

ПРЯМАЯ ЗАДАЧА МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ

УДК 628.931

Е.В. Соболев, Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко,
ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель

Аннотация

Разработана методика моделирования светораспределения светодиодных модулей с произвольными входными параметрами. Методика базируется на замене излучения группы светодиодов эквивалентным фотометрическим телом, получаемым в условном оптическом центре модуля посредством трассировки лучей по принципу действия гониофотометра. Предложенная методика позволяет при сохранении заданной точности сократить количество генерируемых лучей при моделировании светораспределения светодиодных модулей по отношению к классической трассировке методом Монте-Карло.

Введение

Моделирование светораспределения является одним из основных этапов разработки световых приборов. Конструктивными элементами, определяющими светораспределение светодиодных световых приборов, являются светодиодный модуль (СДМ) или светодиодный модуль и оптическая система светового прибора. Оптическая система осветительных приборов (ОП) представляет собой, как правило, типизированные решения, например, отражатели с образующими в виде конических сечений, поэтому задача моделирования светораспределения светодиодных ОП может быть сведена к моделированию распределения излучения СДМ, как источника света или самостоятельного светового прибора.

В современных светотехнических САПР решение задачи светораспределения световых приборов основано на физически адекватном моделировании распределения светового вектора во внешнем пространстве ОП на основе трассировки лучей методом Монте-Карло [1, 2]. Данный метод позволяет с высокой степенью точности рассчитать распространение светового потока в оптической системе, статистически реализуя законы преобразования оптического излучения (отражение лучей, рассеивание, диффузия, пропускание и т.д.) [2]. Трассировка лучей методом Монте-Карло является универсальным методом моделирования ОП, позволяющим решать задачи светораспределения как дальней, так и ближней зон. Этот метод строится на ряде разбиений трехмерной сцены (вокселизация пространства, пикселизация сетки отображения результатов и пр.), что в случае моделирования ОП, где телесный угол излучения может достигать 4π , приводит к необходимости генерации огромного количества лучей (трассировочный файл с характеристиками светодиодного источника света может содержать информацию о многих миллионах лучей и занимать объем более 250 Мбайт [3]). Таким образом, трассировка лучей методом Монте-Карло при моделировании ОП является достаточно громоздкой и требует значительных вычислительных ресурсов, при этом решение задачи светораспределения часто сводится к поиску оптимального соотношения между числом генерируемых лучей и плотностью дискретизации сетки отображения результатов [4].

Существует ряд современных работ в области моделирования светораспределения СДМ [5, 6], однако, в исследованиях вводится ограничение на форму модуля и (или) форму фотометрического тела используемых светодиодов.

Целью работы является разработка методики решения прямой задачи моделирования светораспределения светодиодных модулей с произвольными входными параметрами.

Методика моделирования светораспределения светодиодных модулей

Прямой задачей моделирования светораспределения СДМ является: по известным характеристикам светодиодов и конструкции модуля определение распределения силы света или освещенности по заданной поверхности [7].

В основе методики моделирования распределения силы света СДМ произвольной формы лежит идея замещения распределения излучения группы элементарных излучателей СДМ (здесь и далее под элементарным излучателем СДМ понимается светодиод (СД) или система «СД – вторичная оптика») эквивалентным фотометрическим телом в условном оптическом центре (ОЦ) O (рисунок 1) модуля. Для определения эквивалентного фотометрического тела модуль помещается в условную сферу с радиусом H_p , центр сферы совпадает с ОЦ СДМ. Поверхность сферы разбивается на пиксели $P(C_p, \gamma_p)$, в направлении каждого из которых рассчитывается сила света эквивалентного фотометрического тела I_{op} , определяемая для точечного излучателя модулем суммы векторов $I(\vec{s}_{ip})$ сил света всех элементарных излучателей в направлении пикселя $P(C_p, \gamma_p)$. Приведенный подход в общем виде имитирует принцип действия гониофотометра, что позволяет сделать предсказуемым количество генерируемых лучей, определяемое количеством n светодиодов в модуле и количеством расчетных пикселей P условной сферы.

Под исходными данными для моделирования будем понимать наличие в произвольном координатном фрейме $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, O')$ координат и углов ориентации в пространстве (базисов $(\vec{i}^{(i)}, \vec{j}^{(i)}, \vec{k}^{(i)})$) всех n элементарных излучателей рассчитываемого СДМ, а также фотометрические данные элементарных излучателей модуля, представленные в виде файлов фотометрических данных [8]. Базис $(\vec{i}^{(i)}, \vec{j}^{(i)}, \vec{k}^{(i)})$ элементарного излучателя связан с направлениями его главных осей: продольной $\vec{i}^{(i)}$, поперечной $\vec{j}^{(i)}$ и оптической $\vec{k}^{(i)}$. Принимается допущение точности элементарного излучателя модуля, что предполагает выполнение закона квадратов расстояний (ЗКР) для элементарного излучателя СДМ. Это предположение основано на том, что линейные размеры светящей поверхности элементарного излучателя СДМ на несколько порядков меньше линейных размеров светящей поверхности модуля, и исходя из принципа действия гониофотометра при выборе расстояния фотометрирования (радиуса H_p условной сферы), обеспечивающего выполнение ЗКР для СДМ, автоматически обеспечивается выполнение ЗКР для элементарного излучателя модуля.

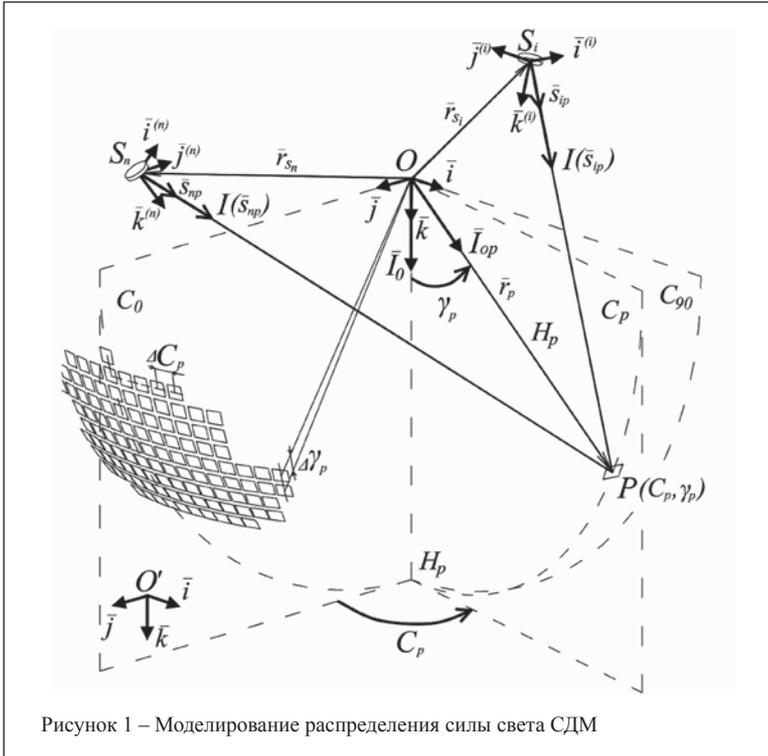


Рисунок 1 – Моделирование распределения силы света СДМ

Условный ОЦ СДМ определяется как центр тяжести системы масс, в качестве которых выступают световые потоки отдельных СД [9]. Координаты $O(X_0, Y_0, Z_0)$ ОЦ СДМ в координатном фрейме $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}, O')$ определяются как средневзвешенные по световому потоку координаты отдельных СД:

$$X_0 = \frac{\sum \Phi_i \cdot x_i}{\sum \Phi_i}; Y_0 = \frac{\sum \Phi_i \cdot y_i}{\sum \Phi_i}; Z_0 = \frac{\sum \Phi_i \cdot z_i}{\sum \Phi_i}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – координаты i -го СД, м; Φ_i – световой поток i -го СД, лм.

ОЦ определяется как некоторая постоянная точка при заданной форме СДМ. В ОЦ СДМ принимается координатный фрейм СДМ $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}, O)$, получаемый переносом фрейма $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}, O')$ в ОЦ O модуля, после чего координаты всех n элементарных излучателей выражаются в системе координат СДМ:

$$S_i = M_i \cdot S'_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где S_i – однородные координаты точки установки i -го элементарного излучателя в системе координат СДМ; S'_i – однородные координаты точки установки i -го элементарного излучателя в координатном фрейме $(\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}, O')$; M_i – матрица переноса.

Радиус H_p условной сферы определяется зависимостью осевой силы света СДМ I_0 от расстояния до освещаемой площадки ($I_0 = f(h)$). За радиус H_p принимается расстояние, начиная с которого осевая сила света СДМ I_0 остается постоянной в пределах погрешности 1% [10]. Разбиение

поверхности сферы на пиксели $P(C_p, \gamma_p)$ определяется требованиями к сетке углов измерения при фотометрических измерениях [10]. Для системы фотометрирования (C, γ) шаг меридиональных углов $\Delta\gamma_p$ не должен превышать 5° , а экваториальных углов $\Delta C_p - 10^\circ$.

Значение силы света $I(\bar{s}_{ip})$ определяется фотометрическим телом элементарного излучателя и ориентацией его базиса относительно базиса ОЦ СДМ. Чтобы найти это значение, необходимо определить орт \bar{s}_{ip} в системе координат соответствующего i -го элементарного излучателя. В общем виде для произвольно ориентированного элементарного излучателя, расположенного в точке S_p , координируемой относительно ОЦ СДМ вектором \bar{r}_{si} , и произвольного пикселя $P(C_p, \gamma_p)$ условной сферы, координируемого относительно ОЦ СДМ вектором \bar{r}_p , орт \bar{s}_{ip} , определяющий направление силы света $I(\bar{s}_{ip})$ i -го элементарного излучателя в направлении пикселя $P(C_p, \gamma_p)$, определяется в базисе СДМ по формуле:

$$\bar{s} = \frac{\bar{r}_p - \bar{r}_{si}}{|\bar{r}_p - \bar{r}_{si}|} \quad (3)$$

Зная направляющие косинусы орта \bar{s}_{ip} в базисе СДМ – $R^{(0)}$, направляющие косинусы данного орта в базисе i -го элементарного излучателя $(\bar{i}^{(i)}, \bar{j}^{(i)}, \bar{k}^{(i)}) - R^{(i)}$ будут определяться следующим образом:

$$R^{(i)} = M_r^{(i)} \cdot R^{(0)}, \quad (4)$$

где $M_r^{(i)}$ – матрица направляющих косинусов, преобразующая координаты вектора из базиса СДМ в базис i -го элементарного излучателя.

Ориентация базиса элементарного излучателя относительно базиса СДМ может быть осуществлена при помощи трех последовательных поворотов (рисунок 2): относительно оптической оси элементарного излучателя $\bar{k}^{(i)}$ на угол C_p ; относительно продольной оси элементарного излучателя $\bar{i}^{(i)}$ на угол γ_r и при необходимости дополнительного поворота относительно оптической оси элементарного излучателя $\bar{k}^{(i)}$ на угол θ_r . Два первых поворота определяют ориентацию оптической оси элементарного излучателя, а третий дополнительный поворот – ориентацию продольной и поперечной осей.

Матрица поворота, преобразующая координаты вектора из базиса СДМ в базис i -го элементарного излучателя, примет вид:

$$M_r^{(i)} = \begin{bmatrix} c\theta_r \cdot cC_r + s\theta_r \cdot c\gamma_r \cdot sC_r & & & \\ -s\theta_r \cdot cC_r + c\theta_r \cdot c\gamma_r \cdot sC_r & & & \\ & s\gamma_r \cdot sC_r & & \\ -c\theta_r \cdot sC_r + s\theta_r \cdot c\gamma_r \cdot cC_r & -s\theta_r \cdot s\gamma_r & & \\ s\theta_r \cdot sC_r + c\theta_r \cdot c\gamma_r \cdot cC_r & -c\theta_r \cdot s\gamma_r & & \\ & s\gamma_r \cdot cC_r & c\gamma_r & \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $c\theta_r, s\theta_r$ – косинус и синус угла θ_r (подобным образом обозначены синусы и косинусы других углов поворота).

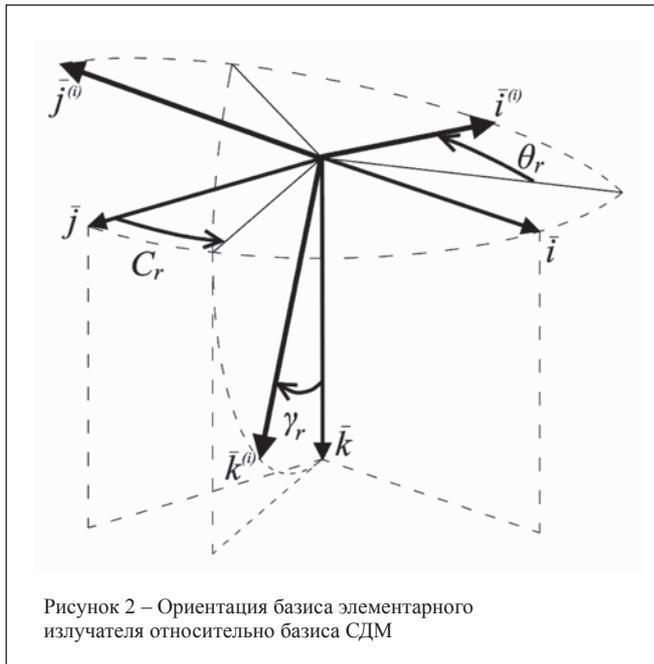


Рисунок 2 – Ориентация базиса элементарного излучателя относительно базиса СДМ

Зная направляющие косинусы орта \bar{s}_{ip} в базисе i -го элементарного излучателя – $R^{(i)}$, в зависимости от принятой системы фотометрирования определяются координирующие орт \bar{s}_{ip} углы [11]. Для найденных углов путем интерполяции фотометрических данных i -го элементарного излучателя модуля определяется сила света $I(\bar{s}_{ip})$. Как отмечалось выше, искомая сила света I_{op} эквивалентного фотометрического тела СДМ, координируемая углами C_p и γ_p определяется для точечного излучателя суммой векторов сил света всех элементарных излучателей в направлении пикселя $P(C_p, \gamma_p)$:

$$\bar{I}_{op} = \sum_{i=1}^n I(\bar{s}_{ip}). \quad (6)$$

Результатом моделирования является полное описание геометрии проектируемого СДМ с координатами и углами ориентации в пространстве всех элементарных излучателей относительно ОЦ СДМ, а также фотометрическое тело СДМ. Расчет распределения освещенности по заданной поверхности дальней зоны осуществляется при помощи ЗКР на основе результатов моделирования распределения силы света.

Верификация методики моделирования методом прямой трассировки лучей

Проверка адекватности разработанной методики моделирования светораспределения СДМ с произвольными входными параметрами была проведена на основе имитационной модели при помощи прямой трассировки лучей методом Монте-Карло. В рамках верификации предлагаемой методики необходимо:

- создать трехмерную параметрическую модель СДМ;
- определить распределение силы света СДМ предлагаемым методом и методом прямой трассировки лучей Монте-Карло;
- проверить значимость полученных результатов моделирования и сравнить их с полученными в результате трассировки лучей Монте-Карло.

На первом этапе была создана трехмерная параметрическая модель СДМ, состоящая из четырех развернутых наружу на 60 градусов СД. Суммарный световой поток СД в модуле 80 лм. Моделирование методом Монте-Карло осуществлялось для $4 \times 1\,000\,000$ лучей, варьируемым параметром выступал коэффициент сглаживания сетки отображения результатов. Моделирование предлагаемым методом осуществлялось для 4×1332 лучей. Результаты моделирования распределения силы света модуля для главной поперечной плоскости предлагаемым способом (Im) и наиболее вероятное светораспределение при моделировании методом Монте-Карло (Iav) представлены на рисунке 3.

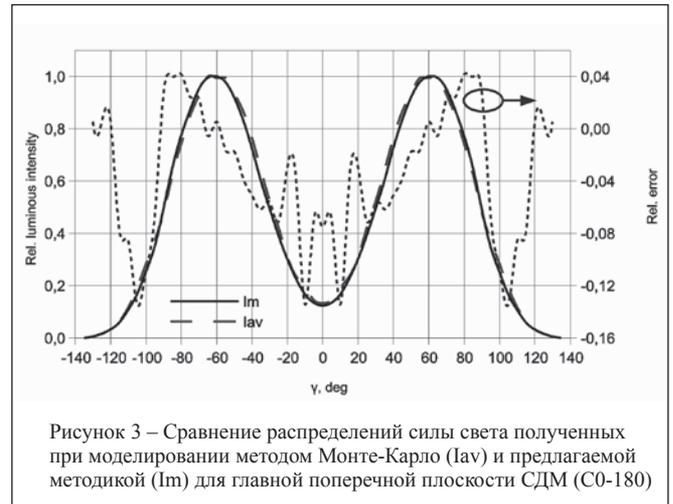


Рисунок 3 – Сравнение распределений силы света полученных при моделировании методом Монте-Карло (Iav) и предлагаемой методикой (Im) для главной поперечной плоскости СДМ (C0-180)

Для оценки погрешности формы распределения силы света, полученной в результате моделирования, был произведен расчет светового потока СДМ путем определения зональных световых потоков с целью отбрасывания зон, для которых вклад светового потока в общий световой поток СДМ не превышает 5 %. Динамика относительной погрешности формы распределения силы света, полученной в результате моделирования, представлена на рисунке 3, из которого видно, что погрешность модели светораспределения для всех углов не превышает 13 %, для всех значащих зональных углов – 10 %. Также были рассчитаны показатели качества для сравнения пространственных распределений силы света [12]: «степень соответствия» двух наборов, описывающих распределение силы света ($f_{\text{luminaire, fit}} = 98,2\%$), и отношение световых потоков ($f_{\text{luminaire, flux}} = 0,991$).

Результаты верификации разработанного способа моделирования подтвердили, что предложенный способ позволяет адекватно проводить расчеты светораспределения светодиодных модулей с произвольными входными параметрами.

Заключение

На основе метода трассировки лучей разработана методика решения прямой задачи моделирования светораспределения светодиодных модулей с произвольными входными параметрами. Предложенная методика в общем виде имитирует принцип действия гониофотометра. Это позволяет сократить количество генерируемых лучей по отношению к классической трассировке методом Монте-Карло при сохранении универсальности метода для рассматриваемого класса задач. Проведена

верификация предложенной методики моделирования, в рамках которой подтверждена адекватность разработанного способа моделирования.

Литература:

1. Макаров, Д.Н. Методы компьютерного моделирования осветительных установок : дис. канд. техн. наук : 05.09.07 / Д.Н. Макаров. – Москва, 2007. – 146 л.
2. Шибайкин, С.Д. Разработка трехмерной триангуляционной модели осветительных приборов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.09.07 / С.Д. Шибайкин. – Саранск, 2010. – 24 с.
3. Цзян-чжун Цзяо. Стандарты трассировочных файлов для проектирования светодиодных источников света / Цзян-чжун Цзяо // Современная светотехника. – 2013. – №5. – С. 100–101.
4. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.] – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
5. Дэн, С.С. Исследование кривых силы света светодиодов для общего освещения / С.С. Дэн, Ц.М. Чань // Светотехника. – 2009. – № 5. – С. 30–36.
6. Гутцайт, Э.М. Исследования освещенностей от светодиодных модулей, расположенных на больших расстояниях от освещаемых объектов / Э.М. Гутцайт // Радиотехника и электроника. – 2009. – № 1. – С. 113–124.
7. Приборы и комплексы осветительные. Термины и определения : ГОСТ Р 55392-2012. – Введ. 01.07.13. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 43 с.

8. ANSI/IESNA Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data and Related Information : ANSI/IESNA LM-63-02. – Appr. 09.12.02. – New York : Illuminating Engineering Society of North America, 2002. – 17 p.

9. Соболев, Е.В. Моделирование светотехнических характеристик светодиодных модулей / Е.В. Соболев, Е.Н. Подденежный // Светотехника и электроэнергетика. – 2011 – №2 (26) – С. 13–18.

10. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний : ГОСТ Р 54350-2011. – Введ. 01.07.12. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 37 с.

11. Справочная книга по светотехнике / Ю.Б. Айзенберг [и др.] ; под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и дополн. – М. : Знак, 2006. – 972 с.

12. Берген, А. Практический метод сравнения пространственных распределений силы света / А. Берген // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 52–57.

Abstract

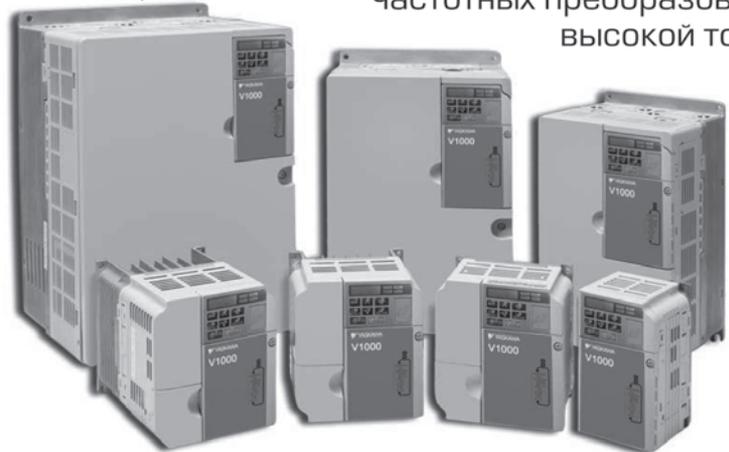
The procedure of modeling light distribution of LED modules with arbitrary input parameters is developed. The procedure bases on replacing the emission of LED group with equivalent photometric body, it's obtained in the conditional optical center of module by the principle of goniophotometer raytracing method. The proposed procedure allows with saving a given accuracy to reduce the number of generated rays for the light distribution of LED modules simulation in comparison with the classical Monte-Carlo raytracing.

Поступила в редакцию 02.06.2014 г.

VECTOR OF TECHNOLOGIES



Акция
на YASKAWA
V1000



Это серия компактных, высокоэффективных частотных преобразователей, с низким уровнем шума, высокой точностью поддержания скорости и большим пусковым моментом, со скалярным и векторным управлением без обратной связи, подходящий для управления как асинхронных, так и синхронных двигателей, мощностью от 0,2 до 18,5 кВт со встроенным контроллером.

Наши специалисты с радостью помогут решить ваши задачи.
 Tel: +375-17-265-60-15, fax: +375-17-265-60-16, mob: +375-29-685-60-15.
 info@vec-tech.by, web: http://www.vec-tech.by