

**СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ В  
МАЛОУГЛОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ  
НАБЛЮДЕНИЯ**

**Браславская О.Б.**

**научный руководитель канд. физ.-мат. наук Гендрина И. Ю.  
Томский государственный университет**

**Введение.** Фундаментом теории переноса изображения в рассеивающих средах являются два раздела современной науки: теория линейных систем и теория переноса излучения.

Для описания процесса распространения света в среде необходимо знание таких оптических характеристик, как показатели рассеяния и поглощения, а также индикатрисы рассеяния, которые определяются следующим образом:

$\kappa$  — коэффициент пропорциональности, который называется *показателем поглощения*.  $\sigma(\beta)$  — коэффициент пропорциональности, называемый *показателем рассеяния в направлении  $\beta$* .  $x(\beta) = \sigma(\beta) / \sigma$  — *индикатриса* рассеяния — относительное угловое распределение силы света излучения, рассеянного элементарным объемом. Распространение света в рассеивающей и поглощающей среде описывается следующим уравнением:

$$\frac{dI(R, n)}{dl} = -\epsilon I(R, n) + \frac{\sigma}{4\pi} \iint I(R, n') x(n, n') dn' + B(R, n) \quad (1)$$

Предположим, что входным сигналом системы является точечная масса  $\delta(x - x_1, y - y_1)$ , расположенная в точке  $(x_1, y_1)$ . Результирующий выходной сигнал будет функцией  $x, y$  и параметров  $x_1, y_1$ :

$$L[\delta(x - x_1, y - y_1)] = h(x, y; x_1, y_1) \quad (2)$$

Это функция называется *точечно-импульсной реакцией* или *функцией рассеяния точки*. Другими словами мы получили отклик системы на точечную массу. Так как произвольная функция  $f(x, y)$  может быть представлена как суперпозиция (интеграл) точечных масс, то результирующий выходной сигнал равен

$$g(x, y) = \iint f(\xi, \eta) h(x, \xi, y, \eta) d\xi d\eta \quad (3)$$

Используя выражение (2), определим реакцию  $g(x, y)$  как двумерную свертку входного сигнала  $f(x, y)$  с функцией рассеяния точки  $h(x, y)$ .

$$g(x, y) = \iint f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = f(x, y) ** h(x, y) \quad (4)$$

Предположим, что  $f(x, y) = e^{j(ux+vy)}$ . Подставляя эту функцию в выражение (4), получаем выражение

$$g(x, y) = \iint h(\xi, \eta) e^{j(u(x-\xi)+v(y-\eta))} d\xi d\eta. \quad (5)$$

Если  $H(u, v) = \iint h(\xi, \eta) e^{-j(u\xi+v\eta)} d\xi d\eta$ , то  $g(x, y) = L[e^{j(ux+vy)}] = H(u, v) e^{j(ux+vy)}$ .

Функция  $H(u, v)$  является двумерным преобразованием Фурье функции  $h(x, y)$ . Она называется *частотной характеристикой* двумерной системы, а именно *оптической передаточной функцией*.

**Постановка задачи.** Рассмотрим систему передачи изображения: источник - рассеивающая среда – приемник. На нижней поверхности среды расположен источник,

на верхней границе среды – приемник. Наша система удовлетворяет условиям линейной системы.

Рассмотрим в качестве оптической модели среды четыре модели:

1. 4 слоя, модель Ленобль: индикатриса рассеяния и коэффициент ослабления, зависящий от высоты.
2. 4 слоя, индикатриса молекулярного рассеяния и коэффициент ослабления, зависящий от высоты.
3. 4 слоя, индикатриса рассеяния Хензи-Гринстейна и коэффициент ослабления, зависящий от высоты.
4. 21 слой, модель Крекова-Рахимова: индикатриса рассеяния и коэффициенты поглощения и ослабления.

Интегральной характеристикой рассеивающей среды является оптическая толщина, определяемая  $\tau = \sum \varepsilon(z)dz$

Во многих случаях, когда речь идет о расчете интегральных (энергетических) характеристик световых полей, индикатрису рассеяния достаточно характеризовать одним числом. Таким параметром может быть первый коэффициент разложения  $x_1$  или средний косинус индикатрисы рассеяния

$$\overline{\cos \beta} = \frac{x_1}{3} = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 x(\cos \beta) \cos \beta d(\cos \beta).$$

Часто используют также коэффициент асимметрии индикатрисы

$$\delta = \frac{\int_0^1 x(\cos \beta) d(\cos \beta)}{\int_{-1}^0 x(\cos \beta) d(\cos \beta)},$$

т.е. отношение потоков излучения, рассеянных в переднюю и заднюю полусферу, или параметр  $F = \delta/(1+\delta)$  - долю света, рассеянного вперед. Параметры  $\overline{\cos \beta}, \delta, F$  возрастают при увеличении размеров частиц и уменьшении их относительного показателя преломления.

**Метод расчета.** Для получения характеристик системы передачи изображения в рамках теории переноса изображения и теории линейных систем воспользуемся решением в МУП.

В любой точке среды интенсивность излучения  $I(\mathbf{R}, \mathbf{n})$  имеет заметное значение лишь в области углов вблизи направления  $\mathbf{n}_0$  источника и быстро убывает с увеличением расстояния  $|\mathbf{n} - \mathbf{n}_0|$ . В этом случае, приходят к малоугловому уравнению переноса.

Общее решение малоуглового уравнения переноса имеет вид:

$$\Phi(z, p) = \varepsilon(z) - \sigma(z)x(p, z)$$

Частным случаем является оптическая передаточная функция (ОПФ) среды

$$S(v, z) = \exp\left(-\int_0^z (\varepsilon(z - \xi) - \sigma(z - \xi)x(v\xi, z - \xi))d\xi\right) \quad (6)$$

**Результаты расчетов.** ОПФ рассчитывается в МУП путем численного интегрирования с помощью метода трапеций в среде MatLAB 7.12.0 (R2011a). При моделировании рассеивающая среда предполагается плоскопараллельной, слоисто-однородной. Мононаправленный источник единичной мощности находится на нижней границе среды (на поверхности Земли), приемник – на верхней границе атмосферы на

высоте  $z=30$  км. Оси приемника и источника совпадают. Результаты приведены на рисунках 1 и 2.

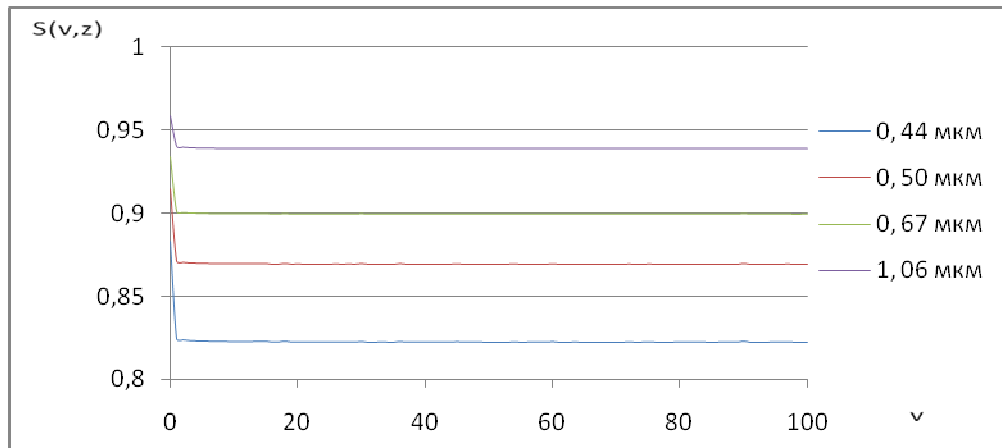


Рисунок 1. ОПФ для первой модели для 4-х длин волн:  $\lambda=0,44$  мкм,  $\lambda=0,50$  мкм,  $\lambda=0,67$  мкм,  $\lambda=1,06$  мкм

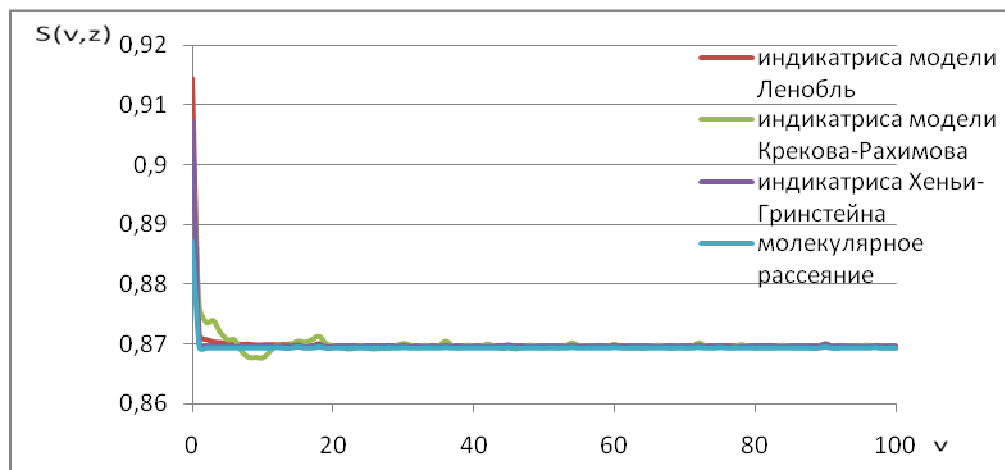


Рисунок 2. ОПФ для 4-х типов модели для  $\lambda=0,5$  мкм

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие выводы: Как видно на рисунках 1 и 2, ОПФ – монотонно убывающая функция. Отметим, что индикатриса рассеяния оказывает значительное влияние на ОПФ. Этот вывод можно сделать на основании того, что средний косинус и коэффициент асимметрии (Таблица 1) для 4-х моделей индикатрис на одной и той же длине волны имеют заметное отличие между собой. Также можно сказать о том, что ОПФ для одной и той же длины волны слабо зависит от типа рассмотренных моделей, т.к. все кривые почти совпадают. Это видно из рисунка 2. Значительное влияние на ОПФ оказывает оптическая толщина среды  $\tau$  (Таблица 2). Поскольку тип модели незначительно влияет на ОПФ, а зависимость возникает от  $\tau$ , то вместо стратифицированной модели атмосферы можно рассмотреть однородную модель с соответствующим значением  $\tau$ .

Таблица 1. Средний косинус, коэффициент асимметрии и доля света, рассеянного вперед для 4-х типов модели.

модель индикатрисы	длина волны $\lambda$ , мкм	средний косинус $\cos \beta$	коэффициент асимметрии $\delta$	доля света, рассеянного вперед F
модель Ленобль	0,44	0,3185	8,0945	0,8900
	0,50	0,3199	8,3316	0,8928

	0,67	0,3163	8,0604	0,8896
	1,06	0,3156	7,8778	0,8874
индикатриса молек.рассеяния	0,50	0,0050	1,0000	0,5000
модель Крекова-Рахимова	0,53	0,4148	20,2323	0,9529
модель Хеньи-Гринштейна	0,50	0,2500	4,8544	0,8292

Таблица 2. Оптическая толщина.

модель индикатрисы	длина волны $\lambda$ , мкм	оптическая толщина $\tau$
модель Ленобль	0,44	0,6451
	0,5	0,4608
	0,67	0,3502
	1,06	0,2064
модель Крекова-Рахимова	0,53	0,1584

ОПФ можно использовать для восстановления оптических характеристик среды. Для этого мы планируем создать базу данных, содержащую расчеты ОПФ для различных оптико-геометрических условий.

**Заключение.** Изучены свойства ОПФ в МУП для различных условий наблюдения. Отмечено, что МУП позволяет посчитать ОПФ и ФРТ с маленьким шагом. Несмотря на то, что МУП обладает небольшой областью применимости, данный метод показывает хорошие результаты в безоблачной атмосфере.

#### Литература

1. Зега Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде / Э. П. Зега, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск: Наука и техника, 1985. – 327 с.
2. Кабанов М. В. Атмосферные оптические помехи: учебное пособие / М. В. Кабанов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1991. – 206 с.
3. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис. – М.: Мир, 1971. – 495 с.
4. Креков Г.М. Оптические модели атмосферного аэрозоля / Г.М. Креков, Рахимов Г.М. – Томск: Изд-во Том. филиала СО АН СССР 1986. – 294 с.
5. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Стандартные методы. Расчеты. /Ж. Ленобль. – Гидрометеиздат, 1990.
- 6.