

Изображающие системы на основе обобщённых гармонических линз

В.С. Васильев¹, Р.В. Скиданов^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В данной работе описаны теоретические аспекты обобщённых линз. Были описаны структуры обобщённой гармонической линзы, имеющей различные диаметры и различные степени N . Так же рассмотрена функция рассеяния точки (ФРТ) системы, состоящей из нескольких обобщённых гармонических линз, таким образом, была отражена многокомпонентная оптическая система.

1. Введение

Классическая изображающая оптическая система состоит из сферических линз и зеркал. Так исторически сложилось ввиду того что технология формирования сферической поверхности реализуется на очень простом оборудовании с несложным набором технологических операций, который не очень сильно изменился за последние сотни лет развития оптического приборостроения. Оптические изображающие системы на основе асферических линз намного компактнее и проще в конструкции, поскольку содержат намного меньше элементов. Однако технологии их изготовления намного сложнее технологий изготовления сферических линз, поэтому широкое использование асферических линз в массово выпускаемых изображающих системах началось относительно недавно (последние 20 лет). Основные типы асферических поверхностей для линз, которые используются в настоящий момент времени описаны в [1].

В настоящий момент времени схема использования асферических линз в изображающих оптических системах довольно стандартная в объективе группа сферических линз заменяется на один асферический элемент, который проводит исправление волнового фронта, формируя практически идеальный гомоцентрический пучок. При этом, обычно используется что то из стандартного набора асферических линз [1]. Однако под асферической линзой можно понимать гораздо более широкий класс элементов, в том числе и осесимметричные элементы свободной формы. Одним из таких элементов является обобщённая линза [2]. Обобщённая линза хорошо описана в работах [3,4], однако как следует из этих работ получение изображения с помощью одиночной обобщённой линзы или невозможно, или оно будет плохого качества.

Однако если в оптической системе несколько элементов, то всегда можно подобрать фазовую функцию одного из элементов таким образом, чтобы на выходе оптической системы был сформирован гомоцентрический пучок. В том случае, если используются рефракционные линзы, в этом нет особой необходимости. Однако в настоящее время развитие технологий формирования микрорельефов с высотой существенно больше микрометра, дает возможность

изготовления дифракционных [5, 6] или гармонических линз [7] аппроксимирующих любую асферическую поверхность [8].

Трудоемкость этой технологии не зависит от формы поверхности, которая аппроксимируется микрорельефом. При этом плоский микрорельеф вместо рефракционной линзы обладает заметным преимуществом по габаритам. Так расстояние между отдельными гармоническими линзами можно уменьшать практически до нуля, и, в целом система из гармонических линз может быть существенно компактнее рефракционного объектива.

Однако, использование гармонических линз аппроксимирующих асферические линзы дает дополнительную степень свободы при проектировании многолинзовых объективов. Разработчики освобождаются от ограничений на форму используемых асферических линз. Возможно использование в таких системах элементов, которые в отдельности не являются изображающими.

В настоящей работе рассматривается афокальная система аналог Фурье – коррелятора где вместо параболических линз установлены обобщенные линзы.

2. Оптическая схема эксперимента

В данной работе будем рассматривать обобщённую параболическую линзу – как оптический элемент, функция пропускания которого выражается формулой:

$$T(r) = -\exp(-iCr^m) \quad (1)$$

где c – масштабный множитель, m – степень обобщённой линзы, r – координата радиус-вектора линзы. Надо понимать, что такая линза за исключением случая $m=2$ не будет изображающей, но есть возможность получения четкого изображения в системе из 2-х линз. Для этого надо подобрать такой фазовую функцию второй линзы, которая полностью компенсирует негомцентричность пучка сформированного первой линзой. Будем называть обобщенной линзой линзу с функцией пропускания

$$T(r) = -\exp[i\Phi(r)] \quad (2)$$

где $\Phi(r)$ произвольная функция.

На рис. 1 показана схема работы такой системы.

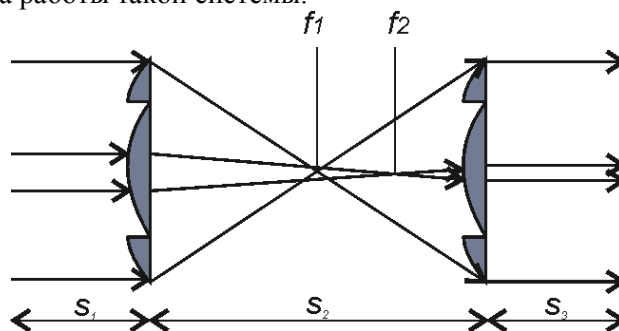


Рисунок 1. Афокальная система из двух обобщенных линз. f_1 – минимальное фокусное расстояние, f_2 – максимальное фокусное расстояние, s_1 – расстояние от входной плоскости до первой линзы, s_2 – расстояние между линзами, s_3 – расстояние от второй линзы до выходной плоскости.

Функция $\Phi(r)$ второй линзы подбирается исходя из условия формирования плоской фазовой функции на выходе системы.

3. Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента была использована параболическая обобщённая линза с $m = 2.1$ (рис.2а). Несмотря на то, что показатель степени обобщенной параболической линзы несильно отличается от двойки, изображение такая линза строит крайне плохо. На рис. 2 показано распределение интенсивности вдоль оптической оси такой линзы,

видно, что фокальный отрезок по длине составляет примерно 0,2 от фокусного расстояния $f_1=1,45\text{м}$, $f_2=1,8\text{м}$.

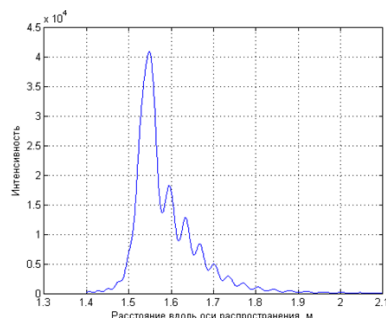


Рисунок 2. Распределение интенсивности параболической обобщенной линзы с $m=2.1$, вдоль оси распространения при падении на линзу плоской волны.

Фазовая функция корректирующей линзы была рассчитана для расположения второй линзы на расстоянии f_2 от первой на основе формулы (4).

Все расчёты производились в параксиальном случае, с использованием преобразования Френеля.

Фазовая функция корректирующей линзы представлена на рис.3.

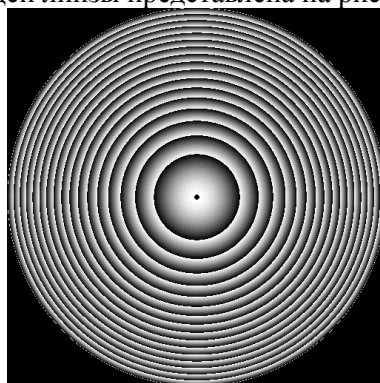


Рисунок 3. Фазовая функция обобщенной линзы для установки в афокальную систему вместе с линзой, фазовая функция которой представлена на рис. 2а.

Представим результаты моделирования формирования изображений в такой оптической системе. Для сравнения аналогичное моделирование производилось для системы из двух параболических линз с $m=2$, т.е. для классического Фурье-коррелятора. В качестве тестового изображения была взята радиальная светотехническая таблица (рис. 4), которая обычно используется для испытания объективов.

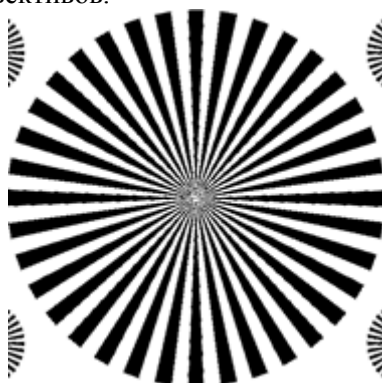


Рисунок 4. Изображение радиальной светотехнической таблицы на входе оптической системы.

После прохождения через оптическую систему, состоящую из 2-х параболических линз с $m=2$, на выходе получается распределение светового поля, которое представлено на рис. 5.

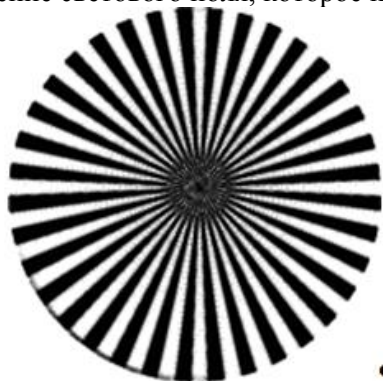


Рисунок 5. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из 2-х параболических линз с $m=2$.

В качестве количественной оценки качества изображения на выходе системы использовали среднее квадратичное отклонение (СКО). Значение СКО:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_0^{m-1} \sum_0^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2,$$

где $I(i, j)$ и $K(i, j)$ – интенсивности входного и выходного изображения, соответственно, m, n – размерность изображения. При использовании параболических линз с $m=2$ значение СКО = 0,00993. Т.е. ошибка менее 1%. Теперь рассмотрим, что будет если произойдет замена на параболические обобщенные линзы.

Полученное в результате моделирование изображение показано на рис. 6.

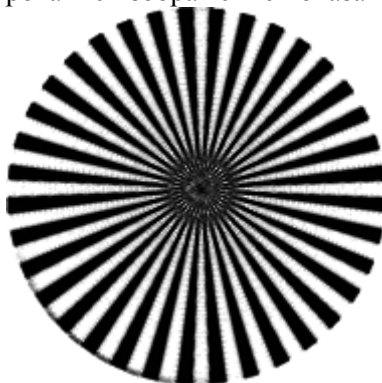


Рисунок 6. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из параболической линзы с $m=2,1$, и компенсирующей линзы, рассчитанной по формуле (4).

СКО полученного изображения составило 0,00951, что даже немного лучше, чем при использовании параболических линз с $m=2$.

4. Литература

- [1] Malacara, D. Handbook of Optical Design / D. Malacara, Z. Malacara // New York, Basel: Marcelu Ekkerin, Inc. – 2004. – 522 p.
- [2] Хонина, С.Н. Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 401-411.
- [3] Хонина, С.Н. Линзакон: непараксиальные эффекты / С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 11. – С. 44-51.

- [4] Устинов, А.В. Обобщённая линза: анализ осевого и поперечного распределения / А.В. Устинов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 305-315.
- [5] Грейсух, Г.И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степенев // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28, № 1. – С. 60-66.
- [6] Казанский, Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, №3. – С. 425-434.
- [7] Sweeney, D.W. Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Applied Optics. – 1995. – Vol.34(14). – P. 2469-2475.
- [8] Хонина, С.Н. Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 363-369.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования РФ в рамках выполнения государственного задания 3.3025.2017/4.6.

Imaging system based on generalized harmonic lenses

V.S. Vasilev¹, R.V. Skidanov^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. This work described theoretical aspects of generalized lens. We described a generalized harmonic lens with different diameters and having various degree N. Also the point spread function system consisted from several generalized harmonic lens was shown. Many component optical system with different parameters was demonstrated.