

РАСЧЁТ ЭЙКОНАЛА СВЕТОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ В НАБОР ТОЧЕК*Досколович Л.Л., Моисеев М.А., Бызов Е.В., Кравченко С.В.**Институт систем обработки изображений РАН,**Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)***Аннотация**

Рассмотрен итерационный метод расчёта функции эйконала светового поля из условия фокусировки в набор точек. Предложенный метод является обобщением метода «согласованных параболоидов», предложенного для расчёта зеркал, формирующих дискретные распределения интенсивности (освещённости) в виде набора точек. Представлены результаты расчёта функций эйконала и соответствующих рефракционных оптических элементов для фокусировки плоского пучка в набор точек в эллиптической области, в области в виде креста и в виде надписи «IPSI». Результаты моделирования показывают высокое качество фокусировки и подтверждают работоспособность предложенного метода.

Ключевые слова: геометрическая оптика, эйконал, фокусировка в набор точек, метод согласованных параболоидов.

Введение

Задача расчёта оптического элемента из условия формирования заданного распределения освещённости в некоторой плоскости относится к классу обратных задач неизображающей оптики и является крайне сложной. В случае точечного источника излучения и только одной преломляющей или отражающей оптической поверхности задача сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка эллиптического типа. Методы расчёта оптических поверхностей, основанные на прямом численном решении уравнения данного типа, появились только в последние годы [1, 2]. В общем случае для решения данной обратной задачи используются различные итерационные методы [3–10]. Среди указанных итерационных методов особо следует выделить метод «согласованных параболоидов», предназначенный для расчёта зеркал с поверхностями свободной формы, формирующих дискретные распределения интенсивности (освещённости), соответствующие набору точек [8–10]. В этом случае поверхность зеркала представляется в виде набора сегментов параболоидов (задача формирования диаграмм направленности) или эллипсоидов (задача фокусировки в набор точек) с определёнными параметрами. Расчёт параметров параболоидов (эллипсоидов) осуществляется итерационным методом, при этом сходимость метода строго доказана [8, 9]. Известна модификация данного метода для задачи расчёта рефракционных поверхностей, состоящих из сегментов картезианских овалов [10].

В настоящей работе метод согласованных параболоидов обобщён на случай решения задачи расчёта эйконала светового поля из условия фокусировки в набор точек. Данная задача является важной при расчёте дифракционных оптических элементов [11], в особенности дифракционных многофокусных линз, делителей пучка и рассеивателей [12–14]. Кроме того, по функции эйконала может быть восстановлена рефракционная или отражающая оптическая поверхность, что позволяет применять предложенный метод

для расчёта преломляющих оптических элементов и зеркал [15]. Предлагаемый в работе метод получен как частный случай решения задачи расчёта эйконала из условия фокусировки в заданную область с использованием представления функции эйконала в виде огибающей двухпараметрического семейства эйконалов линз и принципа Ферма. Отличительной особенностью предложенного в данной работе метода является его вычислительная простота. В качестве примеров рассчитаны преломляющие оптические элементы формирующих наборы точек с различной геометрией.

1. Постановка задачи

Сформулируем задачу расчёта эйконала светового поля для формирования заданного дискретного распределения освещённости. Будем предполагать, что в плоскости $z=0$ в области G задано распределение освещённости $E_0(\mathbf{u})$, $\mathbf{u} \in G$, где $\mathbf{u} = (u, v)$ – декартовы координаты в плоскости $z=0$. Область G будем называть апертурой. Требуется рассчитать распределение эйконала $\Psi(\mathbf{u})$, $\mathbf{u} \in G$ из условия формирования в плоскости $z=f$ заданного дискретного распределения освещённости, соответствующего набору точек $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, \dots, N$ с заданной энергией E_i , $i = 1, \dots, N$ (рис. 1).

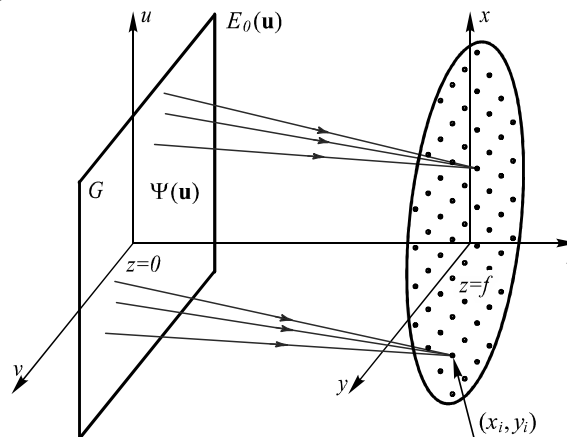


Рис. 1. Геометрия задачи фокусировки

2. Представления функции эйконала при фокусировке в заданную область и набор точек

Приведённая выше «дискретная» задача фокусировки в набор точек может быть рассмотрена как частный случай задачи фокусировки в заданную однопараметрическую или двумерную область. Действительно, предположим, что сетка $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, \dots, N$ является аппроксимацией некоторой двумерной области D . Рассмотрим расчёт функции эйконала в плоскости $z = 0$, при которой лучи будут приходить в область D . Для этого сначала запишем функцию эйконала линзы с фокусом в точке \mathbf{x} в плоскости $z = f$:

$$\Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}) = -\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^2 + f^2} + \Psi_f(\mathbf{x}). \tag{1}$$

В данном уравнении переменные $\mathbf{x} = (x, y)$ рассматриваются как параметры, а $\Psi_f(\mathbf{x})$ — константа, соответствующая значению эйконала светового поля в точке фокусировки. Функцию эйконала для фокусировки в заданную область D предлагается определить в виде огибающей двухпараметрического семейства функций эйконалов (1) по параметрам $(x, y) \in D$. По определению, огибающая поверхность касается каждой функции эйконала в семействе (1) в некоторой точке. Соответственно, частные производные огибающей поверхности совпадают в точке касания с частными производными эйконала линзы.

Поскольку в геометрической оптике направление луча определяется частными производными функции эйконала, то лучи, соответствующие эйконалу огибающей поверхности, будут направлены на точки области D , соответствующие фокусам линз в (1).

Таким образом, расчёт эйконала для фокусировки в заданную область D сводится к построению огибающей для двухпараметрического семейства эйконалов линз (1). Уравнение огибающей поверхности в декартовых координатах имеет вид [16]:

$$\begin{cases} \Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}) = -\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^2 + f^2} + \Psi_f(\mathbf{x}), \\ \frac{\partial \Psi_f(\mathbf{x})}{\partial x} - \frac{x - u}{\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^2 + f^2}} = 0, \\ \frac{\partial \Psi_f(\mathbf{x})}{\partial y} - \frac{y - v}{\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x})^2 + f^2}} = 0. \end{cases} \tag{2}$$

Система уравнений (2) содержит эйконал линзы (первое уравнение) и производные данного уравнения по параметрам x, y (второе и третье уравнения). Интересно отметить, что второе и третье уравнения в системе (2) являются необходимым условием экстремума функции (1) по переменным (x, y) при фиксированных значениях переменных (u, v) . Данное условие соответствует принципу Ферма и позволяет представить функцию эйконала в переменных (u, v) в виде:

$$\Psi_l(\mathbf{u}) = -\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x}(\mathbf{u}))^2 + f^2} + \Psi_f(\mathbf{x}(\mathbf{u})), \tag{3}$$

где

$$\mathbf{x}(\mathbf{u}) = \arg \min_{\mathbf{x} \in D} \Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}) \tag{4}$$

или

$$\mathbf{x}(\mathbf{u}) = \arg \max_{\mathbf{x} \in D} \Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}), \tag{5}$$

где функция $\Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x})$ имеет вид (1).

Общие уравнения (3)–(5) зависят от функции $\Psi_f(\mathbf{x})$, которая определяет распределение энергии в области фокусировки.

Дискретным вариантом задачи фокусировки в область D является задача фокусировки в набор точек \mathbf{x}_i , $i = 1, \dots, N$ из области D . При этом уравнения (5)–(7) принимают вид:

$$\Psi_l(\mathbf{u}) = -\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x}_m)^2 + f^2} + \Psi_{f,m}, \tag{6}$$

где

$$m = \arg \min_{1 \leq i \leq N} \Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}_i) \tag{7}$$

или

$$m = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \Psi_l(\mathbf{u}; \mathbf{x}_i), \tag{8}$$

$\Psi_{f,i} = \Psi_f(\mathbf{x}_i)$, $i = 1, \dots, N$. Уравнения (6)–(8) определяют непрерывную функцию, состоящую из эйконалов линз с фокусами в точках \mathbf{x}_i , $i = 1, \dots, N$. При этом набор значений $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ является аналогом функции $\Psi_f(\mathbf{x})$. Значения $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ соответствуют значениям эйконала в точках фокусировки и определяют распределение энергии в этих точках.

3. Решение дискретной задачи фокусировки в набор точек

Рассмотрим расчёт значений $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ из условия формирования заданного распределения энергии I_i , $i = 1, \dots, N$ в точках $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, \dots, N$. Для решения данной задачи может быть использован аналог метода согласованных параболоидов, предложенного в работах [8, 9]. При расчёте зеркал, фокусирующих излучение от точечного (компактного) источника в набор точек, указанный метод было бы логичнее назвать методом согласованных эллипсоидов, поскольку в этом случае поверхность зеркала состоит из сегментов эллипсоидов, у которых первый фокус совпадает с источником излучения, а второй фокус соответствует точкам фокусировки. Расчёт больших осей эллипсоидов проводится по итерационному алгоритму из условия формирования заданного распределения энергии в точках фокусировки [8, 9]. Отметим, что большие оси эллипсоидов равны эйконалу в точках фокусировки.

Задача расчёта функции эйконала из условия фокусировки в набор точек с распределением энергии I_i , $i = 1, \dots, N$ полностью аналогична методу согласованных параболоидов. При этом вместо эллипсоидов используются функции эйконалов линз

$$\Psi_{l,i}(\mathbf{u}) = -\sqrt{(\mathbf{u} - \mathbf{x}_i)^2 + f^2} + \Psi_{f,i}, i = 1, \dots, N, \tag{9}$$

а параметры оптимизации, как и в случае эллипсоидов, соответствуют значениям эйконала в точках фокусировки $\Psi_{f,i}$.

Итерационный алгоритм расчёта значений $\Psi_{f,i}$ требует многократного решения прямой задачи, состоящей в расчёте энергии в точках фокусировки по методу трассировки лучей.

При расчёте зеркал, состоящих из сегментов эллипсоидов, для трассировки луча от источника вычисляются расстояния по направлению луча от источника до всех эллипсоидов. Рассматриваемый луч попадёт в точку, соответствующую второму фокусу эллипсоида, до которого расстояние минимально или максимально. Условие минимума используется при расчёте зеркал эллиптического типа (в этом случае лучи пересекают оптическую ось), а условие максимума – при расчёте зеркал гиперболического типа (лучи не пересекают оптическую ось).

В рассматриваемой дискретной задаче, согласно формулам (6)–(8), для трассировки луча из точки \mathbf{u} достаточно найти минимальный или максимальный элемент в массиве $\Psi_{l,i}(\mathbf{u})$, $i = 1, \dots, N$.

В общем случае расчёт распределения энергии в точках фокусировки при заданных значениях $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ осуществляется следующим образом. Обозначим $\mathbf{u}_j = (u_j, v_j)$, $j = 1, \dots, N_G$ узлы прямоугольной сетки с размером ячейки $\delta_x \times \delta_y$, аппроксимирующей область G , в которой задан эйконал. Будем считать, что каждый луч несёт энергию $E_j = E_0(\mathbf{u}_j) \delta_x \delta_y$, $j = 1, \dots, N_G$. Для каждой точки \mathbf{u}_j выхода луча вычисляется точка прихода на основе поиска минимального (или максимального) элемента в массиве $\Psi_{l,i}(\mathbf{u})$, $i = 1, \dots, N$. При этом энергия в точке прихода (в точке с индексом $m = \arg \min_i \Psi_{l,i}(\mathbf{u}_j)$) увеличивается на величину E_j .

Подробное описание итерационного алгоритма расчёта параметров эллипсоидов, обладающего монотонной сходимостью, представлено в работах [8, 9]. Данный алгоритм без изменений переносится на расчёт значений $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ в формуле (9). На каждом шаге алгоритма производится расчёт распределения энергии в точках фокусировки, а затем осуществляется коррекция значений $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$. Если энергия в точке \mathbf{x}_i меньше заданного значения I_i , то при использовании условия минимума (7) нужно уменьшить значение $\Psi_{f,i}$ на некоторую величину Δ . В случае эллипсоидов уменьшение большей оси приближает эллипсоид к источнику и, таким образом, увеличивает число лучей, направляемых в данную точку (во второй фокус эллипсоида).

Таким образом, расчёт функции эйконала для фокусировки в набор точек может быть проведён по следующему алгоритму:

- 1) Задание набора точек фокусировки \mathbf{x}_i с распределением энергии I_i , $i = 1, \dots, N$. Переход к шагу 2.
- 2) Определение начальных значений эйконала $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ в точках фокусировки. Переход к шагу 3.

- 3) Введение сетки \mathbf{u}_j , $j = 1, \dots, N_G$ в области G задания эйконала и расчёт матрицы значений $\Psi_{l,ij} = \Psi_{l,i}(\mathbf{u}_j)$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N_G$. Переход к шагу 4.
- 4) Расчёт распределения энергии в точках фокусировки $I_{calc,i}$, $i = 1, \dots, N$. Переход к шагу 5.
- 5) Если $|I_{calc,i} - I_i| \leq \epsilon$, $i = 1, \dots, N$, где ϵ – заданная точность формирования распределения энергии, то сохранение решения и остановка алгоритма. В противном случае – переход к шагу 6.
- 6) Коррекция значений $\Psi_{f,i} = \Psi_{f,i} \pm \Delta_i$, $i = 1, \dots, N$ в соответствии с методом из работ [8, 9], пересчёт матрицы $\Psi_{l,ij}$, состоящий в изменении элементов строк на величины Δ_i . Переход к шагу 4.

Важно отметить вычислительную простоту вышеприведённого алгоритма. В частности, матрица значений $\Psi_{l,i}(\mathbf{u}_j)$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N_G$ вычисляется только один раз на шаге 3 итерационного процесса. Расчёт распределения энергии в точках фокусировки сводится к вычислению минимальных (или максимальных) элементов в столбцах матрицы $\Psi_{l,ij}$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N_G$.

Подробное описание метода коррекции значений $\Psi_{f,i}$, $i = 1, \dots, N$ на шаге 5 представлено в работах [8, 9]. Следует отметить, что данный метод обеспечивает монотонное уменьшение ошибки в итерационном процессе. В то же время указанный метод характеризуется низкой скоростью сходимости, в особенности при большом числе точек, и поэтому на практике часто используются более простые эвристические методы.

В исследованиях, проведённых авторами настоящей работы, хорошо зарекомендовал себя следующий метод коррекции значений $\Psi_{f,i}$:

$$\Psi_{f,i} = \Psi_{f,i} \pm \Delta \cdot \text{sign}(I_{calc,i} - I_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

где Δ – некоторая константа. Знаки « \pm » в формуле (10) обусловлены выбранным типом эйконала. Знак «+» соответствует «эйконалу эллиптического типа» (когда лучи пересекают оптическую ось), а знак «-» соответствует «эйконалу гиперболического типа» (когда лучи не пересекают оптическую ось). В методе (10) величина изменения эйконала в точках фокусировки выбирается пропорциональной разнице $|I_{calc,i} - I_i|$ между расчётными и заданными энергиями в точках фокусировки.

4. Результаты расчётов

С использованием предложенного метода были рассчитаны функции эйконала и соответствующие преломляющие оптические элементы, формирующие наборы точек с различной геометрией.

Пример 1. Была рассчитана функция эйконала, заданная в квадратной области G с размером 5×5 мм в плоскости $z = 0$, из условия фокусировки в набор из 56 точек в эллиптической области с размером осей 6 мм и 3 мм при $z = 100$ мм. Расчёт проводился при постоянном распределении освещённости $E_0(\mathbf{u}) = E_0$,

$\mathbf{u} \in G$ и постоянной энергии точек фокусировки. Рассчитанная функция эйконала приведена на рис. 2 и обеспечивает формирование заданной постоянной освещённости со среднеквадратичной ошибкой менее 2 %. По рассчитанной функции эйконала была восстановлена преломляющая поверхность. Точные аналитические формулы для расчёта преломляющей поверхности, формирующей заданное распределение эйконала, представлены в работе [15]. В то же время при указанных «парааксиальных» параметрах функция высоты преломляющей поверхности может быть рассчитана в приближении тонкого оптического элемента:

$$h(\mathbf{u}) = \Psi(\mathbf{u}) / (n - 1), \quad (11)$$

где $n = 1,49$ – показатель преломления материала оптического элемента.

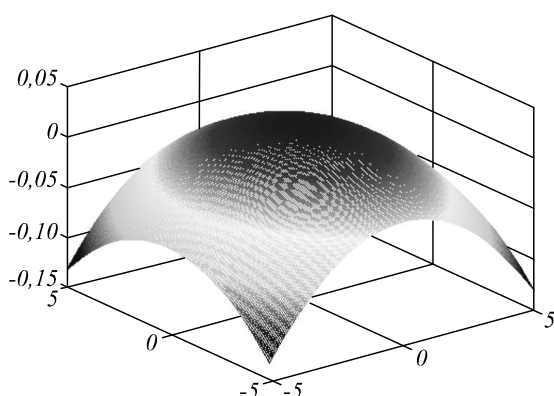


Рис. 2. Функция эйконала для фокусировки в набор точек в эллиптической области

Для проверки правильности приведённых расчётных формул было проведено моделирование работы оптического элемента (11) в программе для светотехнических расчётов TracePro® с использованием метода трассировки лучей [17]. Для этого поверхность (11) была аппроксимирована системой неоднородных рациональных сплайнов (NURBS) в программе автоматизированного проектирования Rhinoceros® [18]. В качестве первой поверхности оптического элемента

использовалась плоская поверхность, перпендикулярная падающему плоскому пучку с постоянной освещённостью. На рис. 3 показано рассчитанное в программе TracePro® распределение освещённости, которое формируется при освещении оптического элемента коллимированным пучком с постоянной освещённостью. Распределение освещённости рассчитано при 62500 лучах и показывает фокусировку в набор точек с хорошим качеством. Некоторая неравномерность распределения энергии в точках объясняется погрешностью метода трассировки лучей, а также аппроксимацией поверхности (11) с помощью рациональных сплайнов.

Пример 2. Была рассчитана функция эйконала, заданная в квадратной области G с размером 5×5 мм в плоскости $z = 0$, из условия фокусировки в набор из 80 точек с постоянной энергией в области в форме креста при $z = 100$ мм. Рассчитанная функция эйконала приведена на рис. 4 и обеспечивает формирование заданного постоянного распределения освещённости в точках со среднеквадратичной ошибкой менее 3 %.

Аналогично предыдущему примеру по рассчитанной функции эйконала был рассчитан преломляющий оптический элемент. На рис. 5 показано рассчитанное в программе TracePro® распределение освещённости, которое формируется при освещении оптического элемента коллимированным пучком с постоянной освещённостью. Распределение освещённости показывает фокусировку в набор точек в области креста.

Пример 3. Была рассчитана функция эйконала, заданная в квадратной области G с размером 5×5 мм в плоскости $z = 0$, из условия фокусировки в набор из 108 точек с постоянной энергией, составляющих надпись «IPSI», при $z = 100$ мм. Рассчитанная функция эйконала приведена на рис. 6 и обеспечивает формирование заданного постоянного распределения освещённости в точках со среднеквадратичной ошибкой менее 1,5 %. Аналогично предыдущим примерам, по рассчитанной функции эйконала был рассчитан преломляющий оптический элемент.

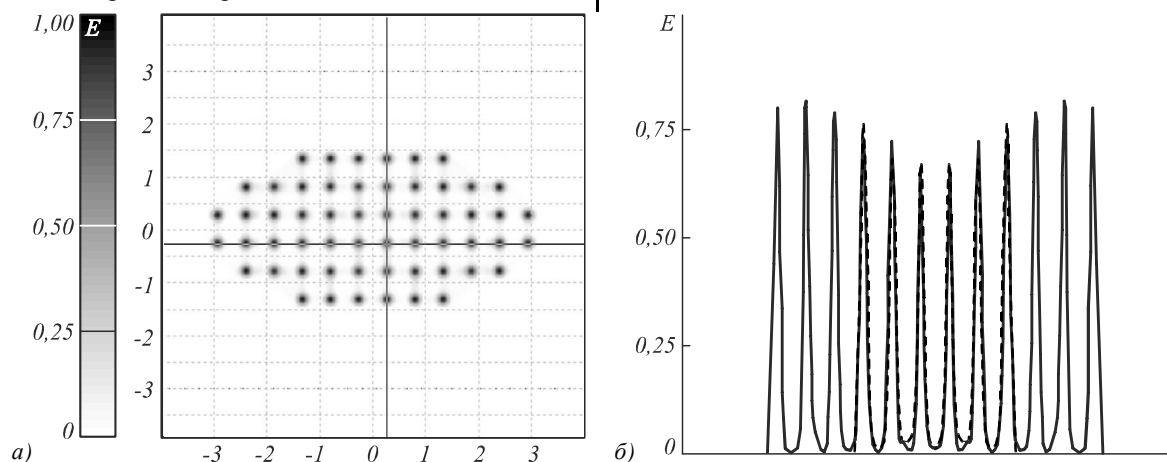


Рис. 3. Полутоновое распределение освещённости, формируемое преломляющим оптическим элементом для фокусировки в набор точек в эллиптической области (а); сечения распределения освещённости вдоль прямых, показанных на рис. 3а (б)

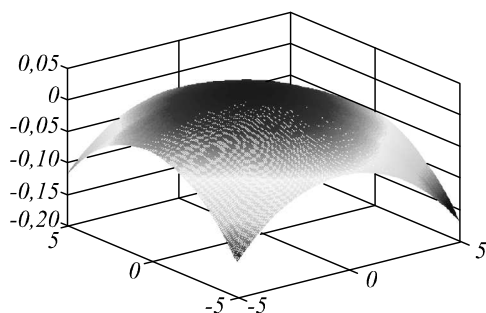


Рис. 4. Функция эйконала для фокусировки в набор точек в области в форме креста

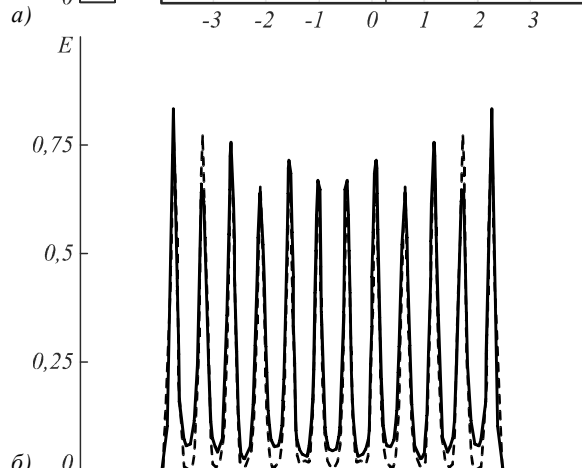
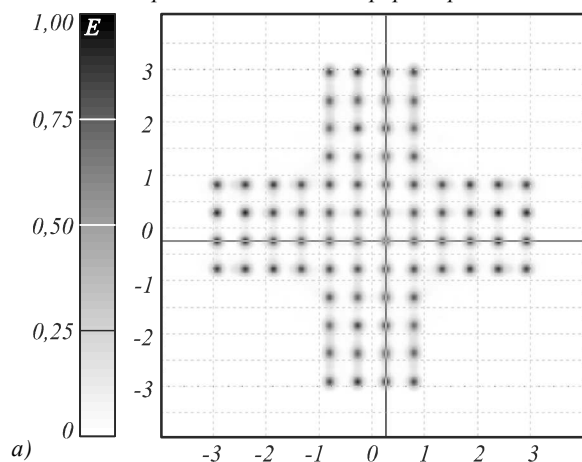


Рис. 5. Полутоновое распределение освещённости, формируемое преломляющим оптическим элементом для фокусировки в набор точек в области в форме креста (а); сечения распределения освещённости вдоль прямых, показанных на рис. 4а (б)

На рис. 7 показано рассчитанное в программе ТрасеPro® распределение освещённости, которое формируется при освещении оптического элемента коллимированным пучком с постоянной освещённостью. Распределение освещённости показывает фокусировку хорошего качества в набор точек, составляющих надпись «IPSI».

Заключение

Предложен итерационный метод расчёта функции эйконала светового поля из условия фокусировки в набор точек. Предложенный метод является обобщением известного метода «согласованных параболоидов».

предназначенного для расчёта зеркал, формирующих дискретные распределения интенсивности или освещённости в виде набора точек. Метод получен как частный случай решения задачи расчёта эйконала из условия фокусировки в заданную область с использованием представления функции эйконала в виде огибающей двухпараметрического семейства эйконалов линз и принципа Ферма. Представленные результаты расчёта функций эйконала и соответствующих рефракционных оптических элементов для фокусировки плоского пучка в набор точек в эллиптической области, в области в виде креста и в виде надписи «IPSI» демонстрируют высокие рабочие характеристики предложенного метода.

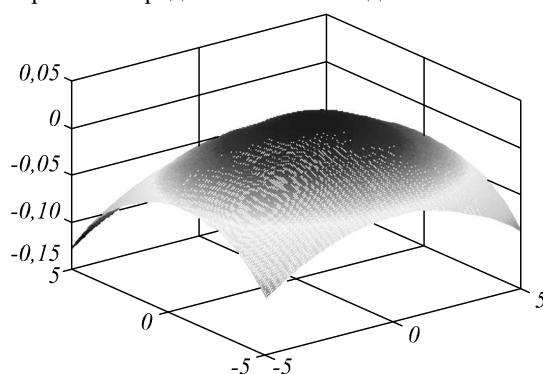


Рис. 6. Функция эйконала для фокусировки в набор точек в области в форме надписи «IPSI»

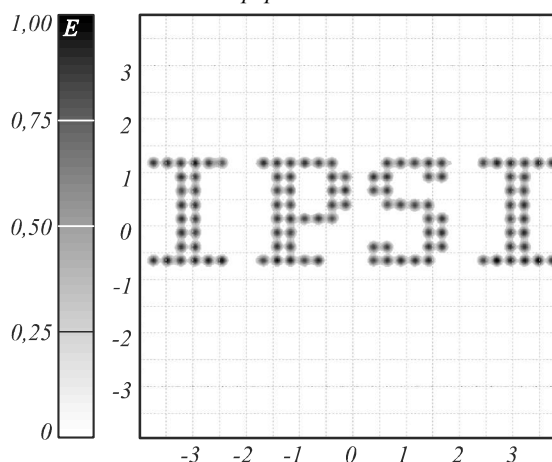


Рис. 7. Полутоновое распределение освещённости, формируемое преломляющим оптическим элементом для фокусировки в набор точек, соответствующих надписи «IPSI»

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 14-19-00969.

Литература (References)

1. Rengmao, W. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge–Ampère equation / W. Rengmao, X. Liang, L. Peng, Z. Yaqin, Z. Zhenrong, L. Haifeng, L. Xu // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38. – P. 229-231.
2. Rengmao, W. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform

- optics design / W. Rengmao, P. Benítez, Z. Yaqin, J.C. Miñano // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39. – P. 634-637.
3. **Feng, Z.** Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio / Z. Feng, Y. Luo and Y. Han // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 22020-22031.
 4. **Luo, Y.** Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source / Y. Luo, Z. Feng, Y. Han and H. Li // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 9055-9063.
 5. **Moiseev, M.A.** Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension / M.A. Moiseev and L.L. Doskolovich // Journal of Modern Optics. – 2010. – Vol. 57. – P. 536-544.
 6. **Moiseev, M.A.** Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich and N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, Issue S3. – P. A225-A233.
 7. **Wang, K.** Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging / K. Wang, F. Chen and Z. Liu // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 413-425.
 8. **Oliker, V.I.** Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics / V.I. Oliker // Trends in Nonlinear Analysis. – ed. by V.I. Oliker, M. Kirkilionis, S. Krömker, R. Rannacher, F. Tomi. – Springer, 2003. – P. 197-224.
 9. **Kochengin, S.A.** Computational algorithms for constructing reflectors / S.A. Kochengin, V.I. Oliker // Computing and Visualization in Science. – 2003. – Vol. 6. – P. 15-21.
 10. **Michaelis, D.** Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber and A. Bäuer // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36. – P. 918-920.
 11. **Soifer, V.A.** Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich. – London: Taylor & Francis Ltd., 1997. – 245 p.
 12. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1245-1251.
 13. **Kazanskiy, N.L.** Binary beam splitter / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, Issue 14. – P. 2672-2677.
 14. **Bitterli, R.** Fabrication and characterization of linear diffusers based on concave micro lens arrays / R. Bitterli, T. Scharf, H.-P. Herzig, W. Noell, N. de Rooij, A. Bich, S. Roth, K.J. Weible, R. Voelkel, M. Zimmermann and M. Schmidt // Optics Express. – 2010. – Vol. 18, Issue 13. – P. 14251-14261.
 15. **Doskolovich, L.L.** Analytic design of optical elements generating a line focus / L.L. Doskolovich, A.Yu. Dmitriev, S.I. Kharitonov // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52(9). – P. 091707(7).
 16. **Залгаллер, В.А.** Теория огибающих / В.А. Залгаллер. – М.: Наука, 1975. – 104 с. (**Zalgaller, V.A.** Theory of envelopes / V.A. Zalgaller. – Moscow: "Nauka" Publisher, 1975. – 104 p. – (In Russian)).
 17. <http://www.lambdaires.com>
 18. <http://www.rhino3d.com>

COMPUTATION OF LIGHT FIELD EIKONAL TO FOCUS INTO A SET OF POINTS

*L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, E.V. Byzov, S.V. Kravchenko
Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

An iterative method for calculating the light field eikonal from the condition of focusing into a set of points is considered. The proposed method is a generalization of the method of conforming paraboloids developed for designing mirrors generating discrete intensity or irradiance distributions as a set of points. The results of calculation of the eikonal functions and corresponding refractive optical elements to focus a collimated beam into a set of points in an elliptic region, in a cross region and in a label «IPSI» are presented. The simulation results demonstrate high quality of focusing and thus confirm the robustness of the proposed method.

Key words: geometric optics, eikonal, focusing into a set of points, the method of conforming paraboloids.

Сведения об авторах

Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович – см. стр. 376 этого номера.

Сведения об авторах Моисеев Михаил Александрович и Кравченко Сергей Васильевич – см. стр. 442 этого номера.

Бызов Егор Владимирович, 1988 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре



Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных работ Е.В. Бызова 9 публикаций и 1 авторское свидетельство.

E-mail: xameak@bigmir.net.

Egor Vladimirovich Byzov (b. 1988) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is co-author of 9 scientific papers and 1 patent.

Поступила в редакцию 15 августа 2014 г.