

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЁТА ДВУХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ СВЕТОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

С.В. Кравченко¹, Е.В.Бызов¹, М.А.Моисеев²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национально исследовательский университет),
² Институт систем обработки изображений РАН

Представлен метод расчёта преломляющих оптических элементов с двумя поверхностями свободной формы. Процедура расчёта позволяет разделить работу по преломлению лучей между поверхностями в заданном соотношении. В качестве примера представлен оптический элемент, формирующий равномерно освещённую прямоугольную область с угловым размером 110° на 90° . Световая эффективность оптического элемента при точечном источнике излучения – 92,2 %, а среднеквадратичное отклонение сформированного распределения освещённости от заданного – 6,2 %.

В условиях современной экономики постоянный рост стоимости энергетических ресурсов, а также отрицательное антропогенное влияние на окружающую среду делают чрезвычайно важным развитие энергосберегающих технологий. Одним из наиболее эффективных способов экономии энергии является переход от устаревших осветительных устройств на основе ламп накаливания к светотехническим устройствам нового поколения, которые в качестве источника излучения используют современные светоизлучающие диоды (СИД). Применение светодиодов в конструкции светотехнических устройств подразумевает использование так называемой вторичной (формирующей) оптики, осуществляющей перераспределение светового потока СИД в заданную область пространства и формирование в ней заданного светового распределения. В качестве вторичной оптики чаще всего используются преломляющие оптические элементы (головки), располагающиеся непосредственно над светодиодом. Расчёт поверхностей оптических элементов является крайне сложной задачей, и даже в случае точечного источника излучения и одной поверхности сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных типа Монжа - Ампера [1]. Аналитические решения данного уравнения известны только для случаев с радиальной или цилиндрической симметрией. Для формирования распределений, не обладающих осевой симметрией, применяются так называемые поверхности свободной формы (англ. free-form surface) [2]. Головки светодиодов с одной преломляющей поверхностью свободной формы, обеспечивают хорошие рабочие характеристики при создании световых распределений со средними и большими угловыми размерами. Однако 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 (энергетическими) потерями. Для повышения энергетической эффективности оптического элемента в его конструкции могут использоваться две преломляющие поверхности свободной формы [3-5], каждая из которых выполняет часть работы по повороту луча. Применение двух рабочих поверхностей позволяет значительно снизить френелевские потери и тем самым повысить световую эффективность оптической системы.

Методы расчёта элементов с двумя поверхностями свободной формы не позволяют [3-5] распределить работу по повороту лучей на каждой из поверхностей в требуемом соотношении. Отсутствие такой степени свободы ограничивает физическую реализуемость рассчитанных оптических элементов, так как после расчёта одна или обе поверхности могут быть не штампуемыми методом литья под давлением вследствие, например, загибания нижней части оптического элемента. Это ограничение можно

избежать, регулируя относительную величину угла поворота луча на каждой из поверхностей.

Представленный в работе метод позволяет распределить работу по преломлению лучей между внутренней и внешней поверхностями в заданном соотношении. Процедура расчёта состоит из трёх основных этапов: аппроксимации требуемого распределения набором точек с заданным потоком энергии в определённом направлении, расчёте внутренней поверхности и расчёте внешней поверхности оптического элемента. Каждая из поверхностей во время расчёта представляется набором базовых поверхностей (далее примитивов), количество которых равно числу точек формируемого распределения. Форма каждого примитива зависит от одного параметра, а их набор однозначно определяет вид внешней и внутренней поверхностей.

В представленном методе параметром примитива первой преломляющей поверхности является длина радиус-вектора r_0 вдоль заданного направления до точки поверхности. Каждый луч, повернутый поверхностью, имеет угловую координату $\phi_i = k\psi_i$, где k – коэффициент, определяющий, какую часть от требуемого поворота луча выполняет внутренняя поверхность, ψ_i – угловая координата i -того луча, вышедшего из источника, ϕ_i – угловая координата того же луча после преломления на первой поверхности. Угловые координаты измеряются относительно оси примитива (рисунок 1).

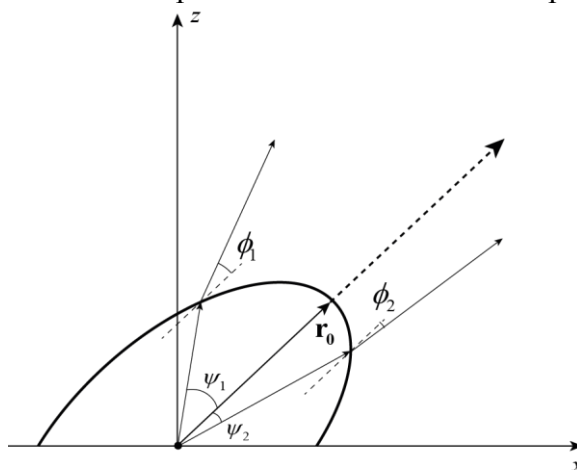


Рисунок 1 – Принцип работы примитива внутренней поверхности

Непрерывная внутренняя поверхность получается путём аппроксимации набора примитивов бикубическим сплайном.

Следующим этапом является определение внешней поверхности. Каждый примитив внешней поверхности должен сколлимировать падающий на него световой пучок в требуемом направлении. Поэтому расчёт внешней базовой поверхности происходит из условия формирования плоского волнового фронта в требуемом направлении. В данном случае параметром примитива является величина l_0 , характеризующая расстояние от точки внутренней поверхности до поверхности примитива вдоль преломлённого на первой поверхности луча (рисунок 2).

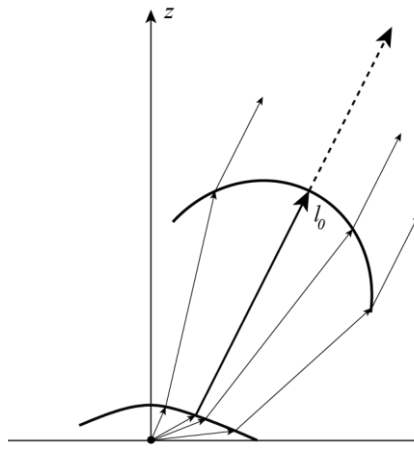


Рисунок 2 – Принцип работы примитива внешней поверхности

Таким образом, задача расчёта двух поверхностей сводится к нахождению $2N$ параметров: r_0 и l_0 , с последующей аппроксимацией примитивов бикубическими сплайнами, где N – количество точек требуемого распределения. В работе было теоретически показано, что оптический элемент работает наиболее эффективно при равных потерях энергии на каждой поверхности. Данный вывод был подтверждён экспериментальными данными.

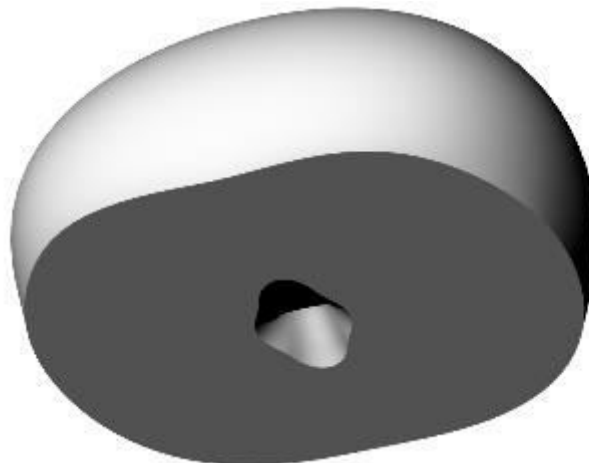


Рисунок 3 – Оптический элемент, формирующий равномерное распределение освещённости в прямоугольной области угловым размером 110° на 90°

Разработанный метод был реализован на языке программирования Matlab®. С помощью него был рассчитан ряд оптических элементов с различным соотношением работы по преломлению лучей на каждой из поверхностей: 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, 100/0. Требуемым распределением являлось равномерное распределение освещённости в прямоугольной области с угловым размером 110° на 90° , которое было аппроксимировано 900 точками. Работа каждого оптического элемента была промоделирована с точечным ламбертовским источником излучения в коммерческом программном обеспечении для оптико-механического моделирования TracePro®. Наиболее высокую эффективность, как и ожидалось, показал элемент с соотношением работы по преломлению лучей на каждой из поверхностей 50/50 (рисунок 3). Световая эффективность элемента на рисунке 3 составила 92,2 %. Такое значение световой эффективности соответствует максимально возможному, так как около 4 % светового излучения неизбежно теряется на каждой преломляющей поверхности вследствие френелевских потерь даже при нормальном падении лучей. Среднеквадратичное отклонение формируемого распределения от равномерного составило 6,2 %. Распределение, формируемое данным оптическим элементом, при точечном источнике излучения представлено на рисунке 4.

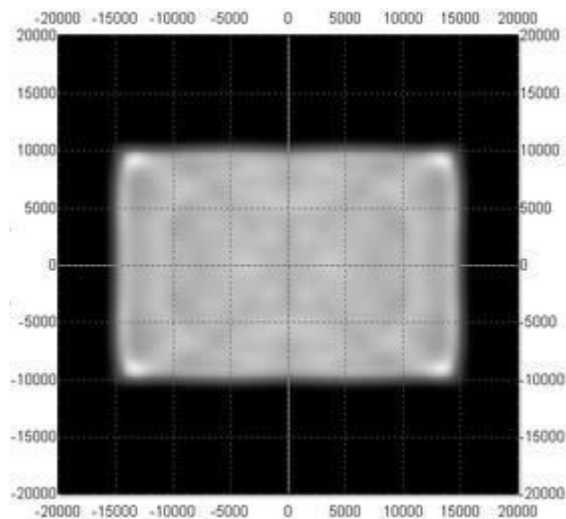


Рисунок 4 – Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рисунок 3) при точечном источнике излучения

В реальных задачах нельзя пренебрегать размерами источника излучения. Распределение освещённости, формируемое тем же элементом (рисунок 3), было промоделировано при протяжённом источнике размером 1x1 мм, излучающем по закону Ламберта. Результат моделирования представлен на рисунке 5.

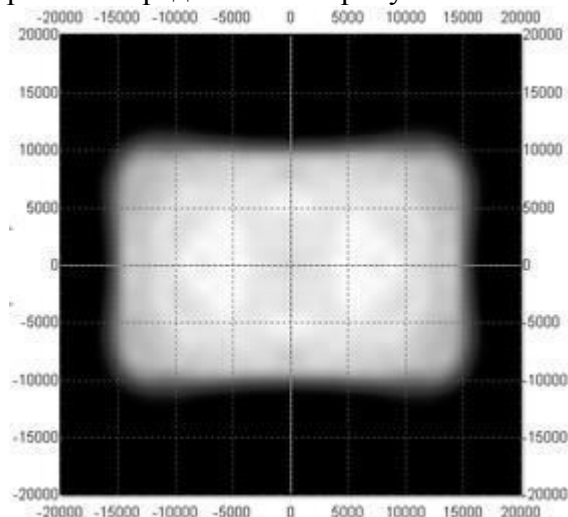


Рисунок 5 – Распределение освещённости, формируемое оптическим элементом (рисунок 3) при протяжённом источнике излучения размером 1x1 мм

В случае протяжённого источника излучения световая эффективность оптического элемента (рисунок 3) составила 92,1 %, а СКО формируемого распределения от равномерного – менее 10,9 %. Таким образом, несмотря на то, что разработанный метод не учитывает конечные размеры источника, рассчитанный оптический элемент демонстрирует отличную работоспособность при использовании его с протяжённым источником излучения, сохраняя максимальную эффективность.

Литература

1. Y. Ma. Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target/ Y. Ma, H. Zhang, Z. Su, Y. He, L. Xu, X. Liu, and H. Li// *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54, N 14. – P. 4503-4508.
2. Chen H.-C. Rectangular illumination using a secondary op-tics with cylindrical lens for LED street light/ H.-C. Chen, J.-Y. Lin, H.-Y. Chiu // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, N 3. – P. 3201-3212.
3. Bauerle, A. Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces / A. Bauerle, A. Bruneton, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Opt. Express.* – 2012.– Vol. 20, N 13. – P. 14477-14485.
4. Bruneton, A. High resolution irradiance tailoring using mul-tiple freeform surfaces [Text] / A. Bruneton, A. Bäuerle, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21(9). – P. 10563–10571.
5. Feng, Z. Beam shaping system design using double freeform optical surfaces [Text]/ L. Huang, M. Gong, G. Jin, *Opt. Express.* – 2013. Vol. 21(12), P. 14728-14735.