

УДК 004.925

С. И. ВЯТКИН

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

А. Н. РОМАНЮК, А. Н. РЕЙДА, О. А. ЯКОВЕНКО

Винницкий национальный технический университет

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Реалистичность формирования графических сцен во многом определяется освещенностью окружающей среды. Предлагается эффективное представление карт освещенности окружающей среды. Рассматривается визуализация объектов с применением карт освещения среды. Использование аналитического задания для излучения компонент сферических коэффициентов гармоник освещения позволяет вычислять и применять девять коэффициентов, соответствующим низкочастотным видам освещения, для того чтобы минимизировать ошибки. Излучение нечувствительно к высоким частотам в освещении, и хорошо аппроксимируется, с использованием только девяти параметров. Излучение может быть процедурно представлено в виде квадратичного полинома в декартовых компонентах нормали поверхности и может быть выражено в явной форме. Это приводит к простому и эффективному процедурному алгоритму рендеринга, с использованием аппаратных средств графических процессоров.*

*Метод позволяет использовать произвольное распределение освещения для компонент двунаправленного отражения. Это снимает ограничения текущего графического оборудования для точечных и направленных источников света. Метод позволяет эффективно вычислить текстуры карт окружающей среды освещения и может быть использован в системах высокореалистической графики.*

*Ключевые слова: карты окружающей среды, освещенность, яркость, коэффициенты отражения Ламберта, предварительная фильтрация сферических гармоник.*

С. І. ВЯТКИН

Інститут автоматизації та електрометрії СВ РАН

А.Н. РОМАНЮК, О. М. РЕЙДА, О. О. ЯКОВЕНКО

Вінницький національний технічний університет

## ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ТРИВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АНАЛІТИЧНОГО ЗАВДАННЯ ОСВІТЛЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

*Реалістичність формування графічних сцен багато в чому визначається освітленістю навколишнього середовища. Пропонується ефективно представлення карт освітленості навколишнього середовища. Розглядається візуалізація об'єктів із застосуванням карт освітлення середовища. Використання аналітичного завдання для випромінювання компонент сферичних коефіцієнтів гармонік освітлення дозволяє обчислювати і застосовувати дев'ять коефіцієнтів, відповідним низькочастотних видам освітлення, для того щоб мінімізувати помилки. Випромінювання невідчутно до високих частот в освітленні, і добре апроксимується, з використанням тільки дев'яти параметрів. Випромінювання може бути процедурно представлено у вигляді квадратичного полінома в декартових компонентах нормалі поверхні і може бути виражено в явній формі. Це призводить до простого і ефективного процедурному алгоритму рендеринга, з використанням апаратних засобів графічних процесорів.*

*Метод дозволяє використовувати довільний розподіл освітлення для компонент двонаправленого відображення. Це знімає обмеження поточного графічного обладнання для точкових і спрямованих джерел світла. Метод дозволяє ефективно обчислити текстури карт навколишнього середовища освітлення і може бути використаний в системах високореалістической графіки.*

*Ключові слова: карти навколишнього середовища, освітленість, яскравість, коефіцієнти відображення Ламберта, попередня фільтрація сферичних гармонік.*

S.I. VYATKIN

Institute of Automation and Electrometry SB RAS

O.N. ROMANYUK, O. M. REIDA, O.O. YAKOVENKO

Vinnitsia National Technical University

## VISUALIZATION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS USING AN ANALYTICAL TASK OF ILLUMINATION THE ENVIRONMENT

*The realism of the formation of graphic scenes is largely determined by the illumination of the environment. Illumination in the real scenes is a physically complex phenomenon that includes various sources,*

*such as local illumination areas and large continuous lighting distributions. Current graphics hardware supports only point or directional light sources. One of reasons is the lack of simple procedural formulas for common illumination distributions. The purpose of the work is to use an analytical quantitative formula for radiation, which formalizes observations and allows fundamental approximation.*

*This work focuses on the Lambert component of bidirectional radiation. The radiation environment map is used for diffuse reflection. The map is indexed along the surface normal, each pixel stores the illumination for a certain orientation of the surface.*

*An effective presentation of the illumination the environment maps is proposed. We consider the visualization of objects with the use of the illumination the environment maps. Using the analytical task to emit the components of the spherical harmonics of the illumination harmonics allows us to calculate and apply nine coefficients corresponding to low-frequency types of illumination in order to minimize mistakes. The radiation is insensitive to high frequencies in illumination, and is well approximated using only nine parameters. The radiation can be represented procedurally as a quadratic polynomial in the Cartesian components of the surface normal and can be expressed explicitly. This leads to a simple and effective procedural rendering algorithm, using graphics processors hardware.*

*The method allows to use of arbitrary illumination distribution for the components of bidirectional reflection. This removes the limitations of current graphics equipment for point and directional light sources. The method allows you to effectively calculate the texture maps of the illumination the environment and can be used in systems of highly realistic graphics.*

*Keywords: environment maps, illumination, brightness, Lambert reflection coefficients, preliminary filtration of spherical harmonics.*

### **Постановка проблемы**

Освещение в реальных сценах является физически сложным явлением [1-4], включающим различные источники, такие как области локального освещения и большие непрерывные распределения освещения, такие как свет от Солнца. Текущее графическое оборудование поддерживает только точечные или направленные источники света. Одна из причин – это отсутствие простых процедурных формул для общих распределений освещения.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Для расчета освещения необходимо интегрирование по верхней полусфере для каждого пикселя. Один из подходов к использованию общих распределений освещения – это метод карт окружающей среды. Карты окружающей среды - это представления о происшедшем освещении в какой-то момент времени. С помощью таких карт можно эффективно находить отражения далеких объектов [5]. Предварительно фильтрованные карты окружающей среды, и предварительное вычисление отдельных карт отражения для диффузного и зеркального двунаправленного отражения приведены в [8]. В [7] обработанные общие двунаправленные отражения используют 2D-наборы предварительно созданных изображений. Предварительная фильтрация – это автономный, и вычислительно дорогой процесс. После предварительной фильтрации, рендеринг, как правило, может быть выполнен на интерактивных скоростях с поддержкой графического оборудования с помощью текстуры.

Эмпирически хорошо известно, что отраженная интенсивность от диффузной поверхности изменяется медленно в зависимости от ориентации поверхности. Это было использовано для обоснования представления карты освещенности окружающей среды с низким разрешением и в эффективном вычислении затенения иерархически [8].

### **Цель исследования**

Цель данной работы - использовать аналитическую количественную формула для излучения, которая формализует эти наблюдения и допускает принципиальное приближение.

В настоящей работе основное внимание уделяется Ламбертовской составляющей двунаправленного излучения. Используется карта среды излучения для диффузного отражения. Карта индексируется по нормали поверхности, каждый пиксель хранит освещенность для определенной ориентации поверхности. Для таких приложений, как игры, карты излучения часто хранятся непосредственно на поверхности, а не как функция вектора нормали, и называются световыми картами. Карты освещенности окружающей среды также могут быть расширены до пространственно-изменяющейся освещенности путем вычисления излучения объема [9]. Многие из этих идей могут быть применены для ускорения алгоритмов глобального освещения. Например, интерполяция с использованием градиентов освещенности, или идея сохранения освещенности в зависимости от ориентации поверхности с помощью ориентационных световых карт. Ключом к предлагаемому в работе подходу является быстрое вычисление аналитического приближение к карте среды излучения. Для рендеринга, применяется простой процедурный алгоритм, который работает в интерактивном режиме с

аппаратной поддержкой графических процессоров. Этот процедурный подход предпочтительнее, чем сопоставление текстур в некоторых приложениях.

Требуется пройти только один текстурный проход для рендеринга текстурированных объектов с картой освещенности окружающей среды, поскольку освещенность вычисляется процедурно. С другой стороны, стандартный подход требует отдельной текстуры для освещенности, и должен иметь поддержку мультитекстурирования или несколько проходов текстурирования. В других приложениях, где отображение текстуры относительно недорого, метод может быть использован для очень эффективного вычисления излучения текстурной карты окружающей среды. Такое представление также предлагает новые подходы к вычислению освещенности и рендерингу на основе изображений.

#### Изложение основного материала исследования

Пусть  $L$  обозначает распределение освещения. Излучение  $I$  - функция поверхностной нормали  $\vec{n}$  и задается интегралом над верхней полусферой  $\Psi(\vec{n})$ .

$$I(\vec{n}) = \int_{\Psi(\vec{n})} L(l)(l \cdot \vec{n}) dl \quad (1)$$

Где  $\vec{n}$  и  $l$  - единичные векторы направления, т. е.  $I$  и  $L$  могут быть параметризованы с помощью направлений  $(\alpha, \beta)$  на единичной сфере.

Необходимо масштабировать  $I$  с помощью отражательной способностью поверхности  $\lambda$ , которая может быть зависимой от позиции  $\vec{p}$  и описываться текстурой, чтобы найти излучение  $R$ , которое непосредственно соответствует интенсивности изображения.

$$R(\vec{p}, \vec{n}) = \lambda(\vec{p})I(\vec{n}) \quad (2)$$

Необходимо найти приближение  $I$ . В данной работе применяются формулы для прямого рендеринга диффузных объектов с картами среды. Формулы содержат компоненты сферических гармонических коэффициентов. Сферические гармоники являются на сфере аналогом базису Фурье на прямой или круге.

$$(x, y, z) = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \beta) \quad (3)$$

$I(\alpha, \beta)$  и  $L(\alpha, \beta)$  могут быть представлены коэффициентами —  $I_{km}$  и  $L_{km}$  в их сферическом гармоническом расширении.

$$I(\alpha, \beta) = \sum_{km} I_{km} G_{km}(\alpha, \beta) \quad (4)$$

$$L(\alpha, \beta) = \sum_{km} L_{km} G_{km}(\alpha, \beta) \quad (5)$$

где  $G_{km}$  - сферические гармоники:

$$G_{00}(\alpha, \beta) = const_1 \quad (6)$$

$$(G_{11}; G_{10}; G_{1-1})(\alpha, \beta) = const_2(x, y, z) \quad (7)$$

$$(G_{21}; G_{2-1}; G_{2-2})(\alpha, \beta) = const_3(xz; yz; xy) \quad (8)$$

$$G_{20}(\alpha, \beta) = const_4(3z^2 - 1) \quad (9)$$

$$G_{22}(\alpha, \beta) = const_5(x^2 - y^2) \quad (10)$$

Также определим  $A = (\vec{n} \cdot l)$  с коэффициентами  $A_{km}$ . Поскольку нет азимутальной зависимости,  $m = 0$ , используем только индекс  $k$ .

$$A(\alpha) = \max[\cos(\alpha, 0)] = \sum_k A_k G_{10}(\alpha) \quad (11)$$

С помощью этих определений можно показать, что

$$I_{km} = \sqrt{4\pi A_k L_{km} / 2k + 1} \quad (12)$$

Определим новую переменную

$$\hat{A}_k = \sqrt{4\pi A_k / 2k + 1} \quad (13)$$

Для рендеринга, будет удобно расширить

$$I(\alpha, \beta) = \sum_{km} \hat{A}_k L_{km} G_{km}(\alpha, \beta) \quad (14)$$

Аналитическая формула для  $A_k$  может быть получена. Можно показать, что  $\widehat{A}_k$  обращается в нуль для нечетных значений  $k > 1$ , и снизиться очень быстро до  $k^{-5/2}$ . Аналитические формулы приведены ниже

$$\begin{aligned} k = 1, \widehat{A}_1 &= 2\pi/3, \\ k > 1, \text{ odd}, \widehat{A}_k &= 0 \\ k \text{ even}, \widehat{A}_k &= \frac{2\pi(-1)^{k/2-1}}{(k+2)(k-1)} \left[ \frac{k!}{2^k \left(\frac{k}{2}!\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Для рендеринга, нужно учитывать только низкочастотное освещение. Работая в частотном пространстве, используем низкочастотный характер  $A = (\vec{n} \cdot \vec{l})$ , применяя несколько коэффициентов вместо полного полусферического интеграла. Простая форма первых девяти сферических гармоник, делает реализацию простой.

#### Предварительная фильтрация

Для данной карты окружающей среды, находим девять коэффициентов освещения, путем интегрирования вместо сферических гармоник базисной функции. Каждый цветовой канал обрабатывается отдельно, поэтому коэффициенты можно рассматривать как значения RGB.

$$L_{km} = \int_{\alpha=0}^{\pi} \int_{\beta=0}^{2\pi} L(\alpha, \beta) G_{km}(\alpha, \beta) \sin \alpha \, d\alpha d\beta$$

Выражения для  $G_{km}$  находятся в соответствии с уравнениями (6-10). Интегралы являются суммами пикселей в карте окружения  $L$ , взвешенными по функциям  $G_{km}$ . Интегралы также можно рассматривать как моменты освещения, или как внутренние произведения функций  $L$  и  $G_{km}$ . Поскольку вычисляем девять чисел, шаг предварительной фильтрации занимает  $O(9S)$  времени, где  $S$ -размер (общее количество пикселей) карты окружающей среды. Для сравнения, стандартный метод вычисления карты текстуры окружающей среды освещенности занимает  $O(T \cdot S)$  времени, где  $T$ - число текселей в карте окружающей среды. Предлагаемый метод поэтому будет приблизительно в  $T/9$  раз быстрее. Хотя обычная карта окружающей среды вычислена на очень низком разрешении  $64 \times 64$ , соответствующий  $T = 4096$ , предлагаемый метод будет почти в пятьсот раз быстрее. Реализована предварительная фильтрация как шаг предварительной обработки данных карты окружающей среды. Время вычисления для карты окружающей среды с разрешением  $300 \times 300$  составило 30 миллисекунд. Это свидетельствует о том, что с применением предлагаемого подхода, удастся обрабатывать сцены с динамическим освещением. Для стандартного метода вычисления полусферического интеграла для каждого пикселя карты среды освещенности заняло примерно два часа. Если явное представление освещенности окружающей среды текстурной карты потребует применить, то сначала надо вычислить девять коэффициентов  $L_{km}$ , используя предлагаемый метод, а затем использовать их для очень быстрого создания карты среды освещения. Максимальная ошибка для любого пикселя, как дробь от общей интенсивности освещения, составляет 9% и соответствует максимальной погрешности в порядке 2 аппроксимации  $A(\alpha)$ . Кроме того, можно показать среднюю ошибку по всем ориентациям поверхности под 3% для любого физического распределения освещения. Для карты окружающей среды, используемые в приведенных примерах, соответствуют сложному естественному освещению, - средняя ошибка меньше 1%, а максимальная ошибка пикселя 5%. На рис. 1 и 2 представлено визуальное сравнение качества результатов со стандартным фильтром. Они показывают, что предлагаемый метод дает perceptively более точный результат.

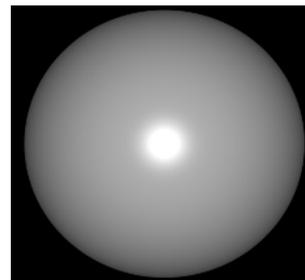
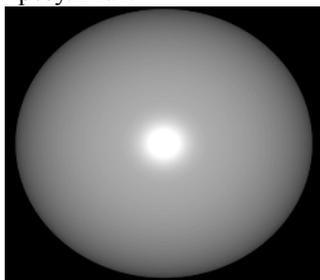


Рис. 1. Стандартный метод вычисления полусферического интеграла

Рис. 2. Предлагаемый метод с использованием  
аналитического задания освещенности окружающей

среды

Конечное изображение состоит из суммы сферических гармонических базисных функций, масштабируемых коэффициентами освещения  $L_{km}$ . Эти базисные функции 3D-излучения зависят от нормалей поверхности и определены над всем объектом, делая возможным генерировать изображение из любой точки зрения. Можно также вручную отрегулировать девять коэффициентов освещения  $L_{km}$  для непосредственного управления внешним видом, как показано на рисунках 3-6. Коэффициенты освещения при необходимости могут быть назначены интуитивно.

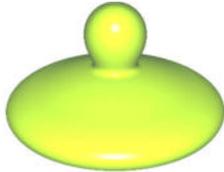


Рис. 3.  $K_m=(0,0)$ ;  $L_{km}=0.5$



Рис. 4.  $K_m=(1,0)$ ;  $L_{km}=0.05$



Рис. 5.  $K_m=(2,0)$ ;  $L_{km}=-0.2$



Рис. 6.  $K_m=(2,2)$ ;  $L_{km}=-0.06$

### Выводы

Предложено аналитическое представление для карт освещенности окружающей среды, с использованием явного задания уравнения. Метод позволяет использовать произвольное распределение освещения для компонент двунаправленного отражения. Это снимает ограничения текущего графического оборудования для точечных и направленных источников света. Метод позволяет эффективно вычислить текстуры карт окружающей среды освещения.

### Список использованной литературы

1. Романюк О. Н., Чорний А. В. Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів : монографія. Вінниця : УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006. 190 с.
2. Романюк О. Н. Комп'ютерна графіка : навч. посіб. Вінниця : ВДТУ, 2001. 129 с.
3. Романюк О. Н. Дослідження дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхонь : оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2007. № 1(13). С. 45-49.
4. Романюк О. Н. Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності : наукові праці Донецького національного технічного університету : Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка. 2008. Випуск 9 (132). С. 145-151.
5. Carey R. J., Greenberg D. P. Textures for realistic image synthesis. Computer & Graphics. 1985. Vol. 9, Iss. 2. P. 81-176. URL: [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(85\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0097-8493(85)90020-2)
6. Zigelman G., Kimmel R., Kiryati N. Texture mapping using surface flattening via multidimensional scaling. Visualization and Computer Graphics IEEE Transactions on. 2002. Vol. 8, № 2. P. 198-207. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/998671>
7. Al-Saidi A., Avis N.J., Grimstead I.J., Rana O.F. Distributed Collaborative Visualization Using Light Field Rendering. Cluster Computing and the Grid 2009. CCGRID '09. 9th IEEE/ACM International Symposium on. 2009. P. 609-614. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5071930>
8. Wolfgang Heidrich and Hans-Peter Seidel. View-independent Environment Maps. URL: <https://my.eng.utah.edu/~cs5610/handouts/parab-env-map.pdf>
9. Dachsbacher C., Stamminger M. Splatting indirect illumination. Proceeding I3D 06 Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games. Redwood City, California, March 14-17, 2006. ACM New York, NY, USA, 2006. P. 93-100. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1111428>

### References

1. Romaniuk O. N., Chornyi A. V. Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannia tryvymirnykh hrafichnykh ob'ektiv : monohrafiia. Vinnytsia : UNIVESUM-Vinnytsia, 2006. 190 s.
2. Romaniuk O. N. Kompiuterna hrafika : navch. posib. Vinnytsia : VDTU, 2001. 129 s.
3. Romaniuk O. N. Doslidzhennia dystrybutyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhon : optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. 2007. № 1(13). S. 45-49.
4. Romaniuk O. N. Klasyfikatsiia dystrybutyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti : naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu : Informatyka, kibernetyka i obchysliuvalna tekhnika. 2008. Vypusk 9 (132). S. 145-151.
5. Carey R. J., Greenberg D. P. Textures for realistic image synthesis. Computer & Graphics. 1985. Vol. 9, Iss. 2. P. 81-176. URL: [https://doi.org/10.1016/0097-8493\(85\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0097-8493(85)90020-2)
6. Zigelman G., Kimmel R., Kiryati N. Texture mapping using surface flattening via multidimensional scaling. Visualization and Computer Graphics IEEE Transactions on. 2002. Vol. 8, № 2. P. 198-207. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/998671>
7. Al-Saidi A., Avis N.J., Grimstead I.J., Rana O.F. Distributed Collaborative Visualization Using Light Field Rendering. Cluster Computing and the Grid 2009. CCGRID 09. 9th IEEE/ACM International Symposium on. 2009. P. 609-614. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5071930>
8. Wolfgang Heidrich and Hans-Peter Seidel. View-independent Environment Maps. URL: <https://my.eng.utah.edu/~cs5610/handouts/parab-env-map.pdf>
9. Dachsbacher C., Stamminger M. Splatting indirect illumination. Proceeding I3D 06 Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games. Redwood City, California, March 14-17, 2006. ACM New York, NY, USA, 2006. P. 93-100. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1111428>