

Физически обоснованный рендеринг в Dagon

Тимур Гафаров

2026

Dagon – фреймворк для разработки компьютерных игр и мультимедийных приложений на языке D. В данной статье описаны математические модели, реализованные в Dagon для освещения трехмерных объектов и сцен при помощи аналитических источников света.

Dagon реализует теорию, описанную в статье «*Real Shading in Unreal Engine 4*»^[1]. Она опирается на модель Тробириджа – Рейца, более известную как GGX. В 1975 году Т. С. Тробиридж и К. П. Рейц вывели функцию распределения нормалей микрограней, представив шероховатости как случайные микроскопические поверхности зеркальных эллипсоидов вращения^[2]. В 2007 году Б. Уолтер и его коллеги независимо пришли к точно такой же модели и назвали ее GGX^[3].

Для зеркально отраженного света и изотропной поверхности GGX использует двулучевую функцию отражательной способности (BRDF) Кука – Торренса^[4] с множителем 4 вместо π ^[3] (так как оригинальная работа использовала другую нормализацию D):

$$L_s = \frac{FGD}{4(N \cdot L)(N \cdot V)}$$

где D – функция распределения нормалей микрограней, G – функция геометрического затенения-маскирования, F – коэффициент отражения Френеля, N – вектор нормали макроповерхности, V – вектор направления на наблюдателя, L – вектор направления на источник света.

Функция D описывает статистическое распределение микрограней в заданной точке макроповерхности – сколько микрограней выровнено относительно полувектора между направлением на источник света и направлением к наблюдателю. Dagon использует функцию распределения, приведенную в статье «*Microfacet Models for Refraction Through Rough Surfaces*»^[3]:

$$D(m) = \frac{\alpha_g^2 \chi^+(m \cdot N)}{\pi \cos^4 \theta_m (\alpha_g^2 + \tan^2 \theta_m)^2}$$

α_g – параметр ширины распределения. В визуализации обычно принимается равным квадрату линейной шероховатости;

m – вектор нормали микрограни. Он равен полувектору (half-vector) между направлением на источник света и направлением к наблюдателю;

θ_m – угол между нормалью микрограни и нормалью макроповерхности. $\cos \theta_m$ – косинус угла θ_m , эквивалентный скалярному произведению $(m \cdot N)$;

$\chi^+(m \cdot N)$ – положительная индикаторная функция, которая принимает значение 0 для микрограней, направленных внутрь геометрии. Если угол между нормалью макроповерхности и нормалью микрограни превышает 90° , скалярное произведение становится отрицательным. Это означает, что такая микрогрань физически не может существовать.

Для вычисления $D(m)$ Dagon использует пространственный метод оптимизации, устраняющий из формулы тангенс. Знаменатель можно переписать следующим образом:

$$\pi \cos^4 \theta_m (\alpha_g^2 + \tan^2 \theta_m)^2 = \pi (\cos^2 \theta_m \alpha_g^2 + \cos^2 \theta_m \tan^2 \theta_m)^2$$

Так как $\cos^2 \alpha \tan^2 \alpha = \sin^2 \alpha$, а $\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha$, выражение внутри скобок упрощается:

$$\cos^2 \theta_m \alpha_g^2 + 1 - \cos^2 \theta_m = \cos^2 \theta_m (\alpha_g^2 - 1) + 1$$

Функция G описывает, какая доля света блокируется микрогранями при заданном угле обзора. Маскирование происходит, когда микрогрань, отражающая свет в сторону наблюдателя, скрывается соседними микрогранями; затенение происходит, когда микрогрань блокируется от источника света и не получает освещения. Для вычисления G используется метод Смита^[5], который разделяет функцию на две независимые вероятности – для направления к наблюдателю и направления к источнику света:

$$G(L, V) = G_1(L) \cdot G_1(V)$$

Формула для одного направления v , описанная в статье «*Microfacet Models for Refraction Through Rough Surfaces*»^[3] выглядит следующим образом:

$$G_1(v) = \chi^+(v \cdot N) \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \alpha_g^2 \tan^2 \theta_v}}$$

где θ_v – угол между нормалью микрограни и заданным направлением (на источник света или к наблюдателю).

В целях оптимизации Dagon вместо полной формулы использует аппроксимацию Шлика, как предлагается в статье «*Real Shading in Unreal Engine 4*»^[1]:

$$G_1(v) = \chi^+(v \cdot N) \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_v (1 - k) + k}$$

Коэффициент k определен следующим образом:

$$k = \frac{\alpha_g}{2}$$

Б. Берли (Disney Animation Studios) при разработке Principled BRDF^[6] предложил выполнять пересчет шероховатости R для аналитических источников света:

$$\alpha_g = \left(\frac{R+1}{2} \right)^2$$

Если подставить это выражение в уравнение k , получается

$$k = \frac{(R+1)^2}{8}$$

Коэффициент отражения Френеля F описывает долю отраженного света в зависимости от угла обзора. В графике реального времени коэффициент отражения обычно рассчитывается как аппроксимация Шлика:

$$F_{Schlick} = F_0 + (1 - F_0)(1 - \cos \theta)^5$$

где F_0 – коэффициент отражения при взгляде под прямым углом.

В классической формуле Шлика на углах скольжения (когда $\cos \theta$ близок к 0) коэффициент отражения всегда стремится к единице. В реальном мире, если поверхность шероховатая, свет, отраженный под углом скольжения, частично блокируется микрогранями, и вследствие этого отражение на краях шероховатых объектов физически не может достичь 1.

Себастьян Лагард предложил заменить константную единицу в формуле на ограничение по шероховатости^[7]:

$$F_{Schlick}(R) = F_0 + (\max(1 - R, F_0) - F_0)(1 - \cos \theta)^5$$

Для диффузной составляющей Dagon использует модель Ламберта, в которой функция распределения нормирована на $1/\pi$. Для сохранения энергии диффузный вклад в освещенность уменьшается на долю зеркально отраженного света:

$$L_d = \frac{1}{\pi} C_{diff} (N \cdot L)(1 - F)(1 - M)$$

где C_{diff} – базовый (диффузный) цвет, M – металличность.

Литература

- [1] Brian Karis, «Real Shading in Unreal Engine 4», SIGGRAPH 2013
- [2] T. S. Trowbridge and K. P. Reitz, «Average Irregularity Representation of a Rough Surface for Ray Reflection», Journal of the Optical Society of America (JOSA), Vol. 65, N. 5, 1975
- [3] Bruce Walter, Stephen R. Marschner, Hongsong Li, Kenneth E. Torrance, «Microfacet Models for Refraction Through Rough Surfaces», EGSR, 2007
- [4] R. Cook, K. Torrance, «A Reflectance Model for Computer Graphics», SIGGRAPH 1981 Proceedings, Vol. 15, No. 3
- [5] Bruce G. Smith, «Geometrical Shadowing of a Random Rough Surface», IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1967
- [6] Brent Burley, «Physically Based Shading at Disney», SIGGRAPH, 2012
- [7] S. Lagarde, «Adopting a Physically Based Shading Model», 2011.