М. С. Ковалев, В. В. Мораренко, С. Б. Оди-
ноков

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЦЕЛЬНОГО ЗНАКА ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Решена задача получения голограммных оптических элементов, формирующих прицельный знак произвольной осесимметричной геометрической формы для голографического прицела, для возможности оперативного подбора прицельного знака, исходя из смены условий стрельбы с помощью дифракционного оптического элемента, фокусирующего лазерное излучение в необходимое изображение. Приведены результаты расчета фазовой функции пропускания такого дифракционного оптического элемента, формирующего в своей фокальной плоскости изображение прицельного знака осесимметричной геометрической формы, теоретическая оценка распределения интенсивности в фокальной плоскости рассчитанного элемента при освещении его лазерным излучением с заданными параметрами.

E-mail: M.S.Kovalev@gmail.com, v.v.morarenko@gmail.com,
odinokov@bmstu.ru

Ключевые слова: голографический прицел, прицельный знак, голограммный оптический элемент, дифракционный оптический элемент, излучение.

Известно, что в отличие от оптических прицелов при использовании голографического коллиматорного прицела (ГКП) большое поле обзора позволяет стрелку пользоваться периферическим зрением и мгновенно реагировать на угрозу. В отличие от обычных коллиматорных прицелов, ГКП обеспечивает процесс прицеливания в «динамике». Стрелку не обязательно устанавливать прицел вплотную к глазу, можно смотреть через него на любом расстоянии как в «окно» и видеть прицельный знак в бесконечности, что для динамической стрельбы в движении очень важно. Так реализуется важное преимущество голографического коллиматорного прицела – легкость процесса прицеливания. Также стрелку не приходится зажимывать второй глаз. Таким образом, актуальной является задача получения голограммных оптических элементов (ГОЭ), формирующих прицельный знак произвольной геометрической формы для того, чтобы оперативно подобрать прицельный знак, исходя из условий окружающей среды, вида соревнований, типа мишени, расстояния до цели. В итоге должна значительно возрасти скорость и точность стрельбы.

Для получения 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, вносящая фазовую задержку за счет модуляции коэффициента пропускания (амплитудный ДОЭ) или высоты микрорельефа (фазовый ДОЭ). Последний характеризуется определенной фазовой функцией пропускания $\varphi(\vec{u})$, где $\vec{u}$ – координаты в плоскости элемента. Основное отличие всех ДОЭ 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 типа параметров. К первому – относят 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 – параметры дискретизации и квантования фазовой функции (чаще всего с учетом технологических особенностей), размер и форма элементов дискретизации. К третьему типу параметров относят 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 и создания реперных знаков делает актуальной задачу фокусировки лазерного излучения в сложное изображение, составленное, в том числе, парциальными отрезками прямых и дугами окружностей. В частности, фокусировка в контур, который представляет собой буквенно-цифровую информацию, может осуществляться «составными фокусаторами» в набор отрезков и полуокружностей (рис. 1).

В данной работе при расчете фазовой функции ДОЭ используется геометрикооптическое или лучевое приближение, т. е. рассматривается

Рис. 1. Виды прицельных знаков, включающих буквенно-цифровую (а, в) информацию и дуги кривых (б, г)

Рис. 2. Пример зонированной регулярной структуры

задача расчета фазовой функции элемента, предназначенного для фокусировки плоского пучка с заданной исходной интенсивностью $I_0(\vec{u})$ в кривую 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 .

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 ДОО. Во-вторых, в работах [1], [2] и [3] показано, что и при геометрикооптическом приближении на практике получаются качественные элементы, выполняющие задачу фокусировки с хорошей точностью.

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

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

Поскольку ДОО трехмерен, а фокальная кривая двумерна (находится целиком в плоскости), возможно разделить апертуру ДОО на двумерные области $\Gamma_i(t)$ точек (x, y) , направляющих излучение в одну

Рис. 3. Геометрия задачи фокусировки в прицельный знак осесимметричной геометрической формы: элементарная область $\Gamma(t)$ фокусирует излучение $I_0(\vec{u})$ в точку (x', y') задней фокальной плоскости $z = f'$ (а) и осесимметричной геометрической формы прицельный знак, объединяющий в себе кольцо диаметром d и толщиной δ (б)

и ту же точку кривой $\gamma(t)$ (рис. 3, а). Наглядная интерпретация может быть получена на примере ДОО, 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 геометрооптическом приближении описано в [4].

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

Рис. 4. Первая (1) и вторая (2) области апертуры ДОО с радиусами R_1 и R_2 соответственно

Рис. 5. Геометрия задачи фокусировки в кольцо:

$W_0(r)$ – интенсивность освещенного пучка $\rho \in [\frac{d}{2}, \frac{d}{2} + \delta]$; ρ_1, ρ_2 – радиусы фокусировки излучения области 1 и 2 соответственно

Рассчитаем сначала фазовую функцию области 1, дающей кольцо (рис. 5). 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.

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

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

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 [3]

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

Уравнение наклона лучей примет вид

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

Далее, интегрируя (2), получаем конечный вид фазовой функции, интеграл в которой решается численно:

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

На практике рассчитанные в лучевом приближении ДОЭ (рис. 6), формирующие в фокальной плоскости кольцо, имеют достаточно четкий центральный всплеск интенсивности. В прицельном знаке это полезно, так как необходима центрирующая точка внутри кольца.

Рис. 6. Вид фазовой функции фотошаблона в кольцо

Рис. 7. Распределение интенсивности в кольце прицельного знака

Оценим теоретически распределение интенсивности в фокальной плоскости ДОЭ при освещении его лазерным излучением с заданными ранее параметрами. Зависимость относительной интенсивности от радиуса представлена на рис. 7. Как видно, ширина кольца удовлетворяет заданному 0,5 мм.

Таким же способом рассчитаем фазовую функцию области, фокусирующей излучение в крест без центра. В этом случае фазовая функция [2] имеет вид

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \frac{k}{2f'} \left[\frac{2\beta - d}{2R} (x - R_1)^2 + d(x - R_1) \right], & (x - R_1)(y - R_1) \geq 0, \\ \frac{k}{2f'} \left[\frac{2\beta - d}{2R} (y - R_1)^2 + d(y - R_1) \right], & (x - R_1)(y - R_1) < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку задача решается в геометрикооптическом приближении, то влиянием краевых эффектов из-за разделения апертуры на две области

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

пренебрегаем. Учтем только, что эта область кольцевая. Предположим, что она состоит из четырех кольцевых сегментов, каждый из которых фокусирует в отдельный отрезок креста. Результат численного расчета фазовой функции ДОЭ (3) с параметрами $f = 5$ мм, $\lambda = 650$ мкм, $2R = 5$ мм при числе элементов дискретизации фазы по двум осям $N_1 = N_2 = 128$ представлен на рис. 8.

С точки зрения технологии производства, ДОЭ непрерывный и даже зонированный рельеф создать сложно. Его необходимо опти-

мизировать, 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 . Получившуюся нормированную фазовую функцию, эквивалентную функции рельефа ДОЭ, обычно аппроксимируют ступенчато, в том числе и бинарным рельефом, т. е. двухуровневым профилем.

Таким образом, в работе доказана актуальность создания ДОЭ для фокусирования лазерного излучения в различные геометрические изображения для возможности оперативной смены прицельных знаков в голографическом коллиматорном прицеле, а также целесообразность использования геометрооптического приближения в решении обратной задачи фокусировки. Приведены рассчитанные фазовые функции составного ДОЭ, обеспечивающие образование в фокальной плоскости изображения прицельного знака осесимметричной геометрической формы. Кроме того, с помощью 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.
4. Гончарский А. В., Попов В. В., Степанов В. В. Введение в компьютерную оптику. М.: Изд-во Московского университета, 1991. – 310 с.
3. Котляр В. В., Осипов А. П. Фокусаторы в круг и кольцо из гауссова пучка // Компьютерная оптика, ИСОИ РАН, Самара–Москва. – 2001. – № 21. – С. 40–44.

Статья поступила в редакцию 30.05.2012