

透过高散射介质成像的超短脉冲激光 电子学全息系统

侯比学 成 铎 陈国夫

(中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室 西安 710068)

提要 分析了超短脉冲激光透过高散射介质的电子学全息成像原理;编制了数字再现和图像处理软件;结合 CCD 摄像机、图像采集处理机,建立了一套完整的适于透过高散射介质成像的电子学全息系统;给出了实验结果,实验证明系统是可行的。

关键词 高散射介质,最早到达光,电子学全息

1 引 言

透过高散射介质(散射非常严重的介质)成像技术是当前国际上比较活跃的一个研究领域,其主要原因之一就是它在医学成像方面有着潜在的应用前景。超短脉冲激光照明与超快光学选通技术结合起来产生的最早到达光方法,在透过高散射介质成像方面取得了较好的结果。

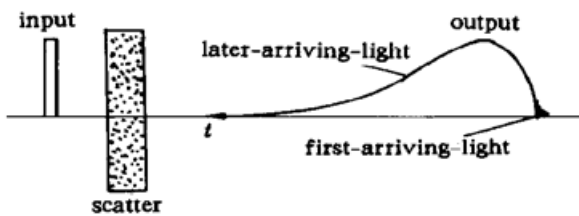


图 1 出射光脉冲示意图

Fig. 1 Schematic of an ultrashort laser pulse propagating through a highly scattering medium

这种方法是基于最早到达光概念^[1]。一个窄的光脉冲通过高散射介质后,由于强烈的散射,光脉冲将被展宽,如图 1。展宽后的脉冲可分为两部分:最早到达光和后续到达光。最早到达光几乎沿着入射光方向直线透过散射介质,较早出现于介质的另一侧,处在出射脉冲的最前沿,这部分光可形成较好的像。后续到达光在介质中严重散射,走过曲折的路径,较迟地出现于介质的另一侧,这部分光影响成像质量,严重时

将完全淹没目标的像。

可见,采用时间选通方法可以把最早到达光分离出来成像,摆脱后续到达光的影响。常用的时间选通方法有克尔快门和条纹相机^[2,3],这两种方法都有缺点,克尔快门需要笨重的大功率激光系统,同步扫描型条纹相机的时间分辨率只有 5~10 ps,而且通过扫描过程才能建立二维图像。

超短脉冲激光电子学全息技术具有所需光源功率低、二维成像,时间分辨率与脉宽相同,整个系统易于调整等优点,成为分离最早到达光的有用实效方法^[4,5]。本文分析了超短脉冲激光透过高散射介质的电子学全息成像原理,建立了一套完整的适于透过高散射介质成像的电

子学全息成像系统, 实验证明系统是可行的, 还分析了这种方法的优点。

2 超短脉冲激光电子学全息方法透过高散射介质成像原理

光路安排如图 2。由超短脉冲激光器发出的光进入马赫-陈德尔干涉仪, 被分为物光束和参考光束, 物光束通过一个吸收体、散射体和一个空间滤波器系统, 由一个半反射镜使物光和参考光会合, 再通过一个成像系统将散射体的出射表面成像于 CCD 靶面上, 调节参考光路中的延迟线, 使参考光脉冲与最早到达光同时到达 CCD 靶面, 干涉形成像面全息图, 而后续到达光在时间上与参考光没有相遇, 不能发生干涉, 对全息图没有贡献, 只形成模糊的亮背景。由于 CCD 分辨率很低, 为了使物参两光形成较低空间频率的干涉条纹, 以适应 CCD 的要求, 在光路中有一空间滤波系统, 滤去高频散射光, 而且使物光与参考光夹角很小。

CCD 把全息图数据输入微机, 微机把全息图以类似于光学再现的方式进行数字化处理, 得到吸收体的像, 显示于监视器上。

设物参光夹角为 θ , CCD 靶面为 xy 平面, 照射在 CCD 靶面上的物光中最早到达光的复振幅为 $a_1(x, y)$, 后续到达光为 $a_2(x, y)$, 参考光一般采用平面平行光, 复振幅分布为 $R(x, y) = r \exp(i2\pi\xi_r x)$, 其中 r 为实常数, $\xi_r = \sin\theta/\lambda$, λ 为光源的中心波长。只有最早到达光与参考光脉冲同时到达 CCD 靶面, 干涉形成全息图, 后续到达光对 CCD 靶面连续积分曝光, 只形成模糊的亮背景。这样, CCD 靶面上光强分布为

$$I = |a_1 + R|^2 + |a_2|^2 = |a_1|^2 + |a_2|^2 + r^2 + r a_1^* \exp(i2\pi\xi_r x) + r a_1 \exp(-i2\pi\xi_r x)$$

在曝光时间内, 后续到达光 a_2 对 CCD 靶面积分曝光, 对积分强度的贡献可写为 $c + |a_2'|^2$, 其中 c 为常数, $|a_2'|^2$ 是由于介质散射造成的散斑分布。这样, 在曝光时间内, 超短脉冲激光序列对 CCD 靶面的积分光强可写为

$$I_i = c + r^2 + |a_2'|^2 + |a_1|^2 + r a_1^* \exp(i2\pi\xi_r x) + r a_1 \exp(-i2\pi\xi_r x)$$

对上式在空间频率域进行分析。在空域中的 x, y 坐标对应的空间频率域中的坐标为 ξ 和 η 。通过空间滤波系统的物光是带宽有限的, 设在 ξ 方向宽度为 $-\xi_0$ 到 $+\xi_0$, 在 η 方向的宽度为 $-\eta_0$ 到 $+\eta_0$ 。由于衍射发生在 ξ 方向, 只考虑 ξ 方向的频率分布, 在 η 方向只要滤波窗口的尺寸大于 η_0 即可。积分光强的空间频谱分布如图 3。在 $\xi = 0$ 处

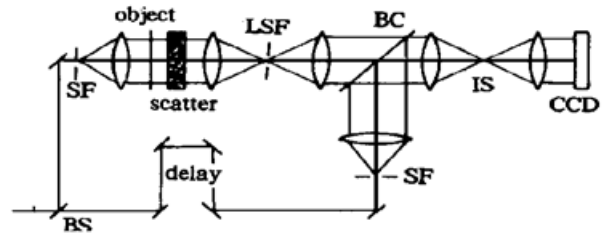


图 2 超短脉冲激光电子学全息原理图
SF: 针孔滤波器; BS: 分束器; BC: 合束器;
delay: 延迟线; IS: 成像系统; LSF: 低通空间滤波系统
Fig. 2 Optical system for electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through a highly scattering medium
BS: beam splitter; IS: image system; SF: spatial filter; delay: system for the optical path delay of the reference; BC: beam combiner; LSF: low-pass spatial filter

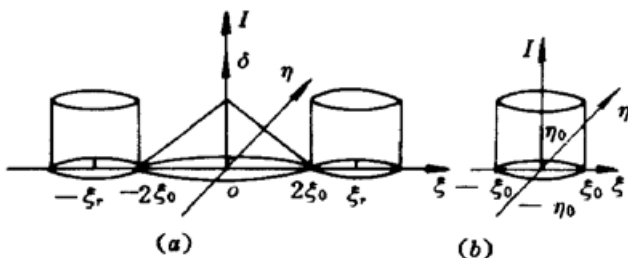


图 3 积分光强的空间频谱分布

(a) 总的频谱分布;

(b) 滤波、频谱移动后的一级衍射项的频谱分布

Fig. 3 Spatial frequency spectrum of the integrated intensity

(a) Overall spatial frequency spectrum;

(b) Spatial frequency spectrum after filtering and shifting

的 δ 函数, 是由上式中前两项 c 和 r^2 形成的, 圆锥函数是由第三项 $|a'_2|^2$ 和第四项 $|a_1|^2$ 的频谱分布, 这是我们假设物光的频谱分布是带宽有限的圆柱状函数的结果; 在 $\xi = \pm \xi_r$ 处的两个圆柱状函数是 ± 1 级衍射项, 即上式中最后两项的频谱。可见当 $\xi_r \geq 3\xi_0$ 时, ± 1 级衍射项的频谱与其他项分开, 这类似于离轴全息图再现时 0 级与 ± 1 级衍射项在一定条件下是相互分离的。

显然, 通过对记录的全息图作傅里叶变换、频谱滤波、频谱移动、反傅里叶变换, 可得到有用的衍射项 $ra_1^* \exp(i2\pi\xi_r x)$ 或 $ra_1 \exp(-i2\pi\xi_r x)$, 其强度分布 $r^2|a_1|^2$ 应该是从单幅全息图得到的再现像强度分布。

但是, 在记录的全息图中, 微弱的最早到达光信号叠加在很强的背景中, 再现像信噪比很低。我们假设 $a_1 = s_0 \cdot n$, s_0 为吸收体的阴影像, n 为乘性散斑噪声, 再现像为 $r^2|a_1|^2 = r^2|n|^2 s_0^2$, 忽略常数因子 r^2 , 再现像分布为 $|n|^2 s_0^2$ 。如果得到多幅再现像, 且每幅图像上的噪声是互不相关的, 那么叠加平均像为 $I_{im} = \overline{|n|^2 s_0^2}, \overline{|n|^2} \rightarrow$ 常数, 这样就得到了吸收体较好的像。

对于典型的不稳定散射介质(如肌肉组织, 混浊液体等), 散斑的相关时间为 20~ 30 ms 数量级。因此, 在采集多幅全息图时, 每幅全息图的曝光时间足够短($< 20 \sim 30$ ms), 以保证形成稳定的全息图, 而相邻两幅全息图的间隔时间大于散斑噪声的相关时间, 以使每幅再现像的散斑噪声互不相关。当多幅再现像叠加平均时, 散斑噪声得到抑制, 信噪比大大提高。如果 N 幅再现像叠加平均, 信噪比提高 \sqrt{N} 倍。对于稳定的散射介质, 在记录每幅全息图之前, 可以人为地引入扰动, 使散斑互不相关。

本文以上述原理为基础, 编制了全息图再现和图像处理软件, 软件框图如图 4。结合 CCD 摄像机、图像采集处理机, 建立了一套完整的适于透过高散射介质成像的电子学全息系统。实验证明, 该系统是可行的。实验中, 光源为自己研制的自锁模钛宝石激光器, 脉冲宽度为 20 fs, 散射介质是置于样品盒中的厚度为 12 mm, 体积百分比为 5% 的鲜奶、水混合散射液体, 成像目标是直径为 0.65 mm 的金属丝, 金属丝紧贴样品盒左方放置。图 5 (a) 是样品盒中装入清水时采集到的金属丝的像, (b) 是透过奶液拍摄到的金属丝的飞秒全息图, 图中已经完全看不到金属丝的影像, (c) 是由单幅全息图解调出的再现像, 信噪比较低, (d) 是 25 幅全息图再现像叠加平均的结果, 较大幅度地提高了图像质量, 明显提高了图像信噪比。对于这样的高散射介质, 如果采用连续激光全息技术, 将不会得到清楚的图像。

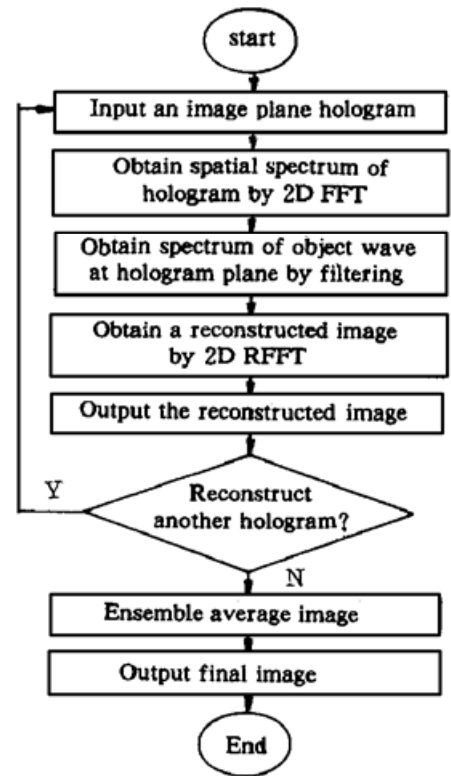


图 4 程序框图

Fig. 4 Flow chart of the program

3 超短脉冲激光电子学全息方法透过高散射介质成像的讨论

由于这种方法采用了全息技术, 它有以下三点好处: (1) 通过全息过程, 可得到再现像的复振幅分布, 因此, 对再现像处理时, 不仅可以对图像强度分布进行处理, 且还可以对复振幅分

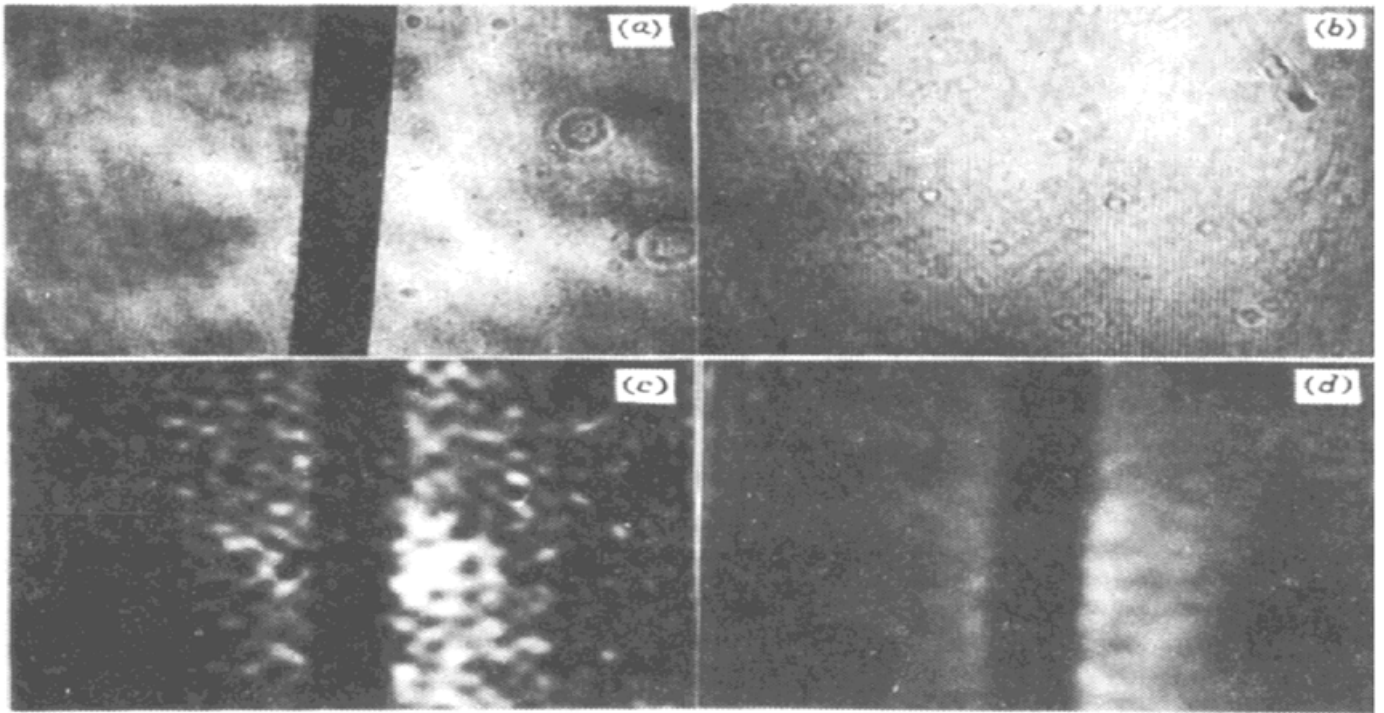


图 5 实验结果

- (a) 透过清水采集到的金属丝的像; (b) 透过奶液拍摄到的金属丝的单幅全息图;
 (c) 由单幅全息图得到的再现像; (d) 由 25 幅全息再现像叠加平均的结果

Fig. 5 The experimental results

- (a) The image of metal wire through water; (b) A hologram of metal wire through scatter;
 (c) The image obtained from a single hologram; (d) The image obtained from 25 holograms

布进行处理; (2) 全息选通技术是靠光源的短相干长度实现的, 因此, 这种方法除了可以用超短脉冲激光器作光源外, 还可以使用短相干长度的连续激光器作光源; (3) 采用超短脉冲激光记录全息图时, 相当于光源的各个频率成分同时曝光 CCD 靶面, 也可以采用调谐式激光器, 在曝光时间内扫过所需的所有频率, 在某一时刻, 只有单频率光曝光, 但总的积分结果将等同于超短脉冲激光记录; 也可以采用可调谐激光器, 在每一个单频率处, 记录一幅全息图, 把再现像复振幅存入计算机, 在计算机中采用傅里叶综合方法通过移相、叠加, 同样可以选通出最早到达光成像^[6], 这种方法由于记录全息图时是单频光曝光, 全息图没有模糊的亮背景, 对比度很高, 况且参考光与最早到达光的同步是在计算机中实现的, 光路调节非常方便。

电子学全息方法与传统的干版全息相比, 省去了光学再现法中必需的曝光、显影、定影、漂洗、干燥等一系列处理过程, 简化了再现过程, 缩短了再现周期。而且传统的干版全息方法在透过高散射介质成像时, 后续到达光与参考光不发生干涉, 但仍然曝光干版, 有损干版的动态范围; 不稳定散射介质的稳定时间很短, 为了在这很短的时间内使干版充足曝光, 必须采用足够大功率的光源; 最早到达光在展宽的出射脉冲中只占很小一部分, 能量很弱, 干版量子效率很低, 无法满足要求, CCD 芯片具有很高的量子效率(可达 40%)。以上几点都是电子学全息方法可以克服的。

电子学全息方法可连续地较快地产生多幅全息图, 特别适合于透过不稳定散射介质的成像, 只要控制每幅全息图的曝光时间小于散斑的相关时间, 而相邻两幅的间隔时间大于这个相关时间, 通过对再现像的叠加平均处理, 可得到较好的吸收体的像。

但是, 这种方法也有它的不足之处, CCD 的分辨率很低, 使得物参光夹角很小, 全息图的

干涉条纹只有 15 条/mm 左右, 这将限制成像质量和系统分辨率的提高, 即使 CCD 像素数增加, 也将受到计算机存贮能力和运算能力的限制; 另外, 飞秒激光器的造价和使用费用很高, 也给这一技术的研究和应用带来一些困难。目前这一技术的研究在提高散射强度的同时, 还要设法提高探测深度。

尽管存在一些问题, 随着超短脉冲激光技术、CCD 技术、计算机技术、信号处理技术的发展, 这种成像技术将有很好的发展前景。

致谢 衷心感谢中国科学院西安光机所的王国志研究员、丰善、王淑岩副研究员以及郝志琦同志的有益讨论和提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 K. M. Yoo, R. R. Alfano. Time-resolved coherent and incoherent components of forward light scattering in random media. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6): 320~ 322
- 2 L. Wang, P. P. Ho, X. Liang *et al.*. Kerr-Fourier imaging of hidden objects in thick turbid media. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 241~ 243
- 3 Jeremy C. Hebden, Robert A. Kruger, K. S. Wong. Time resolved imaging through a highly scattering medium. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7): 788~ 794
- 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 H. Chen, M. Shih, E. Arons *et al.*. Electronic holographic imaging through living human tissue. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17): 3630~ 3632
- 6 E. Lieth, C. Chen, H. Chen *et al.*. Imaging through scattering media with holography. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(7): 1148~ 1153

An Ultrashort Laser-pulse Electronic Holography System Suitable for Imaging Through Highly Scattering Media

Hou Bixue Cheng Duo Chen Guofu

(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract The principle of electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through highly scattering media is discussed. An electronic holography system is established which is suitable for imaging through highly scattering media. This system consists of a CCD camera, an imaging processor and is programmed for numerical reconstructing and image processing. The experiments show that this system is feasible. The advantages of this system are also discussed.

Key words highly scattering media, first-arriving-light, electronic holography