

КОРРЕКЦИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ НА РАТАН-600

Б. С. Минченко

Крайне сложная структура диаграммы направленности РАТАН-600 приводит к значительным искажениям синтезируемых двумерных радиоизображений. Рассмотрена возможность применения метода чистки Хёгбома для подавления этих искажений. Приведены результаты моделирования алгоритма «чистки» на ЭВМ.

An extremely complex structure of the beamshape of the radio telescope RATAN-600 causes considerable distortions of two-dimensional radio images synthesized. A possibility of application of Högbom's method of «cleaning» to suppression of the distortions is considered. Results of computer modelling of the «cleaning» procedure are presented.

При использовании радиотелескопов апертурного синтеза время, необходимое для полного синтеза объекта, определяется синтезированным разрешением [1]. Стремясь сократить продолжительность наблюдений, радиоастрономы в последние годы предпочитают применять неполный синтез с последующей коррекцией, или «чисткой», синтезированной радиокарты. Неполный синтез $U-V$ -плоскости объекта (т. е. наличие «дыр» на ней) приводит к тому, что синтезированная диаграмма приобретает сложную многолепестковую структуру, причем среднеквадратичный уровень боковых лепестков зависит от степени заполнения $U-V$ -плоскости [2]. Радиокарта, полученная из наблюдений с подобной диаграммой, будет существенно искажена диаграммными эффектами. В связи с этим возникает необходимость уменьшения искажений путем некоторого фиктивного (т. е. не с помощью измерений) заполнения дыр на $U-V$ -плоскости.

Существует несколько способов улучшения радиоизображений, из которых в последнее время наиболее распространен метод чистки, разработанный Хёгбомом [3]. Суть этого метода заключается в том, что полученная из наблюдений радиокарта $T(x, y)$ (так называемая грязная карта) представляется суммой свертки синтезированной диаграммы $A(x, y)$ с набором точечных источников и некоторого остаточного изображения $T_{\text{ост}}(x, y)$

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^n A(x - x_i, y - y_i) S_i(x_i, y_i) + T_{\text{ост}}(x, y). \quad (1)$$

В результате получается «чистая» радиокарта $T_c(x, y)$, представляемая аналогичным образом, но вместо «грязной» синтезированной диаграммы используется определенным образом выбранная «чистая» диаграмма $A_c(x, y)$:

$$T_c(x, y) = \sum_{i=1}^n A_c(x - x_i, y - y_i) S_i(x_i, y_i) + T_{\text{ост}}(x, y). \quad (2)$$

Другими словами, полученное из наблюдений изображение, т. е. изображение, сглаженное реальной «грязной» диаграммой, заменяется изображением, которое получилось бы при наблюдениях с подходящей «чистой» диаграммой, обеспечивающей лучшее заполнение $U-V$ -плоскости.

Очевидно, что в простых случаях (один или несколько разнесенных точечных источников) процедура чистки достаточно корректна. Для протяженных объектов сложной формы результат чистки, т. е. структура «чистой» карты, будет зависеть от структуры этих объектов. Тем не менее метод чистки широко применяется при наблюдениях с многоэлементными интерферометрами, осуществляющими синтез $U-V$ -плоскости объекта, и дает достаточно хорошие результаты (см., например, [4]).

Необходимость коррекции двумерных изображений возникает и при наблюдениях на радиотелескопе РАТАН-600. Искажения радиокарт обусловлены здесь исключительной сложностью формы диаграммы направленности радиотелескопа (особенно на средних углах места). По этой причине коррекция радиокарт на этих углах традиционным путем (т. е. в спектральной области) нецелесообразна, так как требует применения больших матриц при вычислениях спектров, а это в свою очередь предъявляет чрезвычайно высокие требования к объему памяти ЭВМ и приводит к увеличению времени вычислений. Применение метода чистки позволит снизить требования к машинной памяти и значительно сократить время счета, так как, во-первых, вычисления в нашем случае проводятся в плоскости объекта (т. е. не нужно переходить к спектрам) и, во-вторых, во многих случаях достаточно оперировать с центральным ядром диаграммы, составляющим небольшую часть всей матрицы $A(x, y)$.

Алгоритм коррекции можно описать последовательностью нескольких простых операций.

1. На «грязной» карте находится точка с максимальной интенсивностью I_0 . В эту точку помещается «грязная» диаграмма, нормированная по своему максимуму к величине γI_0 . Производится вычитание этой диаграммы из карты.

2. Все последующие итерации отличаются от первой лишь тем, что каждый раз вместо «грязной» карты берется карта, получившаяся после предыдущей итерации. Итерации прекращаются, когда средний уровень интенсивности по карте становится сравнимым с уровнем шумов. По окончании итераций вместо исходной «грязной» карты имеем $T_{\text{ост}}(x, y)$.

3. В соответствующих точках остаточной карты восстанавливаются «чистые» диаграммы с необходимыми (для сохранения масштаба) амплитудами, после чего получается «чистая» радиокарта вида (2).

Ясно, что с уменьшением величины γ улучшается согласие «чистой» карты с истинным распределением радиояркости. Однако при этом возрастает число итераций и, следовательно, время счета, что не позволяет уменьшать γ беспречно. Согласно [3], во многих случаях можно брать γ в диапазоне $0.25 \div 0.5$, а иногда даже $\gamma \approx 1$.

Следует отметить, что в результате чистки не улучшается отношение сигнал/шум.

В настоящей работе на модельных примерах исследована возможность применения метода чистки для улучшения двумерных изображений на РАТАН-600. Рассматривается режим наблюдений в одном азимуте в диапазоне средних углов места ($20 \div 75^\circ$), при котором двумерное изображение (радиокарта) получается последовательной во времени прохождением исследуемой области неба на разных высотах.

Как известно [1], конфигурация зоны спектральной чувствительности и, следовательно, структура диаграммы РАТАН-600 зависят от угла места наблюдения. На средних углах места процент дыр в покрытии $U-V$ -плоскости значителен (при одном азимуте наблюдений), и можно поэтому ожидать, что диаграмма будет весьма «грязной», а это вызовет сильные искажения радиокарты.

Для последующего применения в процедуре чистки были рассчитаны диаграммы РАТАН-600 (для одного сектора) на нескольких углах места. Расчет производился по методу двумерного быстрого преобразования Фурье по заданному распределению поля в апертуре. Распределение поля задава

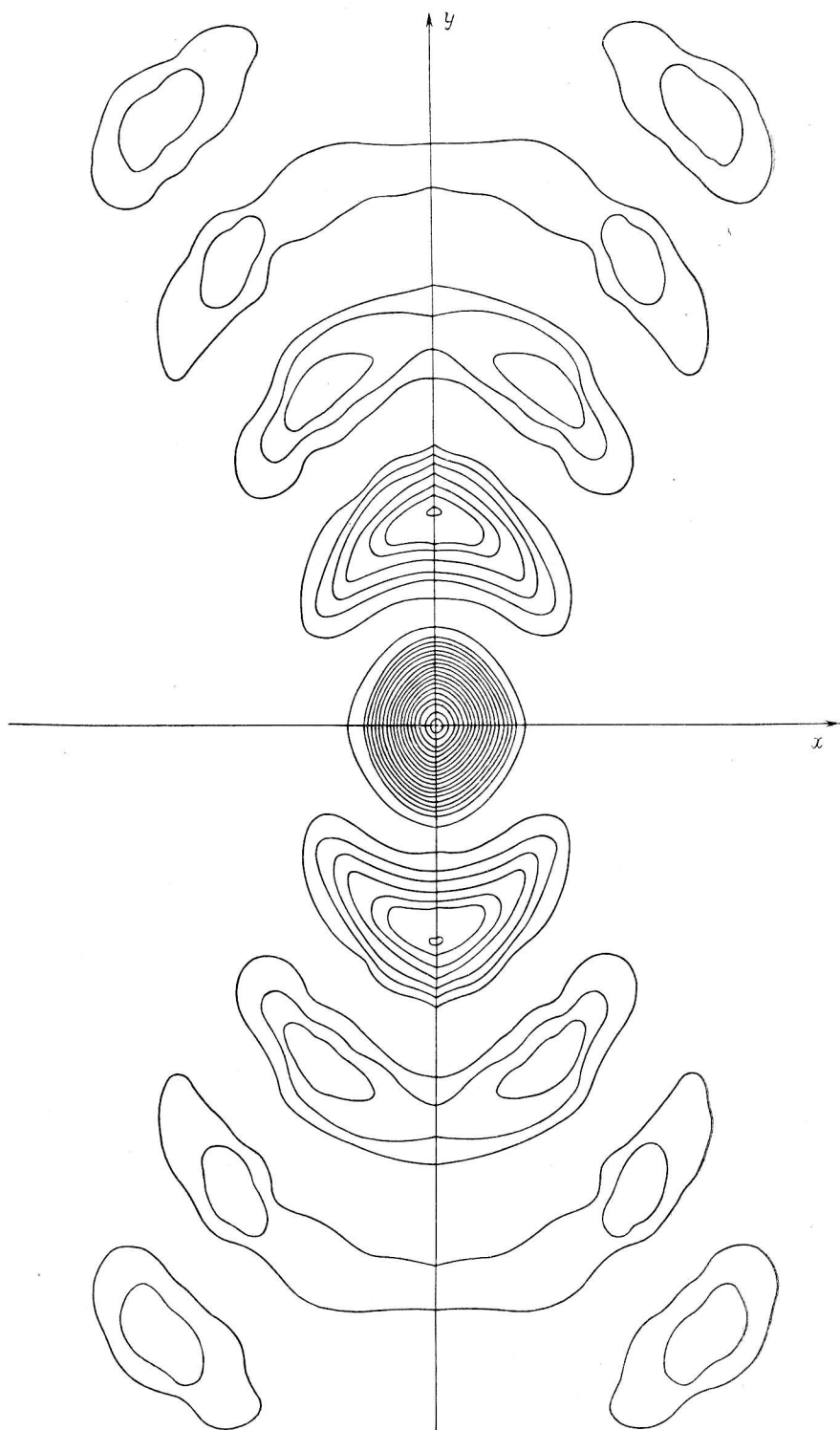


Рис. 1. Расчетная диаграмма направленности (по мощности) радиотелескопа РАТАН-600 для угла места 50° .

лось спадающим по косинусоидальному закону с уровнем 0.3 на краю. Поскольку при расчете не было необходимости добиваться высокой точности счета, размер матрицы был во всех случаях взят 64×64 (в целях экономии вычислительного времени). Тем самым практически не учитывалась вертикальная диаграмма отдельного щита, что привело к повышению уровня боковых лепестков. Однако общая структура диаграммы выявляется достаточно хорошо.

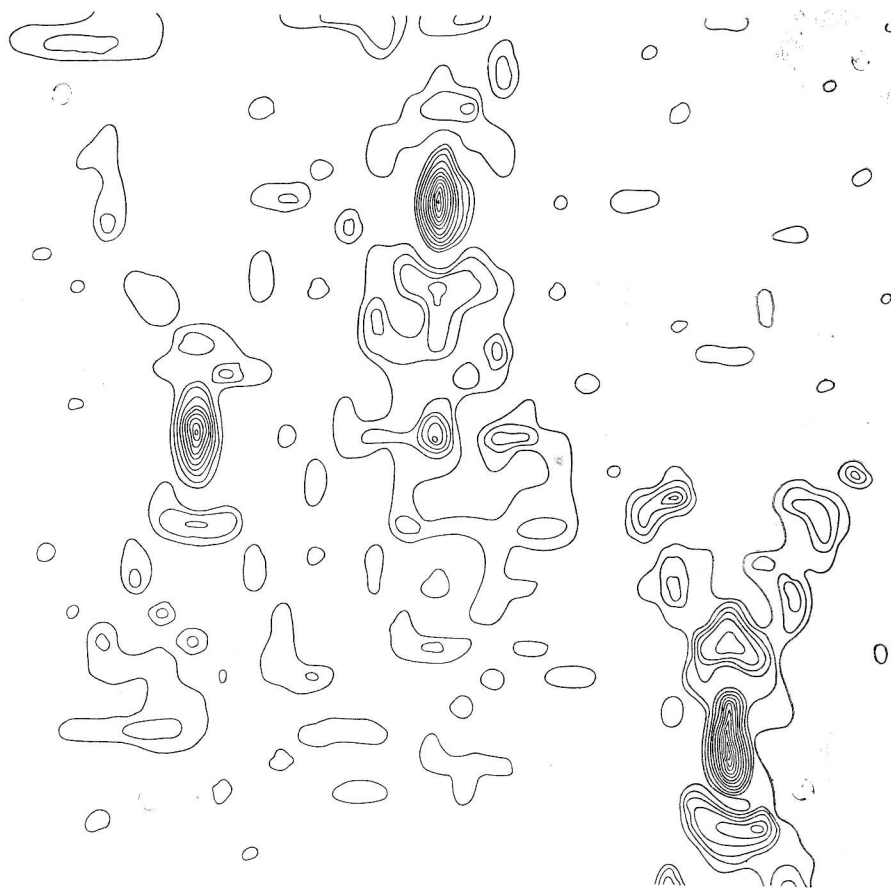


Рис. 2. Пример «грязной» карты.
Соответствующая модель показана на рис. 3.

На рис. 1 приведена одна из вычисленных диаграмм. Изофоты соответствуют уровням 5, 10, 15% и т. д.

Из расчетов следует, что наиболее «грязными» получаются диаграммы в диапазоне углов $20 \div 75^\circ$. Поэтому целесообразно убедиться в действенности метода чистки именно в таком наименее благоприятном (и наиболее обширном) диапазоне углов. С этой целью был проведен ряд модельных экспериментов на ЭВМ. Рассматривались различные модели радиисточников. Во всех случаях «чистая» диаграмма выбиралась однолепестковой, причем ее лепесток совпадал по форме и размерам с главным лепестком «грязной» диаграммы. Чистка производилась с различными значениями γ и отношения сигнал/шум. Исходные «грязные» карты вычислялись на ЭВМ сверткой источников с «грязными» диаграммами, полученными расчетным путем, и последующим «зашумливанием» с помощью генератора случайных нормальных чисел с задаваемыми средним и дисперсией.

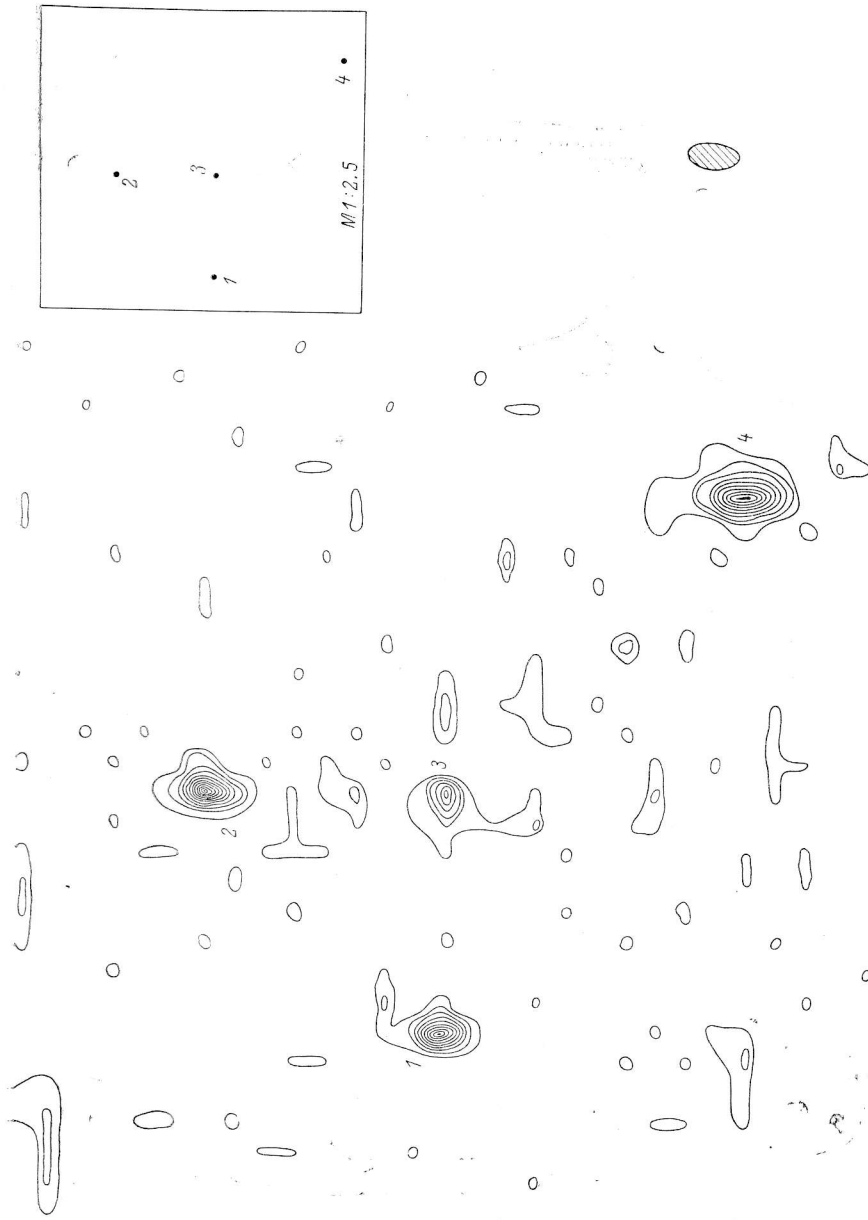


Рис. 3. «Чистая» карта, полученная с помощью метода чистки из карты рис. 2.

Приведем два примера чистки модельных изображений. На рис. 2 представлена «грязная» карта ансамбля точечных источников. На рис. 3 изображена «чистая» карта этого ансамбля (в правом верхнем углу — соответствующая модель в уменьшенном виде, масштаб 1 : 2.5). В данном примере расстояния между источниками существенно превышают размеры главного лепестка «грязной» диаграммы. Для сравнения на рис. 3 изображена «чистая» диаграмма, ограниченная по уровню 0.5 (заштрихованная область в правом нижнем углу). Этот случай (редко расположенные источники на фоне пустого неба), отражает типичную картину расположения радиопередатчиков в сантиметровом диапазоне. В данном примере взято отношение сигнал/шум порядка 12%, $\gamma=0.25$, число итераций 11. Отношение сигнал/шум определяется формулой

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i / \sigma_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где n — число источников, T_i — амплитуда i -го источника, $\sigma_{\text{ш}}$ — среднеквадратичное отклонение шума. «Чистая» карта (рис. 3) наглядно демонстрирует действенность метода чистки для рассматриваемого случая. Работа с подобными моделями позволила выявить, что точность восстановления амплитуд определяется практически лишь отношением сигнал/шум и не зависит от γ . Т. е. можно брать γ , близкие к 1, что уменьшает число итераций и, следовательно, время счета. Например, в рассмотренном примере абсолютная погрешность восстановления амплитуды источника № 1 составила 7.5%, № 2—3%, № 3 — 4%, № 4 — 4%. При увеличении γ до 0.8 (при постоянстве отношения сигнал/шум) величина этой погрешности не превышала 12%.

Еще один пример приведен на рис. 4 («грязная» карта) и рис. 5 («чистая» карта с соответствующей моделью в правом верхнем углу). Здесь расстояния между источниками сравнимы с размерами главного лепестка «грязной» диаграммы. На рис. 5 также изображена «чистая» диаграмма, ограниченная по половинному уровню (слева внизу). В этом примере отношение сигнал/шум — 6%, $\gamma=0.1$, число итераций равно 19. Сравнение обеих карт с соответствующей им моделью позволяет заключить, что в этом случае точность восстановления амплитуд источников в большой степени зависит от расстояния между источниками. Как показали эксперименты, основным фактором, определяющим точность восстановления амплитуд, является γ . На рис. 5 заметно влияние сильного источника № 6 на более слабый источник № 5, находящийся на расстоянии порядка трех собственных интервалов от № 6. При картографировании попадание сильного соседнего источника в боковые лепестки диаграммы, нацеленной на слабый источник, вызовет ложное увеличение амплитуды последнего. В приводимом примере амплитуда слабого источника № 5 выросла на «грязной» карте в 1.8 раза. На «чистой» карте его амплитуда оказывается увеличенной в 1.5 раза, т. е. погрешность снизилась на 30%. При увеличении γ погрешность «чистой» карты возрастает, приближаясь к погрешности «грязной» карты. Кроме того, источники, которые не разрешаются при наблюдениях (т. е. на «грязной» карте), остаются неразрешенными и на «чистой» карте (см. источники № 1 и 2, расстояние между которыми меньше, чем собственный интервал антенны в соответствующем направлении).

Эти явления есть следствие того, что чистка, с точки зрения спектрального подхода к радиотелескопам, лишь изменяет конфигурацию зоны спектральной чувствительности, не увеличивая при этом ее предельных размеров, которые определяют разрешение. Применение более узкого, чем главный лепесток «грязной» диаграммы, «чистого» луча не увеличит разрешающую способность, поскольку тонкие детали в структуре объекта уже безвозвратно утеряны при сглаживании «грязной» диаграммой.

Результаты моделирования показали перспективность применения метода чистки на РАТАН-600 особенно, если учесть, что реальная диаграмма направленности является менее «грязной», чем расчетная. При наблюдениях в одном азимуте чистка дает хорошие результаты при исследовании изоли-



Рис. 4. Пример «грязной» карты.
Соответствующая модель показана на рис. 5.

рованных точечных источников или их ансамблей. При больших угловых расстояниях между источниками (больше размера огибающей диаграммы) можно выбрать γ близким к 1, в противном случае следует брать γ порядка 0.1–0.5 в зависимости от вида «грязной» карты. Более четкие рекомендации по выбору γ могут быть сделаны лишь на основании реальных наблюдений с реальной диаграммой.

Метод чистки при одном азимуте наблюдений вполне применим для общей оценки структуры протяженных объектов на высоких углах места, где улучшается разрешение в вертикальном направлении. При более высоких требованиях к качеству «чистой» карты, а также при работе на средних углах одного азимута оказывается недостаточно.

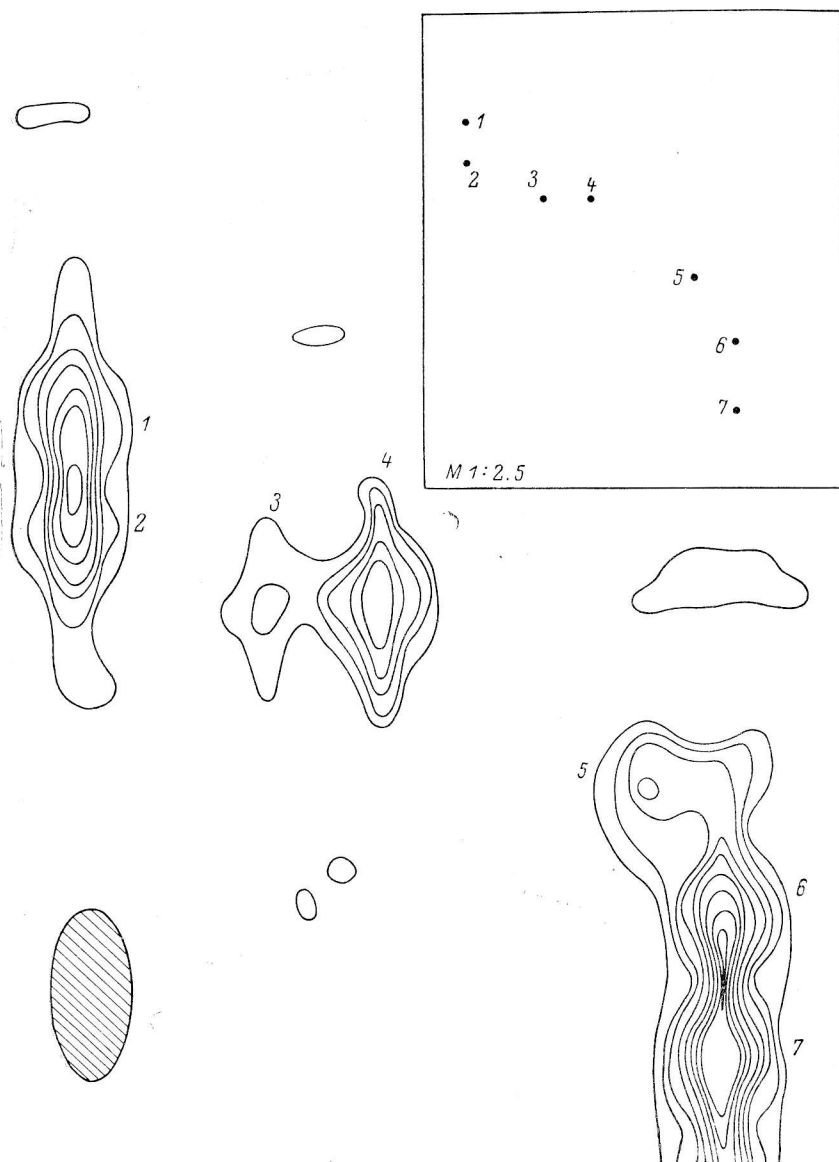


Рис. 5. «Чистая» карта, полученная с помощью метода чистки из карты рис. 4.

В последнее время для синтеза некоторой изучаемой области неба используются наблюдения, выполненные на различных радиотелескопах с самыми различными параметрами (разрешением, заполнением $U-V$ -плоскости, отношением сигнал/шум и т. д.), результаты которых затем суммируются, давая «синтетическую» карту, которая далее подвергается чистке. По аналогии с этим можно применить метод «чистки» к радиокarte, полученной последовательным азимутальным синтезом (указано Ю. Н. Парийским). Этот

прием позволит получать на РАТАН-600 высококачественные изображения сложных объектов на любых углах места.

В заключение автор выражает благодарность Ю. Н. Парийскому за многие полезные обсуждения и внимание к работе.

Литература

1. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. Глав. астрон. обс. в Пулкове, 1972, № 188, с. 13—39.
2. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973, 415 с.
3. Högbom J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. — Astron. Astrophys. Suppl., 1974, 15, N 3, p. 417—426.
4. Terzian Y., Balick B., Bignell C. Radio-synthesis observations of planetary nebulae. — Astrophys. J., 1974, 188, N 2, p. 257—277.

Ноябрь 1975 г.