Модель дистанционного зондирования земной поверхности (суша, океан) с учетом поляризации излучения

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова, А.К. Куликов, А.Н. Волкович

Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН
125047 Москва, Миусская пл., д. 4
E-mail: tamaras@keldysh.ru

Предлагается оригинальный универсальный математический аппарат для моделирования трехмерного переноса оптического излучения в неоднородной системе «атмосфера-земная поверхность» с учетом поляризации и деполяризации, которое описывается вектором параметров Стокса. Подход основан на построении обобщенных решений общей векторной краевой задачи для кинетического уравнения в форме векторных функционалов, ядрами которых являются тензоры функций влияния или пространственно-частотных характеристик. При этом компоненты тензоров функций влияния и пространственно-частотных характеристик с учетом аэрозольных и молекулярных характеристик рассеяния и поглощения среды можно рассчитывать разными методами в разных приближениях теории переноса излучения. Пространственно-частотные характеристики являются фурье-образами функций влияния по горизонтальным координатам. Функции влияния и пространственно-частотные характеристики – это универсальные функции, описывающие передаточные свойства атмосферы в рамках линейно-системного подхода, которые инвариантны относительно характеристик состояния поляризации, горизонтальных вариаций и угловых зависимостей граничных условий и источников излучения. Имея набор таких инвариантных функций, можно рассчитать «сценарий» распределения яркости и характеристик поляризации излучения земной поверхности («приземную фотографию») с различными конкретными пространственными и угловыми структурами источников и ядер операторов отражения с учетом многократного рассеяния и поляризации в атмосфере, а также значения вектора Стокса в любой внутренней точке системы или за её пределами («космическую фотографию» в поляризованном свете).

Введение

В 40-е – 90-е годы XX века советские ученые проводили активно и интенсивно на высоком научном уровне многоплановые фундаментальные и прикладные исследования по математическим и прикладным проблемам кинетической теории переноса излучения, нейтронов, частиц. Этому способствовали бурное развитие атомной энергетики, освоение космического пространства и становление космических исследований, активное развитие и внедрение лазерных технологий, огромный интерес к астрофизике, необходимость разработки методов и проектирования средств космического землеобзора и аэрокосмического дистанционного зондирования и мониторинга экосистем, разработка моделей метеорологии, климата, экологической безопасности, природных и техногенных катастрофических процессов и т.д.

В настоящее время в интересах международной кооперации по аэрокосмическому глобальному мониторингу Земли, а также международного глобального проекта по изучению эволюции Земли, климата и опасных явлений требуется разработка нового математического обеспечения для решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в природных средах, реализуемого на высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных системах [1].

В последние годы широкомасштабно и активно развиваются и проектируются международные аэрокосмические системы оперативного и долгосрочного глобального мониторинга окружающей среды с широким профилем приложений. С 1984 года существует международная координация в рамках CEOS – Committee on Earth Observing Satellites, объединяющая сейчас 23 members mostly space agencies и 21 associated nations and international organizations. Создаются региональные и международные Центры приема и обработки огромных массивов космической информации, специализирующиеся в области информационных технологий (архивация, сжатие и воспроизведение данных, визуализация и 1d, 2d, 3d графика, Интернет-сайты и т.п.) и распространения данных с тематической ориентацией.

European Space Agency совместно с Japan Aerospace Exploration Agency запустили уже два спутника ADEOS с аппаратурой POLDER для изучения облачности, атмосферного аэрозоля, цвета океана и суши в поляризованном свете. К сожалению, пока предлагаются чрезмерно упрощенные алгоритмы обработки этой информации с неконтролируемой погрешностью восстановления параметров зондируемых объектов.

В последние 15 лет произошли заметные изменения в научном сообществе, в частности, в США, Канаде, Германии, Франции. Особенно активно космические исследования в совокупности с вычислительной техникой развиваются в Японии и Китае, куда вернулись из-за рубежа опытные высококвалифицированные ученые и приглашаются российские специалисты.

Роль математического моделирования задач теории переноса излучения в настоящее время возрастает в связи с новой международной концепцией развития международных космических систем наблюдений и мониторинга (без которых невозможно выполнение многих международных деклараций и соглашений, в частности, по озоновому слою, по охране лесов, по транснациональному переносу загрязнений, по климату, по выбросам газов с тепличным эффектом и т.д.).

В Советском Союзе было три коллектива, которые участвовали в решении информационно-математических проблем теории переноса излучения при становлении и развитии космических исследований: в Ленинграде под руководством академиков К.Я.Кондратьева и В.В.Соболева, в Новосибирске под руководством академика Г.И.Марчука и член-корреспондента Г.А.Михайлова, в Москве в Институте прикладной математики под общим руководством академиков М.В.Келдыша и А.Н.Тихонова совместно с Институтом физики атмосферы АН СССР и Институтом космических исследований АН СССР.

В настоящее время сохранились только два коллектива: в Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН (бывш. Вычислительный центр СО РАН, Новосибирск), который специализируется по методам статистического моделирования и Монте-Карло, и в Отделе «Кинетические уравнения» Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН (Москва), который специализируется по детерминированным аналитическим и численным методам решения задач теории переноса, в том числе с параллельными алгоритмами на многопроцессорных вычислительных системах. Эти коллективы занимают лидирующие позиции.

Моделирование переноса поляризованного электромагнитного излучения – это одна из самых сложных и громоздких вычислительных проблем кинетической теории переноса. Естественный солнечный свет поляризован, но в природных средах происходит его деполяризация. И напротив, неполяризованный свет от источника может стать поляризованным. Авторы являются первыми разработчиками оригинальных детерминированных высокоточных численных методов расчета полного набора компонент вектора Стокса и интенсивности излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения [1, 2]. В основе лежит единый методический подход - итерационный метод характеристик с квадратурами для матриц интегралов столкновений и корректными процедурами ускорения сходимости итераций.

Предлагается оригинальный универсальный математический аппарат для моделирования трехмерного переноса оптического излучения в неоднородной системе «атмосфера-земная поверхность» с учетом поляризации и деполяризации, которое описывается вектором параметров Стокса [3, 4]. Подход основан на построении обобщенных решений [5] общей векторной краевой задачи для кинетического уравнения в форме векторных функционалов, ядрами которых являются тензоры функций влияния или пространственно-частотных характеристик. При этом компоненты тензоров функций влияния и пространственно-частотных характеристик с учетом аэрозольных и молекулярных характеристик рассеяния и поглощения среды можно рассчитывать разными методами в разных приближениях теории переноса излучения.

Пространственно-частотные характеристики являются фурье-образами функций влияния по горизонтальным координатам. Функции влияния и пространственно-частотные характеристики – это универсальные функции, инвариантные относительно характеристик состояния поляризации, горизонтальных вариаций и угловых зависимостей граничных условий и источников излучения. Имея набор таких инвариантных функций, с помощью построенных рядов Неймана можно рассчитать «сценарий» распределения поляризованного излучения земной поверхности («приземная фотография») с различными конкретными пространственными и угловыми структурами источников и ядер операторов отражения с учетом многократного рассеяния и поляризации в атмосфере, а также значения вектора параметров Стокса в любой внутренней точке системы или за её пределами («космическая фотография» в поляризованном свете).

Выбор способа расчета функционалов – через функции влияния или в фурье-образах через пространственно-частотные характеристики – зависит от свойств функций, описывающих характеристики закона отражения поверхности и источников, а также от конкретных приложений.

Математическая постановка задачи

В аэрокосмических исследованиях геосистем, биосферы, экологических или потенциально-опасных объектов и т.п. радиационное поле Земли является носителем информации об окружающей среде. Наиболее полной характеристикой квазимонохроматического электромагнитного поля считается вектор параметров Стокса $\mathbf{\Phi}(r,s)$ [1-4], по сути, сложный функционал от оптических и метеорологических параметров атмосферы и земной поверхности, а также условий освещения и наблюдения. В SP-представлении (Стокса-Пуанкаре) компоненты вектора-столбца $\mathbf{\Phi}(r,s)=(I,Q,U,V)^T=\{\Phi_m\}_1^4$ имеют нормировку интенсивности и обладают следующими важными свойствами: пространство параметров Стокса I,Q,U,V образует выпуклый конус в действительном евклидовом пространстве $R^{(4)}$ (верхний индекс "(4)" - метка размерности векторного пространства, в котором определяются векторы параметров Стокса) и имеют место следующие соотношения:

$$I \ge 0; \quad I^2 \ge Q^2+U^2+V^2; \quad |Q|+|U|+|V| \le \sqrt{3}I.$$

В задачах радиационной коррекции при дистанционном зондировании объектов и земной поверхности, в обработке оптической информации, в теориях видения и передачи изображения через мутные среды, в теоретико-расчетных основах проектирования оптико-электронных систем наблюдения широкое распространение получило приближение линейных систем [1, 6] с моделями оптической передаточной функции, функции модуляции, функции размытия точки, контрастно-частотной характеристики. Линейным системам отвечают первые краевые задачи теории переноса – задачи с «вакуумными» границами.

Будем искать вектор параметров Стокса некогерентного многократно рассеянного светового пучка в приближении нелинейной системы как решение общей векторной краевой задачи теории переноса поляризованного излучения в плоском слое с неоднородной отражающей подстилающей поверхностью. Нелинейность обусловлена нелинейной зависимостью решения от характеристик закона отражения в граничном условии и многократным переотражением излучения от подложки. В качестве отражающей нижней границы слоя (дна, подложки, подстилающей поверхности) может быть земная поверхность (суша, вода) или верхняя граница облачности, гидрометеоров, растительного покрова.

Основным аппаратом решения многомерных краевых задач теории переноса остаются численные методы, в частности, методы Монте-Карло [7, 8]. *Для применения конечно-разностных методов в случае трехмерной задачи с плоской геометрией необходимо ограничить размер конечного по высоте слоя в горизонтальной плоскости.* Наиболее эффективным и естественным оказывается подход, разработанный Т.А. Сушкевич в ИПМ имени М.В. Келдыша РАН и называемый методом функций влияния и пространственно-частотных характеристик [1, 2, 9].

Идея этого подхода состоит в том, что решение краевой задачи представляется в виде функционалов (обобщенного решения), называемых оптическими *передаточными операторами*, с помощью которых, с одной стороны, можно рассчитывать угловые и пространственные распределения параметров Стокса внутри и вне системы переноса, а с другой стороны, устанавливаются явные связи этих параметров с характеристиками системы переноса (источников излучения, закона отражения). Ядрами функционалов являются функции влияния краевых задач теории переноса или пространственно-частотные характеристики - фурье-образы функций влияния по горизонтальным координатам. Другими словами, *решение первой и общей краевых задач находится с помощью фундаментального решения, которое определяется методом преобразования Фурье* [1, 5]. При этом от задачи для трехмерного слоя осуществляется переход к задаче для одномерного слоя – снижается размерность численно решаемой задачи. Одновременно происходит факторизация решения: вместо горизонтальных координат появляется действительный параметр - пространственная частота, что позволяет естественно распараллеливать вычисления по параметрам.

Рассматривается задача переноса поляризованного излучения в плоском слое, неограниченном в горизонтальном направлении $(-\infty < x, y < \infty;\ \ r_\perp = (x, y))$ и конечном по высоте ($0 \le z \le H$), трехмерного евклидова пространства: радиус-вектор $r = (x, y, z)$. Множество всех направлений распространения излучения $s = (\mu, \varphi)$, где $\mu = \cos\vartheta,\ \vartheta \in [0, \pi]$ - зенитный угол, $\varphi \in [0, 2\pi]$ - азимут, образует единичную сферу $\Omega = \Omega^+ \cup \Omega^-$; Ω^+ и Ω^- - полусферы направлений с $\mu \in [0,1]$ и $\mu \in [-1,0]$, соответственно. Для удобства записи граничных условий вводим множества (t - top, b - bottom):

$$t = \{z, r_\perp, s : z = 0,\ s = s^+ \in \Omega^+\};\quad b = \{z, r_\perp, s : z = H,\ s = s^- \in \Omega^-\}.$$

Вектор параметров Стокса находим как решение общей векторной краевой задачи ($R \ne 0$)

$$K\mathbf{\Phi} = \mathbf{F}^{in},\quad \mathbf{\Phi}\big|_t = \mathbf{F}^0,\quad \mathbf{\Phi}\big|_b = \varepsilon R\mathbf{\Phi} + \mathbf{F}^H \tag{1}$$

с линейными операторами: оператор переноса

$$D \equiv (s, qrad) + \sigma(z) = D_z + (s_\perp, \frac{\partial}{\partial r_\perp}),\quad D_z \equiv \mu\frac{\partial}{\partial z} + \sigma(z);$$

интеграл столкновений

$$S\mathbf{\Phi} = \sigma_s(z)\int_\Omega P(z, s, s')\mathbf{\Phi}(z, r_\perp, s')ds',\quad ds' = d\mu' d\varphi';$$

равномерно ограниченный оператор отражения

$$[R\mathbf{\Phi}](H, r_\perp, s) \equiv \int_{\Omega^+} q(r_\perp, s, s^+)\mathbf{\Phi}(H, r_\perp, s^+)ds^+,\quad s \in \Omega^-; \tag{2}$$

интегро-дифференциальный оператор $K \equiv D - S$; одномерный оператор $K_z \equiv D_z - S$; P - фазовая матрица рассеяния; $\sigma(z)$ и $\sigma_z(z)$ - вертикальные профили коэффициентов ослабления и рассеяния; q - фазовая матрица отражения; параметр $0 \le \varepsilon \le 1$ фиксирует акт взаимодействия излучения с подложкой; $\mathbf{F}^{in}(z, s)$, $\mathbf{F}^0(r_\perp, s)$, $\mathbf{F}^H(r_\perp, s)$ - источники излучения. Если хотя бы одна из функций $\mathbf{F}^0$, $\mathbf{F}^H$, q зависит от $r_\perp$, то решение общей векторной краевой задачи (1) находится в 5d фазовом объеме $(x, y, z, \vartheta, \varphi)$, а если нет зависимости от $r_\perp$, то приходим к одномерной задаче с 3d фазовым объемом (z, ϑ, φ).

Общие функциональные свойства задачи (1) изучались Михайловым Г.А. [7, 8], Гермогеновой Т.А., Кузьминой М.Г., Коноваловым Н.В. [10] и др. Первые алгоритмы и программы расчета полного набора параметров Стокса при любых структурах матриц рассеяния разработаны С.А. Стрелковым и Т.А. Сушкевич [1, 2, 11]. На этой методической основе проведены вычислительные эксперименты в интересах ряда космических проектов, когда земная поверхность моделировалась как ламбертовая.

Новая математическая модель переноса поляризованного излучения позволяет получать решение, асимптотически совпадающее с решением общей векторной краевой задачи (1) в пространстве обобщенных функций медленного роста [5, 207 с.] по горизонтальной координате $r_\perp$. С единых методических позиций рассматриваются четыре класса задач: с горизонтально-однородными и горизонтально-неоднородными изотропными (ламбертовыми) и анизотропными граничными условиями отражения (2).

Краевая задача (1) линейная и ее решение можно искать в виде суперпозиции $\Phi = \Phi_0 + \mathbf{\Phi}_R$. Фоновое излучение $\mathbf{\Phi}_0$ определяется как решение первой векторной краевой задачи теории переноса с «вакуумными» условиями

$$K\mathbf{\Phi} = \mathbf{F}^{in}, \quad \mathbf{\Phi}\big|_t = \mathbf{F}^0, \quad \mathbf{\Phi}\big|_b = \mathbf{F}^H \tag{3}$$

для слоя с прозрачными или абсолютно черными (неотражающими) границами ($R \equiv 0$). Задача для подсветки $\mathbf{\Phi}_R$, обусловленной влиянием отражающей подстилающей поверхности, - это общая векторная краевая задача ($R \neq 0, \;\; \mathbf{E} \neq 0$)

$$K\mathbf{\Phi}_R = 0, \quad \mathbf{\Phi}_R\big|_t = 0, \quad \mathbf{\Phi}_R\big|_b = \varepsilon R\mathbf{\Phi}_R + \varepsilon\mathbf{E}, \tag{4}$$

где источник $\mathbf{E}(r_\perp, s) \equiv R\mathbf{\Phi}_0$ - яркость (освещенность, облученность) подложки, создаваемая фоновым излучением с учетом его состояния поляризации и поляризующих свойств подложки.

Векторный передаточный оператор

Воспользуемся моделями векторных функций влияния [1] и представлением решения первой векторной краевой задачи

$$K\mathbf{\Phi}_n = 0, \quad \mathbf{\Phi}_n\big|_t = 0, \quad \mathbf{\Phi}_n\big|_b = \mathbf{t}_n f_n\,(s^H; r_\perp, s)$$

в форме векторного линейного функционала

$$\mathbf{\Phi}_n = (\Theta_n, f_n) = \frac{1}{2\pi}\int_{\Omega^-} ds' \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_n(s^-; z, r_\perp - r_\perp', s)\, f_n(s^H; r_\perp', s^-)\,dr_\perp',$$

ядром которого является векторная функция влияния – решение первых векторных краевых задач

$$K\Theta_n = 0, \quad \Theta_n\big|_t = 0, \quad \Theta_n\big|_b = \mathbf{t}_n f_\delta\,(s^-; r_\perp, s)$$

с параметром $s^- \in \Omega^-$ и источником $f_\delta(s^-; r_\perp, s) = \delta(r_\perp)\delta(s - s^-)$. Вводятся тензор функций влияния $\Pi = \{\Theta_{mn}\}$, линейный векторный функционал $\mathbf{\Phi} = (\Pi, \mathbf{f})$, операция, описывающая взаимодействие излучения с границей через тензор функций влияния:

$$[G\mathbf{f}](s^-; H, r_\perp, s) \equiv R(\Pi, \mathbf{f}) = \int_{\Omega^+} q(r_\perp, s, s^+)(\Pi, \mathbf{f})\,ds^+$$

и асимптотически точное решение общей векторной краевой задачи (4) представляется в форме линейного функционала с ядром – тензором функций влияния:

$$\mathbf{\Phi}_R = (\Pi, \mathbf{Y}), \text{ где «сценарий» } \mathbf{Y} = \sum_{k=0}^{\infty} G^k \mathbf{E} = \sum_{k=0}^{\infty} R\mathbf{\Phi}_k$$

суть сумма ряда Неймана по кратности отражения излучения от подложки с учетом многократного рассеяния в атмосфере через тензор функций влияния. «Сценарий» удовлетворяет уравнению Фредгольма II-рода

$$\mathbf{Y} = R(\Pi, \mathbf{Y}) + \mathbf{E}, \qquad (5)$$

которое называют уравнением *"приземной фотографии"* в поляризованном свете. *«Космическая фотография»* с учетом поляризации и деполяризации излучения в атмосфере и при взаимодействии с подложкой описывается передаточным оператором – линейным функционалом, устанавливающим явную связь со «сценарием»:

$$\mathbf{\Phi} = \mathbf{\Phi}_0 + (\Pi, \mathbf{Y}). \qquad (6)$$

Более подробно процедуры построения передаточного оператора и моделей функций влияния и пространственно-частотных характеристик изложены в монографии [1].

Заключение

Асимптотически точные модели представления решения исходной общей векторной краевой задачи (1) как линейные функционалы (6), адекватно описывающие физический процесс, получены строгими методами. В вычислительном плане решение общей векторной краевой задачи (1) свелось к четырем этапам:

- расчет вектора параметров Стокса фонового излучения атмосферы;
- расчет векторных функций влияния или пространственно-частотных характеристик с распараллеливанием по параметрам;
- расчет «сценария» распределения параметров Стокса излучения на подложке с помощью рекуррентных процедур;
- расчет функционала (6) - решения в заданных точках фазового объема исходной задачи (1), в частности, расчет «космической фотографии» в поляризованном свете.

Новыми результатами в предлагаемом подходе являются:

- решение исходной общей векторной краевой задачи (1) со сложной нелинейной зависимостью от свойств границы сведено к решению первых векторных краевых задач с «вакуумными» граничными условиями для векторных функций влияния или пространственно-частотных характеристик с распараллеливанием вычислений по параметрам;
- выделены универсальные функции, инвариантные относительно характеристик состояния поляризации, горизонтальных вариаций и угловых зависимостей граничных условий и источников задач (1) и (4);
- имея набор таких инвариантных тензоров функций влияния, с помощью ряда Неймана можно получить решение задач с различными конкретными пространственными и угловыми структурами источников и ядер операторов отражения в любых приближениях по кратности отражения с учетом многократного рассеяния и поляризации излучения в среде и на границе;
- вместо неявного учета отражения от подложки на каждой итерации по кратности рассеяния в новой модели расчеты вкладов рассеяния в атмосфере и отражения от подложки расщеплены - это эффективно, так как эти механизмы имеют разный порядок, а также важно для решения задач дистанционного зондирования подложки;
- формулировка векторных функционалов с ядрами – тензорами функций влияния или пространственно-частотных характеристик - устанавливает явные связи со «сценарием» на подложке, в свою очередь для «сценария» сформулирована модель с явной связью с характеристиками отражения подложки.

Такая постановка задачи приобретает актуальность в связи с новыми проблемами дистанционного зондирования поверхности суши и океана и идентификации объектов. Новые возможности предлагаемой модели связаны с верификацией инженерных прикладных методик, массово используемых для экспресс-анализа космических данных, и в радиационных блоках для моделей климата, циркуляции, прогноза, трансграничного переноса загрязнений воздушного бассейна, последствий техногенных аварий, состояния растительного покрова и т.д.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проекты 06-01-00666, 05-01-00202) и Российской академией наук (проект ОМН-3(4)).

Литература

1. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения // М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
2. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А.* Метод характеристик в задачах атмосферной оптики // М.: Наука, 1990. 296 с.
3. *Розенберг Г.В.* Вектор-параметр Стокса // УФН, 1955. Т. 56. № 1. С. 77-110.
4. *Чандрасекар С.* Перенос лучистой энергии // М.: ИИЛ, 1953. 431 с. (перевод с англ.)
5. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики // М: Наука, 1988. 512 с.
6. *Сушкевич Т.А.* Линейно-системный подход и теория оптического передаточного оператора // Оптика атмосферы и океана, 2000. Т. 13. № 8. С.744-753.
7. *Елепов Б.С., Кронберг А.А., Михайлов Г.А., Сабельфельд К.К.* Решение краевых задач методом Монте-Карло // Новосибирск: Наука СО, 1980. 174 с.
8. *Михайлов Г.А.* Оптимизация весовых методов Монте-Карло // М.: Наука, 1987. 240 с.
9. *Сушкевич Т.А.* Решение общей краевой задачи теории переноса для плоского слоя с горизонтальной неоднородностью // Доклады РАН, 1994. Т. 339. № 2. С.171-175.
10. *Гермогенова Т.А., Коновалов Н.В., Кузьмина М.Г.* Основы математической теории переноса поляризованного излучения (строгие результаты) // Принцип инвариантности и его приложения. Труды Всесоюзного симпозиума, Бюракан, 1981. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1989. С.271-284.
11. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Учет диффузного отражения при решении векторного уравнения переноса // Доклады АН СССР, 1983. Т. 271. № 1. С. 89-93.