

УДК 535.42

05.11.07

Расчет фазовой функции дифракционного оптического элемента, формирующего в своей фокальной плоскости изображение прицельного знака осесимметричной геометрической формы

03, март 2012

Ковалев М.С.⁽¹⁾, Мораренко В.В.⁽²⁾

*Аспирант⁽¹⁾, студент⁽²⁾,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Одинокоев С.Б.,
д.т.н., доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
M.S.Kovalev@gmail.com
V.V.Morarenko@gmail.com

Известно, что в отличие от оптических прицелов при использовании голографического прицела (ГП) большое поле обзора позволяет стрелку пользоваться периферическим зрением и мгновенно реагировать на появляющуюся угрозу. В отличие от обычных коллиматорных прицелов ГП обеспечивает процесс прицеливания в «динамике», так как глаз стрелка не надо устанавливать вплотную к прицелу, а можно смотреть через него на любом расстоянии, как в «окно», и видеть прицельный знак в бесконечности, что для динамической стрельбы очень важно. Таким образом, реализуется значительное преимущество голографического коллиматорного прицела - легкость процесса прицеливания. Так, стрелку не приходится закрывать второй глаз. Таким образом, актуальной является задача записи голограммных оптических элементов (ГОЭ) различной геометрической формы для того, чтобы оперативно подобрать прицельный знак, исходя из условий окружающей среды, вида соревнований, типа мишени, расстояния до цели, что приводит к значительному повышению скорости и точности стрельбы.

Для записи ГОЭ требуется шаблон, в качестве которого выступает дифракционный оптический элемент (ДОЭ). Он представляет собой плоскую стеклянную подложку, на одной из сторон которой сформирована дифракционная структура, которая вносит фазовую задержку за счет модуляции коэффициента пропускания (амплитудный ДОЭ) или высоты микрорельефа (фазовый ДОЭ). Последний характеризуется определенной фазовой функцией $\varphi(u)$, где u – координаты в плоскости элемента. Основная особенность всех ДОЭ, отличающая их от преломляющих (рефракционных) элементов, – это разделение падающей волны на множество дифрагированных волн, называемых порядками дифракции. Обычно полезным является лишь один из порядков дифракции – рабочий порядок.

Один из наиболее интересных и перспективных классов ДОЭ образуют специальные, так называемые «фокусаторы»: они преобразуют излучение в тонкие линии заданной конфигурации или малые области пространства. Конечно, необходимо получить высокую дифракционную эффективность при формировании требуемого распределения интенсивности в фокальной плоскости. Наличие множества решений, обусловленное некорректностью обратной задачи фокусировки, и приближений в ходе ее решения приводят к необходимости исследования характеристик фокусирующих ДОЭ. Среди них можно выделить три вида параметров. К первому виду относятся физические параметры, положенные в основу расчета фазовой функции: фокусное расстояние (f'), рабочая длина волны (λ), размеры ДОЭ (радиус R и толщина h) и параметры области фокусировки. Ко второму виду относятся параметры дискретизации и квантования фазовой функции (чаще всего с учетом технологических особенностей), размер и форма элементов дискретизации. К третьему виду относятся дифракционные характеристики: дифракционная эффективность, ширина фокальной линии, среднеквадратичное отклонение полученного распределения интенсивности от требуемого в фокальной плоскости и т.п. [1]

ДОЭ, синтезируемые методами компьютерной оптики, открывают возможность формирования сложных контурных конфигураций в фокальной плоскости. Решение прикладных задач генерации фотошаблонов, создания реперных знаков и использования в оптических устройствах прицеливания делает актуальной задачу фокусировки лазерного излучения в сложное изображение в фокальной плоскости, составленное, в том числе, парциальными отрезками прямых и дугами окружностей. В частности, фокусировка в контур, представляющий буквенно-цифровую информацию, может осуществляться «составными фокусаторами» в набор отрезков и полуокружностей (рис. 1).

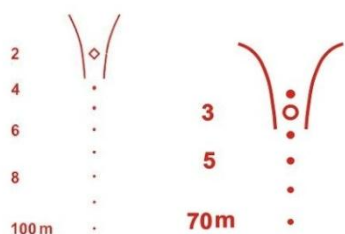


Рис. 1. Виды прицельных знаков, включающих как буквенно-цифровую информацию, так и отрезки прямых, дуги кривых

В данной работе при расчете фазовой функции ДОЭ используется геометрическое или лучевое приближение. То есть рассматривается задача расчета фазовой функции элемента, предназначенного для фокусировки плоского пучка с заданной исходной интенсивностью $I_0(u)$ в кривую линию S , заданную параметрическим уравнением в задней фокальной плоскости ($x', y', z = f'$):

$$\gamma(t) = f(x'(t), y'(t), z = f'),$$

где t – натуральный параметр, $t \in [0, L]$, L – длина кривой S .

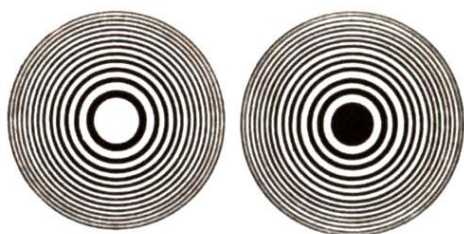


Рис. 2. Пример зонированной регулярной структуры

Во-первых, такой подход позволяет получить регулярный зонированный микрорельеф (рис. 2). Итерационные алгоритмы являются более точными, однако, как правило, дают нерегулярный микрорельеф, что повышает требования к технологии получения такого профиля при производстве ДОЭ. Во-вторых, в работах [1], [2] и [4] показано, что и при геометрикооптическом приближении на практике получаются качественные элементы, выполняющие задачу фокусировки с хорошей точностью.

В основе расчета фазовой функции ДОЭ [2] лежит поиск лучевого соответствия $t = t(u)$ между точками фокальной кривой и точками апертуры ДОЭ с последующим восстановлением фазовой функции из уравнения наклона лучей (1), где u , как отмечалось выше, координаты в плоскости элемента. Пусть $u = (x, y)$ – декартовы прямоугольные координаты.

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} = \frac{k(x'(t(x, y)) - x)}{\sqrt{(x - x'(t(x, y)))^2 + (y - y'(t(x, y)))^2 + z^2}}, \\ \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} = \frac{k(y'(t(x, y)) - y)}{\sqrt{(x - x'(t(x, y)))^2 + (y - y'(t(x, y)))^2 + z^2}}. \end{cases} \quad (1)$$

Из-за того что ДОЭ трехмерен, а фокальная кривая двумерна (находится целиком в плоскости), возможно разделить апертуру ДОЭ на двумерные области $\Gamma_i(t)$ точек (x, y) , направляющих излучение в одну и ту же точку кривой $\gamma(t)$ (рис.3). Наглядная интерпретация может быть получена на примере ДОЭ, фокусирующего излучение в набор из N точек, расположенных на пространственной кривой. Тогда и апертуру нужно разбить на N областей-сегментов. Понятно, что при стремлении числа точек фокусировки N к бесконечности можно получить непрерывную кривую S . Общее решение задачи расчета фазовой функции в геометрикооптическом приближении описано в [3].

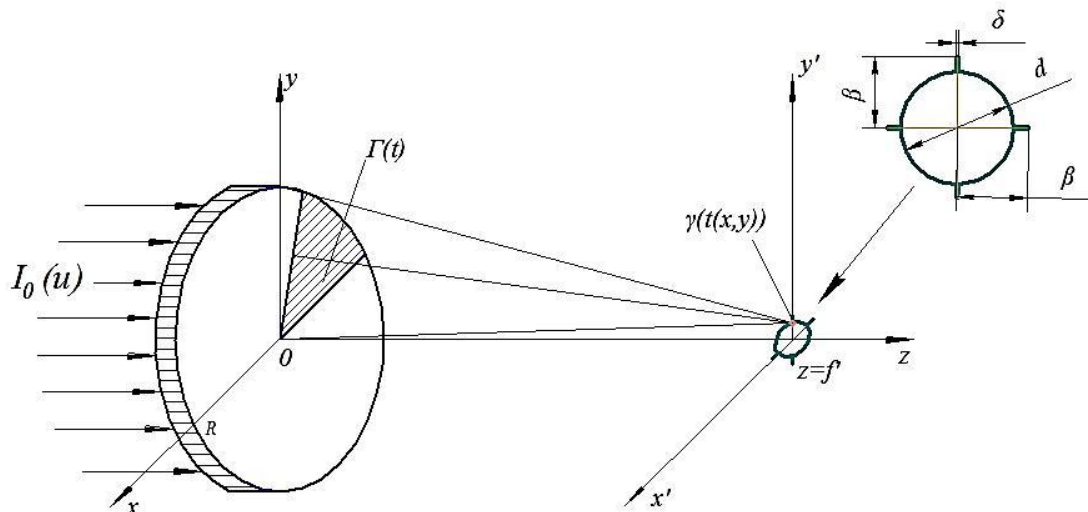


Рис. 3. Геометрия задачи фокусировки в прицельный знак осесимметричной геометрической формы: элементарная область $\Gamma(t)$ фокусирует излучение $I_0(u)$ в точку (x', y') задней фокальной плоскости $z = f$.

Необходимый прицельный знак (см. рис.3 и 4) имеет хоть и осесимметричную геометрическую форму, но является сложным, то есть составным: он объединяет в себе кольцо диаметром d и толщиной δ и крест без центра с отрезками длиной $b = \beta - \frac{d}{2}$ той же толщины. В данной работе проблема составной структуры изображения решается следующим образом. Апертура ДОЭ (x, y) разделяется по радиусу на две области (рис.5). Первая область радиусом $R_1 = 1,5 \text{ мм}$ фокусирует излучение в кольцо диаметром $d = 6 \text{ мм}$, вторая, кольцевая область $1,5 \text{ мм} < R_2 \leq 2,5 \text{ мм}$ – в состоящий из четырех отрезков крест без центра. Пусть необходимо получить ширину всех линий $0,5 \text{ мм}$. Фокусное расстояние ДОЭ примем 5 мм . Центральная точка (см. рис.4) будет получена из практических соображений.

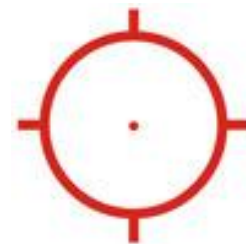


Рис. 4. Прицельный знак осесимметричной геометрической формы.

Рассчитаем сначала фазовую функцию области 1, дающей кольцо (рис. 6). Так как изображение прицельного знака осесимметричное, то разумно использовать полярную систему координат для решения задачи фокусировки в кольцо (r, ψ) . Фазовая функция такого ДОЭ также будет осесимметричной.

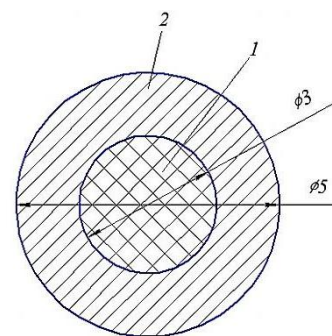


Рис. 5. Области апертуры ДОЭ:

1 – фокусирует в кольцо,
2 – в отрезки.

В качестве падающего на ДОЭ излучения возьмем лазерное. Источник – лазерный диод (длина волны $\lambda = 650 \text{ нм}$). Известно, что это гауссов пучок с амплитудой: $W_0(r) = \sqrt{I_0(r)}$, где $I_0(r)$ – интенсивность освещающего пучка:

$$I_0(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \quad (2)$$

Пучок падает на ДОЭ с комплексной функцией пропускания: $\tau = \exp(i\varphi(r))$, $r \leq R_1$, где R_1 – радиус области ДОЭ, фокусирующей в кольцо, w – радиус перетяжки гауссова пучка. Получим зависимость $\rho(r)$ [4].

$$\rho(r) = \sqrt{\rho_2^2 - \frac{(\rho_2^2 - \rho_1^2)}{\left(1 - \exp\left(-\frac{R_1^2}{w^2}\right)\right)} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) - \exp\left(-\frac{R_1^2}{w^2}\right)\right]}$$

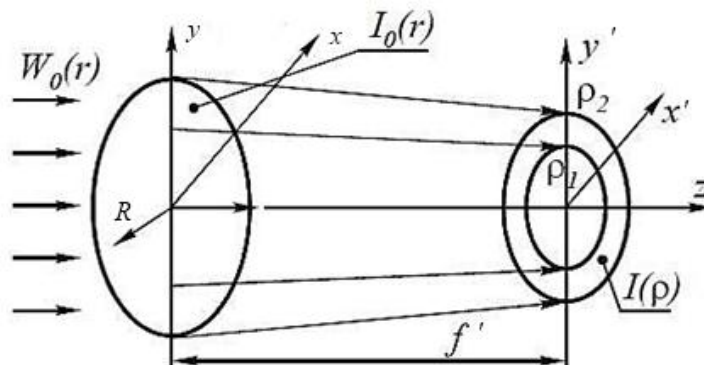


Рис. 6. Геометрия задачи фокусировки в кольцо: здесь $\rho \in \left[\frac{d}{2}; \frac{d}{2} + \delta\right]$

Уравнение наклона лучей примет вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{k}{f'}(\rho - r), r \in [0; R_1], \rho \in [\frac{d}{2}; \frac{d}{2} + \delta]. \quad (3)$$

Далее, интегрируя (3), получаем конечный вид фазовой функции, интеграл в которой решается численно:

$$\varphi_{\Gamma}(r) = \frac{k}{f'} \int_0^r \left(\sqrt{\rho_2^2 - \frac{(\rho_2^2 - \rho_1^2)}{\left(1 - \exp\left(-\frac{R_1^2}{w^2}\right)\right)} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) - \exp\left(-\frac{R_1^2}{w^2}\right) \right]} \right) dr - \frac{kr^2}{2f'} \quad (4)$$

Аналогичную зависимость можно получить и для плоского фронта:

$$\varphi_{\text{пл}}(r) = \frac{k\rho_1}{2f'c} \left(cr(c^2r^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \ln(cr + (c^2r^2 + 1)^{\frac{1}{2}}) \right) - \frac{kr^2}{2f'}, \text{ где } c = \frac{(\rho_2^2 - \rho_1^2)^{\frac{1}{2}}}{R_1\rho_1} \quad (5)$$

На практике рассчитанные в лучевом приближении ДОО (рис. 7), формирующие в фокальной плоскости кольцо, имеют достаточно четкий центральный всплеск интенсивности. В прицельном знаке этот факт играет только на пользу, так как необходима центрирующая точка внутри кольца.

Оценим теоретически распределение интенсивности в фокальной плоскости ДОО при освещении его лазерным излучением с заданными ранее параметрами. Зависимость относительной интенсивности от радиуса представлена на рис. 8. Как видно, ширина кольца удовлетворяет заданному – 0,5 мм.

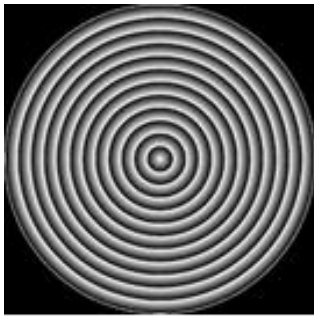


Рис. 7. Вид фазовой функции фотошаблона в кольце.

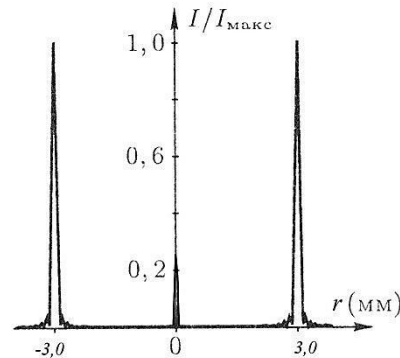


Рис. 8. Распределение интенсивности в кольце прицельного знака.

Таким же способом рассчитаем фазовую функцию области, фокусирующей излучение в крест без центра. Так как задача решается в геометрикооптическом приближении, влиянием краевых эффектов из-за разделения апертуры на две области пренебрегаем. Учтем только, что эта область кольцевая; предположим, что она состоит из четырех кольцевых сегментов, каждый из которых фокусирует в отдельный отрезок креста. В этом случае фазовая функция [2] имеет вид:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \frac{k}{2f'} \cdot \left[\frac{2\beta - d}{2R} \cdot (x - R_1)^2 + d \cdot (x - R_1) \right], & (x - R_1) \cdot (y - R_1) \geq 0, \\ \frac{k}{2f'} \cdot \left[\frac{2\beta - d}{2R} \cdot (y - R_1)^2 + d \cdot (y - R_1) \right], & (x - R_1) \cdot (y - R_1) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Результат численного расчета фазовой функции ДОО (5) с параметрами $f = 5 \text{ мм}$, $\lambda = 0,650 \text{ мкм}$, $2R = 5 \text{ мм}$ при числе элементов дискретизации фазы по двум осям $N_1 = N_2 = 128$ представлен на рис. 8.

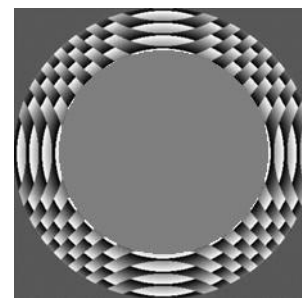


Рис. 8. Вид фазовой функции фотошаблона в крест (без центра).

С точки зрения технологии производства ДОО непрерывный и даже зонированный рельеф создать сложно. Его необходимо оптимизировать, чтобы была возможность использовать фотолитографию или электронно-лучевую литографию. Фазовая функция приводится к интервалу $[0; 2\pi)$ делением $\varphi(x, y)$ с остатком на 2π . Опять же с технологической точки зрения, получившуюся нормированную фазовую функцию, эквивалентную функции рельефа ДОО, обычно аппроксимируют ступенчато, в том числе и бинарным рельефом, то есть двухуровневым профилем.

Выводы

Таким образом, в работе показаны актуальность создания ДОО для фокусирования лазерного излучения в различные геометрические изображения для возможности оперативной смены прицельных знаков в голографическом коллиматорном прицеле, целесообразность использования геометрооптического приближения в решении обратной задачи фокусировки. Приведены рассчитанные фазовые функции составного ДОО, обеспечивающие образование в фокальной плоскости изображения прицельного знака осесимметричной геометрической формы. Кроме того, в результате математического моделирования было выявлено, что ширина линий прицельного знака и энергетическая эффективность почти не зависят от радиуса кольца, относительная величина центрального всплеска уменьшается с ростом радиуса кольца фокусировки.

Список литературы

1. Дифракционная компьютерная оптика / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
2. Методы компьютерной оптики / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
3. А.В. Гончарский, В.В. Попов, В.В. Степанов. Введение в компьютерную оптику. М.: Изд-во Московского университета, 1991. – 310 с.
4. Котляр В.В., Осипов А.П. Фокусаторы в круг и кольцо из гауссового пучка. // Компьютерная оптика, ИСОИ РАН, Самара-Москва, 2001, № 21, с. 40-44.
5. Diffractive optics: design, fabrication, and test / Donald C. O'Shea...[et al.] p. cm. – (SPIE tutorial texts; v. TT62)
6. Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера / Волков А.В., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Успенев Г.В., Занелли А. // Компьютерная оптика, 2000, № 20, С. 84-89.