

强散射随机介质中吸收物体的成像

张西芹 刘 迎 马世宁

(天津大学物理系 天津 300072)

提要 以宽带连续光为光源对隐藏在强散射随机介质中的吸收物体成像进行了实验研究,用一种新的图像处理方法恢复了被散射光所淹没的吸收物体的像。由于人体组织为光的强散射介质,因此该研究在医学成像中有很大的潜在应用价值。

关键词 随机散射介质,吸收物体,宽带连续光,医学成像

1 引 言

采用可见光或红外光为光源的医学成像技术是当前国际上研究的热点之一。由于光在通过生物组织传播时被随机散射,大量散射光偏离直线传播方向进入吸收物体的几何阴影区,使被测生物体的影像变模糊,甚至完全消失,所以直接对人体组织中的吸收物体成像是不可能的。近年来,随着激光技术和计算机技术的发展,各种光学成像技术相继产生,并取得了很大进展,根据其成像原理的不同可以分为:时间分辨成像技术^[1]、相干分辨成像技术^[2,3]、脉冲全息成像技术^[4]、散斑成像技术^[5]、全息探伤成像技术^[6]等。其中时间分辨成像技术和相干分辨成像技术近年来发展迅速,时间分辨成像技术具有较高的空间分辨率,但是它要求以超短脉冲光为光源,脉冲的峰值功率与生物组织的安全阈值相矛盾,并且只能给出吸收物体的一维或二维图像;而相干分辨成像技术不但直接给出二维图像,还能够测量吸收物体在散射介质中的深度,例如光学相干层析(OCT)成像^[3,7,8],它只要求光源具有窄的相关函数,既可以用短脉冲光为光源,也可以用宽带连续光为光源。宽带连续光源比超短脉冲光源廉价得多,更具有实用价值。本文以非相干连续光为光源,基于相干分辨成像的基本原理,用一种新的图像处理方法,对强散射随机介质中隐藏的吸收物体成像进行了实验研究。

2 理论分析

相干分辨成像的基本思想是:透过随机散射介质后未被散射的光能够与参考光干涉形成载有被测物体信息的干涉图,漫散射光只能形成噪声背底,通过对干涉图的统计处理将噪声去掉,恢复被测物体的像,该技术的关键是如何去掉噪声背底。本文采用直接减去参考光的方法对图像进行预处理,然后进行增强、叠加平均、直流滤波等处理。

图 1 为迈克尔逊干涉仪光路图,入射光经分束器分成两束,一束作为物光,另一束作为参

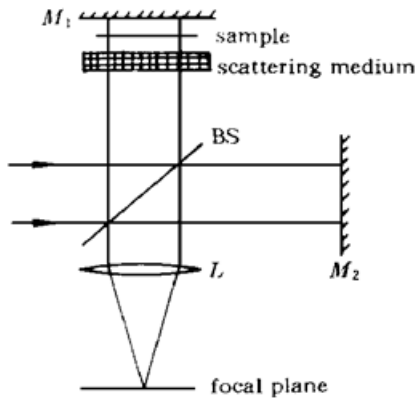


图 1 成像原理图

M_1, M_2 : 平面镜; BS: 分束器; L : 透镜

Fig. 1 Schematic of the imaging principle

M_1, M_2 : mirrors; BS: beam splitter; L : lens

装置 CCD 摄像机及图像卡, 每幅图的采样时间为 40 ms, 在每幅图的曝光时间内 CCD 摄像机实际上接收到的是 4×10^6 段波列的平均值, 散射光 E_s 由于经过散射介质时位相和振幅的随机改变, E_s 与 E_r 的位相差也是随机改变的, 按照统计光学理论, $\langle \cos[\alpha(r)] \rangle = 0, \langle \cos[\beta(r)] \rangle = 0$, 接收面上的强度分布为

$$I = (E_r + E_c + E_s)(E_r + E_c + E_s)^* = |E_r|^2 + |E_c|^2 + |E_s|^2 + 2|E_r||E_c| \cos[\mathcal{Q}(r)] + 2|E_s||E_r| \cos[\alpha(r)] + 2|E_s||E_c| \cos[\beta(r)] \quad (1)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示时间平均 $I_r = \langle |E_r|^2 \rangle, I_c = \langle |E_c|^2 \rangle, I_s = \langle |E_s|^2 \rangle$

I_r 为参考光的强度, I_c 为直接透过散射介质的相干光强度, I_s 为非相干噪声。 I_r 是均匀稳定分布的, 可以直接减去, 得

$$I' = I_c + I_s + 2|E_c||E_r| \cos[\mathcal{Q}(r)] \quad (3)$$

在强散射介质情况下, I_c 项比其他项小得多, 可以忽略不计, 相干项 $2|E_c||E_r| \cos[\mathcal{Q}(r)]$ 载有被测物体的信息, 能够形成吸收物体的像, 但被大量的非相干噪声 I_s 所调制。采用多幅图叠加的方法使噪声平均, 经过上述处理的图像强度为

$$\sum_{i=1}^N I'_i = \sum_{i=1}^N I_{s,i} + 2N|E_c||E_r| \cos[\mathcal{Q}(r)] \quad (4)$$

上式表示 N 幅图强度相加, 其中 $\sum_{i=1}^N I_{s,i}$ 为 N 幅图叠加后的噪声, 用 I_N 表示, 由于散射粒子是运动的, 每幅图的噪声分布互不相同, 并且每两幅图之间的时间间隔远大于噪声的相关时间, 所以, 多幅图叠加后, I_N 趋于均匀分布。 $2N|E_c||E_r| \cos[\mathcal{Q}(r)]$ 为信号项, 用 I_s 表示, 经过叠加处理后, I_s 增强, 形成被强噪声所调制的强信号。为了去掉噪声项, 采用直流滤波的方法, 即图像的每一像素值都减去一相同的数值, 经滤波处理后, 噪声项 I_N 大大减少, 而信号项强度不变, 信噪比明显提高。

3 实验装置

实验系统装置如图 2 所示。光源为一普通发光二极管, 中心波长为 700 nm, 带宽为 8 nm; M_1, M_2 为迈克尔逊干涉仪的两个平面反射镜; 在干涉仪的一臂中加入散射池和被测样品, 被

考光, 在物光光路中加入散射介质和被测样品, 由于光两次经过散射介质, 被测物体可视为处于散射介质中。透镜 L 焦平面上接收到的光可以分为三种成份: 参考光 E_r , 物光中直接透过散射介质(未被散射)的部分 E_c (相干部分) 和漫散射光 E_s (非相干部分), 用 r 表示接收面上的位置坐标, 接收面上的强度分布可以表示为

$$I = (E_r + E_c + E_s)(E_r + E_c + E_s)^* = |E_r|^2 + |E_c|^2 + |E_s|^2 + 2|E_r||E_c| \cos[\mathcal{Q}(r)] + 2|E_s||E_r| \cos[\alpha(r)] + 2|E_s||E_c| \cos[\beta(r)] \quad (1)$$

形成 $\mathcal{Q}(r)$ 的两束光未经过散射, 在干涉仪处于等光程位置时, $\mathcal{Q}(r)$ 不随时间而变化, 它只是 r 的函数。而 $\alpha(r)$ 和 $\beta(r)$ 是随时间而变化的, 本文所用的发光二极管光源每秒钟至少发射 10^8 段波列, 所用图像接收

测物体是一直径为 0.8 mm 的金属丝; 散射池是厚度为 10 mm 的圆柱形石英比色皿, 透光面直径为 2 cm; 散射介质由 Kalliroscope AQ 1000 显示液粒子溶于水中构成, 散射粒子是一种长 15 μm, 宽 5 μm 的长胶状粒子, 实验所用散射介质的浓度使吸收物体的像完全消失, 光的透射率小于 5%; 面阵 CCD 摄像机的分辨率为 600 线, 256 灰度级, 采样频率为每秒 25 幅。CCD 摄像机在透镜 L_3 的焦平面上接收图像, 经图像卡 A/D 转换后由图像显示器进行显示, 微机用于主程序的管理和控制。

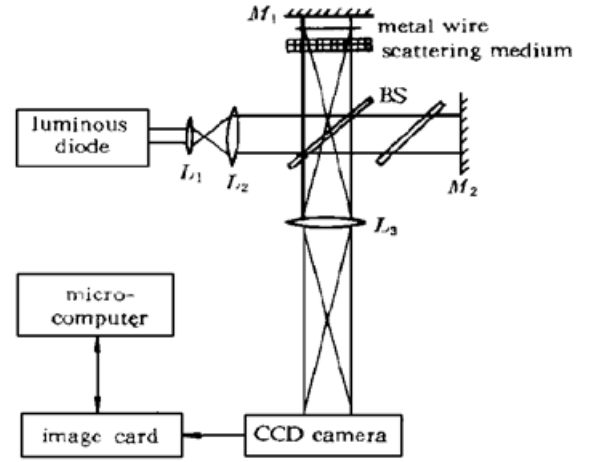


图 2 实验系统装置图

Fig. 2 Experimental setup of the imaging system

4 实验测量及结果分析

实验操作步骤分为以下几步: (1) 散射池中加入水(此时未加散射粒子), 将干涉仪调节到等光程附近; (2) 用一黑色屏挡住参考光, 向散射池中逐渐加入散射粒子, 从图像显示器上观察, 直到金属丝的像完全消失, 此时用眼睛透过散射池观察, 也看不到金属丝; (3) 把挡住参考光的黑色屏移开, 采集一幅物光与参考光的干涉图; (4) 用黑色屏挡住物光, 采集一幅参考光的强度分布图; (5) 把(3), (4) 两步中得到的两幅图相减, 完成图像的预处理。然后对多幅经过预处理的图像进行叠加、滤波、增强等处理。

为了便于比较, 给出了散射池中无散射粒子, 并且挡住参考光时金属丝的原像(图 3 (a))。图 3(b) 为一幅经过预处理的图像, 即从物光和参考光的干涉图中减去参考光后的结果, 金属丝的相干像被恢复出来, 像边缘比较清晰, 说明它有较高的空间分辨率, 但是信号强度比较弱,

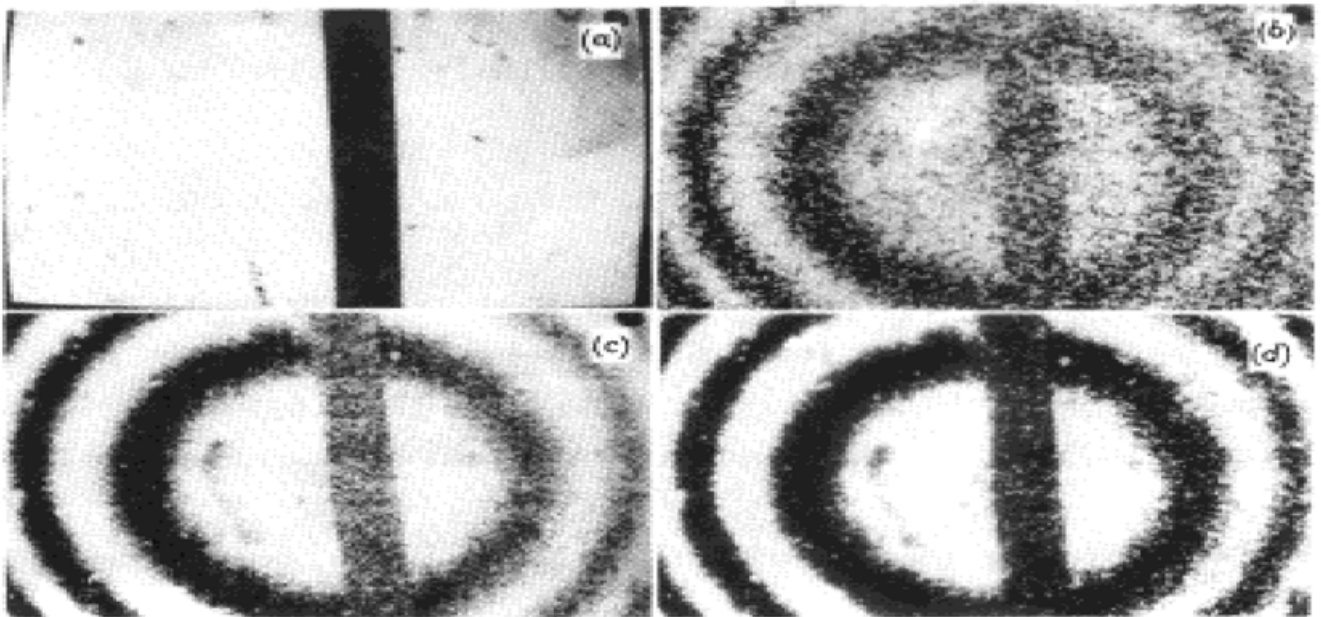


图 3 对隐藏在强散射随机介质中的金属丝的成像结果

Fig. 3 Imaging a metal wire hidden in highly scattering random media

(a) without scattering media; (b) a single recovered image; (c) average of 20 images; (d) (c) was filtered

噪声比较强,为了提高图像的亮度,便于观察,对预处理后的图像进行了线性增强,未经增强的图像亮度要比图 3(b)小得多。为了减少噪声,提高信噪比,采用了多幅图进行叠加的方法,图 3(c)为 20 幅经过预处理的图像相叠加的结果,叠加后的信号强度明显增强,并且使噪声分布趋于均匀。图 3(d)为对图 3(c)进行直流滤波后的结果,比较(c)和(d)可以看出,(d)经滤波后,噪声明显减少。

通过本实验证明了:(1)用宽带连续光对随机散射介质中吸收物体成像的可行性,这种光源价格低廉,很具有实用价值;(2)本实验使用的这种图像处理方法是一种比较新颖的技术,易于测量,简便快捷,通过实验证实了它的可行性。

参 考 文 献

- 1 K. M. Yoo, B. B. Das, R. R. Alfano. Imaging of a translucent object hidden in a highly scattering medium from the early portion of the diffuse component of a transmitted ultrafast laser pulse. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(13):958~ 960
- 2 E. N. Leith, C. Chen, H. Chen *et al.*. Imaging through scattering media using spatial incoherence techniques. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(23):1820~ 1822
- 3 M. R. Hee, J. A. Izatt, J. M. Jacobson *et al.*. Femosecond transillumination optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12):950~ 952
- 4 H. Chen, Y. Chen, D. Dilworth *et al.*. Two-dimensional imaging through diffusing media using 150-fs gated electronic holography techniques. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7):487~ 489
- 5 P. Naulleau, D. Dilworth, E. Leith *et al.*. Detection of moving object embedded within scattering media by use of speckle methods. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5):498~ 500
- 6 J. Woisetschlager, D. B. Sheffer, C. W. Loughry *et al.*. Phase-shifting holographic interferometry for breast cancer detection. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(22):5011~ 5015
- 7 G. J. Tearney, B. E. Bouma, S. A. Boppart *et al.*. Rapid acquisition of *in vivo* biological images by use of optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17):1408~ 1410
- 8 G. J. Tearney, S. A. Boppart, B. E. Bouma *et al.*. Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7):543~ 545

Imaging of Absorbing Objects Hidden in Highly Scattering Random Media

Zhang Xiqin Liu Ying Ma Shining

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

Abstract Imaging of an absorbing object hidden in highly scattering random media is achieved with a CW broadband light from a luminous diode. A new image-processing algorithm is developed to restore the image covered by the diffuse light. Submillimeter spatial resolution is achieved. This method may find the important potential application in medical imaging.

Key words random scattering media, absorbing object, CW broadband light, medical imaging