

УДК 535.361

Способы расчета светового режима в объеме полубесконечной диффузно рассеивающей среды методом Монте-КарлоИ.А. Сайдазимов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. В.П. Ципилев
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: august667@mail.ru**Ways for calculating the light regime in the volume of a semi-infinite diffusely scattering medium using the Monte Carlo method**I.A. Saidazimov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.P. Tsipilev
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: audust667@mail.ru

Abstract. This work describes two different methods for calculating illuminance enhancement in a diffusely scattering medium. One of the methods is analytical, the second is based on the Monte-Carlo method. The case of an infinity wide beam falling onto a semi-infinite scattering medium is considered. It has been established that for $n = 1,5$ illumination increases by 9,0, and for $n = 2,0$ by 15,4.

Key words: illuminance, scattering, Monte-Carlo.

Введение

Задача моделирования светораспределения в сильно рассеивающих средах возникает в различных областях физики. Например, при изучении рассеяния света в атмосфере, при рассмотрении взаимодействия лазерного излучения с биотканью в лазерной медицине, при распространении света в прессованных порошках прозрачных материалов и т.п.

Наиболее популярным методом моделирования в задачах светорассеяния можно назвать имитационный метод Монте-Карло [1]. Несмотря на то, что применяется метод Монте-Карло для моделирования светораспределения в мутных средах начал в 80-х годах XX века [2], его до сих пор изучают и модернизируют.

Большинство работ, посвященных моделированию распространения света в мутных средах, ориентированы на расчет коэффициентов диффузного отражения и пропускания. Однако, в ряде задач важно знать световой режим, сформировавшийся в объеме диффузно рассеивающей среды (ДРС). В работе [3] представлены 3 типа алгоритма для расчета коэффициента связи F между освещенностью в объеме среды и освещенностью поверхности, задаваемую падающим направленным пучком: – метод воздействия пучком конечного радиуса, метод точечного воздействия бесконечно узким пучком и метод сложения потоков. При этом, результаты, полученные этими тремя способами, отличны друг от друга. Поэтому интерес представляет изучение этих методов и их модернизация, в частности, метод сложения потоков как потенциально тестовый метод.

Материалы и методы исследования

Метод сложения потоков: в случае воздействия широким пучком ($r_0 \rightarrow \infty$) на идеально прозрачную ДРС, максимум повышения уровня освещенности (коэффициента связи F) может быть рассчитан как бесконечная сумма потоков, формируемых за счет френелевского отражения от границы «ДРС - воздух».

$$F_{\max} = 4 \cdot \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] \cdot (1 + K + K^2 + K^3 + \dots) = 4 \cdot \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{1-K},$$

где n – показатель преломления ДРС, K – коэффициент внутреннего отражения от границы «ДРС - воздух» (коэффициент возврата).

Коэффициент возврата K рассчитывается по формулам Френеля с учетом плотности вероятности падающих на границу «ДРС - воздух» фотонов в зависимости от угла падения. Для случая сферической индикатрисы рассеяния с помощью аналитических рассуждений получено, что функция распределение фотонов f по углу падения α имеет следующий вид:

$$f(\alpha) = 2 \cdot \cos(\alpha).$$

Метод точечного воздействия бесконечно узким пучком и пучком конечного радиуса. Этот метод является одним из способов расчета коэффициента связи F методом Монте-Карло. В этом случае, плоскопараллельный пучок лазерного излучения, падающий на полубесконечную ДРС, заменяется бесконечно узким пучком, который пересекает поверхность в точке $(0, 0, 0)$. В случае воздействия пучком конечного радиуса r_0 должно выполняться условие $x^2 + y^2 < r_0^2$. Принято считать, что при рассеянии света в порошке прозрачного материала на некоторой глубине формируется полностью сферическая индикатриса рассеяния. Таким образом, математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + L \sin \theta \cos \varphi \\ y &= y_0 + L \sin \theta \sin \varphi \\ z &= z_0 + L \cos \theta \\ \cos \theta &= 2\xi_1 - 1, \quad \varphi = 2\pi\xi_2 \\ L &= -\tau \ln(\xi_3) \\ \tau &= 1 / (\beta + \mu) \\ \Lambda &= \frac{\beta}{\beta + \mu} \end{aligned}$$

где x_0, y_0, z_0 – начальные координаты фотона; x, y, z , – новые координаты фотона; θ, φ – углы сферической системы координат; L – длина свободного пробега фотона; ξ_i – случайные числа от 0 до 1; β – коэффициент рассеяния; μ – коэффициент поглощения; Λ – альбеда рассеяния. Если $\xi_4 < \Lambda$, то происходит рассеяние, а если $\xi_4 > \Lambda$ – поглощение.

Формула для расчета коэффициента связи F в зависимости от радиуса пучка r_0 и рассматриваемого слоя ДРС k выглядит следующим образом:

$$F(k, r_0) = \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] \cdot \frac{N(k, r_0)}{N_{dir}(0)},$$

где $N(k, r_0)$ – количество следов, оставленных фотонами в k -ом слое в пределах окружности с $r < r_0$, а $N_{dir}(0)$ – количество следов, оставленных прямыми фотонами в приграничном слое ДРС.

Для сравнения с методом сложения потоков расчеты проводились при $r_0 \rightarrow \infty$ и $\Lambda = 0,9999$.

Результаты

В таблице 1 приведены результаты расчетов коэффициентов возврата K и связи F_{max} методом сложения потоков и методом точечного воздействия при $n = 1,5$ и $n = 2,0$.

Из таблицы 1 видно, что полученные значения K и F_{max} практически полностью совпадают, в отличие от результатов, представленных в работе [3]. Для лучшего сравнения этих методов, необходима дальнейшая модернизация метода сложения потоков с целью расширения её области применения до случая плоскопараллельного пучка конечного радиуса r_0 .

Коэффициенты возврата и связи, рассчитанными разными способами

Показатель преломления n	Метод сложения потоков		Метод воздействия бесконечно узким пучком (Монте-Карло)	
	K	F_{max}	K	F_{max}
1,5	0,576	9,057	0,581	9,031
2,0	0,770	15,459	0,780	15,378

На рисунке 1 представлена зависимость падающих на границу «ДРС - воздух» фотонов от угла падения.

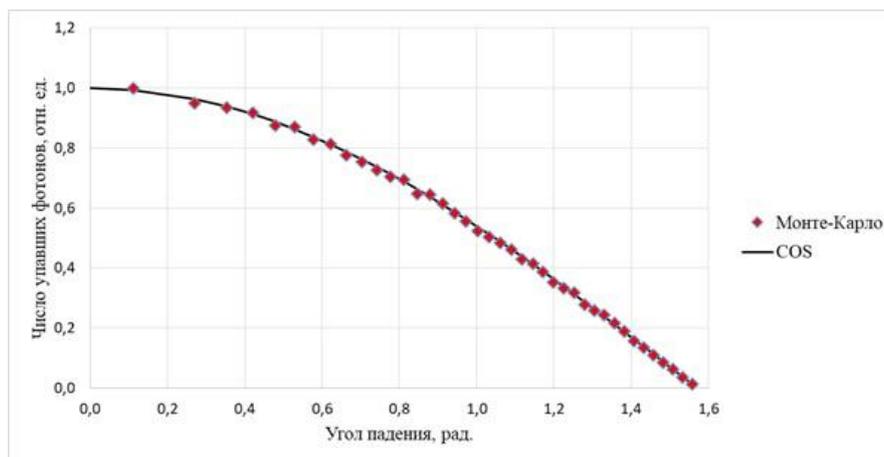


Рис. 1. Плотность вероятности падающих на границу «ДРС – воздух» фотонов в зависимости от угла падения (расчет методом Монте-Карло проводился при $\Lambda = 0,9999$ и $n = 1,5$)

Видно, что зависимость от угла падения по закону косинуса, полученная аналитически, и зависимость, полученная методом Монте-Карло, идентичны. Для дальнейшей модернизации метода сложения потоков необходимо аналитически получить функцию распределения по углам падения при $\Lambda < 1$.

Заключение

Описаны методы сложения потоков и воздействия бесконечно узким пучком для расчета уровня повышения освещенности в объеме диффузно рассеивающей среды по сравнению с освещенностью поверхности. Аналитически установлено, что падающие на границу «ДРС – воздух» фотоны распределены по закону косинуса для случая идеально прозрачной среды со сферической индикатрисой рассеяния. Получены коэффициенты внутреннего отражения и связи освещенности в слое ДРС с освещенностью поверхности двумя разными методами.

Список литературы

1. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло – Москва: изд-во «Наука», 1973. – 312 с.
2. Александров Е.И., Ципилев В.П. Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры // Известия вузов. Физика. – 1988. - № 10. – С. 23–29.
3. Яковлев А.Н. Закономерности и особенности лазерного и электронно-пучкового импульсного инициирования энергетических материалов различных классов : дисс. ... док. техн. наук : 1.3.14, 1.3.8 : защищена 24.10.23 – Томск, 2023. – 366 с.