Перенос поляризованного излучения в гетерогенной системе и кинетический подход

С.А. Стрелков, Т.А. Сушкевич, С.В. Максакова

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

Развивается кинетический подход к моделированию переноса поляризованного излучения в природных средах на основе общей векторной краевой задачи для линеаризованного уравнения Больцмана с парными «столкновениями». Методом функций влияния построен передаточный оператор гетерогенной системы переноса поляризованного излучения с разными радиационными режимами в подобластях.

Ключевые слова: аэрокосмическое дистанционное зондирование, перенос поляризованного излучения, природные гетерогенные среды, передаточный оператор, метод функций влияния.

Введение

Предлагается метод передаточного оператора и функций влияния, который используется

- в проведении анализа и постановке задач математического моделирования для новых сфер приложения теории переноса фотонов (электромагнитного излучения) с учетом многократного рассеяния и поглощения, преломления, поляризации и деполяризации в рамках матричного подхода для физико-математической модели, описывающей дуализм "волна-частица" и основанной на кинетических уравнениях, в том числе в аэрокосмических исследованиях, астрофизике, нанотехнологиях, фотонике, интроскопии, материаловедении (чистота материалов, качество поверхности и т.п.), медицине, науках о живом и т.д.;
- в разработке и развитии теоретических и методических основ (физико-математические модели, аналитические и численные методы, алгоритмы, их качественный анализ, компьютерные коды и программные системы) универсального матричного подхода для математического моделирования переноса поляризованных и неполяризованных электромагнитных волн (фотонов) на базе общих векторных краевых задач для интегро-дифференциального кинетического уравнения – линеаризованного приближения уравнения Больцмана с бинарными столкновениями;
- в развитии и верификации методики решения прямых и обратных задач пассивного и активного дистанционного зондирования, томографии, интроскопии, эллипсометрии, аэрокосмического мониторинга на базе теории обобщенных решений, передаточного оператора, теории сопряженных операторов и алгоритмов регулярных возмущений в рамках кинетической теории переноса электромагнитного излучения (фотонов);
- в разработке и реализации алгоритмов распараллеливания вычислений и автоматизации расчетов на современных и перспективных многопроцессорных вычислительных системах, а также быстрых компьютерных кодов и автоматизации обработки расчетных результатов на PC.

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.).

Разработчики поляризационных методик всё те же (Россия, США, Нидерланды, Франция, Германия, Беларусь); за рубежом, особенно в США, поддерживается широкое распространение готовых (устаревших) компьютерных кодов (чтобы всё держать под контролем и не позволить проводить самостоятельные разработки); к сожалению, нигде не читаются лекции по теории переноса, тем более с учетом поляризации.

При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и окружающей среды носителем информации об их состоянии является электромагнитное излучение, регистрируемое различными средствами. Радиационное поле Земли - одна из определяющих компонент климата, экосистемы и жизнеобеспечения. Составной частью исследований опасных явлений и экологических последствий естественно-природных катастроф и техногенных чрезвычайных ситуаций является разработка информационно-математической системы и создание программного визуально-диагностического обеспечения для математического моделирования переноса излучения, аэрокосмического дистанционного зондирования и мониторинга, анализа и прогнозирования на основе "сценариев". Для решения таких проблем традиционно используются самые большие ЭВМ, в том числе суперкомпьютеры (2004 год – в США по заказу NASA; Япония, Германия).

Разрабатывается многофункциональный универсальный комплекс физико-математических моделей и методов расчета характеристик системы переноса излучения и на его основе – информационно-математическая моделирующая система с широкой областью приложений для решения научно-исследовательских и прикладных задач. Теоретической основой являются многопараметрические многомерные векторные общие краевые задачи для интегро-дифференциального кинетического уравнения переноса электромагнитного излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, поляризующих и деполяризующих природных и искусственных средах в диапазоне от ультрафиолетовых до миллиметровых волн [1-15].

Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации распараллеливания расчета при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки. Новый подход к моделированию радиационных полей в оптически толстых и существенно неоднородных средах на базе модели переноса излучения в гетерогенных системах и метода векторных функций влияния обладает удивительными свойствами распараллеливания вычислений и построения новых алгоритмов декомпозиции: методом векторных функций влияния исходную задачу с областью определения решения большой размерности и большим размером разностной сетки фазового пространства задачи можно факторизовать на ряд малоразмерных подзадач, определенных на подобластях и разностных сетках меньшей размерности. При этом подобласти могут отличаться радиационными режимами и в них можно использовать разные приближения и методы решения векторных краевых задач теории переноса поляризованного излучения [1-15].

Математическая постановка задачи

Для наглядности рассмотрим одномерную гетерогенную систему переноса излучения, состоящую из $M > 1$ слоев с границами h_m, $m = 1 \div M+1$: $z \in \left[0, H\right]$, $h_1 = 0$, $h_m < h_{m+1}$, $h_{M+1} = H$. В каждом из слоев может устанавливаться радиационный режим, описываемый разными приближениями теории переноса, например: диффузионное, малоугловое, асимптотическое, многократное анизотропное и т.п. Примером гетерогенной системы является атмосфера-океан с многоярусными облаками.

Для записи граничных условий введем фазовые пространства - области изменения пространственных и угловых переменных:

$$d\downarrow,m=\{z,s:z=h_m,\ s\in\Omega^{\downarrow}\};\ d\uparrow,m=\{z,s:z=h_m,\ s\in\Omega^{\uparrow}\};\quad \Omega=\Omega^{\downarrow}\cup\Omega^{\uparrow};$$

$$\mu^{\downarrow}=\cos\vartheta^{\downarrow},\quad \vartheta^{\downarrow}\in[0,\pi/2);\quad \Omega^{\downarrow}=\{s^{\downarrow}=(\mu^{\downarrow},\varphi):\ \mu^{\downarrow}\in(0,1],\ \varphi\in[0,2\pi]\};$$

$$\mu^{\uparrow}=\cos\vartheta^{\uparrow},\quad \vartheta^{\uparrow}\in[\pi/2,\pi);\quad \Omega^{\uparrow}=\{s^{\uparrow}=(\mu^{\uparrow},\varphi):\ \mu^{\uparrow}\in[-1,0),\ \varphi\in[0,2\pi]\}.$$

Перенос излучения с учетом его поляризации и деполяризации в гетерогенной системе описывается векторной общей краевой задачей для кинетического уравнения

$$K\mathbf{\Phi}=\mathbf{F}^{in},\qquad \mathbf{\Phi}\big|_{t\downarrow}=\mathbf{F}_t^{\downarrow},\qquad \mathbf{\Phi}\big|_{b\uparrow}=\varepsilon R_b^{\uparrow}\mathbf{\Phi}+\mathbf{F}_b^{\uparrow},$$

с условиями отражения и пропускания на внутренних границах системы h_m, $m=2\div M$:

$$\mathbf{\Phi}\big|_{d\uparrow,m}=\varepsilon\ (R_m^{\uparrow}\mathbf{\Phi}+T_m^{\uparrow}\mathbf{\Phi})+\mathbf{F}_{m-1}^{\uparrow},\quad \mathbf{\Phi}\big|_{d\downarrow,m}=\varepsilon\ (R_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi}+T_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi})+\mathbf{F}_m^{\downarrow},$$

на внешних границах системы полагаем

$$\mathbf{F}_1^{\downarrow}=\mathbf{F}_t^{\downarrow};\quad \mathbf{F}_M^{\uparrow}=\mathbf{F}_b^{\uparrow};\quad d\downarrow,1=t\downarrow;\quad d\uparrow,M+1=b\uparrow;$$

интегро-дифференциальный оператор $K\equiv D-S$; $\mathbf{\Phi}(z,s)=(I,Q,U,V)$ - вектор параметров Стокса, первая компонента которого есть интенсивность излучения; M - число слоев; $m=1\div M$ – номер слоя от 1 до M; наглядные метки для внешних границ t - от слова “top”, b - “bottom”; $R_b^{\uparrow}$ - оператор, описывающий отражение от подстилающей поверхности; с помощью параметра $0\le\varepsilon\le 1$ фиксируем акт прохождения излучения через границы.

Оператор переноса D и оператор S – интеграл «столкновений» в терминологии уравнений Больцмана, описывающий один акт взаимодействия излучения с компонентами среды с учетом поляризационных эффектов, являются линейными:

$$D\equiv\mu\frac{\partial}{\partial z}+\sigma_{tot}(z);\quad S\mathbf{\Phi}\equiv\sigma_{sc}(z)\int_{\Omega}\gamma(z,s,s')\mathbf{\Phi}(z,s')ds'\ ,\quad ds'=d\mu' d\varphi'.$$

Прохождение излучения через внутренние границы между слоями описываем операторами отражения $R_m^{\downarrow}$, $R_m^{\uparrow}$ и пропускания $T_m^{\downarrow}$, $T_m^{\uparrow}$, ядрами которых являются матрицы рассеяния $\gamma_m^{\downarrow}$ и $\gamma_m^{\uparrow}$, соответствующие слою, лежащему ниже границы h_m (с меткой $\downarrow$), и слою, лежащему выше границы h_m (с меткой $\uparrow$):

$$\left[R_m^{\uparrow}\left(\gamma_{m-1}^{\uparrow}\right)\mathbf{f}_{m-1}^{\downarrow}\right]\left(h_m,s_{m-1}^{-}\right)=\int_{\Omega^{\downarrow}}\gamma_{m-1}^{\uparrow}\left(h_m,s_{m-1}^{+},s_{m-1}^{-}\right)\mathbf{f}_{m-1}^{\downarrow}\left(h_m,s_{m-1}^{+}\right)ds_{m-1}^{+};$$

$$\left[T_m^{\downarrow}\left(\gamma_m^{\downarrow}\right)\mathbf{f}_{m-1}^{\downarrow}\right]\left(h_m,s_m^{+}\right)=\int_{\Omega^{\downarrow}}\gamma_m^{\downarrow}\left(h_m,s_{m-1}^{+},s_m^{+}\right)\mathbf{f}_{m-1}^{\downarrow}\left(h_m,s_{m-1}^{+}\right)ds_{m-1}^{+};$$

$$\left[T_m^{\uparrow}\left(\gamma_{m-1}^{\uparrow}\right)\mathbf{f}_m^{\uparrow}\right]\left(h_m,s_{m-1}^{-}\right)=\int_{\Omega^{\uparrow}}\gamma_{m-1}^{\uparrow}\left(h_m,s_m^{-},s_{m-1}^{-}\right)\mathbf{f}_m^{\uparrow}\left(h_m,s_m^{-}\right)ds_m^{-};$$

$$\left[R_m^{\downarrow}\left(\gamma_m^{\downarrow}\right)\mathbf{f}_m^{\uparrow}\right]\left(h_m,s_m^{+}\right)=\int_{\Omega^{\uparrow}}\gamma_m^{\downarrow}\left(h_m,s_m^{-},s_m^{+}\right)\mathbf{f}_m^{\uparrow}\left(h_m,s_m^{-}\right)ds_m^{-}.$$

Решение представляется в виде асимптотического ряда регулярных возмущений

$$\mathbf{\Phi}=\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon^n\mathbf{\Phi}^{(n)}.$$

Вводятся алгебраические векторы размерности $2M$, компонентами которых являются четырех-компонентные векторы параметров Стокса:

полное решение

$$\mathbf{\Phi}=\{\mathbf{\Phi}_1^{\downarrow},\mathbf{\Phi}_1^{\uparrow},\mathbf{\Phi}_2^{\downarrow},\mathbf{\Phi}_2^{\uparrow},...,\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow},\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow},...,\mathbf{\Phi}_M^{\downarrow},\mathbf{\Phi}_M^{\uparrow}\}\ ;$$

n - приближение решения

$$\mathbf{\Phi}^{(n)}=\{\mathbf{\Phi}_1^{\downarrow(n)},\mathbf{\Phi}_1^{\uparrow(n)},\mathbf{\Phi}_2^{\downarrow(n)},\mathbf{\Phi}_2^{\uparrow(n)},...,\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)},\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)},...,\mathbf{\Phi}_M^{\downarrow(n)},\mathbf{\Phi}_M^{\uparrow(n)}\} \ ;$$

n - приближение источника

$$\mathbf{F}^{(n)}=\{\mathbf{F}_1^{\downarrow(n)},\mathbf{F}_1^{\uparrow(n)},\mathbf{F}_2^{\downarrow(n)},\mathbf{F}_2^{\uparrow(n)},...,\mathbf{F}_m^{\downarrow(n)},\mathbf{F}_m^{\uparrow(n)},...,\mathbf{F}_M^{\downarrow(n)},\mathbf{F}_M^{\uparrow(n)}\} \ ;$$

начальное приближение источников

$$\mathbf{F}^{(0)}\equiv\mathbf{E}=\{\mathbf{E}_1^{\downarrow},\mathbf{E}_1^{\uparrow},\mathbf{E}_2^{\downarrow},\mathbf{E}_2^{\uparrow},...,\mathbf{E}_m^{\downarrow},\mathbf{E}_m^{\uparrow},...,\mathbf{E}_M^{\downarrow},\mathbf{E}_M^{\uparrow}\};$$

«сценарии» на границах

$$\mathbf{Z}=\{\mathbf{Z}_1^{\downarrow},\mathbf{Z}_1^{\uparrow},\mathbf{Z}_2^{\downarrow},\mathbf{Z}_2^{\uparrow},...,\mathbf{Z}_m^{\downarrow},\mathbf{Z}_m^{\uparrow},...,\mathbf{Z}_M^{\downarrow},\mathbf{Z}_M^{\uparrow}\} \ ;$$

векторные функции влияния слоев

$$\Theta=\{\Theta_1^{\downarrow},\Theta_1^{\uparrow},\Theta_2^{\downarrow},\Theta_2^{\uparrow},...,\Theta_m^{\downarrow},\Theta_m^{\uparrow},...,\Theta_M^{\downarrow},\Theta_M^{\uparrow}\} \ ;$$

тензоры функций влияния слоев

$$\Pi=\{\Pi_1^{\downarrow},\Pi_1^{\uparrow},\Pi_2^{\downarrow},\Pi_2^{\uparrow},...,\Pi_m^{\downarrow},\Pi_m^{\uparrow},...,\Pi_M^{\downarrow},\Pi_M^{\uparrow}\} \ .$$

Осуществляется декомпозиция исходной общей задачи для системы в целом на $2M$ задач для каждого слоя отдельно со своими граничными условиями. Начальное приближение – это задачи с начальными источниками без учета обмена излучением между слоями с номерами $m=1\div M$:

$$K\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(0)}=\mathbf{F}_m^{\downarrow in}, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(0)}\Big|_{d\downarrow,m}=\mathbf{F}_m^{\downarrow}, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(0)}\Big|_{d\uparrow,m+1}=0\,;$$

$$K\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(0)}=\mathbf{F}_m^{\uparrow in}, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(0)}\Big|_{d\downarrow,m}=0, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(0)}\Big|_{d\uparrow,m+1}=\mathbf{F}_m^{\uparrow}\,.$$

Приближение $n\geq 1$ описывается системой из $2M$ уравнений для слоев $m=1\div M$:

$$K\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}=0, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}\Big|_{d\downarrow,m}=\mathbf{F}_m^{\downarrow(n-1)}, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}\Big|_{d\uparrow,m+1}=0\,;$$

$$K\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}=0, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}\Big|_{d\downarrow,m}=0, \quad \mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}\Big|_{d\uparrow,m+1}=\mathbf{F}_m^{\uparrow(n-1)}$$

с источниками на внутренних границах h_m с номерами $m=2\div M$:

$$\mathbf{F}_m^{\downarrow(n)}=T_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi}_{m-1}^{\downarrow(n)}+T_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi}_{m-1}^{\uparrow(n)}+R_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}+R_m^{\downarrow}\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}\,;$$

$$\mathbf{F}_m^{\uparrow(n)}=R_{m+1}^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}+R_{m+1}^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}+T_{m+1}^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_{m+1}^{\downarrow(n)}+T_{m+1}^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_{m+1}^{\uparrow(n)}$$

и на внешних границах с номерами $m=1$ и $m=M$:

$$\mathbf{F}_1^{\downarrow(n)}=0; \quad \mathbf{F}_M^{\uparrow(n)}=R_b^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_M^{\downarrow(n)}+R_b^{\uparrow}\mathbf{\Phi}_M^{\uparrow(n)}\,.$$

Приближение решения исходной задачи для $n\geq 1$ находится как решение системы уравнений в форме векторных линейных функционалов для каждого слоя с номерами $m=1\div M$ [2]:

$$\mathbf{\Phi}_m^{\downarrow(n)}=\left(\Pi_m^{\downarrow},\mathbf{F}_m^{\downarrow(n-1)}\right); \qquad \mathbf{\Phi}_m^{\uparrow(n)}=\left(\Pi_m^{\uparrow},\mathbf{F}_m^{\uparrow(n-1)}\right)\ .$$

Ядрами функционалов являются тензоры функций влияния слоев [2] $\Pi_m^{\downarrow}=\{\Theta_m^{\downarrow}\}$, $\Pi_m^{\uparrow}=\{\Theta_m^{\uparrow}\}$ и компоненты тензоров определяются через решения векторных краевых задач с номерами $m=1\div M$

$$K\Theta_m^{\downarrow}=0, \quad \Theta_m^{\downarrow}\Big|_{d\downarrow,m}=\mathbf{f}_{\delta,m}^{\downarrow}, \quad \Theta_m^{\downarrow}\Big|_{d\uparrow,m+1}=0\,; \qquad \mathbf{f}_{\delta,m}^{\downarrow}=\mathbf{t}\delta\left(s-s_m^{\downarrow}\right);$$

$$K\Theta_m^{\uparrow}=0, \quad \Theta_m^{\uparrow}\Big|_{d\downarrow,m}=0, \quad \Theta_m^{\uparrow}\Big|_{d\uparrow,m+1}=\mathbf{f}_{\delta,m}^{\uparrow}; \qquad \mathbf{f}_{\delta,m}^{\uparrow}=\mathbf{t}\delta\left(s-s_m^{\uparrow}\right).$$

.

Передаточный оператор гетерогенной системы

В n-приближении решение можно записать как обобщенное решение в форме векторного линейного функционала

$$\mathbf{\Phi}^{(n)} = \left(\Pi, \mathbf{F}^{(n-1)}\right) ,$$

где источник $(n-1)$-приближения записан в виде

$$\mathbf{F}^{(n-1)} = P\mathbf{\Phi}^{(n-1)} .$$

Введем матрично-векторный оператор G, который описывает один акт взаимодействия излучения с внутренними и внешними границами с учетом состояния его поляризации и многократного рассеяния и поглощения во всех слоях системы.

Можно установить, что два последовательных n-приближения связаны рекуррентным соотношением

$$\mathbf{\Phi}^{(n)} = \left(\Pi, P\mathbf{\Phi}^{(n-1)}\right) ,$$

где P - матрица ленточного типа, компонентами которой являются операторы отражения и пропускания границ. Справедливо представление

$$\mathbf{\Phi}^{(n)} = \left(\Pi, G^{n-1}\mathbf{E}\right) ,$$

где $\mathbf{E}$ - начальное приближение источников. Асимптотически точное решение получаем в форме векторного линейного функционала, который является передаточным оператором гетерогенной системы:

$$\mathbf{\Phi} = \left(\Pi, \mathbf{Z}\right) .$$

Оператор G можно представить через тензоры функций влияния слоев

$$G\mathbf{F} = P(\Pi, \mathbf{F}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ R_2^{\uparrow}(\Pi_1^{\downarrow}, \mathbf{F}_1^{\downarrow}) + R_2^{\uparrow}(\Pi_1^{\uparrow}, \mathbf{F}_1^{\uparrow}) + T_2^{\uparrow}(\Pi_2^{\downarrow}, \mathbf{F}_2^{\downarrow}) + T_2^{\uparrow}(\Pi_2^{\uparrow}, \mathbf{F}_2^{\uparrow}) \\ \vdots \\ T_m^{\downarrow}(\Pi_{m-1}^{\downarrow}, \mathbf{F}_{m-1}^{\downarrow}) + T_m^{\downarrow}(\Pi_{m-1}^{\uparrow}, \mathbf{F}_{m-1}^{\uparrow}) + R_m^{\downarrow}(\Pi_m^{\downarrow}, \mathbf{F}_m^{\downarrow}) + R_m^{\downarrow}(\Pi_m^{\uparrow}, \mathbf{F}_m^{\uparrow}) \\ R_{m+1}^{\uparrow}(\Pi_m^{\downarrow}, \mathbf{F}_m^{\downarrow}) + R_{m+1}^{\uparrow}(\Pi_m^{\uparrow}, \mathbf{F}_m^{\uparrow}) + T_{m+1}^{\uparrow}(\Pi_{m+1}^{\downarrow}, \mathbf{F}_{m+1}^{\downarrow}) + T_{m+1}^{\uparrow}(\Pi_{m+1}^{\uparrow}, \mathbf{F}_{m+1}^{\uparrow}) \\ \vdots \\ T_M^{\downarrow}(\Pi_{M-1}^{\downarrow}, \mathbf{F}_{M-1}^{\downarrow}) + T_M^{\downarrow}(\Pi_{M-1}^{\uparrow}, \mathbf{F}_{M-1}^{\uparrow}) + R_M^{\downarrow}(\Pi_M^{\downarrow}, \mathbf{F}_M^{\downarrow}) + R_M^{\downarrow}(\Pi_M^{\uparrow}, \mathbf{F}_M^{\uparrow}) \\ R_b^{\uparrow}(\Pi_M^{\downarrow}, \mathbf{F}_M^{\downarrow}) + R_b^{\uparrow}(\Pi_M^{\uparrow}, \mathbf{F}_M^{\uparrow}) \end{bmatrix}$$

Вектор $\mathbf{Z}$, который описывает «сценарии» угловых распределений параметров Стокса и яркости на внутренних и внешних границах системы с номерами $m = 1 \div M + 1$:

$$\mathbf{Z} = \sum_{n=0}^{\infty} G^n \mathbf{E} = \mathbf{E} + \sum_{n=1}^{\infty} P\mathbf{\Phi}^{(n)} = \mathbf{E} + \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{F}^{(n)},$$

есть сумма ряда Неймана по кратности прохождения излучения через границы системы с учетом многократного рассеяния и поляризации или деполяризации излучения с помощью оператора G, ядром которого являются тензоры функций влияния каждого слоя.

В целом решение исходной задачи для гетерогенной системы сводится к трем этапам.

Этап 1. Расчет вектора функций влияния с параметрической зависимостью от направлений и для отдельных слоев как решение задач с внешним мононаправленным потоком (аналог обычных задач для слоя, освещаемого солнечным потоком). Для расчета функций влияния в разных слоях выбираются аналитические или численные методы, которые наиболее адекватно описывает радиационный режим в соответствующих слоях.

Этап 2. Расчет вектора «сценариев» на внутренних и внешних границах системы с помощью матрично-векторной операции.

Этап 3. Расчет угловых и пространственных распределений излучения внутри системы или на её границах через векторный линейный функционал, содержащий вектор «сценариев» на границах и ядром которого является вектор функций влияния

Заключение

В последние годы поляризация привлекает научные интересы ученых в разных странах, особенно после запуска космических аппаратов с поляризационной аппаратурой POLDER. Наблюдается активность в разработках, ориентированных на многомерные среды, на стохастические облака и анизотропные среды (Красноярск, Обнинск). Расширяется сфера приложений, в том числе в область ММВ (ИРЭ РАН). Естественно, что на вооружении суперкомпьютеры, параллельные алгоритмы, метод Монте-Карло, а значит, в этих работах участвуют ученики Г.А.Михайлова (ИВМиМГ, Новосибирск).

Нам же удалось построить векторно-матричный передаточный оператор и найти базовый набор тензоров функций влияния и пространственно-частотных характеристик для задач дистанционного зондирования и моделиров ания переноса поляризованного излучения в гетерогенных системах с разными приближениями теории переноса в подобластях для плоских слоев и сферических оболочек (1D, 2D, 3D - геометрии).

Дано обобщение и развитие оригинального авторского подхода решения скалярных и векторных общих краевых задач теории переноса излучения методом функций влияния, основанном на теории регулярных возмущений, теории обобщенных решений, теории оптического и квазиоптического передаточного оператора, в том числе для двухсредных и гетерогенных систем. Важное приложение – это верификация и сравнительный анализ высокоточных и быстрых приближенных аналитических и численных методов и алгоритмов расчета вектора Стокса и интенсивности излучения для массового экспресс-анализа больших потоков данных аэрокосмического дистанционного зондирования и мониторинга окружающей среды.

Наличие универсального математического и программного аппарата позволит проводить эталонные расчеты, создавать базы расчетных данных радиационных характеристик, используемых при решении обратных задач дистанционного зондирования, проводить вычислительные эксперименты и имитационное моделирование каналов наблюдений и оценивать их информативность, верификацию приближенных методик, разработку и обоснование области применимости быстрых алгоритмов для массовых серийных расчетов, планирование экспериментов и оптимизацию систем измерений при решении научно-исследовательских и прикладных задач, а также исследовать процессы переноса фотонов и проводить тематический количественный анализ в задачах новых сфер приложений.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 08-01-00024).

Литература

1. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А.* Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.

2. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.

3. *Кузьмина М.Г., Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* К решению азимутальной задачи переноса поляризованного излучения в неоднородных плоских слоях с произвольной матрицей рассеяния. М., 1979. 28 с. (Препринт / ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, № 134).

4. *Кузьмина М.Г., Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Дискретный аналог уравнения переноса поляризованного излучения в плоских слоях. М., 1979. 32 с. (Препринт / ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, № 143).

5. *Стрелков С.А., Сушкевич Т.А.* Программная система АП-5 "Расчет поляризационных характеристик излучения в неоднородных плоских слоях". Инструкция. М., 1980. 44 с. (Препринт / ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, № 36).

6. *Стрелков С.А., Сушкевич Т.А.* Пакет начальных данных для программной системы АП-5 "Расчет поляризационных характеристик излучения в неоднородных плоских слоях". М., 1980. 40 с. (Препринт / ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, № 18).

7. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Учет диффузного отражения при решении векторного уравнения переноса // Доклады АН СССР. 1983. Т. 271. № 1. С. 89-93.

8. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Решение векторного уравнения переноса с локальными источниками методом пространственно-частотных характеристик // В сб.: "Численное решение задач атмосферной оптики". Сборник научных трудов ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. / Под редакцией Масленникова М.В. и Сушкевич Т.А. - М.: ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1984. С. 22-41.

9. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Куликов А.К., Максакова С.В.* К теории векторного оптического передаточного оператора // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1218-1230.

10. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Куликов А.К., Максакова С.В.* Модель переноса поляризованного излучения в плоском слое с границей раздела двух сред // Сиб. журн. вычисл. математики. 1998. Т 1. № 2. С. 183-194.

11. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В.* Математическая модель переноса поляризованного излучения // Математическое моделирование. 1998. Т 10. № 7. С. 61-75.

12. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Куликов А.К., Максакова С.В.* К теории векторного оптического передаточного оператора системы атмосфера-океан // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т 11. № 9. С. 987-998.

13. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Функция влияния общей векторной краевой задачи теории переноса // Докл. РАН. 1999. Т 364. № 4. С. 457-461.

14. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Модель переноса поляризованного излучения в системе атмосфера-земная поверхность // Сиб. журн. вычисл. математики. 1999. Т 2. № 1. С. 89-98.

15. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Волкович А.Н., Куликов А.К., Максакова С.В.* Параллельные алгоритмы моделирования переноса излучения в гетерогенной среде с учетом поляризации // В сб.: Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет: технологии параллельного программирования", 18-23 сентября 2006 года, Новороссийск, Абрау-Дюрсо. - М.: Изд-во МГУ им. М.В.Ломоносова, 2006. С. 34-36.

Polarized radiation transfer in heterogeneous systems and kinetic approach

S.A. Strelkov, T.A.Sushkevich, S.V. Maksakova

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

The kinetic approach to modelling of the polarized radiation transfer in natural media is developed on a basis of the general vector boundary-value problem for the linearity Boltzmann's equation with pair collisions. The transfer operator of the heterogeneous polarized radiation transfer system with the different radiation conditions in the subdomains have been constructed.

Keywords: air-space remote sensing, polarized radiation transfer, natural heterogeneous media, transfer operator, influence functions method.