

Г. К. ВИНОГРАДОВ, И. А. ВОДОВАТОВ, М. Г. ВЫСОЦКИЙ,  
Н. А. ЕСЕПКИНА, Т. И. ЗУБКОВА

(Ленинград)

## ОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ АНТЕНН

Весьма перспективным методом исследования диаграмм направленности антенных устройств является оптическое моделирование [1, 2]. Оптическое моделирование может применяться не только для обычных, аддитивных, антенн, но и для антенн корреляционного типа.

Корреляционные антенны [3] состоят из двух антенн или группы антенн, подключенных к приемнику таким образом, что сигнал на выходе пропорционален корреляционной функции сигналов, поступающих с отдельных частей антенны. При одном из способов обработки это достигается периодическим изменением на  $\pi$  фазы сигнала, принимаемого одной из частей антенны. Диаграмма направленности корреляционной антенны, пропорциональная произведению диаграмм направленности отдельных ее частей, в ряде случаев обладает лучшими параметрами по сравнению с диаграммой направленности аддитивной антенны той же конфигурации: меньшей чувствительностью к ненаправленному фону, отсутствием нулевых и низкочастотных составляющих в пространственно-частотных характеристиках. Корреляционные антенны широко применяются в радиоастрономии [4]. Практически все современные многоэлементные радиотелескопы (кресты Миллса, Т-образные антенны, компаунд-интерферометры, интерферометры с суперсинтезом) являются корреляционными антеннами.

В работе (5) рассмотрены эксперименты по оптическому моделированию корреляционных антенн типа Т-образного креста Миллса. При этом для имитации переключения фазы сигнала в одной из частей антенны использовалась вращающаяся полуволновая пластинка, а искомая диаграмма направленности получалась на частоте модуляции с помощью узкополосного усилителя.

Нами были исследованы оптические схемы, позволяющие моделировать двумерную диаграмму направленности корреляционных антенн непосредственно, без применения механических вращающихся элементов.

**Принцип работы схем оптического моделирования характеристик корреляционных антенн.** Принцип работы рассматриваемых схем основан на оптическом перемножении и сложении распределений света, соответствующих диаграммам направленности отдельных частей корреляционной антенны.

Известно [3], что диаграмма направленности по интенсивности корреляционной антенны  $F_{\text{кор}}$  может быть записана в виде

$$F_{\text{кор}} = 2(f_1 f_2^* + f_1^* f_2) = 4 |f_1 f_2| \cos(kD \sin \varphi + \psi), \quad (1)$$

где  $f_1 = |f_1| e^{i\psi_1}$ ,  $f_2 = |f_2| e^{i\psi_2}$  — диаграммы направленности по полю отдельных частей корреляционной антенны;  $D$  — расстояние между их центрами;  $\varphi$  — угол, характеризующий направление на источник сигнала;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\psi = \psi_1 - \psi_2$ .

В частном случае, когда диаграммы  $f_1$  и  $f_2$  действительны ( $\psi_1 = \psi_2 = 0$ ), а фазовые центры частей антенны совпадают ( $D = 0$ ), выражение (1) упрощается:

$$F_{\text{кор}} = 4f_1 f_2. \quad (2)$$

Таким образом, для оптического моделирования диаграммы направ-

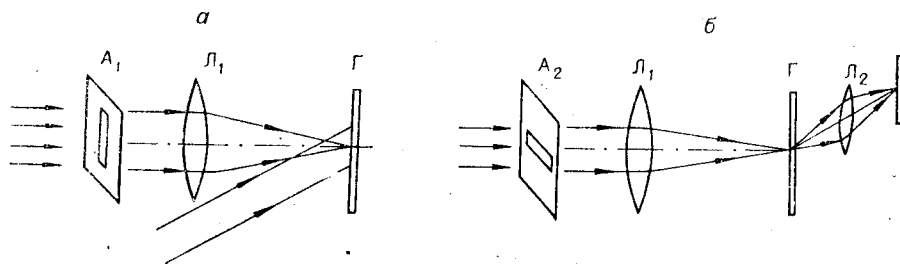


Рис. 1.

ленности корреляционной антенны нужно в простейшем случае (2) произвести оптическое перемножение распределений света, соответствующих диаграммам  $f_1$  и  $f_2$ , или в более общем случае оптически выполнить два перемножения и результаты перемножения сложить.

Операция оптического перемножения двух диаграмм направленности, позволяющая моделировать корреляционные антенны с совпадающими фазовыми центрами, может быть осуществлена с помощью голографической схемы (рис. 1). Вначале в фокальной плоскости линзы  $L_1$  (рис. 1, а) производится голографическая регистрация пространственно-частотного спектра модели одной из частей антенны ( $A_1$ ). После фотообработки голограмма  $\Gamma$  (рис. 1, б) засвечивается пространственно-частотным спектром второй модели ( $A_2$ ). В первом порядке дифракции в направлении распространения опорного пучка амплитудное распределение света пропорционально произведению диаграмм направленности  $f_1 f_2$ , т. е. диаграмме направленности корреляционной антенны. После фильтрации искомое распределение фокусируется дополнительной линзой  $L_2$ .

Если расстояние между центрами переключаемых частей корреляционной антенны отлично от нуля, то ее диаграмма направленности определяется более сложным выражением (1). В этом случае вид удобной для моделирования схемы зависит от соотношения размеров частей антенны и расстояния между ними. При достаточно больших расстояниях между частями антенны целесообразно применить схему, аналогичную рассмотренной в работах [6, 7]. В этой схеме (рис. 2, а) фотографируется картина интерференции двух световых распределений, пропорциональных диаграммам  $f_1$  и  $f_2$ . Восстановление голограммы осуществляется плоским пучком (рис. 2, б). После фильтрации членов нулевого порядка экраном Э и сложения первых порядков дифракции получаем выражения, соответствующие диаграмме направленности корреляционной антенны. Действительно, если интерферирующие поля пропорциональны диаграммам направленности  $f_1$  и  $f_2$ , то интенсивность света в области интерференции определяется выражением

$$|F|^2 \sim |f_1|^2 + |f_2|^2 + f_1^* f_2 + f_1 f_2^* \quad (3)$$

С помощью этого выражения находится амплитудный коэффициент пропускания проявленной фотопластинки. Первые два члена правой части [3] соответствуют неотклоненному пучку и должны быть отфильтрованы при восстановлении, а третий и четвертый дают искомую диаграмму.

Для работы схемы необходимо, чтобы углы дифракции первых порядков, пропорциональные расстоянию между частями антенны, были достаточно велики. В противном случае окажется невозможным разделить пучки нулевого и первых порядков.

Для моделирования корреляционных антенн, у которых расстояния между переключаемыми частями соизмеримы с их размерами, могут использоваться различные варианты более сложных схем. Принцип

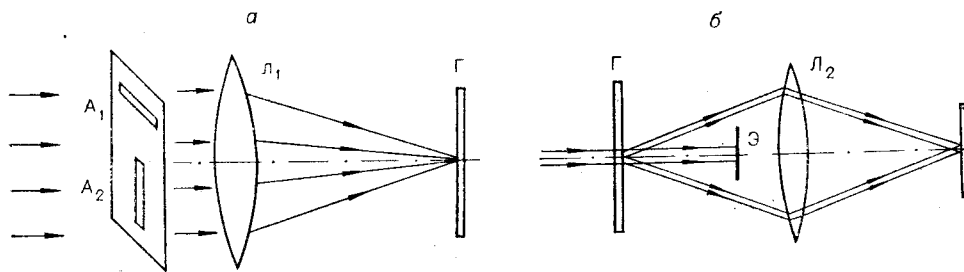


Рис. 2.

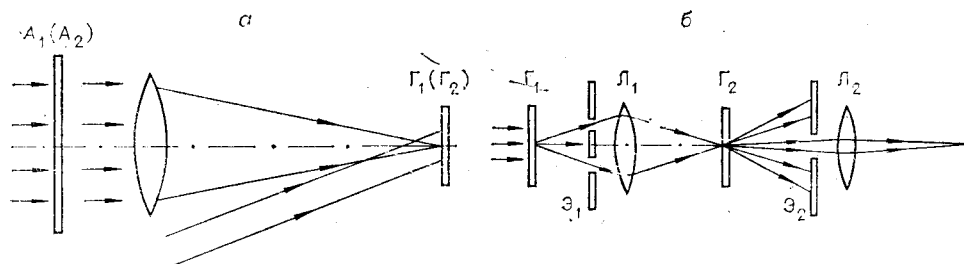


Рис. 3.

работы одной из них состоит в следующем. На двух отдельных голограммах  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  регистрируются пространственно частотные спектры двух частей антенны (рис. 3, а). Запись обеих голограмм производится при одном и том же наклоне опорного пучка. На стадии восстановления одна из голограмм, например  $\Gamma_1$ , освещается плоским пучком (рис. 3, б). После фильтрации членов нулевого порядка первые порядки складываются и освещают другую голограмму ( $\Gamma_2$ ). Нетрудно показать, что в нулевом порядке дифракции на голограмме  $\Gamma_2$  распределение света пропорционально диаграмме направленности корреляционной антенны.

Будем считать, что амплитудные коэффициенты пропускания  $t_1$  и  $t_2$  голограмм  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  соответственно пропорциональны интенсивностям зарегистрированных на них интерференционных картин:

$$\begin{aligned} t_1 &\sim |f_1|^2 + |u_0|^2 + u_0 f_1^* + u_0^* f_1; \\ t_2 &\sim |f_2|^2 + |u_0|^2 + u_0 f_2^* + u_0^* f_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  имеют тот же смысл, что и в предыдущих формулах;  $u_0$  — амплитуда опорной волны. Осветив голограмму  $\Gamma_1$  плоской волной и отфильтровав низкочастотные составляющие, получим за голограммой  $\Gamma_1$  следующее распределение света:

$$u_1 \sim u_0 f_1^* + u_0^* f_1. \quad (5)$$

Используя эту волну в качестве восстанавливающей для голограммы  $\Gamma_2$ , будем иметь за голограммой  $\Gamma_2$  распределение света

$$\begin{aligned} u &= u_1 t_2 \sim (f_1^* f_2 + f_1 f_2^*) |u_0|^2 + (|u_0|^2 + f_2 f_2^*) \times \\ &\times (f_1^* u_0 + u_0^* f_1) + f_1^* f_2 u_0^2 + f_1 f_2 (u_0^*)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Первые два члена в формуле (6) характеризуют волну, распространяющуюся вблизи оптической оси, и соответствуют диаграмме направленности корреляционной антенны. Волны, соответствующие остальным членам, распространяются под углами к оси, определяемыми наклоном опорного пучка, и при правильном выборе угла наклона опорного пучка могут быть отфильтрованы.

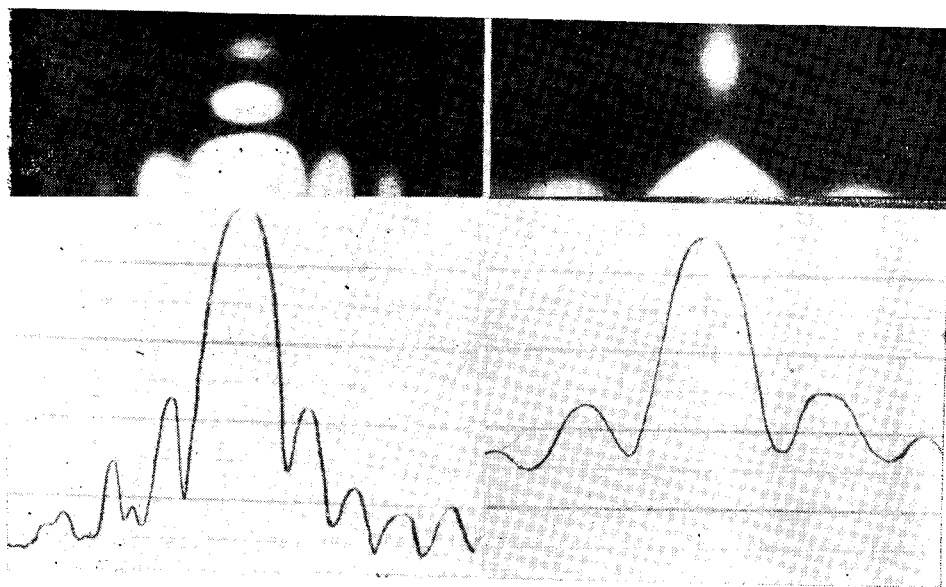


Рис. 4.

**Результаты экспериментов.** Для проверки эффективности работы приведенных выше схем на начальных этапах исследования проводилось оптическое моделирование диаграмм направленности антенн типа креста Миллса и Т-образной антенны, характеристики которых известны. В зависимости от вида рассматриваемой схемы менялось расстояние между частями антенны.

Оптические модели антенн, изготовленные механическим или фотографическим способом, освещались пучком когерентного света от гелий-неонового лазера с длиной волны излучения 0,63 мкм. Расширение светового пучка осуществлялось системой двух софокусных объективов. Запись голограмм с пространственно-частотными спектрами антенн производилась на пластинках типа ВР-Л. Распределение поля в выходной плоскости регистрировалось с помощью фотоаппарата или самописцем типа Н-110.

Все эксперименты выполнялись на оптических схемах, собранных на основе голографических установок СИН и УИГ-2Г-1.

На рис. 4 приведены результаты оптического моделирования креста Миллса с совпадающими фазовыми центрами отдельных частей. Эксперимент проводился на схеме, собранной в соответствии с рис. 1. Модель антенны представляла собой два одинаковых взаимно перпендикулярных прямоугольника с отношением сторон 1:15. На рис. 4 слева представлены фотография дифракционного распределения, соответствующего диаграмме направленности корреляционного креста Миллса, и результаты фотометрирования центрального сечения. Справа для сравнения приведены данные экспериментов для той же антенны, работающей в аддитивном режиме. Хорошо видны изменения формы и ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков.

При выполнении экспериментов по моделированию антенн с далеко расположенными частями (см. схему рис. 2) модели частей антенны

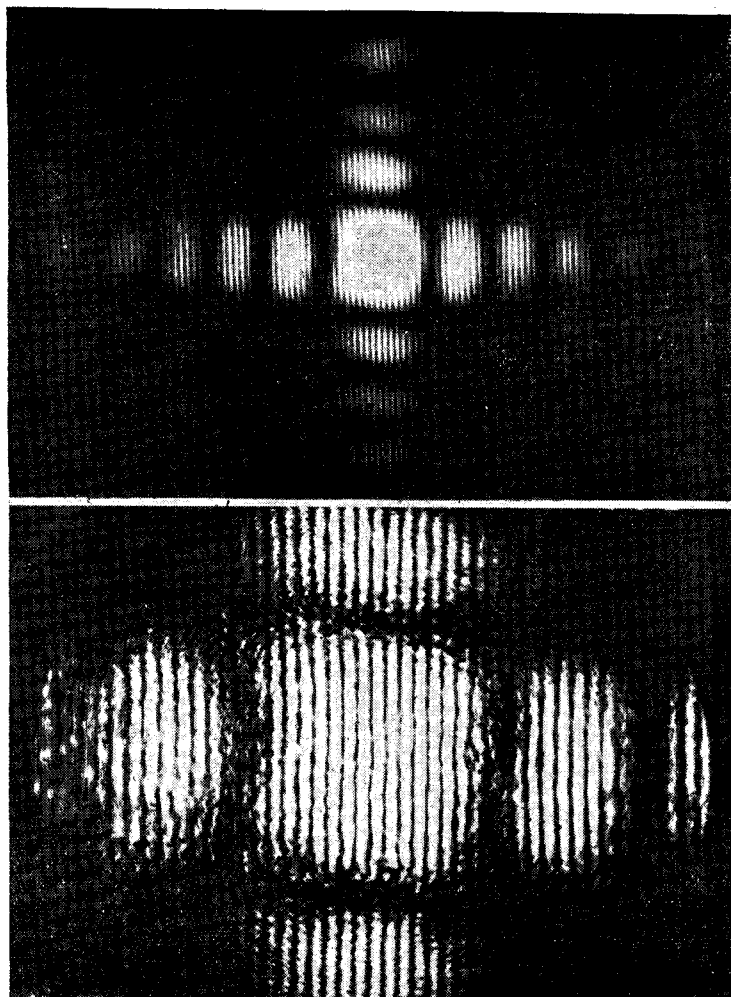


Рис. 5.

были изготовлены так же, как и в предыдущем случае, однако расстояние между центрами моделей антенн было больше в 5 раз их длины. На рис. 5 приведены выполненные в двух масштабах фотографии дифракционных распределений, соответствующих диаграммам направленности такой антенны. Нетрудно видеть, что количество интерференционных полос, укладывающихся в главном лепестке диаграммы направленности (20 шт.), совпадает с расчетным (I).

Следует отметить, что из-за малого динамического диапазона фотоматериала, использовавшегося для фотографирования картин интерференции, оказалось затруднительным зарегистрировать на одной голограмме одновременно и основную, и боковые лепестки диаграммы направленности. Поэтому при фотографировании картины интерференции производилось несколько отличающихся по длительности экспозиций. Кроме того, для выведения на линейный участок рабочей точки кривой почернения применялась предварительная засветка фотопластины равномерно по всей поверхности.

Результат исследования схемы с использованием двух голограмм (см. рис. 3), позволяющей моделировать диаграммы направленности корреляционных антенн с любыми расстояниями между элементами, представлен на рис. 6. Фотографии дифракционного распределения со-

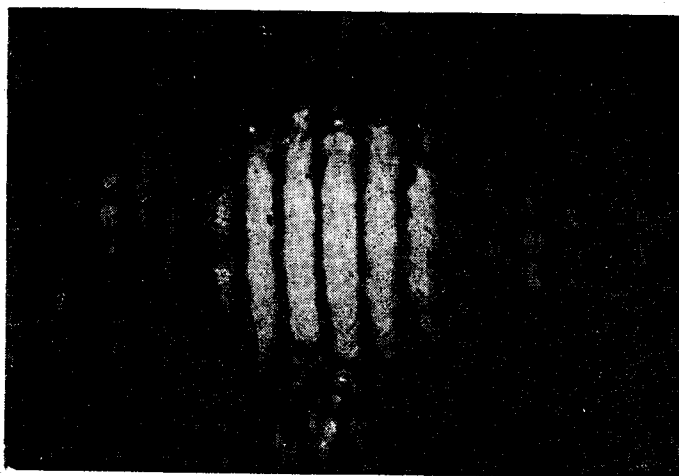


Рис. 6.

ответствуют диаграмме направленности корреляционной Т-образной антенны, у которой расстояние между центрами элементов в 2 раза больше их длины.

Особенности работы данной схемы связаны с необходимостью регистрации световых пучков, последовательно дифрагирующих на двух голограммах. Успех эксперимента здесь в значительной степени определяется возможностью получения голограмм с достаточно высокой дифракционной эффективностью.

В заключение следует отметить, что исследованные оптические схемы обеспечивают возможность непосредственного моделирования двумерных диаграмм направленности корреляционных антенных устройств, не прибегая к использованию каких бы то ни было механических вращающихся элементов.

Результаты настоящей работы позволяют сделать вывод о перспективности использования методов оптического моделирования для исследования характеристик корреляционных антенн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахрах Л. Д., Владимирова О. Н., Курочкин А. П., Соболев Г. А., Фридман Г. Х. Применение методов когерентной оптики и голографии к задачам антенной техники и обработки информации.— В кн.: Антенны, № 2. М., «Связь», 1967.
2. Есепкина Н. А., Петрунькин В. Ю., Водоватов И. А., Виноградов Г. К., Высоцкий М. Г. Использование методов когерентной оптики и голографии для исследования характеристик радиотелескопов.— «Изв. высш. учебн. заведений. Радиофизика», 1976, т. 19, № 11, с. 1696—1704.
3. Краус Д. Радиоастрономия. М., «Сов. радио», 1973.
4. Радио- и радиолокационная астрономия.— ТИИЭР, 1973, т. 61, № 9.
5. Колосов Ю. А., Курочкин А. П. Об оптическом моделировании диаграмм направленности корреляционных антенн.— «Радиотехника и электроника», 1973, т. 18, № 7, с. 1347—1352.
6. Фридман Г. Х., Цветов Е. Р., Лось В. Ф., Карамнов Б. И., Галущенко В. В., Лихонина В. Б. Об интерференционном методе оптического распознавания образов.— «Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн.», 1970, вып. 12, с. 20—34.
7. Nisensohn P., Sprague R. A. Real-time optical correlation.— «Appl. Opt.», 1975, vol. 14, N 11, p. 2602—2606.

Поступила в редакцию 14 апреля 1978 г.