

Рассеяние поляризованных импульсов оптического излучения в тонких облачных слоях

Илюшин Я.А.^{1,2}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Россия 119991 Москва Ленинские горы
E-mail: ilyushin@phys.msu.ru*

² *Институт радиотехники и электроники В.А.Котельникова РАН
Россия 125009 Москва Моховая 11/7*

Проведено компьютерное моделирование лидарного зондирования тонких облачных слоев визуализирующим лидаром. Численно решено векторное уравнение переноса излучения с импульсным источником узкого пучка поляризованного излучения. Предложена теоретическая модель, объясняющая полученные результаты на уровне полуколичественного согласия. Ключевые слова: перенос излучения, поляризация, лидар, дистанционное зондирование

Scattering of Polarized Optical Pulses in Thin Cloud Layers

Ilyushin Ya.A. ^{1,2}

¹ *Moscow State University*

² *Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics*

Computer simulation of lidar sounding of thin cloud layers by visualizing lidar has been carried out. A vector radiative transfer equation with a pulsed source of a narrow beam of polarized radiation is solved numerically. A theoretical model is proposed to explain the results obtained at the level of semi-quantitative agreement.

Keywords: radiation transfer, polarization, lidar, remote sensing

Теория переноса излучения [1] является хорошо зарекомендовавшей себя приближенной теорией для оценки энергетических параметров радиационных полей в случайных средах. Он широко применяется как в задачах радиационного теплообмена [2], так и для анализа и интерпретации данных зондирования [3]. Корректное моделирование полей излучения требует правильного учета поляризации излучения и его изменений при рассеянии. В настоящее время доступны быстрые и точные компьютерные коды для оценки индивидуальных свойств рассеяния (матриц Мюллера) частиц [4]. Алгоритмы моделирования статического переноса поляризованного излучения в простых средах и конфигурациях источников (плоские слоистые среды [5], источники теплового излучения [6]) обеспечивают точность, необходимую для современных приложений дистанционного зондирования. Пренебрежение поляризацией значительно упрощает все расчеты, хотя и приводит к погрешности до десятков процентов [7]. Скалярный подход до сих пор используется для качественных оценок [8], а также для моделирования сложных полей с сингулярностями [9]. Среди известных опубликованных работ по нестационарным задачам переноса излучения, наоборот, не так много работ, в которых учитывается поляризация (см. [10] и ссылки там). В числе этих работ стоит упомянуть статью [11], где исследуется так называемое динамическое обратное рассеяние гало в оптически толстой среде. Кроме того, в работе

[12] полуаналитическое решение нестационарной поляризованной задачи радиационного переноса валидировано моделированием методом Монте-Карло (МС) поляризованных отраженных сигналов лидара.

В целом состояние поляризации фотона содержит ценную информацию о предыдущей истории жизни этого фотона в среде. Учет поляризации не только количественно повышает точность моделирования, но и позволяет качественно анализировать процесс формирования радиационного поля. Это используется в экспериментах по селективному зондированию пространственно-неоднородных сред. [13,14]. Одной из сложнейших задач теории переноса излучения является поле точечного мононаправленного (ТМ) источника (прожектор, карандаш луч и др.) [15]. Источник ТМ, с одной стороны, является фундаментальным элементарным источником излучения в теории переноса излучения. Любая функция источников уравнения переноса излучения (УПИ) может быть представлена в виде линейной суперпозиции источников типа ТМ. С другой стороны, узкие коллимированные пучки излучения, в частности лазерные лучи, широко применяются в дистанционном зондировании природной среды [16], геодезии и навигации [17], беспроводной связи [18], медицине [19], различных технологических процессах [20] и т.д. В связи с этим опубликовано много работ по распространению импульсных [11] и непрерывных [21] пучков излучения. В большинстве этих работ (всех цитируемых здесь, кроме [11]) используется скалярный подход к расчету поля, т.е. поляризация фотонов там игнорируется.

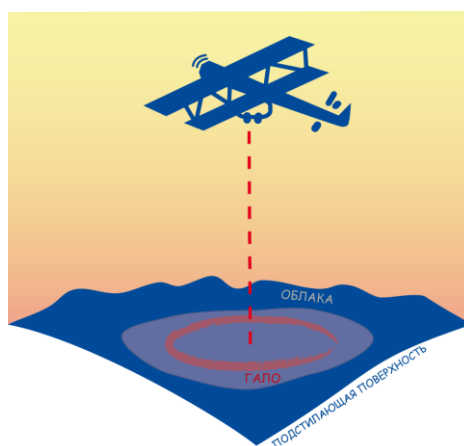


Рис. 1. Схема зондирования облачного слоя визуализирующим лидаром

Авторы [11] численно решили векторное уравнение переноса излучения (ВУПИ) с помощью алгоритма Монте-Карло и показали, что в слоях конечной толщины может формироваться так называемое динамическое гало обратного рассеяния (кольцеобразный максимум интенсивности излучения). Такое зависящее от времени гало обратного рассеяния наблюдалось при диффузном отражении лазерного излучения от облачных слоев в эксперименте с так называемыми визуализирующими лидарами [22] (рис.1). Численное моделирование без поляризации [23] теоретически подтвердило эти наблюдения.

В данной работе приведены результаты исследований эффекта динамического гало обратного рассеяния с учетом поляризации излучения. Векторное уравнение переноса поляризованного излучения в плоскостой среде с точечным мононаправленным источником численно решено с помощью конечно-разностной схемы на высокопроизводительном параллельном компьютерном кластере. Пример результатов

численного моделирования поляризованного светового поля в среде приведён на рис. 2. Полученные результаты объяснены с помощью простой аналитической модели на уровне полуколичественного согласия.

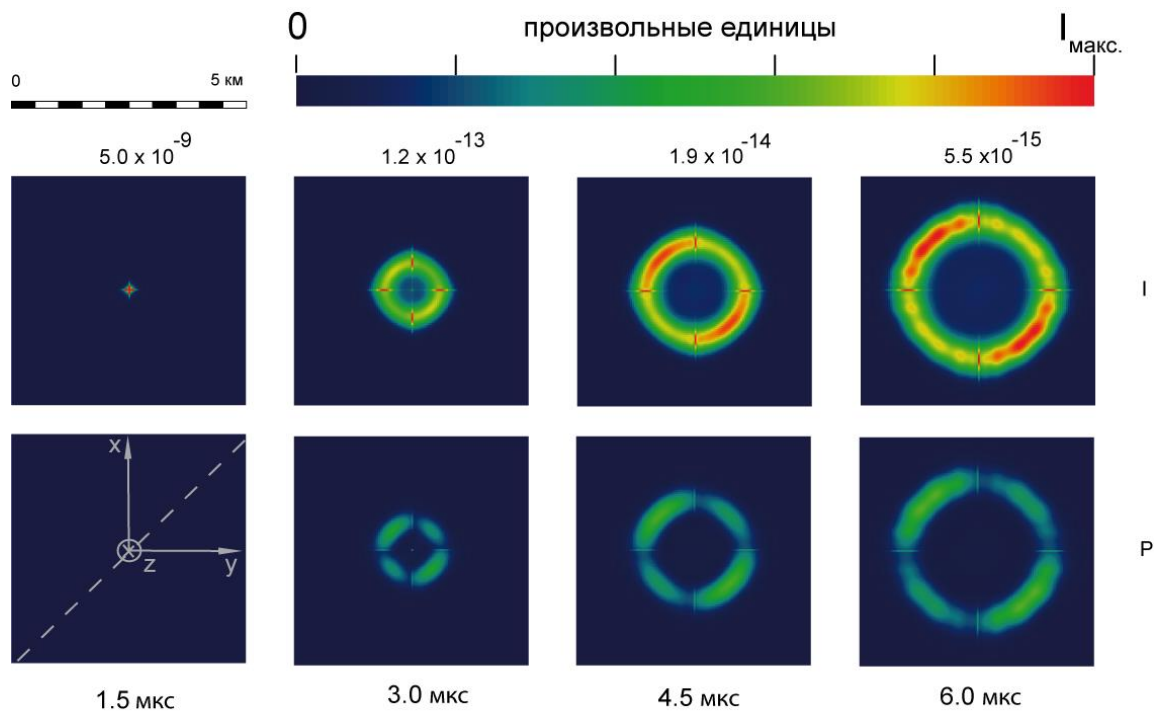


Рис. 2. Результаты численного моделирования поляризованного светового поля в тонком облачном слое. Плоскость линейной поляризации излучения импульсного лазерного источника указана пунктирной линией. Верхний ряд – интенсивность излучения, нижний ряд – интенсивность поляризованной компоненты излучения. Максимальная интенсивность излучения в относительных единицах указана цифрами в верхнем ряду. Нижний ряд цифр – моменты времени в микросекундах.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [24]. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-27-00396.

Литература

1. S. Chandrasekhar, Radiative Transfer (1960).
2. M. N. Ozisik, Radiative transfer and interactions with conduction and convection (Wiley, New York, 1973).
3. C. Emde, V. Barlakas, C. Cornet, F. Evans, S. Korkin, Y. Ota, L. Labonnote, A. Lyapustin, A. Macke, B. Mayer, and M. Wendisch, "IPRT polarized radiative transfer model intercomparison project - Phase A," Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 164, 8–36 (2015).
4. A. Moroz, "Improvement of Mishchenko's T-matrix code for absorbing particles," Applied Optics 44, 3604–3609 (2005).
5. K. Stamnes, S.-C. Tsay, W. Wiscombe, and K. Jayaweera, "Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media," Appl. Opt. 27, 2502–2509 (1988).

6. C. Emde, S. A. Buehler, C. Davis, P. Eriksson, T. R. Sreerekha, and C. Teichmann, "A polarized discrete ordinate scattering model for simulations of limb and nadir long-wave measurements in 1-D/3-D spherical atmospheres," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109 (2004). D24207.
7. C. Adams and G. Kattawar, "Solutions of the equations of radiative transfer by an invariant imbedding approach," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 10, 341 – 356 (1970).
8. A. D. Kim and M. Moscoso, "Backscattering of beams by forward-peaked scattering media," *Opt. Lett.* 29, 74–76 (2004).
9. Y. A. Ilyushin and V. P. Budak, "Narrow beams in scattering media: the advanced small-angle approximation," *J. Opt. Soc. Am. A* 28, 1358–1363 (2011).
10. H.-L. Yi, X. Ben, and H. Tan, "Transient radiative transfer in a scattering slab considering polarization," *Opt. Express* 21, 26693–26713 (2013).
11. K. Phillips, M. Xu, S. Gayen, and R. Alfano, "Time-resolved ring structure of circularly polarized beams backscattered from forward scattering media," *Opt. Express* 13, 7954–7969 (2005).
12. L. I. Chaikovskaya, E. P. Zege, I. L. Katsev, M. Hirschberger, and U. G. Ooppel, "Lidar returns from multiply scattering media in multiple-field-of-view and CCD lidars with polarization devices: comparison of semi-analytical solution and monte carlo data," *Appl. Opt.* 48, 623–632 (2009).
13. A. G. Luchinin, M. Y. Kirillin, and L. S. Dolin, "Backscatter signals in underwater lidars: temporal and frequency features," *Appl. Opt.* 57, 673–677 (2018).
14. X. Guo, M. F. G. Wood, and A. Vitkin, "Monte Carlo study of pathlength distribution of polarized light in turbid media," *Opt. Express* 15, 1348–1360 (2007).
15. S. Chandrasekhar, "On the diffuse reflection of a pencil of radiation by a plane-parallel atmosphere," *Proceedings of the National Academy of Science* 44, 933–940 (1958).
16. E. W. Eloranta, "Practical model for the calculation of multiply scattered lidar returns," *Appl. Opt.* 37, 2464–2472 (1998).
17. G. A. Kaloshin, G. G. Matvienko, S. A. Shishkin, V. I. Anisimov, V. V. Butuzov, V. V. Zhukov, G. V. Stolyarov, and V. P. Pasyuk, "Potential capabilities of aircraft laser landing systems," *Appl. Opt.* 55, 8556–8563 (2016).
18. G. Giuliano, L. Laycock, D. Rowe, and A. E. Kelly, "Solar rejection in laser based underwater communication systems," *Opt. Express* 25, 33066–33077 (2017).
19. V. V. Tuchin, "Light scattering study of tissues," *Phys. Usp.* 40, 495–515 (1997).
20. S. V. Shalupaev, A. V. Maksimenko, V. N. Myshkovets, and Y. V. Nikityuk, "Laser cutting of ceramic materials with a metallized surface," *J. Opt. Technol.* 68, 758 (2001).
21. A. Lewis, M. Bell, R. Wagner, Q. Su, and R. Grobe, "Dark cone produced by light backscattered off turbid media," *Laser Physics* 13, 207–212 (2003).
22. R. Cahalan, M. McGill, J. Kolasinski, T. Varnai, and K. Yetzer, "THOR - cloud thickness from offbeam lidar returns," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22, 605–627 (2005).
23. S. M. Prigarin, "Monte Carlo simulation of the effects caused by multiple scattering of ground-based and spaceborne lidar pulses in clouds," *Atmospheric and Oceanic Optics* 30, 79–83 (2017).
24. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В.: Практика суперкомпьютера "Ломоносов" // Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", N 7, 2012. С. 36-39.