

РАСЧЁТ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВУМЯ РАБОЧИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСВЕЩЁННОСТИ

Кравченко С.В., Моисеев М.А., Досколович Л.Л.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

Аннотация

В данной работе представлен новый оптимизационный метод для расчёта преломляющих оптических элементов светодиодов с двумя поверхностями свободной формы. Процедура расчёта включает в себя два этапа: построение начального приближения и последующую оптимизацию параметров внешней поверхности оптического элемента из условия формирования заданного распределения освещённости. В качестве примера рассчитан оптический элемент, формирующий равномерно освещённую прямоугольную область с угловым размером $60^\circ \times 40^\circ$ при протяжённом ламбертовском источнике излучения 1×1 мм. Световая эффективность оптического элемента составила около 88,5 %, а среднеквадратичное отклонение сформированного распределения освещённости от заданного – менее 8,5 %.

Ключевые слова: светодиод, поверхность свободной формы, оптимизационный метод, распределение освещённости, неизображающая оптика, расчёт оптической поверхности.

Введение

В настоящее время светодиодные источники излучения играют всё более и более важную роль на мировом рынке осветительных устройств. Их применение в светотехнических системах предполагает использование так называемой вторичной (формирующей) оптики – преломляющих или отражающих оптических элементов, перераспределяющих излучённый источником световой поток в заданную область пространства. Расчёт преломляющих поверхностей оптического элемента, формирующего требуемое световое распределение, является крайне сложной задачей. Даже при точечном источнике излучения данная задача сводится к решению дифференциального уравнения в частных производных типа Монжа–Ампера [1], аналитические решения которого известны только для частных случаев с радиальной или цилиндрической симметрией [2–6].

При формировании сложных световых распределений, не обладающих осевой симметрией (прямоугольной, шестиугольной, эллиптической формы и т. д.), используются оптические элементы с асимметричными поверхностями (в англ. лит. *free-form surface*, дословный перевод – поверхности свободной формы). Для расчёта таких поверхностей, как правило, применяются оптимизационные или итерационные методы [7–10]. Оптические элементы с одной преломляющей поверхностью свободной формы [7–10] обеспечивают хорошие рабочие характеристики при создании световых распределений со средними и большими угловыми размерами (от 80° и более). При формировании узкоугольных световых пучков использование таких оптических элементов является неэффективным, так как поворот боковых лучей от источника единственной преломляющей поверхностью осуществляется с большими френелевскими потерями (например, при падении луча на границу раздела сред полиметилметакрилат-воздух под углом $41,4^\circ$ угол его поворота составляет около 40° , а фре-

нелевские потери – более 45%). Для увеличения световой эффективности оптического элемента в его конструкции могут использоваться две преломляющие поверхности свободной формы [11–16], каждая из которых выполняет часть работы по повороту луча.

В работе [11] предложен так называемый «метод декартовых овалов», позволяющий рассчитывать кусочно-гладкую поверхность, формирующую распределение освещённости в виде набора точек при точечном источнике излучения. Метод [11] не может быть применён при решении задач формирования непрерывных световых распределений, так как это приводит к огромной вычислительной сложности данного решения. Несмотря на то, что метод [11] учитывает наличие нескольких преломляющих поверхностей в оптической системе, он позволяет рассчитать только одну из них. В работе [12] представлен метод, позволяющий рассчитывать две преломляющие поверхности из условия преобразования двух падающих волновых фронтов. Так как в работе [12] не формализован процесс приведения требований светового распределения к требованиям формирования заданного волнового фронта, использование метода [12] при расчёте оптических элементов для светотехнических систем является затруднительным.

В работах [13, 14] авторы рассматривают общий подход к расчёту оптических элементов с двумя поверхностями свободной формы для формирования заданных распределений освещённости при точечном источнике излучения. Решение задачи нахождения формы поверхностей в [13, 14] сводится к расчёту функции лучевого соответствия, описывающей связь координат луча от источника излучения с координатами луча в выходной плоскости, и последующему восстановлению поверхностей оптического элемента, реализующих заданное лучевое соответствие. К сожалению, в работах [13, 14] представлено слишком общее описание метода расчёта в рамках нескольких абзацев с одной формулой. Приведённое описание не

позволяет повторить представленные результаты расчётов оптических элементов для формирования постоянного распределения освещённости в областях квадратной или прямоугольной формы. Кроме того, в работах [13, 14] авторы не приводят значения световой эффективности рассчитанных оптических элементов (доли излучённого светового потока, попадающего в заданную область), а также не исследуют работу рассчитанных оптических элементов для случая протяжённых источников излучения.

Таким образом, задача расчёта эффективных оптических элементов для светодиодов с двумя рабочими поверхностями свободной формы остаётся по-прежнему актуальной.

В данной работе представлен новый оптимизационный метод, позволяющий рассчитывать оптические элементы с двумя рабочими преломляющими поверхностями из условия формирования требуемого распределения освещённости. В качестве примера в работе приведены результаты расчёта оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещённости в прямоугольной области с угловыми размерами $60^\circ \times 40^\circ$. Световая эффективность полученного решения при протяжённом источнике 1×1 мм составляет 88,5 %, а среднеквадратичное отклонение формируемого распределения освещённости от равномерного – 8,4 %.

1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу расчёта преломляющего оптического элемента с двумя поверхностями свободной формы из условия формирования заданного распределения освещённости. Пусть в начале координат находится точечный источник излучения (светодиод) с заданным распределением интенсивности $I(\varphi, \psi)$, где $\varphi \in [0, 2\pi]$, $\psi \in [0, \pi/2]$ – углы сферической системы координат. Источник излучает в полусферу $z > 0$. В некоторой плоскости $z=f$ необходимо сформировать требуемое распределение освещённости.

Для решения данной задачи предлагается использовать преломляющий оптический элемент, расположенный непосредственно над светодиодом. Оптический элемент имеет относительный показатель преломления n и ограничен двумя поверхностями свободной формы. Внутренняя поверхность задаётся функцией радиус-вектора $\mathbf{R}(\varphi, \psi)$, а внешняя определяется скалярной функцией $l(\varphi, \psi)$, характеризующей расстояние от точки $\mathbf{R}(\varphi, \psi)$ внутренней поверхности до точки $\mathbf{M}(\varphi, \psi)$ внешней поверхности вдоль вышедшего из источника и преломлённого на первой поверхности луча \mathbf{a}_1 (рис. 1). Таким образом, задача расчёта оптического элемента сводится к нахождению двух скалярных функций $R(\varphi, \psi)$ и $l(\varphi, \psi)$ из условия формирования в выходной плоскости $z=f$ заданного распределения освещённости $E_0(u, v)$, где u, v – локальные декартовы координаты.

2. Расчёт поверхностей свободной формы

Предлагаемый оптимизационный метод расчёта поверхностей оптического элемента, формирующего

требуемое распределение освещённости, включает в себя два этапа: расчёт начального приближения путём численного решения системы линейных дифференциальных уравнений и оптимизацию параметров внешней поверхности оптического элемента с использованием полученных аналитических выражений для расчёта формируемого распределения освещённости.

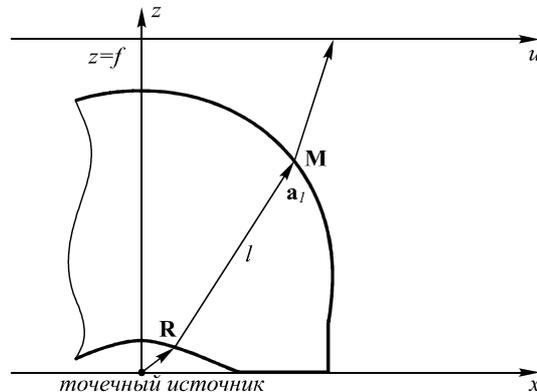


Рис. 1. Взаимное расположение источника, оптического элемента и выходной плоскости

2.1. Расчёт начального приближения

Результат работы оптимизационного метода существенно зависит от выбранного начального приближения. В данной работе для расчёта начальных поверхностей оптического элемента предлагается получить один или несколько его профилей путём решения соответствующих осесимметричных задач с помощью метода [5], а затем построить внутреннюю и внешнюю поверхности, содержащие полученные профили, параметризовав их с помощью бикубического сплайна [17].

Рассмотрим построение начального приближения на примере расчёта оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещённости в прямоугольной области со сторонами 1200 мм и 750 мм на расстоянии 1000 мм, что соответствует угловым размерам $60^\circ \times 40^\circ$. С помощью метода [5] решим две осесимметричные задачи расчёта преломляющих поверхностей, формирующих равномерно освещённые круглые области с диаметрами 1200 мм и 750 мм (рис. 2а, б). Высота внутренней части обоих рассчитанных профилей на рис. 2а, б составляет 0,8 мм, а высота внешней части – 8 мм, что позволяет расположить их так, как показано на рис. 2в. На рис. 2г приведены построенные начальные поверхности, содержащие рассчитанные профили и параметризованные бикубическими сплайнами.

На рис. 3 показано промоделированное в коммерческом программном обеспечении TracePro® [18] распределение освещённости, формируемое оптическим элементом на рис. 2г при точечном ламбертовском источнике излучения для 1 000 000 лучей. Полученное световое пятно имеет размеры, близкие к размерам требуемой освещаемой области. При этом распределение освещённости не является равномерным, что подтверждает необходимость дальнейшей оптимизации параметров оптического элемента.

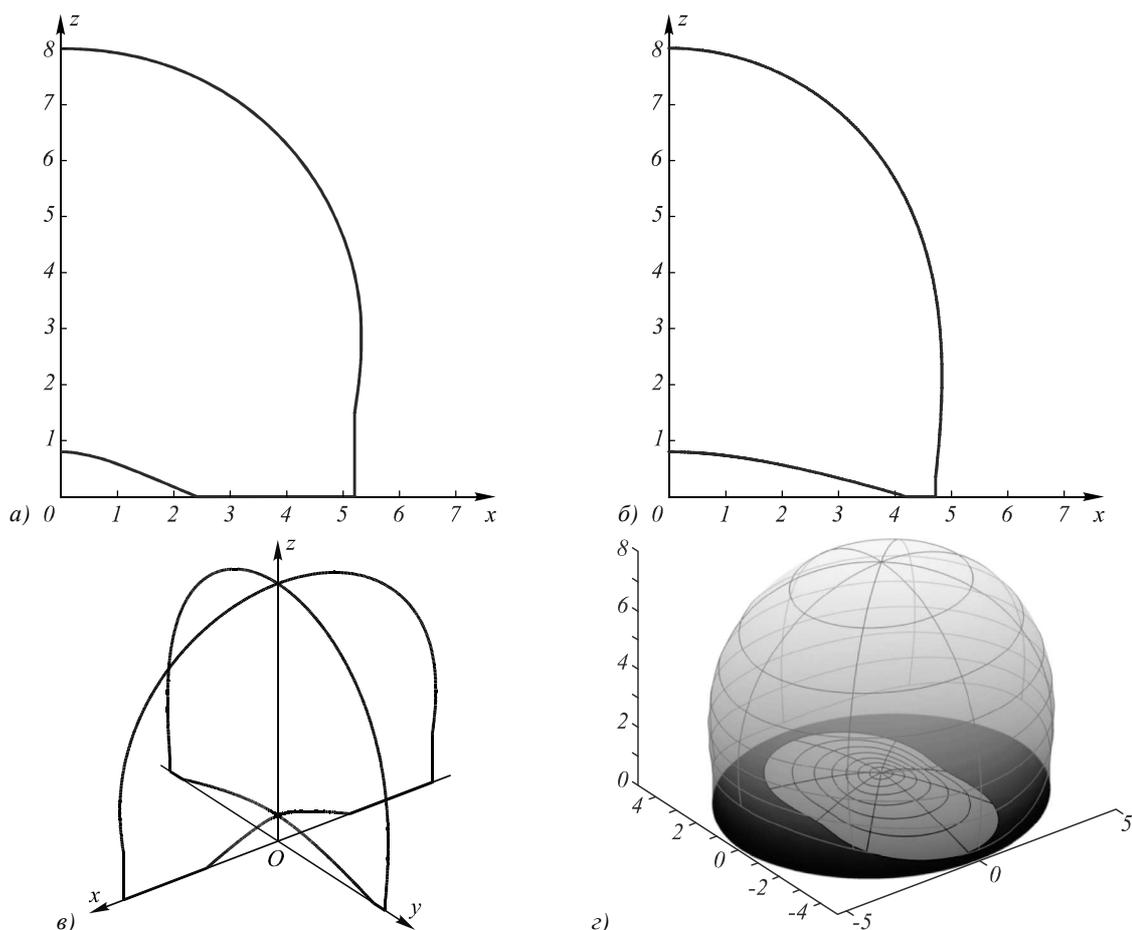


Рис. 2. Профили оптических элементов, формирующих равномерно освещённые круги с диаметрами 1200 мм и 750 мм соответственно (а–б); совмещённые профили (в); начальное приближение оптического элемента (г)

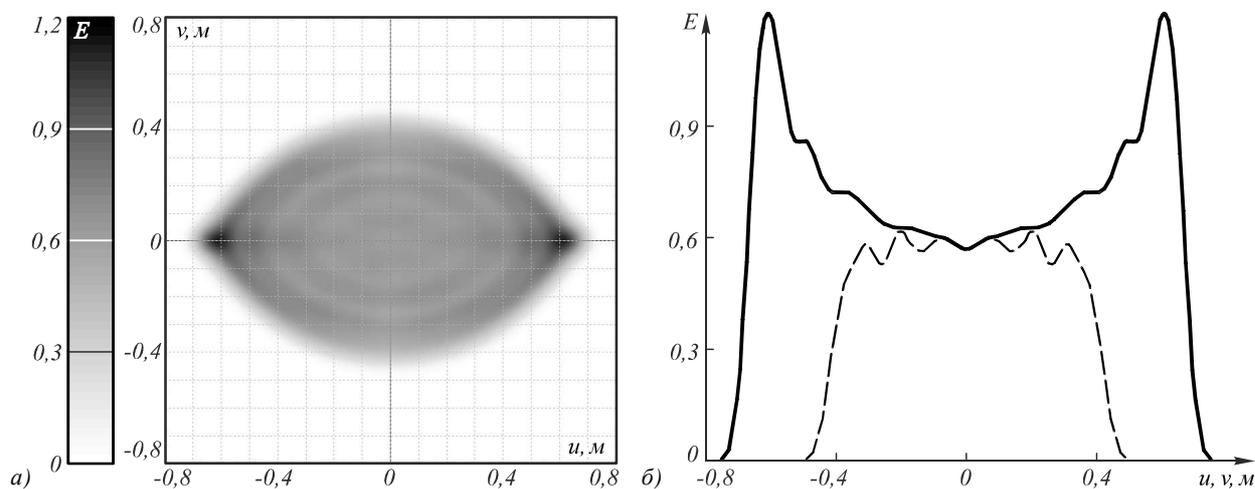


Рис. 3. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рис. 2г) при точечном источнике излучения: полутоновое распределение (а); сечения распределения освещённости: непрерывная линия – $v=0$, штриховая линия – $u=0$ (б)

2.2. Оптимизация параметров оптического элемента

Как было отмечено в предыдущем пункте, распределение освещённости, формируемое начальным приближением оптического элемента, как правило, отличается от требуемого. Для формирования заданного светового распределения необходимо выполнить

оптимизацию параметров его внешней поверхности. В качестве функции невязки в данной работе предлагается использовать среднеквадратичное отклонение (СКО) формируемого распределения освещённости от требуемого:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{c}) &= \|E(u, v; \mathbf{c}) - E_0(u, v)\| = \\ &= \sqrt{\frac{1}{\|S\|} \iint_S (E_0(u, v) - E(u, v; \mathbf{c}))^2 du dv} \rightarrow \min_{\mathbf{c}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\|S\|$ – площадь области S , в которой необходимо сформировать заданное распределение освещённости $E_0(u, v)$, $E(u, v; \mathbf{c})$ – распределение освещённости, формируемое преломляющим оптическим элементом, а \mathbf{c} – вектор, содержащий параметры бикубического сплайна его внешней поверхности.

Для решения задачи оптимизации (1) (задачи минимизации функции многих переменных) предлагается использовать метод последовательного квадратичного программирования, относящийся к семейству градиентных методов и реализованный в стандартной библиотеке Matlab® (пакет Optimization Toolbox).

Решение задачи оптимизации (1) требует эффективного метода расчёта распределения освещённости $E(u, v; \mathbf{c})$, формируемого оптическим элементом при заданном векторе параметров \mathbf{c} . Аналитическое выражение для расчёта формируемого оптическим элементом распределения освещённости $E(u, v; \mathbf{c})$ было получено в работах [9,10] и имеет следующий вид:

$$E(u, v; \mathbf{c}) = \iint_{\varphi, \psi} I(\varphi, \psi) \sin \psi \delta_{\sigma}(u - \tilde{u}, v - \tilde{v}) d\varphi d\psi, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta_{\sigma}(u - \tilde{u}, v - \tilde{v}) = \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp\left(-\frac{(u - \tilde{u})^2 + (v - \tilde{v})^2}{\sigma^2}\right).$$

Функции $\tilde{u} = \tilde{u}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$, $\tilde{v} = \tilde{v}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$, входящие в выражение (2), представляют координаты пересечения выходной плоскости и преломлённого оптическим элементом луча, вышедшего в направлении φ, ψ . Предложенное определение поверхностей оптического элемента с помощью скалярных функций $R(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ и $l(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ позволяет получить аналитические выражения для вычисления координат $\tilde{u}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$, $\tilde{v}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$.

Введём единичный вектор $\mathbf{a}_0(\varphi, \psi) = \mathbf{R}(\varphi, \psi) / R(\varphi, \psi)$, соответствующий направлению выходящего из источника луча. Согласно закону Снеллиуса, единичный вектор направления луча, преломлённого на внутренней поверхности, имеет вид [19]:

$$\mathbf{a}_1 = n\mathbf{a}_0 + \left(\sqrt{1 - [n\mathbf{a}_0, \mathbf{n}_1]^2} - n(\mathbf{a}_0, \mathbf{n}_1) \right) \mathbf{n}_1, \quad (3)$$

$$\text{где } \mathbf{n}_1(\varphi, \psi) = \left[\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \psi} \right] / \left\| \left[\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \psi} \right] \right\| - \text{единичный вектор}$$

нормали внутренней поверхности. Так как точка $\mathbf{R}(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ является началом преломлённого луча, а вектор $\mathbf{a}_1(\varphi, \psi)$ определяет его направление, то, зная функцию $l(\varphi, \psi; \mathbf{c})$, несложно получить координаты точки пересечения луча со второй преломляющей поверхностью в виде: $\mathbf{r}(\varphi, \psi) = \mathbf{R}(\varphi, \psi) + l(\varphi, \psi) \mathbf{a}_1(\varphi, \psi)$.

Для того чтобы найти единичный вектор направления луча $\mathbf{a}_2(\varphi, \psi)$, вышедшего из оптического элемента, необходимо снова воспользоваться законом Снеллиуса:

$$\mathbf{a}_2 = n\mathbf{a}_1 + \left(\sqrt{1 - [n\mathbf{a}_1, \mathbf{n}_2]^2} - n(\mathbf{a}_1, \mathbf{n}_2) \right) \mathbf{n}_2, \quad (4)$$

где $\mathbf{n}_2(\varphi, \psi) = \left[\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \psi} \right] / \left\| \left[\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}, \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \psi} \right] \right\|$ – единичный вектор нормали внешней поверхности оптического элемента.

Вычислив направление луча $\mathbf{a}_2(\varphi, \psi)$ и расстояние до выходной плоскости, запишем координаты пересечения луча и выходной плоскости:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(\varphi, \psi; \mathbf{c}) &= R(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{0x} + l(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{1x} + da_{2x}, \\ \tilde{v}(\varphi, \psi; \mathbf{c}) &= R(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{0y} + l(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{1y} + da_{2y}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$d(\varphi, \psi; \mathbf{c}) = \frac{f - R(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{0z} - l(\varphi, \psi; \mathbf{c}) a_{1z}}{a_{2z}}.$$

Выражения (2) и (5) позволяют аналитически рассчитать распределение освещённости, формируемое оптическим элементом с вектором параметров \mathbf{c} , и исключают необходимость выполнения ресурсоёмкой процедуры трассировки лучей, что существенно сокращает время решения прямой задачи при оптимизации поверхности.

3. Пример расчёта оптического элемента

Предложенный выше метод расчёта оптических элементов с двумя рабочими поверхностями свободной формы был реализован в среде программирования Matlab® [20]. Проанализируем работоспособность данного метода для задачи, предложенной в пункте 2.1.

На рис. 4 приведена модель оптического элемента, представленного на рис. 2з, после оптимизации его внешней поверхности с помощью выражений (1)–(5).

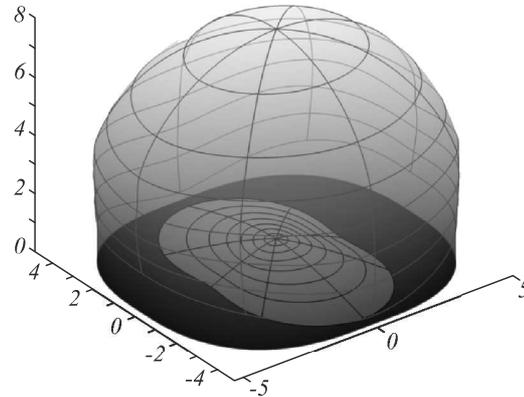


Рис. 4. Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольной области угловым размером 60°×40°

Количество параметров оптимизации с учётом свойств симметрии задачи составило 56. После выполнения 93 итераций функции fmincon, входящей в пакет Optimization Toolbox (метод последовательного квадратичного программирования), оптимизационный процесс был прерван. Функция невязки (1) была вычислена 5618 раз, а время оптимизации составило 205 секунд на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-3770K CPU @ 3,50 GHz. Таким образом, среднее

время вычисления функции ошибки, включающее трассировку 10000 лучей, составило 0,04 секунды.

Распределение освещённости, формируемое в выходной плоскости оптическим элементом на рис. 4, было промоделировано в коммерческом программном обеспечении TrasePro® при точечном ламбертовском источнике излучения (рис. 5).

Световая эффективность (доля вышедшего из источника светового потока, попавшего в выходную плоскость) оптического элемента после оптимизации составила 89,1 %, а относительное среднеквадратичное отклонение формируемого распределения от равномерного – 7,5 %.

Выражения для расчёта формируемого распределения освещённости (2)–(5) были получены в приближении точечного источника излучения. Тем не менее, рассчитанный оптический элемент на рис. 4 сохраняет хорошие рабочие характеристики и при протяжённом источнике. Распределение освещён-

сти, формируемое оптическим элементом на рис. 4 при квадратном ламбертовском источнике излучения 1×1 мм, приведено на рис. 6. Световая эффективность решения при протяжённом источнике составляет около 88,5 %, а среднеквадратичное отклонение формируемого светового распределения от равномерного – менее 8,4 %.

Для сравнения продемонстрируем характеристики оптического элемента с единственной преломляющей рабочей поверхностью свободной формы для этой же задачи. На рис. 7, 8 приведены поверхность оптического элемента, рассчитанного с помощью метода [10], и формируемое им распределение освещённости. Несмотря на то, что относительное среднеквадратичное отклонение светового распределения от равномерного составляет всего лишь 12,6 %, световая эффективность данного решения равна 62,0 %, что на 26,5 % ниже по сравнению с эффективностью оптического элемента на рис. 4.

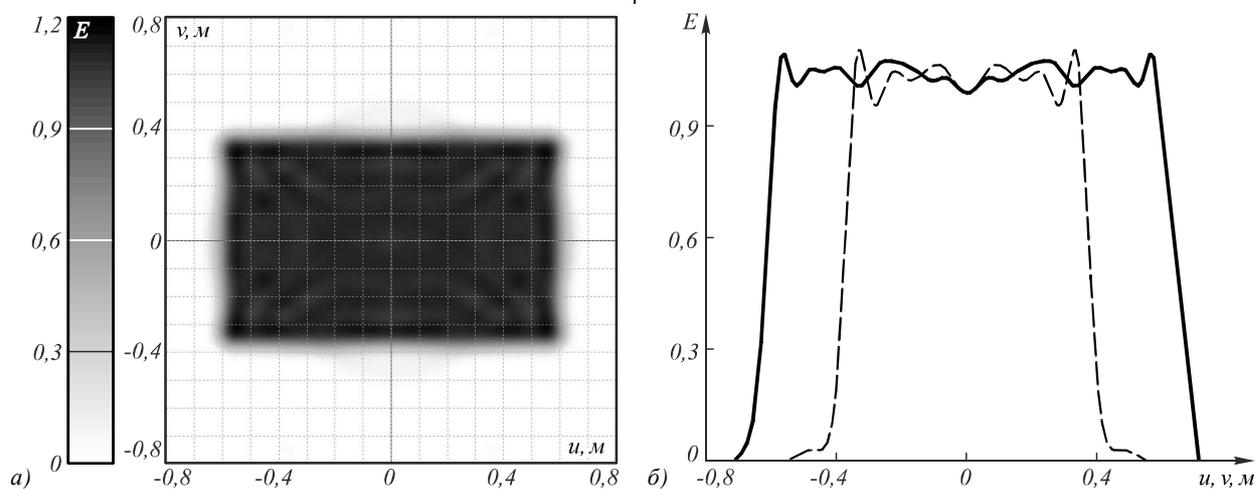


Рис. 5. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рис. 4) при точечном источнике излучения: полутоновое распределение (а); сечения распределения освещённости: непрерывная линия – $v=0$, штриховая линия – $u=0$ (б)

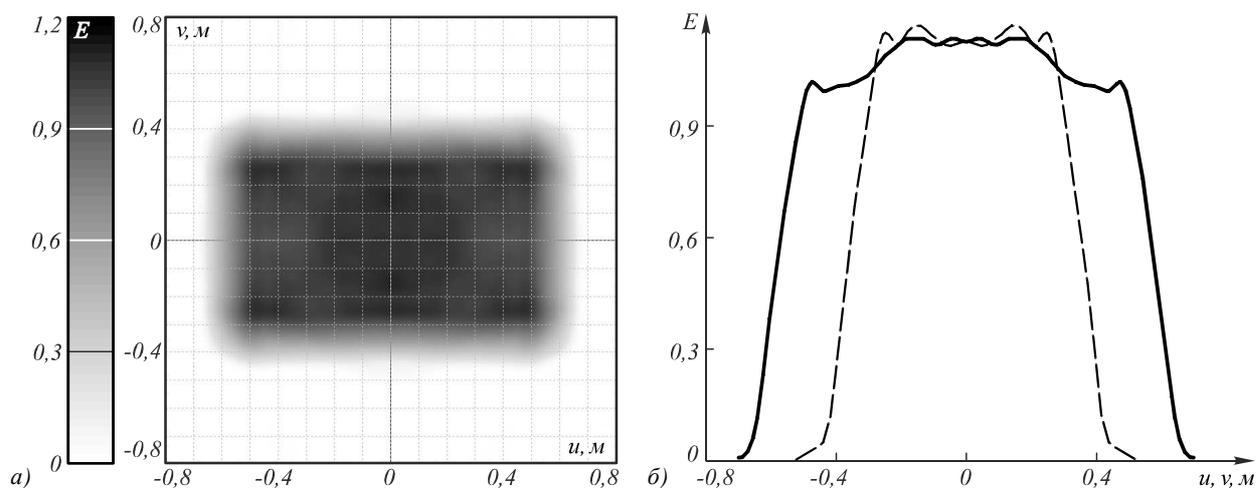


Рис. 6. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рис. 4) при протяжённом источнике излучения 1×1 мм: полутоновое распределение (а); сечения распределения освещённости: непрерывная линия – $v=0$, штриховая линия – $u=0$ (б)

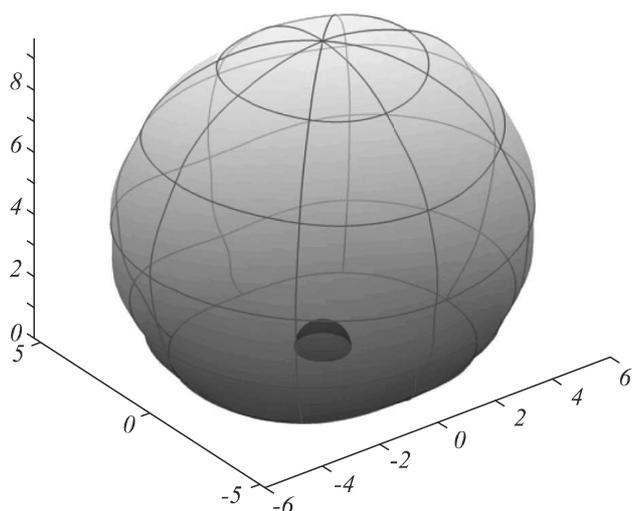


Рис. 7. Оптический элемент с одной рабочей поверхностью, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольной области угловым размером $60^\circ \times 40^\circ$

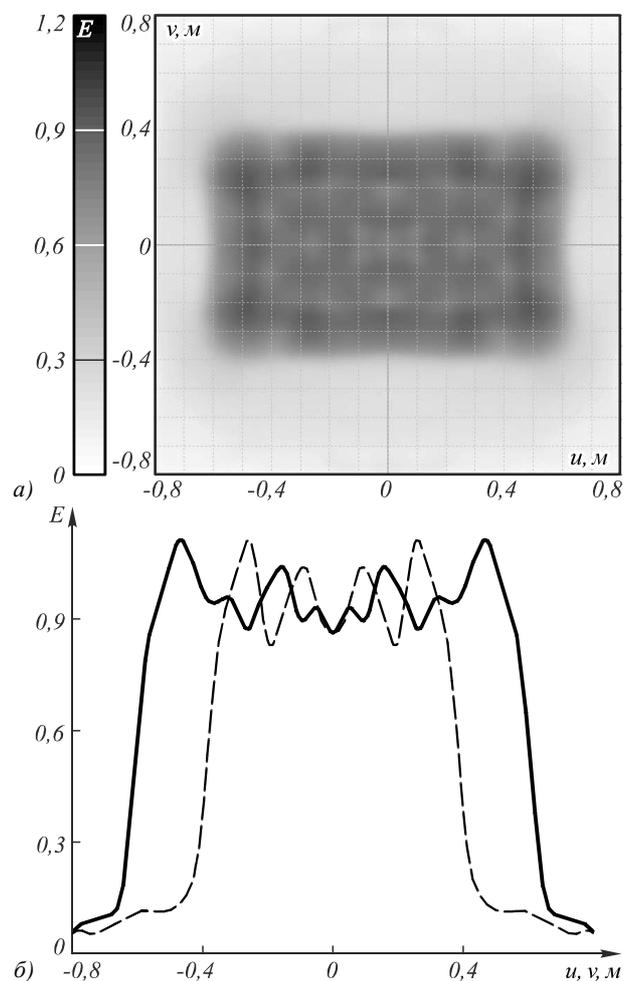


Рис. 8. Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рис. 7) при протяжённом источнике излучения: полутоновое распределение (а); сечения распределения освещённости: непрерывная линия – $v=0$, штриховая линия – $u=0$ (б)

Заключение

В данной работе представлен оптимизационный метод расчёта оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями свободной формы. Метод расчёта оптического элемента состоит из двух этапов: построения начального приближения и оптимизации параметров внешней поверхности оптического элемента из условия формирования заданного распределения освещённости. Выбранное представление поверхностей с помощью двух скалярных функций $R(\varphi, \psi)$ и $l(\varphi, \psi)$ позволяет аналитически рассчитать распределение освещённости в выходной плоскости, что обеспечивает выполнение оптимизационной процедуры за несколько минут.

С помощью разработанного метода был рассчитан и промоделирован оптический элемент, формирующий равномерное распределение в прямоугольной области с угловым размером $60^\circ \times 40^\circ$. Время оптимизации 56 параметров составило 3 минуты 25 секунд. Несмотря на то, что метод расчёта не учитывает конечные размеры источника, рассчитанный оптический элемент демонстрирует отличную работоспособность при использовании его с протяжённым источником излучения – относительное среднеквадратичное отклонение формируемого распределения не превышает 8,4 % от равномерного, а световая эффективность оптического элемента составляет более 88 %.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 14-19-00969.

Литература

1. Guan, P. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X.-J. Wang // Journal of Differential Geometry. – 1998. – Vol. 48, Issue 2. – P. 205-223. – ISSN 0022-040X.
2. Elmer, W.B. Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17, Issue 7. – P. 977-979. – ISSN 0003-6935.
3. Oliker, V.I. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere 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. Досколович, Л.Л. Расчёт радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 201-203.
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. Moiseev, M.A. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / Mikhail A. Moiseev, Leonid L. Doskolovich, Kseniya V. Borisova, Egor V. Byzov // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60, Issue 14. – P. 1100-1106.

7. **Chen, H.-C.** Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light / H.-C. Chen, J.-Y. Lin, H.-Y. Chiu // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 3. – P. 3201-3212.
8. **Lin, K.Ch.** Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources / K.Ch. Lin // *Optical Engineering*. – 2012. – Vol. 51, Issue 4 – P. 043002.
9. **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. – ISSN 0950-0340.
10. **Моисеев, М.А.** Расчёт преломляющего оптического элемента для формирования заданного распределения освещённости при протяжённом источнике излучения / М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 194-200. – ISSN 0134-2452.
11. **Michaelis, D.** Cartesian oval representation of freeform optics illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber, A. Bräuer // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(6). – P. 918-920.
12. **Benitez, P.** Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benitez, J.C. Minano, J. Blen, R. Mohedano, J. Chaves, O. Dross, M. Hernandez, W. Falicoff // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43, Issue 7. – P. 1489-1502.
13. **Bauerle, A.** Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces / A. Bauerle, A. Bruneton, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 13. – P. 14477-14485.
14. **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.
15. **Feng, Z.** Beam shaping system design using double freeform optical surfaces / Z. Feng, L. Huang, M. Gong, G. Jin // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(12). – P. 14728-14735.
16. **Duerr, F.** Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics / F. Duerr, Y. Meuret, H. Thienpont // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(S3). – P. A401-A411.
17. http://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic_interpolation.
18. <http://www.lambdaires.com/tracepro>.
19. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
20. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
4. **Doskolovich, L.L.** Designing radially symmetric refractive surfaces with regard for Fresnel losses / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // *Computer Optics*. – 2008. – Vol. 32(1). – P. 201-203. – (In Russian).
5. **Kravchenko, S.V.** Design of axis-symmetrical optical element with two aspherical surfaces for generation of prescribed irradiance distribution / S.V. Kravchenko, M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2011. – Vol. 35(4). – P. 467-472. – (In Russian).
6. **Moiseev, M.A.** Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / Mikhail A. Moiseev, Leonid L. Doskolovich, Kseniya V. Borisova, Egor V. Byzov // *Journal of Modern Optics*. – 2013. – Vol. 60, Issue 14. – P. 1100-1106.
7. **Chen, H.-C.** Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light / H.-C. Chen, J.-Y. Lin, H.-Y. Chiu // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 3. – P. 3201-3212.
8. **Lin, K.Ch.** Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources / K.Ch. Lin // *Optical Engineering*. – 2012. – Vol. 51, Issue 4 – P. 043002.
9. **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. – ISSN 0950-0340.
10. **Moiseev, M.A.** Design of optical element producing required irradiance distribution for extended light source/ M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich // *Computer Optics*. – 2010. – Vol. 34(2) – P. 194–200. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
11. **Michaelis, D.** Cartesian oval representation of freeform optics illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber, A. Bräuer // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(6). – P. 918-920.
12. **Benitez, P.** Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benitez, J.C. Minano, J. Blen, R. Mohedano, J. Chaves, O. Dross, M. Hernandez, W. Falicoff // *Optical Engineering*. – 2004. – Vol. 43, Issue 7. – P. 1489-1502.
13. **Bauerle, A.** Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces / A. Bauerle, A. Bruneton, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 13. – P. 14477-14485.
14. **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.
15. **Feng, Z.** Beam shaping system design using double freeform optical surfaces / Z. Feng, L. Huang, M. Gong, G. Jin // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(12). – P. 14728-14735.
16. **Duerr, F.** Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics / F. Duerr, Y. Meuret, H. Thienpont // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(S3). – P. A401-A411.
17. http://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic_interpolation.
18. <http://www.lambdaires.com/tracepro>.
19. **Born, M.** Principles of optics / M. Born, E. Wolf. – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – 952 p.
20. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

References

1. **Guan, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X.-J. Wang // *Journal of Differential Geometry*. – 1998. – Vol. 48, Issue 2. – P. 205-223. – ISSN 0022-040X.
2. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // *Applied Optics*. – 1978. – Vol. 17, Issue 7. – P. 977-979. – ISSN 0003-6935.
3. **Oliker, V.I.** Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere 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.

DESIGN OF REFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS WITH TWO FREE-FORM SURFACES FOR GENERATION OF PRESCRIBED ILLUMINANCE DISTRIBUTION

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

Abstract

New optimization method for design of refractive optical elements with two free-form surfaces is presented. Algorithm of design consists of two parts: generation of initial approximation and the further optimization of outer surface parameters from condition of producing prescribed illuminance distribution. As an example the optical element generating uniformly illuminated rectangular region with angular sizes $60^\circ \times 40^\circ$ with extended 1x1 mm Lambertian light source is computed. The light efficacy of optical element is about 88,5% and the relative root-mean-square error of generated illuminance distribution is less than 8,5 %.

Key words: light emitting diode, free-form surface, optimization method, illuminance distribution, non-imaging optics, optical surface design.

Сведения об авторах

Кравченко Сергей Васильевич, 1991 года рождения. В 2008 году окончил с серебряной медалью МОУ Лицей №51 городского округа Тольятти и поступил на первый курс факультета информатики Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика».

E-mail: sergey.kravchenko91@gmail.com.

Sergey Vasilyevich Kravchenko (b. 1991) granted from school №51 in Togliatti with silver medal in 2008. Currently he is the student of Samara Space Aerospace University, Informatics department, majoring in Applied Mathematics and Physics.



Моисеев Михаил Александрович, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) 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 23 статьи и 7 авторских свидетельств. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm>.

E-mail: mikhail@smr.ru.

Homepage: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/MoiseevM.htm>.

Mikhail Alexandrovich Moiseev (b. 1986) graduated with honors (2008) from Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Philosophy Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher in Diffraction Optics laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a *SPIE* member. He is co-author of 23 scientific papers and 7 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

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

Поступила в редакцию 13 августа 2014 г.