«Оптика атмосферы», **2**, № 1 (1989) УДК 551.521.16:551.521.3

А.Н. Валентюк

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В СТОХАСТИЧЕСКИХ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕДАХ ПРИ СИЛЬНЫХ ФЛУКТУАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ

Развита методика расчета моментов произвольного порядка яркости излучения, пропущенного или отраженного стохастическим рассеивающим слоем при сильных флуктуациях параметров рассеяния. Проанализированы также статистические характеристики контраста изображения, переданного через такой слой.

В работе [1] был развит метод решения стохастического уравнения переноса излучения в малоугловом приближении в предположении выполнимости в среде условия локальной однородности (горизонтальный масштаб макронеоднородностей среды много больше ширины функции Грина уравнения переноса излучения). При нахождении первых двух моментов функции Грина в [1] использовалось предположение о нормальном распределении параметров рассеяния среды. Очевидно, что это предположение имеет место только при достаточно малых коэффициентах вариации параметров рассеяния (слабых флуктуациях). В данной работе изучены особенности распространения излучения в среде с флуктуирующими параметрами в том случае, когда коэффициент вариации параметров рассеяния достаточно велик (сильные флуктуации).

В рамках метода [1] реализации коэффициента диффузного пропускания стохастического слоя в точке, определяемой радиус-вектором ρ, имеют вид

$$T(\rho) = \exp\left[-\int_0^{z_s} \kappa^*(\boldsymbol{r}_{eu})\, du/\mu_0\right]; \tag{1}$$

реализация локальной оптической передаточной функции (ОПФ) [2] —

$$T(\omega,\ \rho) = \exp\left[-\int_0^{\pi/2} \sigma^*(\rho,\ u)\, F(\omega u)\, du\right]; \tag{2}$$

$$F(p) = 1 - Q(p),\quad Q(p) = \frac{1}{2}\int_0^{\pi/2} \gamma i_0(\gamma)\, J_0(p\gamma)\, d\gamma, \tag{3}$$

реализация яркости излучения, отраженного от слоя при освещении и наблюдении по нормали $\boldsymbol{N}$ [3], —

$$I(\rho;\ \boldsymbol{N}) = \frac{\sigma_0(\pi)}{2\kappa_0^*}\left[1 - \exp\left(-2\kappa_0^*\int_0^{z_s} \eta(\rho;\ u)\, du\right)\right], \tag{4}$$

где $\kappa^*(r)$ — пространственное распределение эффективного показателя поглощения света средой, равного $\varepsilon(\boldsymbol{r}) - \sigma^*(\boldsymbol{r})$, $\varepsilon(\boldsymbol{r})$ — показатель ослабления, $\sigma^*(\boldsymbol{r})$ — эффективный показатель рассеяния света средой [4]; z_s — толщина слоя; $\{\boldsymbol{r}_{eu}\} = \{\rho - a(z_s - u);\ u\}$, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{\Omega}_{0\perp}/\mu_0$, $\boldsymbol{\Omega}_0$ — единичный вектор, определяющий направление падения радиации на слой, $\boldsymbol{\Omega}_{0\perp}$ — проекция $\boldsymbol{\Omega}_0$ на плоскость слоя, μ_0 — направляющий косинус вектора $\boldsymbol{\Omega}_0$ с осью z; $i_0(\gamma)$ — индикатриса рассеяния среды; $\sigma_0(\pi)$ — значение показателя направленного светорассеяния макронеоднородности в направлении „назад"; κ_0^* — значение показателя эффективного поглощения макронеоднородности среды $\eta(\rho;\ u)$ — индикаторная функция, равная единице внутри макронеоднородности и нулю — вне ее; $J_0(x)$ — функция Бесселя, ω — пространственная частота.

На основании формул (1)—(4) легко могут быть найдены выражения для моментов произвольного порядка рассматриваемых характеристик светового поля. Для расчета моментов $T(\rho)$ необходимо знать характеристический функционал $\Phi_\kappa[v]$ случайного процесса $\kappa^*(r)$, для расчета моментов $T(\omega,\ \rho)$ — характеристический функционал $\Phi_\sigma[v]$ случайного процесса $\sigma^*(r)$, для расчета моментов $I(\rho,\ \boldsymbol{N})$ — характеристический функционал $\Phi_z[v]$ случайного процесса $\kappa^*(r) = \kappa_0^*\eta(\rho, u)$. Тогда

$$< T^n > = \Phi_\kappa [ni], \; < T^n(\omega) > = \Phi_\sigma [niF], \tag{5}$$
$$< I^n(N) > = g^n \sum_{m=0}^{n} C_n^m (-1)^m \Phi_z [im],$$
где
$$C_n^m = \frac{n!}{m!\,(n-m)!}, \quad g = \frac{\sigma_0(\pi)}{2\kappa_0^*}, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Достаточно простые выражения для характеристических функционалов могут быть получены для модели параметров рассеяния среды в виде пуассоновского случайного процесса [5], для которого

$$\Phi_\kappa[v] = \exp\left\{\frac{\overline{M}}{z_s}\int_0^{z_s} dt \left[\chi_\kappa\left(\int_0^{z_s} \eta_0(t-t')\,F(t')\,dt'\right) - 1\right]\right\}, \tag{6}$$

где $\bar{M}$ — среднее число макронеоднородностей на отрезке длиной z_s; $\chi_\kappa(v)$ — характеристическая функция случайной величины κ_0^*; $\eta_0(u) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < u < u_0, \\ 0 & \text{при } u < 0, u > u_0, \end{cases}$ u_0 — размер макронеоднородностей. Аналогичным образом могут быть записаны выражения для функционалов $\Phi_\sigma[v]$ и $\Phi_z[v]$.

Для среды с экспоненциальной функцией распределения эффективной толщины поглощения макронеоднородностей $\tau_{\kappa H}^* = \kappa_0^* u_0 \left\langle T^n \right\rangle = \exp\left(-\dfrac{\bar{M} n \left\langle \tau_{\kappa H}^* \right\rangle}{1 + n\left\langle \tau_{\kappa H}^* \right\rangle}\right)$, а выражение для $\left\langle I^n(N) \right\rangle$ имеет вид (5) с $\Phi_z(im) = \exp[-2\bar{M}\left\langle \tau_{\kappa H}^* \right\rangle m/(1 + 2m\left\langle \tau_{\kappa H}^* \right\rangle)]$.

Достаточно простое выражение для моментов $\left\langle T^n(\omega) \right\rangle$ может быть получено для среды, индикатриса рассеяния которой описывается формулой, являющейся малоугловой аппроксимацией индикатрисы Хеньи-Гринштейна; $i_0(\gamma) = 2\alpha(\alpha^2 + \gamma^2)^{-3/2}$, где $\alpha = (1 - \bar{\mu})\bar{\mu}^{-1/2}$, $\bar{\mu}$ — средний косинус угла рассеяния:

$$< T^n(\omega) > = \exp\{-\overline{M}\,[1 - \exp[n < \tau_{\sigma H}^* > \varphi(\omega^*)]]\},$$
$$\varphi(\omega^*) = (\omega^*)^{-1}\,[Ei(L_n) - Ei(L_n\,\mathrm{e}^{-\omega^*})],$$
$$L_n = n < \tau_{\sigma H}^* > (1 - \mathrm{e}^{-\omega^*\theta})\,(\omega^*\theta)^{-1},$$

где $\omega^* = \alpha\omega z_s$, $\theta = u_0/z_s$, $Ei(x) = \int_{-\infty}^{x} t^{-1}e^{-t}dt$ — интегральная показательная функция, $\left\langle \tau_{\sigma H}^* \right\rangle$ — средняя эффективная толщина рассеяния макронеоднородностей.

Значение моментов рассматриваемых характеристик светового поля позволяет найти и их функцию распределения, например, с помощью разложения функций распределения в ряд по ортогональным полиномам [6].

Основным недостатком модели пуассоновского случайного процесса является то, что распределение числа макронеоднородностей по закону Пуассона справедливо только при достаточно большом $\bar{M}$. В связи с этим рассмотрим другую модель стохастического рассеивающего слоя, позволяющую анализировать статистические характеристики полей излучения в стохастических средах с макронеоднородностями, имеющими размер порядка толщины слоя. Рассмотрение проведем на примере коэффициента диффузного пропускания T. Расчет пропускания прямопрошедшего света и яркости отраженного излучения будет аналогичным.

Входящую в (1) случайную величину $\tau_\kappa^* = \int_0^{z_s} \kappa^*(\boldsymbol{r}_{eu})du/\mu_0$ можно записать в виде: $\tau_\kappa^* = \sum_{j=1}^{M} \tau_{\kappa j}^*$, где $\tau_{\kappa j}^*$ — случайное значение эффективной оптической толщины поглощения неоднородности под номером j, M — случайное число макронеоднородностей вдоль вектора $\boldsymbol{r}_{eu}$. Считая, что величины $\tau_{\kappa j}^*$ статистически независимы и предполагая, что число неоднородностей j реализуется с вероятностью p_j, характеристическую функцию случайной величины τ_κ^* запишем в виде [6]: $\Phi(v) = \sum_{j=0}^{\infty} p_j \chi_\tau^j(v)$, где $\chi_\tau(v)$ — характеристическая функция случайной величины $\tau_{\kappa j}^*$. В ряде случаев величина p_j неизвестна, а известна функция распределения макронеоднородностей по размерам $f(\Delta)$. В этом случае функция $\Phi(v)$ может быть найдена приближенно при условии, что $p_j \to 0$ при $j > 2$. Действительно, при выполнении этого условия $p_2 = \int\limits_0^{z_s} f(\Delta) d\Delta$, $p_1 = 1 - p_2$.

1. Валентюк А.Н. //Докл. АН БССР. 1987. Т. 31. № 12. С. 1085.
2. Валентюк А.Н. //Исследование Земли из космоса. 1987. № 3. С. 91.
3. Валентюк А.Н. //Изв. вузов. Радиофизика. 1988. № 7. С. 881.
4. Валентюк А.Н. //Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. № 8. С. 839.
5. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука. 1978. С. 40.
6. Левин Б.Р. Статистическая радиофизика. М.: Сов. радио. 1969. С. 91.

Могилевский филиал
Института физики АН БССР

Поступило в редакцию
11 мая 1988 г.

A.N. Valentyuk. **Radiation Distribution Through Stohastic Scattering Media for Strong Fluctuation of Scattering Parameters.**

The method of calculation of arbitrary order moments of radiation brightness, which reflected or refracted from stochastic scattering layer for strong fluctuations of scattering parameters is developed. The statistical characteristics of image contrast, transmitted through that layer are analysed.