<Оптика атмосферы и океана>, **6**, N 5 (1993)

УДК 535.36

Б.В. Горячев, М.В. Кабанов, С.Б. Могильницкий, Б.А. Савельев

О ПОТОКОВЫХ МЕТОДАХ В ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются некоторые вопросы применения потоковых методов в задачах переноса излучения в рассеивающих средах. Обсуждаются точность метода многократных отражений и его практическое использование.

От редакционной коллегии

Дискуссия о сути метода многократных отражений была инициирована, в известной степени, редакционной коллегией журнала, и, разумеется, читатель сам может оцепить аргументы сторон.

Наверное, имеет смысл напомнить суть вопроса. По мнению А. Борового, оперирование с одномерным уравнением переноса с формальной стороны может быть ассоциировано только с двухпотоковым приближением. Авторы метода многократных отражений настаивают на большем, трактуя свое предложение как эвристический прием, аппелирующий к физическим соображениям.

Положительные итоги дискуссии несомненны, ибо появились новые возможности для оценок точности метода (правда, п. 3,*а* статьи авторов метода выглядит несколько странно: если есть сомнения в достоверности численного расчета оппонента, то почему бы расчет этот не повторить (?)). Как выясняется, могут возникать нетривиальные обстоятельства и в приложениях метода к конкретным задачам.

1. Введение

В настоящее время основными методами расчета потоков радиации в рассеивающих объемах конечной) размера являются численные методы, во многих случаях требующие для расчетов достаточное количество машинного времени [1]. Для оперативного решения задач такого рода разрабатываются аналитические методы, например, FA-метод [2], модернизированный метод δ-Эддингтона [3]. Главной проблемой при разработке таких методов являются корректная формулировка основных уравнений и соответствующая постановка граничных условий. Решение уравнений с необходимыми приближениями является предметом математической физики и часто не требует обращения к физическим процессам переноса излучения.

При разработке метода многократных отражений (ММО) наиболее важной частью решения задачи является построение такой модели переноса излучения в пространственно-ограниченных рассеивающих средах (ПОРС), которая позволяла бы решить задачу переноса излучения исходя из простых и точных решений для одномерной среды. В данном случае одномерная среда предстает не как описание какого-то реального физического объекта, а как составляющая часть модели переноса излучения в ПОРС. При дальнейшем построении модели комбинация из трех одномерных сред, рассматриваемых во взаимно перпендикулярных направлениях, дает возможность получить решение задачи переноса излучения в ПОРС.

Основой такого сочетания является шести потоковое представление индикатрисы рассеяния излучения [4], используя которое уравнение переноса можно записать в виде [5]

$$\mu_i \frac{dI_i}{d\tau} = I_i - \Lambda \sum_{j=1}^{6} \delta_{ij} I_i \,. \tag{1}$$

Таким образом, проблема сводится к решению уравнения (1), а не двухпотоковой системы уравнений, как утверждает автор [6]. Однако предложенный в [5] способ решения не обладает достаточной точностью при расчетах потоков излучения в.рассеивающих средах с поглощением, в то время как асимптотики ММО позволяют достигать точности примерно 1,5-2% [7].

Следует также добавить, что шестипотоковое представление индикатрисы рассеяния позволяет получить однозначную связь между параметрами среды и коэффициентами уравнения (1). Полученное решение удобно использовать для оперативного расчета интегральных потоков излучения, выходящих из ограниченного объема рассеивающей среды. Такие расчеты получены при моделировании радиационного баланса атмосферы. Подтверждением этому тезису служит большой интерес к этой проблеме (расчет интегральных потоков) в специальной литературе [8, 9]. Метод МО работает и в случае разорванной облачности [10].

2. Двухпотоковое приближение

При рассмотрении потоковых методов обычно проводится аналогия с двухпотоковым методом, так как в них используется система уравнений, являющаяся частным случаем (1):

$$\frac{dI_1}{d\mathbf{l}} = -\alpha' I_1 + \beta' I_2 ,$$
$$-\frac{dI_2}{d\mathbf{l}} = -\alpha' I_2 + \beta' I_1 , \qquad (2)$$

где $\mathbf{l}$ – выбранное направление; α', β' – коэффициенты, определяемые параметрами среды [11]. При этом, как указано в статье [6], центральной проблемой двухпотокового приближения является не решение системы уравнений (2), а определение коэффициентов α' и β'. Этому вопросу посвящено достаточно большое количество работ [11,12], в которых связь между коэффициентами α' и β' и параметрами среды находится полуэмпирическим методом, в то время как ММО позволяет установить однозначную связь между параметрами среды и излучения. К тому же ММО позволяет учесть поперечные размеры среды, что особенно важно при проведении экспериментальных исследований. Таким образом, несмотря на внешнее сходство с двухпотоковым методом, в методе МО модель переноса построена таким образом, что надо говорить, скорее, о шестипотоковом приближении, т.е. рассматривается баланс потоков излучения в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Но ММО отличается и от шестипотокового приближения тем, что позволяет рассчитывать перенос излучения в объеме конечных размеров.

3. Точность метода МО

При решении вопроса о точности метода МО на основе сравнительного анализа [6] методов МК (Монте-Карло) и МО необходимо учитывать следующие моменты:

а) Подсчет ошибки нельзя проводить формально, когда речь идет о сигналах разного уровня. Например, если отражение составляет 99,99%, пропускание 0,01%, то ошибка в определении пропускания может быть весьма значительной в связи с тем, что изменение сигнала за счет статистической ошибки эталонного метода (в данном случае метод Монте-Карло) превышает уровень сигнала.

б) Необходима проверка достоверности данных, приведенных в табл. 1 статьи [6]. Например, при величине продольной оптической толщи 100 и 200 пропускание по эталонному методу (взятое из [2]) составляет 1%, что физически невозможно, тем не менее, делается заключение, что ошибка ММО составляет 100%. Поэтому выводы о точности метода на основании таких сравнений делать нельзя.

в) Мы считаем, что чем больше оптическая толща, тем меньше должна быть невязка. А из табл. 2 [6] видно, что ошибка изменяется нерегулярным образом. Такую нерегулярность можно объяснить только случайными причинами (такими, например, как считывание графической информации с графика в логарифмическом масштабе).

г) Более трудным является вопрос об адекватности построения модели выхода фотонов из среды в методах МК (в статье [2] это не объясняется) и МО, так как за счет разной геометрии этой модели тоже могут появиться ошибки.

д) Необходимо отметить, что метод МО дает хорошие результаты при больших оптических толщах, что подтверждается сравнением асимптотических результатов по ММО с данными точного решения (в асимптотике) [7]. На этом основании можно опровергнуть мнение автора [6] о несостоятельности метода МО.

4. Практическое применение ММО

Наиболее перспективно применение метода для оперативного расчета радиационного баланса при интерпретации данных эксперимента, особенно при проведении модельных измерений, когда необходим учет пространственной ограниченности среды. Кроме того, ММО дает боковое распределение интенсивности $dI/d\tau_x$ [13]. Внешняя аналогия с двухпотоковым приближением приводит к возможности утверждения о неприменимости ММО к описанию объекта типа стопы пластинок, бруска и т.д., так как в этом случае должны учитываться и другие физические явления [6]. Но ММО не применяется при описании таких объектов, а многократные отражения используются только для наглядного вывода уравнения переноса. К тому же данная методика позволяет эффективно решать и другие задачи, например, рассчитывать потоки излучения в рассеивающей среде, ограниченной отражающими поверхностями [14].

Использование для разработки ММО модели среды в виде параллелепипеда определяется стандартным выбором граничных условий и математическим аппаратом для решения задачи, причем переход к среде произвольной формы не представляет трудностей. Также не является серьезным препятствием к практическому применению метода использование интегральных характеристик излучения потоковыми методами [11]. Более того, метод дает возможность определить семь составляющих радиационного баланса объема с рассеивающей средой (в частном случае консервативной симметричной среды таких составляющих три). Для детального изучения тела яркости рассеивающего объема можно использовать n-потоковые методы [15], однако в большинстве практических задач достаточно двух-шеститпотоковых приближений.

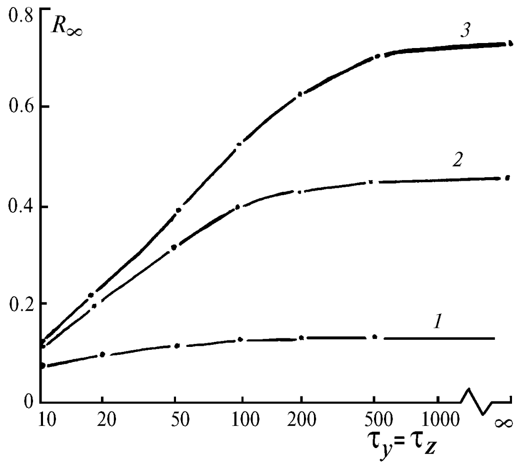
Экспериментальное определение интегральных характеристик излучения, рассеянного объемом среды, представляет собой стандартную задачу и является предметом многих работ по фотометрии [16]. Измерение потока излучения $\mathbf{\Phi}$ основывается на тривиальном соотношении $\mathbf{\Phi} = \int_{4\pi} I d\omega$. Практически эта задача решается с помощью фотометрического шара (для малых объемов среды) или путем сканирования рассеивающего объекта. Сканирование может быть осуществлено перемещением приемника по границе объема либо изменением апертуры сканирования. Для всех вышеуказанных случаев существуют стандартные методики учета расстояния до рассеивающего объекта.

Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов дает возможность сделать вывод о том, что потоковые методы достаточно хорошо описывают реальный процесс переноса излучения [11].

В качестве конкретного примера практического использования ММО приведем способ определения вероятности выживания кванта в сильно мутных средах.

Для определения Λ необходимо измерить коэффициент R_∞, при этом следует учитывать зависимость R_∞ от поперечных оптических размеров. Как следует из рисунка, при $\Lambda = 0{,}9$ R_∞ не зависит от поперечных оптических размеров уже при τ_y, $\tau_z \geq 10$. Уменьшение вероятности выживания кванта понижает эти размеры. Следовательно, при изменении Λ необходимо тщательно контролировать значения поперечных размеров для слабо поглощающих сред.

Разработанная методика определения Λ проверена экспериментально на модельных взвесях полистиролового латекса с размером частиц $d = 0{,}08$ мкм. Коллимированный монохроматический поток излучения ($\lambda = 0{,}63$ мкм) позволял реализовать рэлеевское рассеяние, которое характеризуется параметрами индикатрисы рассеяния $\eta = \beta = 0{,}2$; $\mu = 0{,}15$ [7]. Измерение осуществлялось путем сканирования передней грани кюветы световодом, соединенным с ФЭУ-79. Точность измерения Λ для изотропного и рэлеевского рассеяний определяется погрешностью измерения светового потока, отраженного слоем исследуемой среды, а при анизотропном рассеянии – точностью определения параметров η, β, μ.



Другим практическим применением ММО является закон диффузного отражения излучения от пространственно ограниченных дисперсных сред, позволяющий рассчитать коэффициенты отражения различных образцов, которые существенно зависят от поперечных оптических размеров среды.

В заключение следует отметить, что ММО является основанием для критического анализа имеющихся многочисленных экспериментальных и теоретических работ в области переноса излучений в рассеивающих средах. Он стимулирует создание новых методик расчета, учитывающих пространственную ограниченность среды, и устройств, работающих на их основе.

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 264 с.
2. Davies R. //J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. P. 1712–1725.
3. Joseph T.H., Wiscomble W.T. //J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 2452–2459.
4. Chu C.M., Churchill S.W. // J. Phys. Chem. 1955. V. 59. P. 855–863.
5. Meador W.E., Weaver W.R. // Appl. Opt. 1976. V. 15. N 12. P. 3155–3160.
6. Боровой А.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 5. С. 610–617.
7. ГорячевБ.В., Кабанов М.В., Савельев Б.А. // Оптика атмосферы и океана, 1990. Т. 3. N 2. С. 142–150.
8. Mekee T.B., Cox S.K. // J. Atmos. Sci. 1966. V. 33. P. 2014–2020.
9. Aida M. // J. Quant. Spect. and Rad. Transfer. 1977. V. 17. P. 303–309.
10. Горячев Б.В., Ларионов В.В., Могильницкий С.Б., Савельев Б.А. // ДАН СССР. 1987. Т. 297. N 2. С. 318–321.
11. Зеге Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985. 328 с.
12. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т. 1. 280 с.
13. Могильницкий С. Б. // Изв. вузов. Физика. 1979. N 11. С. 117–120.
14. Горячев Б.В., Ларионов В.В., Могильницкий С.Б., Савельев Б.Л. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. Вып. 2. С. 407–409.
15. Whitney C. // J. Quant. Spect. and Rad. Transfer. 1974. V. 14. P. 591–611.
16. Гуревич М.М. Фотометрия. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 270 с.

Конструкторско-технологический институт «Оптика», Томск
Томский политехнический университет

Поступила в редакцию
26 июля 1991 г.

B.V. Goryachev, M.V. Kabanov. S.B. Mogil'nitskii, B.A. Savel'ev. **On the Flux Methods in the Theory of Radiation Transfer.**

Some aspects of the flux methods use in solving problems on radiative transfer in scattering media are discussed. Accuracy of the method of multiple reflections and its applications are considered.