

Изображающие системы на основе обобщённых линз

В.С. Васильев¹, Р.В. Скиданов^{1,2}, С.В. Ганчевская^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Рассматривается возможность использования обобщённых линз в изображающих оптических системах. Для получения отображения точки в точку предлагается использовать две обобщённые линзы в системе, подобной Фурье-коррелятору, где вторая линза устанавливается так, чтобы при падении на систему плоской волны на выходе оптической системы формировалась плоская волна. Показано, что для обобщённых линз с небольшим отклонением степени от 2 такая система формирует довольно качественное изображение. Для тестирования системы использовалась стандартная радиальная светотехническая таблица, позволяющая определить основные оптические характеристики.

Ключевые слова: обобщённая линза, радиальная светотехническая таблица, изображающая оптическая система, преобразование Френеля, Фурье-коррелятор.

Цитирование: Васильев, В.С. Изображающие системы на основе обобщённых линз / В.С. Васильев, Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 789-795. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-789-795.

Введение

Классическая изображающая оптическая система состоит из сферических линз и зеркал. Так исторически сложилось по причине простоты технологии формирования сферической поверхности, которая реализуется на очень простом оборудовании с несложным набором технологических операций, который не сильно изменился за последние сотни лет развития оптического приборостроения. Оптические изображающие системы на основе асферических линз намного компактнее и проще в конструкции, поскольку содержат 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, описаны в [1].

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. Обычно используется что-то из стандартного набора асферических линз [1]. 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 подробно описана в работах [3, 4], однако, как следует из этих работ, получение изображения с помощью одиночной обобщённой линзы или невозможно, или получается изображение плохого качества.

Если в оптической системе несколько элементов, всегда можно подобрать фазовую функцию одного из

элементов таким образом, чтобы на выходе оптической системы формировался гомоцентрический пучок. Развитие технологий формирования микрорельефов с высотой существенно больше микрометра даёт возможность изготовления дифракционных [5, 6] или гармонических линз [7], аппроксимирующих любую асферическую поверхность [8]. Конечно, в этом случае необходимо компенсировать хроматические искажения [8, 9], но с увеличением высоты рельефа они уменьшаются [7]. Трудоемкость этой технологии не зависит от формы поверхности, которая аппроксимируется микрорельефом. По сравнению с рефракционной линзой плоский микрорельеф обладает заметным преимуществом – габаритами. Толщина таких линз, даже с учётом толщины подложки, существенно меньше толщины рефракционных линз. Существенно меньше и ограничение на расстояние между отдельными гармоническими линзами. Его можно уменьшать практически до нуля в процессе расчёта и оптимизации оптической системы. В результате система из гармонических линз может быть существенно компактнее рефракционного объектива.

Оптические свойства дифракционных и дифракционно-рефракционных систем для задач формирования изображений хорошо описаны в [8–15].

Использование асферических линз со свободной формой поверхности даёт 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. Вследствие этого практически нет ограничения на траекторию лучей в оптической системе, что потенциально может позволить получить большую светосилу оптической системы при существенно меньшей длине оптической системы. Отклонение от гомоцентрично-

сти пучка в такой системе может компенсироваться всего одной асферической обобщённой линзой.

В рамках этой работы не будут рассматриваться компактные системы, не ставится в качестве цели рассмотрение использования гармонических линз, поскольку моделирование ведётся в приближении тонкого элемента для одной длины волны. В работе рассматривается метод компенсации негомоцентричности фокусируемого пучка за счёт использования компенсирующей обобщённой линзы, а именно: рассматривается афокальная система – аналог телескопической системы, как наиболее простой для моделирования, где вместо параболических линз установлены обобщённые линзы.

1. Обобщённая линза

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

$$T(r) = \exp(-iCr^m), \tag{1}$$

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 чёткого изображения в системе из двух линз. Для этого надо подобрать фазовую функцию второй линзы, которая полностью компенсирует негомоцентричность пучка, сформированного первой линзой. Будем называть обобщённой линзой линзу с функцией пропускания:

$$T(r) = \exp[i\Phi(r)], \tag{2}$$

где $\Phi(r)$ – произвольная функция.

На рис. 1 показана схема работы системы.

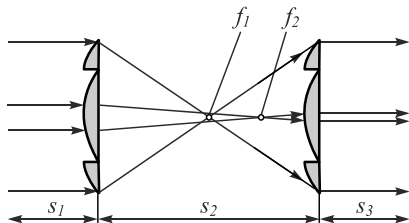


Рис. 1. Афокальная система из двух обобщённых линз: f_1 – минимальное фокусное расстояние, f_2 – максимальное фокусное расстояние, s_1 – расстояние от входной плоскости до первой линзы, s_2 – расстояние между линзами, s_3 – расстояние от второй линзы до выходной плоскости

Функция $\Phi(r)$ второй линзы подбирается, исходя из условия формирования плоского волнового фронта на выходе системы.

2. Математическая модель

Формирование интенсивности на выходе оптической системы, состоящей из 2 обобщённых линз, рассматривалось в параксиальном случае. Для моделирования распространения света использовалось преобразование Френеля. Таким образом, комплексная амплитуда перед второй линзой определяется следующим образом:

$$E_2(x, y, z) = \left(-\frac{ik}{2\pi z}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x', y') \cdot e^{-\frac{ik}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]} dx' dy', \tag{3}$$

где $E_1(x', y')$ – комплексная амплитуда светового поля после первой линзы.

Фазовая функция второй линзы определялась простым способом: на вход системы подавалась плоская волна, далее согласно (3) вычислялась комплексная амплитуда светового поля перед второй линзой системы. Фазовая функция линзы определялась по формуле

$$\Phi(r) = 2\pi - \arg[E_2(x, y, z)]. \tag{4}$$

На выходе системы получается плоский волновой фронт, следовательно, система преобразует плоскую волну в плоскую волну и является аналогом Фурье-коррелятора для обычных линз. Однако, в отличие от классического Фурье-коррелятора, у этой системы есть некоторые отличия. Например, отсутствует частотная плоскость, а вместо неё есть множество частотных плоскостей, расположенных на отрезке от f_1 до f_2 . Полная математическая модель системы представляет собой три преобразования Френеля.

$$E_1(x, y) = \exp(iCr^m) \left(-\frac{ik}{2\pi s_1}\right) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x, y) \exp\left\{-\frac{ik}{2s_1}[(x-x')^2 + (y+y')^2]\right\} dx' dy',$$

$$E_2(x, y) = \exp[\Phi(r)] \left(-\frac{ik}{2\pi s_2}\right) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y) \exp\left\{-\frac{ik}{2s_2}[(x-x')^2 + (y+y')^2]\right\} dx' dy',$$

$$E_3(x, y) = \left(-\frac{ik}{2\pi s_3}\right) \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(x, y) \exp\left\{-\frac{ik}{2s_3}[(x-x')^2 + (y+y')^2]\right\} dx' dy',$$

где $E_0(x, y)$ – комплексная амплитуда во входной плоскости, $E_1(x, y)$ – комплексная амплитуда после первой линзы, $E_2(x, y)$ – комплексная амплитуда после второй линзы, $E_3(x, y)$ – комплексная амплитуда в выходной плоскости.

В отличие от классического Фурье-коррелятора, расстояние между линзами можно менять в широких пределах. Минимальное расстояние не может быть меньше f_2 – максимального фокусного расстояния первой линзы, а максимальное расстояние может быть определено, исходя из условия работы системы без потерь, т.е. весь свет, преобразованный первой линзой, должен попасть на вторую линзу.

Расстояние s_3 определялось вычислительным экспериментом, в ходе которого прямым перебором определялась плоскость с наименьшим размером изображения точечного светящегося объекта во входной плоскости.

3. Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента была использована параболическая обобщённая линза с $m=2,1$ (рис. 2а) диаметром 50 мм. Моделирование проводилось для длины волны 532 нм. Использовались изображения, размер которых составлял 512×512 отсчётов. Несмотря на то, что показатель степени обобщённой параболической линзы не сильно отличается от двойки, изображение линза строит крайне плохо. На рис. 2б показано распределение интенсивности вдоль оптической оси линзы. Видно, что фокальный отрезок по длине составляет примерно 0,2 от фокусного расстояния $f_1 = 1,45$ м, $f_2 = 1,8$ м. Для исходной параболической линзы ($m=2$) фокусное расстояние составляло 1,5 м. На рис. 2в сформированное такой линзой изображение.

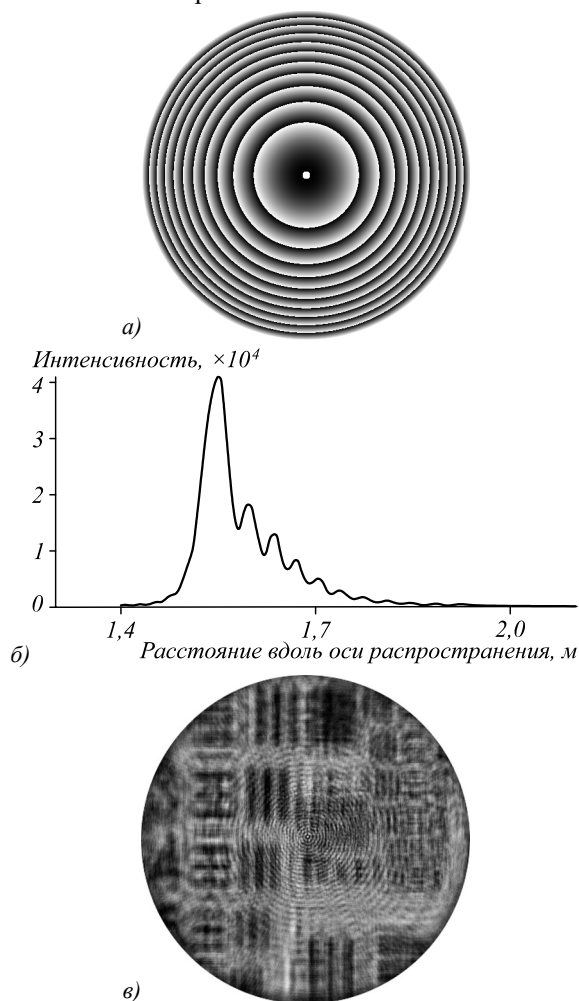


Рис. 2. Фазовая функция параболической обобщённой линзы с $m=2,1$ (а), распределение интенсивности вдоль оси распространения при падении на линзу плоской волны (б), изображение светотехнической таблицы на расстоянии 1,55 м от линзы (в)

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

Фазовая функция корректирующей линзы представлена на рис. 3.

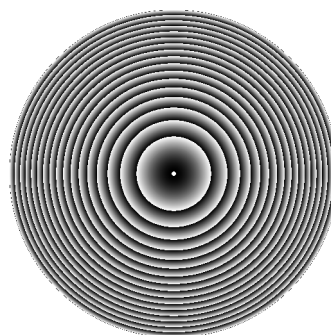


Рис. 3. Фазовая функция обобщённой линзы для установки в афокальную систему вместе с линзой, фазовая функция которой представлена на рис. 2а

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. Физический размер изображения составил 2 мм.

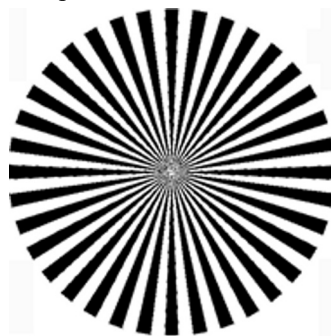


Рис. 4. Изображение радиальной светотехнической таблицы на входе оптической системы

После прохождения через оптическую систему, состоящую из 2 параболических линз с $m=2$, на выходе получается распределение светового поля, которое представлено на рис. 5а. Для оценки качества формирования изображения была использована частотно-контрастная характеристика, которая определялась по формуле

$$k = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \tag{5}$$

где I_{max} – средняя яркость светлых полос в сечении изображения, I_{min} – средняя яркость темных полос в сечении изображения. На рис. 5б, в, г представлены сечения изображения рис. 5а по разным радиусам. Так, для рис. 5б был использован радиус 0,95 мм, для рис. 5в – 0,5 мм, а для рис. 5г – 0,3 мм. На основе обработки полученных сечений по формуле (1) была рассчитана частотно-контрастная характеристика для оптической системы. График зависимости контраста от частоты представлен на рис. 5д.

Как видно из графика, частотно-контрастная характеристика системы близка к таковой в дифракционно-ограниченном случае. Действительно, при диаметре 50 мм и фокусном расстоянии 1500 мм диаметр пятна

рассеяния системы составляет около 19 мкм, что даёт предельную разрешаемую частоту около 53 мм^{-1} .

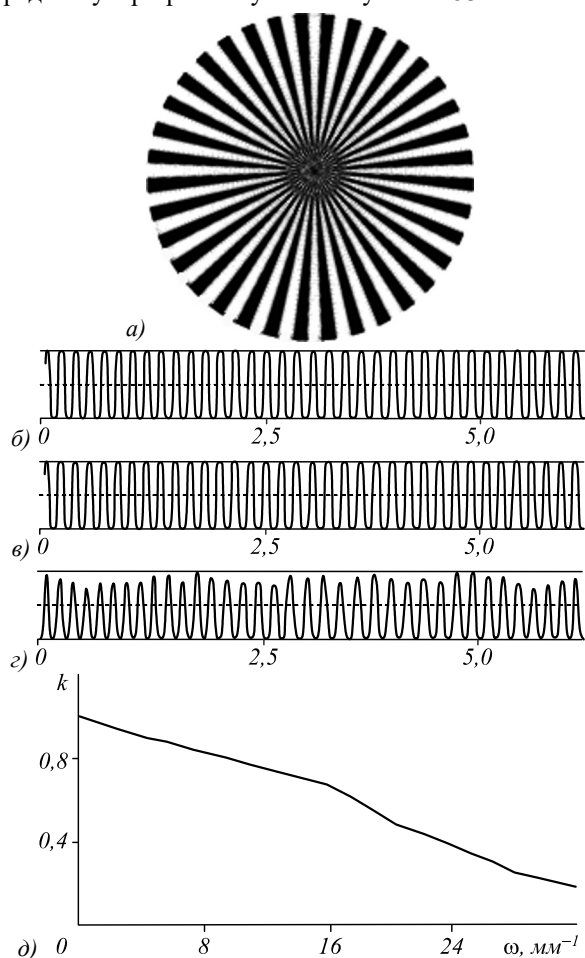


Рис. 5. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из 2 параболических линз с $t=2$ (а), сечения по радиусам 0,95 мм (б), 0,5 мм (в), 0,3 мм (г), график зависимости контраста полос в изображении светотехнической таблицы в зависимости от частоты (д)

Рассмотрим, как изменится качество изображения при замене на параболические обобщённые линзы со степенью, отличной от 2.

Полученное в результате моделирования изображение показано на рис. 6.

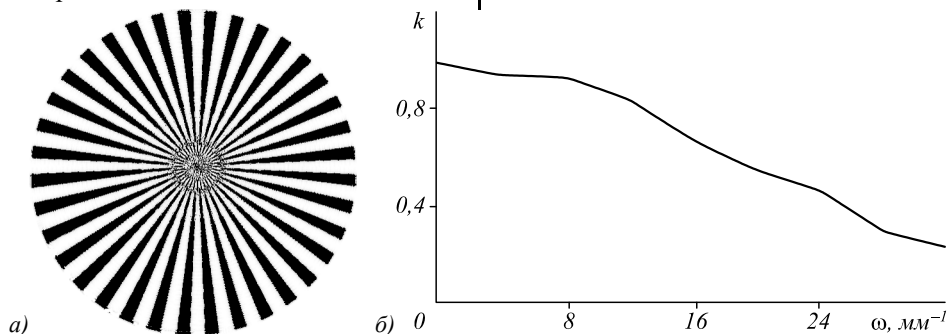


Рис. 7. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из параболической линзы с $t=1,9$, и компенсирующей линзы, рассчитанной по формуле (4), график зависимости контраста полос в изображении светотехнической таблицы в зависимости от частоты (б)

На рис. 6б – частотно-контрастная характеристика, соответствующая рис. 6а. В целом, отличий немного, но видно, что на высоких частотах контраст немного выше 0,2, тогда как на рис. 5д он немного меньше.

Таким образом, система, сформированная из неизображающих по отдельности линз, даёт изображение сопоставимого качества.

Рассмотрим ещё один пример неизображающей линзы. Теперь используем в качестве первой линзы параболическую обобщённую линзу с $t=1,9$. Расстояние между линзами было таким же, как в предыдущем случае. В результате моделирования получено изображение светотехнической таблицы (рис. 7а). На рис. 7б представлен график зависимости контраста от частоты линий для этой системы, который немного лучше, чем на рис. 5д.

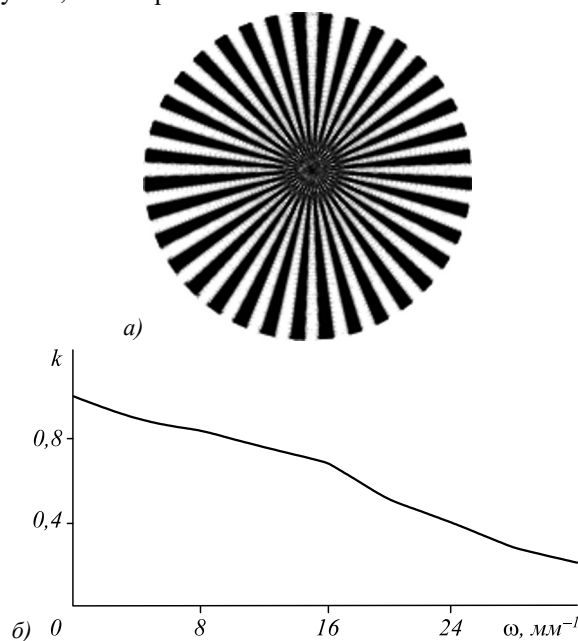


Рис. 6. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из параболической линзы с $t=2,1$, и компенсирующей линзы, рассчитанной по формуле (4), график зависимости контраста полос в изображении светотехнической таблицы в зависимости от частоты (б)

При более существенных отличиях параболических обобщённых линз от линз с $m=2$ результаты принципиально не меняются. На рис. 8а представлен пример изображения на выходе системы из обобщённой параболической линзы $m=2,5$ и соответствующей компенсирующей линзы.

Как видно из рис. 8б, для этой пары линз полученный результат лучше, чем для линз с меньшими степенями.

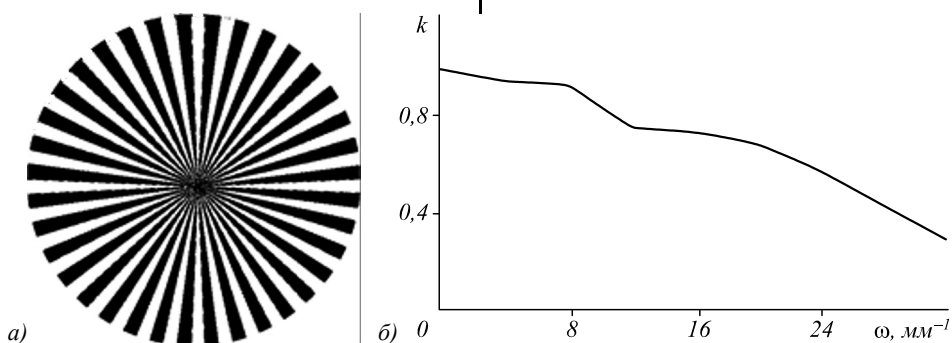


Рис. 8. Изображение радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из параболической линзы с $m=2,5$, и компенсирующей линзы, рассчитанной по формуле (4), график зависимости контраста полос в изображении светотехнической таблицы в зависимости от частоты (б)

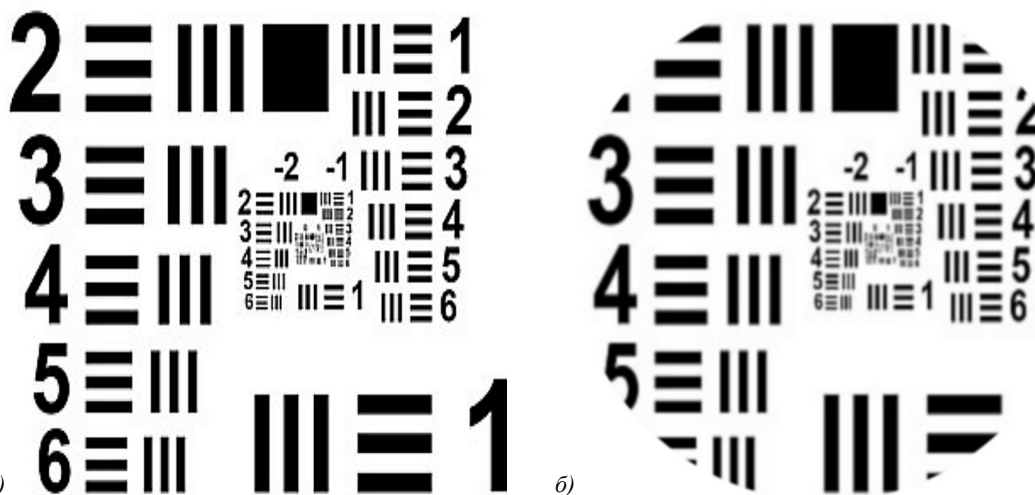


Рис. 9. Нерадиальная светотехническая таблица (а), изображение не радиальной светотехнической таблицы на выходе системы, состоящей из параболической линзы с $m=2,5$, и компенсирующей линзы, рассчитанной по формуле (4) (б)

Заключение

Основной результат, полученный в работе, – принципиальная возможность формирования изображения в оптической системе, состоящей из неизображающих линз. Результат даёт основания утверждать о возможности разработки в будущем принципиально новых изображающих систем, основанных на использовании плоской аппроксимации асферических неизображающих линз. На основе анализа зависимости контраста от частоты полос можно утверждать, что для монохроматического излучения качество формируемого изображения телескопической системой обобщённых линз сопоставимо с качеством изображения, полученным в телескопической системе, состоящей из обычных параболических линз.

Такая система даёт изображение хорошего качества и для светотехнической таблицы нерадиальной структуры (рис. 9).

На рис. 9б угловые участки отсутствуют, т.к. моделирующая программа строит изображение только в радиально симметричной области. Как видно из рис. 9б, формируется изображение приемлемого качества, полностью сливаются только очень высокочастотные полосы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания (проект № 3.3025.2017/4.6, 007-ГЗ/Ч3363/26), а также при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20045мк.

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. Волотовский // 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. Воло-

- товский // 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. 307-315.
 5. **Грейсух, Г.И.** Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2005. – Вып. 28. – 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. Волоотовский // 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, Issue 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. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-363-369.
 9. **Карпеев, С.В.** Исследование влияния широкополосного излучения на распределение интенсивности, формируемое дифракционным оптическим элементом / С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, С.Н. Хонина, С.И. Кудряшов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 689-694.
 10. **Грейсух, Г.И.** Сопоставительный анализ линзы Френеля и киноформной линзы / Г.И. Грейсух, С.А. Степанов, А.И. Антонов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 369-376.
 11. **Антонов, А.И.** Дифракционные элементы для изображающих оптических систем / А.И. Антонов, Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Автометрия. 2017. – Т. 53, № 5. – С. 4-16.
 12. **Грейсух, Г.И.** Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционным объективом цифровой фотокамеры / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 3. – С. 27-31.
 13. **Грейсух, Г.И.** Учет дифракционной эффективности при проектировании рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 3. – С. 32-38.
 14. **Грейсух, Г.И.** Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трёхслойной микроструктурами / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, Б.А. Усевич // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118, № 6. – С. 997-1004.
 15. **Грейсух, Г.И.** Моделирование и исследование коррекции хроматизма оптических систем, линзы которых выполнены из материалов, допускающих прецизионное прессование / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. 2015. – Т. 39, № 4. – С. 529-535.
 16. **Бобров, С.Т.** Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

Сведения об авторах

Васильев Вадим Сергеевич (родился 4.04.1993), старший лаборант в Самарском национальном исследовательском университете. Научные интересы: дифракционная оптика, оптическое микроманипулирование. Имеет 3 статьи. E-mail: vadimka.vasilev.93@mail.ru.

Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лабораторией микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 120 статей, 7 монографий. E-mail: romans@smr.ru.

Ганчевская София Владиславовна, 1992 года рождения, в 2015 получила степень магистра Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева по специальности «Прикладная математика и физика». Работает ассистентом кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженером лаборатории микро- и нанотехнологий. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция, технология изготовления дифракционных оптических элементов. E-mail: sofi@smr.ru.

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 27 декабря 2018 г. Окончательный вариант – 30 августа 2019 г.

Imaging systems based on generalized lenses

V.S. Vasilev¹, R.V. Skidanov^{1,2}, S.V. Ganchevskaya^{1,2}

¹ Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

Abstract

We consider the possibility of using generalized lenses in imaging optical systems. We propose using two generalized lenses in a system similar to a Fourier-correlator to obtain a point-to-point mapping, where the second lens is set so that a plane wave is also formed at the output of the system when the incident wave is plane. We show that for generalized lenses with a small deviation

of their degree from 2, such a system forms a fairly high-quality image. We use a standard radial photographic chart to test the system, which allows us to determine its key optical characteristics.

Keywords: generalized lens, radial photographic chart, imaging optical system, Fresnel transform, Fourier-correlator.

Citation: Vasilyev VS, Skidanov RV, Ganchevskaya SV. Imaging systems based on generalized lenses. *Computer Optics* 2019; 43(5): 789-795. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-789-795.

Acknowledgements: The work was partly funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the government project # 3.3025.2017/4.6, 007-Г3/Ч3363/26.

References

- [1] Malacara D, Malacara Z. Handbook of optical design New York, Basel: Marcelu Ekkerin Inc; 2004.
- [2] Khonina SN, Volotovskiy SG. Fraxicon – diffractive optical element with conical focal domain. *Computer Optics* 2009; 33(4): 401-411.
- [3] Khonina SN, Kazanskii NL, Ustinov AV, Volotovskii SG. The lensacon: nonparaxial effects. *J Opt Technol* 2011; 78(11): 724-729. DOI: 10.1364/JOT.78.000724.
- [4] Ustinov AV, Konina SN. Generalized lens: calculation of distribution on the optical axis. *Computer Optics* 2013; 37(3): 307-315.
- [5] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Comparative analysis of the chromatic aberrations of the diffractive and refractive lenses. *Computer Optics* 2005; 28: 60-66.
- [6] Kazanskii NL, Khonina SN, Skidanov RV, Morozov AA, Kharitonov SI, Volotovskiy SG. Formation of images using multilevel diffractive lens. *Computer Optics* 2014; 38(3): 425-434.
- [7] Sweeney DW, Sommargren GE. Harmonic diffractive lenses. *Appl Opt* 1995; 34(14): 2469-2475.
- [8] Khonina SN, Ustinov AV, Skidanov RV, Morozov AA. Comparative study of the spectral characteristics of aspheric lenses. *Computer Optics* 2015; 39(3): 363-369. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-363-369.
- [9] Karpeev SV, Alferov SV, Khonina SN, Kudryashov SI. Study of the broadband radiation intensity distribution formed by diffractive optical elements. *Computer Optics* 2015; 38(4): 689-694.
- [10] Greisukh GI, Stepanov SA, Antonov AI. Comparative analysis of the fresnel lens and the kinoform lens. *Computer Optics* 2018; 42(3): 369-376.
- [11] Antonov AI, Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Diffractive elements for an imaging optical systems. *Avtometriya* 2017; 53(5): 4-16.
- [12] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Layout and calculation of a refractive-diffraction objective of a periscope type for a mobile communication device. *J Opt Technol* 2016; 83(11): 687-691.
- [13] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Taking diffractive efficiency into account in the design of refractive/diffractive optical systems. *J Opt Technol* 2016; 83(3): 163-167.
- [14] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Spectral and angular dependences of the efficiency of the relief-phase diffraction lenses with two- and three-layer microstructures. *Opt Spectrosc* 2015; 118(6): 964-970.
- [15] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Modeling and investigation of color correction in optical systems with constituent elements synthesized by precision molding. *Computer Optics* 2015; 39(4): 529-535.
- [16] Bobrov ST, Greisukh GI, Turkevich YuG. Optics of diffraction elements and systems [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher, 1986. – 223 p.

Authors' information

Vadim Sergeevich Vasilev (born in 4.04.1993), he works as senior assistant in Samara National Research University, have 3 papers. Research interests: diffractive optics, optical manipulation. E-mail: vadimka.vasilev.93@mail.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of professor at Samara National Research University Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 160 scientific papers, 7 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: romans@smr.ru.

Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya (b. 1992), graduated from Samara State Aerospace University in 2015, majoring in "Applied Mathematics and Physics". Currently she works as an assistant professor of Technical Cybernetics department. Her research interests: diffractive optics, optical manipulation, manufacturing technology of diffractive optical elements. E-mail: sofi@smr.ru.

Received December 27, 2018. The final version – August 30, 2019.