

РАСЧЕТ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА, ФОРМИРУЮЩЕГО ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ В ВИДЕ ОТРЕЗКА

Л.Л. Досколович¹, М.А. Моисеев²

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Предложена конструкция преломляющего оптического элемента для формирования от компактного источника излучения диаграммы направленности в виде отрезка. Расчет поверхностей оптического элемента сведен к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. Приведены результаты численного моделирования формируемых диаграмм направленности. Энергетическая эффективность оптических элементов составляет ~90 % при угловых размерах диаграмм направленности в 80-180°.

Ключевые слова: геометрическая оптика, оптический элемент, преломляющая поверхность, диаграмма направленности, полное внутреннее отражение.

Введение

Формирование заданных диаграмм направленности (ДН) является актуальным для задач лазерной оптики, радиофизики и светотехники. Задача расчета оптического элемента для формирования заданной ДН состоит в определении формы отражающих (или преломляющих) поверхностей элемента при условии, что отраженные (или преломленные) лучи имеют заданные направления. Решение данной задачи сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения типа Монже-Ампера [1,2]. В общем трехмерном случае решение данного уравнения является крайне сложным. Аналитическое решение возможно только в частном случае радиальной симметрии.

Для формирования однопараметрических ДН разработан ряд методов. В работах [3-5] приведено общее решение задачи расчета зеркала для формирования ДН в виде линии при точечном источнике излучения. Наибольшее практическое значение имеет задача формирования ДН в виде отрезка: она является эталонной при формировании сложных ДН, состоящих из набора отрезков. Законченное аналитическое решение этой задачи получено в [6,7]. Расчет преломляющих оптических элементов для формирования ДН в виде линии и отрезка в указанных работах не рассматривался.

В данной работе предложена конструкция преломляющего оптического элемента для формирования ДН в виде отрезка. Расчет оптического элемента сводится к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. Элемент рассчитан на работу с компактным источником излучения (типа светодиода), излучающим в половину полного телесного угла. В элементе используются преломляющие поверхности, работающие по принципу полного внутреннего отражения. Это позволяет достичь высокой энергетической эффективности при формировании ДН.

Подобные поверхности широко используются в коллиматорах светодиодов, производимых компанией Philips Lumileds Lighting [8,9]. Предложенная в работе конструкция демонстрирует возможность использования данного подхода при формировании ДН в виде отрезка.

1. Постановка задачи, конструкция элемента

Под ДН в виде отрезка понимается ДН, заданная векторной функцией одного аргумента в виде [6,7]

$$\mathbf{p}(\mu) = (0, \sin \mu, \cos \mu), \quad \mu \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}], \quad (1)$$

где μ_{\max} – параметр, определяющий размеры ДН. Здесь и далее используется следующая угловая система координат (β, μ) : β – угол между некоторым вектором и плоскостью Oyz , а μ – угол между его проекцией на плоскость Oyz и оптической осью (осью Oz). Вдоль ДН должно быть сформировано заданное распределение интенсивности $I(\mu)$, $\mu \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}]$.

Пусть в начале координат находится точечный (компактный) источник света, излучающий в полусферу $z > 0$. Для формирования ДН (1) предлагается использовать конструкцию оптического элемента, изображенную на рис. 1. Оптический элемент ограничен тремя поверхностями. Внутренняя и боковая поверхности элемента являются цилиндрическими поверхностями, полученными вращением профиля, лежащего в плоскости Oxz , вокруг оси Ox (рис. 2).

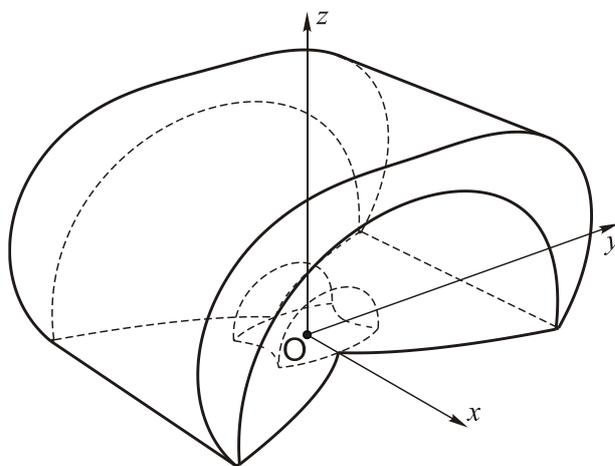


Рис. 1. Общий вид оптического элемента

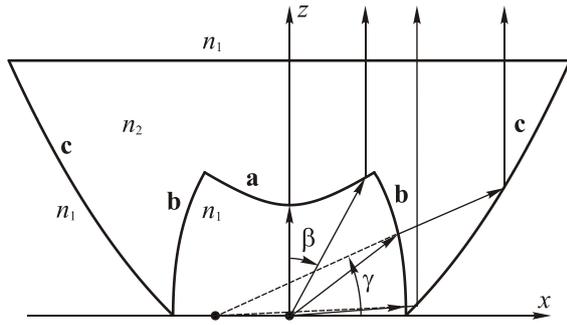


Рис. 2. Схема сечения центрального профиля оптического элемента плоскостью Oxz .

Внутренняя и боковая поверхности предназначены для преобразования излучения от точечного источника, расположенного в начале координат, в цилиндрический пучок с осью Ox .

Внешняя поверхность является цилиндрической с образующим профилем, расположенным в плоскости Oyz . Внешняя поверхность предназначена для преобразования цилиндрического пучка в ДН (1) и формирования заданного распределения интенсивности $I(\mu)$.

Профиль внутренней поверхности (рис. 2) состоит из трех частей: центральной (a), средней (b) и боковой (c). Центральная часть коллимирует лучи от источника. Средняя часть формирует смещенный мнимый источник, уменьшая угловой размер пучка, падающего на боковую поверхность элемента. Боковая поверхность работает по принципу полного внутреннего отражения и формирует коллимированный пучок, распространяющийся вдоль оси Oz .

Следует отметить, что идея использования профиля, работающего по принципу полного внутреннего отражения, используется в коллиматорах компании Philips Lumileds Lighting [8,9]. Отличием данных коллиматоров является то, что в них используются радиально-симметричные поверхности, полученные вращением профиля на рис. 2 вокруг оси Oz .

2. Расчет оптического элемента, формирующего диаграмму направленности в виде отрезка

Расчет оптического элемента сводится к расчету образующих профилей внутренней, боковой и внешней поверхностей оптического элемента. Центральная часть внутреннего профиля на рис. 2 является поверхностью коллимирующей линзы. Фокус линзы совпадает с источником излучения. Уравнение для длины радиус-вектора центральной части профиля несложно получить из принципа Ферма в виде:

$$r_a(\beta) = r_{0a} \frac{1 - 1/n}{\cos(\beta) - 1/n}, \quad (2)$$

где r_{0a} – расстояние от источника до центра линзы, $n = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления (рис. 2).

При расчете средней части внутреннего профиля также используется принцип Ферма. Так как средняя часть должна создавать мнимый источник излучения, то значение функции эйконала должно быть постоянным на любой окружности с центром в мнимом фокусе. Данное условие имеет вид

$$r_b(\beta) - \frac{1}{n} \sqrt{a^2 + r_b^2(\beta) + 2ar_b(\beta)\sin(\beta)} = \Psi_0, \quad (3)$$

где $r_b(\beta)$ – длина радиус-вектора средней части профиля (рис. 2), a – расстояние от источника до мнимого фокуса. Константа Ψ_0 выбирается в (3) из условия совпадения бокового профиля с центральным в точке стыковки. Согласно (3), расчет $r_b(\beta)$ сводится к решению квадратного уравнения.

Боковая часть внутреннего профиля является параболой, фокус которой совпадает с мнимым источником. Длина радиус-вектора точки параболы относительно точки мнимого фокуса имеет вид:

$$r_c(\gamma) = \frac{2r_{0c}}{1 - \sin(\gamma)}, \quad (4)$$

где r_{0c} – расстояние от мнимого фокуса до нижнего края бокового профиля.

Внешняя поверхность оптического элемента предназначена для перераспределения потока излучения по углу μ . Расчет преломляющих цилиндрических поверхностей рассмотрен в [10]. Дифференциальное уравнение для длины радиус-вектора направляющей внешнего профиля имеет вид [10]:

$$\frac{dr(\mu_0)}{d\mu_0} = -r(\mu_0) \frac{\sin(\mu_0 + \mu(\mu_0))}{(1/n - \cos(\mu_0 + \mu(\mu_0)))}, \quad (5)$$

где μ_0 и μ – угловые координаты луча соответственно до и после прохождения через внешнюю преломляющую поверхность. Функция $\mu = \mu(\mu_0)$ определяется из условия формирования заданного распределения интенсивности $I(\mu)$ на ДН.

Для определения $\mu = \mu(\mu_0)$ необходимо записать закон сохранения светового потока. Для введенных выше координат элемент телесного угла имеет вид

$$d\Omega = \cos(\beta) d\beta d\mu.$$

В таком случае дифференциальная форма закона сохранения светового потока примет вид:

$$\left(\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_0(\beta, \mu_0) \cos(\beta) d\beta \right) d\mu_0 = I(\mu) d\mu, \quad (6)$$

где $I_0(\beta, \mu_0)$ – интенсивность источника излучения, $I(\mu)$ – заданная ДН. Согласно (6), функция $\mu(\mu_0)$ в

(5) определяется из решения следующего дифференциального уравнения

$$\frac{d\mu(\mu_0)}{d\mu_0} = \frac{1}{I(\mu)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_0(\beta, \mu_0) \cos(\beta) d\beta, \quad (7)$$

$$\mu(\pm\pi/2) = \pm\mu_{\max}.$$

В случае ламбертовского источника излучения (для выбранной угловой системы координат его интенсивность $I_0(\beta, \mu_0) = \cos(\mu_0) \cos(\beta)$) уравнение (7) можно решить аналитически:

$$\mu(\mu_0) = \mu_{\max} \sin(\mu_0) / \sin(\mu_{\max}). \quad (8)$$

Таким образом, для ламбертовского источника расчет внешнего профиля сводится к интегрированию обычного дифференциального уравнения, разрешенного относительно производной. Для решения подобных уравнений могут быть использованы стандартные численные процедуры типа метода Рунге-Кутты.

3. Результаты расчета оптических элементов

С помощью предложенного метода был рассчитан оптический элемент, формирующий равномерную ДН с угловым размером 120°. Расчет производился для ламбертовского источника излучения с использованием формул (2)-(5), (8) при параметрах $r_{0a} = 3$ мм, $n = 1,5$. Размеры полученного оптического элемента равны 18x12x22 мм. Моделирование работы проводилось по методу трассировки лучей с использованием специализированной программы по светотехнике TracePro [11]. На рис. 3 приведено расчетное распределение интенсивности, формируемое элементом. Размеры полученной диаграммы направленности в точности совпадают с заданными, что подтверждает правильность использованных расчетных формул.

Для оценки работоспособности элемента с реальным источником излучения типа светодиода был проведен расчет интенсивности для протяженного ламбертовского источника размером 1x1 мм. Продемонстрированная ДН приведена на рис. 4. Рис. 4 показывает, что элемент сохраняет свою работоспособность, а использование размерного источника привело только к уширению ДН.

В таблице 1 приведены значения энергетической эффективности оптических элементов, рассчитанных при различных значениях параметра μ_{\max} . Под энергетической эффективностью понимается доля излученного источником светового потока, прошедшая через оптический элемент. Анализ таблицы 1 показывает, что эффективность оптических элементов превосходит 90 % при угле $\mu_{\max} > 45^\circ$. Для приведенных в таблице случаев среднее квадратичное отклонение интенсивности от постоянного значения не превышает 5 %.

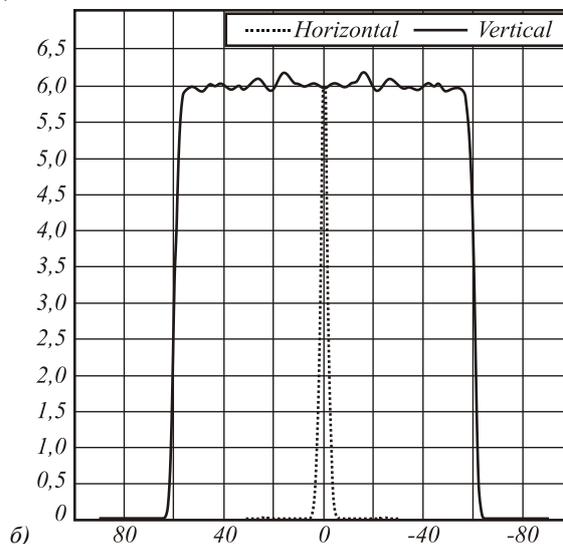
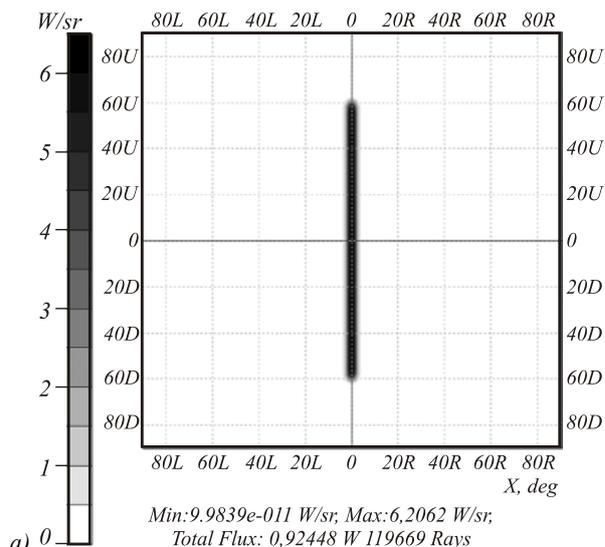
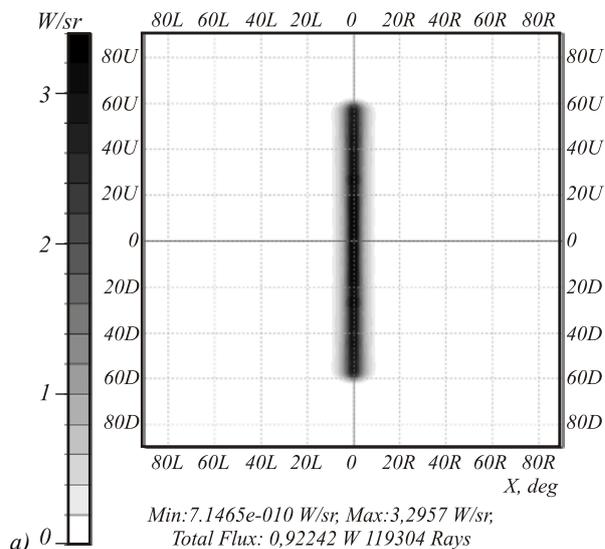


Рис. 3. Расчетная ДН, формируемая элементом при $\mu_{\max} = 60^\circ$ и точечном ламбертовском источнике излучения: а) общее распределение интенсивности, б) зависимость интенсивности от угла для сечений $\beta = 0, \mu = 0$



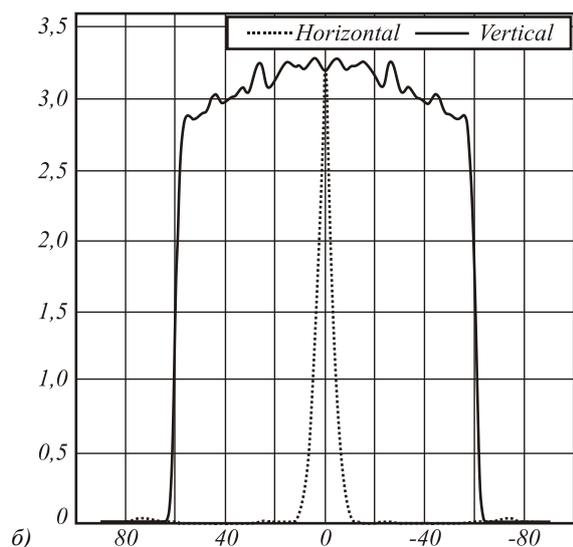


Рис.4. Расчетная ДН, формируемая элементом при $\mu_{\max}=60^\circ$ и ламбертовском источнике излучения с размером 1×1 мм: а) общее распределение интенсивности, б) зависимость интенсивности от угла для сечений $\beta = 0$, $\mu = 0$

Таблица 1

μ_{\max}	Энергетическая эффективность, %
40	88,756
45	90,242
50	91,522
55	91,967
60	92,448
65	92,525
70	92,55
75	92,541
80	92,49
85	92,324
90	91,907

При уменьшении μ_{\max} эффективность оптического элемента снижается за счет увеличения френелевских потерь. Большие френелевские потери возникают в связи с тем, что нижний край внешней цилиндрической поверхности элемента должен поворачивать излучение источника на слишком большой угол $90^\circ - \mu_{\max}$. Результаты моделирования показывают, что при угле $\mu_{\max} < 30^\circ$ эффективность элемента падает более чем на 25 % и использование данного подхода при расчете оптических элементов становится нецелесообразным.

Заключение

Предложена конструкция оптического элемента для формирования ДН в виде отрезка. Получены выражения для расчета поверхностей оптических элементов. Расчет поверхностей сведен к решению тривиальных задач с цилиндрической симметрией. Результаты моделирования формируемых ДН показывают, что значение энергетической эффективности оптического элемента более 90 % при полном размере ДН, превышающем 90° .

Благодарности

Работа выполнена при поддержке программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (RUXO-014-SA-06), Фонда содействия отечественной науке, грантов РФФИ №№07-01-96602, 07-07-91580, 08-07-99005 и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ №НШ-3086-2008.9.

Литература

1. **Muschaweck, J.** Tailored freeform optical surface / J. Muschaweck, H. Ries // J. Opt. Soc. Am. A. 2002. – Vol. 19(3). – P. 590–595.
2. **Guan, P.** On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics / P. Guan, X-J. Wang // J. Differential Geometry. 1998. – Vol. 48(2). – P. 205–223.
3. **Досколович, Л.Л.** Расчет зеркала для формирования однопараметрической диаграммы направленности / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Автометрия, - 2004. – Т. 40, № 5. – С. 104–111.
4. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich [and other] // J. of Mod. Opt. 2005. – Vol. 52(11). – P. 1529–1536.
5. **Досколович, Л.Л.** Расчет формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Оптический журнал. - 2005. – Т. 72, № 4. – С. 34.
6. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S. Bernard // Journal of Modern Optics, -2007. – Vol. 54(4). – p. 589–597.
7. **Досколович, Л.Л.** Расчет зеркала для формирования диаграммы направленности в виде отрезка / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, М.А. Тренина // Автометрия. -2006. – Т. 42(4). – С. 67–75.
8. <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS26.PDF>
9. <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DR02.PDF>
10. **Досколович, Л.Л.** Расчет радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учетом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика, -2008. – Т. 2, № 32.
11. http://www.lambdare.com/software_products/tracepro/

DESIGNING REFRACTING OPTICAL ELEMENT GENERATING LINE-SHAPED DIRECTION DIAGRAM

L.L. Doskolovich¹, M.A. Moiseev²

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia,

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University, Samara, Russia

Abstract

In the article we present the construction of refracting optical element for generating line-shaped direction diagram. Calculation of optical surfaces is converted to nugatory problems with cylindrical symmetry. Presented results of numerical modeling of generated direction diagrams show that energy efficiency of calculated optical elements is about 90 % with angle sizes from 80° to 180°.

Key words: geometrical optics, optical element, refracting surface, direction diagram, total internal reflection.

Citation: Doskolovich LL, Moiseev MA. Designing refracting optical element generating line-shaped direction diagram. *Computer Optics* 2008; 32(4): 366-9.

Acknowledgements: This work was supported by the program "Basic Research and Higher imgetion" (RUXO-014-SA-06), Assistance Fund-stvennoj the Patriotic science, RFBR grants №№07-01-96602, 07-07-91580, 08-07 -99,005 and the grant of the President of the Russian Federation for support of leading scientific schools №NSH-3086-2008.9.

References

- [1] Muschaweck J, Ries H. Tailored freeform optical surface. *J. Opt. Soc. Am. A* 2002; 19(3): 590-595.
- [2] Guan P, Wang X-J. On a Monge-Ampere equation arising in geometric optics. *J. Differential Geometry* 1998; 48(2): 205-223.
- [3] Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Mirror calculation for forming one-parameter directional pattern. *Avtometriya* 2004; 40(5): 104-111.
- [4] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Perlo P, Bernard S. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram. *Journal of Modern Optics* 2005; 52(11): 1529-1536.
- [5] Doskolovich LL, Kharitonov SI. Calculating the surface shape of mirrors for shaping an image in the form of a line. *Journal of Optical Technology* 2005; 72(4): 318-321.
- [6] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Bernard S. Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram. *Journal of Modern Optics* 2007; 54(3-4): 589-597.
- [7] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Trenina MA. Designing a mirror to generate a directivity diagram in the form of a line segment. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2006; 42(4): 67-75.
- [8] <http://www.philipslumileds.com/pdfs/ds26.pdf>
- [9] <http://www.philipslumileds.com/pdfs/dr02.pdf>
- [10] Doskolovich LL, Moiseev MA. Designing radially symmetric refractive surfaces with regard for Fresnel losses [In Russian]. *Computer Optics* 2008; 32(2): 201-203.
- [11] http://www.lambdare.com/software_products/tracepro.