

## К ВОПРОСУ О «ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ» РАТАН-600

*Н. С. Соболева, А. В. Темирова*

Для решения ряда астрофизических задач, таких, например, как обнаружение слабых гало вокруг радиоисточников, слабых деталей в изображениях сильных источников и т. п., необходимо иметь инструменты с большим динамическим диапазоном по поверхностной яркости. В статье исследуются возможности решения таких задач с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Показано, что динамический диапазон северного сектора радиотелескопа зависит от угла места наблюдения. При наблюдениях на низких углах места максимальный уровень первого бокового лепестка составляет  $-35$  дБ, а на расстоянии  $4'$  от оси диаграммы направленности — менее  $-40$  дБ. Для источников малых угловых размеров динамический диапазон радиотелескопа того же порядка и на высоких углах места. Однако для протяженных источников динамический диапазон с увеличением угла места заметно ухудшается. При работе в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало» средний уровень боковых лепестков в области  $0^{\circ}.5$  составляет  $-21$  дБ, среднеквадратический уровень боковых лепестков в этой области  $-22$  дБ. Наблюдается хорошая повторяемость ото дня ко дню боковых лепестков. Так как в этом случае диаграмма направленности не зависит от угла места, то можно проводить «чистку по опорному источнику» с достаточной точностью. При этом средний уровень боковых лепестков падает до  $-42$  дБ, а среднеквадратический уровень — до  $-34.5$  дБ. Используя метод «чистки» по опорному объекту, мы обнаружили гало под радиоисточником 3С 84 (NGC 1275).

For studying weak halo of radiosources, weak objects in the vicinity of strong sources high dynamic range radiotelescope is required. Possibilities for the solution of these problems with the help of the radiotelescope RATAN-600 are investigated. It is demonstrated that dynamic range of the northern sector of RATAN-600 depends on elevation angle. Maximum level of the primary beam sidelobe is  $-35$  dB in the case of low observing angles and in the vicinity of  $4'$  relative to the beam axis this level falls down to  $-40$  dB. Dynamic range of RATAN-600 for small sources is of the same value at high elevation angles. However, for extended sources dynamic range becomes considerably worse with the increasing of the elevation angle. For observations with the southern sector using the flat mirror the average value of the primary sidelobes is  $-21$  dB (in zone  $0^{\circ}.5$ ) and r. m. s. level of these sidelobes is  $-22$  dB. High reproducibility of the primary beam sidelobe structure is observed. As the antenna pattern does not depend on elevation angle in this case then «cleaning» by reference source may be done. In this connection the average level of sidelobes falls to  $-42$  dB and r. m. s. to  $-34.5$  dB respectively. Using the «cleaning» method, halo of 3C84 (NGC 1275) was discovered.

Проблема обнаружения слабого радиоизлучения вблизи сильных радиоисточников впервые возникла в метровом диапазоне волн еще в 50-х годах при интерпретации наблюдений в Кембридже. Второй Кембриджский каталог радиоисточников [1] содержал более 50% объектов, которые оказались ложными. После появления мощных локаторов в аналогичную ситуацию попала и радиолокация (см., например, [2]). В пассивной радиоастрономии сантиметрового диапазона эта проблема стала актуальной только в последнее десятилетие с появлением радиометров высокой чувствительности [3]. Для решения задач типа обнаружения слабых диффузных образований, различных гало вокруг радиоисточников и в скоплениях, слабых деталей в изображениях сильных радиоисточников необходимо иметь инструменты с большим динамическим диапазоном по поверхностной яркости [4].

Мы приведем результаты исследования возможностей РАТАН-600 в решении таких задач. При этом не будем затрагивать вопросов далекого рассеяния, а ограничимся особо важной для перечисленных астрофизических задач об-

ластью  $\sim 0.5^\circ$  вокруг оси диаграммы направленности радиотелескопа (размер рентгеновских гало, скоплений, гигантских радиогалактик). Вопросы влияния случайных ошибок отражающей поверхности радиотелескопа (за исклю-

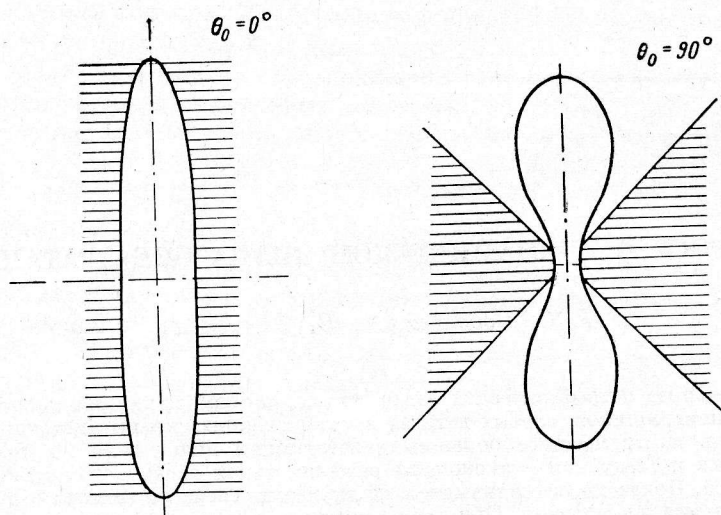


Рис. 1. Схематическое изображение областей низкого уровня близких боковых лепестков диаграммы направленности северного сектора RATAN-600 на горизонте ( $\theta_0=0^\circ$ ) и в зените ( $\theta_0=90^\circ$ ).

Заштрихованные участки — области низкого уровня боковых лепестков, полученные методом «стрип-интегрирования» распределения поля в раскрыве антенны [7].

чением влияния случайных «дыр») на уровень близких боковых лепестков в этой статье также не рассматриваются.

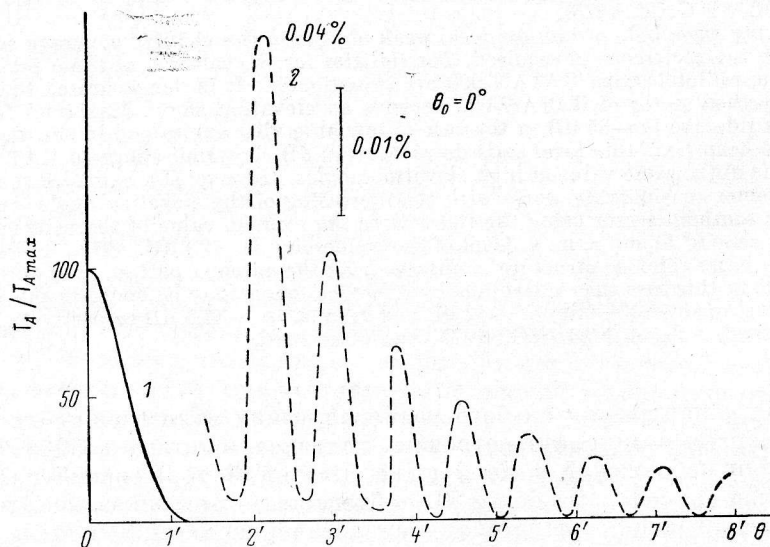


Рис. 2. Расчетная горизонтальная диаграмма направленности северного сектора RATAN-600 для  $\theta_0=0^\circ$ .

1 — главный лепесток диаграммы направленности; 2 — близкие боковые лепестки диаграммы направленности, масштаб для которых приведен справа. По оси абсцисс — расстояние от оси диаграммы направленности в минутах дуги.

Экспериментальное определение близких боковых лепестков диаграммы направленности проводилось на волне 7.6 см с помощью высокочувствительного приемника [5]. Относительно большая длина волны позволяла не забо-

таться о случайных неконтролируемых погрешностях поверхности радиотелескопа.

**«Динамический диапазон» северного сектора.** Как известно, РАТАН-600 может быть использован в различных режимах наблюдений [6]. Остановимся сначала на режиме работы на одном секторе телескопа. В этом режиме характер диаграммы направленности сильно зависит от угла места. Из-за сильно спадающего облучения при полном использовании рабочей поверхности радиотелескопа уровень близких боковых лепестков в центральном сечении диаграммы направленности оказывается достаточно низким и слабо зависит от угла места наблюдения. На низких углах места наблюдения система становится короткофокусной и имеют место сильное спадание поля к краям антенны и минимальный уровень боковых лепестков. При наблюдениях на высоких углах места уровень близких боковых лепестков в центральном сечении лишь слегка растет. На рис. 1 схематически показана область низкого уровня боковых лепестков (заштрихованная часть), полученная методом Брэсуэлла [7] — стрип-интегрированием косинусоидального распределения поля в раскрыве антенны. Перечисленные выше свойства антенны РАТАН-600 отличают ее от других систем апертурного синтеза. На рис. 2 приведена расчетная горизонтальная диаграмма направленности радиотелескопа для угла места  $\theta_0=0^\circ$  (расчет проводился по методике [8]). В связи с отсутствием достаточно яркого точечного источника на горизонте экспериментальную проверку диаграммы направленности осуществить не удалось. Наблюдения ярких точечных источников были выполнены только на  $\theta_0=48$  и  $87^\circ$ . По техническим причинам при измерениях можно было выставить всего 7 групп элементов отражателя (т. е. 175 щитов). Поэтому распределение поля в раскрыве антенны (особенно на высоких углах места) стало более равномерным, и величина близких боковых лепестков сильно возросла. На рис. 3 и 4 приведены кривые прохождения ярких точечных источников ЗС 273 ( $\theta_0=48^\circ$ ) и ЗС 84 ( $\theta_0=87^\circ$ ). Там же для сравнения показана форма и величина близких боковых лепестков диаграммы направленности для тех же углов места и с тем же количеством элементов, рассчитанных по двум независимым программам [9, 10].

Как следует из рис. 4, максимальный уровень близких боковых лепестков при наблюдении вблизи зенита составляет 1.9—1.7% (—17—18 дБ) при использовании неполного сектора из 7 групп. Удовлетворительное (с точностью 0.5%) согласие с расчетом дает основание полагать, что и для других углов места расчетная диаграмма направленности достаточно хорошо характеризует уровень близких боковых лепестков. Это качественно подтверждается наблюдениями на средних углах места (также с использованием сектора из 7 групп) (см. рис. 3).

Из анализа расчетной диаграммы направленности на горизонте (рис. 2) ясно, что уровень близких боковых лепестков должен быть малым (максимальный лепесток —34 дБ), а на расстоянии  $4'$  от оси диаграммы направленности менее —40 дБ и «динамический диапазон» на низких углах места определяется чувствительностью радиотелескопа. «Чистки» изображений источников на этих углах места не требуется. При использовании всей отражающей поверхности сектора нет необходимости «чистить» также источники малого углового размера на всех углах места.

Сложнее дело обстоит с протяженными источниками, излучение которых падает в незаштрихованную область рис. 1. Радиоизображение от этих источников необходимо чистить, однако для этого надо либо уметь проводить уверенный двумерный счет диаграммы направленности, либо использовать двумерные карты опорных объектов. К сожалению, в настоящий момент нет уверенности в реальности значительного расширения «динамического диапазона» радиотелескопа при работе на одном секторе при наблюдении сложных протяженных источников на высоких углах места.

**Динамический диапазон в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало».** Характер близких боковых лепестков диаграммы направленности в режиме работы «южный сектор плюс перископическое зеркало» в сильной степени определяется теневым эффектом (вторичное зеркало экранирует часть от-

ражающей поверхности кругового отражателя). Поэтому уровень боковых лепестков в этом случае больше, чем у диаграммы направленности северного сектора. Некоторым преимуществом является тот факт, что диаграмма направленности практически не меняется с углом места  $\theta_0$ .

Нами была сделана попытка улучшить динамический диапазон путем «чистки» близких боковых лепестков по опорному объекту. Для наблюдений

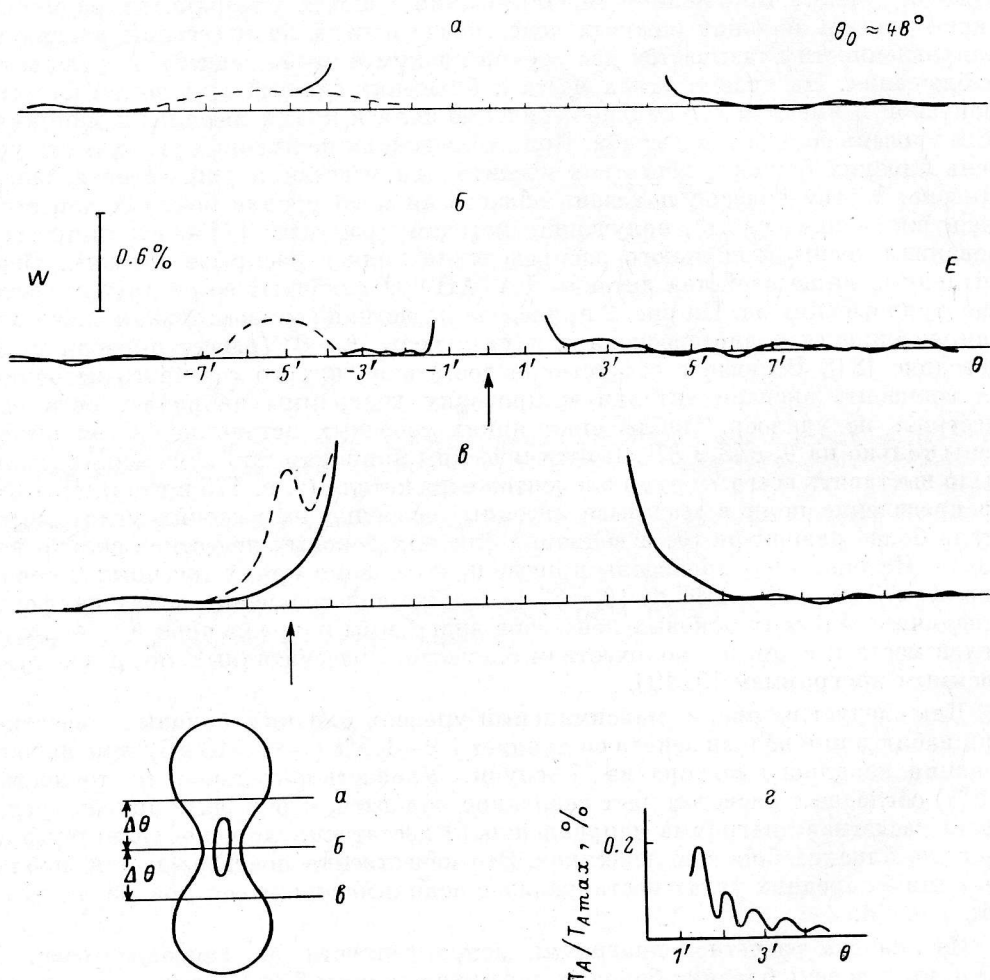


Рис. 3. Северный сектор. 3С 273.

Кривые прохождения радиисточника 3С 273 ( $\theta_0=48^\circ$ ) через диаграмму направленности северного сектора радиотелескопа: *a* — выше оси диаграммы направленности на  $\Delta\theta=8'$ ; *б* — центральное прохождение; *в* — ниже оси диаграммы направленности на  $\Delta\theta=-8'$ . Вверху — схематическое изображение траекторий точного движения радиисточников через диаграмму направленности радиотелескопа. Справа (*г*) — расчетный уровень близких боковых лепестков для центрального сечения диаграммы направленности. По оси абсцисс — расстояние от оси диаграммы направленности в минутах дуги. По оси ординат — отношение антенной температуры к значению ее на оси диаграммы. Центральная часть источника и главный лепесток центрального сечения диаграммы направленности (как и на всех последующих рисунках) опущены. Деталь слева (штриховая линия) не является боковым лепестком 3С 273. Это радиисточник, лежащий ниже оси диаграммы направленности и исследованный в [4, 11].

были выбраны два ярких источника — 3С 84 и 3С 345 ( $\theta_0=86^\circ$ ) и 3С 273 в качестве опорного объекта.

Радиисточник 3С 273 ранее был тщательно изучен на северном секторе [11] и было установлено, что рядом с сильным центральным источником расположен слабый источник (0.4—0.6% от центрального). Перед тем как использовать 3С 273 для «чистки» других источников, этот слабый объект был удален с кривой прохождения. Принятая для «чистки» кривая прохождения опорного источника показана на рис. 5 и 6 (*б*) сплошной линией. Из большого числа

наблюдений были отобраны и осреднены по три лучших записи каждого из источников. На рис. 5 и 6 приведены осредненные кривые прохождения источников ЗС 84, ЗС 273 и ЗС 345. Процедура «чистки» в данном случае сводилась

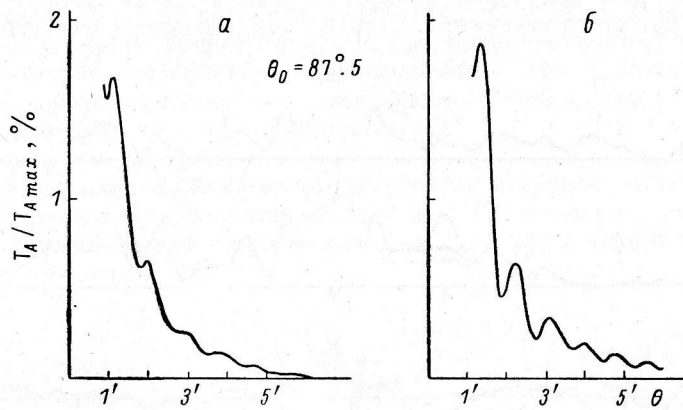


Рис. 4. Северный сектор. ЗС 84.

*a* — кривая прохождения радиоисточника ЗС 84 через центральное сечение диаграммы направленности радиотелескопа на волне 7.6 см; *b* — расчетная картина близких боковых лепестков. По оси абсцисс — расстояние от оси диаграммы направленности в минутах дуги, по оси ординат — отношение антенной температуры к значению антенной температуры на оси диаграммы направленности.

к совмещению максимумов кривых прохождения исследуемого и опорного источников, выравниванию максимальных антенных температур и вычитанию кривых друг из друга с учетом скорости движения источников по небесной сфере. Результаты вычитания приведены на рис. 5 и 6 (*e*).

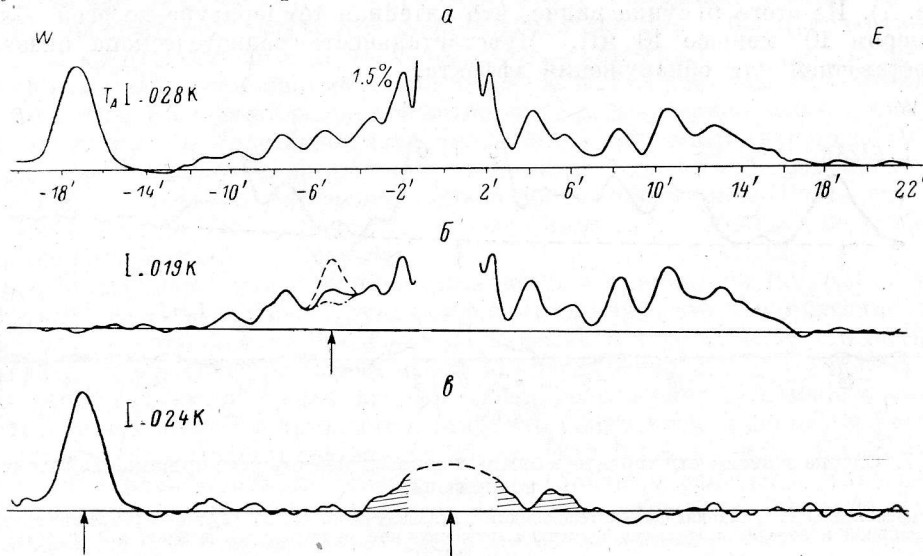


Рис. 5. Результат «чистки» источника ЗС 84 диаграммой направленности, измеренной по источнику ЗС 273, в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало».

Область неба вокруг радиоисточников ЗС 84 (*a*) и ЗС 273 (*b*); *e* — результат «чистки» (вычитания) из кривой *a* кривой *b*. Стрелками отмечены положения известных источников радиоизлучения (*b* — вблизи ЗС 273, *e* — вблизи ЗС 84). Заштрихованная область — выделенное гало под источником ЗС 84.

Заметим, что при таком способе чистки, когда оба источника оказались примерно одной яркости (рис. 5), чувствительность записи ухудшилась примерно в 1.4 раза. В случае чистки источника ЗС 345 чувствительность записи уменьшилась несущественно, так как яркость ЗС 273 более чем в 2 раза превосходит яркость ЗС 345.

Одновременно нами была сделана попытка применить те же методы «чистки» для исследования поляризации гало ЗС 84. Задача была поставлена Сюняевым. Ожидаемый эффект заключается в появлении поляризации при комптоновском рассеянии излучения от яркого центрального источника в горячем газе гало вокруг этого источника. Степень поляризации рассеянного излучения

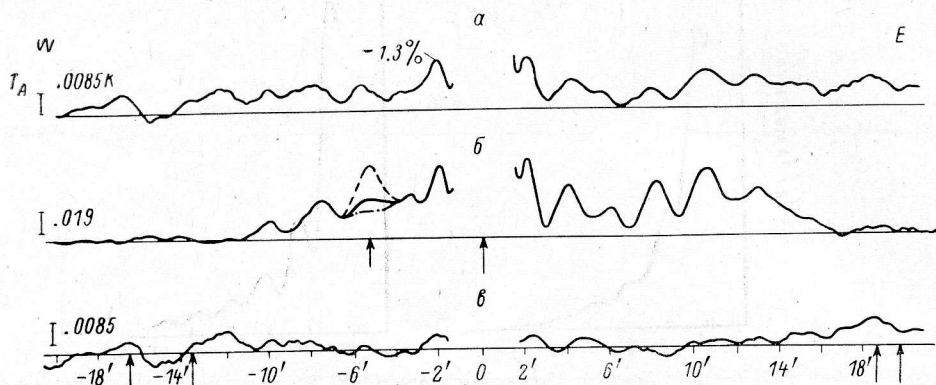


Рис. 6. Результат «чистки» источника ЗС 345 диаграммой направленности, измеренной по источнику ЗС 273, в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало».

*a* — область неба вокруг источника ЗС 345; *б* — область неба (осредненная по трем кривым прохождения) вокруг источника ЗС 273. Стрелками отмечены положения известных источников радиоизлучения вблизи ЗС 273; *в* — результат вычитания из кривой *a* кривой *б*. Стрелками отмечены положения известных источников вблизи ЗС 345.

близка к 60%. Были проведены измерения интенсивности в горизонтальной ( $I_x$ ) и вертикальной ( $I_y$ ) плоскостях с помощью поворота плоскости поляризации полуволновой пластинкой. После этого была вычислена разность  $I_y - I_x$  (рис. 7). Из этого рисунка видно, что антенная температура во всей области размером  $10'$  меньше  $10$  мК. Чувствительность радиотелескопа оказалась недостаточной для обнаружения эффекта.

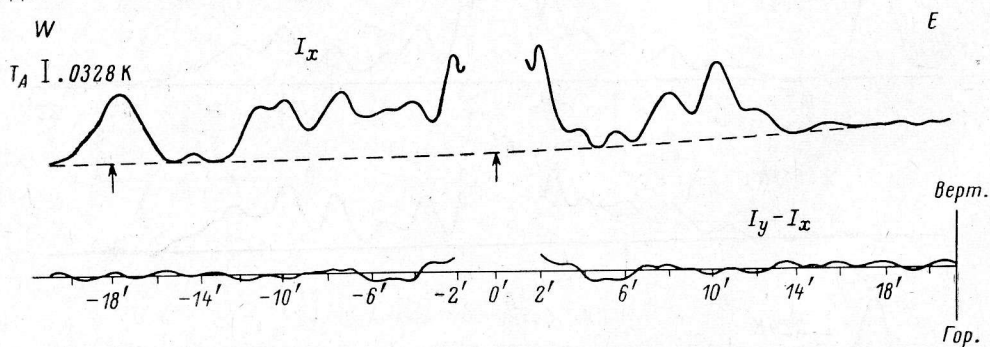


Рис. 7. Оценка зависимости характера близких боковых лепестков от принимаемой плоскости поляризации.

*a* — горизонтальная составляющая интенсивности радиоизлучения ЗС 84 ( $I_x$ ); *б* — результат сравнения вертикальной и горизонтальной составляющих интенсивности радиоизлучения источника ЗС 84 ( $I_y - I_x$ ) (см. текст).

Был проведен также эксперимент по выяснению влияния так называемых «дыр» (невыведенных элементов поверхности) плоского отражателя на уровень боковых лепестков. На рис. 8 приведена кривая прохождения источника ЗС 273 для случая двух невыведенных элементов плоского отражателя. Из сравнения рис. 8 с рис. 5 и 6 видно, что уровень близких боковых лепестков резко возрос, изменилась также и форма лепестков.

Анализ результатов измерений в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало» приводит к следующим выводам.

а) Максимальный лепесток (первый) составляет 1.5% ( $-18$  дБ). Средний уровень боковых лепестков в области  $\sim 0.5$  вокруг оси диаграммы равен

—21 дБ, среднеквадратичный уровень боковых лепестков в этой области —22 дБ.

б) Наблюдения показывают хорошую повторяемость близких боковых лепестков ото дня ко дню. Так, средний остаточный фон разности кривых прохождения, полученных по одному и тому же источнику в различные дни наблюдений, падает до —42 дБ, а среднеквадратичный уровень лепестков падает до —34.5 дБ. Последняя цифра близка к среднеквадратичному флуктуаций, обусловленных чувствительностью радиотелескопа. Из сказанного следует целесообразность и возможность «чистки» изображения с применением стандартных радиоастрономических алгоритмов [12].

в) Вычитание радиоизображения ЗС 273 из радиоизображения ЗС 84 (рис. 5) показывает, что эти изображения не тождественны: источник ЗС 84 (NGC 1275) не является точечным. Дополнительное слабое свечение вокруг ядра NGC 1275 обусловлено наличием радиогало, по которому в литературе имеются противоречивые сведения [13].

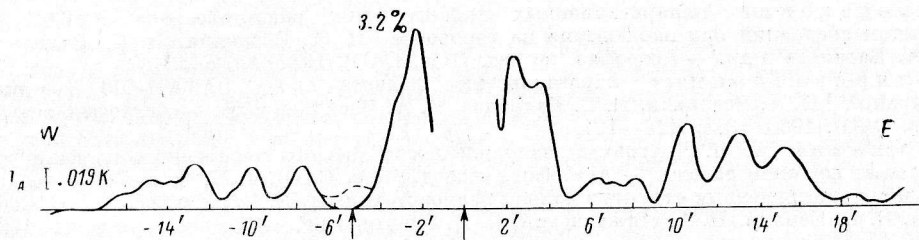


Рис. 8. Кривая прохождения радиои источника ЗС 273 через диаграмму направленности радиотелескопа в режиме «южный сектор плюс перископическое зеркало» в случае двух невыставленных элементов плоского отражателя (№ 57 и 65, нумерация элементов плоского отражателя идет с W на E от № 18 по № 107).

**Заключение.** Мы показали, что при наблюдениях источников малых угловых размеров на северном секторе при полном использовании рабочей поверхности и даже на южном секторе с перископом уровень близких к оси диаграммы направленности лепестков либо мал, либо может быть учтен по опорным объектам. Это уже сейчас позволяет решать некоторые астрофизические задачи, требующие реализации динамического диапазона по антенной температуре более 30 дБ.

При чувствительности по плотности потока от 1 до 0.1  $mJ_y$  радиотелескоп работает в зоне резкого уплощения кривой число источников—плотность потока ( $\log N - \log S$ ). Легко показать, что это приводит к повышению требований к уровню боковых лепестков.

Сравним найденные нами оценки динамического диапазона РАТАНА с возможностями радиотелескопов других типов. Напомним, что динамический диапазон и степень заполнения плоскости спектральной чувствительности ( $uv$ -плоскость) телескопа связаны между собой [14]. Особенно высокий уровень боковых лепестков имеют радиотелескопы апертурного синтеза с малым заполнением  $uv$ -плоскости. Это приводит к тому, что динамический диапазон Вестерборкского радиотелескопа составляет 20 дБ [15], VLA — около 13 дБ [16]. Заполненные радиотелескопы имеют уровень боковых лепестков, зависящий от распределения поля в апертуре и от различных «теневых» эффектов. Плавное спадание поля к краям апертуры приводит к малым лепесткам. Недавно в Эффельсберге был достигнут динамический диапазон 37 дБ при сохранении достаточно крутого обрыва поля. Однако его удастся реализовать только в задачах по поиску различных асимметричных структур вблизи ярких радиоисточников.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Н. Е. Гольневой, принимавшей активное участие в обработке результатов наблюдений на ЭВМ НР 9825А, А. Д. Алиакберову, проводившему ряд поляризационных наблюдений, и Г. М. Тимофеевой, изготовившей и настроившей полуволновую пластинку для этих наблюдений. Авторы выражают благодарность Ю. Н. Парийскому за помощь и интерес к работе, Н. А. Есепкиной и А. А. Стоцкому, высказавшим много полезных критических замечаний при чтении рукописи.

### Литература

1. Райл М. Проблемы путаницы и обзоры дискретных источников. — В кн.: Радиоастрономия. Парижский симпозиум 1958 г. М.: Иностран. лит., 1961, с. 465—467.
2. Стейнберг Б. Д. Влияние относительной интенсивности источников и отношения сигнал / шум на угловую разрешающую способность антенны. — ТИИЭР, 1974, 62, № 6, с. 128—132.
3. Large dynamic range observations with the Effelsberg 100-m radio telescope / W. Reich, P. Kalberla, K. Reif, Neidhofer. — *Astron. Astrophys.*, 69, p. 165—170.
4. Stute U., Reich W., Kalberla P. High dynamical range observations in the fields of strong extragalactic radio sources. — *Astr. Ap. Suppl.*, 1980, Ser. 42, p. 299—310.
5. Радиотелескоп РАТАН-600 в режиме низких собственных шумов / — А. Б. Берлин, Л. Г. Гасанов, В. Я. Гольнев и др. — *Радиотехника и электроника*, 1982, XXVII, № 7.
6. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы использования РАТАН-600. — *Изв. ГАО*, 1972, № 188, с. 13—39.
7. Bracewell R. N. Strip integration in radioastronomy. — *Austr. J. Physics*, 1956, 9, 2, p. 198—217.
8. Определение поляризационных характеристик радиотелескопа РАТАН-600 с учетом аббераций при наблюдении на горизонте / Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1982, 15, с. 151.
9. Поляризационные характеристики радиотелескопа РАТАН-600 с учетом аббераций / Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1980, 12, с. 116—124.
10. Коржавин А. Н. Диаграммы направленности антенны переменного профиля для реальных режимов работы. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1977, 9, с. 71.
11. Поиск протяженных структур вблизи радиоисточников ЗС 120 и ЗС 273 / Н. С. Соболева, Б. Я. Берлин, Н. А. Нижельский, Е. Е. Спангенберг. — *Письма в Астр. ж.*, 1982, 8, № 4.
12. Hogbom J. A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. — *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1974, 15, p. 417.
13. Gisler G. R., Miley G. K. 610 MHz observations of the Perseus Cluster of Galaxies with the Westerbork Synthesis Radio Telescope. — *Astron. Astrophys.*, 1979, 76, p. 109—119.
14. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиометры и радиотелескопы. М.: Наука, 1973.
15. Радиотелескоп апертурного синтеза в Вестерборке / Я. Баарс, Д. Вандер Брюгге, Д. Кассе. — ТИИЭР, 1973, 61, с. 115—127.
16. The very large array / A. R. Thomson, B. G. Clark, C. M. Wade, P. J. Napier. — *Astrophys. J. Suppl.*, 1980, 64, p. 151—167.

Поступила в редакцию 13.05.82