

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ ОТ ЗАКОНА ОБЛУЧЕНИЯ АПЕРТУРЫ

*А. Н. Коржавин*

Методом оптического моделирования исследуется зависимость диаграммы направленности антенны переменного профиля (АПП) от закона облучения апертуры. Различные распределения амплитуды поля в раскрыве антенны имитируются фотографически изготовленными фильтрами переменной плотности. Количественные данные получены с помощью фотоэлектрической регистрации дифракционных изображений. Обработка измерений производится с помощью ЭВМ с параллельным выводом данных в виде графиков на графопостроитель и в виде цифровых таблиц на АЦПУ. Показано, что характерная для случая равномерного облучения апертуры структура боковых лепестков диаграммы направленности АПП — вертикальные сектора, усы, шахматная сетка — при спадающих к краям распределениях поля сглаживается, приближаясь к полученной методом расчета. В случае, когда края антенны облучаются сильнее, чем ее центр, боковые лепестки усиливаются, образуя X-образную структуру.

Using the method of optical simulation a study is made of the dependence of the variable profile antenna (VPA) pattern properties on the law of aperture illumination. Different distributions of the field amplitude are imitated by means of photographic filters of variable transparency. Quantitative data are obtained by recording of diffraction patterns. The output signal is treated with a computer and the data are represented as graphs and tables. It is shown that with the field distribution decreasing at the edges the typical homogeneous illumination features of the antenna pattern — chess — board structure, X-type moustache — smooth and grow similar to those obtained earlier by computation methods. In the case when the edges receive more intensive illumination, the sidelobes grow stronger forming an X-shape structure.

## Введение

Подробное знание свойств диаграммы направленности радиотелескопа необходимо для корректной обработки наблюдений. Исследование диаграммы направленности телескопа позволяет выявить ее особенности, учет которых необходим при разработке различных режимов использования инструмента. Диаграммы направленности антенны переменного профиля (АПП) исследовались экспериментально [1], расчетным методом [2, 3], а также методом оптического моделирования [4]. В работе [4] исследовались свойства диаграммы АПП для случая равномерного облучения апертуры. Было показано, что в этом случае боковые лепестки диаграммы направленности АПП образуют характерную структуру (усы, шахматная сетка), которая расположена выше и ниже главного лепестка диаграммы. Главный лепесток хорошо выражен, его размеры определяются общими размерами апертуры, однако большая часть энергии содержится в протяженной системе боковых лепестков.

В настоящей работе продолжены исследования, начатые в [4]. Основное внимание уделяется изучению зависимости диаграммы АПП от различных типов облучения апертуры. Для этой цели установка для оптического моде-

лирования, аналогичная использованной в [4], была дополнена фотоэлектрическим регистрирующим устройством и иммерсионной ванной, которая располагается перед отверстием, имитирующим раскрыв АПП, и в которую погружаются фотографически изготовленные фильтры, имитирующие распределение поля в раскрыве.

### Описание установки

На рис. 1 показана схема установки для оптического моделирования диаграмм направленности антенн радиотелескопов. В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер ЛГ-36, работающий на волне  $6328 \text{ \AA}$  в одномодовом режиме. Поляроидная пленка  $\Pi$ , перекрывающая пучок излученного лазером света, используется для регулирования интенсивности света в установке. Известно, что излучение газового лазера всегда линейно поляризовано благодаря расположению окон в газоразрядной трубке под углом Брюстера [5]. Изменяя угол между плоскостями поляризации излучения лазера и поляроида  $\Pi$  можно в широких пределах регулировать интенсивность света в установке. Линзы  $L_1$  и  $L_2$  образуют коллиматор, обеспечивающий получение широкого параллельного пучка света диаметром около 40 мм. Пространственный фильтр  $\Pi\Phi$  служит для улучшения когерентности излучения. Диаметр отверстия  $\Pi\Phi$  равен 0.01 мм. Линза  $L_2$  коллиматора,

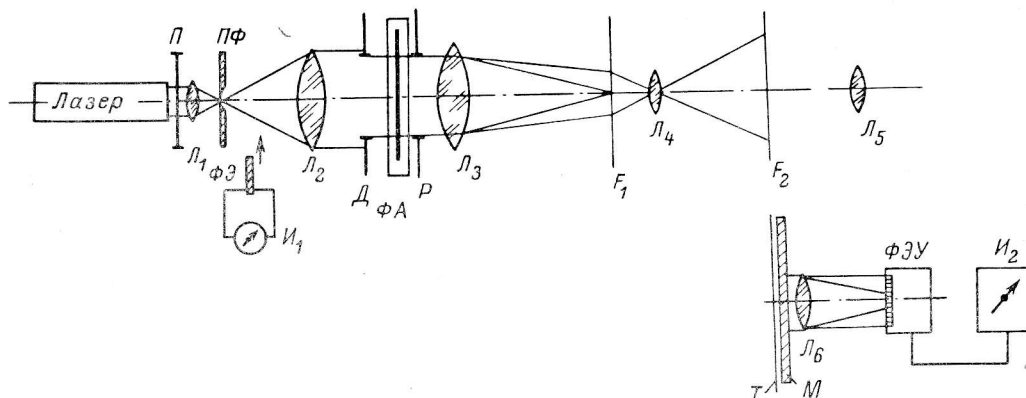


Рис. 1. Схема установки для оптического моделирования диаграмм направленности радиотелескопов.

плосковыпуклая тонкая с диаметром 50 мм и  $f=300$  мм обращена выпуклой стороной в сторону  $L_1$ . При этом отраженный плоской стороной линзы  $L_2$  пучок фокусируется в точку в плоскости  $\Pi\Phi$  вблизи его отверстия, что используется при настройке коллиматора.

Диафрагма  $Д$  вырезает из пучка света, даваемого коллиматором, однородный с неравномерностью не более 10% пучок диаметром 10 мм, который используется для работы. Пластина  $Р$  представляет собой непрозрачный экран с отверстием, имитирующим раскрыв исследуемой антенны. Как известно [2], раскрыв АПП представляет собой часть кольца с радиусом  $r$ , зависящим от угла места наблюдения  $\theta_0$ , так что  $r=R/\sin\theta_0$ , где  $R$  — радиус исходной окружности АПП. В настоящей работе использовалась кольцевая щель с  $r=4.89$  мм, соответствующая углу  $\theta_0=53^\circ 3'$  (при  $R=3.92$  мм). Ширина кольцевой щели  $h_x=0.15$  мм. Щель изготовлена в фольге из бериллиевой бронзы путем выжигания электроискровым способом.

Амплитудный фильтр  $\Phi А$ , при необходимости вводимый в оптическую систему, располагается последовательно с пластинкой  $Р$ . Фильтры  $\Phi А$  изготавливаются фотографическим способом и для уменьшения фазовых ошибок помещаются в иммерсионную ванну. Фазовые искажения вызываются, в ос-

новном, неравномерностью толщины основы фотопленки. Данный вопрос рассмотрен, например, в работах [6, 7]. В качестве иммерсионной жидкости мы используем толуол. Его коэффициент преломления  $n=1.497$  (при  $t=20^\circ\text{C}$  и  $\lambda=5893\text{ \AA}$  [8]). При тех же условиях коэффициент преломления ацетилцеллюлозы  $n=1.49\div 1.50$  и желатина  $n=1.530$  [9]. Толуол практически никак не воздействует на фотопленку и быстро высыхает, не оставляя на ней никаких следов. Это очень удобно, так как допускает многократное использование фотографических фильтров. Сама иммерсионная ванна сделана из двух высококачественных плоскопараллельных стеклянных пластинок размером  $50 \times 50$  мм, склеенных по краям с трех сторон с зазором 0.5 мм. Объем ванны 0.5 см<sup>3</sup>. Расход жидкости и ее испарение во время работы незначительны.

Линза  $L_3$  служит для преобразования созданного перед ней светового поля. При этом в ее фокальной плоскости  $F_1$  наблюдается дифракция Фраунгофера, а в пространстве между  $F_1$  и  $L_3$  — дифракция Френеля. В качестве  $L_3$  используются линзы с фокусными расстояниями  $f=300$  мм и  $f=1000$  мм. Линза  $L_3$  (плосковыпуклая тонкая) обращена плоской стороной к  $L_2$ . Отраженный этой стороной пучок света фокусируется линзой  $L_2$  на плоскости  $ПФ$ , что используется для юстировки положения линзы  $L_3$ .

Проекционная короткофокусная ( $f=40$  мм) линза  $L_4$  служит для переброски в увеличенном виде изображения из плоскости  $F_1$  в плоскость  $F_2$ . Эквивалентное фокусное расстояние системы из  $L_3$  и  $L_4$  легко меняется и может быть сделано гораздо больше, чем расстояние между  $L_3$  и  $F_2$ . Линзы  $L_2$ — $L_4$  и плоскопараллельные пластинки для иммерсионной ванны изготовлены в оптических мастерских Главной астрономической обсерватории АН СССР. Точность их поверхностей около  $0.1\lambda$  на размере 50 мм. Это соответствует фазовым ошибкам порядка  $0.01\lambda=3^\circ$  на размерах моделей  $d=5$  мм. Соотношения между размерами моделей (5 мм) и фокусными расстояниями линз (300—1000 мм) обеспечивают хорошее выполнение условий параксиального приближения.

Плоскостной селеновый фотоэлемент  $ФЭ$  вместе с микроамперметром  $И_1$  служит для измерения и контроля интенсивности света. Фотоэлемент можно вводить в пучок света либо после  $ПФ$ , либо после линзы  $L_3$ . С помощью  $ФЭ$  и поляроида  $П$  интенсивность пучка регулируется так, чтобы яркость дифракционных изображений была примерно одинаковой для различных щелей. Это необходимо при фотографической регистрации, чтобы обеспечить постоянный диапазон выдержек для различных типов исходных распределений светового поля. При проведении серии фотоэлектрических измерений  $ФЭ$  вводится в пучок перед каждой регистрацией для контроля постоянства мощности излучаемого лазером света.

Фотографирование дифракционных картин производится при помощи зеркальной камеры типа «Зенит» на 35-мм фотопленку. При этом обычно используется диапазон выдержек от 1/500 сек. до 1 мин. При коротких выдержках получается изображение главного и первых боковых лепестков, при больших выдержках эти области диаграммы получают сильно передержанными, в то время как хорошо прорабатываются далекие боковые лепестки. Обработка снимков для получения количественных данных производится обычными методами фотографической фотометрии [10, 11] и подробно описана в работе [4].

Визуальное изучение дифракционных картин производится с помощью лупы  $L_5$ , в качестве которой служит окуляр видоискателя камеры «Зенит».

Фотоэлектрическая регистрация обеспечивается  $ФЭУ$  с записью сигнала на самописец  $И_2$ .  $ФЭУ$  установлен на каретке, которая перемещается в горизонтальном направлении с помощью синхронного электромотора. По вертикали каретка переставляется вручную. Точность отсчетных устройств по обеим координатам 0.01 мм. При сканировании диаграмм направленности антенн в плоскости изображения  $F_2$  помещается диафрагма  $T$  с точечным от-

вертием (диаметром 0.01 мм). Величина этого отверстия в 25—30 раз меньше самых узких деталей дифракционного изображения. Расстояние между  $T$  и входным окном ФЭУ около 60 мм. Благодаря дифракции пучок света, прошедший через это отверстие, расширяется и освещает участок входного окна ФЭУ диаметром 5 мм (диаметр окна — 10 мм), вследствие чего исключается влияние на измерения неравномерности чувствительности в разных точках фотокатода.

Описываемая установка использовалась также и для получения сверток исследуемых диаграмм направленности с моделями различных радиоисточников [12]. Для этого точечная диафрагма  $T$  заменялась транспарантом, имитирующим радиоисточник, и добавлялись рассеиватель  $M$  и линза  $L_6$  (рис. 1).

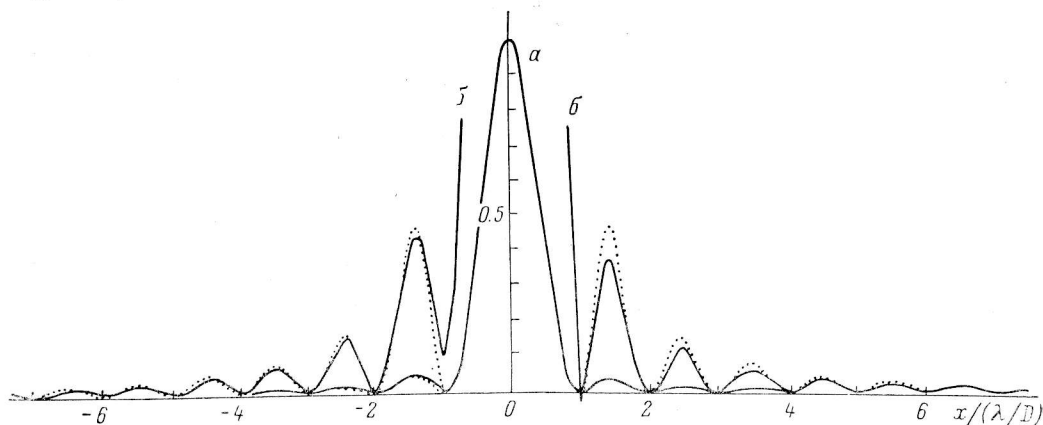


Рис. 2.

$a$  — регистрограмма дифракции на квадратном отверстии,  $b$  — то же в масштабе 10 : 1.

Для оценки точности и проверки линейности фотоэлектрической регистрации производилось сканирование дифракционных изображений от квадратного отверстия. На рис. 2 приведены копии таких регистраций (*сплошные линии*) и расчетные кривые  $(\sin x/x)^2$  (*пунктирные*). Показано распределение интенсивности вдоль главной оси изображения, полученное в двух масштабах. Кривая  $a$  демонстрирует главный и ближайшие боковые лепестки, кривая  $b$  в десятикратном масштабе показывает более далекие лепестки изображения. Как видно из рис. 2, точность фотоэлектрической регистрации не менее 1—2%.

На рис. 3 приведены копии записей, показывающие, какое влияние на дифракционное изображение оказывают фазовые ошибки при введении в оптическую систему фотографического фильтра  $\Phi A$  (рис. 1). Сечения дифракционной картины от прямоугольной щели размером  $5.00 \times 0.11$  мм получены для схем, когда: 1) имеется только щель  $P$  (рис. 3,  $a$ ); 2) перед щелью имеется прозрачная фотопленка, помещенная в иммерсионную ванну (рис. 3,  $b$ ); 3) перед щелью имеется фотопленка без иммерсии (два примера — рис. 3,  $в$  и  $г$ ). В первых двух случаях дифракционные изображения щели практически не отличаются и близко описываются функцией  $(\sin x/x)^2$ , в то время как в последних двух случаях ясно видны искажения, обусловленные локальными неоднородностями фотоматериала.

Фильтры  $\Phi A$  с переменной прозрачностью изготавливались фотографическим путем, они имеют круговую симметрию с плавным изменением плотности вдоль радиуса. Для того чтобы получить такой фильтр, на листе бумаги рисовались тушью фигуры, подобные изображенной на рис. 4,  $a$ . Затем такая фигура прикреплялась к диску, укрепленному на оси двигателя. При его вращении фигура размазывается в круг с плавным изменением яр-



кости вдоль радиуса и в таком виде фотографируется [13]. На рис. 4, б показан один такой фильтр, изображенная здесь дуга показывает располо-

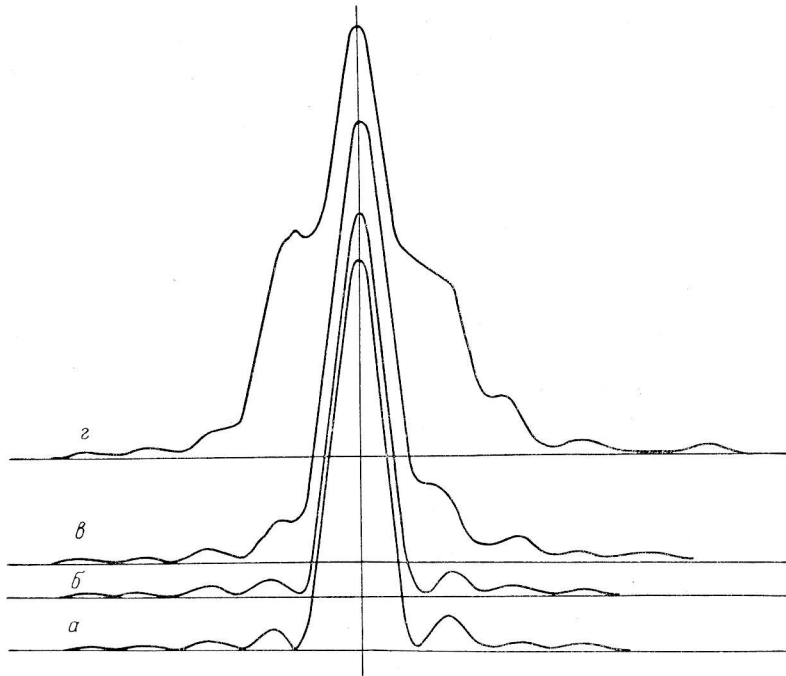


Рис. 3. Регистрограммы дифракции на прямой щели в схеме, когда имеются только щель (а), щель и пленка в иммерсионной ванне (б), щель и пленка без иммерсии (в).

г — то же, то и в, только другой участок пленки.

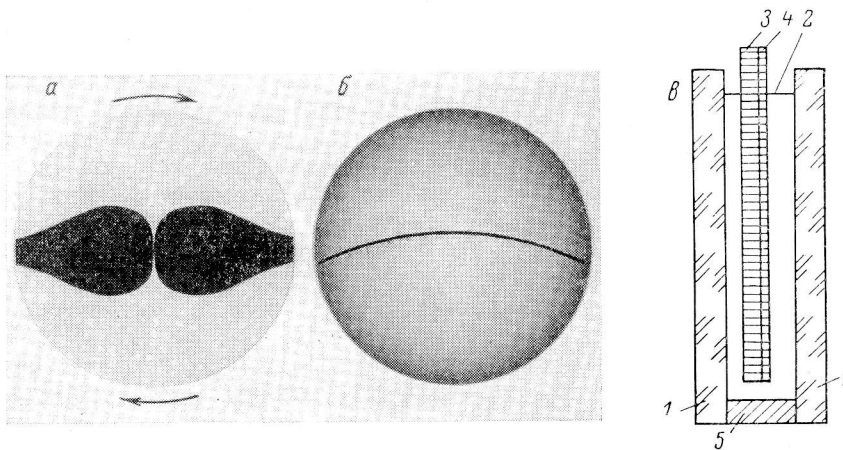


Рис. 4.

а — фигура, которая фотографируется во время вращения; б — радиальный фильтр переменной плотности; а — схема иммерсионной ванны; 1 — стеклянные пластинки, 2 — иммерсионная жидкость, 3 — основа фотопленки, 4 — эмульсия, 5 — клей.

жение щели относительно фильтра. Ясно, что при этом изменение прозрачности происходит в основном вдоль щели, что вполне достаточно для имитации распределения амплитуды поля в апертуре АПП.

## Результаты экспериментов

Для изучения вопроса о влиянии типа облучения апертуры на диаграмму направленности АПП были выбраны семь радиальных фильтров, охватывающих гамму распределений от сильно спадающих к краям до распределений, когда края антенны облучаются сильнее, чем ее центр. Причем, среди фильтров, дающих спадающее к краям облучение, имеются такие, которые имитируют законы облучения, близкие к экспериментально измеренным для БПР и РАТАН-600.

На рис. 5 показано действие выбранных типов облучения на диаграмму направленности АПП для случая установки антенны на высоту  $53^\circ 3'$ . В верхнем ряду на рис. 5 приведены копии кривых пропускания  $P(s)$  использованных радиальных фильтров. В среднем ряду даны снимки дифракционных картин, иллюстрирующие изменение главного лепестка диаграммы АПП в зависимости от типа облучения. Наконец, в нижнем ряду на рис. 5 показано, как изменяется система боковых лепестков АПП при изменении закона облучения апертуры. Видно, что при спадающем к краям распределении поля в апертуре (типы облучения 2—5) структура боковых лепестков сглаживается, сектора ярких лепестков сужаются, главный лепесток расширяется, снижается уровень боковых лепестков в области вне ярких секторов, причем тем сильнее, чем слабее облучение краев отверстия по сравнению с его центром. Если же края отверстия облучены сильнее, чем его центр (тип облучения 7), то изменения дифракционной картины носят противоположный характер. При двугорбом облучении апертуры (рис. 5, тип облучения 6) диаграмма приобретает X-образную форму.

Количественные данные о диаграмме направленности АПП были получены путем фотоэлектрической регистрации дифракционных изображений. При каждом сканировании дифракционной картины на ленте самописца получалась запись, соответствующая горизонтальному сечению диаграммы АПП. Обработка записей производилась на ЭВМ М-222 с выводом информации в виде таблиц на АЦПУ и графиков на графопостроителе «Атлас». Результаты обработки фотоэлектрических измерений диаграмм АПП приведены на рис. 6.

Оцифровка записей сечений диаграммы АПП производилась вручную. Величина интервалов между сечениями выбиралась в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова с учетом того, что максимальная пространственная частота диаграммы в вертикальном направлении определяется величиной стрелки раскрытия АПП. Интервал между отсчетами в каждом горизонтальном сечении был выбран несколько меньше, чем величина, определяемая максимальной пространственной частотой в этом направлении. При обработке на ЭВМ для получения достаточно густой сетки для построения графиков производилась интерполяция измеренных значений на узлы сетки. В вертикальном направлении интерполяция производилась по формуле Котельникова, а в горизонтальном направлении с помощью кубической параболы.

Перед оцифровкой регистрограмм производилось их графическое усреднение. Диаграмма направленности АПП в рассматриваемых случаях обладает центральной и осевой симметрией, вследствие чего яркость дифракционных изображений в каждой из четырех точек с координатами  $(\pm x, \pm y)$  должна быть одинаковой. В действительности яркости в этих точках несколько различались, что и вызывало необходимость проведения усреднения. Чтобы обеспечить нужные для этого условия, сканирование изображений производилось в сечениях, расположенных симметрично выше и ниже центрального горизонтального сечения.

Практически усреднение регистрограмм состояло в наложении друг на друга по четыре соответствующих участка записей и построении на кальке усредненной кривой. Обработка измеренных величин на ЭВМ состояла в приведении к одному масштабу отдельных сечений (учет непостоянства мощности

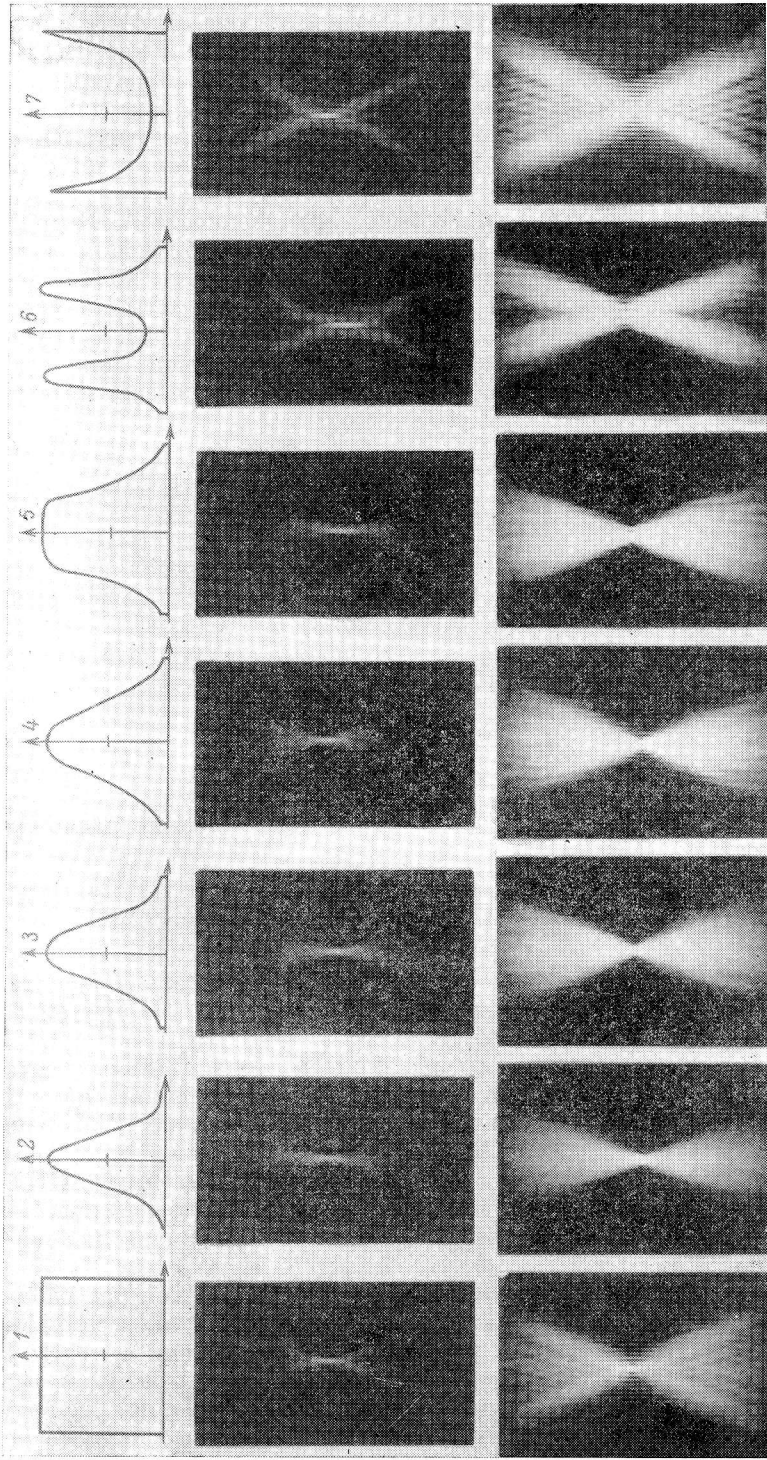


Рис. 5. Дифракция на криволинейной щели, имитирующей апертуру АПШ при установке на высоту  $53^{\circ} 3'$ , при различных законах облучения.

Верхний ряд — кривые пропускания радиальных фильтров (цифры — номера типов облучения); средний ряд — снимки с выдержкой  $1/60$  сек., показывающие главный лепесток диаграммы направленности АПШ; нижний ряд — снимки с выдержкой 1 сек., показывающие боковые лепестки диаграммы.

излучения лазера), нормировке данных к максимальному значению, интерполировании измерений на узлы сетки для построения графиков, построении графиков с параллельным выводом цифровых значений в виде таблиц. Каждый из графиков представляет собой горизонтальное сечение диаграммы направленности АПП. Каждое следующее сечение на рис. 6,  $a$ — $ж$  сдвинуто относительно предыдущего на одинаковую величину вниз и влево. Густота сечений выбрана такой, чтобы в целом рисунок давал объемное представление о диаграмме АПП. На рис. 6 показан только один квадрант диаграммы. Значения координат  $x$  (горизонтальное направление) и  $y$  (вертикальное направление) даны в единицах  $\lambda/R$ . Интервал между сечениями по  $y$  равен  $0.397 \lambda/R$ .

На рис. 6, показывающих вид диаграммы направленности АПП при различных законах облучения раскрыва, номера типов облучения соответствуют таковым на рис. 5. Слева внизу на рис. 6 приведены копии кривых пропускания использованных радиальных фильтров. Изофоты по уровням 0.5, 0.1 и 0.025 от максимального значения построены на рис. 6 вручную. Слева вверху на каждом из рис. 6 приведены кривые, дающие дополнительные характеристики диаграммы АПП. Так, кривая 1 показывает интегральную вертикальную диаграмму АПП  $A(y)$ :

$$A(y) = \int_{x_1}^{x_2} A(x, y) dx.$$

Форма и размеры диаграммы  $A(y)$  в большой степени определяются вертикальной диаграммой отдельного отражающего элемента, служащей огибающей тонкой структуры диаграммы направленности АПП [2, 4].

Кривая 2 иллюстрирует интегральную горизонтальную диаграмму АПП  $A(x)$ :

$$A(x) = \int_{y_1}^{y_2} A(x, y) dy.$$

Кривая 3 — свертку  $A(x')$  диаграммы АПП с вертикально расположенной полуплоскостью:

$$A(x') = \int_{x_1}^{x_2} A(x - x') dx.$$

Эта кривая при подходящем соотношении угловых размеров диаграммы и протяженного источника излучения близка к кривой его прохождения через диаграмму направленности АПП.

Кривая 4 демонстрирует ширины различных горизонтальных сечений диаграммы АПП  $\Theta_{0.5}(y)$ . Эти ширины определяются по уровням 0.5 от максимальных значений в этих сечениях и выражены в единицах  $\lambda/R$ . Кривые 1—3 нормированы к их максимальным значениям. Кривая 3 представляет только половину кривой вхождения полуплоскости в диаграмму АПП. Ее значение 0.5 соответствует направлению оси диаграммы точно на край полуплоскости. Вторая половина кривой центрально-симметрична первой относительно точки 0.5.

Кривые 1 и 4 дают необходимую информацию для обработки наблюдений радиоисточников на АПП. Так, для определения потоков источников наблюдаемые значения необходимо исправить в соответствии с ходом кривой 1, а для определения по уширению записи эффективных размеров радиоисточников ширины соответствующих горизонтальных сечений диаграммы могут быть определены из кривой 4. Конечно, для наиболее полного решения задачи о восстановлении распределения радиояркости необходимо учитывать всю структуру диаграммы АПП, информация о которой содержится в основных графиках на рис. 6. Для определения таких характеристик, как

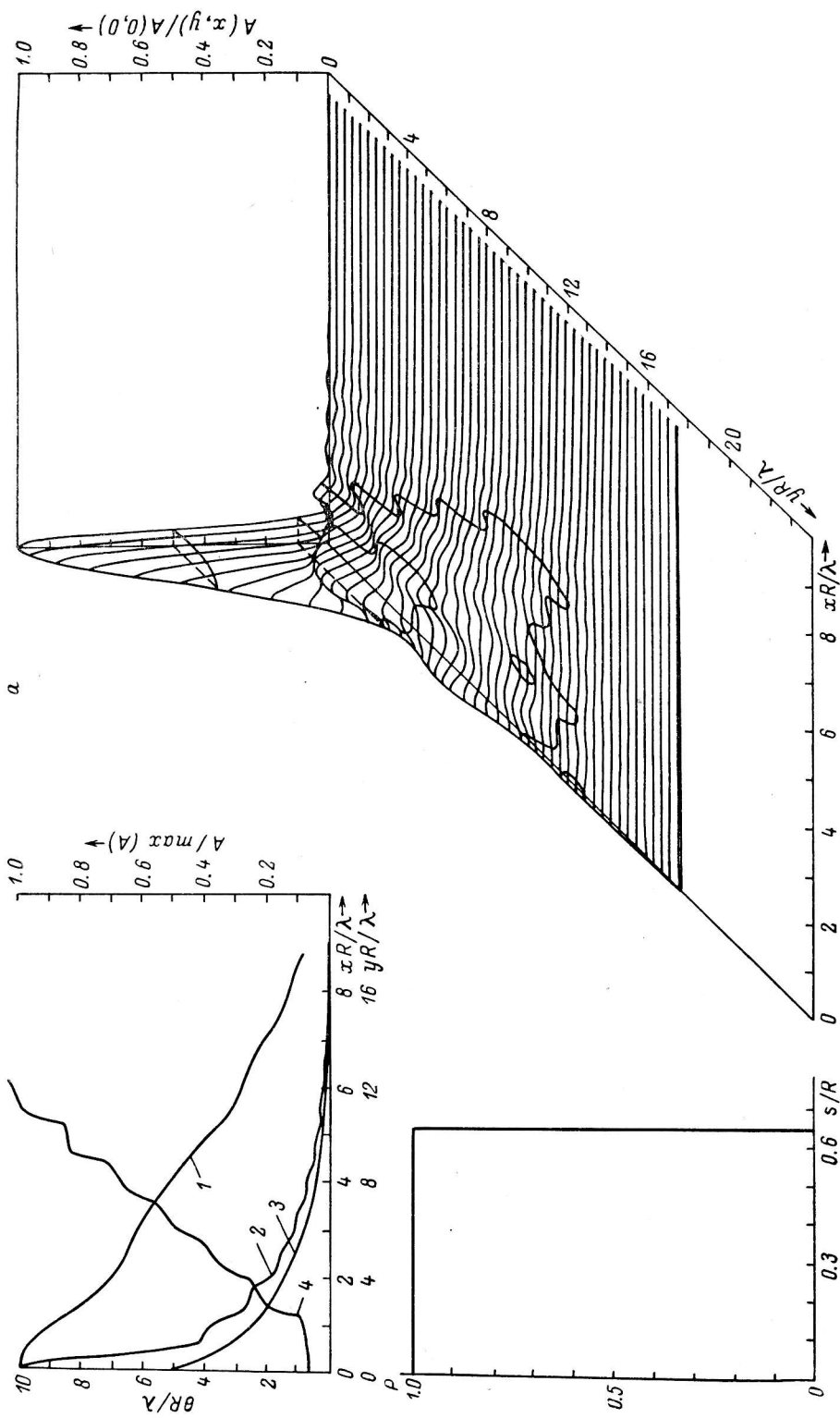


Рис. 6.

а — диаграмма направленности АПН для  $\theta_0 = 53^\circ$  и типа облучения № 1. Показан только один квадрант диаграммы  $A(x, y)/A(0, 0)$ . Координаты  $(x, y)$  — прямоугольные угловые на небесной сфере в окрестности главного направления  $x = y = 0$  (выражены в единицах  $\lambda/R$ ). Координатные оси параллельны:  $x$  — горизонтальному,  $y$  — вертикальному направлениям. Слева внизу показана кривая пропускания  $P(s)$  радиального фильтра. Расстояние  $s$  от центра фильтра выражено в единицах  $R$  (радиус исходной окружности АПН). Слева вверху приведены: 1 — вертикальная интегральная диаграмма  $A(y)$ , 2 — горизонтальная интегральная диаграмма  $A(x)$ , 3 — свертка  $A(x')$  диаграммы АПН с вертикальной полуосью, 4 — ширины горизонтальных сечений  $\theta_{0,5}(y)$  по уровням 0.5 от соответствующих максимумов. Кривые 1—3 нормированы к их максимальным значениям, ширины  $\theta_{0,5}(y)$  выражены в единицах  $\lambda/R$ . Масштабы по  $x$  и по  $y$  отличаются в 2 раза. б —  $\theta_{0,5}$  — то же, что и на а соответственно для типа облучения № 2—4.

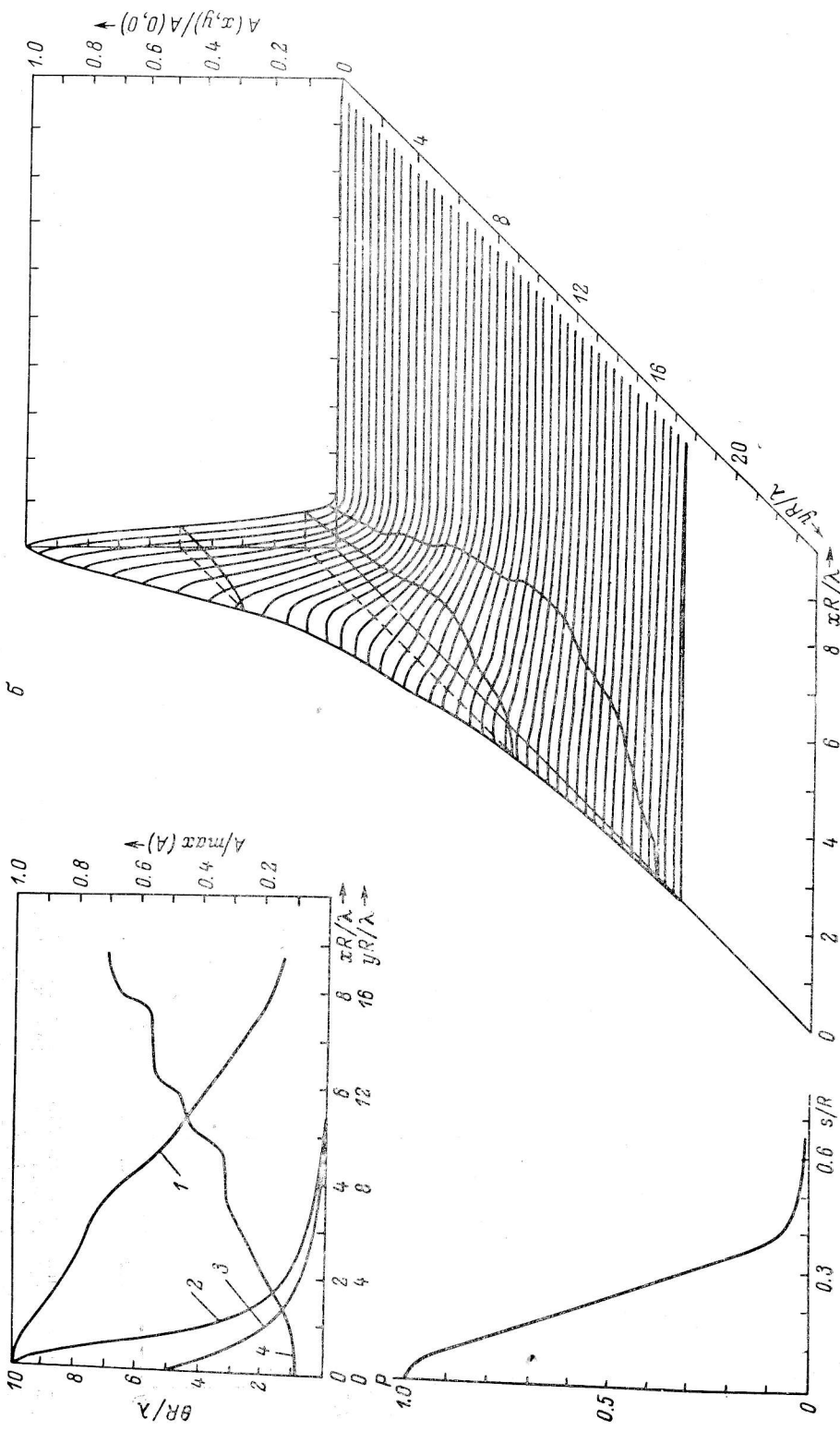


Рис. 6. (продолжение).



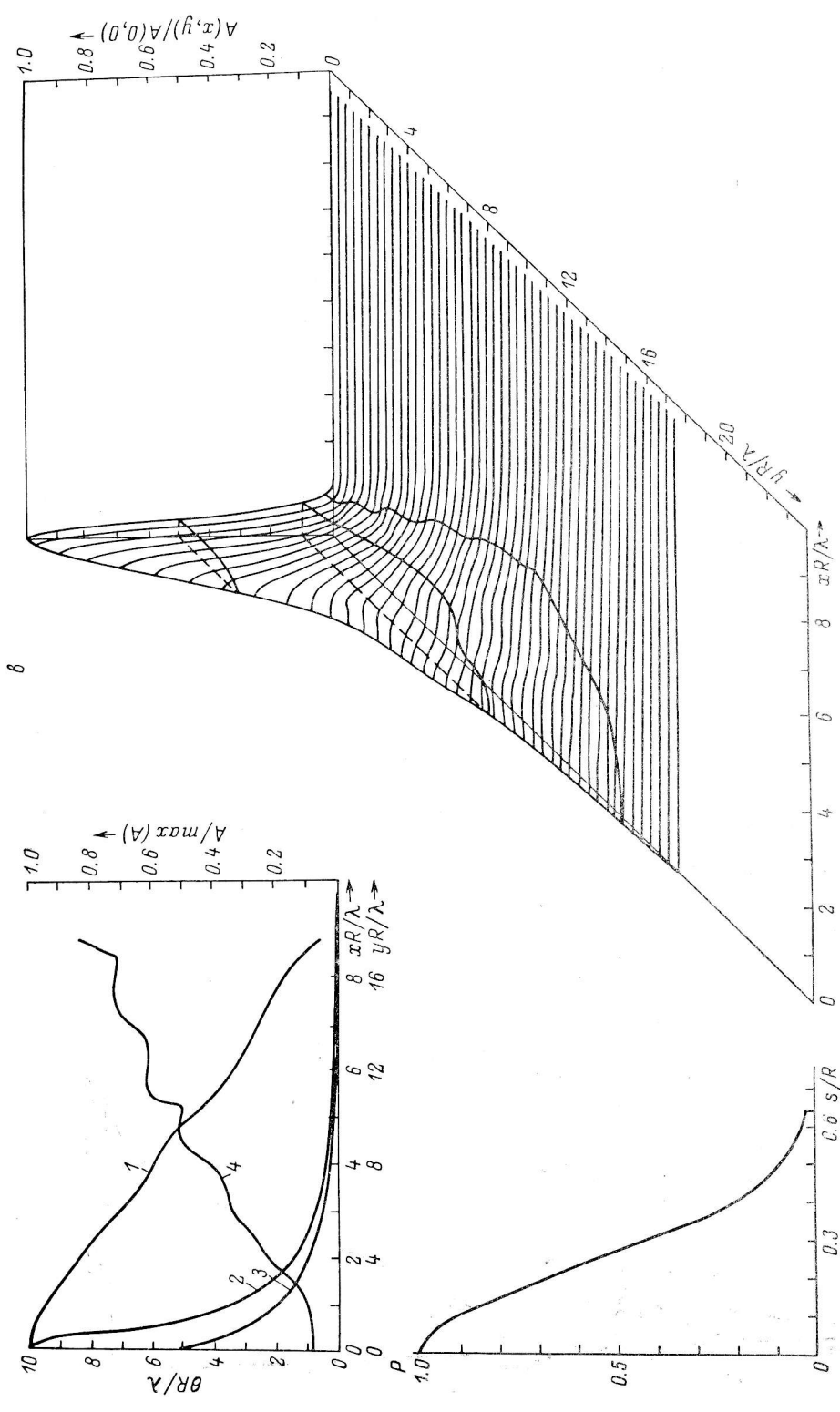


Рис. 6 (продолжение).

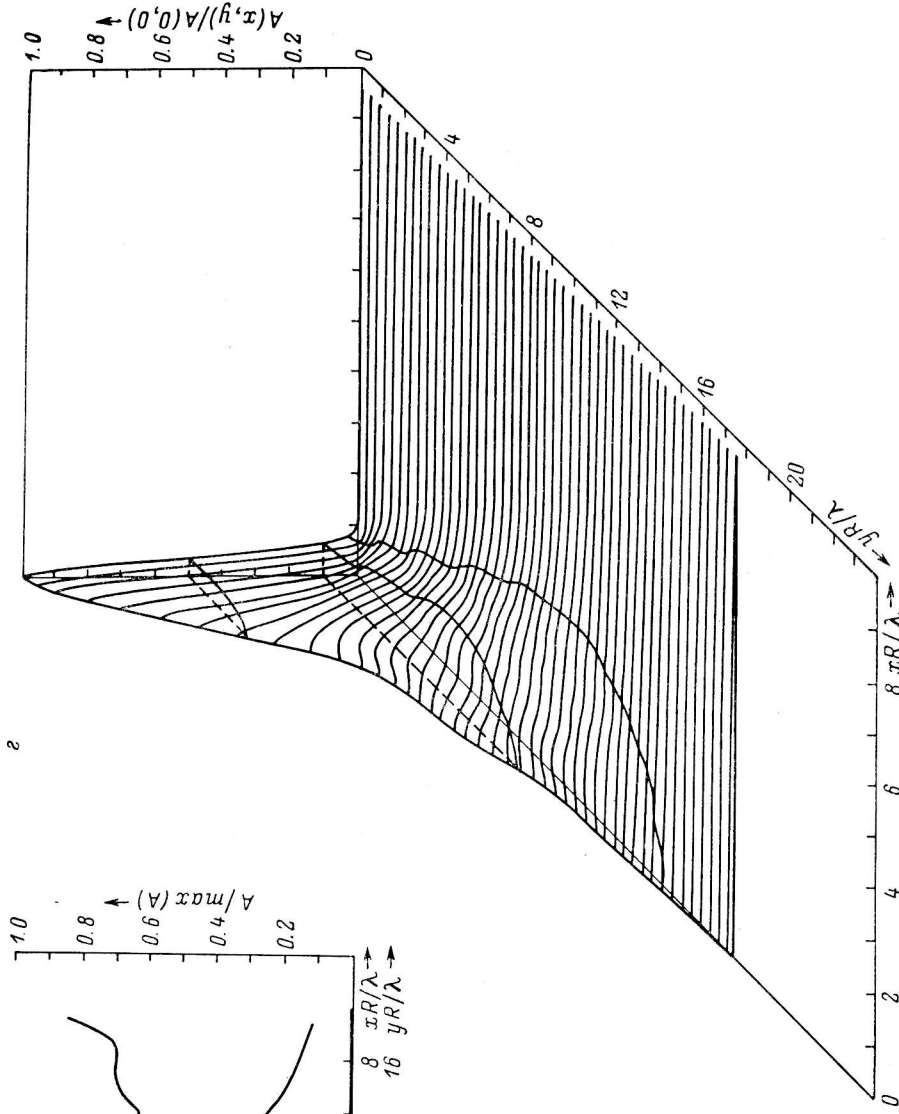
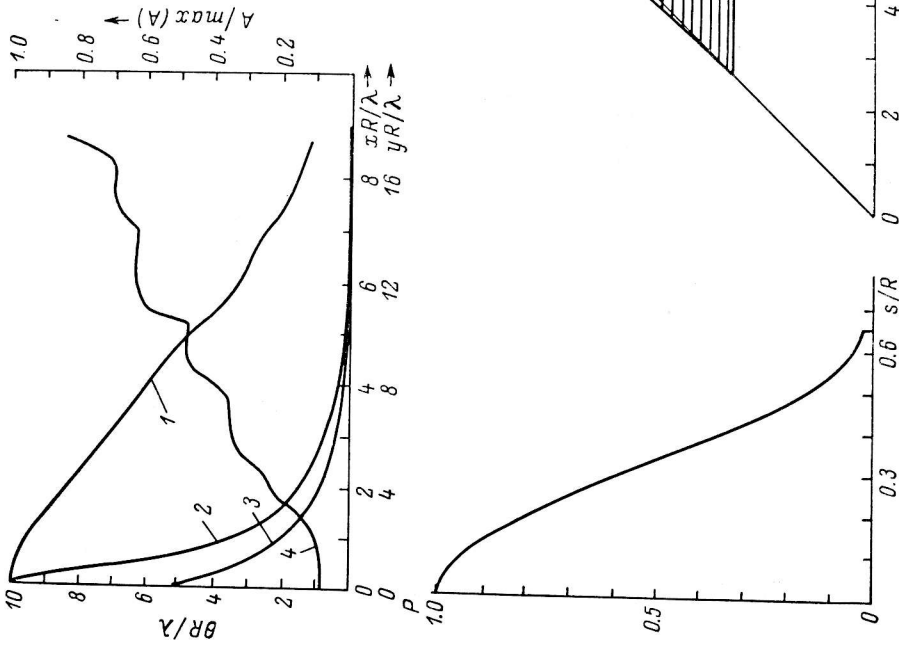


Рис. 6 (продолжение).

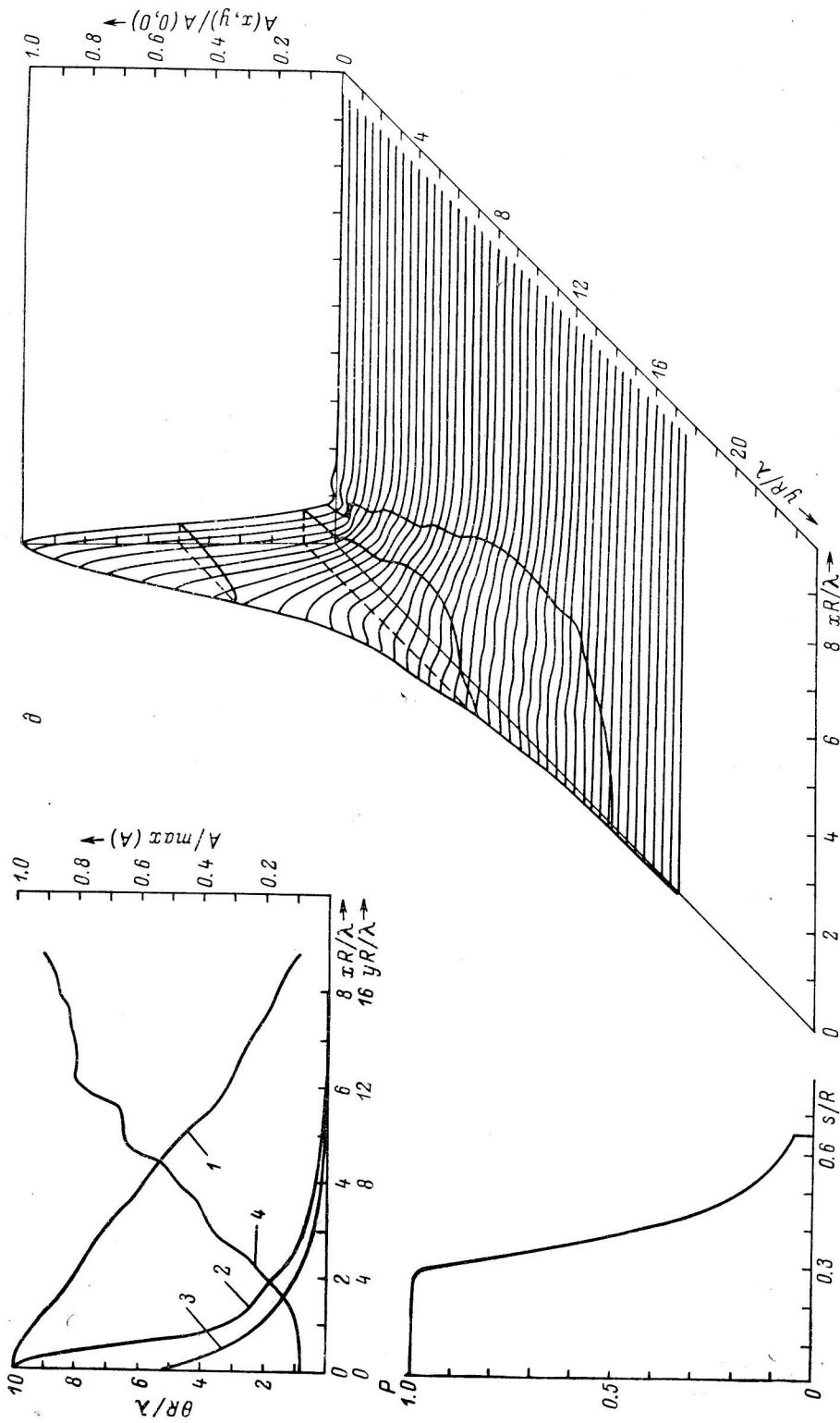


Рис. 6 (продолжение).

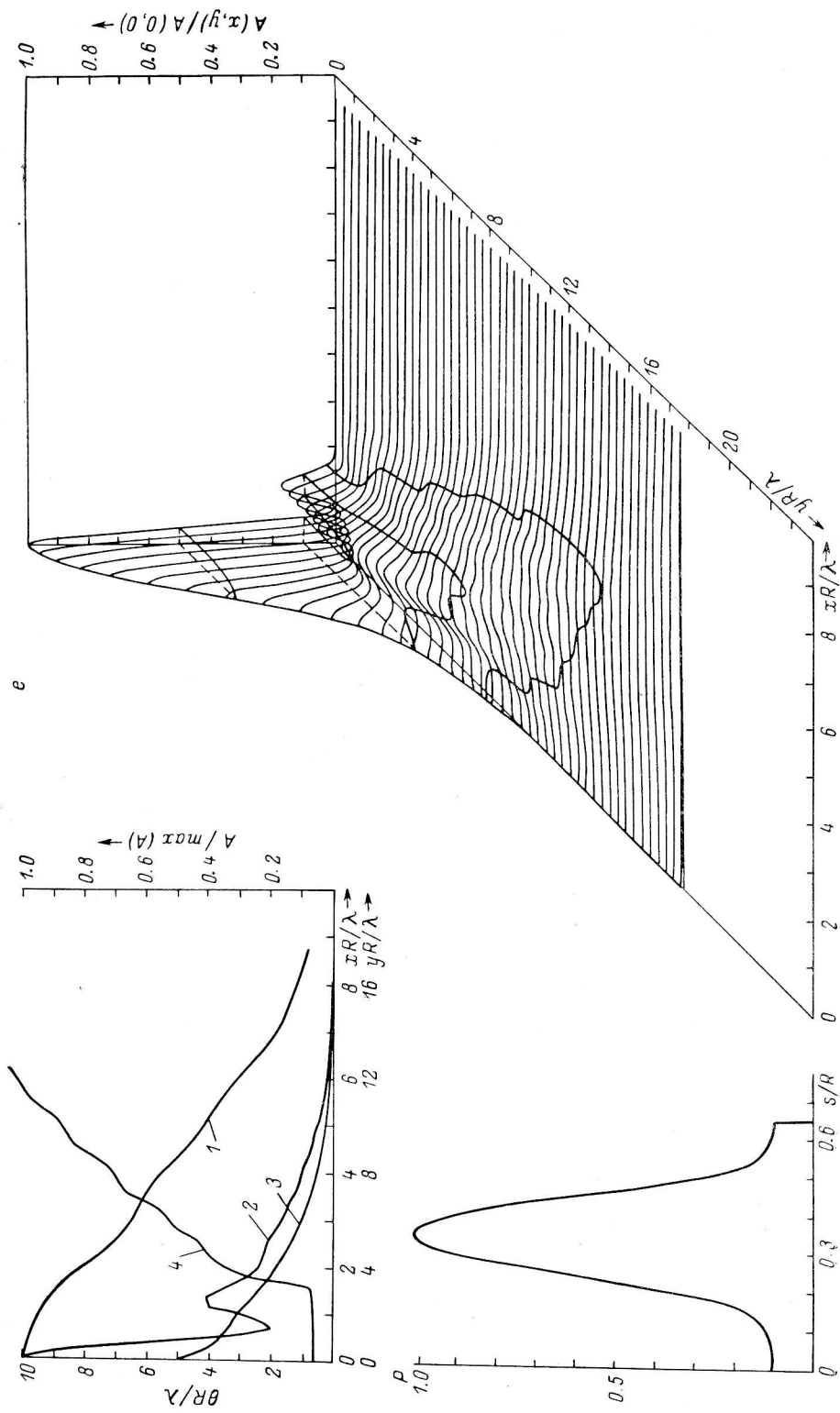


Рис. 6 (продолжение).

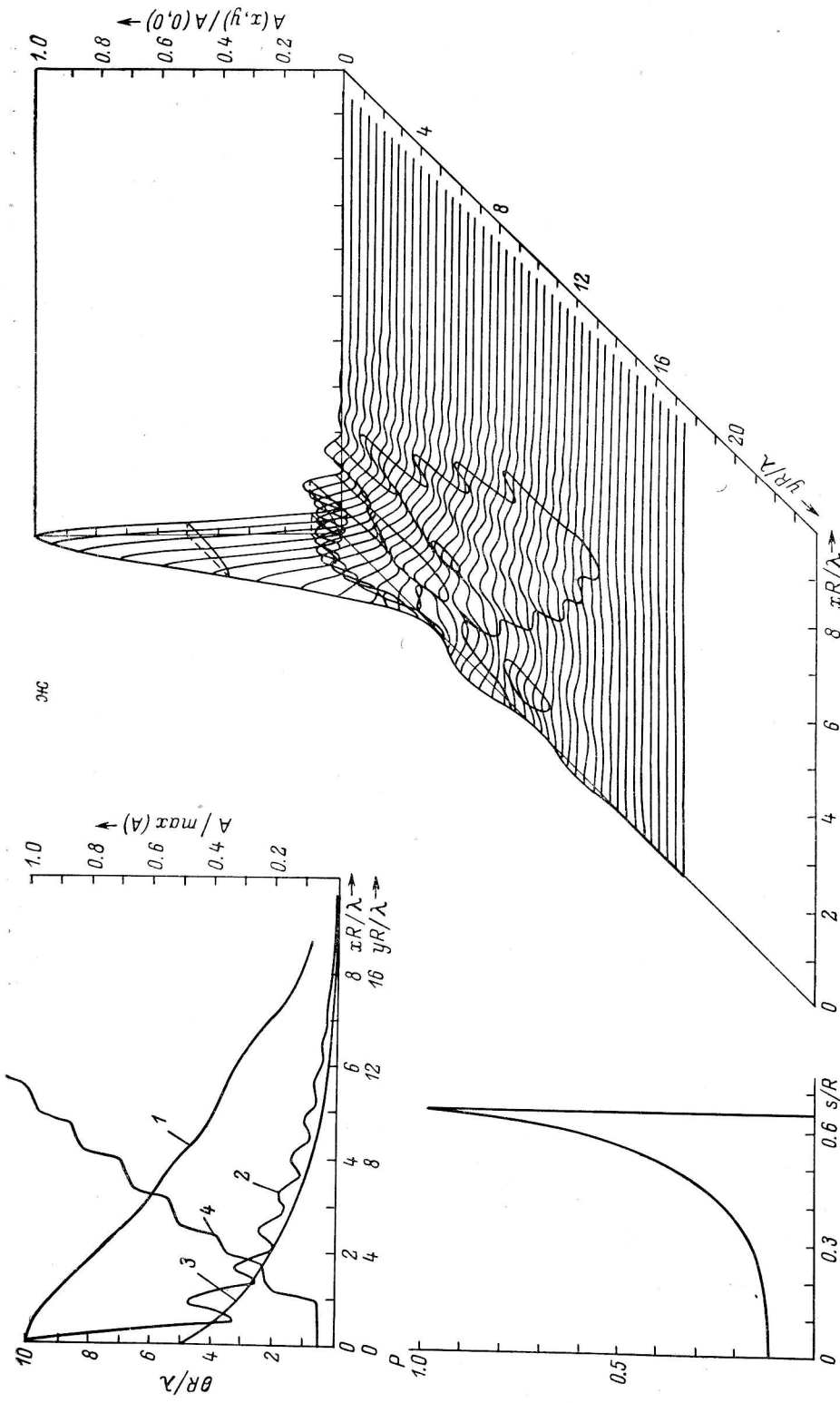
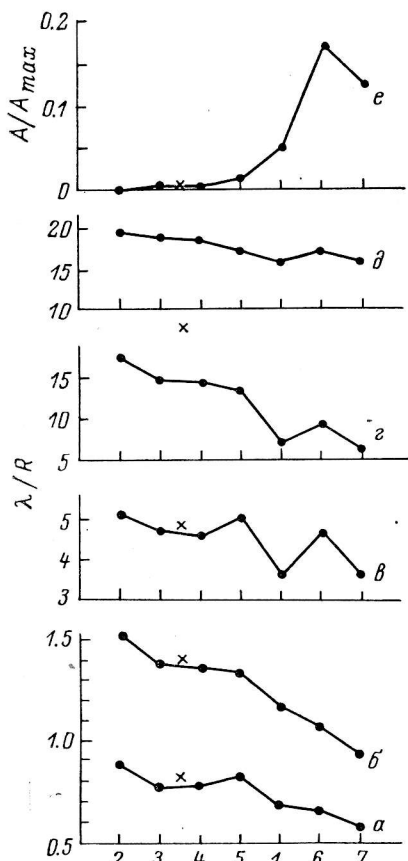


Рис. 6 (продолжение).

величина рассеянного фона, на АПП часто производятся наблюдения мощных протяженных источников (например, Солнца). Полезная информация при обработке таких наблюдений может быть получена из кривой 3.

Видимые на кривых 1 рис. 6 волны отражают пространственный масштаб, соответствующий величине стрелки раскрыва АПП. Изломанность кривых 2 рис. 6 связана с тем, что при их построении не производилось интерполирование, необходимое для получения гладких кривых.

Некоторые характеристики, показывающие зависимость диаграммы АПП от типа облучения апертуры, приведены на рис. 7. Цифры вдоль оси абсцисс



на рис. 7 означают номера типов облучения и расположены в порядке перехода от наиболее узких спадающих к краям (2) к более широким (3—5), затем равномерному (1) и, наконец, типам облучения, когда края антенны облучаются сильнее, чем ее середина (6, 7). Кривые *a* и *b* на рис. 7 иллюстрируют изменение ширины центрального горизонтального сечения диаграммы АПП, измеренной соответственно по уровню 0.5 и 0.1 от максимального, в зависимости от типа облучения. Кривые *c* и *d* показывают аналогичные величины для центрального вертикального сечения диаграммы направленности АПП. Кривая *d* — зависимость ширины вертикальной интегральной диаграммы (кривых 1 рис. 6) по уровню 0.5 от максимального для различных типов облучения. И, наконец, из кривых *e* видно, как изменяется максимальное значе-

Рис. 7. Зависимости от типа облучения.

*a* — размера центрального горизонтального сечения диаграммы АПП по уровню 0.5, *b* — то же по уровню 0.1, *c* — размера центрального вертикального сечения по уровню 0.5, *d* — то же по уровню 0.1, *e* — размера вертикальной интегральной диаграммы АПП по уровню 0.5, *e* — уровня первого бокового лепестка в центральном горизонтальном сечении.

ние первого бокового лепестка в центральном горизонтальном сечении в зависимости от типа облучения.

Общий характер изменений характеристик диаграммы АПП согласуется с тем, что было получено еще в ранних работах по теории антенн (см., например, [14]). Сужение главного лепестка при переходе от типа облучения 2 к типу облучения 7 составляет 25—30% (рис. 7, *a—e*). Уменьшение ширины центрального вертикального сечения диаграммы по уровню 0.1 (рис. 7, *d*) — более значительно (в 2.5 раза). Это связано с тем, что, как видно из рис. 5 и 6, с изменением типа облучения происходит значительное изменение структуры боковых лепестков диаграммы АПП, а наиболее яркие из них превосходят уровень 0.1 и расположены как раз в вертикальных секторах диаграммы. Сужение огибающей диаграммы АПП (кривая *d*, рис. 7) связано с возрастанием роли краев раскрыва АПП. Так, при использовании облучения типа 2 работает в основном центральная часть раскрыва с шириной  $h_k$  (ширина кольца), а при облучении типа 7 действуют в основном края раскрыва. Эффективная ширина краев раскрыва в вертикальном направлении  $h_k/\cos \epsilon$ . Изменение величины  $h_k/\cos \epsilon$  от центра к краю раскрыва в рассматриваемом



случае составляет приблизительно 15%, примерно на столько же изменяется и ширина огибающей диаграммы АПП (рис. 7, *д*). Уровень первого бокового лепестка в центральном горизонтальном сечении диаграммы (кривая *е*) изменяется значительно: от величины 0.001 (тип облучения 2) до 0.175 (тип облучения 6).

Крестиками на рис. 7 показаны характеристики диаграммы АПП (БПР), полученной методом расчета в работе [3]. Эти величины взяты для близкого к нашему случаю угла места  $\theta_0 = 60^\circ$ . Расчеты [3] выполнены для случая, когда в качестве первичного облучателя используется открытый конец волновода. Можно полагать, что соответствующее распределение амплитуды поля в раскрыве должно быть близким нашим 3 или 4 типам облучения. Как видно из рис. 7, *а—в*, результаты наших экспериментов и расчетов [3] согласуются с точностью до 3%. Расхождение на 25% в размере центрального вертикального сечения по уровню 0.1 (рис. 7, *з*), вероятно вызвано различием вертикальных огибающих расчетной диаграммы [3] и нашей, что связано с различной относительной шириной раскрывов. В нашем случае  $h_k/R = 0.15/3.92 = 0.038$ , соответствующее значение для БПР, для которого производились расчеты,  $h_k/R = h \cos(\theta_0/2)/R = 0.026$ , что приблизительно на 25% меньше.

Сопоставляя результаты расчетов диаграммы АПП [2, 3] и экспериментов по оптическому моделированию АПП, можно заключить, что имеется вполне удовлетворительное согласие обоих методов как количественное, так и качественное для области главного и ближайших боковых лепестков диаграммы АПП. Характерная для АПП структура боковых лепестков, выявленная в [4] для случая равномерного облучения апертуры, при спадающих к краям типах облучения сглаживается, а изофоты принимают восьмеркообразную форму, полученную еще в работе [2]. Однако эти изофоты не гладкие, как в [2, 3], а волнистые, что связано с тем, что отдельные боковые лепестки сглаживаются не полностью. Волнистость изофот сильнее на более низких уровнях (ср. изофоты 0.1 и 0.025 на рис. 6), т. е. более далекие боковые лепестки сглаживаются слабее. Для этой области диаграммы направленности АПП (т. е. для уровней 5% и ниже) согласие расчетов и экспериментов по оптическому моделированию ухудшается. Отмеченное различие, возможно, отражает различие в исходных данных (распределения поля на раскрыве). Кроме того, следует учесть, что расчеты [3] выполнены с учетом поляризационных свойств АПП, а в наших экспериментах такой учет не производился.

### Заключение

Методом оптического моделирования проведены эксперименты по исследованию зависимости диаграммы направленности АПП от закона облучения апертуры. Для одной высоты наблюдения ( $\theta_0 = 53^\circ 3'$ ) получены диаграммы АПП при нескольких различных видах распределения амплитуды поля в раскрыве. Эти распределения создавались путем использования фотографически изготовленных фильтров переменной прозрачности, помещаемых в пучок света перед маской, имитирующей раскрыв АПП для данной высоты. Количественные данные получены с помощью фотоэлектрической регистрации дифракционных картин с записью сигнала на самописец. Обработка измерений выполнялась на ЭВМ с выводом результатов в виде графиков на графопостроитель «Атлас» и цифровых таблиц на АЦПУ. При обработке измерений, кроме значений диаграммы  $A(x, y)$ , определялись также вертикальные  $A(y)$  и горизонтальные  $A(x)$  интегральные диаграммы АПП, свертка диаграммы АПП с вертикальной полуплоскостью  $A(x')$  и ширины горизонтальных сечений  $\theta_{0.5}(y)$  (см. рис. 6, *а—ж*). Полученные данные позволяют проследить, как изменяется главный лепесток (рис. 7) и структура боковых лепестков (рис. 5, 6) диаграммы направленности АПП при различных типах облучения апертуры. Из сравнения с расчетными данными [3]

делается вывод, что имеется вполне удовлетворительное (3—5%) согласие результатов исследований диаграммы направленности АПП расчетным методом и методом оптического моделирования.

Полученные в данной работе количественные характеристики диаграммы направленности АПП могут быть непосредственно использованы при обработке радиоастрономических наблюдений. Изученные свойства диаграммы направленности должны учитываться также и при выборе новых режимов использования радиотелескопов типа АПП.

В заключение автор благодарит Г. Б. Гельфрейха за постоянный интерес к данной работе, А. А. Калиняка за предоставленную возможность использования оборудования его лаборатории, Э. В. Кондрашева за ценные советы при проведении экспериментов.

#### Литература

1. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. Глав. анстрон. обс. в Пулкове, 1960, № 164, с. 3—26.
2. Есепкина Н. А., Кайдановский Н. Л., Кузнецов Б. Г. и др. Исследование характеристик излучения АПП. — Радиотехника и электроника, 1961, 6, с. 1947—1960.
3. Бахвалов Н. С., Васильева Л. Г., Есепкина Н. А. и др. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 135—149.
4. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Оптическое моделирование антенн СВЧ с отражателем переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, с. 1176—1189.
5. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. М., «Мир», 1974, 399 с.
6. Ingalls A. L. The effect of film thickness variations on coherent light. — Photographic Sciens and Engineering, 1960, 4, p. 135—140.
7. Богданов А. А., Брусин И. Я., Скворцов В. Д. Влияние шумов фотопленки в системах оптической обработки сигналов антенн с синтезируемой апертурой. — Изв. вузов, Радиофизика, 1971, 14, с. 114—126.
8. Краткий физико-технический справочник. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1960, 1, 446 с.
9. Чайлдс У. Физические постоянные. М., Физматгиз, 1962, 80 с.
10. Мартынов Д. Я. Курс практической астрофизики. М., «Наука», 1967, 543 с.
11. Курс астрофизики и звездной астрономии. Том 1. Под ред. А. А. Михайлова. М., «Наука», 1973, 608 с.
12. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Оптическое моделирование радиоастрономических наблюдений на антенных системах со сложной формой апертуры. — Изв. вузов, Радиофизика, 1976, 19, с. 1690—1695.
13. McLean D. J. The improvement of images obtained with annular apertures. — Proc. R. Soc. (London), 1961, A263, p. 545—551.
14. Антенны сантиметровых волн. Ч. 1. Под ред. Я. Н. Фельда. М., «Советское радио», 1950, с.

Декабрь 1975 г.