

ГРАДИЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ СПЛАЙН-ПОВЕРХНОСТИ ИЗ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ

Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев

*Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва*

Аннотация

Представлен градиентный метод расчета поверхности преломляющего оптического элемента, формирующего заданное распределение освещенности от точечного источника излучения. Форма преломляющей поверхности описывается в сферических координатах бикубическим сплайном. Приведены результаты расчета оптических элементов, создающих равномерное распределение освещенности в эллиптической и прямоугольной областях. Световая эффективность оптических элементов составляет порядка 89 %, неравномерность освещенности – менее 9 %.

Ключевые слова: преломляющая поверхность, распределение освещенности, бикубический сплайн, градиентный метод.

Введение

Формирование требуемого распределения освещенности в заданной области является актуальным в задачах проектирования светотехнических устройств автомобилей [1-3], систем подсветки LCD-мониторов [4,5], кинопроекторов и т.п.

При проектировании оптических головок светодиодов задача состоит в расчете внешней преломляющей поверхности головки светодиода из условия формирования заданного распределения освещенности в некоторой плоскости. При точечном (компактном) источнике излучения указанная задача сводится к решению нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных типа уравнения Монже-Ампера [6-9]. Решение данных уравнений является сложной задачей. Аналитические решения известны только для частных случаев поверхностей с радиальной или цилиндрической симметрией [10-17]. Для расчета сложных, не радиально-симметричных оптических поверхностей (в англоязычной литературе – free-form) используются оптимизационные итерационные процедуры, требующие больших временных и вычислительных затрат [18-26].

Работоспособность итерационных процедур [18-26] является недостаточной. Задача расчета преломляющей (отражающей) оптической поверхности для формирования постоянной освещенности в прямоугольной области с большим угловым размером по-прежнему является актуальной.

В работах [19,20] рассмотрен метод расчета преломляющих поверхностей на основе численного решения уравнения Монже-Ампера. Метод позволяет создавать сложные распределения освещенности, например, в виде букв. В расчетном примере буквы формируются на равномерно засвеченном фоне. Это связано с требованием непрерывности заданного распределения освещенности. Освещенность фона составляет порядка 30 % от освещенности в зоне букв, что существенно снижает световую эффективность. Примеры расчета преломляющих поверхностей для формирования практически важных прямоугольной и эллиптической областей в [19,20] не рассмотрены.

В работах [23-25] представлены градиентные методы расчета преломляющей поверхности для формирования заданного распределения освещенности при точечном и протяженном источниках излучения. Методы основаны на оптимизации функции эйконала, заданной в прилегающей к оптическому элементу плоскости и последующем восстановлении преломляющей поверхности по распределению эйконала. Приведенные в работах [23-25] примеры показывают хорошую работоспособность метода для источников, излучающих в небольшие телесные углы (порядка $\pi/5 - \pi/2$ стерадиан). Как правило, реальный источник излучает в полусферу (светодиоды) или сферу (лампы накаливания). Для эффективного использования излучения источника необходимо перераспределять весь его световой поток в освещаемую область.

Наиболее развитый метод расчета преломляющей поверхности представлен в работе [26]. Расчет преломляющей поверхности в [26] основан на решении нелинейной системы уравнений. Метод требует задания функции лучевого соответствия между угловыми координатами исходящих из источника лучей и координатами лучей, попадающих в область регистрации. В работе [26] не предложен общий способ задания функции лучевого соответствия, что ограничивает область применения метода. Тем не менее, метод [26] позволяет формировать заданное распределение освещенности в прямоугольнике и правильно восьмиугольнике с высокой эффективностью и равномерностью.

При проектировании систем подсветки дисплеев большую роль играет толщина системы, определяемая как расстояние от источника излучения до освещаемой области. При уменьшении толщины системы увеличиваются угловые размеры освещаемой области. При этом возрастают френелевские потери. На преломляющей поверхности могут появляться зоны, в которых происходит полное внутреннее отражение. В расчетных примерах, приведенных в [20,23-26], отношение размера освещаемой области к толщине оптической системы не превышает 2,8,

что соответствует максимальному угловому размеру освещаемой области 110° .

В данной работе предложен градиентный метод расчета оптических элементов, применимый для произвольной формы освещаемой области. Метод основан на представлении преломляющей поверхности в виде бикубического сплайна и последующей оптимизации его параметров. В отличие от методов [20,23-26], данный метод учитывает френелевские потери при преломлении, что позволяет увеличить угловые размеры освещаемой области. На примерах расчета показано, что метод позволяет создавать равномерно освещаемые области в виде эллипса и прямоугольника с угловыми размерами 150° и более. При этом доля светового потока от источника излучения, попадающая в заданную область, составляет порядка 90 %, а неравномерность распределения освещенности не превышает 10 %.

1. Постановка задачи

Рассмотрим геометрию оптической системы. Преломляющий оптический элемент ограничен поверхностью \mathbf{r} и имеет показатель преломления n_1 (рис. 1). В начале координат внутри оптического элемента расположен точечный источник излучения. Источник излучает в полусферу $z > 0$. Вне элемента находится среда с показателем преломления n_2 (рис. 1).

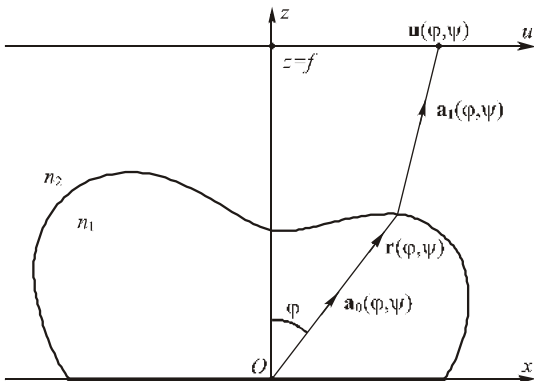


Рис.1. Схема расположения оптического элемента и выходной плоскости

Задача заключается в определении формы преломляющей поверхности \mathbf{r} из условия формирования в выходной плоскости $z = f$ заданного распределения освещенности $E_0(\mathbf{u})$, где $\mathbf{u} = (u, v)$ – декартовы координаты при $z = f$.

Пусть преломляющая поверхность описывается функцией радиус-вектора $\mathbf{r}(\phi, \psi)$ в виде:

$$\mathbf{r}(\phi, \psi) = \begin{pmatrix} x(\phi, \psi) \\ y(\phi, \psi) \\ z(\phi, \psi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(\phi, \psi) \sin \phi \cos \psi \\ r(\phi, \psi) \sin \phi \sin \psi \\ r(\phi, \psi) \cos \phi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ϕ и ψ – углы сферической системы координат. Предполагается, что функция $r(\phi, \psi)$ является па-

раметризованной и ее вид полностью описывается набором свободных параметров $c_i, i \in 1, 2, \dots, N$:

$$r(\phi, \psi) = r(\phi, \psi; c_1, c_2, \dots, c_N). \quad (2)$$

В таком случае задачу расчета преломляющей поверхности (2) можно рассматривать как задачу оптимизации с параметрами c_i .

В данной работе использовалось представление функции $r(\phi, \psi)$ в виде бикубического сплайна. Его параметрами являются значения радиус-вектора $r(\phi, \psi)$ и его производных $\partial r / \partial \phi, \partial r / \partial \psi, \partial^2 r / \partial \phi \partial \psi$ в узлах сетки сплайна [27]. Пример сплайновой сетки изображен на рис. 2.

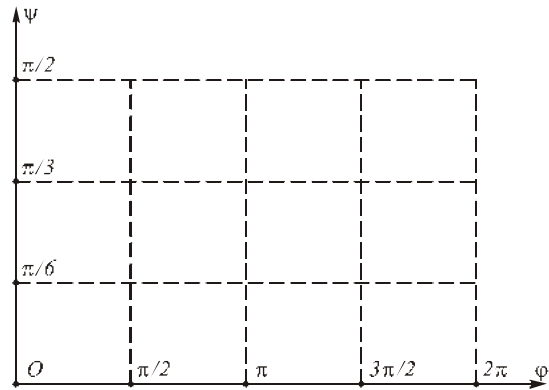


Рис.2. Пример сетки сплайна в координатах ϕ, ψ

Для приведенного примера разбиения количество узлов сетки равно 20, что соответствует 80 параметрам оптимизации (20 значений функции, 40 значений первых производных и 20 значений смешанных производных). Необходимо отметить, что функция и производные сплайнов должны совпадать при $\phi = 0, \phi = 2\pi$. Это обусловлено 2π -периодичностью функции $r(\phi, \psi)$ по переменной ϕ . Все точки $r(\phi, 0)$ соответствуют одной и той же точке, являющейся вершиной поверхности. Значения функции в этой точке и производных по переменной ϕ должны быть одинаковыми.

При формировании симметричных распределений освещенности, соответствующих прямоугольной или эллиптической области, функцию $r(\phi, \psi)$ достаточно определить в первом квадранте. Указанные свойства периодичности и симметрии позволяют существенно уменьшить число параметров оптимизации.

2. Расчет распределения освещенности на выходной плоскости

Расчет формы поверхности оптического элемента из условия формирования заданного распределения освещенности является обратной задачей. Рассмотрим предварительно решение прямой задачи, состоящей в расчете распределения освещенности при заданной поверхности $r(\phi, \psi)$.

Введем единичный вектор

$$\mathbf{a}_0(\varphi, \psi) = \frac{\mathbf{r}(\varphi, \psi)}{r(\varphi, \psi)}, \quad (3)$$

определяющий направление луча от источника к точке $\mathbf{r}(\varphi, \psi)$ поверхности. Согласно закону Снеллиуса, единичный вектор преломленного луча \mathbf{a}_1 можно записать в виде суперпозиции единичного вектора падающего луча \mathbf{a}_0 и единичного вектора нормали к поверхности \mathbf{n} [28]:

$$\mathbf{a}_1(\varphi, \psi) = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{a}_0(\varphi, \psi) + \left(\sqrt{1 - \left[\frac{n_1}{n_2} \mathbf{a}_0, \mathbf{n} \right]^2} - \frac{n_1}{n_2} (\mathbf{a}_0, \mathbf{n}) \right) \mathbf{n}(\varphi, \psi). \quad (4)$$

Используя выражения (1)–(4), несложно получить зависимости декартовых координат (u, v) точки на выходной плоскости, в которую попадет преломленный луч, от сферических координат (φ, ψ) исходящего луча:

$$\begin{aligned} u(\varphi, \psi) &= r(\varphi, \psi) \sin \varphi \cos \psi + a_{1x}(\varphi, \psi) l(\varphi, \psi), \\ v(\varphi, \psi) &= r(\varphi, \psi) \sin \varphi \sin \psi + a_{1y}(\varphi, \psi) l(\varphi, \psi), \end{aligned} \quad (5)$$

где $l(\varphi, \psi) = (f - r(\varphi, \psi) \cos \varphi) / a_{1z}(\varphi, \psi)$ – расстояние, пройденное преломленным лучом до выходной плоскости, $z = f$.

Введем элемент телесного угла с вершиной в начале координат (в точечном источнике)

$$d\Omega = \frac{(\mathbf{a}_0(\varphi, \psi), \mathbf{N}(\varphi, \psi)) d\varphi d\psi}{r^2(\varphi, \psi)},$$

где $\mathbf{N}(\varphi, \psi) = \frac{\partial \mathbf{r}(\varphi, \psi)}{\partial \varphi} \times \frac{\partial \mathbf{r}(\varphi, \psi)}{\partial \psi}$ – вектор нормали к поверхности. Согласно закону сохранения светового потока, световой поток $d\Phi$, излученный источником в элемент телесного угла $d\Omega$, равен световому потоку, попавшему на элемент площади $dudv$ в выходной плоскости:

$$\begin{aligned} d\Phi &= I(\varphi, \psi) T(\varphi, \psi) \frac{(\mathbf{a}_0(\varphi, \psi), \mathbf{N}(\varphi, \psi)) d\varphi d\psi}{r^2(\varphi, \psi)} = \\ &= E(\mathbf{u}) dudv, \end{aligned} \quad (6)$$

где $I(\varphi, \psi)$ – интенсивность точечного источника, $T(\varphi, \psi)$ – коэффициент пропускания, учитывающий френелевские потери [16,17,28]. Коэффициент пропускания вычисляется как для плоской границы раздела двух сред с показателями преломления n_1, n_2 . В качестве границы раздела рассматривается касательная плоскость к поверхности $\mathbf{r}(\varphi, \psi)$. Согласно

выражению (6), освещенность на выходной плоскости имеет вид

$$E(\mathbf{u}) = I(\varphi, \psi) T(\varphi, \psi) \frac{(a_{0z}(\varphi, \psi), \mathbf{N}(\varphi, \psi))}{r^2(\varphi, \psi) J((\varphi, \psi))}, \quad (7)$$

где $J(\varphi, \psi) = \frac{\partial u(\varphi, \psi)}{\partial \varphi} \frac{\partial v(\varphi, \psi)}{\partial \psi} - \frac{\partial u(\varphi, \psi)}{\partial \psi} \frac{\partial v(\varphi, \psi)}{\partial \varphi}$ – якобиан перехода от сферических координат (φ, ψ) к декартовым координатам (u, v) на плоскости $z = f$.

Выражение (7) неудобно для вычислений, так как его значение не определено в случаях, когда якобиан $J(\varphi, \psi)$ равен нулю (например, в каустике). Используя свойства дельта-функции Дирака, выражение (7) перепишем в виде [25]:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{u}) &= \iint_D I(\varphi, \psi) T(\varphi, \psi) \frac{(\mathbf{a}_0, \mathbf{N}(\varphi, \psi))}{r^2(\varphi, \psi)} \times \\ &\times \delta(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi)) d\varphi d\psi, \end{aligned} \quad (8)$$

где вектор $\mathbf{u}(\varphi, \psi)$ определяется из выражения (5), а область интегрирования $D = \{(\varphi, \psi) : \varphi \in [0, \pi/2], \psi \in [0, 2\pi]\}$. Для численных расчетов аппроксимируем дельта-функцию функцией Гаусса:

$$\begin{aligned} \delta_\sigma(u, v) &= \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\sigma^2}\right), \\ \lim_{\sigma \rightarrow 0} \delta_\sigma(u, v) &= \delta(u, v). \end{aligned} \quad (9)$$

В этом случае выражение для освещенности (8) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{u}) &= \iint_D I(\varphi, \psi) T(\varphi, \psi) \frac{(\mathbf{a}_0, \mathbf{N}(\varphi, \psi))}{r^2(\varphi, \psi)} \times \\ &\times \delta_\sigma(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi)) d\varphi d\psi. \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) представляет собой усредненное распределение освещенности на выходной плоскости, причем радиус усреднения определяется параметром σ функции Гаусса (9).

3. Градиентный метод

В случае представления преломляющей поверхности в виде (1)–(2), освещенность на выходной плоскости определяется параметрами поверхности

$$E(\mathbf{u}) = E(\mathbf{u}; \mathbf{c}),$$

где \mathbf{c} – вектор, состоящий из параметров сплайнов $c_i, i = 1, 2, \dots, N$. Введем функцию ошибки

$$\varepsilon(\mathbf{c}) = \sqrt{\frac{1}{\|S\|} \iint_S (E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) - E_0(\mathbf{u}))^2 dudv}, \quad (11)$$

где $\|S\|$ – площадь области S , в которой задано требуемое распределение освещенности $E_0(\mathbf{u})$. Функция (11) представляет среднеквадратичное отклонение (СКО) распределения освещенности, формируемого при векторе параметров \mathbf{c} , от заданного распределения. Задачу расчета поверхности оптического элемента $r(\varphi, \psi; \mathbf{c})$ сформулируем как задачу минимизации функции ошибки (11). Для решения этой задачи был использован градиентный метод [29]. При использовании градиентных методов вектор \mathbf{c} ищется как предел последовательности, определяемой рекуррентной формулой

$$\mathbf{c}_{n+1} = \mathbf{c}_n - \nabla \varepsilon(\mathbf{c}) \Big|_{\mathbf{c}_n} \cdot t, \tag{12}$$

где $\nabla \varepsilon(\mathbf{c}) \Big|_{\mathbf{c}_n}$ – градиент функции ошибки $\varepsilon(\mathbf{c})$ в точке \mathbf{c}_n , t – шаг метода. С учетом выражений (10)–(11), частные производные функции ошибки равны

$$\frac{\partial \varepsilon(\mathbf{c})}{\partial c_i} = 2 \iint_S (E(\mathbf{c}; \mathbf{u}) - E_0(\mathbf{u})) \frac{\partial E(\mathbf{c}; \mathbf{u})}{\partial c_i} dudv, \tag{13}$$

$$\frac{\partial E(\mathbf{c}; \mathbf{u})}{\partial c_i} = \iint_D I(\varphi, \psi) \frac{\partial \Psi(\mathbf{c}; \varphi, \psi)}{\partial c_i} d\varphi d\psi, \tag{14}$$

где

$$\Psi(\varphi, \psi; \mathbf{c}) = T(\varphi, \psi) \frac{(\mathbf{a}_0, \mathbf{N}(\mathbf{c}; \varphi, \psi))}{r^2(\mathbf{c}; \varphi, \psi)} \times \delta_\sigma(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, \psi)).$$

4. Примеры расчета оптических элементов

Приведенный в данной работе метод расчета оптических элементов был реализован в программной среде Matlab с использованием оптимизационного пакета Optimization Toolbox.

На рис. 3а изображена рассчитанная поверхность оптического элемента для формирования равномерного распределения освещенности в эллипсе. Расчет поверхности проводился для ламбертовского источника при следующих параметрах: показатель преломления материала оптического элемента $n_1 = 1,5$, расстояние от источника до выходной плоскости $f = 15$ мм, полуоси эллипса – 50 мм и 25 мм.

В качестве начального приближения для преломляющей поверхности использовался оптический элемент, формирующий равномерную освещенность в круге [16]. Для оптимизации использовалось разбиение преломляющей поверхности на 40 сплайнов, что, с учетом свойств симметрии, соответствует 42 параметрам оптимизации. Суммарное время оптимизации на компьютере с процессором Intel Core2 6600 составило 5,5 часов.

На рис. 3б приведены результаты моделирования распределения освещенности, формируемого оптическим элементом на рис. 3а. Расчет освещенности производился с помощью специализированного программного продукта TracePro [30].

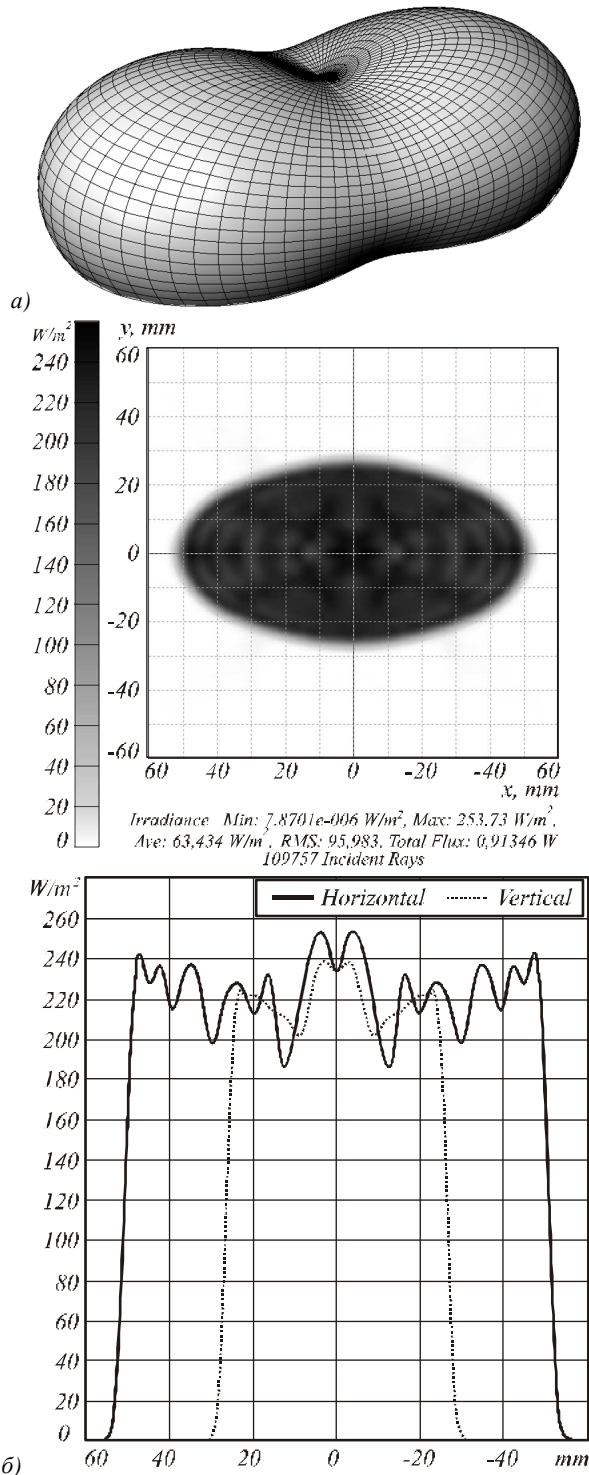


Рис.3. Результаты расчета оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещенности в правильном шестиугольнике; а) – преломляющий элемент, б) – распределение освещенности на выходной плоскости

Для характеристики качества формируемого распределения освещенности используем значение относительного среднеквадратичного отклонения (ОСКО)

$$\delta = \frac{1}{E_0} \sqrt{\frac{1}{\|S\|} \iint_S (E(\mathbf{u}; \mathbf{c}) - E_0)^2 dudv}$$

и значение энергетической эффективности E_{eff} . Энергетическую эффективность E_{eff} определим как долю светового потока, излучаемого источником и попадающего в заданную область на выходной плоскости. Энергетическая эффективность рассчитанного оптического элемента составляет более 89 %, ОСКО распределения освещенности от равномерного – менее 8 %. Отношение длины большой оси эллипса на выходной плоскости к толщине оптической системы составляет порядка 6,7. Размеры полученного оптического элемента – 12,6×7,2×3,8 мм.

На рис. 4а изображена рассчитанная поверхность оптического элемента для формирования равномерного распределения освещенности в прямоугольнике. Размеры прямоугольника 88×44 мм, остальные параметры оптической системы такие же, как и в предыдущем случае. Начальным приближением для преломляющей поверхности являлся оптический элемент, формирующий распределение освещенности в виде эллипса. Суммарное время оптимизации – 2,7 часа.

На рис. 4б приведены результаты моделирования распределения освещенности, формируемого оптическим элементом на рис. 4а. Энергетическая эффективность рассчитанного оптического элемента, как и в предыдущих случаях, составляет более 89 %. ОСКО распределения освещенности от равномерного – менее 9 %. Отношение диагонали прямоугольника на выходной плоскости к толщине оптической системы составляет порядка 6,5. Размеры полученного оптического элемента – 12,6×7,4×3,8 мм.

Расчетные примеры показывают, что метод применим для создания оптических элементов с угловыми размерами освещаемых областей порядка 140°–150°. При этом отношение размера освещаемой области к расстоянию от источника до выходной плоскости составляет около 6,5–7. Энергетические потери возникают только за счет френелевских отражений и составляют порядка 10 %.

Заключение

Разработан градиентный метод расчета оптических элементов для формирования сложных, не радиально-симметричных распределений освещенности. Рассчитаны оптические элементы для освещения эллиптической (с полуосями 50 и 25 мм) и прямоугольной (с размерами 88×44 мм) областей при расстоянии от источника до выходной плоскости 15 мм. Энергетическая эффективность составляет порядка 89 %, СКО распределения освещенности – менее 9 %. Метод применим для расчета оптических элементов, формирующих освещенные области с большими угловыми размерами (порядка 150° и более).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке фонда «Фундаментальные исследования и высшее обра-

зование» (RUXO-014-SA-06), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9), грантов РФФИ № 07-07-97601-р_офи, 07-01-96602-р_поволжье_а, 07-07-91580-АСП_а, 08-07-99005-р_офи и Фонда содействия отечественной науке.

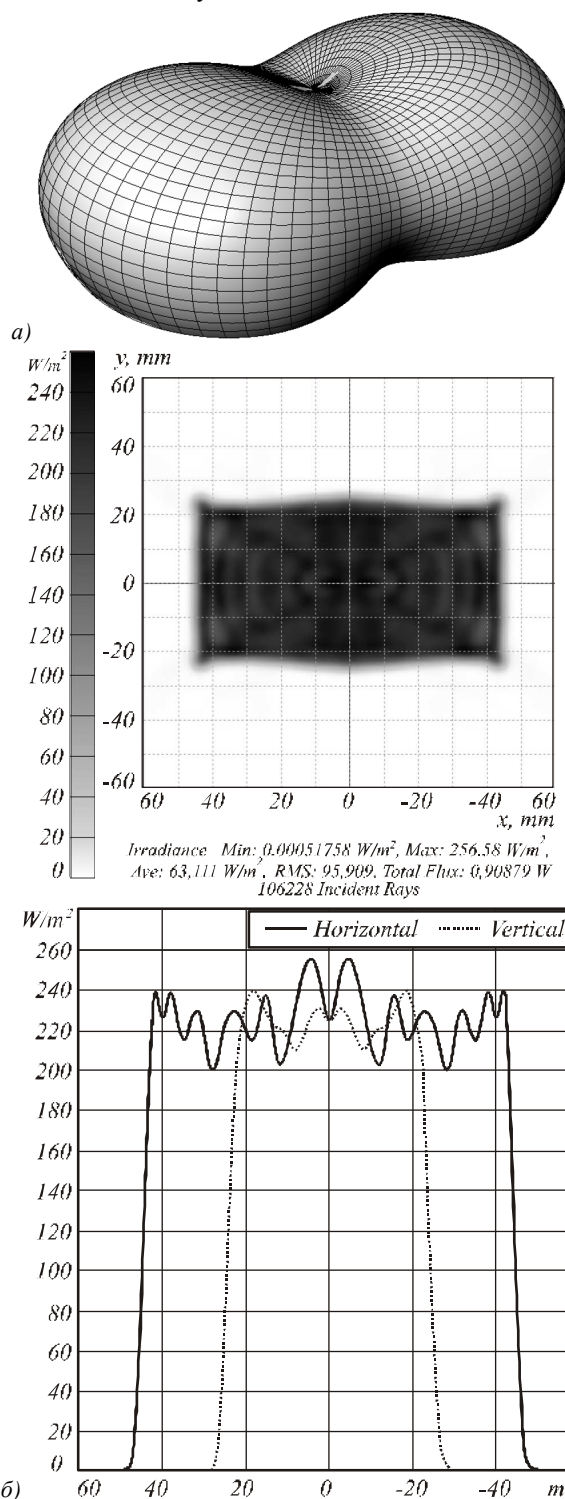


Рис.4. Результаты расчета оптического элемента, формирующего равномерное распределение освещенности в правильном шестиугольнике; а) – преломляющий элемент, б) – распределение освещенности на выходной плоскости

Литература

1. **Muschaweck, J.** Tailored LED lowbeam headlamps / J. Muschaweck // *Laser+Photonik*, 2004. – p. 26–28.
2. **Benitez, P.** Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps / P. Benitez, J. [and other] // *Proc. SPIE*, -2006. – Vol. 6342(2).
3. **Benitez, P.** Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps / P. Benitez, [and other] // *Optics Express*, -2006. – Vol. 14(26). – P. 13014–13020.
4. **Sung-II, Ch.** Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system / L. Baik-Kyu, [and other] // *Optics Letters*, -2006. – Vol. 31(20). – P. 3016–3018.
5. **Jui-Wen, P.** Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector / W. Chih-Ming, [and other] // *Optics Express*, -2007. – Vol. 15(17). – P. 10483–10491.
6. **Pengfei, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / G. Pengfei, W. Xu-Jia // *J. Differential Geom.*, -1998. – Vol. 48(2). – P. 205–223.
7. **Oliker, V.I.** Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem / I. Knowles, [and other] // *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math*, -1987. – P. 361–374.
8. **Oliker, V.** Geometry and Nonlinear Partial Differential Equations / V. Oliker, A. Treibergs – AMS Bookstore, -1992. – P.154.
9. **Oliker, V.** Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics / E. Newman, V.I. Oliker // *J. Opt. Soc. Am. A*, -1995. – Vol. 12(4). – P. 784–793.
10. **Elmer, W.B.** Optical design of reflectors. Part 2 / W.B. Elmer // *Applied Optics*, -1978. – Vol. 17(7). – P. 977–979.
11. **Elmer, W.B.** The Optical Design of Reflectors / W.B. Elmer – N.Y.: Wiley, -1980. – P.290.
12. **Kusch, O.** Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices / O. Kusch – M.: "ASLAN" Publishing House, -1993. – P.192.
13. **Hicks, R.A.** Designing a mirror to realize a given projection / R.A. Hicks // *J. Opt. Soc. Am. A*, -2005. – Vol. 22(2). – P. 323–330.
14. **Досколович, Л.Л.** Расчет формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Оптический журнал*, -2005. – Т. 4. – С. 34–37.
15. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S. Bernard // *J. Mod. Opt.*, -2007. – Vol. 54(4). – P. 589–597.
16. **Моисеев, М.А.** Расчет радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учетом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика*, -2008. – Т. 32, -№ 2. – С. 201–203.
17. **Моисеев, М.А.** Расчет преломляющего оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика*, -2008. – Т. 32, -№ 4. – С. 366–369.
18. **Bortz, J.** Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target / J. Bortz, N. Shatz, D. Pitou // *Proc. SPIE*, -2000. – Vol. 4092. – P. 130–138.
19. **Ries, H.** Tailoring freeform lenses for illumination / J. Muschaweck, H. Ries // *Proc. SPIE*, -2001. – Vol. 4442. – P. 43–50.
20. **Ries, H.** Tailored freeform optical surfaces / J. Muschaweck, H. Ries // *J. Opt. Soc. A. A*, -2002. – Vol. 19(3). – P. 590–595.
21. **Jacobson, B.A.** Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source / B.A. Jacobson, R.D. Gendelbach // *Proc. SPIE*, -2001. – Vol. 4446. – P. 130–138.
22. **Parkyn, B.** Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm / B. Parkyn, D. Pelka // *Proc. SPIE*, -2006. – Vol. 6338.
23. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод решения задачи фокусировки в двумерную область при протяженном источнике / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович // *Компьютерная оптика*, -2007. – Т. 31, -№ 3. – С. 20–26.
24. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета эйконала для фокусировки в заданную область / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Автометрия*, -2007. – № 1. – С. 98–106.
25. **Белоусов, А.А.** Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности / А.А. Белоусов, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Оптический журнал*, -2008. – Т. 75, -№ 3. – С. 30–35.
26. **Yi, D.** Freeform LED lens for uniform illumination / G. Pei-fu, L. Xu, D. Yi, Zh. Zhen-rong // *Optics Express*, -2008. – Vol. 16(17). – P. 12958–12966.
27. **Boor, C. De** A Practical Guide to Splines / Carl De Boor – N.Y.: Springer, -2001. – P.346.
28. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф – М.: Наука, -1973. – 720 с.
29. **Gill, Ph.E.** Practical Optimization / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright – N.Y.: Springer, -1981. – P.401.
30. http://lambdare.com/software_products/tracepro/

В редакцию поступила 02.03.2009г.

GRADIENT CALCULATION OF REFRACTING B-SPLINE SURFACE GENERATING PRESCRIBED IRRADIANCE DISTRIBUTION.

*Doskolovich Leonid Leonidovich (leading researcher, e-mail: leonid@smr.ru),
Moiseev Mikhail Alexandrovich (engineer, e-mail: mikhail@smr.ru)
S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,
Image Processing Systems Institute of the RAS*

Abstract

The article is devoted to the gradient method of refractive surface calculation. The radius vector of refractive surface is described by the B-spline function in spherical coordinates. The optical elements generating uniform irradiance distribution in elliptical and rectangular areas are calculated. Energy effectiveness of the optical elements is about 89 %, nonuniformity of irradiance – less than 9 %.

Key words: refracting surface, irradiance distribution, bicubic spline, gradient method.

Citation: Doskolovich LL, Moiseev MA. Gradient calculation of refracting B-spline surface generating prescribed irradiance distribution. *Computer Optics* 2009; 33(1): 37-42.

Acknowledgements: The work was supported by the Foundation "Basic Research and Higher education-set" (RUXO-014-SA-06), the grant of the President of the Russian Federation under delay leading scientific schools (NSH-3086.2008.9), RFBR grants № 07-07-97601-r_ofi, 07-01-96602-r_povolzhe_a, 07-07-91580-ASTP_A, 08-07-99005-r_ofi and Russian Science Support Foundation.

References

- [1] Muschaweck J. Tailored LED lowbeam headlamps. *Laser+Photonik* 2004; 2: 26–8.
 - [2] Cvetkovic A, Dross O, Chaves J, Benitez P, Minano JC, Mohedano R. Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps. *Proc. SPIE* 2006; 6342(2).
 - [3] Cvetkovic A, Dross O, Chaves J, Benitez P, Minano JC, Mohedano R. Etendue Preserving Mixing and Projection Optics for High Brightness LEDs Applied to Automotive Headlamps. *Optics Express* 2006; 14(26): 13014-204.
 - [4] Chang SI, Yoon JB, Kim H, Kim JJ, Lee BK, Shin DH. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system. *Optics Letters* 2006; 31(20): 3016-18.
 - [5] Pan JW, Wang CM, Lan HC, Sun WS, Chang JY. Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector. *Optics Express* 2007; 15(17): 10483–91.
 - [6] Guan P, Wang XJ. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics. *J. Differential Geom.* 1998; 48(2): 205–23.
 - [7] Oliker V, Waltman P. Radially symmetric solutions of a Monge-Ampere equation arising in the reflector mapping problem. *Proceedings of the UAB International Conference on Differential Equations and Mathematical Physics, Lecture Notes in Math* 1987; 361-74.
 - [8] Oliker V, Treibergs A. *Geometry and Nonlinear Partial Differential Equations*. Providence: AMS Bookstore; 1992
 - [9] Newman E, Oliker VI. Determining the intensities produced by reflected and refracted wave fronts in geometrical optics. *J. Opt. Soc. Am. A* 1995; 12(4): 784–93.
 - [10] Elmer WB. Optical design of reflectors. Part 2. *Applied Optics* 1978; 17(7): 977–9.
 - [11] Elmer WB. *The Optical Design of Reflectors*. N.Y.: Wiley; 1980.
 - [12] Kusch, O. *Computer-aided optical design of illumination and irradiating devices*. M.: "ASLAN" Publishing House; 1993.
 - [13] Hicks RA. Designing a mirror to realize a given projection. *J. Opt. Soc. Am. A* 2005; 22(2): 323–30.
 - [14] Doskolovich LL, Kharitonov SI. Calculating the surface shape of mirrors for shaping an image in form of a line. *Journal of Optical Technology* 2005; 4: 34–7.
 - [15] Doskolovich LL, Kazansky NL, Bernard S. Designing a mirror to form a lineshaped directivity diagram. *J. Mod. Opt.* 2007; 54(4): 589–97.
 - [16] Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of radial-symmetric refractive surfaces taking into account Fresnel losses. [In Russian] *Computer Optics* 2008; 32(2): 201–3.
 - [17] Doskolovich LL, Moiseev MA. Design of refractive optical element generating the line-shaped directivity diagram. [In Russian] *Computer Optics* 2008; 32(4): 366–9.
 - [18] Bortz J, Shatz N, Pitou D. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target. *Proc. SPIE* 2000; 4092: 130–8.
 - [19] Muschaweck J, Ries H. Tailoring freeform lenses for illumination. *Proc. SPIE* 2001; 4442: 43–50.
 - [20] Muschaweck J, Ries H. Tailored freeform optical surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A* 2002; 19(3): 590–5.
 - [21] Jacobson BA, Gendelbach RD. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source. *Proc. SPIE* 2001; 4446: 130–8.
 - [22] Parkyn B, Pelka D. Free-form illumination lens designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm. *Proc. SPIE* 2006; 6338.
 - [23] Belousov AA, Doskolovich LL. A gradient method for solving light focusing problem from extended source in two-dimensional region. [In Russian] *Computer Optics* 2007; 31(3): 20–6.
 - [24] Belousov AA, Doskolovich LL, Kharitonov SI. A gradient method of computation eikonal function for focusing in prescribed region. [In Russian] *Avtometriya* 2007; 43(1): 98-106.
-

-
- [25] Belousov AA, Doskolovich LL, Kharitonov SI. A gradient method of designing optical elements for forming a specified irradiance on curved surface. *Journal of Optical Technology* 2008; 75(3): 161–5.
- [26] Ding Y, Liu X, Zheng ZR, Gu PF. Freeform LED lens for uniform illumination. *Optics Express* 2008; 16(17): 12958–66.
- [27] Boor C. *A Practical Guide to Splines*. N.Y.: Springer; 2001.
- [28] Born M, Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. M.:Nauka, 1973.
- [29] Gill PE, Murray W, Wright MH. *Practical Optimization*. N.Y.: Springer; 1981.
- [30] Optical Design Software TracePro. Source: <<http://www.lambdares.com>>.
-