

УДК 519.245 535.34 535.36

В.И. Маковкин, Н.В. Замятин

Модель прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах

Предложена методика моделирования методом Монте-Карло прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах. Реализованы основные этапы моделирования от инициализации фотона до его поглощения средой или перехода за пределы наблюдаемой области. Приведены результаты моделирования перемещения пучка фотонов в исследуемой среде. Результаты проведенной работы показали, что целесообразно применять данный метод для моделирования прохождения лазерного излучения уровнемеров через запыленные и мутные среды в резервуарах, так как он позволяет математически определить возможную погрешность показателей лазерных дальномеров при измерении уровня вещества через различные среды и выявить причины этой погрешности.

Ключевые слова: мутная среда, запыленная среда, метод Монте-Карло, рассеивание, поглощение, модель, лазер.
doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-18-22

Для определения объемов сыпучих веществ в резервуарах предложено применять лазерные дальнометры в режиме уровнемеров. Одной из основных проблем при эксплуатации резервуаров является погрешность получаемых лазерным уровнемером значений уровня вещества в определенных точках и вычисление объема вещества в резервуаре [1, 2]. Если влияние ряда факторов на погрешность может быть устранено положением, конструкцией и типом уровнемера, то требуется отдельное изучение влияния пылевых облаков и паров, образуемых внутри резервуара, на точность возвращаемого сигнала [3].

Пары и пылевые облака (цемент, зерно, гранулы, пары от горячих жидкостей) являются неоднородными мутными средами. Это значит, что их оптические характеристики нельзя описать простым отражением или поглощением света в среде, так как он может рассеиваться на частицах разных плотностей и неоднородностях веществ.

Аналитическое определение влияния мутных сред на показатели лазерного дальнометра сильно затруднено без введения серьезных приближений и упрощений, поэтому для подобных задач широкое распространение получили численные методы моделирования, в особенности, метод Монте-Карло, используемый во многих областях науки. Моделирование подобных процессов лучше всего осуществимо с применением статистического метода Монте-Карло (МК), который основывается на представлении распространения излучения в виде потока модельных волновых пакетов. Данный метод является хорошей альтернативой аналитическому решению уравнения переноса [4–7].

Кроме основной проблемы моделирования прохождения излучения в мутной среде, имеющей сильный коэффициент рассеяния, актуальной проблемой являются неоднородность среды, наличие частиц пыли, воды (пара) и других частиц самого различного размера и концентрации, к тому же состоящих из различных химических веществ. Эффект подобной неоднородности можно объяснить так. Свет, перемещаясь в мутной среде, преломляется и отражается на

границах неоднородностей описанных компонент, являющихся частью этой среды, и в результате фотоны могут выходить в самых различных направлениях. Каждый вид пыли, пара и тому подобное имеет свой специфический состав, характер неоднородности и, следовательно, свои параметры рассеяния [8].

В [9] различные компоненты рассеяния (частицы пыли или пара), предлагается учитывать с помощью «розыгрыша» равномерно распределенных случайных величин, напрямую зависящих от концентрации тех или иных частиц в среде.

В алгоритме реализованы:

- инициализация фотона;
- моделирование движения фотона;
- моделирование разных видов рассеяния фотона;
- моделирование процесса пересечения или отражения от границы сред;
- моделирование движения фотонов в сторону измеряемого объекта и их обратное движение при отражении;
- моделирование поглощения части пучка фотона после каждого «шага» и при пересечении границы сред;
- моделирование «рулетки» выживания фотонов при «весе» пучка фотонов меньше заданного.

Главной идеей этого метода является моделирование большого количества реализаций случайного процесса. Вероятностные характеристики этих процессов должны совпадать с величинами решаемой задачи [10, 11]. Метод Монте-Карло требует большого количества времени обработки для того, чтобы достичь необходимой точности, но с вычислительными мощностями, которыми обладают современные компьютеры, это сделать гораздо проще, чем десятки лет назад. В данной задаче метод Монте-Карло применяется для моделирования транспорта фотонов через мутные среды и получаемая модель должна учитывать характеристики среды, ее оптические свойства, геометрию и описание распространения излучения [12].

В поставленной задаче в качестве уровнемера используется импульсный лазерный дальномер. Он

состоит из детектора излучения, импульсного лазера и схемы обработки сигнала. Одним из преимуществ импульсных лазерных уровнемеров (дальномеров) является их большая дальность работы, так как импульс можно выдавать с разной мощностью и в случае необходимости включать только на время импульса.

Расчет движения фотона должен быть не только в направлении к измеряемому веществу, но и в обратном, при движении к детектору. Необходимо рассчитать, попадет ли фотон в область самого детектора или уйдет за его границы, а также рассчитать длину и время его пути для определения величины погрешности измерения уровня [13].

Модель должна учитывать следующие события:

- 1) инициализация фотона;
- 2) перемещение фотона в среде;
- 3) изменение направления перемещения фотона в среде;
- 4) рассеяние фотонов;
- 5) попытка перемещения фотона в другой слой (отражение или пересечение их границы);
- 6) уменьшение числа фотонов;
- 7) смерть фотона.

Моделируемый фотон описывается следующими данными: исходный W_0 пакет фотонов, координаты (x, y, z) и углы (θ, φ) , определяющие его направление движения (рис. 1). Угол φ отсчитывается от положительного направления оси X в плоскости (x, y) , а угол θ – от положительного направления оси.

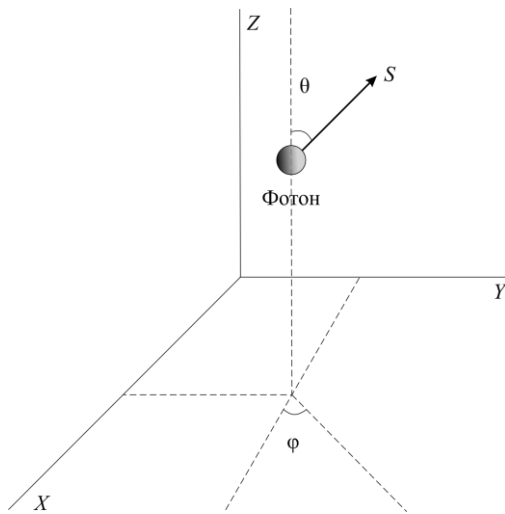


Рис. 1. Положение и направление фотона

При инициализации функция плотности вероятности свободного пробега фотона определяется, используя закон Бугера–Ламберта–Бера.

$$\varepsilon = \int_{x_{\min}}^{x_{\text{md}}} p(x) dx, \quad (1)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное на интервале от 0 до 1; $p(x)$ – функция плотности вероятности случайной величины x ; x_{\min} – минимальное значение x ; x_{md} – выбираемое значение x .

Определить расстояние, которое пройдет фотон в мутной среде, можно из функции плотности вероятности

$$p(l) = \mu_t \exp(-\mu_t l). \quad (2)$$

Отсюда находим функцию определения длины пробега

$$l = -\ln(1-\varepsilon) / \mu_t, \quad (3)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное в интервале $(0, 1)$; $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ – коэффициент экстинкции света; μ_a – коэффициент поглощения света; μ_s – коэффициент рассеяния света.

Направление движения фотона определяется с помощью направляющих косинусов (μ_x, μ_y, μ_z) . Сами направляющие косинусы вычисляются по формуле

$$\begin{cases} \mu_x = \sin \theta \cos \varphi \\ \mu_y = \sin \theta \sin \varphi \\ \mu_z = \rho \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

где ρ – направление движения фотона по оси Oz и может принимать значения 1 или -1 в зависимости от того, в каком направлении он движется.

Конечные координаты фотона после пробега l в направлении, заданном направляющими косинусами, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x' &= x + \mu_x l, \\ y' &= y + \mu_y l, \\ z' &= z + \mu_z l. \end{aligned} \quad (5)$$

Начальное и последующее после рассеяния направления движения можно определить при использовании любой фазовой функции рассеяния. Угол φ может быть определен по формуле (6), если функция азимутально независима:

$$\varphi = 2\pi\varepsilon, \quad (6)$$

где ε – случайное число, равномерно распределенное на интервале от 0 до 1.

Если рассеяние изотропно, то угол θ определяется как

$$\cos(\theta) = 2\varepsilon - 1. \quad (7)$$

Если рассеяние не изотропно (имеет сложный вид), то, проведя преобразования над случайными числами, исходя из закона распределения плотности вектора, углы определяются следующим образом:

$$\cos(\theta) = 2\sqrt{\varepsilon} - 1, \quad (8)$$

$$\sin(\theta) = \sqrt{1 - \varepsilon^2}. \quad (9)$$

Также для не изотропного рассеяния угол θ может быть определен, используя формулу Хенни–Гринштейна:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{2g} \left\{ 1 + g^2 - \left[\frac{1 - g^2}{1 - g - 2\varepsilon} \right] \right\}, \quad (10)$$

где g – показатель анизотропии, находится в интервале от -1 до 1 .



Рис. 2. Схема алгоритма моделирования методом Монте-Карло

Если g имеет значение ноль, то рассчитывается изотропное рассеяние, если значение близко к единице, то это означает, что отклонение рассеяния от первоначального направления пути очень низкое.

Одним из ключевых моментов при описании распространения лазерного излучения через изучаемую среду является анизотропия рассеяния. Для характеристики анизотропии рассеяния используется параметр анизотропии g (средний косинус угла рассеяния). Так как параметр анизотропии у каждого вещества свой, в данной работе для определения угла рассеяния решено использовать уравнение Хенши–Гринштейна. Таким образом, кроме показателей поглощения и рассеяния сред и частиц, через которые может совершить попытку перемещения фотон, необходимо знать значения параметра анизотропии.

В данном случае под каждым фотоном подразумевается пакет фотонов, распространяющийся в среде, который мы будем называть «вес». Чем большее расстояние проходит фотон, преодолевая границы сред и тому подобное, тем меньше становится его «вес» W . Размер пакета определяется коэффициентом, при инициализации равным W_0 [14].

По мере перемещения фотонов часть их «веса», равная $(1-a)W$, где a – альбеда единичного акта рассеяния, оказывается поглощенной в среде в виде

$$a = \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a}, \quad (11)$$

где μ_a – коэффициент поглощения света; μ_s – коэффициент рассеяния света.

При весе, меньшем порогового значения W_n , разыгрывается «рулетка» – пакет имеет один шанс из m продолжить движение. Если этот шанс не наступил, то вес пакета становится равен нулю, и он будет полностью поглощен [15]. Соотношение порогового значения статистического веса и величины m описывается следующим образом:

$$W_n = 1/m. \quad (12)$$

На основе описанной модели предложен алгоритм его реализации на рис. 2.

Для более объективной картины моделируемая область разделена на сетку с задаваемыми размерами ячеек. При завершении каждого этапа перемещения фотона, за исключением тех случаев, когда фотон покидает границы среды, поглощенная часть «веса» фотона W записывается в ячейку массива Q_{ijk} , определяющего распределение поглощенной энергии в среде. Значения индексов (i, j, k) вычисляются по текущим координатам фотона.

Примерами моделируемой среды являются слой воздуха, мутная среда (пылевое облако или пар) и ве-

щество, уровень которого измеряется лазерным дальномером. Таким образом, сигнал проходит через воздух, слой пыли или пара, отражается (отслеживаем фотоны, рассеиваемые в обратном направлении) от поверхности вещества и повторно проходит через ту же самую мутную среду и воздух, чтобы потом быть измеренным датчиком на лазерном дальномере или пройти мимо него (рис. 3).

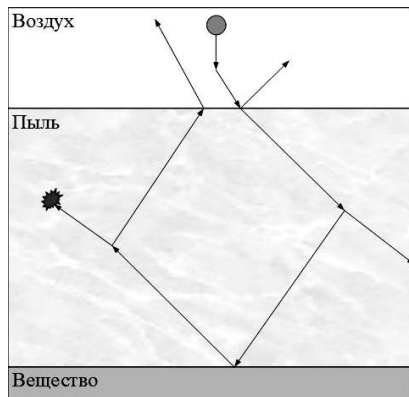


Рис. 3. Схема модели среды и движений фотона в мутных средах и на границах сред

На рис. 4 и 5 приведены примеры реализации перемещения фотона в запыленной среде.

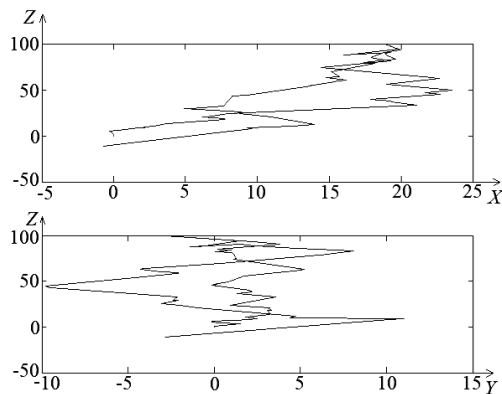


Рис. 4. Пример реализации модели движения одного пучка фотона в мутной среде с момента его инициализации до его возвращения от границы сред. Вверху – вид слева (XZ), внизу – справа (YZ)

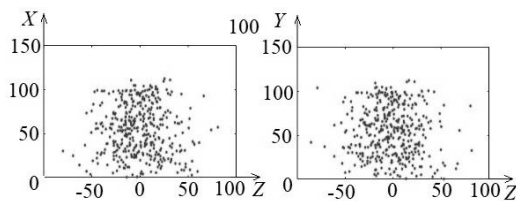


Рис. 5. Пример реализации модели движения фотонов в мутной среде – на рисунке изображены поглощенные при перемещении фотоны. Вид сбоку: XZ – слева, XZ –

Таким образом, предложенный способ моделирования прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды можно использовать для изучения того, какое влияние могут оказывать пыль и пары на получаемые с помощью лазерного дальномера значения уровня. Можно рассчитать возможную погрешность в данных условиях и выявить причины ее появления.

Результаты эксперимента показали адекватность модели и что с ее помощью можно изучать поведение пучков фотонов в различных средах и на границах этих сред.

Литература

1. Маковкин В.И. Обеззараживание и использование андрогенных отходов в ресурсосберегающих строительных технологиях / В.И. Маковкин, Н.В. Замятин, Г.В. Смирнов // Изв. ТПУ. – 2018. – Т. 329, № 9. – С. 164–174.
2. Пат. 2 661 314 РФ, МПК G 01F 23/292 (2006.01) G 01 F 22/00 (2006.01). Способ контроля параметров выпущенных веществ в резервуарах / Г.В. Смирнов, Н.В. Замятин. – № 2017117123; заявл. 16.05.2017; опубл. 13.07.2018. Бюл. № 20.
3. Маковкин В.И. Модель прохождения лазерного излучения через запыленную среду в резервуарах / В.И. Маковкин // Научная сессия ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТУСУР, 2018. – Ч. 3. – С. 102–106.
4. Лазерная инженерия хрящей / В.Н. Баграташвили, А.В. Басков, И.А. Борщенко и др. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2006. – 488 с.
5. Имитационное моделирование в задачах оптического дистанционного зондирования / Г.М. Креков, В.М. Орлов, В.В. Белов и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988. – 168 с.
6. Сетейкин А.Ю. Анализ по методу Монте-Карло процессов распространения лазерного излучения в многослойных биоматериалах // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 99, вып. 4. – С. 685–689.
7. Беликов А.В. Численное моделирование методом Монте-Карло распространения лазерного излучения в многослойной среде, имитирующей ткани головы в норме и при внутричерепной гематоме / А.И. Беликов, А.В. Скрипник, М.М. Антропова // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер.: Физика. – 2017. – Т. 17, вып. 3. – С. 158–170.
8. Русскова Т.В. Оптимизация последовательного программного кода для моделирования переноса солнечного излучения в вертикально-неоднородной среде / Т.В. Русскова, Т.Б. Журавлева // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 10. – С. 836–842.
9. Гендрина И.Ю. Алгоритм моделирования функции размытия точки системы видения через атмосферу методом Монте-Карло // Направления и механизмы развития науки нового времени: от теории до внедрения результатов. – СПб., 2017. – С. 142–144.
10. Павлов М.С. Моделирование распространения оптического излучения методом Монте-Карло в биологических средах с замкнутыми внутренними неоднородностями / М.С. Павлов, И.В. Красников, А.Ю. Сетейкин // Оптический журнал. – Благовещенск, 2010. – С. 15–19.
11. Jacques S.L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Tissue (Steady State and Time of Flight) // Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue. – 2010. P. 109–144.
12. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport / R. Graaff, M.H. Koelink, F.F.M. de Mul, W.G. Zijlstra, A.C.M. Dassel, J.G. Aarnoudse // Applied Optics. – 1993. – Vol. 32. – P. 426–434.
13. MCML–Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues / L. Wang, S.L. Jacques, L. Zheng // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 1995. – Vol. 47, No. 2. – P. 131–146.
14. Кочубей В.И. Спектроскопия рассеивающих сред: учеб. пособие / В.И. Кочубей, А.Н. Башкатов. – Саратов: Новый ветер, 2014. – 86 с.
15. Привалов В.Е. Моделирование распространения лазерного излучения в неоднородных средах со сложной

геометрией / В.Е. Привалов, А.Ю. Сегейкин, А.Э. Фотиади // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – Т. 165, вып. 1. – С. 45–55.

Маковкин Владимир Иванович

Аспирант каф. автоматизации обработки информации (АОИ) ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-425-25-85

Эл. почта: assorti2030@yandex.ru

Замятин Николай Владимирович.

Д-р техн. наук, профессор, каф. АОИ ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-913-820-64-81

Эл. почта: zamnv47@gmail.com

Makovkin V.I., Zamyatin N.V.

Modeling the propagation of laser radiation in dusty and turbid media in tanks

The algorithm for simulating the laser beam propagation through dusty and turbid media in tanks by using the Monte-Carlo method was proposed. The main stages of modelling were implemented: from initialization of a photon to its absorption. A trial simulation of the movement of a photon beam in the studied medium was conducted.

Keywords: Turbid media, dusty media, Monte-Carlo method, scattering, absorption, model, laser.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-18-22

References

1. Makovkin V.I., Zamyatin N.V., Smirnov G.V. [Disinfection and usage of anthropogenic waste in resource-saving construction technologies]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University-Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 164–174 (in Russ.).

2. Smirnov G.V., Zamyatin N.V. *Sposob kontrolya parametrov vypuchih veshchestv v rezervuarah* [The method of controlling the parameters of bulging substances in reservoirs] Patent RF, no. 2017117123, 2017.

3. Makovkin V.I. *Model' prohozhdeniya lazernogo izlucheniya cherez zapylennuyu sredu v rezervuarah* [Model of the passage of laser radiation through a dusty medium in tanks] Nauchnaya sessiya TUSUR. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh [TUSUR Scientific session. Proc. of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, TUSUR, 2018, vol. 3, pp. 102–106.

4. Bagratashvili V.N., Baskov A.V., Borshchenko I.A et al.: *Lazernaya inzheneriya hryashchej* [Laser Engineering of Cartilages]. M., FISMALIT Publ., 2006. 488 p.

5. Krekov G.M., Orlov V.M., Belov V.V et al.: *Imitacionnoe modelirovanie v zadachah opticheskogo distancionnogo zondirovaniya* [Simulation in problems of optical remote sensing]. Novosibirsk, Nauka. Sib. otd. Publ., 1988. 168 p.

6. Seteikin A.Yu. [Monte Carlo analysis of laser radiation propagation in multilayer biological materials]. *Optics and Spectroscopy*. 2005, vol. 99, no. 4, pp. 685–689 (in Russ.).

7. Belikov A.V., Skronik A.V., Antropova M.M. *Chislennoe modelirovanie metodom Monte-Karlo rasprostraneniya lazernogo izlucheniya v mnogoslojnoj среде, imitiruyushchej tkani golovy v norme i pri vnutricherepnoj gematome* [Monte Carlo numerical simulation of the propagation of laser radiation in a multilayer medium that simulates head tissue in normal and intracranial hematoma] *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya Seriya. Sseriya: Fizika* [Bullentin of Saratov University. New Series. Series: Physics]. 2017, vol.17, no. 3, pp. 158–170.

8. Russkova T.V., Zhuravleva T.B. [The optimization of sequential code for simulation of solar radiative transfer in a vertically heterogeneous environment]. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2016, vol. 29, no. 10, pp. 836–842 (in Russ.).

9. Gendrina I.Yu. *Algoritm modelirovaniya funktsii razmytiya tochki sistemy videniya cherez atmosferu metodom Monte-Karlo* [Algorithm for modeling the blur function of a point of system of vision through the atmosphere by the Monte Carlo method]. *Napravleniya i mekhanizmy razvitiya nauki novogo vremeni: ot teorii do vnedreniya rezul'tatov* [Directions and mechanisms for the development of the science of the new time: from theory to the implementation of the results] Saint Petersburg, 2017, pp. 142–144.

10. Pavlov M.S., Krasnikov I.V., Setekin A.Y. [Monte Carlo modelling of optical-radiation propagation in biological media with closed internal inhomogeneities]. *Journal of Optical Technology*. Blagoveshchensk, 2010, pp. 15–19 (in Russ.).

11. Jacques S.L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Tissue (Steady State and Time of Flight). *Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue*. 2010, pp. 109–144.

12. Graaff R., Koelink M.H., de Mul F.F.M., Zijlstra W.G., Dassel A.C.M., Aarnoudse J.G. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport *Applied Optics*. 1993, vol. 32, pp. 426–434.

13. Wang L., Jacques S.L., Zheng L. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 1995, vol. 47, no. 2, pp. 131–146.

14. Kochubej V.I. Bashkatov A.N.: *Spektroskopiya raseivayushchih sred: uchebnoj posobie* [Spectroscopy of scattering media: study guide]. Saratov, Novyj veter Publ., 2014. 86 p.

15. Privалov V.E. Seteikin A.U., Fotiadi E.E. [Simulation of laser radiation propagation in inhomogeneous media with complex geometry]. *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2013, vol. 165, no. 1, pp. 45–55 (in Russ.).

Vladimir I. Makovkin

Postgraduate student,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-425-25-85
Email: assorti2030@yandex.ru

Nikolay V. Zamyatin

Doctor of Engineering Science, Professor,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-820-64-81
Email: zamnv47@gmail.com