



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (ИТММ-2019)**

**МАТЕРИАЛЫ  
XVIII Международной конференции  
имени А. Ф. Терпугова  
26–30 июня 2019 г.**

**Часть 1**



ТОМСК  
«Издательство НТЛ»  
2019

# Имитационное моделирование пространственных и временных характеристик систем видения через атмосферу

И.Ю. Гендрина

*Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, г.Томск, Россия*

Системный подход является эффективным методом решения задач переноса излучения в различных средах, в частности, через атмосферу. Его применение основывается на том, что структура, состоящая из источника излучения, среды распространения и приемного устройства, удовлетворяет всем признакам линейной системы [1, 2]. В теории переноса излучения такая структура называется системой видения [4].

## Постановка задачи

Будем рассматривать систему видения  $L$  через слоисто-однородную аэрозольно-молекулярную атмосферу. Для анализа влияния системы на произвольный объект, расположенный на подстилающей поверхности, необходимо построить отклик системы  $L$  на точечный  $\delta$ -импульс – функцию размытия точки (ФРТ):

$$L[\delta(x - x_0, y - y_0)] = h(x_0, y_0). \quad (1)$$

Будем рассматривать два варианта – стационарный и нестационарный. Для нестационарного случая в соотношении (1) добавляется зависимость от времени:

$$L[\delta(x - x_0, y - y_0) \delta(t - t_0)] = h(x_0, y_0; t_0). \quad (2)$$

Оптическая модель атмосферы задается с помощью следующих характеристик:

- а) коэффициенты аэрозольного рассеяния  $\sigma_{sc}(\mathbf{r})$  и ослабления  $\sigma_{ext}(\mathbf{r})$ ;
- б) аэрозольная индикатриса рассеяния  $g(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}')$ ;
- в) вертикальные профили температуры и давления для расчета коэффициентов молекулярного рассеяния.

Геометрическая схема расчетов является следующей: на нижней границе атмосферы (на подстилающей поверхности) в точке с координатами  $(x_0, y_0, 0)$  находится точечный источник единичной мощности,

а на верхней границе атмосферы в точке с координатами  $(x_0, y_0, H)$  – идеальный оптический приемник. В нестационарном случае предполагается, что излучение источника происходит в момент времени  $t_0$ .

Источник определяется плотностью распределения первоначальных направлений  $\chi(\omega_0) = \chi(\mu, \varphi)$  (диаграммой направленности), где  $\omega_0$  – направление вылета фотона из источника (задается с помощью косинуса зенитного угла  $\mu$  и азимутального угла  $\varphi$ ). Обычно рассматривают три варианта диаграммы направленности источника: изотропный  $\left(\chi(\omega_0) = \frac{1}{2\pi}\right)$ , ламбертовский  $\left(\chi(\omega_0) = \frac{\mu}{\pi}\right)$  и мононаправленный  $(\chi(\omega_0) = \delta(\omega - \omega_0))$ .

С физической точки зрения ФРТ является решением интегро-дифференциального уравнения переноса [3, 4]:

$$\begin{aligned} (\omega, \text{grad } \Phi(\mathbf{r}, \omega)) &= -\sigma_{ext}(\mathbf{r})\Phi(\mathbf{r}, \omega) + \\ &+ \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \cdot \int_{\Omega} \Phi(\mathbf{r}, \omega') g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + \Phi_0(\mathbf{r}, \omega). \end{aligned} \quad (3)$$

Для нестационарного случая в уравнении (3) появляется дополнительное слагаемое:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, \omega, t)}{\partial t} + (\omega, \text{grad } \Phi(\mathbf{r}, \omega, t)) &= -\sigma_{ext}(\mathbf{r})\Phi(\mathbf{r}, \omega, t) + \\ &+ \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \cdot \int_{\Omega} \Phi(\mathbf{r}, \omega', t) g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + \Phi_0(\mathbf{r}, \omega, t). \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (4) предполагается, что атмосфера находится в стационарном состоянии, т.е. оптические характеристики среды от времени не зависят.

Наряду с уравнением (3) используют «сопряженное» уравнение переноса:

$$\begin{aligned} -(\omega, \text{grad } \Phi^*(\mathbf{r}, \omega)) &= -\sigma_{ext}(\mathbf{r})\Phi^*(\mathbf{r}, \omega) + \\ &+ \sigma_{sc}(\mathbf{r}) \cdot \int_{\Omega} \Phi^*(\mathbf{r}, \omega') g(\mathbf{r}, \omega, \omega') d\omega' + p(\mathbf{r}, \omega). \end{aligned} \quad (5)$$

Подробное описание величин, входящих в уравнения (3) – (5), приведено в [3, 4].

## Метод решения

Универсальным методом решения уравнений (3) – (5) является метод Монте-Карло, который заключается в моделировании траекторий движения фотонов как случайной марковской цепи столкновений фотонов с частицами атмосферы и вычисления статистических оценок для искомым величин. Общая схема построения случайных траекторий описана в [3].

В [5] описан алгоритм расчета функции яркости рассеянного излучения в зависимости от зенитного угла наблюдения. В рамках этого моделирования можно также определять другие характеристики излучения: среднюю, максимальную и минимальную кратности столкновений с частицами атмосферы, выборочную дисперсию и т.д.

Решение уравнения для нестационарного случая также может быть получено с использованием описанного алгоритма.

При моделировании «сопряженных» траекторий следует суммировать длины свободного пробега фотона, в каждой точке столкновения к текущей сумме необходимо добавить расстояние от точки столкновения (считая ее точкой первично рассеянных частиц) до источника на подстилающей поверхности, получившуюся сумму поделить на скорость света. В результате для каждого положения приемного устройства или для каждого направления наблюдения будет получено временное распределение яркости.

Поскольку скорость света одна и та же, то можно не делить на нее, а рассматривать и анализировать распределение яркости по длинам пробега. Кроме полученной функции яркости можно рассчитать среднее время пребывания фотона в атмосфере и другие статистические характеристики.

## Заключение

Предложенный алгоритм дает возможность одновременно получать пространственное и временное распределение яркости рассеянного излучения для незначительно меняющихся оптических характеристик атмосферы. Кроме того, могут быть найдены различные статистические характеристики полученных распределений. Таким образом, система видения может быть описана с помощью различных характеристик, что позволяет комплексно подходить к анализу происходящих в ней процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Тарасенко Ф. П.* Прикладной системный анализ. М.: КНОРУС, 2010. 224 с.
2. *Папулис А.* Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495 с.
3. *Метод Монте-Карло в атмосферной оптике* / под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 100 с.
4. *Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В.* Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
5. *Гендрина И.Ю.* Моделирование процесса переноса излучения через облачную атмосферу на основе данных спутниковых наблюдений // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2016): материалы XV Международ. конф. имени А.Ф. Терпугова (12–16 сентября 2016 г.). Томск: ТГУ, 2016.