

# Численное моделирование световых полей лазерных источников в рассеивающих средах



## 14 Численное моделирование световых полей лазерных источников в рассеивающих средах

Численное моделирование световых полей лазерных источников в рассеивающих средах представляет собой математически сложную и вычислительно трудоемкую задачу. В статье представлен эффективный подход к регуляризации и решению указанной задачи. Приведены результаты численного моделирования светового поля лазерного маяка в тумане на основе параллельных вычислений на суперкомпьютере МГУ «Чебышев»

### АВТОРЫ:

**Я.А. Илюшин** – канд. физ.-мат. наук, доцент, физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: [ilyushin@physics.msu.ru](mailto:ilyushin@physics.msu.ru)

**В.Г. Ошлаков** – научный сотрудник, Институт оптики атмосферы, Томск,  
e-mail: [oshlakov@iao.ru](mailto:oshlakov@iao.ru)

### Введение

В настоящее время лазерные источники света широко применяются для решения различных прикладных задач. Так, лазерные измерительные инструменты используются в геодезии и навигации (рис. 1, 2), дистанционном зондировании природных сред, техническом контроле промышленных продуктов и изделий, медицинской диагностике биологических жидкостей и тканей. Кроме того, лазерные источники света применяются для передачи информации, а также для создания визуальных спецэффектов при организации зрелищных и других мероприятий. Типичная конфигурация источника и среды, характерная для эксперимента по лазерному зондированию атмосферы, показана на рис. 3.

Проведенные исследования показывают, что навигационные системы оптического диапазона обладают потенциально более высокой точностью по сравнению с радиодиапазоном, преимущественно используемым в настоящее время в аэродромных системах ближнего привода и посадки самолетов. В настоящее время имеются перспективные разработки ИК диапазона [1], позволяющие создать систему посадки самолетов, удовлетворяющую всем современным требованиям ИКАО.

С другой стороны, излучение лазера может представлять угрозу для безопасности и здоровья. С появлением относительно мощных лазеров в широком доступе для населения становится особенно актуальной проблема лазерной безопасности, в том числе оценка степени опасности в конкретных ситуациях и выработка эффективных мер защиты и противодействия. По этим причинам требуется разработка необходимых средств моделирования и анализа распространения лазерного излучения в реальных природных и технологических средах.

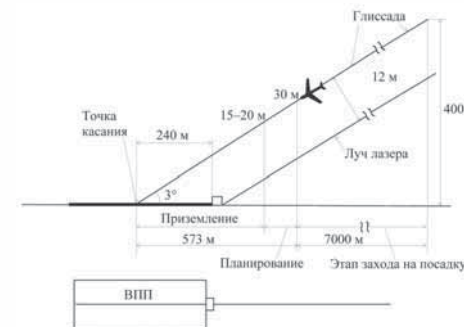


Рис. 1. Инструментальная система ориентирования самолета при посадке по лучу лазера

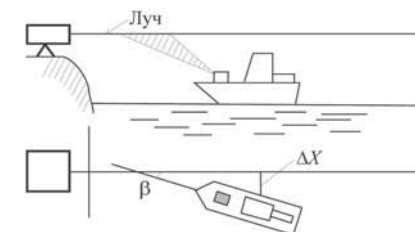


Рис. 2. Инструментальная система ориентирования кораблей по лучу лазера



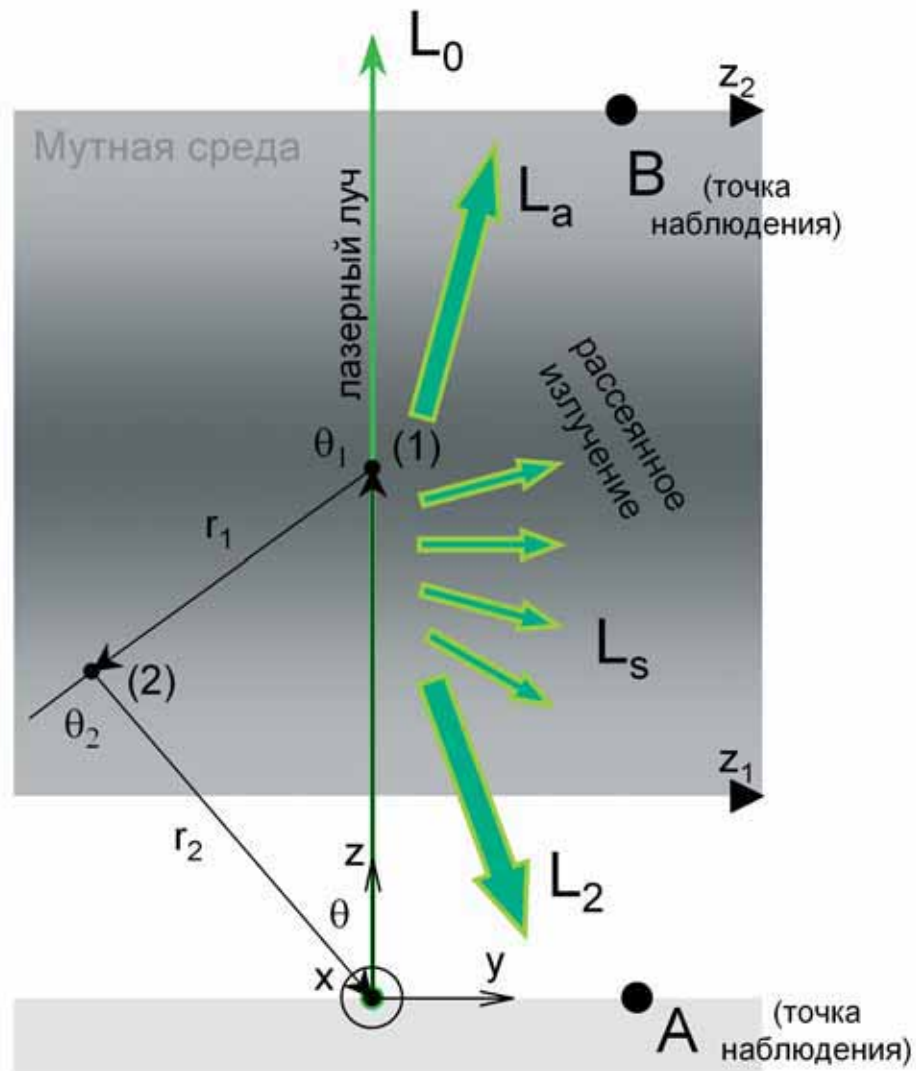


Рис. 3.  
Схема эксперимента по лидарному зондированию атмосферы

На распространение излучения в таких средах значительное влияние оказывает стохастическое рассеяние излучения на присутствующих в этих средах случайных неоднородностях, турбулентности и т.п.

### Анизотропия рассеяния в реальных средах

Математическое моделирование светового поля лазерного источника в случайной мутной среде сводится к решению уравнения переноса излучения (УПИ) с точечным мононаправленным (ТМ) источником излучения. В случае необходимости учета поляризации излучения соответственно требуется решение векторного уравнения переноса излучения (ВУПИ). Вычислительная трудоемкость задачи определяется сложностью углового распределения интенсивности излучения в каждой точке рассматриваемой области трехмерного пространства, а также наличием особенностей этого распределения, подлежащих регуляризации. Детальный численный расчет светового поля в области большого размера требует больших вычислительных ресурсов, на сегодняшний день значительно превышающих возможности типичного персонального компьютера. К настоящему моменту широко распространены различные огрубленные расчеты с использованием тех или иных приближений и допущений.

На практике, как правило, сложность расчета усугубляется еще и сильной анизотропией рассеяния, которую принято характеризовать средним косинусом угла рассеяния (параметром асимметрии)  $g$ . Сильная анизотропия рассеяния характерна для многих сред распространения оптического излучения, в том числе атмосферного аэрозоля ( $g \sim 0,9$ ), облаков ( $g > 0,9$ ), океанской воды ( $g > 0,99$ ), биологических тканей ( $g > 0,95$ ), крови и т.д. В численном моделировании это приводит к плохо обусловленным системам уравнений и неустойчивости численного решения. В расчетах методом Монте-Карло анизотропное рассеяние приводит к необходимости оценки вероятности маловероятных событий, что значительно увеличивает необходимое число испытаний и длительность расчета. Для получения удовлетворительного численного решения задачи необходима разработка и применение соответствующих специальных методов. Общим приемом, лежащим в основе большинства этих методов, является выделение из общего решения сингулярных и сильно анизотропных компонент, для которых формулируется и решается специальная отдельная (приближенная) краевая задача для (В)УПИ. После этого оставшаяся часть решения, мало отличающаяся от изотропного светового поля, находится обычными методами теории переноса излучения. Гладкость этой части решения и регулярность соот-

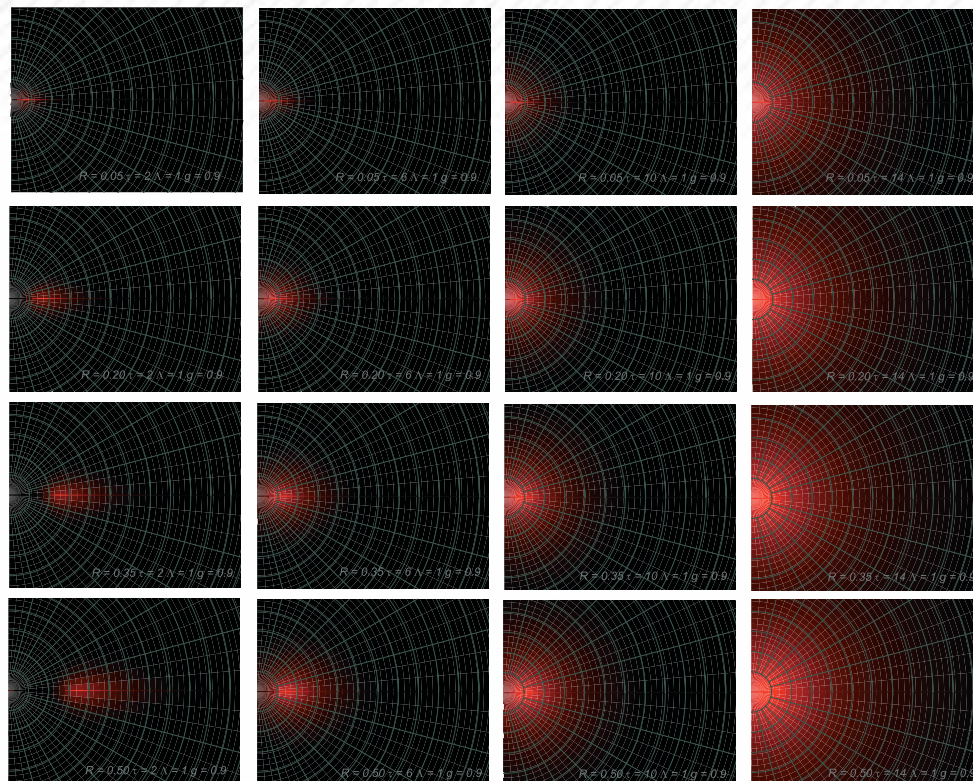


Рис. 4.

Образы лазерного маяка в мутной среде (туман), визуально наблюдаемые с различных расстояний и направлений (численное моделирование). Альbedo однократного рассеяния  $\Lambda = 1$ , параметр анизотропии  $g = 0,9$ , индикатриса рассеяния Хэньи – Гринштейна

ветствующей задачи определяется удачным выбором специально выделенной нерегулярной части решения, т.е. точностью учета в ней особенностей и анизотропии.

### Численное моделирование и обсуждение результатов

В основе большей части известных попыток реализации указанного подхода лежит так называемое малоугловое приближение (МУП) теории переноса излучения. Главной проблемой, ограничивающей возможности на этом пути, является трудность учета дисперсии длин путей распространения рассеянного излучения.

В 2010–2011 гг. был предложен и реализован подход [2–4], в значительной степени снимающий указанное ограничение и позволяющий учесть дисперсию длин и тем самым анизотропию углового распределения интенсивности светового поля фактически с произвольной степенью точности. На рис. 4 приведены результаты расчетов углового распределения яркости лазерного маяка в тумане на различных расстояниях и направлениях с помощью указанного подхода. Соответствующий вычислительный алгоритм реализован на языке C++ с распараллеливанием процессов с общей памятью на основе протокола OpenMP. Расчеты выполнены на суперкомпьютере «Чебышев» МГУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2 322 371 Рос. Федерация : МПК В64F 1/18, G01S 17/50. Способ ориентирования в пространстве движущегося транспорта по световому лучу и устройство для его реализации / Заявитель и патентообладатель Ошлаков В.Г. – № 2006102907/28; заявл. 01.02.2006; опубл. 20.04.2008 Бюл. № 11; приоритет изобретения 01.02.2006.
2. Ilyushin Ya.A. and Budak V.P. Narrow beams in scattering media: the advanced small-angle approximation. / J. Opt. Soc. Am. A, 28(7):1358–1363, Jul 2011.
3. Ilyushin Ya.A. and Budak V.P. Narrow-beam propagation in a two-dimensional scattering medium. J. Opt. Soc. Am. A, 28(2):76–81, Feb 2011.
4. Ilyushin Ya.A. and Budak V.P. Analysis of the propagation of the femtosecond laser pulse in the scattering medium. / Computer Physics Communications, 182(4): 940–945, 2011.