

Математическое моделирование осветительных установок и качественные характеристики освещения

Виктор Чембаев, Владимир Будак, Виктор Желтов, Ренат Нотфуллин
кафедра Светотехники

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия
chembervint@gmail.com, budakvp@mpei.ru, zheltov@list.ru, renat@notfullin.com

Аннотация

Моделирование осветительных установок (ОУ), так же как и визуализация в компьютерной графике строятся на основе решения уравнения глобального освещения (УГО). Отметим, что, в настоящее время, основные средства моделирования ОУ используют диффузное приближение, решая уравнение излучательности методом конечных элементов, что стало уже давно пройденным этапом в компьютерной графике. Связано это с двумя основными факторами - нормативной документацией, построенной на основе анализа освещенности, а также необходимостью получения не фотореалистичной картинке, а непосредственно числовых значений для выполнения нормативных документов. При этом, нормируемые показатели по освещенности позволяют добиваться количественных характеристик в проектируемой ОУ, но вопросы качества освещения остаются не до конца решенными. Для решения вопроса качественных характеристик освещения требуется переход к моделированию пространственно-углового распределения яркости. В настоящей работе мы рассматриваем возможный подход к решению этой задачи на основе решения уравнения глобального освещения локальными оценками метода Монте-Карло.

Ключевые слова: Локальные оценки, качество освещения, яркость, метод излучательности

1. ВВЕДЕНИЕ

В основе современных средств трехмерного моделирования и программ светотехнических расчетов лежит хорошо известное уравнение глобального освещения, являющееся интегральным уравнением Фредгольма второго рода [4]

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

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})$ – яркость в точке \mathbf{r} в направлении $\hat{\mathbf{l}}$, $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}})$ – двунаправлена функция отражения (пропускания), L_0 – яркость непосредственно от источников, $\hat{\mathbf{N}}$ – нормаль в точке \mathbf{r} к поверхности сцены.

Уравнение не имеет аналитического решения и для его моделирования применяются математические методы. Наибольшее развитие методы решения получили в компьютерной графике. Однако в основном они ориентированы на получение фотореалистичной картинке, а не на получение непосредственно пространственно углового распределения яркости. При этом при моделировании

осветительных установок ставится именно задача анализа распределения светотехнических характеристик в пространстве. Конечной целью светотехнического проектирования является определение типа, мощности, количества, месторасположения и ориентации световых приборов, при которых обеспечиваются нормативные светотехнические требования к данной ОУ [13]. При этом под осветительной установкой понимается комплексное светотехническое устройство, предназначенное для искусственного и (или) естественного освещения и состоящая из источника оптического излучения, осветительного прибора или светопропускающего устройства, освещаемого объекта или группы объектов, приемника излучения и вспомогательных элементов, обеспечивающих работу установки (проводов и кабелей, пускорегулирующих и управляющих устройств, конструктивных узлов, средств обслуживания) [13].

При моделировании осветительных установок, в настоящее время, используются две основные системы проектирования – DIALux [11] и Relux [12]. Оба программных продукта построены на моделировании уравнения излучательности методом конечных элементов – метод излучательности. Уравнение излучательности, представляет собой хорошо известное следствие уравнения глобального освещения, хотя и было сформулировано независимо [7, 8]

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

где $M(\mathbf{r})$ – светимость, $F(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – форм-фактор (коэффициент использования), а $\Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – функция видности, равная единице в случае видимости точки \mathbf{r} из точки \mathbf{r}' и нулю в противном случае.

Отметим, что в практике моделирования трехмерных сцен в компьютерной графике, метод излучательности уже практически не используется. Основными недостатками его является само диффузное приближение модели отражения и метод конечных элементов, не позволяющий обрабатывать большие сцены. Эти и другие факторы стали объективной предпосылкой для появления DIALux Evo [11] – системы моделирования осветительных установок на основе фотонных карт. Однако, несмотря на то, что данный продукт существует уже несколько лет, он так и не снижал популярности в практике моделирования ОУ.

Использование в светотехнике метода излучательности при моделировании ОУ не просто исторически сложившийся процесс, но и объективный процесс. Дело в том, что практически вся нормативная база построена на нормировании освещенности, а не истинно видимой глазом

характеристики – яркости. Поэтому процесс перехода на новые алгоритмы решения уравнения глобального освещения в моделировании ОУ связан и с переходом на новую нормативную базу, построенную на основе анализа пространственно-углового распределения яркости. Однако отметим, что как показывают наши исследования только яркости недостаточно для описания качественных характеристик освещения.

В нашей работе мы рассматриваем возможность моделирования пространственно-углового распределения яркости с помощью локальных оценок метода Монте-Карло. Также мы рассматриваем возможность построения видо-независимой системы расчета трехмерной сцены с диффузно-направленной моделью отражения.

2. ЛОКАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ

Уравнение глобального освещения (1) может быть записано в виде интеграла по пространству и разложено в ряд Неймана. После ряда преобразований полученное разложение может быть записано в виде [2]

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\pi} \frac{L_0(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i) \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}_i, \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})}{p_1(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i) p_2(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})} + \frac{1}{\pi^2} \frac{L_0(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i) \sigma(\mathbf{r}_{2i}; \hat{\mathbf{l}}_i, \hat{\mathbf{l}}_{2i}) G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{2i})}{p_1(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i) p_2(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{l}}_i \rightarrow \mathbf{r}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}_{2i})} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_{2i}, \mathbf{r})}{p_2(\mathbf{r}_{2i}, \hat{\mathbf{l}}_{2i} \rightarrow \mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}})} + \dots \right), \quad (3)$$

где G – геометрический фактор [2], а p – плотность вероятности перехода в методе Монте-Карло.

Это выражение может быть интерпретировано как Марковская цепь, с ядром описывающим переход

$$k(x_i \rightarrow x) = \frac{\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}_i, \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})}{p_2(x_i \rightarrow x)}. \quad (4)$$

В результате построения Марковской цепи мы можем на каждом ее акте оценивать ядро перехода для исследуемых точек $\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}$, накапливая статистику, мы получим непосредственно яркость в заданных точках по заданным направлениям [1]. Такая оценка может быть названа локальной оценкой по аналогии с оценками в атмосферной оптике [6].

Отметим, что полученная оценка позволяет моделировать яркость на поверхности, тогда как в светотехнических задачах при анализе, особенно качественных характеристик, требуется распределение яркости относительно наблюдателя. То есть пространственно углового распределения яркости относительно точки наблюдения (камеры в случае визуализации). При этом как показано в работе [2] требуется переход к новому варианту УГО сформулированному относительно точки в пространстве

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_{z_0}(\mathbf{r}_z, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi} C_{01} \int L_z(\mathbf{r}_1, \hat{\mathbf{l}}') \sigma(\mathbf{r}_2; \hat{\mathbf{l}}', \hat{\mathbf{l}}) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \times \\ \times \delta(\Pi(\mathbf{r} - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_2| \hat{\mathbf{l}})) d^3 r_1 d^3 r_2, \quad (5)$$

где $\Pi(\mathbf{r} - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_2| \hat{\mathbf{l}})$ – описывает точку пересечения с поверхностью $\Pi(\mathbf{r})=0$.

Соответствующая последнему выражения оценка может быть названа двойной локальной оценкой, так как для устранения δ -функции требуется дополнительный промежуточный узел [2].

Впервые алгоритм сходный локальным оценкам был сформулирован в работе [9] в феноменологическом подходе и получил название Instant Radiosity. При этом фактические данный алгоритм вытекает из локальных оценок, впервые предложенных в атомной физике [3] и получивший развитие в оптике атмосферы и океана [6].

Отметим, что в задачах визуализации трехмерных сцен, прежде всего, стоит цель фотореалистичного воспроизведения картинке, где не столь важны абсолютные значения яркости, тогда как при решении светотехнических задач важно именно число, которое должно удовлетворять нормам. В нашей работе мы получили строгое математическое обоснование алгоритма локальных оценок.

3. ВИДОНЕЗАВИСИМАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Свою популярность в задачах светотехнического моделирования метод излучательности получил еще и по причине возможности расчета освещенности в сцене не зависящего от положения точки наблюдения. Это позволяет проводить быструю оценку всех количественных характеристик освещения. Однако при этом расчеты проводятся в диффузном приближении.

В рамках нашей работы мы реализовали видонезависимый алгоритм моделирования яркости с диффузно-направленным отражением на основе локальных оценок [2]. Также как и в методе конечных элементов, мы разбиваем сцену на сетку, однако расчет производим не внутри грани, а в ее вершинах.

В вершинах граней \mathbf{r} мы фиксируем направления $\hat{\mathbf{l}}$, в которых локальной оценкой вычисляем значения яркости. После расчета мы можем аппроксимировать яркость в каждой вершине в зависимости от положения наблюдателя. А на основе яркостей в вершинах мы можем вычислить через барицентрические координаты яркость в любой точке в пределах каждой грани. Таким образом, может быть получена яркость на любой поверхности сцены в требуемом нам направлении. На рисунке 1 показана визуализация сцены задачи Соболева [14] в зависимости от положения камеры. На нем хорошо видно как меняется положение блика.

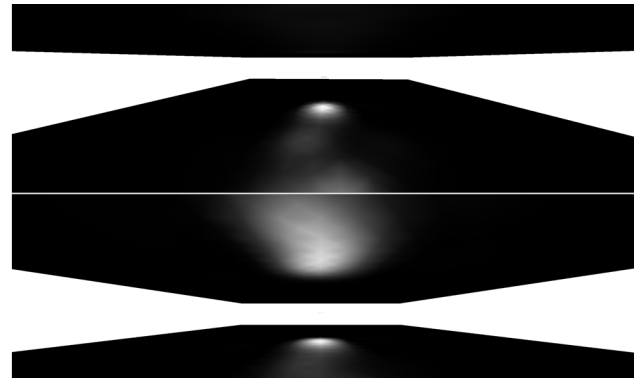


Рисунок 1. Визуализация сцены задачи Соболева рассчитанной видонезависимой локальной оценкой в зависимости от положения камеры.

В приведенной сцене было 4096 расчетных вершин с 512 направлениями в каждой. Расчеты проводились на одном ядре процессора Intel Core i5. При этом для достижения точности в 5% потребовалось около 10 минут.

Отметим, что локальные оценки, и предложенный метод видонезависимого моделирования яркости в частности, в целом позволяют перейти к анализу распределения яркости в трехмерной сцене, а тем самым и ставить новые вопросы о качестве освещения и переходить к их непосредственному решению.

4. О КАЧЕСТВЕ ОСВЕЩЕНИЯ

Все характеристики ОУ можно условно разделить на количественные и качественные. К первым относятся хорошо известные освещенность и яркость, которые характеризуют количественную оценку освещения. Они относительно просто рассчитываются, хорошо изучены, широко распространены. Ко вторым относятся такие величины, как UGR, показатель ослепленности, коэффициент пульсации, индекс цветопередачи и др.

В целом, вопрос качества освещения по-прежнему остается плохо раскрытым, поскольку качество – сугубо субъективная характеристика, которая должна опираться на объективные величины, чтобы имелась возможность ее оценки. Мы предлагаем следующее определение – освещение можно считать качественным, если оно способствует повышению зрительной работоспособности человека и помогает ему решать задачи, поставленные в рамках той или иной сцены освещения.

Наличие ярких источников в сцене может вызывать у наблюдателя чувство дискомфорта и даже ослепленности, что в свою очередь ухудшает зрительную работоспособность и в худшем случае приводит к временной утрате работоспособности.

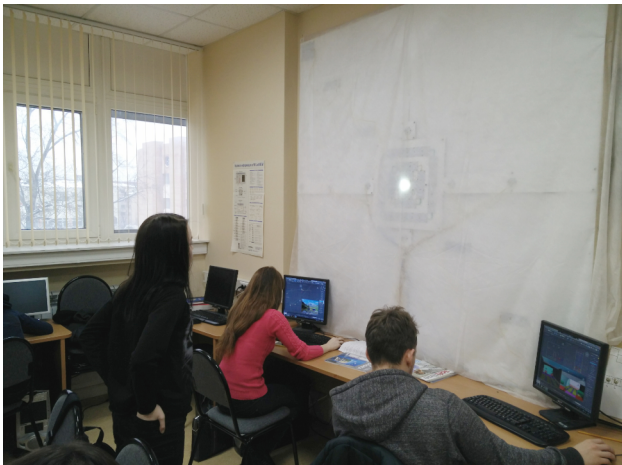


Рисунок 2. Экспериментальная установка.

В рамках нашей работы на кафедре Светотехники МЭИ было создана экспериментальная установка для исследований качественных характеристик освещения. И в частности был подтвержден эксперимент, проведенный в работе [10].

Благодаря нашим исследованиям и работе [10], мы установили основные причины, вызывающие дискомфорт и сформулировали следующие факторы, влияющие на качество освещения:

- распределение яркости в сцене;
- зрительная адаптация (дневная, темновая и смешанная);
- яркость блеских источников, создающих дискомфорт;
- спектральный состав ИС;

Таким образом, как уже было сказано ранее, только яркости недостаточно для оценки качества освещения.

В современных нормативных документах чаще всего упоминаются освещенность для внутреннего освещения и яркость для наружного. В редких случаях нормируются и качественные показатели, но они учитываются, как правило, только в тех проектах, в которых предъявляются повышенные требования к качеству освещения (аэропорты, ж/д вокзалы и пр.)

В европейской и российской практике самое широкое применение среди качественных характеристик освещения получил объединенный показатель дискомфорта UGR [5]:

$$UGR = 8 \lg \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right], \quad (6)$$

где L_i – яркость блеского источника, кд/м^2 , ω_i – угловой размер блеского источника, стер , p_i – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения, L_a – яркость адаптации, кд/м^2 .

Современные программные реализации расчета UGR в таких приложениях, как DIALux и Relux, основаны на их определении из уже известных количественных. Однако в сложных сценах с не диффузными поверхностями погрешности подобных методов могут многократно возрастать.

Одной из современных задач светотехники, безусловно, является ориентация на качественные характеристики освещения. Предстоит не только изменить подход к проектированию осветительных установок, но и разработать методы объективной оценки качественных характеристик по известному распределению яркости. Это позволит проектировать ОУ с безопасным и качественным освещением для работы, отдыха и жизни людей.

Отметим также, что за рамками данной работы пока остается вопрос спектрального состава источников света и его влияние на вопросы качества освещения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы решения УГО в компьютерной графике получили существенно большее развитие, чем в светотехнике. При этом важнейшей вехой стала возможность получения несмещенного значения яркости в произвольной точке сцены. Это открывает огромный потенциал и для светотехники, где все более и более нарастает потребность в переходе от нормирования интегральной характеристики освещенности,

не видимой глазом человека, к нормированию яркости и переходу к проектированию систем освещения на заданное качество освещения. В настоящей работе выполнены экспериментальные исследования качественных показателей освещения, которые могут быть использованы в практике светотехнического проектирования.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Budak V., Zheltov V.: Local Monte Carlo estimation methods in the solution of global illumination equation // WSCG 2014 Communication Papers Proceedings, 2014, P. 25-31.
- [2] Budak V., Zheltov V., Notfulin R., Chembaev V. Relation of Instant Radiosity Method with Local Estimations of Monte Carlo Method // WSCG 2016
- [3] M. H. Kalos On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo // Nuclear Science and Engineering, 1963, Vol. 16, N.1, p.111-117.
- [4] Kajiya J. T. The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86), 1986. V.20, N4. – P.143-150.
- [5] Свод правил СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция», 2011
- [6] Monte-Carlo Methods in Atmospheric Optics / G.I.Marchuk, ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1980
- [7] Cindy Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg and B. Battaile Modeling the interaction of light between diffuse surfaces // Computer Graphics, 1984, Vol. 18, No. 3
- [8] Moon P. 1940. On Interreflections. JOSA, 1940 Vol. 30. N2. P. 195 –205.
- [9] Keller A. 1997. Instant radiosity. In Proceedings of SIGGRAPH 1997. - P. 49-56.
- [10] Luckiesh M., Guth S.K. Brightness in the visual field at borderline between comfort and discomfort // Illuminating Engineering, 1949. V.44, No. 11. P.650
- [11] <https://www.dial.de>
- [12] <http://www.relux.biz>
- [13] Ю. Б. Айзенберг Справочная книга по светотехнике // М. Знак – 972 с.
- [14] Соболев В.В. Точечный источник света между параллельными плоскостями //ДАН СССР, 1944. Т.42, №4. – С.176-177.