с максимально возможной скоростью перевести первичный облучатель в следующее положение и одновременно сместить вторичный отражатель. Быстрый сдвиг первичного облучателя необходим, для того чтобы «обогнать» диаграммой объект и сделать возможным его повторное прохождение. Смещение вторичного отражателя изменяет угол места приема излучения и, следовательно, дает при повторном прохождении новую строку радиокарты. После повторного прохождения все эти операции повторяются снова и т. д. Количество строк, синте-

зируемых за одно подобное наблюдение, зависит от размера объекта по прямому восхождению, скорости мотора, передвигающего каретку с первичным облучателем и допустимыми конструктивными пределами перемещения каретки.

Из-за наличия аббераций в системе каждой строке полученной указанным способом радиокарты соответствует «своя» диаграмма, зависящая от величин продольного и поперечного выноса из фокуса. В этом случае отсутствует пространственная инвариантность, и радиокарта $T_a(x, y)$ должна быть записана в следующем виде (опуская нормирующий множитель):

$$T_a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y, \xi, \eta) T_b(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (1)$$

где $A(x, y, \xi, \eta)$ — диаграмма по мощности, зависящая от координат (x, y) точки радиокарты; $T_b(\xi, \eta)$ — истинное изображение объекта; ξ, η — прямоугольные координаты на исследуемой площадке неба, их применение вполне допустимо ввиду малости размеров объекта. При неподвижной во время отдельного прохождения диаграмме инвариантность к сдвигу в направлении x сохраняется, т. е.

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

Сложная форма диаграммы РАТАН-600 вызывает необходимость коррекции полученных карт. Наличие аббераций приводит к дополнительным искажениям карты. Для коррекции карт вида (2), получаемых при быстром картографировании, стандартный метод «чистки» [2] не может быть применен. При стандартном методе полученная из наблюдений радиокарта (так называемая «грязная» карта) ввиду постоянства диаграммы в пределах поля карты представляется сверткой «грязной» диаграммы с некоторым набором точечных источников и остаточного изображения T_n :

$$T_a(x, y) = \sum_{i=1}^m A(x - x_i, y - y_i) T_b(x_i, y_i) + T_n(x, y). \quad (3)$$

В нашем случае, когда диаграмма зависит от координат наблюдения, «грязная» карта должна быть представлена в виде (учитывая отсутствие инвариантности к сдвигу в направлении y)

$$T_a(x, y) = \sum_{i=1}^m A(x - x_i, y, y_i) T_b(x_i, y_i) + T_n(x, y). \quad (4)$$

«Чистая» карта $T_c(x, y)$, как и в стандартном методе, может быть выражена сверткой «чистой» диаграммы A_c с тем же, что и в (4), набором точечных источников и остаточного изображения:

$$T_c(x, y) = \sum_{i=1}^m A_c(x - x_i, y - y_i) T_b(x_i, y_i) + T_n(x, y). \quad (5)$$

Для коррекции карт, получаемых быстрым картографированием, был разработан алгоритм «чистки» с переменной диаграммой. Этот алгоритм может быть разделен на две основные части.

Вычитание «грязных» диаграмм. Процесс вычитаний состоит из ряда итераций. На первой итерации на исходной «грязной» карте находится точка с максимальной интенсивностью. Координате y_i этой точки соответствует определенная строка «грязной» карты с соответствующими величинами продольного и поперечного смещений из фокуса. По этим данным вычисляется «грязная» абберационная диаграмма, далее произво-

дится вычитание этой диаграммы, центрированной в найденную на карте точку и взятой с определенным весом. Поскольку на дальнейших итерациях данная абберационная диаграмма может быть использована, она записывается на диск в файл прямого доступа по определенному адресу. На всех последующих итерациях на карте, получившейся после предыдущей итерации, снова отыскивается точка максимума интенсивности.

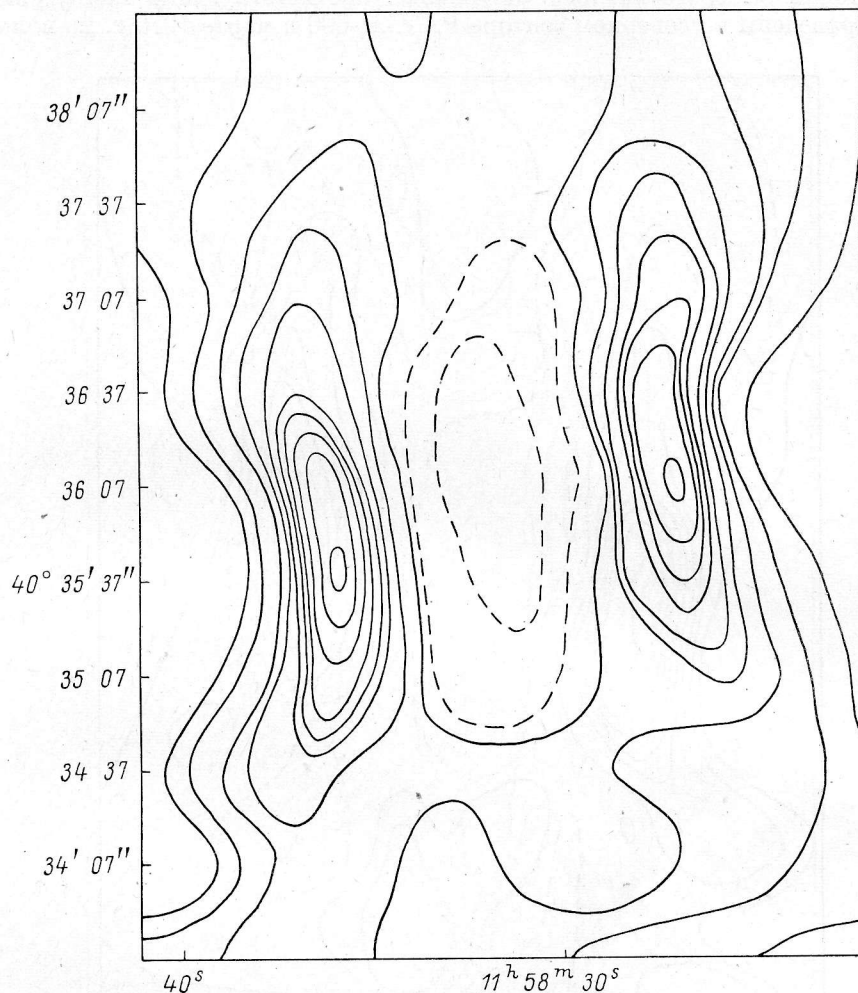


Рис. 1. «Грязная» карта радиисточника Лебедь-А на волне 3.9 см.

Далее происходит сравнение ординаты y_i этой точки с ординатами точек максимумов, имевших место на предыдущих итерациях. При ее совпадении с одной из предыдущих ординат для вычитания используется вычисленная ранее на соответствующей итерации «грязная» диаграмма, которая отыскивается по нужному адресу в файле прямого доступа и вызывается в оперативную память ЭВМ. В случае несовпадения ни с одной из предыдущих ординат вычисляется новая диаграмма, которая также записывается в файл на диске и используется для вычитания из карты. Процесс вычитания оканчивается по достижении некоторого уровня карты, определяемого исходя из отношения сигнал/шум.

Восстановление «чистых» диаграмм. Этот процесс также осуществляется итеративно. Восстановление происходит по той же траектории на карте (но в обратном порядке). Восстанавливаемые «чистые» диаграммы

должны браться с весами, зависящими от весов вычитаемых «грязных» диаграмм на соответствующих итерациях.

Этот алгоритм был реализован в виде достаточно универсальной подпрограммы на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 и испытан на ЭВМ ЕС 10—20. В качестве теста был взят известный двойной радиоисточник Лебедь-А. На рис. 1 представлена «грязная» карта этого источника, снятая методом быстрого картографирования. Соответствующие наблюдения были проведены на северном секторе РАТАН-600 в марте 1976 г. на волне

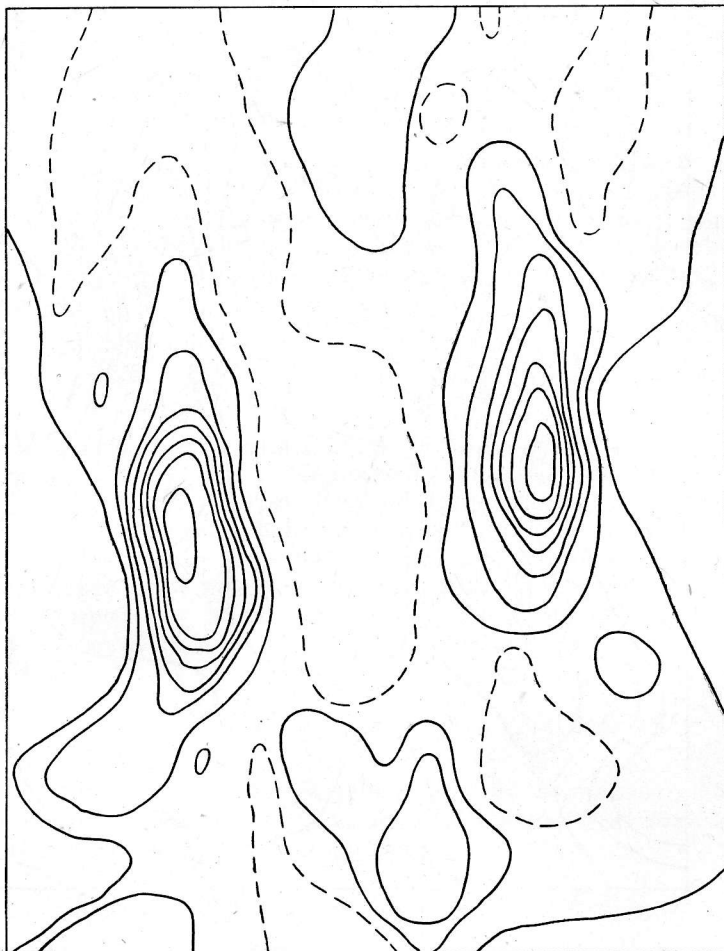


Рис. 2. «Чистая» карта после 10 итераций.

3.9 см. Получено 11 строк, угловое расстояние (шаг) между которыми постоянно и составляет $30''$, что несколько меньше собственного интервала антенны в вертикальном направлении для этого угла места (равного 86°). За каждое наблюдение, кроме последнего, оказалось возможным получить по три строки радиокарты. При последнем наблюдении были получены две строки (верхняя и нижняя). В этом случае записи прохождений источника из-за диаграммных эффектов оказались слишком размытыми (протяженными), что не дало возможности получить более двух строк.

Следует отметить, что при картографировании границы поля карты достаточно определить исходя из размеров реального объекта, а не объекта, сглаженного «грязной» диаграммой. С этой точки зрения было достаточно, вообще говоря, 6—7 строк.

Временная привязка каждой строки определяется по скорости движения источника относительно неподвижного облучателя (которая зависит от склонения источника) и величине поперечного смещения из фокуса. Но, как показано в [3], при поперечных смещениях из фокуса кубичный член фазовой функции распределения поля в раскрыве заметно влияет на величину углового смещения абберационной диаграммы. По этой причине происходит недоворот диаграммы до положения, определяемого сдвигом облучателя, и строки радиокарты оказываются сдвинутыми

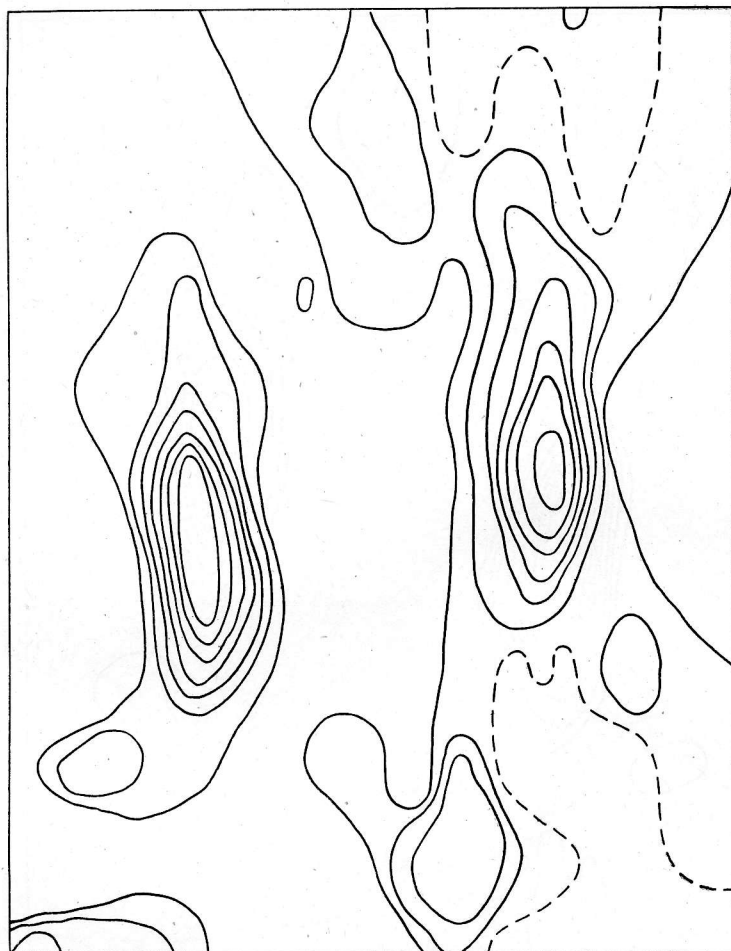


Рис. 3. «Чистая» карта после 25 итераций.

относительно друг друга. Направление сдвига строки зависит от того, в каком направлении сдвигается облучатель.

Расчеты поправок, обусловленных кубичным членом, были сделаны для различных углов места Н. А. Есепкиной с сотрудниками. Максимальное поперечное смещение облучателя, используемое при наблюдениях, составляло 716 мм, соответствующая поправка равняется 8''.

При выборе шага между строками (он должен быть постоянным) необходимо, по-видимому, учитывать влияние члена четвертой степени на величину смещения диаграммы по углу места и, следовательно, корректировать продольные сдвиги облучателя.

Рис. 2—6 показывают образцы вычищенных радиокарт при различных количествах итераций при обработке. Изофоты на всех картах соответ-

ствуют уровням 10, 20, 30% и т. д. от максимума на «грязной» карте. Форма «чистого» луча и его размеры по уровню 0.5 указаны на рис. 6 (в правом нижнем углу).

«Чистая» диаграмма выбрана в виде гауссовой функции с размерами по половинному уровню, равными соответствующим размерам главного лепестка «грязной» диаграммы. Такой выбор отражает реальное заполнение $U-V$ -плоскости.

На основании этих примеров можно сделать следующие заключения.

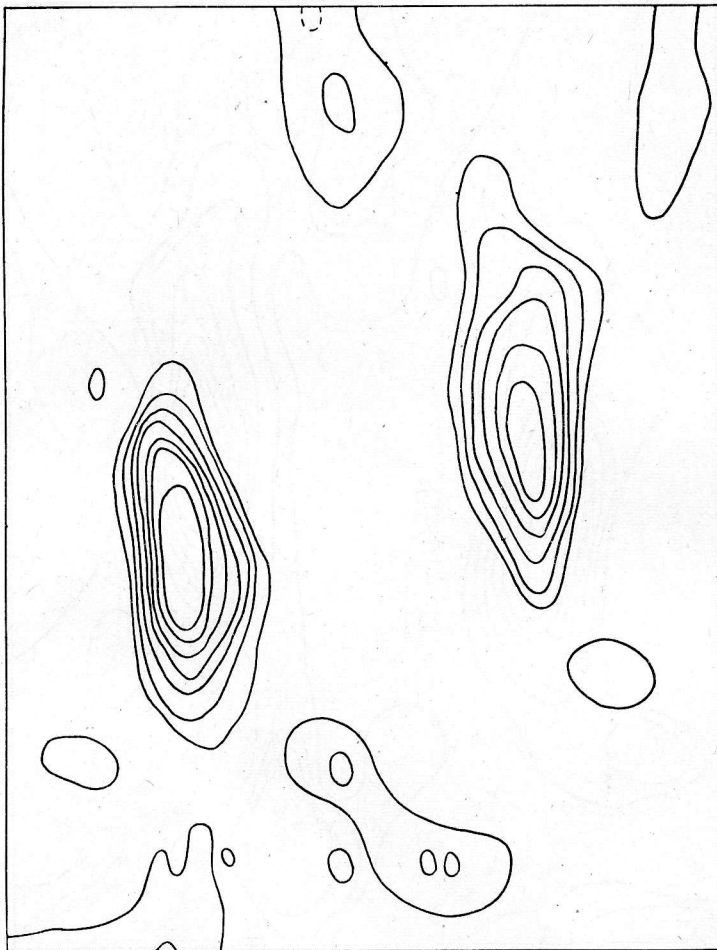


Рис. 4. «Чистая» карта после 50 итераций.

1. Эффективность метода «чистки» в случае, когда источник занимает почти все поле карты, снижается. Невычищенные области остаются даже при большом числе итераций (рис. 5 и рис. 6). Это вытекает из самой природы метода, откуда очевидно, что метод тем эффективней, чем ближе структура исследуемых объектов к набору дельта-функций.

2. Очевидно, что чем меньше весовой множитель γ , с которым вычитаются «грязные» диаграммы, тем лучше приближение «чистой» карты к реальному объекту. Уменьшение γ вызывает увеличение числа итераций, следовательно, возрастает время счета. Согласно [2], оптимальный диапазон для γ равен 0.25—0.5. В разработанном алгоритме γ не остается постоянным, а может изменяться от итерации к итерации, не превосходя при этом 0.5. Начальное γ задается наблюдателем. Это позволило заме-

нить умножения больших числовых массивов «грязных» диаграмм на γ вычитаниями, что дополнительно существенно сокращает время счета.

3. Обычно рекомендуется заканчивать итерации с вычитаниями по достижении уровня отношения сигнал/шум. Дальнейшая очистка не приводит к улучшению радиокарты. Из рис. 5 и 6 видно, что увеличение количества итераций с 90 до 127 практически не изменяет структуру карты. Следовательно, метод «чистки» обеспечивает своего рода насыщение. В нашем примере структура собственно источника выявляется уже после

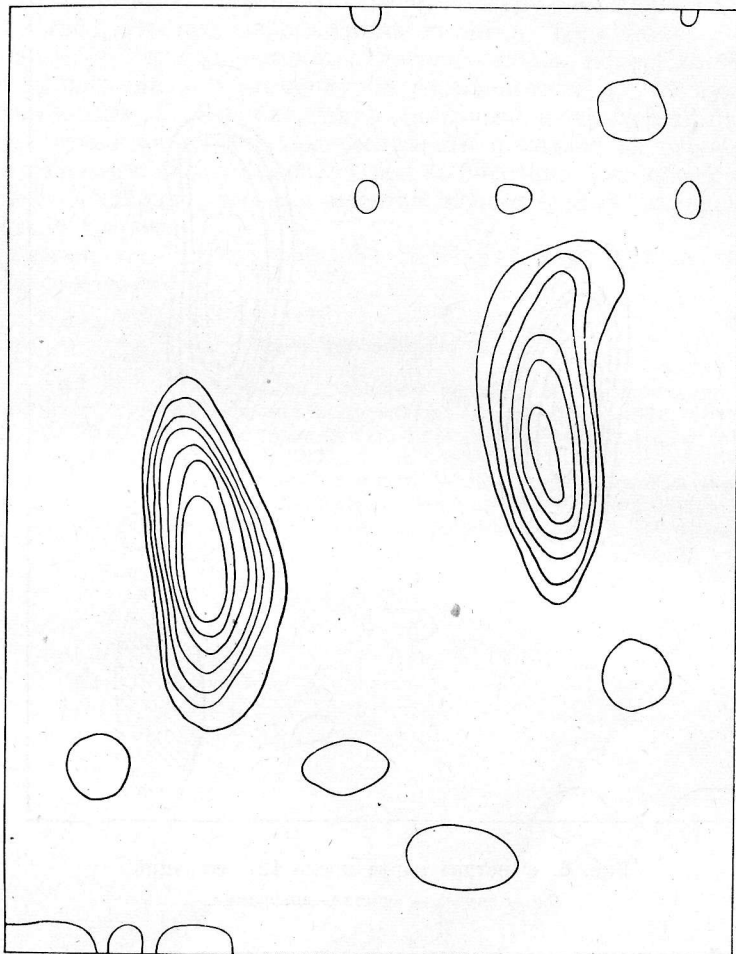


Рис. 5. «Чистая» карта после 90 итераций.

50 итераций (рис. 4). Видимо, для приблизительных оценок можно ограничиваться меньшим числом итераций.

4. Достаточно надежными результатами при очистке протяженных источников, заполняющих значительную часть поля карты, можно считать контуры источников, а также их общую структуру. Для получения тонкой структуры следует применять азимутальный синтез. Ясно, что будучи одноазимутальным, метод быстрого картографирования применим лишь на высоких углах места.

Расчет абберационных диаграмм проводился по программе, составленной Г. Б. Гельфрейхом. Вычисление массива диаграммы размерами 17×51 занимало около 4.5 мин. на ЕС 10—20. По этой причине общее

время счета оказалось довольно большим. При вычислениях на ЭВМ на печать дополнительно выводились координаты точек максимумов интенсивности на каждой итерации. Это дало возможность узнать, сколько диаграмм необходимо было вычислить в каждом случае, что определяется

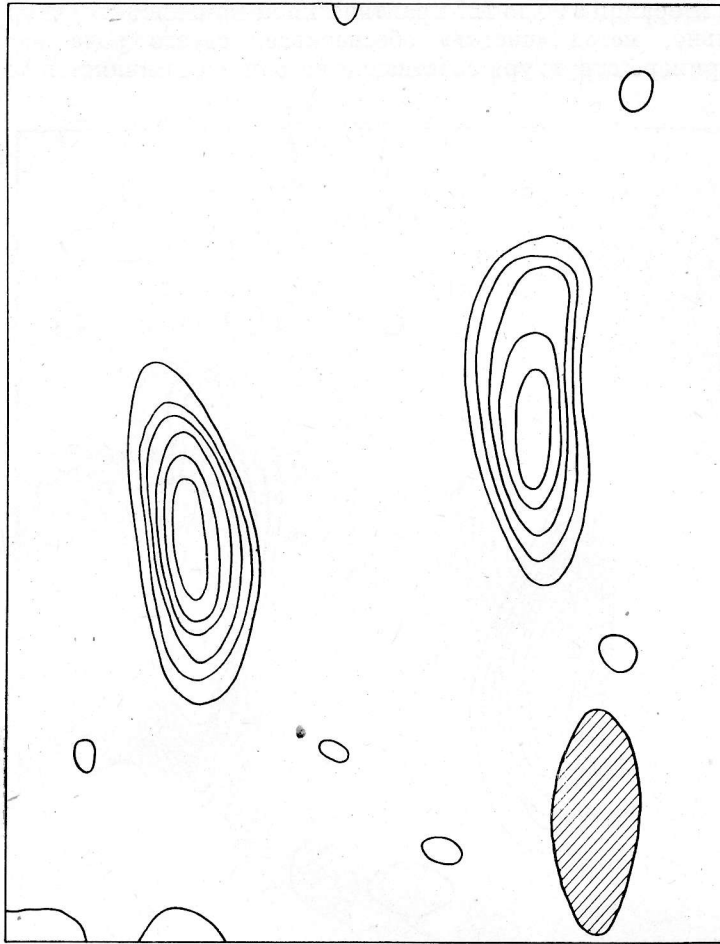


Рис. 6. «Чистая» карта после 127 итераций.
Внизу справа — «чистая» диаграмма.

траекторией движения точки максимума по карте в процессе вычислений. Фиксировалось также общее время счета. Эти данные представлены в таблице.

| Количество итераций | Количество вычисляемых диаграмм | Общее время счета, мин. |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 10 | 4 | 19 |
| 25 | 8 | 39 |
| 50 | 11 | 56 |
| 90 | 11 | 63 |
| 127 | 11 | 66 |

Отсюда видно, что время «чистки» практически определяется временем счета диаграмм. При использовании ЭВМ М40—30, которая будет эксплуа-

тироваться на РАТАН-600, время вычислений должно снизиться на порядок, что является уже вполне приемлемым. Представляется целесообразным хранить расчетные диаграммы для набора высот в архивной памяти ЭВМ и использовать их при обработке, что даст очень большую экономию машинного времени.

В заключение следует отметить, что применение режима скольжения при быстром картографировании может дополнительно сократить время наблюдений. В этом случае для получения отсчетов с постоянным шагом и для правильной временной привязки необходимо знать выходную характеристику мотора, передвигающего каретку, и скорость движения источника относительно неподвижной каретки. При таком способе последующая обработка усложняется незначительно, но время счета резко возрастает, поскольку в этом случае радиокарта $T_a(x, y)$ будет описываться уравнением (1). Следовательно, диаграмма на данной итерации в случае, когда точка максимума интенсивности попадает на строку, снятую путем скольжения, будет определяться значениями уже обеих координат этой точки. Очевидно, что количество используемых диаграмм значительно увеличивается.

Автор выражает благодарность Ю. Н. Парийскому и Н. А. Есепкиной за ценные замечания.

Список литературы

1. Стоцкий А. А. Аберрации главного зеркала и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 63—76.
2. Högbom J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer Baselines. — *Astrophys. Suppl.* 1974, 15, p. 417—426.
3. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю. и др. Использование методов когерентной оптики и голографии для исследования характеристик радиотелескопов. Доклад на 8-й Всесоюз. конференции по радиоастрономии, Пушино, 1975.