

Компьютерная графика и качество освещения реальных осветительных установок в светотехнике

Владимир Будак, Виктор Желтов, Виктор Чембаев
budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com

кафедра светотехники

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

Современные методы моделирования уравнения глобального освещения, в частности, основанные на локальных оценках метода Монте-Карло, позволяют определить пространственно-угловое распределение яркости в произвольной точке сцены. Это открывает новые возможности по определению качественных характеристик освещения сцены при светотехническом проектировании. В работе рассматривается новый подход к определению критерия качества освещения, и возможности перехода на новый уклад проектирования реальных осветительных установок на основе достижений в моделировании уравнения глобального освещения в компьютерной графике.

Ключевые слова: светотехника, компьютерная графика, критерий качества освещения, уравнение глобального освещения.

Computer graphics and illumination quality of real lighting systems in the lighting technology science

Vladimir Budak, Victor Zheltov, Victor Chembayev
budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com

department of Lighting technology

Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

Modern methods of global illumination equation modelling including based on Local Estimations of a Monte Carlo method enable us to determine spatial angular radiance distribution in the specified point of the scene. It gives us new possibilities for determining the qualitative characteristics of a scene lighting in lighting design. This article considers the new approach to determine the illumination quality criteria and the possibility of switching to a new way of designing real lighting systems based on the achievements in modeling the global illumination equation in computer graphics.

Key words: lighting technology science, computer graphics, illumination quality criteria, global illumination equation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Светотехника – это область науки и техники, предметом которой являются исследование принципов и разработка способов генерирования, пространственного перераспределения и измерения характеристик оптического излучения, а также преобразование его энергии в другие виды энергии и использование в целях освещения [4].

Одним из важнейших практических направлений светотехники является проектирование осветительных установок (ОУ). Основной задачей проектирования ОУ является определение типа, мощности, количества, месторасположения и ориентации световых приборов, обеспечивающих нормативные светотехнические требования к данной ОУ [4]. Нормативные требования зависят от освещаемого объекта, и могут, как отсутствовать вовсе в бытовом освещении, так и быть крайне строгими, как, например, в дорожном или спортивном освещении.

Задача проектирования ОУ появилась еще задолго до появления электричества, и решалась еще во времена освещения свечами. Однако не только задачи утилитарного освещения успешно решались до появления компьютерной техники, но и задачи дорожного и архитектурного освещения. Так, на рисунке 1 представлена фотография архитектурно-художественного освещения Московского Кремля в 1896 году.

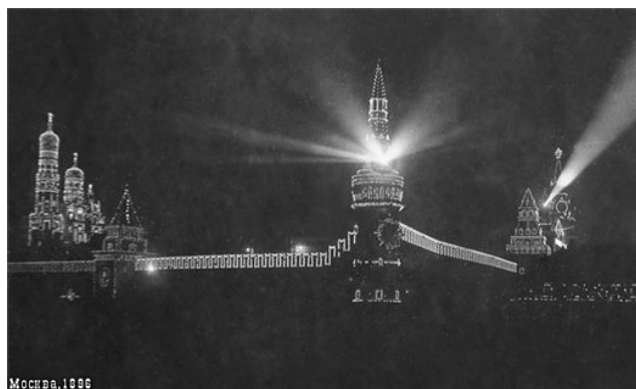


Рис. 1. Архитектурно художественная подсветка Московского Кремля в 1896 году

Однако проектирование ОУ до 90-х годов прошлого века представляло собой набор сложных изнурительных инженерных расчетов и очень часто опиралось на многолетний опыт и интуицию проектировщика.

2. КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА И СВЕТОТЕХНИКА

Появление компьютеров и развитие математических методов совершило подлинную революцию в светотехнике. Однако, эта революция была связана с развитием в другой области – трехмерной компьютерной графике. основополагающей работой тут является статья J. Kajia [2], в которой

формулируется уравнение глобального освещения (УГО), которое может быть записано в привычном нам виде

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) + \frac{1}{\pi} \oint L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') |(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}}')| d\hat{\mathbf{I}}', \quad (1)$$

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$ – яркость светового поля в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{I}}$, $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}')$ – коэффициент яркости элемента поверхности в точке \mathbf{r} в направлении $\hat{\mathbf{I}}$ при его направленном освещении параллельным пучком света в направлении $\hat{\mathbf{I}}'$, часто называемая двунаправленной функцией рассеяния (отражения или пропускания), L_0 – прямая компонента яркости, непосредственно от источников, $\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль в точке \mathbf{r} к элементу поверхности сцены. Здесь и далее крышечкой над вектором будем обозначать единичные вектора. Контурный интеграл в уравнении означает интегрирование по полному телесному углу, элемент которого обозначен через $d\hat{\mathbf{I}}'$.

Именно на моделировании этого уравнения и построена современная трехмерная компьютерная графика, где степень реализма воспроизведения трехмерных сцен уже выходит на уровень постановки вопроса – является ли визуализация более реалистичной, нежели фотография [6]. Современное моделирование осветительных установок также неразрывно связано с решением уравнения глобального освещения, т.е. по сути, задача визуализации в трехмерной компьютерной графике эквивалентна проектированию ОУ. Однако, в сегодняшней инженерной практике моделирование базируется не на решении УГО, а на решении уравнения излучательности [1] методом конечных элементов [7]

$$M(\mathbf{r}) = M_0(\mathbf{r}) + \frac{\sigma(\mathbf{r})}{\pi} \int_{\Sigma} M(\mathbf{r}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2\mathbf{r}', \quad (2)$$

где $M(\mathbf{r})$ – светимость в точке \mathbf{r} , $M_0(\mathbf{r})$ – начальная светимость в точке \mathbf{r} непосредственно от источников света в приближении одного отражения, $\Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция видности точки \mathbf{r} из точки \mathbf{r}' (1 если видна и 0 если не видна), $F(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – элементарный форм-фактор [7], $\sigma(\mathbf{r})$ – коэффициент отражения.

Решение уравнения (2) методом конечных элементов получило собственное название – метод излучательности. Метод стал лишь небольшой вехой в компьютерной графике, оставив наиболее яркий след в виде программы моделирования – Lightscape. Однако, для светотехнического проектирования осветительных установок он стал основой на многие годы, выразившись в двух ключевых системах автоматизированного проектирования – DIALux [10] и Relux [11].

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОТТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При светотехническом моделировании ОУ среди определяемых нормируемых характеристик выделяют два основных вида – количественные и качественные. К количественным величинам можно отнести, в первую очередь, освещенность и яркость, а также производные от них величины – средняя освещенность, неравномерность, отношения максимальной к минимальной и т.п. Среди нормируемых качественных характеристик в инженерной практике используется лишь объединенный показатель дискомфорта UGR [12]

$$UGR = 8 \lg \left[\frac{0.25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right], \quad (3)$$

где L_i – яркость блеского источника, кд/м², ω_i – угловой размер блеского источника, стер, p_i – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения, L_a – яркость адаптации, кд/м².

Отметим, что глаз человека реагирует на яркость падающего излучения, но не на освещенность. При этом для большей части объектов нормируются характеристики на основе освещенности [13]. Исключение составляет дорожное и наружное освещение [14], где нормируется видимая глазу характеристика – яркость. При этом при расчетах в наружном освещении считается, что влияние многократных отражений света минимальное, и оно не учитывается.

Ситуация выглядит странно, глаз человека видит яркость, а нормируется в основном невидимая интегральная характеристика – освещенность. Но, тем не менее, она легко объяснима, если учесть, что нормативные документы разрабатывались во времена инженерных методов моделирования, когда был возможен лишь расчет освещенности в прямом свете и учет многократных отражений через использование приближенных расчетов, например, через коэффициенты использования [8].

Не удивительной тут становится и ситуация, когда в компьютерной графике созданы методы несмещенного моделирования уравнения глобального освещения, позволяя моделировать яркость. А в светотехнике, в это время, моделирование проводится на основе уравнения излучательности. Ведь действительно – зачем моделировать яркость, если нормируется освещенность?

Отметим, что в настоящее время начал активно развиваться новый продукт для моделирования ОУ – DIALux Evo, основанный на моделировании УГО с использованием фотонных карт. Что позволяет моделировать уже непосредственно яркость, однако широкого распространения в инженерной практике на сегодняшний день он не нашел. К тому же, его появление лишь первая веха в возможно начавшемся процессе пересмотра методологии проектирования ОУ и переходу к нормированию истинной видимой характеристики – яркости.

4. ЯРКОСТЬ – НА ПУТИ К КАЧЕСТВУ ОСВЕЩЕНИЯ

Феноменальное развитие математических методов и алгоритмов решения уравнения глобального освещения (1) в компьютерной графике позволяет уже сегодня перейти в светотехнике к моделированию непосредственно яркости и, как следствие, к возможности перехода от нормирования освещенности к яркости. Однако подобный переход сам по себе не имеет ценности. Это можно наблюдать на примере развития DIALux Evo. Программа позволяет считать яркость, но что дальше с ней делать? На наш взгляд, следующим шагом в развитии светотехнического моделирования должен стать переход к проектированию не на заданные количественные характеристики (среднюю освещенность, например), а на заданное качество. Учитывая, что как было сказано выше, в современном проектировании используется только объединенный показатель дискомфорта, в нашей предыдущей работе мы сформулировали новый подход к определению качества освещения [5]. Подход основан на представлении качества освещения в виде одного числа.

$$Q = \frac{1}{AK_{\text{пор}}} \int \frac{|\text{grad}L(x,y)|}{\bar{L}} p(x,y)h(x,y)dx dy, \quad (4)$$

где x, y – координаты точки на проекции сцены (пространство изображения), L – яркость данной точки в направлении наблюдения, \bar{L} – средняя по полю зрения яркость, $p(x,y)$ – некоторая весовая функция, учитывающая различный вклад в реакцию глаз точек, расположенных в центре поля зрения и на периферии, так как плотность колбочек наибольшая у зрительной оси [3], $h(x,y)$ – функция учитывающая значимость той или иной точки для качества освещения, $A = \int dx dy$, $K_{\text{пор}}$ – пороговый контраст, определяемый светотехнической задачей.

Предложенный критерий, в отличие от UGR , учитывает полное пространственно-угловое распределение яркости для заданной точки наблюдения. Так, например, в UGR войдет яркость L_i – непосредственно от точечного источника, попадающего в поле зрения, но вот блик на диффузно-направленно отражающей поверхности от этого источника уже не войдет в расчет коэффициента. Хотя очевидно, что влияние этого блика может быть существенным.

Рассмотрим вариант возможной методики проектирования на заданное качество в соответствии с предложенным критерием. В сцене выбирается ряд видовых точек, для которых будет определяться качество освещения. Если это рассматривать на примере учебной аудитории, то таковыми точками могут быть рабочее место преподавателя у доски, парты с видом на доску. После чего, для данных видовых точек рассчитывается угловое распределение яркости. Для всех поверхностей сцены задается весовой коэффициент $h(x,y)$, учитывающий степень значимости качества освещения для той или иной поверхности. Пример задания коэффициента значимости для аудитории приведен на рисунке 2.



Рис. 2. Задание коэффициента значимости h на примере учебной аудитории

Отметим, что коэффициент может быть задан как непосредственно в пространстве изображений (x,y) , так и непосредственно в пространстве трехмерной сцены, и потом переведен в пространство изображений для каждой видовой точки. После чего мы можем вычислить значение критерия качества Q для каждой из видовых точек и усреднить, возможно, с некоторым весом. Полученное значение будет способно ответить на вопрос – хорошо или плохо освещает установка, что в комплексе с нормировкой на количественные характеристики (например, среднюю освещенность) должно дать исчерпывающий ответ о качестве созданной установки.

5. БУДУЩАЯ РАБОТА

Сформулированный подход к критерию качества освещения, основанному на анализе пространственно-углового распределения яркости, неразрывно связан с наблюдателем, а, следовательно, и его психофизическим восприятием. Это требует экспериментальных исследований для определения пороговых величин и возможных нормировок. В рамках нашей работы мы начали исследование порогов в зоне комфорт-дискомфорт при наблюдении блестящих источников [9]. Однако, натурные эксперименты представляют очевидную сложность, поэтому мы видим дальнейшее развитие исследований критерия качества не только в их продолжении, но и в активном использовании компьютерного моделирования трехмерных сцен.

В этом случае мы предполагаем возможность искусственного создания заведомо «плохих» и «хороших» сцен с точки зрения качества освещения, основываясь на некоторых субъективных критериях. После чего в этих сценах может быть рассчитан предложенный критерий. А далее, предъявляя эти сцены наблюдателям для оценки качества освещения, может быть сопоставлена шкала, полученная при расчете критерия и шкала наблюдателя.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Goral C., Torrance K., Greenberg D., Battaile B. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces // Computer Graphics, 1984. Vol. 18, No. 3. P.213-222.
- [2] Kajiji J.T. The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86), 1986. V.20, N4. P.143-150.
- [3] Lombardo M., Lombardo G., Lomoriello D.S., Ducoli P., Stirpe M., Serrao S. Interocular symmetry of parafoveal photoreceptor cone density distribution. // Retina, 2013. Vol. 33, No.8. P.1640-1649.
- [4] Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике // М. Энергоатомиздат, 1995, 528 с.
- [5] Будак В., Желтов В., Мешкова Т., Нотфуллин Р. Оценка качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости // Светотехника, 2017, №3
- [6] Дебелов В. А. Инструментальная верификация алгоритмов реалистического рендеринга // – Графика-2016, Нижний Новгород, 2016, стр. 22-28.
- [7] Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. — М.: Мир, 1984
- [8] Епанешников М. М. Расчет средней светности потолка и стен при проектировании осветительных установок // Свето-техника, 1959, №12.
- [9] Чембаев В., Будак В., Желтов В., Нотфуллин Р. Математическое моделирование осветительных установок и качественные характеристики освещения // 26-я Международная конференция GraphiCon2016, 2016, стр. 50-54
- [10] www.dialux.de
- [11] www.relux.biz
- [12] Свод правил СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция», 2011
- [13] СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение
- [14] МГСН 2.06-99 Естественное, искусственное и смешанное освещение