

漫散射光自相关用于生物介质成象的实验研究*

张西芹^{1,2} 刘迎² 邢达¹ 马世宁²

(1 华南师范大学激光生命科学研究所, 广州 510631)

(2 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)

摘要 本文用背散射光时间自相关函数研究了随机介质中隐一生物组织时的成象, 由相关时间 τ_c 确定出隐含物体的位置. 还研究了生物组织在随机介质内不同深度时自相关函数的性质.

关键词 生物介质; 隐含物体; 背散射; 自相关

0 引言

随机介质中隐含物体成象研究是目前国际上研究的一个热点, 该研究对于光学医学诊断具有重要意义. 目前, 光学医学成象方法研究主要有两大类: 一类是利用早期光的各种成象技术^{1,2}, 一类是利用漫散射光统计性质的成象技术³⁻⁵. 利用早期光的成象技术一般具有很高的空间分辨率, 但是在探测深度方面具有很大的局限性. 利用漫散射光统计性质的成象技术虽然在空间分辨率方面不如利用早期光的成象技术, 但是在探测深度方面却具有一定的优势.

生物组织是一种多重散射随机介质, 光在其中传播时被多次随机散射而成为漫射光; 同时生物组织还是一种活体组织, 其内部具有微观运动, 因此光在生物组织中传播时成为动态散射光. 研究表明⁶, 从动态散射光的时间涨落可以提取动态随机介质的有关信息. 1997 年 D. A. Boas 等研究者⁶ 对随机介质中隐含一异物时漫散射光的时间自相关性质进行了初步研究. 本文用漫散射光时间自相关函数对半无限随机介质中隐含一实际生物组织时的成象进行了实验研究, 由特征相关时间确定了隐含生物组织的位置, 并且对隐含生物组织在介质内不同深度下的自相关性质进行了研究.

1 理论分析

1.1 半无限介质中漫射光的自相关函数

多重散射随机介质中漫散射光时间自相关函数 $G_1(r, \tau)$ 满足相关漫射方程 (Correlation Diffusion Equation)⁶, 在均匀随机介质中

$$(\nabla^2 + k^2(\tau))G_1(r, \tau) = -vS(r)/D \quad (1)$$

式中 $G_1(r, \tau) = E(t) \cdot E^*(t + \tau)$ 是散射光振幅时间自相关函数, 下标 1 表示振幅自相关, 以区别于强度自相关. $k^2(\tau) = (v/D) [\mu_a + 3^{-1} \mu_s k_0^2 \Delta r^2(\tau)]$, v 是光在介质中的传播速度, D 是光子漫射系数, $D = v \{3[\mu_a + (1-g)\mu_s]\}^{-1}$, μ_s 是介质的散射系数, 与约化散射系数 μ_s 的关系是 $\mu_s = (1-g)\mu_s$, g 是各向异性因子; $\Delta r^2(\tau)$ 是散射粒子在时间 t 内的方均位移, τ 是相关时间, 对于布朗运动, $\Delta r^2(\tau) = 6D_B\tau$, D_B 是布朗漫射系数; $S(r)$ 是光源分布函数, 此处用点光源, 即 $\delta(r - r_s)$.

由于生物组织的有限透射深度和安全阈值, 在实际应用中测量后向散射光比透射光更方便可行, 因此我们将研究半无限随机介质中相关漫射方程的解. 在半无限介质和空气的交界面上, 相关函数 $G_1(r, \tau)$ 应满足边界条件

$$G_1(r, \tau) - (2/3) \hat{n} \cdot \nabla G_1(r, \tau) = 0 \quad (2)$$

在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 -

* 国家杰出青年基金资助项目 (69725009)

收稿日期: 2001-06-13

Boundary Condition)⁷: 假设入射光在介质内一个输运平均自由程 l^* 处开始第一次散射, 即光源位于介质内 $z = z_0 = l^*$ 处. 为了满足物理边界 ($z = 0$) 条件, 需在介质外 ($z < 0$) 增加一镜象光源, 介质内的相关函数是两光源贡献之和. 在介质外 $z = -(2z_b + z_0)$ 处增加一镜象光源后, 在 $z = -z_b$ 处,

$$G_1(r, \tau) = 0 \tag{3}$$

在介质外处增加一镜象光源, 应用格林定理使积分区间变为无限介质, 在无穷远处, $r \rightarrow \infty$ 时

$$G_1(r, \tau) = 0 \tag{4}$$

应用格林定理以及边界条件式(2)~(4), 可以解析得到方程(1)的解

$$G_1(r, \tau) = \frac{vS}{D\gamma} \left[\frac{\exp(ik(\tau)r_1)}{4\pi r_1} - \frac{\exp(ik(\tau)r_2)}{4\pi r_2} \right] \tag{5}$$

式中 $r_1 = \sqrt{\rho^2 + (z - z_0)^2}$, $r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z + 2z_b + z_0)^2}$.

为了便于比较, 对自相关函数进行归一化, 式(5)归一化的自相关函数为

$$g_1(\tau) = \frac{[r_2 \exp(ik(\tau)r_1) - r_1 \exp(ik(\tau)r_2)]}{[r_2 \exp(ik(0)r_1) - r_1 \exp(ik(0)r_2)]} \tag{6}$$

式中 $k(\tau) = \sqrt{(v/D\gamma) [\mu_a + 3^{-1} \mu_s k_0^2 \Delta r^2(\tau)]}$, $k(0) = \sqrt{v\mu_a/D\gamma}$.

1.2 结果分析

影响漫射光涨落的主要因素是介质的散射、吸收以及散射粒子的运动速率. 在半无限介质和空气的交界面上, $z = 0$, 由式(6)计算得到的不同参量时的自相关函数如图1和图2所示. 图1为其它参量一定, 介质的散射系数不同时自相关函数的比较. 图1中 a, b, c 三条曲线的约化散射系数分别是 30cm^{-1} 、 40cm^{-1} 、 50cm^{-1} , 由此可见, 介质的约化散射系数越大, 自相关函数衰减的速度越快. 介质的约化散射系数越大, 光被散射的几率越大, 光强的涨落就越大. 图2是其它参量一定, 介质的布朗漫射系数不同时自相关函数的比较. 图2中 a, b, c 三条曲线的约化散射系数分别是 $0.5 \times 10^{-12}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{-12}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 、 $1.5 \times 10^{-12}\text{m}^2\text{s}^{-1}$, 由此可见, 散射粒子的布朗漫射系数越大, 自相关函数衰减的速度越快. 散射粒子的布朗漫射系数表征了散射粒子的运动情况, 布朗漫射系数越大, 散射粒子运动越剧烈, 漫射光涨落越快, 自相关性越弱.

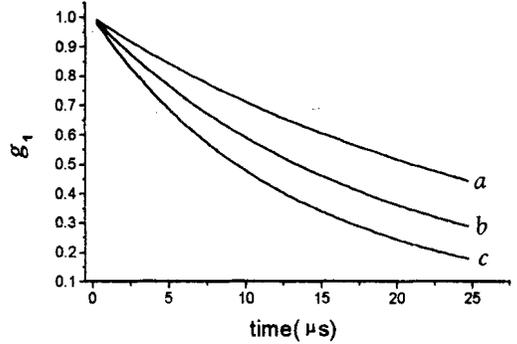


图1 约化散射系数不同时的自相关函数
Fig 1 Auto-correlation functions for different reduced scattering coefficients

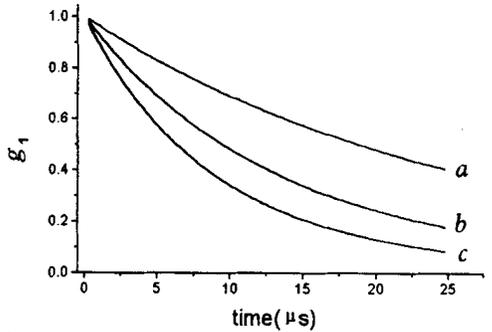


图2 布朗漫射系数不同时的自相关函数
Fig 2 Auto-correlation functions for different Brownian diffusion coefficients

2 实验系统和样品

如图3所示, 波长为633nm的He-Ne激光垂直入射到被测样品表面, 在样品表面距光源1cm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音, 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.

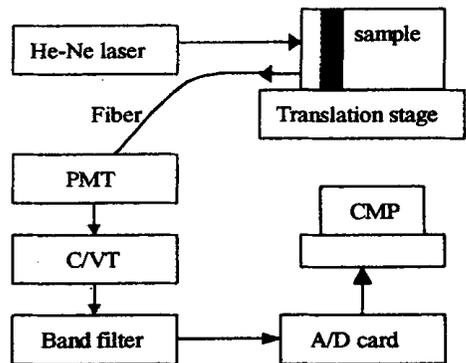


图3 实验系统
Fig 3 Setup of experiment

被测样品是浓度为 1.36% 的内类脂溶液 (Intralipid), 其中的散射粒子具有布朗运动, 其约化散射系数 $\mu_s = 20\text{cm}^{-1}$, 溶液盛在一长 $8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 6\text{cm}$ 的玻璃槽中, 其中被测面的尺寸是 $8\text{cm} \times 6\text{cm}$. 隐藏物体有两种, 一种是宽 16mm , 厚度为 5mm 的带鱼块, 另一种是直径为 10mm 的球形猪肌肉组织. 两种生物介质的布朗漫射系数均为零. 生物组织被放置于溶液一定深度处, 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, 对样品进行横向逐点扫描.

3 实验结果及分析

通常用 $g_1(\tau) = e^{-\tau}$ 的相关时间 τ 来表示相关函数衰减速率. 在隐含物体不同位置处测量得到的特征相关时间 τ 与物体位置的关系如图 4 所示, 该图为隐含物体在溶液中距测量表面 3mm 处.

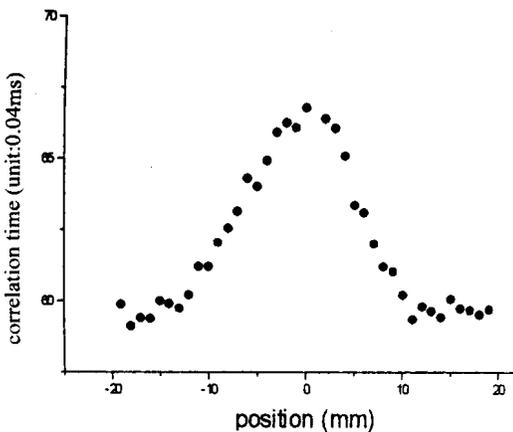


图 4 相关时间与位置的关系

Fig 4 Relation between correlation time and position 在隐含物体的中心位置处, 相关时间最大, 相关函数衰减最慢, 与无隐含物体时差别最大, 以后逐渐减小, 由此我们可以确定隐含物体的存在及直径范围. 在隐含物体中心位置处, 光子被隐含物体散射的概率很大, 大量光子被隐含物体所散射, 反映在相关函数上, 就是相关函数衰减较慢. 一方面是由于隐含物体的散射参量与周围环境介质不同, 另一方面是由于两者具有不同的动力学参量, 隐含物体的布朗漫射系数 $D_B = 0$. 在隐含物体的边缘

位置处, 既有未被隐含物体散射直接由内类脂溶液散射回来的光子, 也有被隐含物体散射又被内类脂溶液散射的光子, 因此相关函数比中心位置处衰减得快, 反映了隐含物体的存在所造成的影响减小. 当远离隐含物体时, 相关函数衰减相对更快, 此时接收到的光子基本上都是被内类脂溶液散射回来的, 只有极少的一部分光子被隐含物体散射, 其所携带的隐含物体信息被淹没.

隐含物体在溶液中不同深度下的相关性质如图 5 所示. 隐含物体为一直径 10mm 的球形猪肌肉组织, Intralipid 溶液的约化散射系数为 20cm^{-1} . 图 5 为隐含物体在溶液中不同深度时中心位置处的相关函数, 实点为实验结果, 虚线所示为拟和结果. 随着隐含物体在溶液中深度的增加, 相关函数衰减逐渐变快, 当深度大于 10mm 时, 相关时间差别不大, 此时探测不到隐含物体的存在.

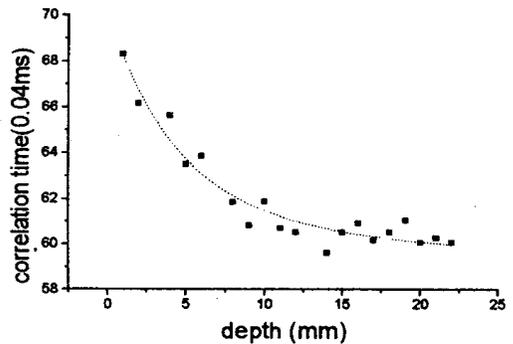


图 5 相关时间与物体深度的关系

Fig 5 Relation between correlation time τ and object depth

4 结论

动态随机介质中隐含一静态异物时, 在动态随机介质表面测量得到结果表明: 隐含异物中心位置处自相关函数的衰减速度比其它位置处慢, 由特征相关时间与位置的关系曲线可以确定隐含物体的位置. 漫射光时间自相关函数的衰减速度随深度的增加而变快, 当达到一定深度时, 自相关函数差别很小, 此时探测不到隐含异物的存在.

参考文献

- 1 Das B B, Yoo K M, Ultrafast time-gated imaging in thick tissues: a step toward optical mammography. Opt Lett, 1993, 18(13): 1092~ 1094
- 2 Zhang X, Liu Y, Ma S. Imaging of absorbing objects hidden in highly scattering random media. Chinese Journal of Lasers, 1998, A 25(12): 1112~ 1116 (In Chinese)
- 3 O'Leary M A, Boas D A. Experimental images of heterogeneous turbid media by frequency-domain diffusing-photon

- tomography. *Opt Lett*, 1995, 20(5): 426~ 428
- 4 Zhang X, Liu Y, Ma S. Study of intensity imaging of an object hidden in multiple-scattering media. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A 27(2): 1112~ 1116 (In Chinese)
- 5 Wang Lihong, Ku Geng. Frequency-swept ultrasound-modulated optical tomography of scattering media. *Opt Lett*, 1998, 23(12): 075~ 077
- 6 Boas D A, Yodanis A G. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation. *J Opt Soc Am (A)*, 1997, 14(1): 192
- 7 Haskell R C, Svaasand L O. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer. *J Opt Soc Am (A)*, 1994, 11(10): 2727~ 2741

EXPERIMENTAL STUDY OF IMAGING BIOMEDIA USING DIFFUSION LIGHT AUTO-CORRELATION

Zhang Xiqin^{1,2}, Liu Ying², Xing Da¹, Ma Shining²

¹ Institute of Laser Life Science, South China Normal University, Guangzhou, 510631

² Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin, 300072

Received date: 2001-06-13

Abstract In this paper, the imaging of an bio-tissue hidden in multiple scattering random media was studied with the temporal auto-correlation function of back-scattering light. The location of the bio-tissue hidden in turbid media was restored with the correlation time τ . The auto-correlation properties of diffusion light were also studied as the object hidden in different depth in the media.

Keywords Bio-tissue; Hidden object; Back scattering; Auto-correlation



Zhang Xiqin was born in 1972. She received her PhD degree in Optical Engineering from Tianjin University in 2000. She is now a postdoctor in Institute of Laser Life Science, South China Normal University. Her current research interests include bio-optical imaging and optical diagnosis in medical field.