

УДК 535.8

О. В. Минин*(Новосибирск)***ДИФРАКЦИОННЫЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РАДИООБЪЕКТИВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Приведены результаты экспериментального исследования дифракционных радиообъективов миллиметрового диапазона длин волн на основе фазовых цилиндрических зонных пластин с четырьмя уровнями квантования фазы применительно к системам квазиоптического радиовидения.

В настоящее время квазиоптическое радиовидение развивается в основном по двум направлениям: формирование изображения с помощью различного вида радиообъективов (прямое радиовидение) и построение изображения голографическими методами (голографическое радиовидение).

Применение в качестве радиообъективов линз и зеркальных антенн не решает полностью задачи построения радиоизображения протяженных предметов, так как для формирования качественных изображений необходимы радиообъективы с большими апертурами (порядка единиц метров даже в коротковолновой части миллиметрового диапазона). Слабой стороной таких радиообъективов является их большая масса и такие же потери энергии, связанные с поглощением проходящего излучения в материале линзы. Перспективными аналогами линз в СВЧ-диапазоне являются дифракционные радиообъективы (ДРО) [1–4].

В работе [5] предложен двухкомпонентный ДРО на основе фазовых зонных пластин, который удовлетворяет требованиям [1, 2], предъявленным к объективам систем миллиметрового и субмиллиметрового радиовидения: такой объектив должен иметь малые потери мощности СВЧ-излучения в материале, обладать полем зрения не менее 60° при числе элементов разрешения не менее 128×128 и обеспечивать просмотр пространства $1 \times 1 \times 0,5$ м. Модификация радиообъектива [5] состоит в выполнении его компонент на неплоских поверхностях [6]. ДРО на неплоских поверхностях имеют большое поле зрения и высокий коэффициент усиления. Однако создание таких объективов (порядка метра и более) встречает определенные технологические трудности.

В работе [7] предлагается выполнять зоны Френеля зонной пластины в виде совокупности вложенных друг в друга квадратов. Другой подход к построению дифракционных фокусирующих элементов с прямоугольной структурой зон Френеля предложен в [8]. Суть его заключается в следующем. Если взять две цилиндрические зонные пластины и совместить их в один элемент, то при угле между их осями, равном $\pi/2$, получим аналог

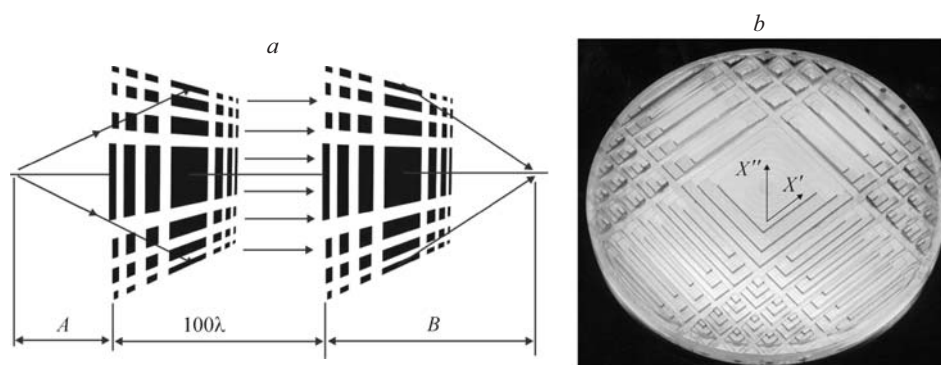


Рис. 1. Дифракционный радиообъектив с прямоугольной топологией зон: оптическая схема двухкомпонентного ДРО (а); вид зонной пластины с прямоугольными зонами с четырьмя уровнями квантования фазы (b)

обычной осесимметричной зонной пластины. Функция рассеяния полученного ДРО будет определяться сверткой функций рассеяния исходных элементов [8] и не имеет осевой симметрии. Однако в технологическом плане такие ДРО имеют ряд преимуществ перед ДРО, структура фазовых зон на поверхности которых представляет собой окружности.

Исследования свойств однокомпонентного ДРО с прямоугольными фазовыми зонами (на основе двух совмещенных так называемых цилиндрических зонных пластин) показали [8], что он сохраняет свои частотные свойства (т. е. зависимость фокусного расстояния от длины волны излучения [1, 3] – аналог хроматических свойств в оптике) в широком спектральном диапазоне, которые совпадают с частотными свойствами зонной пластины.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований фокусирующих и частотных свойств двухкомпонентного ДРО на основе двух фазовых зонных пластин с прямоугольной структурой зон. Двухкомпонентный ДРО представляет собой две идентичные зонные пластины, рассчитанные на преобразование сферического волнового фронта в плоский и разнесенные между собой вдоль оптической оси на расстояние более 100 длин волн в соответствии с результатами работы [5]. ДРО изготавливался из оптического полистирола (показатель преломления 1,59, тангенс угла потерь 10^{-3}) на станке с числовым программным управлением. Точность выполнения фазового рельефа составляла не хуже $\lambda_0/120$, где λ_0 – расчетная длина волны. Схема и методика эксперимента аналогичны представленным в работе [5]. Распределение интенсивности поля вдоль требуемой координаты осуществлялось путем механического сканирования открытым концом волновода.

Оптическая схема ДРО показана на рис. 1, а, а вид одной из компонент ДРО – на рис. 1, b.

Параметры каждой из компонент ДРО следующие: $A = B = D = 45,65\lambda_0$ ($B/D = 1$), $\lambda_0 = 4,6$ мм. Здесь A, B – расстояния от источника излучения до плоскости дифракционного элемента (первая компонента) и от ДРО до точки фокусировки (вторая компонента) соответственно; D – размер апертуры.

На рис. 2 приведены экспериментальные распределения интенсивности поля U в фокусе ДРО поперек оптической оси для трех основных взаимных ориентаций компонент относительно друг друга. Поскольку рассматриваемый ДРО не является вращательно-симметричным, для удобства анализа полученных результатов на рис. 1 показаны возможные ориентации прямо-

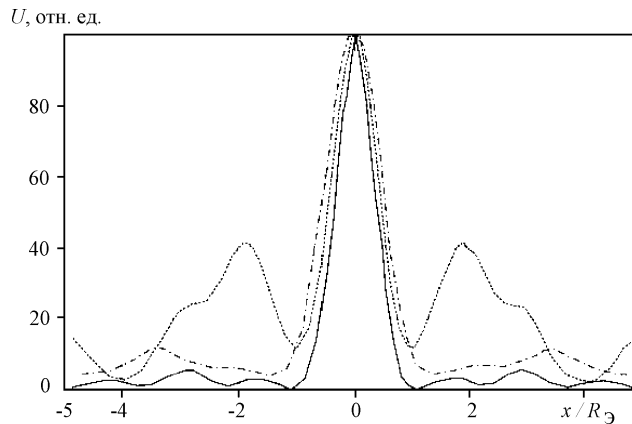


Рис. 2. Распределение интенсивности поля поперек оптической оси в фокусе ДРО на основе фазовых зонных пластин с прямоугольным профилем зон. Сплошная линия соответствует следующим ориентациям компонент ДРО (см. рис. 1): первая компонента по оси X'' , вторая по оси X'' ; штриховая линия: первая компонента по оси X' , вторая по оси X' ; штрихпунктирная линия: первая компонента по оси X'' , вторая по оси X'

угольных зон относительно осей декартовой системы координат: ось X' соответствует случаю, когда границы зон параллельны или перпендикулярны оси X системы координат, ось X'' – случаю, когда зонная пластина повернута на 45° (ось X' параллельна оси X системы координат). По оси ординат на рис. 2 отложены значения интенсивности в относительных единицах, по оси абсцисс – поперечная координата в единицах радиуса Эйри: $R_0 = 1,219\lambda B/D$.

На рис. 3 приведены экспериментальные распределения интенсивности поля вдоль оптической оси в области фокуса ДРО. По оси абсцисс отложена относительная координата вдоль оптической оси $\Delta f = z - B$ в единицах полу-

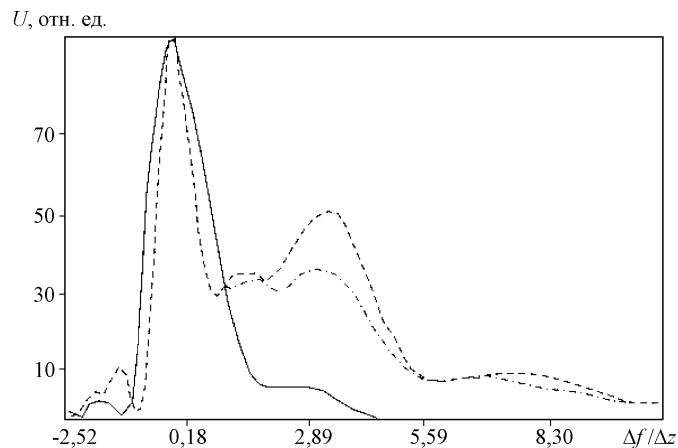


Рис. 3. Распределение интенсивности поля вдоль оптической оси для двухкомпонентного ДРО с прямоугольным профилем зон. Сплошная линия соответствует ориентациям компонент ДРО (см. рис. 1): первая компонента по оси X' , вторая по оси X'' ; штриховая линия: первая компонента по оси X'' , вторая по оси X'' ; штрихпунктирная линия: первая компонента по оси X' , вторая по оси X'

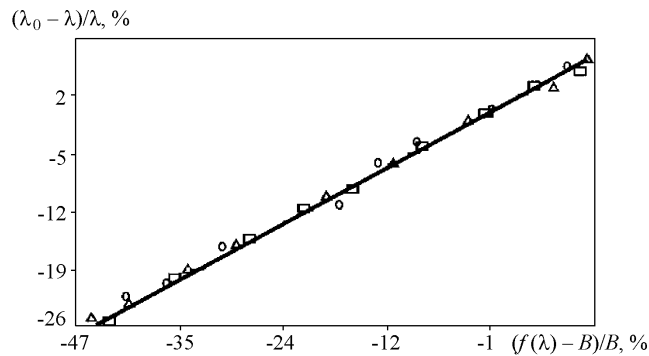


Рис. 4. Частотные свойства ДРО на первых трех гармониках: первая гармоника при $\lambda = \lambda_0$ (квадраты); вторая гармоника при $\lambda = \lambda_0/2$ (треугольники); третья гармоника при $\lambda = \lambda_0/3$ (кружки)

ширины распределения интенсивности поля $\Delta z = 8\lambda_0(B/D)^2$ [9], по оси ординат – интенсивность поля в относительных единицах.

Из рис. 2, 3 видно, в частности, что при разной ориентации фазовых зон у двухкомпонентного ДРО распределение интенсивности поля вдоль оптической оси имеет один главный максимум. При этом в абсолютных величинах уровень сигнала в фокусе* примерно в 2 раза выше, чем при «параллельных» ориентациях фазовых зон компонент ДРО. Наличие второго максимума в распределении интенсивности поля вдоль оптической оси вызвано несимметрией границ зон Френеля (их разным размером вдоль осей X' и X'').

Исследования частотных свойств ДРО на гармониках излучения (на длине волны излучения, кратной длине волны излучения, на которую был рассчитан ДРО) показали следующее. В безразмерных величинах зависимость фокусного расстояния от текущей длины волны носит линейный характер как на основной, так и на кратной длине волны (рис. 4). Здесь по оси абсцисс отложено относительное изменение фокусного расстояния $(f(\lambda) - B)/B$, $f(\lambda) = B$ при $\lambda = \lambda_0$ (в процентах), по оси ординат – относительное изменение длины волны излучения $(\lambda_0 - \lambda)/\lambda$ (в процентах).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что двухкомпонентный ДРО на основе двух зонных пластин, каждая из которых представляет собой две совмещенные цилиндрические зонные пластины, сохраняет свои фокусирующие и частотные свойства в широком частотном диапазоне длин волн. В случае параллельной ориентации зон каждой из компонент ДРО величина первого побочного локального максимума в распределении интенсивности поля вдоль оптической оси в области фокуса достигает величины 30–50 % от интенсивности главного максимума. При ортогональной ориентации зон каждой из компонент ДРО характер распределения интенсивности поля в области фокуса соответствует осесимметричной зонной пластине [1]. При этом ширина распределения интенсивности поля главного максимума вдоль оптической оси, измеренная на полувысоте, больше примерно в 1,6 раза соответствующей величины при параллельной ориентации зон компонент ДРО.

* Под фокусом понимается расстояние от второй компоненты ДРО до области на оптической оси, соответствующей максимальному значению распределения интенсивности поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Минин И. В., Минин О. В.** Дифракционная квазиоптика. М.: ИнформТех, 1992.
2. **Минин И. В., Минин О. В.** Дифракционная квазиоптика и ее применения. Новосибирск: СибАГС, 1999.
3. **Корнблит С.** СВЧ-оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ-антенн: Пер. с англ. /Под ред. О. П. Фролова. М.: Связь, 1980.
4. **Экспериментальная** радиооптика /Под ред. В. А. Зверева, Н. С. Степанова. М.: Наука, 1979.
5. **Минин И. В., Минин О. В.** Широкоугольный многокомпонентный дифракционный СВЧ-объектив // Радиотехника и электроника. 1986. **31**, № 4. С. 800.
6. **Минин О. В., Минин И. В.** Дифракционные объективы на параболических поверхностях // Компьютерная оптика. 1998. № 3. С. 8.
7. **Janicijevic L. J.** Diffraction characteristics of square zone plates // Journ. Optics. 1982. **13**, N 4. P. 199.
8. **Минин И. В., Минин О. В.** Новый тип элементов компьютерной оптики // Тез. докл. Всесоюз. сем. «Методика и техника обработки двумерных сигналов». М.: ЦНИИТИКПК, 1989. Ч. II. С. 34.
9. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1973.

E-mail: iapp@sibmail.ru

*Поступила в редакцию
17 апреля 2003 г.*