

МЕТОД РАСЧЁТА ЗЕРКАЛ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ ДВУМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Е.С. Андреев, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

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

Предложен новый вид лучевого отображения в задаче расчёта зеркал для формирования заданных двумерных распределений интенсивности. Результаты расчета показывают высокие рабочие характеристики предложенного метода. При формировании прямоугольного распределения интенсивности с угловым размером $80^\circ \times 20^\circ$ и эллиптического распределения интенсивности с угловым размером $60^\circ \times 20^\circ$ относительная среднеквадратичная ошибка формирования заданной интенсивности не превышает 8,5%.

Ключевые слова: геометрическая оптика, зеркало, распределение интенсивности.

Задача расчёта отражающей или преломляющей поверхности свободной формы из условия формирования заданного распределения освещённости или интенсивности относится к классу обратных задач неизображающей оптики. Данная задача является сложной и сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных второго порядка типа Монжа-Ампера [1, 2]. Аналитические решения данного уравнения получены только для ряда задач [3-8]. В общем случае для решения данной задачи используются итерационные методы [1,2, 9-15].

Одним из широко применяемых методов является метод, основанный на построении лучевого отображения: соответствия между лучами от источника и точками освещаемой области [12-16]. В настоящей работе предложен новый вид лучевого отображения для задачи расчёта зеркал, формирующих заданные двумерные распределения интенсивности, соответствующие «полосе». Под полосой понимается область с высоким аспектным отношением, получаемая из отрезка прямой заменой каждой точки на отрезок, перпендикулярный исходному (рис. 1). Данное отображение является обобщением отображения, используемого в известной задаче расчёта зеркала для формирования однопараметрических распределений интенсивности [5, 6].

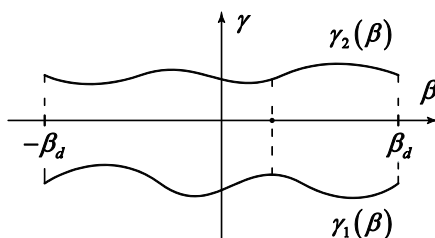


Рис. 1. Вид области, в которой задано двумерное распределение интенсивности

Рассмотрим задачу формирования заданного двумерного распределения интенсивности $I(\beta, \gamma)$, $(\beta, \gamma) \in D$, где $D = [-\beta_d, \beta_d] \times [\gamma_1(\beta), \gamma_2(\beta)]$, где β — угол в плоскости XOZ , отсчитываемый от оси z , γ — угол между лучом и плоскостью XOZ , а функции $\gamma_1(\beta), \gamma_2(\beta)$ опреде-

ляют границы области D по переменной γ (рис. 1). В предельном случае $\gamma_1(\beta) = \gamma_2(\beta) = 0$ область D соответствует отрезку.

При формировании распределения интенсивности $I(\beta, \gamma)$ направления отраженных от зеркала лучей должны иметь вид:

$$\mathbf{p}(\beta, \gamma) = (-\sin(\beta)\cos(\gamma), \sin(\gamma), \cos(\beta)\cos(\gamma)). \quad (1)$$

Зададим соответствия между координатами отраженных лучей (β, γ) и координатами падающих лучей (σ, u) при формировании двумерного распределения интенсивности $I(\beta, \gamma)$

Положим $\beta(\sigma, u) = \beta(\sigma)$, где $\beta(\sigma)$ определяется уравнениями для формирования распределения интенсивности на отрезке. При расчете будем использовать следующее распределение интенсивности, заданное на отрезке:

$$I(\beta) = \int_{\gamma_1(\beta)}^{\gamma_2(\beta)} I(\beta, \gamma) \cos(\gamma) d\gamma, \quad \beta \in [-\beta_d, \beta_d]. \quad (2)$$

Тогда расчёт $\beta(\sigma)$ сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения [6]:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta(\sigma)}{d\sigma} &= \\ &= \frac{\cos\left(\frac{\sigma-\beta}{2}\right) [F_1(\sigma, g) + F_2(\sigma, g)]}{2 \cdot I(\beta) - \cos\left(\frac{\sigma-\beta}{2}\right) [F_1(\sigma, g) - F_2(\sigma, g)]}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } F_1(\sigma, g) = \int_0^{g(\sigma, \beta)} I_0(u, \sigma) \cos(u) du, \quad F_2(\sigma, g) = \int_0^{g(\sigma, \beta)} I_0(u, \sigma) du,$$

$I_0(u, \sigma)$ — интенсивность источника, $g = g(\sigma, \beta)$ — некоторая функция, определяющая размер зеркала по переменной u при фиксированном значении σ .

Функция $\gamma(\sigma, u)$ определяется в виде:

$$\begin{aligned} \gamma(\sigma, u) &= \\ &= \arcsin \left(\frac{I(\beta) \left\{ \frac{d\tau}{d\sigma} F_1(\sigma, u) - \frac{d\alpha}{d\sigma} F_2(\sigma, u) \right\}}{I(\beta, \gamma) \left\{ \frac{d\tau}{d\sigma} F_1(\sigma, g) - \frac{d\alpha}{d\sigma} F_2(\sigma, g) \right\}} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \tau(\sigma) = (\sigma + \beta(\sigma)) / 2, \quad \alpha(\sigma) = \pi / 2 - (\sigma - \beta(\sigma)) / 2.$$

При $\gamma_1(\beta) = \gamma_2(\beta) = 0$ полученные функции лучевого соответствия $\beta(\sigma, u) = \beta(\sigma)$, $\gamma(\sigma, u) \equiv 0$ соответствуют случаю формирования распределения интенсивности в виде отрезка. Это позволяет предположить, что для двумерной области с малым поперечным размером

$\Delta = \gamma_2 - \gamma_1$ (с большим аспектным отношением β_d / Δ), предложенное отображение обеспечит решение задачи формирования заданного распределения интенсивности $I(\beta, \gamma)$ с приемлемой точностью.

Предложенный метод был реализован в программной среде MATLAB. Для проверки работоспособности метода были рассчитаны зеркала, формирующие постоянные распределения интенсивности: в прямоугольной области с угловым размером $80^\circ \times 20^\circ$ (рис. 2) и в эллиптической области с угловым размером $60^\circ \times 20^\circ$. Расчёт функций $\beta = \beta(\sigma)$, $\gamma = \gamma(\sigma, u)$ производился по формулам (3), (4) для постоянной интенсивности источника $I_0(u, \sigma) \equiv I_0$. Для восстановления поверхности зеркала по построенному лучевому отображению $\beta = \beta(\sigma)$, $\gamma = \gamma(\sigma, u)$ был использован численный геометрический метод, основанный на последовательном построении поверхности из сегментов плоскостей [13].

На рис. 2а, 3а показаны формы зеркал, формирующих постоянные распределения интенсивности, а на рис. 2б, 3б — формируемые зеркалами распределения интенсивности при компактном источнике с диаметром 0,06 мм. Положения источников на рис. 2а, 3а показаны черными точками, расстояние от источников до вершин зеркал составляет 1 мм.

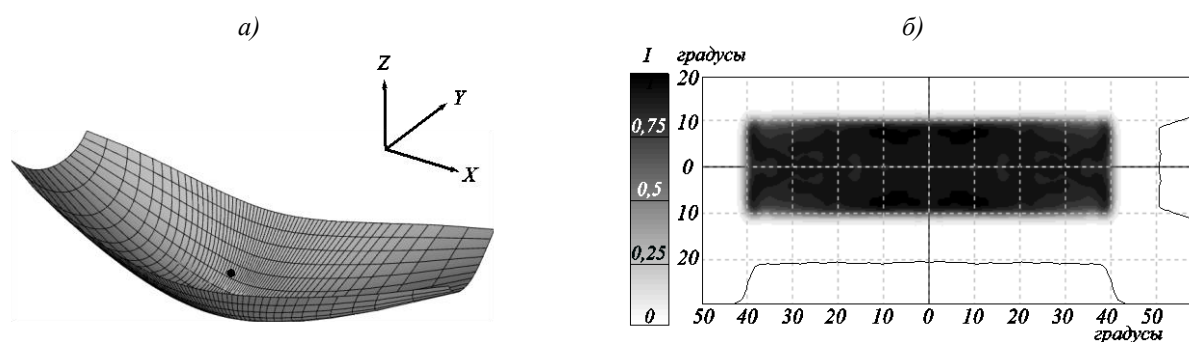


Рис. 2. а) — Зеркало, формирующее постоянное распределение интенсивности в области прямоугольной формы с угловым размером: $80^\circ \times 20^\circ$. Размеры зеркала по осям координат: $12,90 \times 4,94 \times 3,42$ мм. б) — Распределение интенсивности, формируемое зеркалом на рис. а) при компактном источнике с диаметром 0,06 мм.

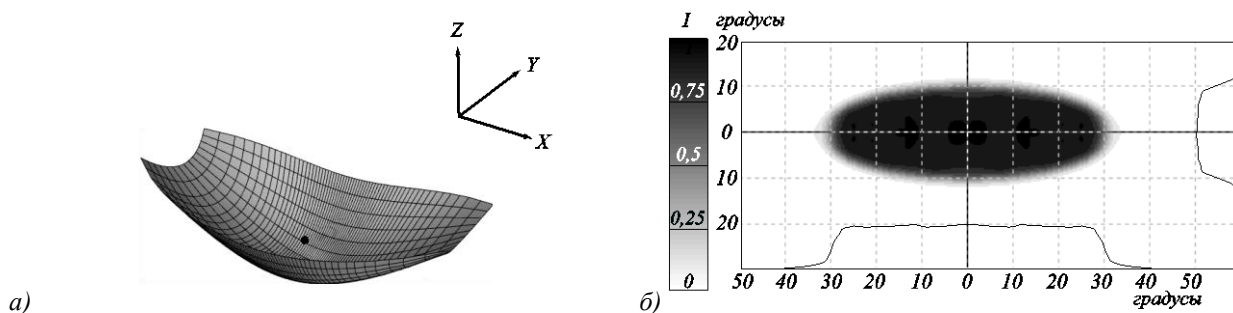


Рис. 3. а) — Зеркало, формирующее постоянное распределение интенсивности в эллиптической области с размером $60^\circ \times 20^\circ$. Размеры зеркала по осям координат: $9,51 \times 4,92 \times 2,77$ мм. б) — Распределение интенсивности, формируемое зеркалом на рис. а) при компактном источнике с диаметром 0,06 мм.

Для расчёта распределений интенсивности использовалась коммерческое программное обеспечение для светотехнических расчётов TracePro [17]. Результаты показывают хорошую равномерность полученных распределений. Для распределений на рис. 2б, 3б относительная среднеквадратическая ошибка не превышает 8,5%, что говорит о высокой работоспособности предложенного метода.

Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-07-00339 А.

Литература

1. . Rengmao, W. Freeform illumination design: a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge–Ampère equation / W. Rengmao, X. Liang, L. Peng, Z. Yaqin, Z. Zhenrong, L. Haifeng, L. Xu, // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 38. – P. 229-231.
2. 2. Rengmao, W. Influence of the characteristics of a light source and target on the Monge–Ampère equation method in freeform optics design / W. Rengmao, P. Benítez, Z. Yaqin, J. C. Miñano // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 634-637.
3. 3. Elmer, W. Optical design of reflectors. Part 2 / W. Elmer, F. Cooke // *Appl. Opt.* – 1978. – Vol 17. – P. 977-979.
4. 4. Moiseev, M. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region / M. Moiseev, L. Doskolovich, // *J. Opt. Soc. Am. A* . – 2012. – Vol 29. – P.1758-1763.
5. 5. Doskolovich, L.L. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, P. Perlo, S. Bernard // *J. Mod. Opt.* – 2005. – Vol. 52. – P. 1529-1536.
6. 6 Doskolovich, L.L. Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S. Bernard // *J. Mod. Opt.* – 2007. – Vol. 54. – P. 589-597.
7. 7. Doskolovich, L. Analytical design of refractive optical elements generating one-parameter intensity distributions/ L. Doskolovich, A. Dmitriev, M. Moiseev, N. Kazanskiy // *J. Opt. Soc. Am. A* . – 2014. – Vol. 31. – P. 2538-2544.
8. 8. Doskolovich, L. Analytical design of freeform optical elements generating an arbitrary-shape curve / L. Doskolovich, A. Dmitriev, E. Bezus, M. Moiseev // *Appl. Opt.* – 2013. – Vol. 52. – P. 2521-2526.
9. 9. Oliker, V.I. Mathematical aspects of design of beam shaping surfaces in geometrical optics / V.I. Oliker // *Trends in Nonlinear Analysis*. – ed. by V.I. Oliker, M. Kirkilionis, S. Krumker, R. Rannacher, F. Tomi. – Springer, 2003. – P. 197-224.
10. 10. Michaelis, D. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems / D. Michaelis, P. Schreiber, A. Bäuer // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 36. – P. 918-20.
11. 11. Doskolovich, L. Design of mirrors for generating prescribed continuous illuminance distributions on the basis of the supporting quadric method / L. Doskolovich, K. Borisova, M. Moiseev, N. Kazanskiy // *Appl. Opt.* – 2016. – Vol. 55. – P. 687-695.
12. 12. Fournier, F. Fast freeform reflector generation using source-target maps / F. Fournier, W. Cassarly, J. Rolland // *Opt. Express*. – 2010. – Vol. 18. – P.5295-5304.
13. 13. Mao, X. Polar-grids based source-target mapping construction method for designing freeform illumination system for a lighting target with arbitrary shape / X. Mao, H. Li, Y. Han, Y. Luo // *Opt. Exp.* – 2015. – Vol. 23. – P.4313-4328.
14. 14. Hongtao, L. A fast feedback method to design easy-molding freeform optical system with uniform illuminance and high light control efficiency / L. Hongtao, C. Shichao, H. Yanjun, L. Yi // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21. – P.1258-1269.
15. 15. Luo, Y. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source / Y. Luo, Z. Feng, Y. Han, H. Li // *Opt. Express*. – 2010. – Vol. 18. – P.9055-9063.
16. 16. Ding, Y. Freeform LED lens for uniform illumination / Y. Ding, X. Liu, Z. Zheng, and P. Gu // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16. – P.12958-12966.
17. Программное обеспечение для оптического проектирования TracePro [Электронный ресурс] – URL: <http://www.lambdares.com>