

doi: 10.3788/gzxb20124107.0781

# 基于快速蒙特卡罗的散射介质光学参量 干涉测量方法研究

张梅<sup>1</sup>, 林林<sup>2</sup>, 高应俊<sup>3</sup>, 罗云瀚<sup>3</sup>

(1 东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

(2 广东医学院 信息工程学院, 广东 东莞 523808)

(3 暨南大学 理工学院, 广州 510632)

**摘 要:**提出了一种散射介质光学参量的干涉测量方法. 在蒙特卡罗数值模拟的基础上引入聚焦高斯光源模型和基于比例缩放的压缩算法, 实现了对光子后向散射分布和干涉特性的快速模拟. 利用计算数据训练了前向人工神经网络进行了介质光学参量的反向求解. 实验中以脂肪乳注射液和生物染色剂印度墨水组成的悬混液为样本, 通过光学干涉系统测量得到了后向散射光依赖于深度的干涉光强分布, 并对其中散射和吸收系数进行了反向计算. 所得结果能够正确反映散射和吸收系数与散射和吸收物质浓度之间的线性关系, 验证了该方法的可行性.

**关键词:**蒙特卡罗; 干涉测量; 人工神经网络; 高斯光束

**中图分类号:** O43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)07-0781-5

## 0 引言

光与散射介质相互作用的复杂性使得准确预测光子在其中的输运过程变得十分困难. 光在介质中的反射、吸收和透射由介质的散射系数、吸收系数、散射概率函数(用各向异性因数  $g$  表示)和折射率共同决定<sup>[1]</sup>. 光在散射介质中的传输可以分为前向问题和反向问题. 前向问题是在已知光学参量的基础上预测光的反射光强、吸收剂量和透射光强分布. 反向问题则是在光强分布已知的条件下反向计算介质的光学参量. 在针对光子传输问题求解的众多方法中, 蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)数值模拟方法是应用最广泛的手段之一, 其模拟结果的准确性得到了多方面的验证, 已经成为光在散射介质中传输的非实验标准<sup>[2-4]</sup>. MC 模拟方法是将光子在介质中的传输过程所涉及的传输程长、散射角和权重变化利用相关的随机数进行模拟. 通过对大量光子的模拟获得光传输的统计特征, 并得到光强在介质内部和表面的分布结果. 该方法近年来被广泛应用于生物组织中的光传输模拟<sup>[5-7]</sup>. 在反向问题的求解中 MC 算法可以保证求解的准确度, 但是过高的时间成本使其难以在各种迭代回归计算中被反复调用, 从而限制了该方在反向问题中的应用. 1993

年, Graaff 等人提出了基于比例缩放的蒙特卡罗压缩算法, 并在半无穷均质介质模型中得到了验证<sup>[8]</sup>. 2007 年, Liu 和 Ramanujam 发展了多层介质中光传输的蒙特卡罗压缩算法, 为提高运算效率和反向计算提供了理论基础<sup>[9]</sup>.

本文研究了聚焦入射条件下散射介质中光子后向散射的面分布和干涉特性, 在 Wang 等人<sup>[10]</sup>开发的 MCML 程序基础上引入压缩算法并增加了光子的光程和在干涉平面上的分布信息以实现相干模拟. 压缩算法的引入提高了正向模拟深度相关干涉光信号的效率, 还使得基于低相干干涉的方法测量介质光学参量成为可能. 在实验中, 结合人工神经网络的快速重建能力实现了对脂肪悬混液光学参量的无损测量.

## 1 蒙特卡罗模拟及压缩算法

### 1.1 蒙特卡罗数值模拟方法

在弹性碰撞条件下, 光子在输运过程中与介质之间的相互作用包括散射和吸收两种情况. 蒙特卡罗模拟是对光子的自由运动程长  $l$ 、散射方向角  $\theta$  和散射方位角  $\psi$  进行随机确定, 随机数的产生依赖于相应事件发生的概率. 其中单次散射步长的概率函数由生物组织衰减系数  $\mu_t = \mu_s + \mu_a$  决定

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61008057)和广东省自然科学基金(No. 9151065005000008)资助

**第一作者:**张梅(1977—),女,讲师,硕士,主要研究方向为光电子学. Email:zhangm@dgut.edu.cn

**通讯作者:**林林(1979—)男,讲师,博士,主要研究方向生物医学光子学和生物医学工程. Email:lynwindsent@yahoo.com.cn

**收稿日期:**2012-03-07; **修回日期:**2012-05-15

$$p(l) = (1/L_t) \exp(-l/L_t) \quad (1)$$

式中,  $L_t = 1/\mu_t$ , 单次散射步长为  $l = -L_t \ln \xi$ ,  $\xi$  为  $[0, 1]$  区间内的随机数. 在本文中, 散射方向角的余弦值  $\cos \theta$  由 Henyey-Greenstein 概率分布函数来确定

$$\cos \theta = \frac{1+g^2}{g} - \frac{(1-g)^2}{2g(1-g+2g\xi)^2} \quad (2)$$

在散射粒子为球形近似条件下, 散射方位角  $\psi$  在  $[0, 2\pi]$  范围内等概率分布为

$$\psi = 2\pi\xi \quad (3)$$

光子与介质每次作用后剩余的权重与作用前的权重比通过消光系数  $\alpha = \mu_s/\mu_t$  进行计算. 设初始权重为  $W_0$ , 经历  $N$  次散射后光子的剩余权重  $W$  表示为

$$W = W_0 \alpha^N \quad (4)$$

### 1.2 蒙特卡罗压缩算法

在散射概率函数不变的条件下, 光子传输过程中的运输路径、权重以及在上表面的出射位置与介质的散射和吸收系数成近似的线性关系. 在已有的蒙特卡罗模拟数据的基础上, 通过比例缩放运算可以快速的获得不同介质参量条件下的数值模拟结果如图 1 所示. 图中  $R$  代表反射光子达到物镜平面时

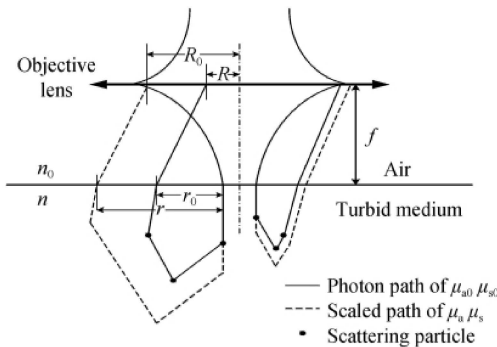


图 1 会聚入射光子在散射介质中传输示意图

Fig. 1 Transmission diagram of focused incident light in scattering medium

相对于主光轴的径向偏移,  $f$  为物镜焦距,  $n_0$  和  $n$  分别为空气和介质折射率. 实线代表光学参量为  $\mu_{s0}$  和  $\mu_{t0}$  时, 光子的传输路径, 虚线表示光学参量变更为  $\mu_s$  和  $\mu_t$  时, 经过比例缩放后的传输路径. 光子运动的累积程长  $s$  和出射点距离入射中心的径向偏移量  $r$  与衰减系数  $\mu_t$  成反比, 出射光子权重则与消光系数和被散射次数相关. 各参量缩放计算关系为

$$s = \frac{\mu_{t0}}{\mu_t} s_0 \quad (5a)$$

$$r = \frac{\mu_{t0}}{\mu_t} r_0 \quad (5b)$$

$$R = R_0 + \left( \frac{\mu_{t0}}{\mu_t} - 1 \right) r_0 \quad (5c)$$

$$W' = W \left( \frac{\mu_s \mu_{t0}}{\mu_{s0} \mu_t} \right)^N \quad (5d)$$

如果进行一次完整的蒙特卡罗模拟, 并记录每一个后向散射光子的权重  $W$ 、出射径向偏移量  $r_0$  和  $R_0$ 、累积程长  $s_0$  以及被散射次数  $N$  作为基础数据, 就可以根据式(5)确定的缩放关系快速计算得到其它参量条件下的数值模拟结果.

### 1.3 高斯光束的数值模拟

实际入射光常常为会聚状态的高斯光束, 在与光束垂直的任意横截面上的光子密度沿径向呈高斯衰减, 光子在介质表面的初始坐标由高斯概率函数产生<sup>[11]</sup>, 其表达式为

$$x_0 = 0.5\omega_0 \sqrt{-2 \ln r/r} (\xi_1 + K\xi_2) \quad (6a)$$

$$y_0 = 0.5\omega_0 \sqrt{-2 \ln r/r} (\xi_2 + K\xi_1) \quad (6b)$$

使用单页双曲面来模拟光子的入射路径, 当光子达到介质表面时, 其方向角余弦值为

$$\cos \theta_0 = \frac{z}{\sqrt{(x_0^2 + y_0^2)K^2 + z^2}} \quad (7)$$

在式(6)和(7)中,  $\omega_0$  为束腰半径,  $\xi_1$  和  $\xi_2$  是  $[0, 1]$  区间内相互独立的随机数.  $r = \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2}$ ,  $K = \lambda z / \pi \omega_0^2$ ,  $z$  为高斯光束束腰到介质表面的轴向距离.

## 2 散射光子的干涉特性

在漫反射测量系统中, 介质的散射和吸收特性通过后向散射光子的时间和空间分布体现出来. 当采用低相干干涉测量系统时, 可以对具有不同时间延迟的光子进行筛选, 通过干涉的放大作用检测来自介质深处的微弱散射信号. 并且入射和探测光路为同一光路, 聚焦光路有限的探测孔径能够帮助滤除杂散光干扰, 筛选出在特定深度被散射的光子. 在干涉信号数值模拟中, 入射光子数在  $5 \times 10^9 \sim 10 \times 10^9$  之间; 入射光束通过 16 mm 显微物镜聚焦于介质表面, 介质为均匀半无穷结构, 入射光中心波长为 1 290 nm, 相干长度 15  $\mu\text{m}$ . 图 2 给出了来自不同深度光子的强度分布. 实线为标准蒙特卡罗模拟结果, 符号表示比例缩放的计算结果, 介质的各向异性因数选择了前向散射 ( $g=0.9$ ) 和非前向散射 ( $g=0.31$ ) 两种情况. 用于进行比例运算的基础数据选择两组, 其中一组来自吸收系数为 0 的“白模拟”结果. 在满足前向散射条件下, 标准蒙特卡罗模拟与比例缩放结果基本一致, 误差主要出现在 0.4 mm 以下的区域. 在其他条件相同的情况下, 非前向散射介质中的 MC 模拟结果的统计误差与前向散射介质相比较. 造成误差的主要原因是来自深处或达到边缘位置的后向散射光子概率较低.

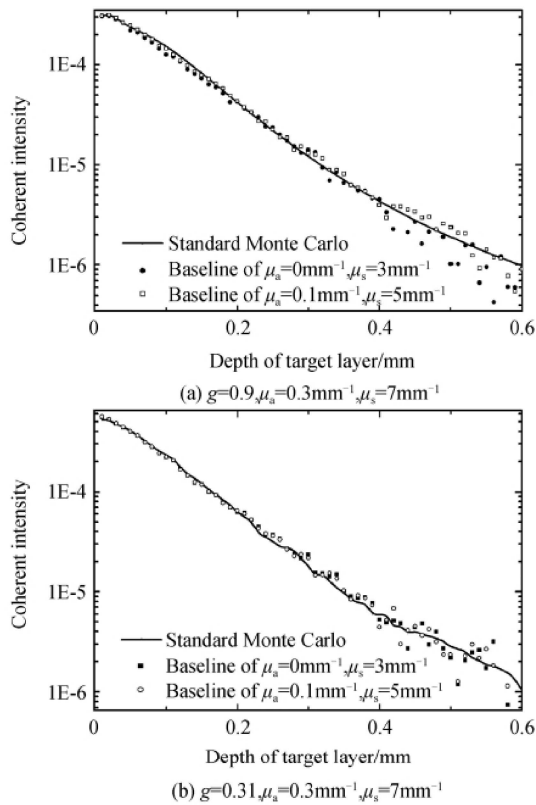


图2 不同深度后向散射光子光强数值模拟结果  
Fig.2 Depth dependent coherent signal from numerical simulation

### 3 悬混液的光学参量干涉测量

#### 3.1 低相干干涉实验系统

在实验中,使用光纤迈克尔逊干涉系统(如图3)对不同深度的后向散射光进行测量.系统包括1290 nm超辐射光源、光纤耦合器、基于光栅和振镜的快速扫描光路、样品臂的聚焦光路、光电转换与差分放大电路、滤波电路以及数据采集电路与计算机.来自特定深度的后向散射光子具有确定的传输光程,通过扫描光路连续改变干涉仪参考臂的长度可以对具有不同光程的光子进行筛选.对于从其它区域散射同时也满足光程匹配条件的杂散光子,往往具有较大的径向偏移量.物镜有限的探测孔径可以

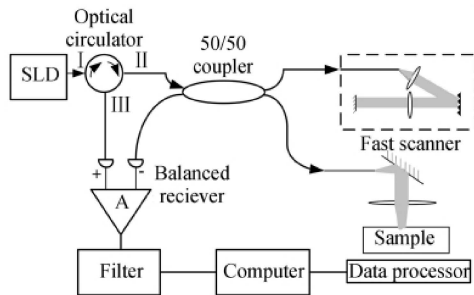


图3 光纤迈克尔逊干涉测量结构示意图  
Fig.3 Schematic of fiber Michelson interferometer

有效地滤除这些杂散光.实验中将20%的Intralipid™(华瑞制药有限公司)及其稀释液作为散射介质.其主要成份包括大豆油、卵磷脂、甘油和水.溶液中脂肪颗粒的平均直径在1 μm左右,通过加入不同浓度的染色剂印度墨水来调整样品的吸收系数.

#### 3.2 实验结果

实验中,样品置于容量为1 mL的矩形试剂盒中,盒体为透明玻璃,入射光垂直聚焦在样品表面.干涉仪参考臂以100 Hz的频率在1 mm的范围内进行扫描,每获得的100组数据的平均值作为测量结果以减小随机误差.对实验获得的深度相关的干涉信号进行归一化处理,以0.01 mm间隔提取干涉强度信号并置于人工神经网络中进行反向运算.图4(a)是单次测量的原始信号;图4(b)是对稀释到不同浓度的Intralipid™测量得到的曲线.每条曲线是100组数据平均值的拟合结果,图中虚线为MC模拟结果(模拟光子数2,可以反映样本光学参量变化区间,纵坐标采用了对数坐标.根据Chen等人的实验数据,在正向蒙特卡罗模拟中,g值选择0.31,折射率为1.36<sup>[3]</sup>,物镜焦距为f=16 mm,由红外CCD测量得到样本上表面聚焦高斯光束的束

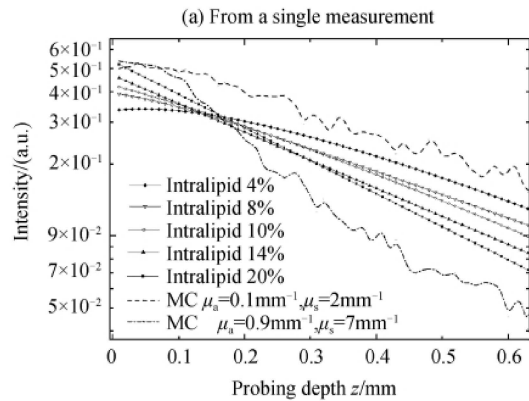
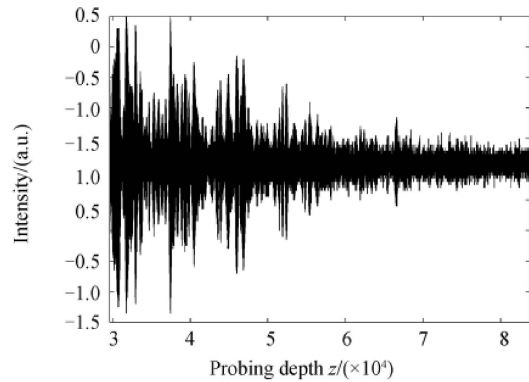


图4 不同浓度Intralipid™干涉测量结果  
Fig.4 Depth dependent coherent signal of Intralipid™ with different concentration

腰半径为  $30.1 \mu\text{m}$ , 散射和吸收系数分别选择  $\mu_a = 0.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_s = 7 \text{ mm}^{-1}$ . 正向模拟获得的散射光子信息保存为基础数据. 设计了三层结构的前馈人工神经网络 (Backward Propagation Artificial Neural Network, BP ANN), 并使用正向模拟基础数据, 通过比例缩放算法生成训练数据. 通过对图 4(b) 中实验数据与 MC 数据的比较, 选择训练数据对应的吸收系数在  $0.1 \sim 1 \text{ mm}^{-1}$  之间以  $0.05 \text{ mm}^{-1}$  等间隔选取 20 个数值; 散射系数在  $0.5 \sim 9 \text{ mm}^{-1}$  之间以  $0.5 \text{ mm}^{-1}$  等间隔选取 18 个数值. 利用快速蒙特卡罗模拟算法共产生 360 组训练数据, 每组数据包含 7 个不同深度干涉信号模拟结果. 将实验获得的干涉信号强度作为神经网络输入量即可获得散射和吸收系数输出结果. 对含有不同浓度印度墨水 (Indian ink) 的 Intralipid™ 悬混液吸收系数计算结果如图 5(a) 所示, 可以看出吸收系数随印度墨水浓度呈现出的单调增加变化, 近似符合直线关系. 20% Intralipid™ 悬混液的吸收系数略大于 10% Intralipid™. 造成这一结果的原因是脂肪粒子对光同样具有吸收能力, 相对染色剂而言比较小, 但是散射次数增多时 (光子与脂肪粒子碰撞次数增加) 其

吸收特性就会表现出来. 在不加入染色剂的情况下, Intralipid™ 悬混液颗粒浓度与散射系数接近线性关系, 吸收系数随浓度变化较小, 如图 5(b).

## 4 结论

本文在传统蒙特卡罗数值模拟的基础上, 引入了聚焦高斯光源模型并建立了具备光程分辨能力的前向算法. 应用蒙特卡罗压缩算法实现了对光子后向散射分布和干涉特性的快速模拟. 只需进行单次完整的正向模拟并保存散射光子信息作为基础数据, 就可以快速计算不同散射和吸收参量的干涉信号模拟结果. 利用该方法生成训练数据, 建立前向人工神经网络并实现了蒙特卡罗反向问题的求解. 在实验中, 以脂肪乳注射剂和生物染色剂悬混液为样本, 通过干涉测量获得了深度相关的散射光强分布, 并对介质散射和吸收系数进行了反向计算. 所得结果能够正确反应散射和吸收系数与 Intralipid™ 和 India ink 浓度之间的线性关系. 需要说明的是, 目前的实验结果只能反映散射和吸收系数的相对变化量, 所反映的近似线性结果能够证明该方法的可行性. 后续的研究重点是采用标准样本和仪器对测量方法进行校准以期获得绝对测量结果, 相关工作正在进行当中. 本文的研究内容对于介质成份的无损定量分析具有重要意义.

### 参考文献

- [1] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1983: 99-136.
- [2] FANG Q, BOAS D A. Monte Carlo simulation of photon migration in 3D turbid media accelerated by graphics processing units[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 20178-20190.
- [3] CHEN C, LU J Q, DING H, *et al.* A primary method for determination of optical parameters of turbid samples and application to Intralipid between 550 and 1630 nm[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(16): 7420-7435.
- [4] TYCHO A, JOGENSEN T M, YURA H T, *et al.* Derivation of a Monte Carlo method for modeling heterodyne detection in optical coherence tomography systems[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(31): 6676-6691.
- [5] ALERSTAM E, SVENSSON T, ENGELS S A. Parallel computing with graphics processing units for high-speed Monte Carlo simulation of photon migration [J]. *Journal of Biomedical Optics Letters*, 2008, **13**(6): 060504-1-060504-3.
- [6] WILSON B C. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue[J]. *Medical Physics*, 1983, **10**(6): 824-830.
- [7] YUN T, ZENG N, LI W, *et al.* Monte Carlo simulation of polarized photon scattering in anisotropic media[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(19): 16590-16602.
- [8] GRAAFF R, KOELINK M H, de MUL F F, *et al.* Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport[J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(4): 426-434.
- [9] LIU Q, RAMANUJAM N. Scaling method for fast Monte

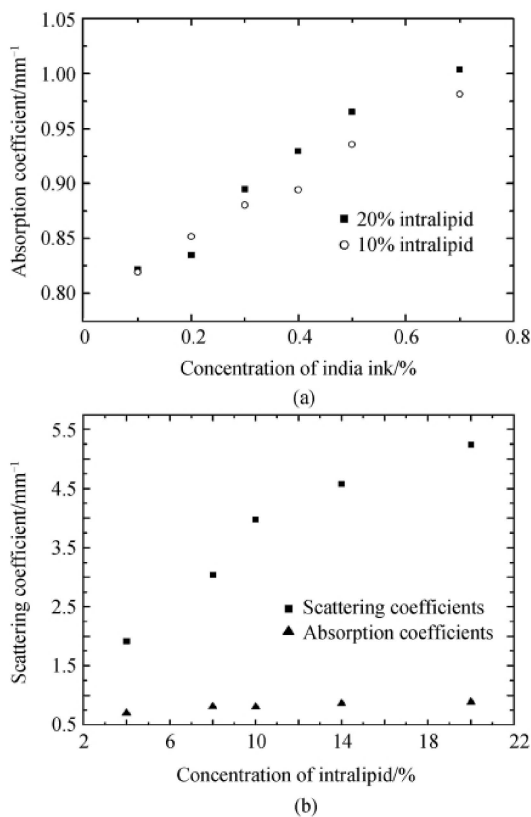


图 5 (a)不同浓度 Indian Ink 吸收系数测量结果;  
(b)不同浓度 Intralipid™ 吸收和散射系数测量结果  
Fig. 5 (a) Absorption coefficient of mixture liquid of Indian Ink and Intralipid™; (b) Scattering coefficient of Intralipid™

- Carlo simulation of diffuse reflectance spectra from multilayered turbid media[J]. *JOSA A*, 2007, **24**(4): 1011-1025.
- [10] WANG L H, JACQUES S L, ZHENG L Q. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 1995, **47**(2): 131-146.
- [11] LIN Lin, ZHANG Mei, ZHANG Huai-ling. Numerical simulation of focused optical beam in tissue samples[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2010, **26**(12): 2375-2378.
- 林林, 张梅, 张怀玲. 聚焦光束在生物组织中传输的数值模拟[J]. *中国医学影像技术*, 2010, **26**(12): 2375-2378.

## Reverse Calculation of Optical Parameters of Scattering Medium Based on Fast Monte Carlo Simulation

ZHANG Mei<sup>1</sup>, LIN Lin<sup>2</sup>, GAO Ying-jun<sup>3</sup>, LUO Yun-han<sup>3</sup>

(1 College of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523808, China)

(2 School of Information Engineering, Guangdong Medical College, Dongguan, Guangdong 523808, China)

(3 Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** A method of coherent measuring optical parameters of scattering medium is presented based on Monte Carlo simulation. The condensed scaling method is introduced to accelerating process of calculation. A tri-layer structure BP-artificial neural network is developed for reverse calculation of scattering and absorption coefficients of medium. Fat emulsion and stain mixture of Intralipid<sup>TM</sup> and India ink are taken as scattering and absorbing sample for coherent measurement by fiber Michelson interferometer. Results of experiments show the linear relation between scattering or absorption coefficients and concentration of Intralipid<sup>TM</sup> or India ink. The method is helpful to nondestructive testing components of turbid material.

**Key words:** Monte Carlo; Coherent measurement; Artificial neural network; Gaussian beam