

УДК 004.925.3:628.987

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-70-75

Видонезависимое моделирование осветительных установок локальными оценками метода Монте–Карло

В.П. Будак, В.С. Желтов, Т.В. Мешкова, В.Д. Чембаев

Задача автоматизированного проектирования осветительных установок актуальна более 10 лет. Наиболее популярные пакеты автоматизированного проектирования по расчету осветительных установок, такие как DIALux и Relux, основаны на решении уравнения излучательности. Оно позволяет моделировать распределения освещенности, и на его основе можно проводить расчет количественных нормируемых светотехнических характеристик. Однако глаз человека воспринимает яркость, а не освещенность. Таким образом, качественные параметры освещения неразрывно связаны с пространственно-угловым распределением яркости, для вычисления которого необходимо решение уравнения глобального освещения. Исходя из инженерных задач проектирования осветительных установок, становится очевидна потребность наличия видонезависимого расчета сцен освещения — возможности визуального представления сцены с различных положений визирования (камеры).

Рассмотрен метод локальных оценок метода Монте–Карло, как один из эффективных методов решения уравнения глобального освещения. Представлен алгоритм видонезависимого моделирования на базе метода локальных оценок. Выполнено исследование различных алгоритмов решения задачи поиска пересечения разыгрываемых лучей источника света с исследуемой сценой освещения.

Ключевые слова: 3D-моделирование сцен, трассировка лучей, метод Монте–Карло, локальные оценки, видонезависимая визуализация, качество изображения.

Для цитирования: Будак В.П., Желтов В.С., Мешкова Т.В., Чембаев В.Д. Видонезависимое моделирование осветительных установок локальными оценками метода Монте–Карло // Вестник МЭИ. 2021. № 1. С. 70—75. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-70-75.

View-independent Modeling of Lighting Systems by Local Estimations of the Monte Carlo Method

V.P. Budak, V.S. Zheltov, T.V. Meshkova, V.D. Chembraev

Computer-aided designing of lighting systems has been remaining of relevance for more than ten years. The most popular CAD packages for calculating lighting systems, such as DIALux and Relux, are based on solving the radiosity equation. By using this equation, the illuminance distributions can be modeled, based on which the standardized quantitative lighting characteristics can be calculated. However, the human eye perceives brightness, not illuminance. The qualitative parameters of lighting are closely linked with the spatial-angular distribution of brightness, for calculation of which it is necessary to solve the global illumination equation. An analysis of the engineering matters concerned with designing of lighting systems points to the obvious need for a so-called view-independent calculation of lighting scenes, which means the possibility to visually represent a scene from different positions of sighting (a camera). The approach based on local estimations of the Monte Carlo method as one of efficient techniques for solving the global illumination equation is considered, and an algorithm for view-independent modeling based on the local estimations method is presented. Various algorithms for solving the problem of searching the intersection for the casted beams from a light source with the studied illumination scene are investigated.

Key words: modeling of 3D scenes, beam tracing, Monte Carlo method, local estimations, view-independent visualization, image quality.

For citation: Budak V.P., Zheltov V.S., Meshkova T.V., Chembraev V.D. View-independent Modeling of Lighting Systems by Local Estimations of the Monte Carlo Method. Bulletin of MPEI. 2021;1:70—75. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-1-70-75.

Введение

Задача автоматизированного проектирования осветительных установок интересует ученых более 10 лет. Существует множество математических методов, реализующих их алгоритмов, и целых программных пакетов автоматизированного проектирования, пользующихся большим спросом в инженерной прак-

тике. Среди наиболее популярных программ по расчету осветительных установок можно выделить две: DIALux и Relux [1 — 3]. Алгоритмы, заложенные в них, решают уравнение глобального освещения в диффузном приближении или так называемое уравнение излучательности, позволяющее моделировать распределения освещенности, на основе которого проходят расчеты

таких нормируемых светотехнических характеристик, как: вертикальная, горизонтальная и цилиндрическая освещенности, световой поток, сила света.

Глаз человека, строго говоря, воспринимает пространственно-угловое распределение яркости [4]. Возможность его моделирования подводит исследователя к ряду новых задач.

Так, 3D-моделированию сцен освещения с произвольными моделями переотражений дает фотореалистичные изображения.

Видонезависимое моделирование позволяет, единожды проведя расчет сцены, получать изображения для различных точек наблюдения (камер);

Оценка качества изображения показывает наличие блестящих источников света в поле зрения, создающих ощущение дискомфорта или ослепленности у наблюдателя.

На сегодняшний день существуют несколько методов моделирования пространственно-углового распределения яркости. Среди них интересны методы фотонных карт [5] и двойных локальных оценок метода Монте-Карло.

Метод фотонных карт реализован в программе DIAlux Evo [6], однако в кругах инженеров-проектировщиков осветительных установок фаворитом является предыдущая классическая версия [7]. Стоит отметить, что метод использовался в светотехнике ранее, в частности, при моделировании щелевого световода [8, 9]. Он обладает известными недостатками, и наиболее существенный из них — необходимость аппроксимации рассчитанных значений на стадии финальной сборки.

Метод двойных локальных оценок метода Монте-Карло позволяет моделировать пространственно-угловое распределение яркости с учетом произвольных моделей переотражений. В отличие от других методов в нем нет необходимости разделять процесс моделирования на две стадии (построение виртуальных источников света, расчет их вклада в яркость в исследуемой точке). Таким образом, он позволяет получать все изображение сцены уже по одному разыгранному лучу [10]. Рассмотрим некоторые аспекты реализации данного метода.

Метод локальных оценок метода Монте-Карло

Уравнение глобального освещения (УГО) сформулировано Ж.Т. Кайиуа в 1986 г. [11]:

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

где $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$ — яркость в точке \mathbf{r} по направлению $\hat{\mathbf{I}}$; $\sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}')$ — двунаправленная функция отражения (отражения или пропускания); L_0 — прямая компонента яркости непосредственно от источников; $\hat{\mathbf{N}}$ — нормаль в точке \mathbf{r} к элементу поверхности сцены.

Уравнение глобального освещения представляет собой интегральное уравнение Фредгольма второго рода

и не имеет аналитического решения. В то же время оно учитывает все фотометрические явления на границе объектов 3D-сцены (диффузно-зеркальное отражение, пропускание и собственное излучение), включает все возможные акты переотражений и пропускания света в сцене, а потому получаемое решение физически адекватно распределению яркости в реальной сцене наблюдения.

Один из методов решения УГО — метод локальных оценок метода Монте-Карло. Он берет свое начало из атомной физики [12] и развивается в оптике атмосферы и океана при решении уравнения переноса излучения [13].

С учетом $\hat{\mathbf{I}}' = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$ (1) можно переписать как:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) + \frac{1}{\pi} \int L(\mathbf{r}', \hat{\mathbf{I}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') \times \delta\left(\hat{\mathbf{I}}' - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right) \frac{|(\hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{I}})| |(\hat{\mathbf{N}}', \hat{\mathbf{I}}')|}{(r - r')^2} d^2 r'. \quad (2)$$

Ядро уравнения (2) содержит в себе δ -функцию, определяющую особенность углового распределения. Она фактически делает невозможным моделирование яркости методами Монте-Карло. Устранить ее можно, проинтегрировав уравнение по пространству. С учетом замены отражения на диффузное, уравнение становится эквивалентным уравнению излучательности, сформулированному в 1984 г. [14]:

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

Таким образом, оценка I_φ для $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$ примет вид:

$$I_\varphi = M \sum_{n=0}^{\infty} Q_n k(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \quad (3)$$

где $k(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ — ядро уравнения (2); Q_n — вес марковской цепи; M — математическое ожидание различных случаев траектории цепи [15].

Марковская цепь моделирует случайную последовательность лучей, блуждающих по сцене. Вес первого луча Q_1 равен начальной яркости источника света $L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$, а $k(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ определяет вероятность перехода из точки марковской цепи в точку \mathbf{r} [16]. Для всех узлов траектории, где луч пересекается с поверхностью сцены, вычисляют вклад в освещенность сцены в точке \mathbf{r} на основе ядра уравнения (3).

Величины L_0 и $k(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ определяют статистические веса марковской цепи Q_n . В случае диффузной модели отражения каждый последующий вес умножается на коэффициент отражения.

Оценка (3) получила название локальной оценки метода Монте-Карло [13], поскольку позволяет оценить освещенность в заданной точке сцены. Таким образом, для получения освещенности в точке \mathbf{r} не-

обходимо построить марковскую цепь, а для каждого преломленного участка вычислить ядро $k(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$. Математическое ожидание полученной величины и будет равно освещенности [15].

Следует отметить, что принципиальным отличием локальной оценки от прямого моделирования является ее возможность определять значения освещенности сразу в нескольких точках трассы.

Двойная локальная оценка

Уравнение глобального освещения выглядит следующим образом:

$$L = L_0 + \mathbf{K}L. \quad (4)$$

Продемонстрируем решение уравнения (4) в виде ряда Неймана [17]:

$$\begin{aligned} L &= \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{K}^n L_0 = L_0 + \mathbf{K}L_0 + \sum_{n=2}^{\infty} \mathbf{K}^n L_0 = \\ &= L_0 + \mathbf{K}L_0 + \mathbf{K}^2 \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{K}^n L_0 = L_0 + \mathbf{K}L_0 + \mathbf{K}^2 L \end{aligned}$$

и в нормальной форме:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) &= L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}) + \mathbf{K}L_0 + \\ &+ \frac{1}{\pi^2} \int_{\Sigma} \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{I}}', \hat{\mathbf{I}}) \delta\left(\hat{\mathbf{I}}' - \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}\right) F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \\ &\times \int_{\Sigma} L(\mathbf{r}'', \hat{\mathbf{I}}'') \sigma(\mathbf{r}'; \hat{\mathbf{I}}'', \hat{\mathbf{I}}') \times \\ &\times \delta\left(\hat{\mathbf{I}}'' - \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}''}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}''|}\right) F(\mathbf{r}', \mathbf{r}'') d^3 r'' d^3 r'. \end{aligned} \quad (5)$$

Локальную оценку, соответствующую выражению (5), назовем двойной локальной оценкой [13]:

$$I_{\varphi} = M \sum_{n=0}^{\infty} Q_n k(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \mathbf{r}', \hat{\mathbf{I}}'),$$

где

$$k(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \mathbf{r}', \hat{\mathbf{I}}') = \frac{1}{\pi^2} \sigma(\mathbf{r}'; \hat{\mathbf{I}}'', \hat{\mathbf{I}}') \sigma(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \hat{\mathbf{I}}') F(\mathbf{r}', \mathbf{r}''). \quad (6)$$

В (4) δ -функция исчезает за счет интегрирования, а независимые переменные $\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}}, \mathbf{r}', \hat{\mathbf{I}}', \mathbf{r}'', \hat{\mathbf{I}}''$ соответствуют геометрии распределения луча [13].

Таким образом, двойная локальная оценка метода Монте–Карло позволяет моделировать уравнение глобального освещения и вычислять яркость в заданной точке в заданном направлении для кратностей выше первой. Первая кратность содержится в члене $\mathbf{K}L_0$ и может быть вычислена непосредственно [15].

Видонезависимые локальные оценки

Метод *Instant Radiosity* не получил широкого применения в компьютерной графике, но лег в основу

программ компьютерного моделирования осветительных установок, таких как DIALux и Relux. Главное преимущество метода заключается в возможности расчета глобального освещения вне зависимости от положения камеры (видонезависимом моделировании). Однако в нем использована диффузная модель отражения, при помощи которой невозможно описать реальные материалы. Кроме того, получаемое распределение освещения не является характеристикой, воспринимаемой глазом.

Сформулируем алгоритм видонезависимой локальной оценки. Как и в случае *Radiosity*, вычисления выполним на сетке, которая может быть как простой статической, сформированной до начала вычислений, так и динамически генерируемой. Наша сетка значительно отличается от используемой в методе: если в *Radiosity* яркость усредняется по элементу сетки, то в нашем случае ее можно находить непосредственно в узлах сетки.

Возьмем статическую сетку. Используем некую начальную сцену и разобьем ее на более мелкую сетку и в узлах определим с равномерным шагом по зенитному θ и азимутальному φ углам направления по полусфере, ориентированной по нормали. Это именно те направления в фиксированных точках, в которых мы будем вычислять яркость $L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{I}})$. Пример сетки дан на рис. 1.

Последующий алгоритм не будет ничем отличаться от локальной оценки, приведенной ранее. После расчета с помощью локальной оценки получим значения яркости в узлах сетки по набору направлений.

По аналогии с методом излучательности при финальном сборе изображения или анализе освещения в светотехнических расчетах нас будет интересовать яркость в произвольных точках поверхности. Если в методе излучательности значение светимости не зависит от положения точки наблюдения (камеры), то в данном случае яркость зависима.

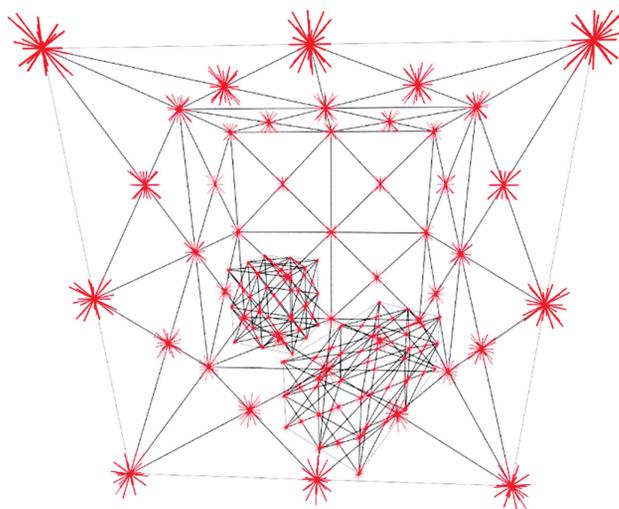


Рис. 1. Определение расчетных точек и направлений видонезависимого расчета

Для определения яркости в произвольной точке элемента необходимо найти яркость в вершинах треугольного элемента сетки в направлении наблюдателя путем аппроксимации яркости, рассчитанной в направлениях, распределенных по полусфере. После чего можно через барицентрические координаты вычислить уже значение яркости в заданной точке внутри треугольного элемента. Пример видонезависимого расчета изображен на рис. 2.

Очевидно, что точность напрямую зависит от размера элемента разбиения сцены и от количества направлений, в которых рассчитывается яркость.

Вопрос выбора количества направлений для расчетов выходит за рамки данного исследования, однако предварительные исследования показали, что, например, для модели Фонга в реальных сценах, чем выше степень косинуса, тем большее число направлений необходимо для описания.

Особенности реализации метода трассировки лучей

Большинство имеющихся на сегодняшний день методов решения УГО можно разделить на две подзадачи: поиск пересечения лучей от источника света с элементами сцены и, непосредственно, вычисление искомых характеристик полученных точек.

С алгоритмической точки зрения первая подзадача довольно трудоемка. Однако, на сегодняшний день она имеет множество различных решений. Проведен анализ существующих реализаций, и наиболее интересными по совокупности критериев оказались: программный пакет трехмерного моделирования Autodesk 3ds Max [18], открытая программная библиотека Visualisation Toolkit (VTK) и свободно распространяемая библиотека Intel Embree [19].

Пакет компьютерного трехмерного моделирования Autodesk 3ds Max — один из наиболее популярных и функциональных в своем роде на сегодняшний день. В рамках настоящей работы изучены возможности использования ядра пакета для решения отдельных подзадач метода трассировки лучей. Программа обладает набором средств для создания программ (SDK — Software Development Kit) с привязками к нескольким популярным языкам программирования: C++, .Net, Python. Ее возможности довольно широки и позволяют как создавать новые объекты и инструменты для создания 3D-моделей, так и взаимодействовать с функциями, необходимыми для рендеринга. Кроме того, имеется встроенный скриптовый язык MaxScript, автоматизирующий большинство ежедневных задач дизайнера, создающий макросы и подключаемые модули расширения. Поставлена задача тестирования имеющейся реализации алгоритмов поиска пересечения лучей с элементами сцены, поскольку вычислять яркость точек предполагалось своими методами. Рассмотрены два варианта взаимодействия с 3ds Max: Python SDK и MaxScript.

MaxScript. Проанализирован встроенный скриптовый язык MaxScript. К его достоинствам отнесены

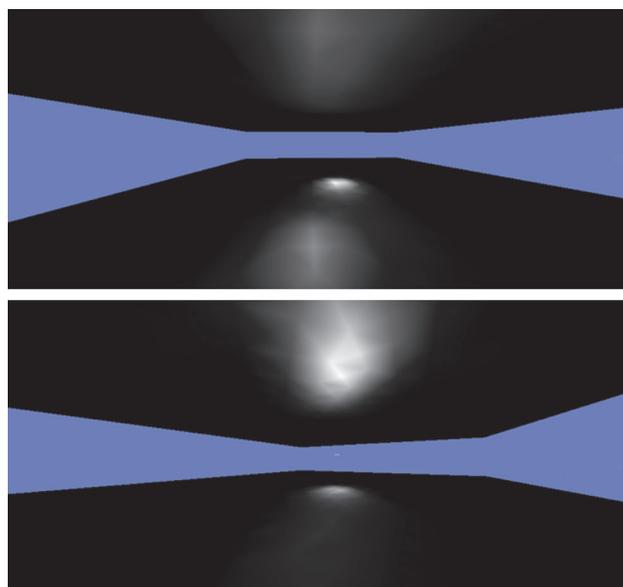


Рис. 2. Задача В.В. Соболева. Видонезависимая визуализация при различных положениях камеры

простота и легкость освоения, что позволяет быстро решать задачи, не тратя существенного времени на изучение. Кроме того, его прямое назначение — создание макросов и плагинов для автоматизации повседневных задач дизайнеров. MaxScript имеет достаточно ограниченные возможности, которые, в свою очередь, легко нивелируются имеющейся двусторонней интеграцией с Python: из скрипта могут быть вызваны подпрограммы, написанные на Python, ровно как и из Python можно вызвать MaxScript. Таким образом, удалось реализовать тестовую программу, решающую задачу Соболева [20]. Результаты оказались следующими.

Вызов геометрических функций ядра 3ds Max из MaxScript работает очень быстро, этого достаточно для того, чтобы не вносить существенный вклад в решение реальных задач трассировки изображений с актуальными на сегодняшний день разрешениями;

Вызов подпрограмм Python из скриптов MS требует существенных ресурсов на передачу данных между процессами, что, учитывая итерационный характер метода трассировки лучей, негативно влияет на производительность всего алгоритма.

Получено удовлетворительное решение задачи, получен прирост производительности алгоритма на порядок в сравнении с ранее разработанным прототипом на Matlab.

Autodesk 3ds Max Python SDK. На момент проведения исследования последней версией 3ds Max — 2014. В этой версии впервые появился Python SDK. К сожалению, сразу было отмечено, что некоторыми функциями класса пользоваться невозможно, ввиду их прямого экспорта из C++ в Python. Они построены по модели C++ с возвратом результата в переменную, переданную по ссылке в качестве аргумента функции, что не работает с неизменяемыми типами данных в Python.

VTK (Virtualization Toolkit) — открытая кроссплатформенная библиотека для трехмерного моделирова-

ния, обработки изображений и прикладной визуализации. Распространяется под лицензией BSD. Написана на C++, имеет привязки к языкам Tcl/Tk, Java, Python. Широко распространена в научном мире за счет широты функционала, простоты применения, наличия привязок к наиболее популярным языкам программирования. При тесте библиотеки применительно к решаемой задаче результаты оказались следующими:

- она может быть использована для поиска пересечений лучей со сценой;
- является хорошо документированной и, благодаря наличию привязки к языку Python, может быть использована для прототипирования алгоритмов и их отладки;
- производительность показала наихудшие результаты среди исследуемых решений.

Таким образом, после тестирования каждого из решений, исходя из соотношения различных критериев (лицензионные ограничения, производительность и простота использования), принято решение об использовании библиотеки Intel Embree по ряду преимуществ:

- открытость и свободное распространение;
- поддержка компанией Intel;
- оптимизация под последние поколения процессоров Intel;
- активное развитие.

Стоит отметить, что Intel Embree поддерживает когерентную трассировку [21], основанную на технологии Intel SSE (Streaming SIMD Extension).

Литература

1. Будаков В.П., Желтов В.С. Современное состояние и перспективы развития компьютерных методов моделирования осветительных установок // Светотехника. 2017. № 1. С. 18—23.
2. DIALux, Lighting, Smart Building [Официальный сайт] www.dial.de (дата обращения 10.02.2020).
3. ReluxNet [Официальный сайт] www.relux.biz (дата обращения 10.02.2020).
4. Ferree C., Rand G. The Efficiency of the Eye Under Different Conditions of Lighting // Trans. Illum. Eng. Soc. IES. 1915. V. 10. Pp. 407—447.
5. Jensen H.W. Global Illumination Using Photon Maps // Rendering Techn. Berlin: Springer-Verlag, 1996. Pp. 21—30
6. Будаков В.П., Мешкова Т.В. DIALux 4.10 и DIALux EVO. Главные различия // Светотехника. 2013. № 3. С. 38—42.
7. Christensen N.J., Jensen H.W. A Practical Guide to Global Illumination and Photon Maps // Proc. Conf. Computer Graphics. 2000. V. 8. P. 77.
8. Коробко А.А. Математическая модель рассеяния материала оптической щели световода // Светотехника. 1983. № 11. С. 8—10.
9. Коробко А.А., Куш О.К., Пятигорский В.М. Расчет профиля зеркального отражателя плоского световода // Светотехника. 1983. № 3. С. 5—7.
10. Chember V., Zheltov V., Budakov V., Nofulin R. Relation of Instant Radiosity Method with Local Esti-

На момент начала исследования Embree поставлялась в двух вариантах: для C++ и .NET. В настоящее время существует неофициальная привязка (Binding) и к языку Python, что в будущем может быть использовано для разработки прототипов новых алгоритмов, однако в настоящей работе использован C++.

Заключение

Метод двойных локальных оценок метода Монте-Карло позволяет вычислять яркость непосредственно в заданной точке для заданного направления с учетом произвольной модели отражений. С помощью алгоритма видонезависимых локальных оценок легко моделировать тела яркости для сцены освещения. Поскольку тело яркости представляет собой распределение яркости по направлениям в точке сцены, можно говорить о том, что алгоритм видонезависимых локальных оценок позволяет моделировать пространственно-угловое распределение яркости для сцен освещения. Данный результат важен, так как открывает ряд новых задач по исследованию возможностей оценки качества освещения (именно пространственно-угловое распределение яркости определяет оценки качественных характеристик освещения) [4].

Еще одним важным практическим результатом исследования является доказанная возможность интеграции разработанных алгоритмов с одним из лидирующих программных пакетов для трехмерного моделирования — Autodesk 3ds Max.

References

1. Budakov V.P., Zheltov V.S. Sovremennoe Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya Komp'yuternykh Metodov Modelirovaniya Osvetitel'nykh Ustanovok. Svetotekhnika. 2017;1:18—23. (in Russian).
2. DIALux, Lighting, Smart Building [Ofits. Sayt] www.dial.de (Data Obrashcheniya 10.02.2020).
3. ReluxNet [Ofits. Sayt] www.relux.biz (Data Obrashcheniya 10.02.2020).
4. Ferree C., Rand G. The Efficiency of the Eye Under Different Conditions of Lighting. Trans. Illum. Eng. Soc. IES. 1915;10:407—447.
5. Jensen H.W. Global Illumination Using Photon Maps. Rendering Techn. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 21—30
6. Budakov V.P., Meshkova T.V. DIALux 4.10 i DIALux EVO. Glavnnye Razlichiya. Svetotekhnika. 2013;3:38—42. (in Russian).
7. Christensen N.J., Jensen H.W. A Practical Guide to Global Illumination and Photon Maps. Proc. Conf. Computer Graphics. 2000;8:77.
8. Korobko A.A. Matematicheskaya Model' Rasseyaniya Materiala Opticheskoy Shcheli Svetovoda. Svetotekhnika. 1983;11:8—10. (in Russian).
9. Korobko A.A., Kushch O.K., Pyatigorskiy V.M. Raschet Profilya Zerkal'nogo Otrazhatelya Ploskogo Svetovoda. Svetotekhnika. 1983;3:5—7. (in Russian).
10. Chember V., Zheltov V., Budakov V., Nofulin R. Relation of Instant Radiosity Method with Local

mations of Monte Carlo Method // Proc. 24th Conf. Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2016. Pp. 189—196.

11. **Kajiya J.T.** The Rendering Equation // Proc. Conf. Computer Graphics. 1986. V. 20. No. 4. Pp. 143—150.

12. **Kalos M.H.** On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo // Nuclear Sci. and Eng. 1963. V. 16. No. 1. Pp. 111—117.

13. **Марчук Г.И., Ермаков С.М., Михайлов Г.А.** Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука СО, 1976.

14. **Goral C.M., Torrance K.E., Greenberg D.P.** Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces // Proc. Conf. Computer Graphics. 1984. V. 18. No. 3. Pp. 213—222.

15. **Будак В.П., Желтов В.С., Калакуцкий Т.К.** Локальные оценки метода Монте-Карло в решении уравнения глобального освещения с учетом спектрального представления объектов // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. № 1. С. 75—84.

16. **Marchuk G.I.** Monte-Carlo Methods in Atmospheric Optics. Berlin: Springer-Verlag, 1980.

17. **ZheltoV V., Budak V.** Local Monte Carlo Estimation Methods in the Solution of Global Illumination Equation // Proc. Conf. Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2014. Pp. 25—30.

18. **Autodesk** [Офици. сайт] www.autodesk.ru (дата обращения 10.02.2020).

19. **Wald I., Woop S., Benthin C., Johnson G.S., Ernst M.** Embree: a Kernel Framework for Efficient CPU Ray Tracing // ACM Trans. Graphics. 2014. V. 33. No. 4. Pp. 143—150.

20. **Соболев В.В.** Точечный источник света между параллельными плоскостями // ДАН СССР. 1944. Т. 42. № 4. С. 176—177.

21. **Wald I., Benthin C., Wagner M., Slusallek P.** Interactive Rendering with Coherent Ray Tracing // Proc. Eurographics. 2001. V. 20. No. 3. Pp. 153—164.

Estimations of Monte Carlo Method. Proc. 24th Conf. Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2016:189—196.

11. **Kajiya J.T.** The Rendering Equation. Proc. Conf. Computer Graphics. 1986;20;4:143—150.

12. **Kalos M.H.** On the Estimation of Flux at a Point by Monte Carlo. Nuclear Sci. and Eng. 1963;16;1:111—117.

13. **Marchuk G.I., Ermakov S.M., Mikhailov G.A.** Metod Monte-Karlo v Atmosfernoi Optike. Novosibirsk: Nauka SO, 1976. (in Russian).

14. **Goral C.M., Torrance K.E., Greenberg D.P.** Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces. Proc. Conf. Computer Graphics. 1984;18;3:213—222.

15. **Budak V.P., Zheltov V.S., Kalakutskiy T.K.** Lokal'nye Otsenki Metoda Monte-Karlo v Reshenii Uravneniya Global'nogo Osveshcheniya s Uchetom Spektral'nogo Predstavleniya Ob'ektov. Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovanie. 2012;4;1:75—84. (in Russian).

16. **Marchuk G.I.** Monte-Carlo Methods in Atmospheric Optics. Berlin: Springer-Verlag, 1980.

17. **ZheltoV V., Budak V.** Local Monte Carlo Estimation Methods in the Solution of Global Illumination Equation. Proc. Conf. Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. 2014:25—30.

18. **Autodesk** [Ofits.Sayt] www.autodesk.ru (Data Ob-rashcheniya 10.02.2020). (in Russian).

19. **Wald I., Woop S., Benthin C., Johnson G.S., Ernst M.** Embree: a Kernel Framework for Efficient CPU Ray Tracing. ACM Trans. Graphics. 2014;33;4:143—150.

20. **Sobolev V.V.** Tochechnyy Istochnik Sveta Mezhd u Parallelnymi Ploskostyami. DAN SSSR. 1944;42;4:176—177. (in Russian).

21. **Wald I., Benthin C., Wagner M., Slusallek P.** Interactive Rendering with Coherent Ray Tracing. Proc. Eurographics. 2001;20;3:153—164.

Сведения об авторах:

Будак Владимир Павлович — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники НИУ «МЭИ», действительный член академии электротехнических наук РФ, e-mail: BudakVP@mpei.ru

Желтов Виктор Сергеевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: zheltov@list.ru

Мешкова Татьяна Валерьевна — научный редактор журналов «Светотехника», Light&Engineering», e-mail: tvmesh@mail.ru

Чембаев Виктор Дмитриевич — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ», e-mail: chembervint@gmail.com

Information about authors:

Budak Vladimir P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, Full Member of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation, e-mail: BudakVP@mpei.ru

ZheltoV Viktor S. — Ph.D. (Techn.), Assistant of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: zheltov@list.ru

Meshkova Tatyana V. — Scientific Editor of the Light and Engineering», «Light&Engineering» Journals, e-mail: tvmesh@mail.ru

Chembaev Viktor D. — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: chembervint@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 15.03.2020

The article received to the editor: 15.03.2020