

**КОМПЬЮТЕРНОЕ СИНТЕЗИРОВАНИЕ
ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ДИФFUЗНО-ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ****Е. Ф. Иванкин, Э. В. Петещенков, В. А. Понькин***ООО «РосЭнергоПроект», г. Воронеж**E-mail: rep@rep.vsi.ru*

На основе решения обобщенных уравнений теоретической фотометрии разработан метод компьютерного синтеза физически точных изображений объектов сложной формы, имеющих оптически связанные поверхности с диффузным, зеркальным и диффузно-зеркальным характером отражения. Достоверность метода подтверждена результатами математического моделирования. Показана практическая применимость метода и для синтеза изображений более широкого класса объектов с диффузно-направленным отражением поверхностей.

Введение. В настоящее время для решения задач оценки и снижения оптической заметности объектов широко используется метод математического моделирования с синтезированием фотометрических изображений объектов, физически точно учитывающий форму, оптические свойства поверхности и реальные условия освещения прямым и рассеянным солнечным излучением [1]. Основной трудностью синтеза фотометрических изображений объектов сложной формы является учет многократного отражения оптически связанными поверхностями. Широко известный метод компьютерной графики, основанный на обратной трассировке лучей (ОТЛ) [2], потенциально обеспечивает высокую точность синтезируемых изображений, однако его применение (с использованием ЭВМ широкого пользования) на практике к объектам сложной формы ограничено зеркальным характером отражения, если общее количество трассируемых лучей невелико.

Для поверхностей с рассеивающими свойствами из-за необходимости трассирования большого количества световых лучей при расчете яркости элемента изображения применение метода ОТЛ, даже несмотря на стремительный рост производительности вычислительной техники, не представляется возможным. Так, расчет изображения летательного аппарата (ЛА) с учетом только двух переотражений падающего на объект излучения на ЭВМ класса Pentium IV с тактовой частотой 3 ГГц превышает сутки.

В [1] на основе решения уравнений теоретической фотометрии (УТФ) [3] был разработан «быстрый» алгоритм компьютерного синтеза фотометрических изображений объектов сложной формы, количественно описы-

вающий энергетические, пространственные и спектральные характеристики излучения объектов, находящихся в естественных условиях освещения. Однако предложенный метод расчета яркости элементов поверхности объектов реализован применительно лишь к идеально диффузному (ламбертовскому) закону отражения оптического излучения.

В то же время для снижения оптической заметности совместно с диффузными покрытиями на бликующих участках поверхности объекта могут использоваться зеркальные покрытия, например, на вертикальных элементах конструкции, а также лакокрасочные покрытия различного назначения с диффузно-направленным отражением (ДНО) [4]. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость повышения детальности учета отражающих свойств поверхностей и их оптической связи в математических моделях оценки оптической заметности объектов сложной формы.

Целью данной работы является создание метода синтезирования фотометрических изображений объектов сложной формы с диффузно-зеркальным отражением (ДЗО) поверхностей и исследование возможности его применения для синтезирования изображений объектов с диэлектрическими поверхностями, имеющими диффузно-направленный характер отражения.

Обобщенные уравнения теоретической фотометрии. Разрабатываемый метод основан на решении УТФ, обобщенных на вариант оптически связанных поверхностей с произвольным характером отражения, которые в общем случае с использованием результатов работы [3] можно записать в виде

$$\begin{cases} I_k(\mathbf{r}_n) = \int_{\Delta\omega_\phi^k} I_\phi(\mathbf{r}_n) q_k(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) d\mathbf{r}_n + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \int_{\Delta\omega_{ik}} I_i(\mathbf{r}_{ik}) q_k(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) d\mathbf{r}_n, \\ I_i(\mathbf{r}_{ik}) = \int_{\Delta\omega_\phi^i} I_\phi(\mathbf{r}_n) q_i(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) d\mathbf{r}_n + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_{\Delta\omega_{ij}} I_j(\mathbf{r}_{ij}) q_i(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ij}) d\mathbf{r}_n, \dots, \end{cases} \quad (1)$$

где $I_k(\mathbf{r}_n)$ – яркость k -й поверхности в направлении наблюдения \mathbf{r}_n ; $I_\phi(\mathbf{r}_n)$ – значения яркости освещения с направления \mathbf{r}_n ; $q_k(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n)$ – индикатриса яркости k -й поверхности при освещении с направления \mathbf{r}_n и наблюдении в направлении \mathbf{r}_n ; \mathbf{r}_{ik} – направление от i -й на k -ю поверхность; $\Delta\omega_\phi^k$ – телесный угол, в пределах которого освещается k -я поверхность; $\Delta\omega_{ik}$ – телесный угол, под которым наблюдается i -я поверхность с k -й поверхности; N – количество оптически связанных поверхностей.

Справедливость и конструктивность уравнений (1) подтверждается возможностью получения на их основе известных результатов решения задачи в частных случаях.

Так, для идеально диффузных поверхностей, когда их яркость не зависит от направления наблюдения ($I_i(\mathbf{r}_{ik}) = \text{const}$), уравнения (1) принимают вид

$$I_k(\mathbf{r}_n) = I_k^0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \left[I_i(\mathbf{r}_{ik}) \int_{\Delta\omega_{ik}} q_k(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) d\mathbf{r}_n \right], \quad (2)$$

где $I_k^0 = \int_{\Delta\omega_\Phi^k} I_\Phi(\mathbf{r}_\Pi) q_i(\mathbf{r}_\Pi, \mathbf{r}_\Pi) d\mathbf{r}_\Pi$ – яркость k -й поверхности, создаваемая внешним освещением. Заменяя в (2) интегрирование по телесному углу интегрированием по площади $d\omega_{ik} = \frac{(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_{ki})}{R_{ik}^2} dS_i$ и учитывая, что для ламбертовского закона отражения $q_k(\mathbf{r}_\Pi, \mathbf{r}_\Pi) = \frac{\rho_k^\Pi(\mathbf{n}_k, \mathbf{r}_\Pi)}{\pi}$ [3], получим известную систему уравнений, определяющую яркость оптически связанных диффузных поверхностей [3]:

$$I_k(\mathbf{r}_\Pi) = I_k^0 + \rho_k^\Pi \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N [\varphi_{ik} I_i(\mathbf{r}_{ik})], \quad (3)$$

где \mathbf{n}_i – нормаль к i -й поверхности; R_{ik} – расстояние между i -й и k -й поверхностями; S_i – площадь i -й поверхности; ρ_k^Π – коэффициент диффузного отражения k -й поверхности;

$$\varphi_{ik} = \int_{S_i} \frac{(\mathbf{n}_k, \mathbf{r}_{ik})(\mathbf{n}_i, \mathbf{r}_{ki})}{\pi R_{ij}^2} dS_i$$

– коэффициент связи i -й и k -й поверхностей.

В случае идеального зеркального отражения, когда

$$q_k(\mathbf{r}_\Pi, \mathbf{r}_\Pi) = \begin{cases} \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi = \mathbf{r}_\Pi^3 = 2(\mathbf{r}_\Pi, \mathbf{n}_k) \mathbf{n}_k - \mathbf{r}_\Pi, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

(здесь ρ_k^3 – коэффициент зеркального отражения k -й поверхности; \mathbf{r}_Π^3 – вектор, зеркальный вектору \mathbf{r}_Π), уравнения (1) можно представить в виде

$$I_k(\mathbf{r}_\Pi) = \begin{cases} I_\Phi(\mathbf{r}_\Pi^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \in \Delta\omega_\Phi^k, \\ 0 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \notin \Delta\omega_\Phi^k \end{cases} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \begin{cases} I_i(\mathbf{r}_\Pi^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \in \Delta\omega_{ik}, \\ 0 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \notin \Delta\omega_{ik}. \end{cases} \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что ненулевым может быть только одно из слагаемых, поскольку вектор \mathbf{r}_Π^3 может находиться только в одном из телесных углов $\Delta\omega_\Phi^k$ или $\Delta\omega_{ik}$, где $i \in 1, \dots, N$, $i \neq k$. С учетом этого обстоятельства выражение (5) перепишем в виде

$$I_k(\mathbf{r}_\Pi) = \begin{cases} I_\Phi(\mathbf{r}_\Pi^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \in \Delta\omega_\Phi^k, \\ I_i(\mathbf{r}_\Pi^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_\Pi^3 \in \Delta\omega_{ik}, \quad i \in 1, \dots, N. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогичный анализ для I_i приводит к следующему выражению:

$$I_k(\mathbf{r}_n) = \begin{cases} I_\phi(\mathbf{r}_n^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_\phi^k, \\ I_\phi(\mathbf{r}_n^{3-3}) \rho_k^3 \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_{ik}, \quad i \in 1, \dots, N, \quad \mathbf{r}_n^{3-3} \in \Delta\omega_\phi^i, \\ I_j(\mathbf{r}_n^{3-3}) \rho_k^3 \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_{ik}, \quad i \in 1, \dots, N, \quad \mathbf{r}_n^{3-3} \in \Delta\omega_{ji}, \quad j \in 1, \dots, N, \end{cases} \quad (7)$$

где \mathbf{r}_n^{3-3} – вектор, зеркальный вектору \mathbf{r}_n^3 .

Выражения (6), (7) представляют собой математическую запись итераций метода ОТЛ для зеркально отражающих объектов, описываемого выражением [2]

$$I_k(\mathbf{r}_n) = I_\phi(\mathbf{r}') \prod_{t \in T} \rho_t^3, \quad (8)$$

где \mathbf{r}' – вектор, характеризующий положение трассируемого луча после всех пересечений с поверхностью объекта; T – множество номеров поверхностей, с которыми пересекается трассируемый луч.

Таким образом, из проведенного анализа следует, что обобщенные уравнения (1) описывают известные методы, используемые в работах [1, 2] при синтезировании фотометрических изображений ламбертовских и зеркальных объектов сложной формы, а потому могут служить основой для разработки метода расчета яркости оптически связанных поверхностей.

Решение обобщенных уравнений теоретической фотометрии рассмотрим для случая диффузно-зеркального отражения поверхностей. Как известно [4], индикатриса такого отражения имеет вид

$$q_k(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) = q_k^d(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) + q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n), \quad (9)$$

где

$$q_k^d(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) = \frac{\rho_k^d(\mathbf{n}_k, \mathbf{r}_n)}{\pi}$$

– диффузная компонента отражения;

$$q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) = \begin{cases} \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_n = \mathbf{r}_n^3, \\ 0 & \text{при } \mathbf{r}_n \neq \mathbf{r}_n^3 \end{cases}$$

– зеркальная компонента отражения.

С учетом (9) уравнения (1) можно представить в следующем виде:

$$I_k(\mathbf{r}_n) = \int_{\Delta\omega_\phi^k} I_\phi(\mathbf{r}_n) \left\{ q_k^d(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) + q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) \right\} d\mathbf{r}_n + \\ + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \int_{\Delta\omega_{ik}} q_k^d(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) \left\{ \int_{\Delta\omega_\phi^i} I_\phi(\mathbf{r}_n) [q_i^d(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) + q_i^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik})] d\mathbf{r}_n \right\} d\mathbf{r}_n +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \int_{\Delta\omega_{ik}} q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) \left\{ \int_{\Delta\omega_{\Phi}^i} I_{\Phi}(\mathbf{r}_n) [q_i^{\text{д}}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) + q_i^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik})] d\mathbf{r}_n \right\} d\mathbf{r}_n + \\
& + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \int_{\Delta\omega_{ik}} q_k^{\text{д}}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_{\Delta\omega_{ji}} I_j(\mathbf{r}_n) [q_i^{\text{д}}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) + q_i^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik})] d\mathbf{r}_n \right\} d\mathbf{r}_n + \\
& + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \int_{\Delta\omega_{ik}} q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n) \left\{ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \int_{\Delta\omega_{ji}} I_j(\mathbf{r}_n) [q_i^{\text{д}}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik}) + q_i^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_{ik})] d\mathbf{r}_n \right\} d\mathbf{r}_n. \quad (10)
\end{aligned}$$

Расписывая в (10) $q_k^{\text{д}}(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n)$ и $q_k^3(\mathbf{r}_n, \mathbf{r}_n)$ и преобразуя уравнение, получим математическое выражение, воспроизводящее итерации алгоритма расчета яркости оптически связанных поверхностей с ДЗО, которое можно представить суммой

$$I_k(\mathbf{r}_n) = I_k^{\text{д}} + I_k^{3-\Phi} + I_k^{3-\text{д}}. \quad (11)$$

В выражении (11) первое слагаемое

$$\begin{aligned}
I_k^{\text{д}} = I_k^0 + \rho_k^{\text{д}} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \left[\varphi_{ik} \left(I_i^0 + \rho_i^{\text{д}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \varphi_{ji} I_j(\mathbf{r}_{ji}) + \right. \right. \\
\left. \left. + \begin{cases} I_{\Phi}(\mathbf{r}_{ik}^3) \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_{ik}^3 \in \Delta\omega_{\Phi}^i, \\ I_j(\mathbf{r}_{ik}^3) \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_{ik}^3 \in \Delta\omega_{ji}, \quad j=1, \dots, N \end{cases} \right) \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

представляет собой УТФ, которые аналогичны уравнениям для системы оптически связанных поверхностей с ламбертовским законом отражения (3), но в отличие от последних в них к первоначально падающим на поверхность потокам внешнего освещения, рассчитанным с использованием метода ОТЛ, добавлены также потоки внешнего освещения, которые зеркально отразились от оптически связанных поверхностей.

Второе слагаемое в (11)

$$I_k^{3-\Phi} = \begin{cases} I_{\Phi}(\mathbf{r}_n^3) \rho_k^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_{\Phi}^k, \\ I_{\Phi}(\mathbf{r}_n^{3-3}) \rho_k^3 \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_{ik}, \quad i=1, \dots, N, \quad \mathbf{r}_n^{3-3} \in \Delta\omega_{\Phi}^i, \\ I_j(\mathbf{r}_n^{3-3}) \rho_k^3 \rho_i^3 & \text{при } \mathbf{r}_n^3 \in \Delta\omega_{ik}, \quad i=1, \dots, N, \quad \mathbf{r}_n^{3-3} \in \Delta\omega_{ji}, \quad j=1, \dots, N, \end{cases} \quad (13)$$

также как и (7), представляет собой итерации метода ОТЛ для зеркальной модели отражения и характеризует яркость поверхностей, формируемых в ре-

зультате многократного зеркального отражения оптически связанными поверхностями в направлении наблюдения потоков внешнего излучения.

И, наконец, третье слагаемое в выражении (11)

$$I_k^{3-d} = \begin{cases} \rho_k^3 \left[I_i^0 + \rho_i^d \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \phi_{ji} I_j(\mathbf{r}_{ji}) \right] & \text{при } \mathbf{r}_H^3 \in \Delta\omega_{ik}, i \in 1, \dots, N, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (14)$$

описывает яркость поверхностей за счет зеркального отражения в направлении наблюдения диффузно рассеянных потоков от оптически связанных поверхностей.

В результате анализа полученного решения обобщенных УТФ (1) в виде выражений (11)–(14) был разработан алгоритм синтеза изображений объектов сложной формы с ДЗО:

$$I_k = \sum_{m \in T} \left(I_m^d \prod_{p \in T^{(m)}} \rho_p^3 \right) + I_\Phi(\mathbf{r}') \prod_{t \in T} \rho_t^3, \quad (15)$$

где $T^{(m)}$ – множество, получаемое из T путем удаления из него всех номеров, начиная с m .

В разработанном алгоритме первоначально с использованием метода ОТЛ решаются уравнения (12) и вычисляются яркости I_k^d , а затем в результате трассирования лучей в направлении наблюдения объекта [2] определяются яркости элементов синтезируемого изображения.

Проверка достоверности метода. Точность синтезированных изображений, полученных с учетом (15), невозможно оценить аналитически, а также путем прямого расчета на основе ОТЛ ввиду недопустимо большого времени вычисления эталонного изображения реальных трехмерных объектов. Поэтому для возможности исследования точности разработанного метода синтеза изображений была создана специальная плоскостная модель, обеспечивающая резкое сокращение объема вычислений за счет сведения задачи к двумерной. В качестве объекта наблюдения в модели используются два оптически связанных цилиндра бесконечной длины с исследуемыми вариантами отражения поверхности. Расчет изображения производится разработанным методом и прямым расчетом с использованием ОТЛ, позволяющим получать эталонные изображения с различными вариантами индикатрис ДЗО и ДНО. В качестве критерия точности синтезируемых изображений принята относительная среднеквадратическая ошибка расчета изображения, определяемая как

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(\bar{I}_i - \tilde{I}_i)^2}{I_\Phi(\mathbf{r}_H)^2}}, \quad (16)$$

где \bar{I}_i и \tilde{I}_i – интенсивности i -го отсчета эталонного и полученного разработанным методом изображений соответственно; M – количество отсчетов изображения.

В ходе исследования точности этого метода рассматривались различные варианты поверхностей с ДЗО. В качестве эталонного принималось изображение, рассчитанное методом ОТЛ с учетом 4-кратного отражения (время расчета $\approx(7-9)$ мин). О погрешности вычисления эталонного изображения можно судить по величине ε (16) между изображениями, полученными с учетом 3- и 4-кратного отражений, которая в зависимости от рассматриваемого варианта индикатрисы ДЗО составляла $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$. Проведенные исследования показали, что погрешность синтезирования изображений объектов с различными характеристиками ДЗО разработанным методом при времени вычислений на ЭВМ широкого пользования $\approx 0,5$ с не превышает $2 \cdot 10^{-3}$.

В качестве примера работоспособности метода применительно к реальным объектам сложной формы на рис. 1 представлены синтезированные изображения ЛА с различным видом индикатрисы ДЗО поверхностей при общем коэффициенте отражения 0,4.

Таким образом, полученный метод обеспечивает за малое время расчетов высокую точность синтезирования физически точных изображений объектов сложной формы, поверхности которых обладают диффузным, зеркальным и диффузно-зеркальным характером отражения. Однако поверхности реальных объектов в большинстве случаев имеют диэлектрические покрытия (краски, лаки, эмали и т. п.), характер отражения которых является диффузно-направленным [4]. Поэтому представляет практический интерес исследование возможности применения рассмотренного в предлагаемой работе подхода для построения изображений объектов сложной формы с ДНО, находящихся в естественных условиях освещения.

В соответствии с [4] экспериментально установлено, что рассеивающие свойства диэлектрических поверхностей обуславливаются диффузной и направленной составляющими отражения. При этом диффузная компонента отражения большинства диэлектрических поверхностей достаточно точно описывается законом отражения Ламберта. В связи с этим погрешность синтезированных изображений объектов с ДНО разработанным методом практически полностью будет обуславливаться лучевым (с заданным значением ρ_k^3) представлением направленной компоненты отражения индикатрисы ДНО, которая в действительности с удовлетворительной точностью описывается эллипсоидом вращения [4]. Поэтому при проведении исследований



Рис. 1. Синтезированные изображения ЛА с различными индикатрисами диффузно-зеркального отражения: с преобладанием диффузной (а) и зеркальной (b) компонент отражения

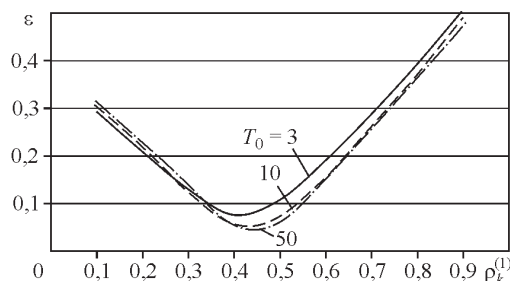


Рис. 2. Погрешность синтезирования изображений при освещении рассеянным в атмосфере излучением

точности синтезирования изображений объектов с ДНО с использованием плоскостной модели учитывалась только направленная составляющая отражения.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости погрешности синтезирования изображений объекта с различными характеристиками ДНО разработанным методом от значений коэффициента зеркального отражения ρ_k^3 для условий рассеянного атмосферой и прямого солнечного освещения соответственно. При расчетах рассматривались поверхности с различной степенью гладкости, характеризующиеся отношениями осей эллипсоида [4]: $T_0 = 50, 10$ и 3 .

Анализ рис. 2 и 3 показывает, что минимум погрешности ε синтезированных изображений объекта с ДНО независимо от их вида достигается при равенстве коэффициента зеркального отражения и среднего по углам освещения реального коэффициента отражения поверхности, т. е. при

$$\rho_k^3 = \rho_k^{\text{опт}} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \rho_k(\theta_{\text{п}}) d\theta_{\text{п}}, \quad (17)$$

где $\rho_k(\theta_{\text{п}})$ – зависимость коэффициента отражения от угла освещения рассматриваемых типов поверхностей с ДНО.

При синтезировании изображений объекта разработанным методом применительно к точечному источнику освещения (Солнцу) с целью избежания «пропусков» бликов было принято следующее допущение. При отклонении трассируемого луча от направления на источник на угол, не превышающий

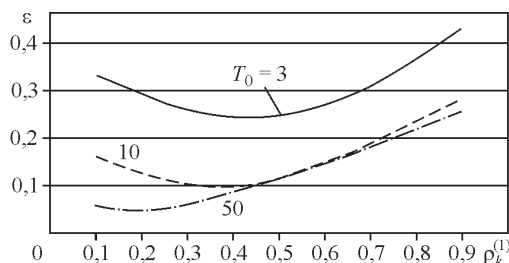


Рис. 3. Погрешность синтезирования изображений при освещении прямым солнечным излучением

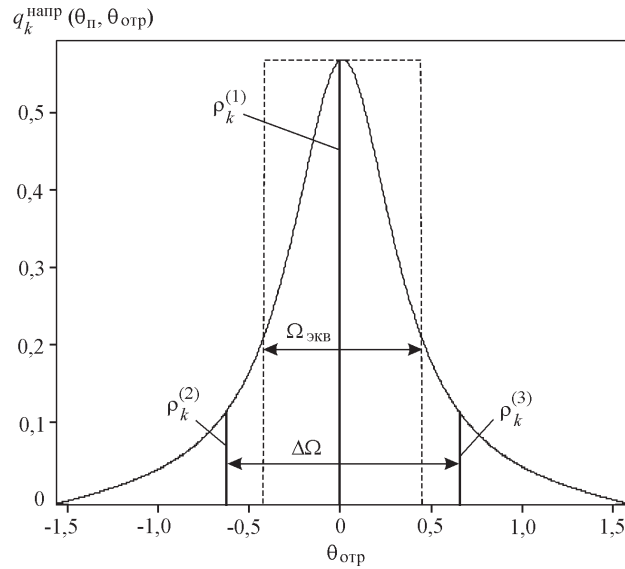


Рис. 4. Трехлучевое приближение направленной компоненты индикатрисы ДЗО

заданное значение, считалось, что этот луч «падает» в точечный источник. Так, на рис. 3 представлены кривые, полученные для значений указанных углов, при которых достигается наименьшая погрешность синтезированных изображений, а именно 2, 9 и 18° для индикатрис ДНО с параметром $T_0 = 50, 10$ и 3 соответственно.

Для повышения точности синтезирования изображений объектов с ДНО при рассеянном освещении с помощью используемого в данной работе подхода можно представить зеркальную компоненту отражения в (9) несколькими лучами. Особенность разработанного алгоритма синтезирования изображений объектов в данном случае будет заключаться в реализации метода ОТЛ как при определении яркостей I_k^n , так и при трассировании лучей из каждого элемента изображения (точки картинной плоскости). Отличие состоит в том, что каждый трассируемый луч после пересечения с поверхностью объекта порождает такое же количество новых лучей для последующего трассирования, как при задании зеркальной компоненты отражения.

С учетом результатов, полученных для однолучевого представления зеркальной компоненты, были проведены исследования для трехлучевого представления. При этом параметры трехлучевой зеркальной компоненты индикатрисы ДЗО (рис. 4) рассчитывались как

$$\begin{cases} \rho_k^{(2)} = \rho_k^{(3)}, \\ \rho_k^{(1)} + \rho_k^{(2)} + \rho_k^{(3)} = \rho_k^{\text{опт}}, \\ \frac{\rho_k^{(2)}}{\rho_k^{(1)}} = 0,5 \frac{q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}}^3 + (\Delta\Omega/2)) + q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}}^3 - (\Delta\Omega/2))}{q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}}^3)}, \end{cases} \quad (18)$$

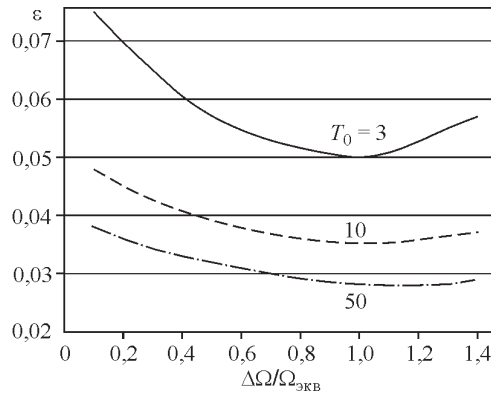


Рис. 5. Погрешность синтезирования изображений при трехлучевой аппроксимации индикатрисы ДНО

где $\rho_k^{(1)}$, $\rho_k^{(2)}$, $\rho_k^{(3)}$ – интенсивности лучей зеркальной компоненты в выражении (9); $q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}})$ – направленная компонента индикатрисы ДНО [4]; $\theta_{\text{отр}}^3$ – угол зеркального отражения, соответствующий максимальному значению $q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}})$; $\pm(\Delta\Omega/2)$ – угол отклонения лучей индикатрисы ДЗО от направления зеркального отражения.

Результаты расчета (среднее время вычислений $\approx 1,5$ с) погрешности синтезирования изображений объекта с ДНО для условий освещения рассеянным земной атмосферой излучением с использованием трехлучевой зеркальной компоненты ДЗО представлены на рис. 5.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что погрешность синтезирования для трехлучевого представления зеркальной компоненты ДЗО ниже, чем для однолучевой зеркальной компоненты (см. рис. 3), а ее минимум достигается при

$$\Delta\Omega = \Omega_{\text{экв}} = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}}) d\theta_{\text{отр}}}{q_k^{\text{напр}}(\theta_{\text{п}}, \theta_{\text{отр}}^3)}. \quad (19)$$

Из сравнения кривых на рис. 2 и 5 следует, что увеличение количества лучей в значительной степени повышает точность синтезирования изображений объектов, поверхность которых имеет широкую индикатрису направленной компоненты отражения. Кроме того, отдельный анализ точности синтезирования изображений оптически связанных и несвязанных элементов поверхности объекта показал, что при многолучевом описании зеркальной компоненты ДЗО по сравнению с одним лучом повышается также точность учета оптической связи.

Заключение. В данной работе предложен новый метод компьютерного синтезирования фотометрических изображений объектов с оптически связанными поверхностями с диффузным, зеркальным и диффузно-зеркальным отражением. Метод основан на решении обобщенных уравнений теоретической фотометрии и в отличие от обратной трассировки лучей приводит к

быстрым алгоритмам, обеспечивающим вычисление изображений объектов сложной формы практически в масштабе реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьева Е. М., Бостынец И. П., Понькин В. А.** Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии /Под ред. В. Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. С. 318.
2. **Шикин А. В., Боресков А. В.** Компьютерная графика. Динамика, реалистические изображения. М.: Диалог-МИФИ, 2000.
3. **Сапожников Р. А.** Теоретическая фотометрия. М.: Энергия, 1997.
4. **Холопов Г. К.** Математическая модель рассеивающих свойств диэлектрических поверхностей // Оптический журнал. 2000. **67**, № 10. С. 30.

Поступила в редакцию 18 июня 2007 г.
