

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.331-334

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОНКИХ ОБЛАЧНЫХ СЛОЯХ

Ч. Хунли¹, Я.А. Илюшин^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва,
ул. территория Ленинские Горы, 1
E-mail: honglizhao123@gmail.com

²Институт радиотехники и электроники В.А. Котельникова РАН, 125009, г. Москва,
ул. Моховая, 11
E-mail: ilyushin@phys.msu.ru

Аннотация. В работе численным моделированием исследуется влияние микрофизических свойств облаков на поляризацию и пропускание лазерных импульсов при дистанционном зондировании. Мы используем двойной подход, включающий как прямое численное решение уравнения переноса излучения, так и моделирование Монте-Карло, исследуя сценарии с учетом и без учета эффектов поляризации. Анализируется горизонтальное зондирование с самолета, влияние толщины облаков и рассеяния на поляризованный и неполяризованный свет. Результаты способствуют улучшению методов зондирования, моделированию атмосферы и развитию технологий мониторинга.

Ключевые слова: численное моделирование, уравнение переноса излучения, тонкие облачные слои, эффекты поляризации, моделирование Монте-Карло

NUMERICAL SIMULATION OF THE LASER PULSE PROPAGATION IN THIN CLOUD LAYERS

Z. Hongli, Y.A. Ilyushin

Abstract. The paper uses numerical modeling to investigate the influence of cloud microphysical properties on the polarization and transmission of laser pulses in remote sensing. We use a dual approach, including both a direct numerical solution of the radiative transfer equation and Monte Carlo simulations, exploring scenarios with and without polarization effects. Horizontal sounding from an aircraft, the influence of cloud thickness and scattering on polarized and unpolarized light are analyzed. The results contribute to the improvement of sensing methods, atmospheric modeling, and the development of monitoring technologies.

Keywords: numerical simulation, radiative transfer equation, thin cloud layers, polarization effects, Monte Carlo simulation

Введение

В работе [1] рассматривается распространение лазерных импульсов в плоскопараллельном облачном слое при нормальном падении лазерного излучения на поверхность слоя (рис. 1, Б и В) с поверхности Земли или самолета или космического аппарата. В этих работах исследовалось явление так называемого динамического кольцевого гало, которое возникает в облачных слоях, не превышающих некоторую пороговую толщину. В данной работе исследуются возможности активного зондирования облачного слоя импульсным лазерным излучением с самолета, находящегося внутри облака. Выбор направления излучения определяется спецификой решаемой задачи. В данном исследовании мы ограничимся горизонтальными направлениями зондирования (параллельными границам плоскопараллельного слоя облаков, рис. 1, А). В нашей работе мы моделируем перенос излучения в облачном слое двумя способами: прямым численным решением уравнения переноса излучения с использованием конечно-разностной схемы в дискретных ординатах с учетом поляризации и методом статистического моделирования (Монте-Карло) без учета поляризации.

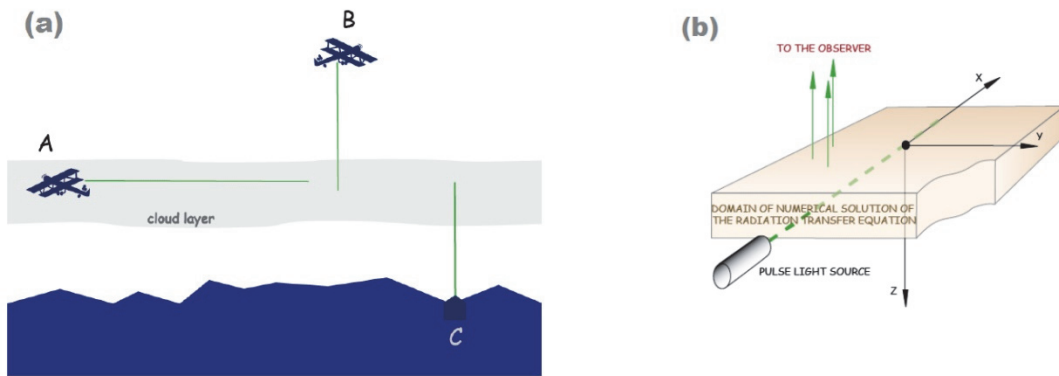


Рис. 1. Лидарное зондирование слоев облаков. Схематическое изображение экспериментальной установки (а) и соответствующей модели для численного моделирования RT (б)

Конечно-разностная схема численного моделирования переноса поляризованного излучения методом дискретных ординат

В настоящем исследовании VRTE в трехмерной среде решается методом дискретных ординат внутри прямоугольной области (рис.1, правая панель). Алгоритм в значительной степени идентичен тому, который применялся в [2] с соответствующими модификациями, адаптирующими его к новой установке (см. рисунок 1). Пространственное и угловое распределение интенсивности и поляризации излучения в среде подчиняется векторному уравнению переноса излучения (VRTE)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega})}{\partial t} + (\vec{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\epsilon \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \hat{\chi}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') \mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' + \mathbf{e}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t), \quad (1)$$

где $\vec{\Omega} = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – единичный вектор произвольного направления, $\mathbf{I}(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \{I, Q, U, V\}$ – вектор параметров Стокса поляризованного излучения, ϵ – объемный коэффициент ослабления поляризованного излучения в среде, $\hat{\chi}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$ – матрица рассеяния, $\mathbf{e}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t)$ – функция источников в среде.

Численное моделирование переноса излучения в слое методом Монте-Карло

Подход Монте-Карло, принятый в этом исследовании, также во многом совпадает с подходом, использованным в [2,3]. Для расчетов была принята широко используемая функция рассеяния Хеньи-Гринштейна

$$x(\Omega, \Omega') = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (2)$$

где g – параметр асимметрии (средний косинус угла рассеяния), $\cos \theta = \Omega \cdot \Omega'$ – косинус угла рассеяния.

Результаты моделирования

В данной работе принята общая схема исследования вопроса, ранее реализованная в [2]. Она предусматривает одновременный анализ численных решений уравнения переноса излучения различных типов.

Пример результатов моделирования методом дискретных ординат представлен на рис. 2.

Для различных состояний поляризации падающего излучения от лазерного источника показаны интенсивность, степень поляризации и четвертый параметр Стокса V излучения, выходящего через поверхность облачного слоя в различные моменты времени. Размер области численного решения ИПВ составляет $4000 \text{ м} \times 500 \text{ м} \times 50 \text{ м}$. Импульсное лазерное излучение падает на боковую грань области, параллельную длинной стороне.

Для упрощения визуального анализа результатов расчетов интенсивность I и поляризованная часть интенсивности $P = Ip$ показаны в одной цветовой шкале.

Аналогично результатам [2], на представленных рисунках видно, что круговая поляризация падающего излучения сохраняется и в наблюдаемом исходящем излучении после многих актов рассеяния в среде, в соответствии с общими законами многократного рассеяния поляризованного излучения, известными ранее.

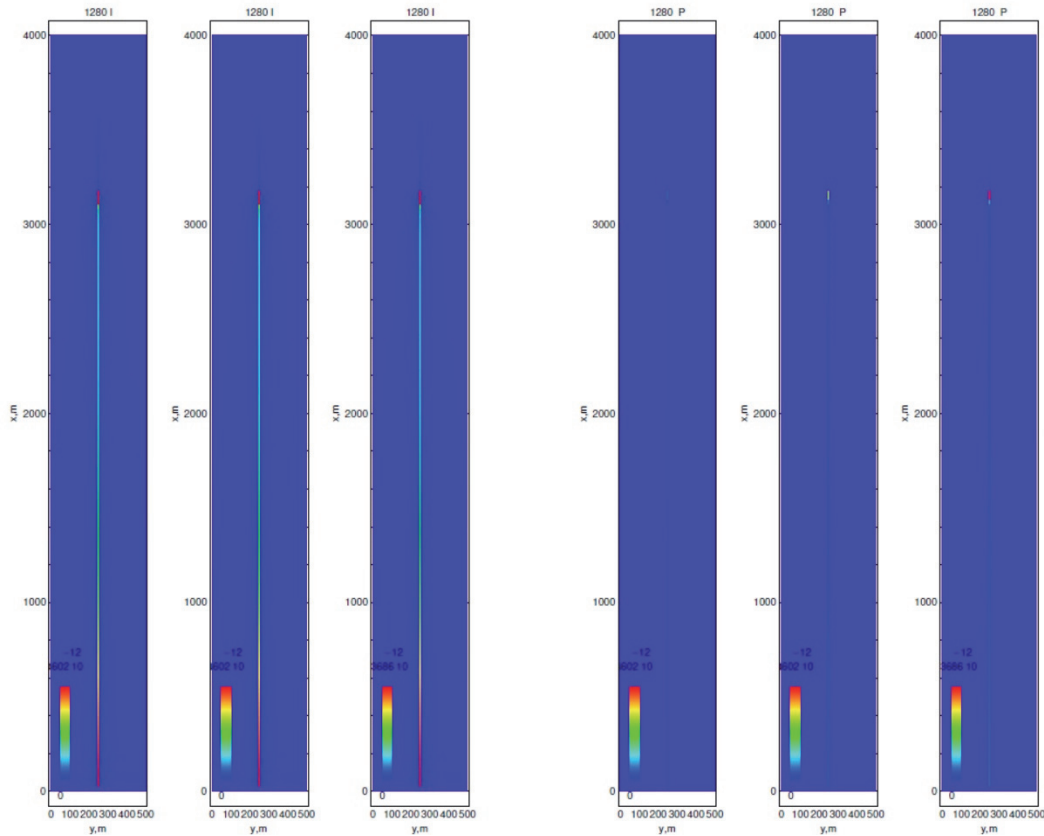


Рис. 2. Пример распространения импульса в облачном слое. Три крайние левые панели: интенсивность наблюдаемого выходного излучения I (неполяризованное падающее излучение (слева), круговая поляризация падающего излучения $V=1$ (в центре), линейная поляризация падающего излучения $Q=1$ (справа)). Три крайних правых панели: поляризованная часть интенсивности $P = I_p$ (неполяризованное падающее излучение (слева), круговая поляризация падающего излучения $V=1$ (в центре), линейная поляризация падающего излучения $Q=1$ (справа))

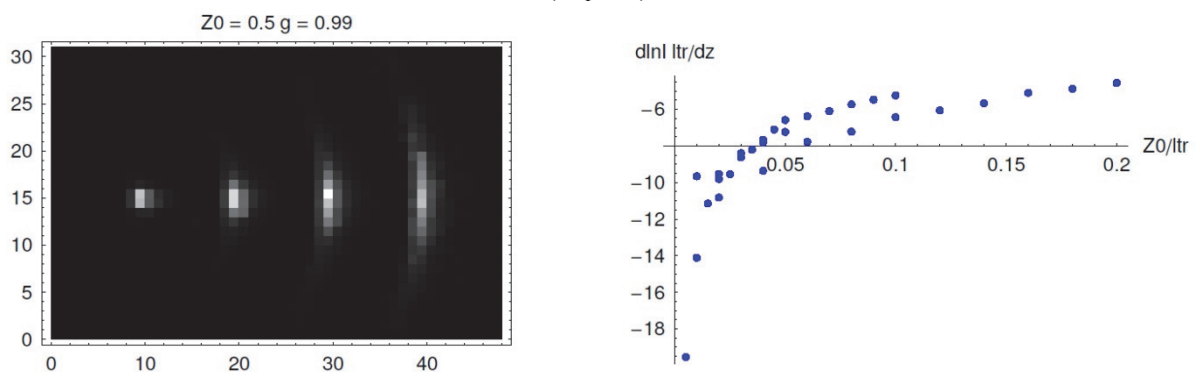


Рис. 3. Пример результатов статистического моделирования переноса излучения в облачном слое. Интенсивность I , выходящая через поверхность плоскопараллельного слоя в различные последовательные моменты времени с равными шагами. Для обеспечения визуального отображения нормализация интенсивности индивидуальна для каждого момента. Справа: скорости затухания интенсивности выходного излучения с расстоянием для различной толщины облачного слоя, выявленные в результате статического моделирования RT

Мы также провели большую серию скалярных расчетов РТ в плоском слое для заданной конфигурации источника и среды при различных значениях толщины слоя и параметра асимметрии рассеяния g в нем. Типичный пример результатов расчета показан на рис. 3, левая панель. Он отображает распределение выходной интенсивности по поверхности слоя в несколько различных последовательных моментов времени. Для наглядного отображения на одном графике нормировка яркости индивидуальна для каждого момента.

На рис. 3 представлено экспоненциальное затухание выходной интенсивности $d \ln I / d(z/l_\pi)$ с расстоянием. Видно, что константа затухания зависит в основном от безразмерной нормированной толщины слоя z_0/l_π в широком диапазоне изменения параметра асимметрии g от 0,9 до 0,99, что соответствует десятикратному изменению транспортной длины. Это дает возможность экспериментально измерить толщину облачного слоя, основываясь на наблюдении за уменьшением интенсивности выходного излучения.

Заключение

Изучена возможность зондирования лазерным импульсом облачных слоев в горизонтальных направлениях. Проведено компьютерное моделирование распространения импульса в облачном слое путем прямого численного решения уравнения переноса излучения с учетом поляризации (конечно-разностная схема) и без учета поляризации (статистическое моделирование методом Монте-Карло).

Для различных состояний поляризации падающего импульса изучена поляризация поля рассеянного излучения в облачном слое.

Проведены численные оценки спада интенсивности рассеянного поля со временем и пройденным расстоянием в зависимости от толщины облачного слоя. Показана возможность оценки толщины облачного слоя по наблюдениям динамики спада интенсивности рассеяния.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [4].

Список литературы

1. Prigarin SM. Monte Carlo simulation of the effects caused by multiple scattering of groundbased and spaceborne lidar pulses in clouds // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2017. – Vol. 30. – P. 79–83.
2. Ilyushin Yaroslav A. Transient polarized radiative transfer in cloud layers: numerical simulation of imaging lidar returns // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2019. – Apr. – Vol. 36, no. 4. – P. 540–548.
3. Ilyushin Ya A. Dynamic Backscattering Halo of Pulsed Laser Beams in Thin Cloud Layers // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 62. – No. 3. – P. 192–199.
4. «Lomonosov»: Supercomputing at Moscow State University / Victor A. Sadovnichy, Alexander V. Tikhonravov, Vladimir V. Voevodin, Vsevolod Opanasenko // *International Conference on High Performance Computing*, 2013.