

多重散射随机介质中隐藏物体的 强度成像研究

张西芹 刘 迎 马世宁

(天津大学物理系, 国家教育部光电子信息工程开放实验室 天津 300072)

提要 用背散射光强研究了多重散射随机介质中隐藏物体位置的确定, 由强度的分布曲线确定出隐藏物体的位置, 并实验研究了隐藏物体在多重散射随机介质中不同深度下的强度分布。

关键词 多重散射介质, 隐藏物体, 背散射, 成像

1 引 言

多重散射随机介质(如生物组织)中隐藏物体(如肿瘤)的成像研究是国际上研究的热点之一。目前, 研究得比较多的光学医学成像方法主要有以下几种: 时间分辨光学成像^[1]、频域光学成像^[2]、光学相干层析成像^[3]、声光层析成像^[4]和超声调制光学层析^[5]等。由于光在多重散射随机介质中的传播规律不能用几何光学理论来解释, 研究多重散射随机介质中光散射问题一般用输运理论研究能量的传输。1993 年, P. N. Den Outer 等研究了光透过一平行平板散射介质后强度的分布, 并由强度的分布确定出其中隐藏物体的位置^[6]。在实际医学成像中, 由于组织的安全阈值, 光能够透过的组织是不多的, 多是应用背散射光来研究组织的性质。为此本文研究了多重散射随机介质表面背散射光强的分布, 由背散射光强的分布来确定出其中隐藏物体的位置, 并实验研究了隐藏物体在距测量表面不同深度下的强度分布。

2 理论分析

光子在随机散射介质中传播时被随机散射, 其振幅、位相、传播方向等都成为随机的量, 但对大量光子而言, 其强度分布服从稳态漫射方程

$$D \nabla^2 \Phi(\vec{r}) - \mu_a \Phi(\vec{r}) = - S(\vec{r}) \quad (1)$$

其中 $\Phi(\vec{r})$ 为能流密度, D 为光子漫射系数, $D = \{3[\mu_a + (1 - g)\mu_s]\}^{-1}$, μ_a 为吸收系数, μ_s 为散射系数, g 为各向异性因子, $S(\vec{r})$ 为光源函数。

对于半无限均匀随机介质, 在随机介质和空气的交界面上折射率不匹配, 为此我们应用外推边界条件(Extrapolated-Boundary Condition)^[7]。点光源条件下 $S(r) = \delta(r)$, 可以解析得到方程(1)在柱坐标系中的解

$$\Phi(\rho, z) = \frac{\exp\left[-\sqrt{\frac{\mu_a}{D}}[\rho^2 + (z - z_0)^2]\right]}{4\pi D \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}} - \frac{\exp\left[-\sqrt{\frac{\mu_a}{D}}[\rho^2 + (z + z_0 + 2z_b)^2]\right]}{4\pi D \sqrt{\rho^2 + (z + z_0 + 2z_b)^2}} \quad (2)$$

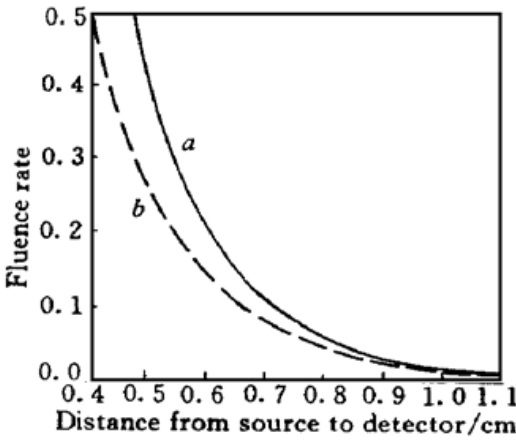


图 1 $\Phi(\rho, z = 0)$ 的分布曲线

Fig. 1 The fluence rate versus distance from source to detector

其中 $z_0 = (\mu_a + \mu_s')^{-1}$, $z_b = \frac{1 + R_{\text{eff}}}{1 - R_{\text{eff}}} 2D$, R_{eff} 为介质表面的有效反射系数。 z 轴沿光入射方向, ρ 为与 z 轴垂直平面内探测器与光源间的距离。在散射介质与空气的界面上($z = 0$), $\Phi(\rho, z = 0)$ 在不同散射和吸收系数下的分布如图 1 所示。曲线 a 的散射参数分别为: $\mu_a = 0.5 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_s' = 10 \text{ cm}^{-1}$; 曲线 b 的散射参数为: $\mu_a = 1.0 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_s' = 5 \text{ cm}^{-1}$ 。在 ρ 一定时, 曲线 a 的值小于曲线 b 的值, 即散射参数不同时能流密度大小不同。

如果均匀半无限介质中有一隐藏物体, 其散射参数与环境介质不同, 在介质表面光强分布将与无隐藏物体时不同。固定光源和探测器间的距离, 在样品表面进行逐点扫描, 如图 2 所示。如果散射介质中无隐藏物体, 探测到的光强将是相同的; 如果散射介质中有一隐藏物体, 由于隐藏物体与环境介质散射参数不同, 由图 1 可知, 散射参数不同时强度大小不同, 所以在隐藏物体位置处探测到的光强与无隐藏物体时不同。可以认为, 在远离隐藏物体处, 光强与无隐藏物体时相同, 通过光强差别的分析, 可以确定出隐藏物体的位置。研究表明: 光源的波长范围在 600~ 1300 nm 时, 大多数生物组织是强散射并且低吸收的, 而肿瘤组织是强吸收的^[8], 根据这一特性, 可以诊断正常组织中是否有病变组织, 为肿瘤的早期诊断提供一种参考。

如果均匀半无限介质中有一隐藏物体, 其散射参数与环境介质不同, 在介质表面光强分布将与无隐藏物体时不同。固定光源和探测器间的距离, 在样品表面进行逐点扫描, 如图 2 所示。如果散射介质中无隐藏物体, 探测到的光强将是相同的; 如果散射介质中有一隐藏物体, 由于隐藏物体与环境介质散射参数不同, 由图 1 可知, 散射参数不同时强度大小不同, 所以在隐藏物体位置处探测到的光强与无隐藏物体时不同。可以认为, 在远离隐藏物体处, 光强与无隐藏物体时相同, 通过光强差别的分析, 可以确定出隐藏物体的位置。研究表明: 光源的波长范围在 600~ 1300 nm 时, 大多数生物组织是强散射并且低吸收的, 而肿瘤组织是强吸收的^[8], 根据这一特性, 可以诊断正常组织中是否有病变组织, 为肿瘤的早期诊断提供一种参考。

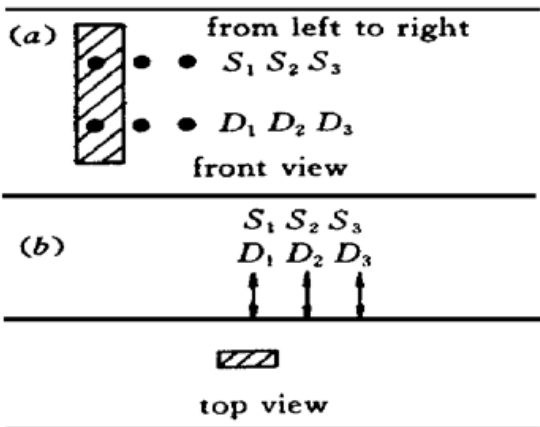


图 2 测量位置

Fig. 2 Measurement position

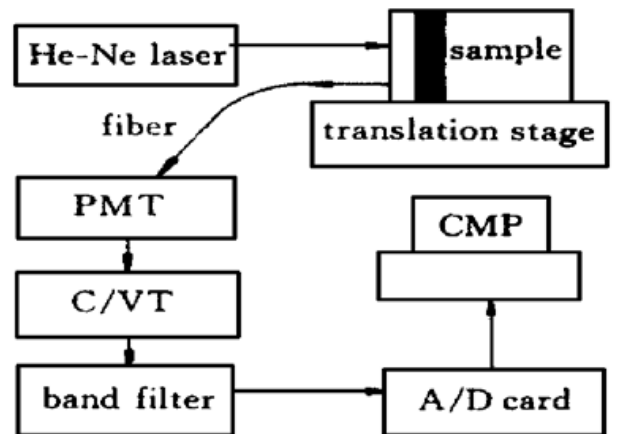


图 3 实验系统

Fig. 3 Experiment setup

3 实验系统和样品

如图 3 所示, 波长为 633 nm 的 He-Ne 激光垂直入射到被测样品表面, 在样品表面距光源 1 cm 处探测器接收背散射光, 经光电倍增管 PMT 放大后, 流压转换器 C/VT 将电流信号转变为电压信号, 经过滤波器滤掉高频噪声, 再经 A/D 转换将电压信号转变为数字信号, 然后用

计算机进行数据处理。

被测样品为浓度 1.36% 的内类脂溶液(Intralipid), 其有效散射系数 $\mu_s' = 20 \text{ cm}^{-1}$, 吸收可以忽略, 溶液盛在 $8 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ 的玻璃槽中, 其中被测面的尺寸为 $8 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$; 隐藏物体为一宽 9 mm, 厚度为 5 mm 的带鱼块, 与被测平面平行放置在溶液中。被测样品放在一可平行移动平台上, 光源与探测器保持不动, 移动平台, 对样品进行扫描(图 2)。

4 实验结果

保持光源与探测器间的距离不变, 光源与探测器沿水平方向对样品进行逐点扫描, 记录下每一点的强度, 得到强度与位置的关系曲线, 由此曲线确定隐藏物体的位置。

4.1 强度分布与隐藏物体位置的关系

隐藏物体竖直放于散射池中, 其前表面距离测量面 3 mm, 通过逐点扫描方法所得到的背散射光强与隐藏物体位置的关系如图 4 所示, *a* 为无隐藏物体时的强度分布, *b* 为有隐藏物体时的强度分布。由图可以看出, 随着探测器与隐藏物体距离的减小, 强度逐渐减小, 与环境介质的差别越来越大, 在隐藏物体的中心位置处, 强度差别最大, 实验结果与理论分析相符。隐藏物体中心位置处, 到达探测器的光子被隐藏物体散射的概率相对其他位置最大, 被隐藏物体散射的光子数和散射次数相对最多, 光子的行为受隐藏物体的影响最大, 这种影响主要决定于隐藏物体的散射参数, 由于其散射参数与环境介质不同, 所以强度差别最大。

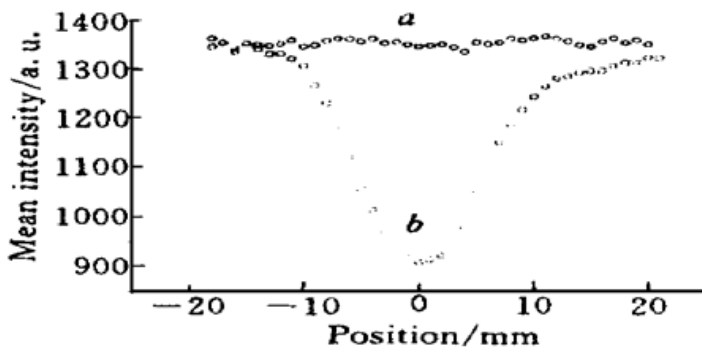


图 4 平均强度与隐藏物体位置的关系

Fig. 4 Mean intensity versus the position of hidden object

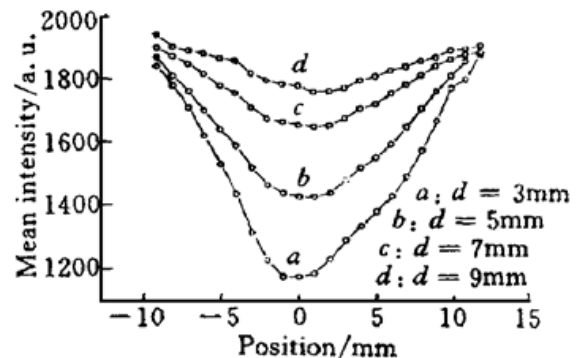


图 5 不同深度下的强度曲线

Fig. 5 Mean intensities for different depth

4.2 隐藏物体在不同深度时的强度分布

隐藏物体在内类脂溶液中距被测表面不同深度下的强度分布如图 5 所示, 图中 4 条曲线自上而下分别对应的深度为: 9 mm, 7 mm, 5 mm, 3 mm。随着深度的增加, 强度的分布越来越平坦, 与周围环境介质的差别越来越小, 当强度分布曲线趋近于一平坦的直线时, 将探测不到隐藏物体。随着隐藏物体在内类脂溶液中深度的增加, 光子被隐藏物体散射的概率逐渐减小, 到达探测器的光子中, 被隐藏物体散射的光子数和散射的次数逐渐减少, 也就是说, 受隐藏物体散射参数的影响越来越小, 受环境介质的影响越来越大, 所以强度差别越来越小。

4.3 强度与深度的关系

一直径为 1 cm 的球形猪瘦肉置于内类脂溶液中, 在其他条件一定的情况下, 改变隐藏物体距测量表面的距离, 其中心距测量面不同深度时的强度如图 6 所示。随着隐藏物体中心距测

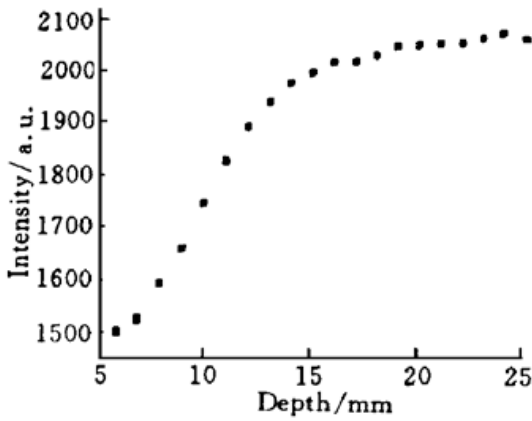


图 6 强度与深度的关系

Fig. 6 Intensity versus depth

量面距离的增加,强度逐渐增加,当增加到一定值时,强度增加逐渐减少,强度分布趋于平坦。也就是说,随着隐藏物体在内类脂溶液中深度的增加,强度受隐藏物体的影响越来越小;当深度为 15 mm 时,探测器接收到的基本上都是被内类脂溶液散射回来的光子,受隐藏物体影响很小,深度继续增加,强度基本不受隐藏物体影响,此时由强度分布曲线不能确定是否有隐藏物体存在。如果把到达探测器的光子所经历的两种散射介质作为整体考虑,随着深度的增加,其整体的散射参数越来越接近环境介质,所以光强与无隐藏物体时环境介质的光强差别越来越小。

参 考 文 献

- 1 B. B. Das, K. M. Yoo, R. R. Alfano. Ultrafast time-gated imaging in thick tissues: a step toward optical mammography. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1092~ 1094
- 2 M. A. O'Leary, D. A. Boas, B. Chance *et al.*. Experimental images of heterogeneous turbid media by frequency-domain diffusing-photon tomography. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 426~ 428
- 3 M. J. Everett, K. Schoenenberger *et al.*. Birefringence characterization of biological tissue by use of optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3): 228~ 230
- 4 C. G. A. Hoelen, F. F. M. De Mul *et al.*. Three-dimensional photoacoustic imaging of blood vessels in tissue. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(8): 648~ 650
- 5 Lihong V. Wang, Geng Ku. Frequency-swept ultrasound-modulated optical tomography of scattering media. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12): 975~ 977
- 6 P. N. Den Outer, Th. M. Nieuwenhuizen. Location of objects in multiple-scattering media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(6): 1209~ 1218
- 7 Richard C. Haskell, Lars O. Svaasand. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2727~ 2741
- 8 W. F. Cheong, S. A. Prahl, A. J. Welch. A review of the optical properties of biological tissues. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(12): 2166~ 2185

Study of Intensity Imaging of an Object Hidden in Multiple-scattering Media

Zhang Xiqin Liu Ying Ma Shining

(Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The location of a hidden object in multiple-scattering media was studied using the mean intensity of backscattering light. The location of the hidden object was restored with the intensity distribution at different positions by scanning the sample. The intensity distribution was experimentally studied when the object hid at different depth in multiple-scattering media.

Key words multiple-scattering media, hidden object, backscattering, imaging