

Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности

*Л. Л. Досколович^{1,2}, А. А. Мингазов^{1,2}, Е. В. Бызов^{1,2}, Д. А. Быков^{1,2}, Е. А. Безус^{1,2},
Р. В. Скиданов^{1,2}, Н. Л. Казанский^{1,2}*

¹ Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Предложен метод расчёта фазовой функции светового поля, обеспечивающей формирование требуемого распределения освещённости в приближении геометрической оптики. В рамках метода задача расчёта фазовой функции сформулирована в полудискретной форме как задача максимизации вогнутой функции, для решения которой используется градиентный метод. С использованием предложенного метода рассчитана фазовая функция, обеспечивающая формирование сложного распределения освещённости в виде гексаграммы. Показано, что гибридный подход, состоящий в использовании полученного геометрооптического решения в итерационном алгоритме Гершберга–Сакстона, позволяет рассчитывать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) с квазирегулярной структурой микрорельефа.

Ключевые слова: дифракционные оптические элементы, геометрическая оптика, гибридный метод, алгоритм Гершберга–Сакстона.

Цитирование: Досколович, Л. Л. Гибридный метод расчета дифракционных оптических элементов, формирующих заданные распределения освещенности / Л. Л. Досколович, А. А. Мингазов, Е. В. Бызов, Д. А. Быков, Е. А. Безус, Р. В. Скиданов, Н. Л. Казанский // НОЛОЕХРО 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 121–125.

Введение

В последние годы задачи дизайна дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в рамках скалярной теории дифракции вновь стали предметом интенсивных исследований. Основными причинами интереса к данной области исследований являются компактность, технологичность и эффективность применения ДОЭ при решении широкого класса задач по преобразованию и фокусировке оптического излучения. Поскольку высота микрорельефа ДОЭ пропорциональна фазовой функции светового поля, формируемого ДОЭ, то задачу расчета ДОЭ обычно рассматривают как задачу расчета фазовой функции. Для решения данной задачи предложены различные итерационные алгоритмы, включающие «классический» алгоритм Гершберга–Сакстона (ГС-алгоритм) и его различные модификации. Несмотря на долгую историю (ГС-алгоритм был предложен в 1972 году), существующие итерационные алгоритмы всё ещё имеют существенные недостатки, обусловленные проблемами медленной сходимости и стагнации итерационного процесса в локальных минимумах. Кроме того, микрорельеф ДОЭ, рассчитанный итерационным алгоритмом, как

правило, имеет сложный и нерегулярный вид, зачастую напоминающий белый шум. Такой рельеф сложен в изготовлении, а также приводит к формированию спекл-структур, заметно ухудшающих качество формируемого распределения.

Для «борьбы» с указанными проблемами были предложены «гибридные» методы, основанные на совместном использовании итерационных алгоритмов и геометрических методов [1–3]. Использование геометрической фазовой функции в качестве начального приближения обеспечивает, как правило, быструю сходимость итерационного алгоритма. При этом получаемая в итерационном алгоритме фазовая функция сохраняет квазирегулярный вид, что существенно упрощает изготовление ДОЭ.

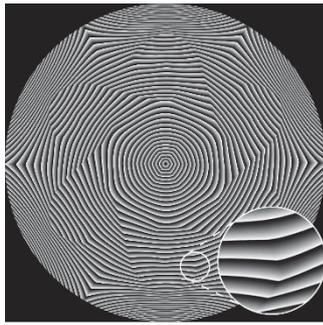
В настоящей работе рассматривается метод расчёта геометрической фазовой функции, заданной в области G плоскости $z=0$, из условия формирования требуемого распределения освещённости в области D плоскости $z=f>0$. В рамках метода задача формулируется в полудискретной форме, когда требуемое непрерывное распределение освещённости аппроксимируется дискретным распределением $L_i, i=1, \dots, N$, заданным в N точках $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i) \in D$. Фазовая функция в этом случае состоит из фрагментов фазовых функций линз с фокусами в точках $\mathbf{x}_i, i=1, \dots, N$ и имеет вид [4]

$$\varphi(\mathbf{u}) = -k \min_i (\sqrt{f^2 + (\mathbf{x}_i - \mathbf{u})^2} - \Psi_i), \quad (1)$$

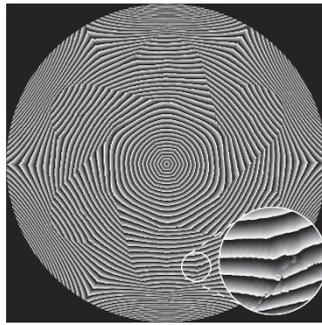
где $\mathbf{u} = (u, v)$ — декартовы координаты в плоскости ДОЭ, $k=2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны, Ψ_i — значения эйконала светового поля в точках фокусировки. Задача расчета фазовой функции (1) сводится к расчету значений Ψ_i , определяющих распределение энергии в точках фокусировки \mathbf{x}_i . Можно показать, что значения Ψ_i , обеспечивающие формирование заданного дискретного распределения $L_i, i=1, \dots, N$, соответствуют точке максимума следующей вогнутой функции [4]:

$$V(\Psi_1, \dots, \Psi_N) = \sum_{i=1}^N \int_{C(\mathbf{x}_i; \Psi_1, \dots, \Psi_N)} \left[\sqrt{f^2 + (\mathbf{x}_i - \mathbf{u})^2} - \Psi_i \right] I_0(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} + \sum_{i=1}^N \Psi_i L_i, \quad (2)$$

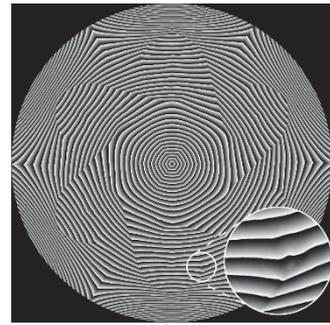
где области $C(\mathbf{x}_i; \Psi_1, \dots, \Psi_N)$ являются «апертурами» фрагментов фазовых функций линз, образующих фазовую функцию (1). Для отыскания максимума функции $V(\Psi_1, \dots, \Psi_N)$ было предложено использовать градиентный метод. При этом градиент функции $V(\Psi_1, \dots, \Psi_N)$ был получен в аналитическом виде [4].



а) Геометрооптический алгоритм



б) GS-алгоритм



в) GS-алгоритм со сглаживанием

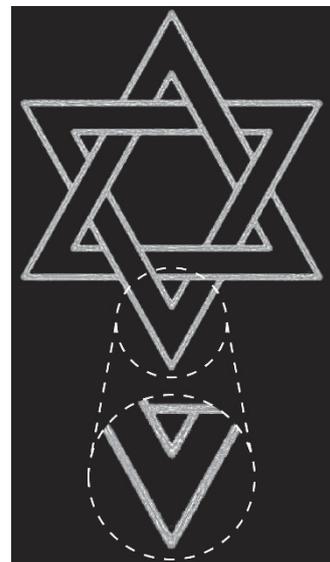
Рис. 1. Фазовые функции по модулю 8π, рассчитанные различными алгоритмами



а) Геометрооптический метод



б) GS-алгоритм



в) GS-алгоритм со сглаживанием

Рис. 2. Распределения освещённости, формируемые при фазовых функциях на рис. 1

С использованием предложенного метода была рассчитана геометрооптическая фазовая функция (рис. 1а) для формирования постоянного распределения освещённости, заданного в сложной несвязной области в виде гексаграммы. Расчёт производился при следующих параметрах: радиус области $G R=5$ мм, расстояние до плоскости фокусировки $f=100$ мм, размер сторон внутренних и внешних треугольников, образующих гексаграмму, $d_1=10$ мм и $d_2=15$ мм, толщина линий гексаграммы $w=0,45$ мм, длина волны $\lambda=550$ нм. Распределение освещенности, формируемое при геометрооптической функции в приближении Френеля-Кирхгофа, показано на рис. 2а и демонстрирует достаточно хорошее качество сформированного распределения, хотя и с проявлением дифракционных эффектов (см. врезку). Нормированное среднеквадратичное отклонение (СКО) сформированного распределения от заданного постоянного распределения в виде гексаграммы составляет 17,5%. Рис. 1б и рис. 2б представляют результат оптимизации геометрооптической фазовой функции в алгоритме Гершберга–Сакстона и полученное распределение освещённости за 30

итераций (данное число итераций оказалось достаточным для сходимости алгоритма). Распределение освещенности на рис. 2б близко к «идеальному». СКО сформированного распределения (рис. 2б) от заданного распределения составляет всего 2,1%. В то же время полученная фазовая функция (рис. 1б) хотя и сохранила регулярный вид, но приобрела высокочастотную составляющую (ср. врезки к рис. 1а и 1б). На рис. 1в и рис. 2в показаны результат оптимизации геометрооптической фазовой функции в ГС-алгоритме со сглаживанием фазы [1] и полученное распределение освещенности. СКО сформированного распределения на рис. 2в от заданного распределения составляет 7,4%. Это СКО больше, чем в предыдущем случае, однако полученная фазовая функция (рис. 1в и врезка) является кусочно-гладкой.

Таким образом, представленный пример показывает, что гибридный подход, основанный на использовании геометрооптического решения в качестве начального приближения в ГС-алгоритме, позволяет рассчитывать ДОЭ с квазирегулярной (рис. 1б) или даже с гладкой фазовой функцией (рис. 1в). Такие ДОЭ, по мнению авторов, существенно проще в изготовлении и позволяют избежать формирования спекл-структур.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта 18-19-00326 Российского научного фонда.

Список источников

- Schmidt, S.** Tailored micro-optical freeform holograms for integrated complex beam shaping / S. Schmidt, S. Thiele, A. Toulouse, C. Bösel, T. Tiess, A. Herkommer, H. Gross, H. Giessen // *Optica*. — 2020. — Vol. 7. — № 10. — P. 1279–1286. — DOI:10.1364/OPTICA.395177.
- Feng, Z.** Composite method for precise freeform optical beam shaping / Z. Feng, B.D. Froese, R. Liang // *Applied Optics*. — 2015. — Vol. 54. — № 31. — P. 9364–9369. — DOI:10.1364/AO.54.009364.
- Yang, L.** Light-shaping design by a fourier pair synthesis: the homeomorphic case / L. Yang, I. Badar, C. Hellmann, F. Wyrowski // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 3. — P. 3621–3630. — DOI:10.1364/OE.415649.
- Doskolovich, L. L.** Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping / L. L. Doskolovich, A. A. Mingazov, E. V. Byzov, R. V. Skidanov, S. V. Ganchevskaya, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. V. Podlipnov, A. P. Porfirev, N. L. Kazanskiy // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29. — № 20. — P. 31875–31890.

Hybrid method for designing diffractive optical elements generating prescribed irradiance distributions

*L. L. Doskolovich^{1,2}, A. A. Mingazov^{1,2}, E. V. Byzov^{1,2}, D. A. Bykov^{1,2}, E. A. Bezus^{1,2},
R. V. Skidanov^{1,2}, N. L. Kazanskiy^{1,2}*

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS — Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the RAS, Samara, Russia

² Samara National Research University, Samara, Russia

We develop a method for calculating the phase function of the light field providing the formation of a prescribed irradiance distribution in the geometrical optics approximation. In the method, this problem is formulated in a semi-discrete form as a problem of maximizing a concave function, which is solved using a gradient method. Using the proposed method, we calculate a phase function, which provides the formation of a “discontinuous” hexagram-shaped irradiance distribution. We show that the hybrid approach consisting in the use of the geometrical-optics solution in iterative Fourier transform algorithms allows one to calculate diffractive optical elements (DOEs) having a quasi-regular microrelief.

Keywords: Diffractive optical elements, Geometrical optics, Hybrid method, Iterative Fourier transform algorithm.