

Б. А. ВАСИЛЬЕВ, Г. К. ВИНОГРАДОВ, И. А. ВОДОВАТОВ,  
М. Г. ВЫСОЦКИЙ, Н. А. ЕСЕПКИНА  
(Ленинград)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ НЕСИНФАЗНЫХ АНТЕНН

При работе с зеркальными антеннами в ряде случаев возникает необходимость учитывать влияние фазовых искажений поля в раскрыве на диаграмму направленности и другие характеристики антенны. Фазовые искажения могут появляться, в частности, вследствие неточной юстировки первичного облучателя антенны или смещения его из фокуса с целью поворота диаграммы направленности и сопровождения источника излучения [1].

Расчет характеристик антенн при наличии фазовых искажений, как правило, представляет собой достаточно сложную задачу и требует длительного машинного счета. Кроме того, прямые измерения характеристик антенн часто связаны со значительными трудностями, особенно если антенна имеет большие размеры.

В этих случаях весьма перспективный метод исследования характеристик антенн — оптическое моделирование. Вопросам оптического моделирования синфазных антенн посвящен ряд работ [2—4]. Использование голографических методов, позволяющих сравнительно просто получать требуемые распределения фазы на апертурах оптических моделей, дает возможность применить оптическое моделирование к антеннам с несинфазным распределением поля на раскрыве [5].

В настоящей работе рассмотрены эксперименты по оптическому моделированию зеркальных антенн с несинфазным распределением. Эксперименты проводились с целью выяснения возможностей метода оптического моделирования для исследования влияния аберраций на характеристики антенн. Для создания нужных амплитудных распределений света на оптических моделях применялись амплитудные фильтры, а соответствующие распределения фазы создавались с помощью специально изготовленных синтезированных голограмм. Ниже приводится описание методики изготовления фазовых голографических фильтров, а также результаты, полученные с помощью таких фильтров, для некоторых антенн.

**Изготовление синтезированных голограмм.** Если имеется транспарант с коэффициентом пропускания по интенсивности, равным

$$T(x, y) = A + B(x, y) \cos[2\pi f_{\text{пр}} x + \varphi(x, y)];$$

$$1 \gg A \gg B(x, y),$$

где  $x, y$  — координаты в плоскости транспаранта,  $f_{\text{пр}}$  и  $\varphi(x, y)$  — пространственная частота и фаза, то этот транспарант можно рассматривать как голограмму, полученную в результате регистрации картины интерференции двух волн. При этом можно считать, что одна из волн опорная, с плоским фазовым фронтом и амплитудой  $a = \sqrt{A}$  падала нормально к плоскости голограммы, а вторая — предметная, с амплитудой  $b(x, y) = B(x, y)/2\sqrt{A}$  была наклонена к опорной волне под углом  $\alpha = \arcsin(\lambda f_{\text{пр}})$ , где  $\lambda$  — длина световой волны. Фазовый фронт предметной волны характеризовался функцией  $\varphi(x, y)$ .

При освещении голограммы нормально падающим на нее плоским световым пучком с амплитудой  $R$  в первом порядке дифракции под уг-

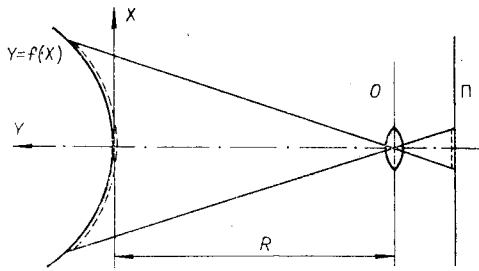


Рис. 1. Схема изготовления синтезированных голограмм.

лом  $\alpha$  к нормали появится восстановленная волна, амплитуда которой равна  $C(x, y) = 0,5RB(x, y)$ , а фаза характеризуется той же функцией  $(x, y)$ , что и предметная волна. Меняя параметры коэффициента пропускания транспаранта  $B(x, y)$  и  $\varphi(x, y)$ , можно в первом порядке дифракции получить желаемые амплитудное и фазовое распределение света.

Транспаранты-голограммы описываемого типа использовались нами при оптическом моделировании несинфазных антенн. Поскольку закон изменения амплитуды на апертуре оптической модели задавался амплитудным фильтром, а фаза на раскрыве в нашем случае зависела лишь от одной координаты, то транспаранты представляли собой неравномерные дифракционные решетки, штрихи которых располагались в соответствии с фазой поля на раскрыве антенны.

Для изготовления неравномерных дифракционных решеток могут применяться различные способы: регистрация картины интерференции двух пучков когерентного света, фотолитографический способ и другие. Нами было осуществлено изготовление неравномерных решеток путем фотографирования на фотопластинку равномерной решетки, наклеенной на специальный шаблон. В зависимости от формы шаблона и его расположения относительно фотоаппарата на пластинке получались изображения дифракционных решеток с различными законами расположения штрихов.

Найдем выражения для фазы  $\varphi(x, y)$  коэффициента пропускания такого транспаранта. Пусть отпечаток с изображением равномерной решетки с шагом  $l_0$  наклеен на цилиндрический шаблон с формой поверхности  $Y = f(X)$  (рис. 1). Образующие цилиндра перпендикулярны плоскости  $XY$ , а оси  $X$  и  $Y$  выбраны так, что ось  $X$  параллельна плоскости фотопластинки П. Можно показать, что, фотографируя отпечаток решетки с расстояния  $R$ , получим на фотопластинке изображение решетки, которая обеспечивает сдвиг фазы

$$\varphi(x_1) = \frac{2\pi}{Rl_0} \int_0^{x_1} \frac{\sqrt{1+(Y')^2}(R+Y)(R+Y+Y'l_0/\sqrt{1+(Y')^2})}{R+Y-XY'} dX, \quad (1)$$

где  $X_1$  и  $x_1$  — текущие координаты на отпечатке и фотопластинке, связанные масштабным коэффициентом

$$x_1 = X_1 F / (R - F) \quad (2)$$

( $F$  — фокусное расстояние объектива фотоаппарата  $O$ ).

В частном случае, когда  $Y = aX$ , т. е. шаблон представляет собой плоскость, наклоненную относительно оси фотоаппарата на угол  $\beta = \arctg a$ , вычисление интеграла (1) с учетом (2) дает  $\varphi(x_1) \sim x_1^2$ , т. е. полученный транспарант в первом порядке дифракции дает волну с квадратичным фазовым набегом. Если шаблон выполнен в виде параболического цилиндра ( $Y = bX^2$ ), то, как показывают вычисления,  $\varphi(x_1) \sim x_1^3$ . В этом случае транспарант дает в первом дифракционном порядке волну с кубическим изменением фазы.

Используя другую форму шаблона, можно получить световой пучок с более сложным законом изменения фазы, например с фазой, изменяющейся как четвертая, пятая и выше степень координаты.

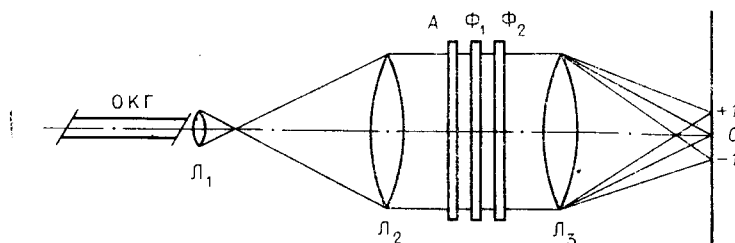


Рис. 2. Схема исследования диаграмм направленности антенн методом оптического моделирования.

Указанным способом был изготовлен набор транспарантов, предназначенных для моделирования антенн с различными значениями квадратичных и кубических фазовых набегов.

**Результаты эксперимента.** Схема исследования диаграмм направленности антенн методом оптического моделирования представлена на рис. 2. Пучок света от лазера расширяется с помощью телескопической системы (софокусные линзы  $L_1$  и  $L_2$ ) и освещает оптическую модель антенны, состоящую из модели апертуры антенны  $A$ , амплитудного фильтра  $\Phi_1$  и транспаранта, создающего фазовое распределение  $\Phi_2$ . В фокальной плоскости линзы  $L_3$  в первом дифракционном порядке регистрируется распределение света, соответствующее исследуемой

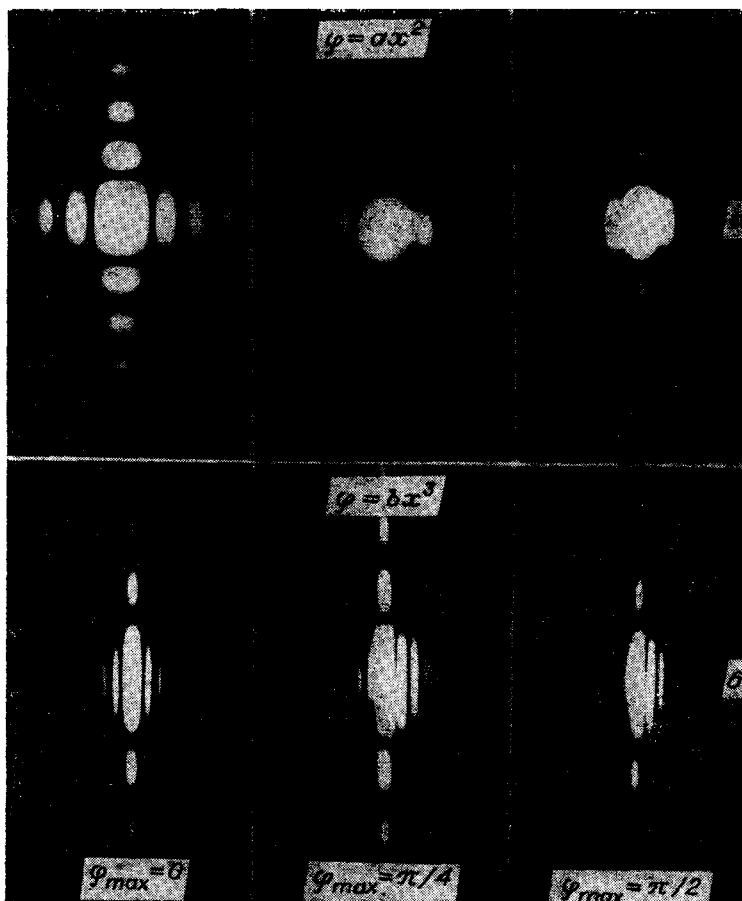


Рис. 3. Фотографии дифракционных распределений от оптических моделей прямоугольных антенн с квадратичными (а) и кубическими (б) фазовыми ошибками.

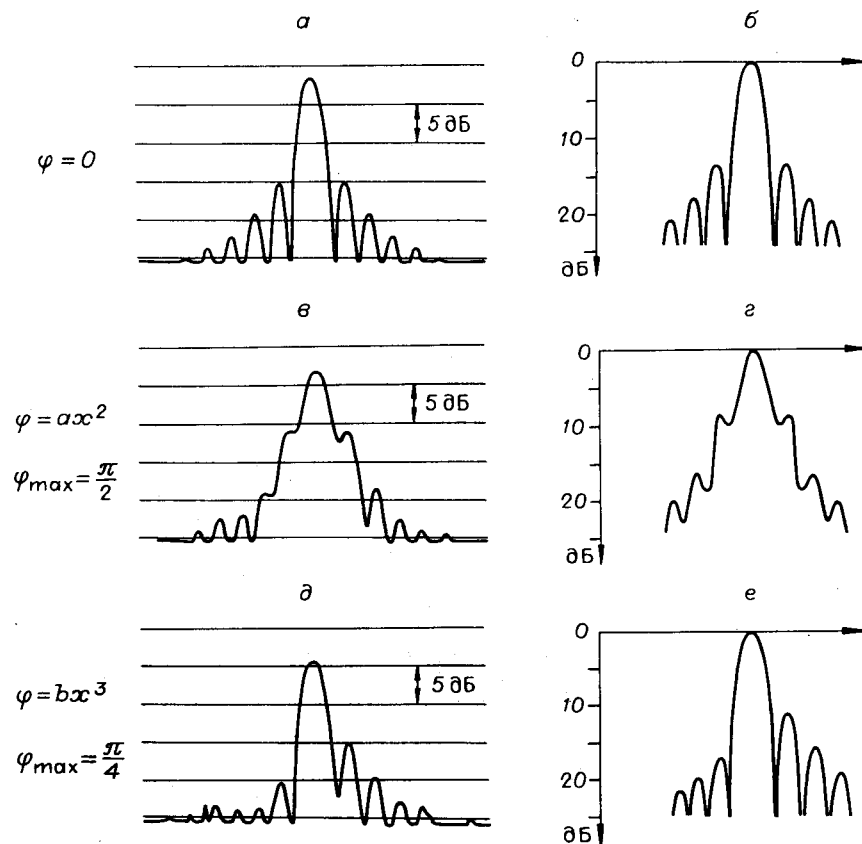


Рис. 4. Дифракционные распределения поля от оптических моделей прямоугольных антенн, полученные экспериментально (а, в, д) и теоретически (б, г, е).

диаграмме направленности антенны с заданными фазовыми набегам. С целью проверки эффективности и точности методики на первых этапах работы проводилось моделирование антенн прямоугольной формы. На рис. 3 и 4 представлены фотографии и результаты фотометрирования дифракционных распределений света от прямоугольных апертур с фазами, изменяющимися по квадратичному и кубическому законам. Как видно из рис. 3, а, введение квадратичных фазовых набегов вызывает расфокусировку изображений. Записи распределений (см. рис. 4, а, в), выполненные с помощью системы фоторегистрации (фотоэлектронный умножитель ФЭУ-69, электрометрический усилитель У5-7, самописец Н-110), показывают хорошее совпадение с расчетными данными (см. рис. 4, б, г), которые взяты из [1]. Введение кубических фазовых набегов, связанных с абберациями типа «комы», приводит к несимметричности дифракционных распределений. На рис. 3, б и 4, д приведены соответствующие фотографии и результаты фотометрирования. Сравнение с расчетными данными (см. рис. 4, е), взятыми из [6], свидетельствует, как и в предыдущем случае, о хорошей точности эксперимента.

Разработанная методика используется нами для исследования характеристик антенны переменного профиля радиотелескопа РАТАН-600, имеющей кольцевую апертуру [7, 8]. В качестве примера здесь приведены результаты оптического моделирования характеристик антенны РАТАН-600 для угла наблюдения  $\Theta_0 = 45^\circ$  при наличии ку-

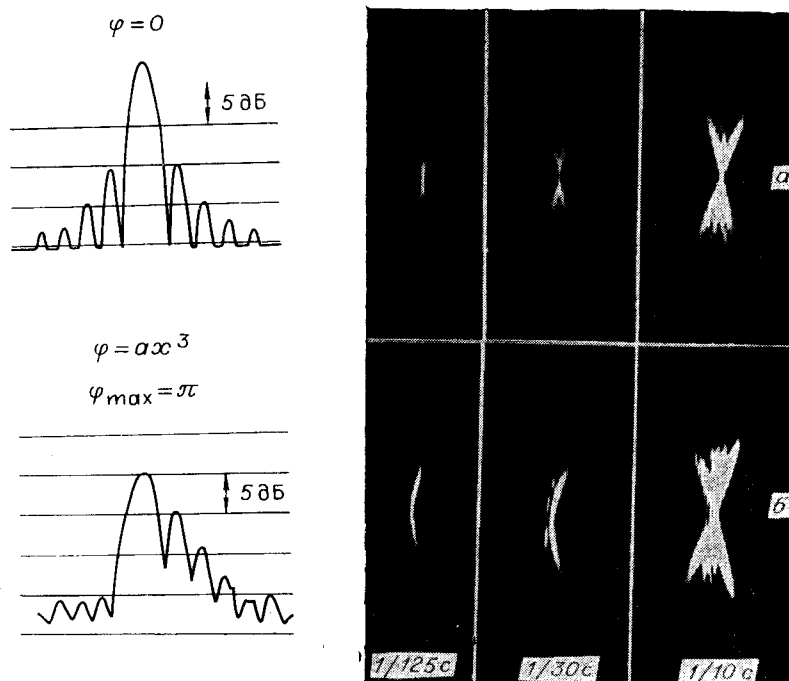


Рис. 5. Фотографии и данные фотометрирования дифракционных распределений поля от оптической модели антенны РАТАН-600: а — при синфазном распределении на раскрыве; б — при наличии кубической фазовой ошибки.

бических фазовых ошибок. На фотографиях рис. 5, б, полученных при разных экспозициях, видна характерная для aberrаций типа «комы» несимметричность распределений поля. Кроме того, «кома» вызывает искажение формы основного лепестка и смещение его максимума, которое может быть измерено. Для сравнения на рис. 5, а даны фотографии дифракционных распределений от синфазного раскрыва той же модели. Слева от фотографий находятся записи, полученные при фотометрировании центральных сечений соответствующих распределений. Снимки и записи сделаны для случая постоянной по апертуре модели амплитуды света.

Метод оптического моделирования позволяет исследовать также поляризационные характеристики антенн. Для этого с помощью комбинации амплитудных фильтров и синтезированных голограмм нужно создать на раскрыве оптической модели распределение света, соответствующее кросс-поляризационной составляющей поля. По виду кросс-поляризационной диаграммы направленности антенны можно судить об ее поляризационных свойствах.

Точно так же, моделируя распределение кросс-поляризационной составляющей поля с учетом фазовых искажений, можно исследовать влияние aberrаций на поляризационные характеристики антенн.

Проведенная работа показывает эффективность метода оптического моделирования для исследования антенн с несинфазными распределениями поля на раскрыве. Эксперименты проводились применительно к антеннам с прямоугольными и кольцевыми апертурами, но могут быть с успехом использованы и для антенн других типов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. З. Айзенберг. Антенны ультракоротких волн. М., Связьиздат, 1957.
2. J. P. Wild. Circular aerial arrays for radio astronomy.—“Proc. of the Royal Soc.”, Ser. A, 1961, vol. 262, № 1308, p. 84—99.

3. Л. Д. Бахрах, О. Н. Владимирова, А. П. Курочкин, Г. А. Соболев, Г. Х. Фридман. Применение методов когерентной оптики и голографии к задачам антенной техники и обработки информации.— В кн.: Антенны, № 2. М., «Связь», 1967.
4. Г. Б. Гельфрейх, А. Н. Коржавин. Оптическое моделирование диаграмм антенн с отражателем переменного профиля.— «Радиотехника и электроника», 1968, т. 13, вып. 7, с. 1176—1190.
5. Н. А. Есепкина, В. Ю. Петрунькин, И. А. Водоватов, Г. К. Виноградов, М. Г. Высоцкий. Использование методов когерентной оптики и голографии для исследования характеристик радиотелескопов.— Тезисы докладов Восьмой Всесоюзной конференции по радиоастрономии. Пушино, Изд. ОНТИ Научного центра АН СССР, 1975.
6. М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. Проектирование антенно-фидерных устройств. М.—Л., «Энергия», 1966.
7. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973.
8. Н. А. Есепкина, Н. А. Кайдановский, Б. Г. Кузнецов, Г. В. Кузнецова, С. Э. Хайкин. Исследование характеристик излучения остронаправленных зеркальных антенн с отражателем переменного профиля.— «Радиотехника и электроника», 1961, т. 6, вып. 12, с. 1947—1961.

Поступила в редакцию 24 мая 1976 г.

УДК 621.396.535.3

А. Н. ЛУКЬЯНОВА, В. И. НАЛИВАЙКО, Б. И. РАПОПОРТ

(Ленинград — Новосибирск)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА НА ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

**Введение.** Широкое применение телевидения в промышленности и науке предъявляет требования к увеличению возможностей и повышению эффективности не вещательных телевизионных систем [1]. Расширить возможности передающей телевизионной системы можно, используя на ее входе пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) [2, 3].

В последние годы появились сообщения о возможности создания пространственно-временных модуляторов света на жидких кристаллах [4—6] и использования их для проекции на большой экран. Модуляторы на слоистой структуре фотопроводник — жидкий кристалл могут быть применены на выходе телевизионной системы, что позволит увеличить рабочие размеры фотокатода и, следовательно, входного изображения, осуществить преобразование спектрального состава падающего света, разделить функции отдельных звеньев входного устройства и открывает возможности унификации телевизионных камер различного применения.

В статье приводятся результаты исследования возможности использования экспериментального преобразователя с регулируемой памятью в малокадровой телевизионной системе.

**Пространственно-временной модулятор на структуре фотопроводник — жидкий кристалл.** Конструкция преобразователя представлена на рис. 1. Слой жидкого кристалла типа МББА, толщина которого (~7 мкм) определялась пленочной прокладкой, электрически контактирует с фотопроводником посредством изолированных друг от друга, зеркально отражающих свет проводников стеклометаллической шайбы. Полупрозрачные электроды на поверхности клиновидного стекла и фотопроводника служат для подачи постоянного рабочего напряжения на преобразователь.