

МЕТОД РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ПРИНЦИПУ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

К.В. Андреева^{1,2}, М.А. Моисеев^{1,2}, С.В. Кравченко^{1,2}, Л.Л. Досколович^{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. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Представлен новый метод расчёта оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения и формирующих сложные двумерные узкоугольные световые распределения. Расчёт поверхностей свободной формы основан на построении кусочно-гладкого решения, формирующего дискретное световое распределение, с дальнейшей аппроксимацией его сплайновой поверхностью. Работоспособность предложенного метода подтверждается приведёнными примерами расчёта оптических элементов. Световая эффективность полученных оптических элементов составляет 91,8 %, а среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещённости от заданного не превышает 8,6 %.

Ключевые слова: расчёт оптических поверхностей, поверхность свободной формы, полное внутреннее отражение, узкоугольное световое распределение.

Цитирование: Андреева, К.В. Метод расчёта оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения // К.В. Андреева, М.А. Моисеев, С.В. Кравченко, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 467-474. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-467-474.

Введение

Для эффективного формирования заданных фотометрических характеристик в современных светотехнических устройствах используется так называемая вторичная оптика – преломляющие или отражающие оптические элементы, перенаправляющие световой поток от источников в заданную область. Задача расчёта таких элементов является обратной задачей геометрической оптики и заключается в определении формы поверхности оптического элемента из условия создания требуемого распределения освещённости или интенсивности. Даже в случае точечного источника излучения и одной оптической поверхности данная задача сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка типа Монжа–Ампера [1–2]. Аналитические уравнения, описывающие поверхности таких оптических элементов, были получены только для узкого круга задач, обладающих радиальной или осевой симметрией [3–6].

Для формирования сложных световых распределений, не обладающих осевой симметрией, как правило, используются оптические элементы с одной или двумя преломляющими поверхностями [7–10]. Такие оптические элементы демонстрируют высокую работоспособность при создании световых распределений с угловыми размерами 50° и более, но оказываются неэффективными при фокусировке светового потока в узкоугольные области. Как правило, для формирования узкоугольных световых распределений применяют TIR оптические элементы – оптические элементы, содержащие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения (англ. TIR – Total Internal Reflection – полное внутреннее отражение) [11–22].

На настоящий момент разработано большое количество методов расчёта оптических элементов, работающих по принципу полного внутреннего отражения и формирующих узкие радиально-симметричные

световые распределения [11–14] или коллимированные световые пучки [15–17]. Однако на практике часто возникает необходимость формирования узкоугольных распределений в сложной области, например, в задачах автомобильного или архитектурного освещения. Существует несколько подходов для решения данных задач.

В работах [18–19] рассмотрены оптические элементы с коллимирующей TIR-поверхностью и внешней поверхностью свободной формы. Стоит заметить, что такое решение не является компактным: оптические элементы с формирующей поверхностью, работающей по принципу полного внутреннего отражения, имеют меньшие размеры. Аналогичный подход используется в работе [20–21], для формирования светового распределения используется конструкция, состоящая из коллимирующей TIR-поверхности и массива микролинз в качестве внешней поверхности.

В работе [22] представлен метод расчёта оптического элемента с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения. Метод основан на восстановлении поверхности с помощью функции лучевого соответствия и позволяет рассчитывать оптические элементы, формирующие заданные световые распределения в прямоугольных областях. Такой подход обладает рядом недостатков. На данный момент не существует общих методов построения функции лучевого соответствия для произвольной области. Кроме того, часто при формировании сложных световых распределений задача восстановления поверхности не имеет решения из-за нарушения условия интегрируемости.

Таким образом, ни в одной из известных авторов работ не рассмотрен метод расчёта оптических элементов, формирующих сложное узкоугольное световое распределение с помощью TIR-поверхностей.

В данной работе представлен метод расчёта оптических элементов с поверхностью свободной формы,

работающей по принципу полного внутреннего отражения, для создания непрерывных узкоугольных световых распределений произвольной формы. Расчёт оптического элемента сводится к последовательному нахождению внутренней поверхности свободной формы и боковой поверхности, работающей по принципу полного внутреннего отражения. Расчёт каждой поверхности состоит из двух этапов. На первом этапе определяется форма кусочно-гладкой поверхности, формирующей дискретное световое распределение, аппроксимирующее заданное непрерывное распределение интенсивности. На втором этапе полученное решение сглаживается с помощью сплайновой поверхности. Кусочно-гладкая поверхность представляет набор сегментов, количество которых равно числу точек дискретного формируемого распределения. Каждый сегмент поверхности коллимирует падающий на него световой поток в заданном направлении. Расчёт кусочно-гладкого решения основан на методе согласованных квадрик [23].

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу расчёта оптического элемента с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения, и формирующей заданную непрерывную диаграмму направленности $I(\mathbf{q})$ в узкоугольной области. Конструкция оптического элемента представлена на рис. 1. Источник света расположен в начале координат.

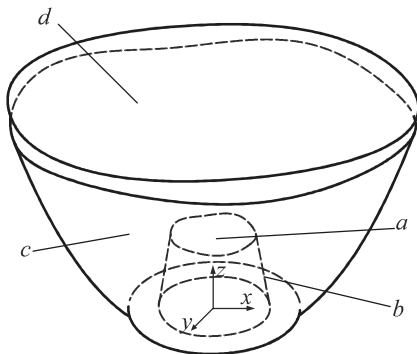


Рис. 1. Взаимное расположение источника и оптического элемента

Внутренняя поверхность оптического элемента состоит из двух частей: преломляющей поверхности свободной формы (a), полностью формирующей заданное световое распределение $I(\mathbf{q})$, и поверхности (b), перенаправляющей лучи источника на боковую поверхность (c). Поверхность (c) является поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения, и, аналогично поверхности (a), также формирует полное световое распределение. Выходная поверхность оптического элемента (d) является плоской.

Расчёт и построение поверхностей оптического элемента выполняется в следующей последовательности: сначала определяется форма поверхности (a), затем производится построение поверхности (b), затем рассчитывается поверхность (c), работающая по принципу полного внутреннего отражения. Расчёт

каждой из поверхностей (a) и (c) состоит из двух этапов. На первом этапе в каждом случае решается задача расчёта кусочно-гладкой поверхности, формирующей дискретное световое распределение, аппроксимирующее требуемое непрерывное распределение интенсивности. Затем полученное решение сглаживается с помощью бикубического сплайна.

2. Расчёт внутренней поверхности оптического элемента

Для получения кусочно-гладкой поверхности (a) аппроксимируем требуемое непрерывное распределение интенсивности дискретным распределением (\mathbf{q}_i, W_i) , представляющим набор сколиммированных световых пучков со световыми потоками W_i , распространяющимися в направлениях \mathbf{q}_i , где $i = 1, \dots, N$, с помощью аналитических выражений, предложенных в работе [10]:

$$W_i = \int_{\delta\Omega} I(\mathbf{q}) d\Omega, \tag{1}$$

$$\mathbf{q}_i = \left(\int_{\delta\Omega} \mathbf{q} I(\mathbf{q}) d\Omega \right) / W_i,$$

где $\delta\Omega_i$ – элемент разбиения полного телесного угла Ω .

Для расчёта поверхности (a) необходимо получить соответствующее дискретное световое распределение внутри оптического элемента (\mathbf{q}_i, W_i) . Так как выходная поверхность оптического элемента (d) является плоской, каждому коллимированному пучку, распространяющемуся в направлении \mathbf{q}_i , можно поставить в соответствие коллимированный световой пучок, распространяющийся в направлении \mathbf{p}_i , внутри оптического элемента. Набор направлений \mathbf{p}_i можно определить с помощью закона Снеллиуса, записанного в векторной форме:

$$\mathbf{p}_i = \frac{[\mathbf{N} \times (-\mathbf{N} \times \mathbf{q}_i)]}{n} - \mathbf{N} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} (\mathbf{N} \times \mathbf{q}_i) (\mathbf{N} \times \mathbf{q}_i)}, \tag{2}$$

где $\mathbf{N} = (0, 0, -1)$ – нормаль к внешней поверхности (d), n – показатель преломления оптического элемента.

Найдём форму кусочно-гладкой поверхности (a), формирующей дискретное световое распределение (1). Искомая поверхность будет состоять из N сегментов, каждый из которых формирует коллимированный световой пучок, распространяющийся в заданном направлении вне оптического элемента. Для решения данной задачи предлагается воспользоваться методом согласованных квадрик, предложенным В. Оликером в работе [23]. Сходимость данного метода была строго доказана в работе [24]. Согласно работе [23], уравнение кусочно-заданной поверхности (a) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_a(\mathbf{s}_0) = r_{a,j}(\mathbf{s}_0) \cdot \mathbf{s}_0, \\ j = \arg \max (r_{a,i}(\mathbf{s}_0)), \end{cases} \tag{3}$$

где $r_{a,i}(\mathbf{s}_0)$ – модуль радиус-вектора сегмента поверхности (a), коллимирующего световой поток источника в направлении \mathbf{q}_i , \mathbf{s}_0 – единичный вектор луча, исходящего от источника света.

Так как согласно принципу Ферма, на поверхности волнового фронта длина оптического пути одинакова для любых лучей от источника, следующее тождество является верным (рис. 2):

$$r_{A,i}(\mathbf{s}_0) + nh = r_{0,i} + nh_0, \quad (4)$$

где h – расстояние между поверхностью (а) и плоскостью волнового фронта для произвольного луча, распространяющегося в направлении \mathbf{s}_0 , h_0 и $r_{a,i}$ – расстояние между поверхностью (а) и плоскостью волнового фронта и модуль радиус-вектора поверхности (а), соответственно, для луча, распространяющегося в направлении $\mathbf{s}_{0,0}$ и падающего по нормали к поверхности (а). Согласно геометрии задачи (рис. 2) и исходя из уравнения (4), модуль радиус-вектора i -го сегмента поверхности (а) можно записать в следующем виде:

$$r_{a,i}(\mathbf{s}_0) = r_{0,i} \frac{1-n}{1-n(\mathbf{s}_0, \mathbf{p}_i)}, \quad (5)$$

где $r_{0,i}$ – параметр, определяющий размер сегмента. Согласно системе уравнений (3), чем больше значение параметра $r_{a,i}$, тем больше размер i -го сегмента и, соответственно, больший световой поток коллимируется в i -м направлении. Таким образом, изменяя значение параметра $r_{a,i}$, можно получить требуемый световой поток W_i , распространяющийся в направлении \mathbf{q}_i . Набор значений $r_{a,i}$ вычисляется с помощью метода согласованных квадрик и полностью описывает вид кусочно-гладкой поверхности (3).

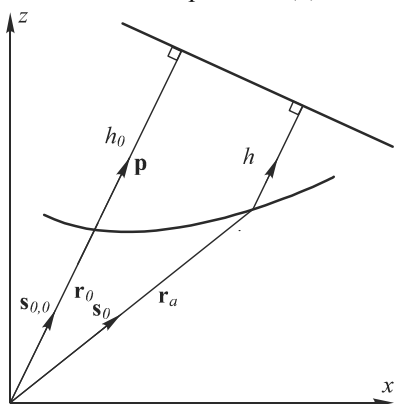


Рис. 2. Принцип работы сегмента поверхности (а)

Гладкая внутренняя поверхность (а), формирующая непрерывное световое распределение, может быть получена с помощью аппроксимации кусочно-заданной поверхности \mathbf{r}_a сплайновой поверхностью [25]. Заметим, что непрерывное решение также можно получить, если устремить количество точек N в дискретной аппроксимации задачи к бесконечности, однако такой подход невозможно осуществить ввиду ограниченности вычислительных ресурсов. Сглаживание поверхности позволяет получить только приближённое решение поставленной задачи, но, как показывает практика, при достаточно больших значениях N порядка 1000–2000 данный подход обеспечивает хорошую согласованность с требуемым результатом.

Поверхность (b) может быть выбрана произвольным образом. В данной работе предлагается задать поверхность (b) сегментом конуса с малым углом α при вершине и основанием, определяющимся границей поверхности (а) – $r_a(\varphi, \psi_{\max})$. Такое представление поверхности связано с технологией изготовления оптического элемента. В сферической системе координат уравнение конической поверхности (b) записывается следующим образом $\mathbf{r}_b(\varphi, \psi) = r_b(\varphi, \psi) \cdot \mathbf{s}_0(\varphi, \psi)$, где

$$r_b(\varphi, \psi) = r_a(\varphi, \psi_{\max}) [\sin(\psi_{\max} + \alpha) / \sin(\psi + \alpha)]. \quad (6)$$

В этом случае лучи \mathbf{s}_1 , преломлённые на поверхности (b), можно найти из закона Снеллиуса (2).

3. Расчёт поверхности, работающей по принципу полного внутреннего отражения

Расчёт поверхности (с), работающей по принципу полного внутреннего отражения, выполняется аналогично расчёту поверхности (а). Сначала с помощью метода согласованных квадрик найдём кусочно-гладкое решение, состоящее из N сегментов, формирующих дискретное световое распределение (1). Вид кусочно-заданной поверхности определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_c = r_b \cdot \mathbf{s}_0 + l_j \cdot \mathbf{s}_1, \\ j = \arg \max (l_i), \end{cases} \quad (7)$$

где l_i – скалярная функция, определяющая расстояние от поверхности (b) до i -го сегмента поверхности (с), $\mathbf{s}_1(\varphi, \psi)$ – направляющий вектор луча, преломлённого на поверхности (b).

Для вывода уравнения i -го сегмента поверхности (с), как и в предыдущем пункте, воспользуемся принципом Ферма и приравняем длину оптического пути от источника до плоскости волнового фронта для произвольного луча \mathbf{s}_0 и луча $\mathbf{s}_{0,0}$, направляющий вектор которого перпендикулярен направлению \mathbf{p}_i (рис. 3):

$$r_b + nl_i + nh = r_{b,0} + nl_0 + nh_0, \quad (8)$$

где r_b и $r_{b,0}$ – длины радиус-векторов поверхности (b) в точках пересечения с лучами \mathbf{s}_0 и $\mathbf{s}_{0,0}$ соответственно, h и h_0 – соответствующие расстояния от поверхности (с) до плоскости волнового фронта.

Запишем расстояние H между источником и плоскостью волнового фронта через геометрические пути лучей:

$$H = l_0 \cos(\beta) + h_0 = r_b \cos(\alpha) + l \cos(\gamma) + h, \quad (9)$$

где α – угол между лучом \mathbf{s}_0 и вектором нормали \mathbf{p}_i плоскости волнового фронта, γ – угол между лучом \mathbf{s}_1 и вектором \mathbf{p}_i , β – угол между лучом $\mathbf{s}_{1,0}$ и вектором \mathbf{p}_i (рис. 3). Заменим косинусы данных углов скалярными произведениями соответствующих векторов и выразим l из системы уравнений (8) и (9):

$$l(\varphi, \psi) = \frac{r_{b,0} + nl_0 (1 + (\mathbf{p}, \mathbf{s}_{1,0})) - r_b (1 - n(\mathbf{p}, \mathbf{s}_0))}{n(1 - (\mathbf{p}, \mathbf{s}_1))}. \quad (10)$$

Набор параметров сегментов l_{0i} , определяющих вид кусочно-заданного решения, также можно найти с помощью метода согласованных квадрик. Для формирования непрерывного распределения полученную кусочно-гладкую поверхность следует аппроксимировать сплайновой поверхностью.

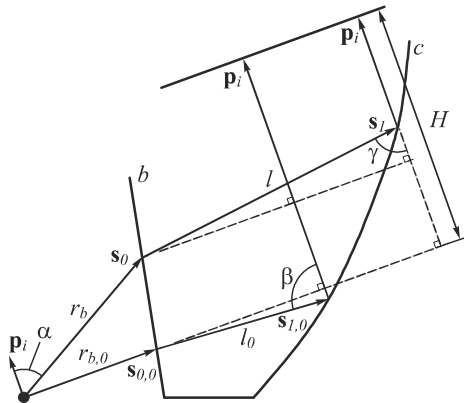


Рис. 3. Отражение лучей на поверхности (с)

4. Результаты расчёта оптических элементов

Предложенный выше метод расчёта оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения, был реализован в среде программирования Matlab. Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих работоспособность данного метода.

В качестве первого примера был рассчитан оптический элемент, формирующий равномерно освещённый квадрат со стороной 3 м на расстоянии 10 м от точечного источника света (угловой размер 16,7°). Формируемое оптическим элементом распределение интенсивности $I(\mathbf{p})$ в дальней зоне связано с освещённостью $E(x, y)$ следующим образом:

$$I(\mathbf{p}) = E(x, y) \cdot [(x^2 + y^2 + z^2)/p_z],$$

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in D; \\ 0, & (x, y) \notin D, \end{cases} \quad (11)$$

где (x, y, z) – координаты точек на выходной плоскости, D – формируемая область.

Для решения предложенной задачи непрерывное распределение интенсивности (11) было представлено дискретным распределением с 1600 точками с помощью выражения (1). Затем были последовательно рассчитаны поверхности (а), (b) и (с) оптического элемента с показателем преломления $n = 1,493$ (ПММА). На первом шаге с помощью метода согласованных квадрик была рассчитана кусочно-гладкая поверхность (а), состоящая из 1600 сегментов и формирующая заданное дискретное световое распределение. Для аппроксимации поверхности (а) использовался определённый на равномерной сетке в сферической системе координат бикубический сплайн. В качестве боковой поверхности (b) была выбрана коническая поверхность, заданная уравнением (6), с углом при вершине $\alpha = 2^\circ$. Затем, аналогично поверхности (а), было получено кусочно-гладкое решение для

поверхности (с), формирующее заданное дискретное распределение, которое также было сглажено с помощью бикубического сплайна.

Трёхмерная модель рассчитанного оптического элемента представлена на рис. 4. Высота оптического элемента составляет 14,31 мм, а диаметр – 23,65 мм.

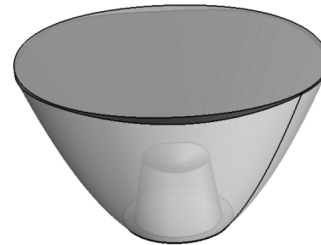


Рис. 4. Оптический элемент, формирующий равномерно освещённый квадрат со стороной 3 м

Для проверки работоспособности оптический элемент был промоделирован в коммерческом программном обеспечении Trace Pro при точечном источнике излучения. На рис. 5 представлено распределение освещённости, формируемое рассчитанным оптическим элементом в выходной плоскости.

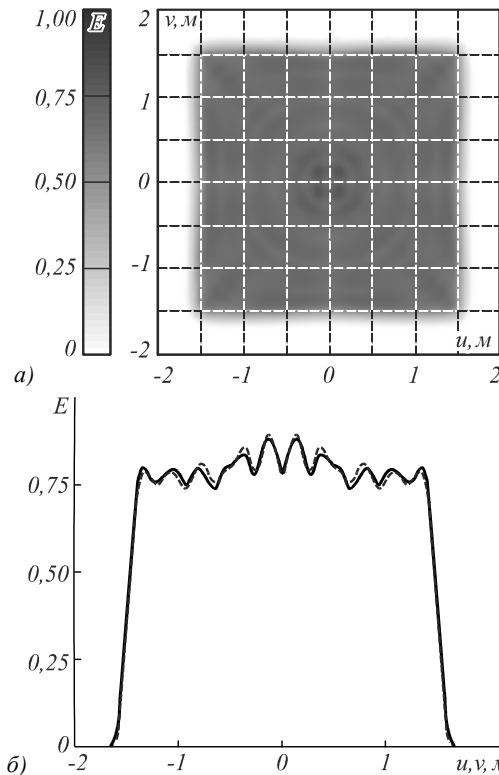


Рис. 5. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом, представленным на рис. 4:
а) полутоновое распределение освещённости,
б) профили распределения освещённости

Световая эффективность оптического элемента составляет 91,8%, а отклонение полученного светового распределения от равномерного не превышает 5,2%.

В качестве второго примера был рассчитан оптический элемент, формирующий постоянное распределение освещённости в сложной области, имеющей вид стилизованной летучей мыши (рис. 6), в выходной плоскости, расположенной на расстоянии 10 м от

точечного источника света. Размеры освещаемой области составляют 10 м по оси Ox (угловой размер $53,1^\circ$) и 5 м по оси Oy (угловой размер $28,1^\circ$).

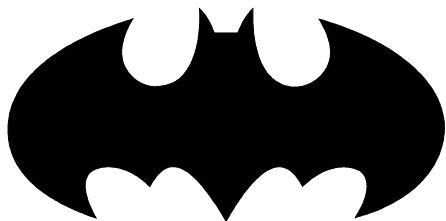


Рис. 6. Форма требуемого распределения освещённости

Для этого методом согласованных квадратов был рассчитан кусочно-гладкий оптический элемент, формирующий заданное дискретное распределение интенсивности, представленное набором из 1062 коллимированных пучков. Полученное решение было аппроксимировано с помощью NURBS поверхности. Оптический элемент представлен на рис. 7. Высота оптического элемента составляет 17,49 мм, размеры оптического элемента по осям Ox и Oy – 24,61 мм и 30,96 мм соответственно.

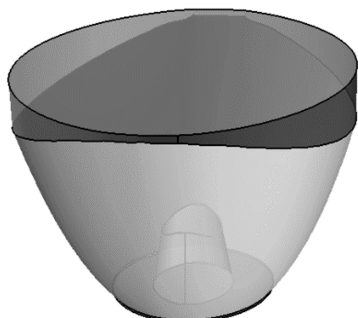


Рис. 7. Оптический элемент, формирующий сложное световое распределение

Результаты моделирования рассчитанного оптического элемента с точечным источником света в программе Trace Pro представлены на рис. 8.

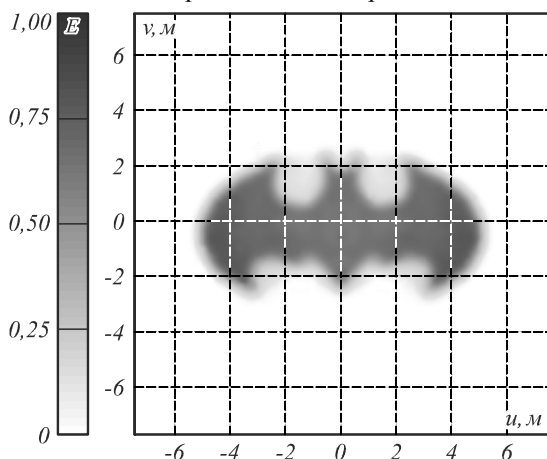


Рис. 8. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом, представленным на рис. 7

Световая эффективность рассчитанного оптического элемента составляет более 91,9%. ОСКО распределения освещённости от равномерного – менее 8,6%.

Представленные выше примеры демонстрируют хорошую работоспособность предложенного метода

расчёта оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения, для формирования сложных узкоугольных распределений освещённости.

Заключение

В данной работе представлен метод расчёта оптических элементов с поверхностью свободной формы, работающей по принципу полного внутреннего отражения. Разработанный метод позволяет рассчитывать оптические элементы, формирующие произвольные узкоугольные световые распределения в сложных двумерных областях.

С помощью разработанного метода были рассчитаны оптические элементы, формирующие равномерные распределения освещённости квадратной области и более сложной области, имеющей вид стилизованной летучей мыши. Результаты моделирования работы оптических элементов показали, что оптические элементы, рассчитанные предложенным методом, обладают высокой световой эффективностью (не менее 91,8%) и с высокой точностью (ОСКО менее 9%) формируют заданные световые распределения, что подтверждает отличную работоспособность метода.

Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00969).

Литература

1. **Wu, R.** Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge–Ampère equation / R. Wu, L. Xu, P. Liu, Y. Zhang, Z. Zheng, H. Li, X. Liu // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, Issue 2. – P. 229-231. – DOI: 10.1364/OL.38.000229.
2. **Wu, R.** Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design / R. Wu, P. Benítez, Y. Zhang, J.C. Miñano // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, Issue 3. – P. 634-637. – DOI: 10.1364/OL.39.000634.
3. **Oliker, V.I.** Radially symmetric solutions of a Monge–Ampère equation arising in the reflector mapping problem / V.I. Oliker, P. Waltman // *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math*, 1987. – P. 361-374.
4. **Moiseev, M.A.** Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, K.V. Borisova, E.V. Byzov // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60(14). – P. 1100-1106. – DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
5. **Кравченко, С.В.** Расчёт осесимметричных оптических элементов с двумя асферическими поверхностями для формирования заданных распределений освещённости / С.В. Кравченко, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 467-472.
6. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // *Applied Optics*. – 1978. – Vol 17(7). – P. 977-979. – DOI: 10.1364/AO.17.000977.
7. **Moiseev, M.A.** Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // *Journal of*

- Modern Optics. – 2010. – Vol. 57(7). – P. 536-544. – DOI: 10.1080/09500341003764069.
8. **Bruneton, A.** High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces / A. Bruneton, A. Bäuerle, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(9). – P. 10563-10571. – DOI: 10.1364/OE.21.010563.
 9. **Кравченко, С.В.** Расчёт преломляющих оптических элементов с двумя рабочими поверхностями для формирования заданных распределений освещённости / С.В. Кравченко, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 435-442.
 10. **Moiseev, M.A.** Design of LED refractive optics with predetermined balance of ray deflection angles between inner and outer surfaces / M.A. Moiseev, E.V. Byzov, S.V. Kravchenko, L.L. Doskolovich // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(19). – P. A1140-A1148. – DOI: 10.1364/OE.23.0A1140.
 11. **Talpur, T.** TIR collimator designs based on point source and extended source methods / T. Talpur, A. Herkommer // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9629. – P. 962906-962916. – DOI: 10.1117/12.2190935.
 12. **Moiseev, M.A.** Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // Journal of the Optical Society of America A. – 2012. – Vol. 29(9). – P. 1758-1763. – DOI: 10.1364/JOSAA.29.001758.
 13. **Moiseev, M.A.** Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, K.V. Borisova, E.V. Byzov // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60(14) – P. 1100-1106. – DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
 14. **Tsai, C.Y.** Free-form surface design method for a collimator TIR lens / C.Y. Tsai // Journal of the Optical Society of America A. – 2016. – Vol. 33(4). – P. 785-792. – DOI: 10.1364/JOSAA.33.000785.
 15. **Chen, C.** Design of optical system for collimating the light of an LED uniformly / C. Chen, X. Zhang // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(5). – P. 1118-1125. – DOI: 10.1364/JOSAA.31.001118.
 16. **Chen, J.J.** Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens / J.J. Chen, C.T. Lin // Optical Engineering. – 2010. – Vol. 49(9). – 093001 (8 pp). – DOI: 10.1117/1.3488046.
 17. **Chen, J.J.** Freeform lens design for LED collimating illumination / J.J. Chen, T.Y. Wang, K.L. Huang, T.S. Liu, M.D. Tsai, C.T. Lin // Optics Express. – 2012. – Vol. 20(10). – P. 10984-10995. – DOI: 10.1364/OE.20.010984.
 18. **Jiang, J.** Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight / J. Jiang, S. To, W.B. Lee, B. Cheung // Optik. – 2010. – Vol. 121(19). – P. 1761-1765. – DOI: 10.1016/j.jjleo.2009.04.009.
 19. **Wu, R.** Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design / R. Wu, P. Benitez, Y. Zhang, J.C. Minano // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39(3). – P. 634-637. – DOI: 10.1364/OL.39.000634.
 20. **Бызов, Е.В.** Метод расчёта вторичной оптики светодиодов для автомобильных фар дальнего света / Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 743-748.
 21. **Byzov, E.V.** Design method for automotive high-beam LED optics / E.V. Byzov, M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9629. – 96290I (7 pp). – DOI: 10.1117/12.2191510.
 22. **Ma, D.** Freeform illumination lens design using composite ray mapping / D. Ma, Z. Feng, R. Liang // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54, Issue 3. – P. 498-503. – DOI: 10.1364/AO.54.000498.
 23. **Oliker, V.I.** Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics / V.I. Oliker. – In book: Trends in Nonlinear Analysis. – Ed. by V.I. Oliker, M. Kirkilionis, S. Krömker, R. Rannacher, F. Tomi. – Springer, 2003. – P. 197-224.
 24. **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.
 25. **Keys, R.G.** Cubic convolution interpolation for digital image processing / R.G. Keys // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1981. – Vol. 29(6). – P. 1153-1160. – DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163711.

Сведения об авторах

Андреева Ксения Валерьевна, 1992 года рождения. В 2014 году с отличием окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по направлению «Прикладные математика и физика». Магистрант второго года обучения магистерской программы «Математическое моделирование и информационные технологии в фотонике» Самарского университета. E-mail: ksen.borisova@gmail.com.

Моисеев Михаил Александрович, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности 010600 «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2011 год), работает научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Является членом международного научного общества SPIE. М.А. Моисеев – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 35 статей и 7 авторских свидетельств. E-mail: mikhail@smr.ru.

Кравченко Сергей Васильевич, 1991 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по направлению «Прикладные математика и физика». Является членом международного научного общества SPIE. В списке научных трудов С.В. Кравченко 18 публикаций. E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

Сведения об авторе Досколович Леонид Леонидович см. стр. 448 этого номера.

ГРПТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 22 июня 2016 г. Окончательный вариант – 10 августа 2016 г.

DESIGN OF OPTICAL ELEMENTS WITH TIR FREEFORM SURFACE

K.V. Andreeva^{1,2}, M.A. Moiseev^{1,2}, S.V. Kravchenko^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}

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

²Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

A novel method for the design of total internal reflection based (TIR) optical elements generating complex two-dimensional narrow-angle light distributions is presented. The method consists of two parts: computation of a piecewise smooth solution and its subsequent approximation by a spline surface. Examples of TIR optical elements designed using the proposed approach are discussed. The simulation results demonstrate high performance of the proposed method: the luminous efficacy of the optical elements is 91.8% and the relative root-mean-square error is less than 8.6%.

Keywords: design of optical surfaces, freeform surface, total internal reflection (TIR), narrow-angle light distributions.

Citation: Andreeva KV, Moiseev MA, Kravchenko SV, Doskolovich LL. Design of optical elements with TIR freeform surface. *Computer Optics* 2016; 40(4): 467-474. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-467-474.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Science Foundation under project #14-19-00969.

References

- [1] Wu R, Xu L, Liu P, Zhang Y, Zheng Z, Li H, Liu X. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge–Ampère equation. *Opt Lett* 2013; 38(2): 229-231. DOI: 10.1364/OL.38.000229.
- [2] Wu R, Benítez P, Zhang Y, Miñano JC. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design. *Opt Lett* 2014; 39(3): 634-637. DOI: 10.1364/OL.39.000634.
- [3] Oliker VI, Waltman P. Radially symmetric solutions of a Monge–Ampère equation arising in the reflector mapping problem. *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math* 1987: 361-374.
- [4] Moiseev MA, Doskolovich LL, Borisova KV, Byzov EV. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source. *J Mod Opt* 2013; 60(14): 1100-1106. DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
- [5] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design of axis-symmetrical optical element with two aspherical surfaces for generation of prescribed irradiance distribution [in Russian]. *Computer Optics* 2011; 35(4): 467-472.
- [6] Elmer WB. Optical design of reflectors. *Appl Opt* 1978; 17(7): 977-979. DOI: 10.1364/AO.17.000977.
- [7] Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of refractive spline surface for generating required irradiance distribution with large angular dimension. *J Mod Opt* 2010; 57(7): 536-544. DOI: 10.1080/09500341003764069.
- [8] Bruneton A, Bäuerle A, Wester R, Stollenwerk J, Loosen P. High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces. *Optics Express* 2013; 21(9): 10563-10571. DOI: 10.1364/OE.21.010563.
- [9] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of refractive optical elements with two free-form surfaces for generation of prescribed illuminance distribution. *Computer Optics* 2014; 38(3): 435-442.
- [10] Moiseev MA, Byzov EV, Kravchenko SV, Doskolovich LL. Design of LED refractive optics with predetermined balance of ray deflection angles between inner and outer surfaces. *Optics Express* 2015; 23(19): A1140-A1148. DOI: 10.1364/OE.23.0A1140.
- [11] Talpur T, Herkommer A. TIR collimator designs based on point source and extended source methods. *Proc SPIE* 2015; 9626: 962906-962916. DOI: 10.1117/12.2190935.
- [12] Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region. *JOSA A* 2012; 29(9): 1758-1763. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001758.
- [13] Moiseev MA, Doskolovich LL, Borisova KV, Byzov EV. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source. *J Mod Opt* 2013; 60(14): 1100-1106. DOI: 10.1080/09500340.2013.844864.
- [14] Tsai CY. Free-form surface design method for a collimator TIR lens. *JOSA A* 2016; 33(4): 785-792. DOI: 10.1364/JOSAA.33.000785.
- [15] Chen C, Zhang X. Design of optical system for collimating the light of an LED uniformly. *JOSA A* 2014; 31(5): 1118-1125. DOI: 10.1364/JOSAA.31.001118.
- [16] Chen JJ, Lin CT. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens. *Optical Engineering* 2010; 49(9): 093001. DOI: 10.1117/1.3488046.
- [17] Chen JJ, Wang TY, Huang KL, Liu TS, Tsai MD, Lin CT. Freeform lens design for LED collimating illumination. *Optics Express* 2012; 20(10): 10984-10995. DOI: 10.1364/OE.20.010984.
- [18] Jiang J, To S, Lee WB, Cheung B. Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight. *Optik* 2010; 121(19): 1761-1765. DOI: 10.1016/j.ijleo.2009.04.009.
- [19] Wu R, Benitez P, Zhang Y, Minano JC. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design. *Opt Lett* 2014; 39(3): 634-637. DOI: 10.1364/OL.39.000634.
- [20] Byzov EV, Moiseev MA, Doskolovich LL. Method for computation of LED secondary optics for automotive headlight. *Computer Optics* 2014; 38(4): 743-748.

- [21] Byzov EV, Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design method for automotive high-beam LED optics. Proc SPIE 2015; 9629: 96290I. DOI: 10.1117/12.2191510.
- [22] Ma D, Feng Z, Liang R. Freeform illumination lens design using composite ray mapping. Appl Opt 2015; 54(3): 498-503. DOI: 10.1364/AO.54.000498.
- [23] Olikier VI, Kirkilionis M, Krömker S, Rannacher R, Tomi F. Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics. In book: Olikier VI, Kirkilionis M, Krömker S, Rannacher R, Tomi F, eds. Trends in Nonlinear Analysis. Springer; 2003: 197-224.
- [24] Kochengin SA, Olikier VI. Computational algorithms for constructing reflectors. Computing and Visualization in Science 2003; 6: 15-21.
- [25] Keys RG. Cubic convolution interpolation for digital image processing. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing 1981; 29(6): 1153-1160. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163711.
-

Authors' information

Kseniya Valeryevna Andreeva (b. 1992) graduated with honors (2016) from Samara National Research University, majoring in Applied Mathematics and Physics. She is a co-author of 13 scientific papers. E-mail: ksen.borisova@gmail.com.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Candidate's degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher at the Diffractive Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a SPIE-member. He is a co-author of 23 scientific papers and 7 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics. E-mail: mikhail@smr.ru.

Sergey Vasilyevich Kravchenko (b. 1991) graduated with honors (2014) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is a co-author of 18 scientific papers. E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

The information about author **Leonid Leonidovich Doskolovich** you can find on page 450 of this issue.

Received June 22, 2016. The final version – August 10, 2016.
