

# 超短脉冲激光通过高散射介质的 电子学全息成像技术研究

侯比学 陈国夫 丰 善 王淑岩 王屹山 郝志琦

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

**摘 要** 根据超短脉冲激光透过高散射介质成像的电子学全息原理, 建立了一套完整的适用于透过高散射介质成像的电子学全息系统. 采用该系统, 透过厚度为 12 mm、体积百分比为 5% 的鲜奶和水的混合散射液体, 对直径为 0.65 mm 的金属丝实现了成像. 分析了该技术对脉冲宽度的要求, 并对该技术进行了讨论.

**关键词** 高散射介质, 成像, 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, 其主要原因之一是它在医学成像方面有着潜在的应用前景. 虽然 X 射线医学成像, 已使医学诊断获得显著进展, 但是由于 X 射线对人体会产生电离作用, 较大剂量会对人体造成损伤. 因此, 人们希望用可见光附近波段的光波来对生物组织进行非侵入检查, 实现光学医学成像. 但是, 生物组织对光的散射非常严重、不稳定, 并且在许多波长处有着强烈的吸收, 使得医学生物组织的成像非常艰难.

通过无规则散射介质成像, 比较成功的方法之一是最早到达光方法, 它是把超短脉冲激光照明与超快光学选通技术结合起来的一种方法. 基于这个基本思想, Wang 等人采用克尔快门选通技术<sup>[1]</sup>, Yoo 等人利用二次谐波产生——互相关技术<sup>[2]</sup>, Hedben 等人采用共焦扫描技术<sup>[3]</sup>, 都分别分离出最早到达光, 实现了成像. 但这几种方法都有缺点, 克尔快门和互相关技术需要复杂的大功率激光系统, 同步扫描型条纹相机的时间分辨率只有 5~10 ps, 况且后两种方法需要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较好方法. Chen 和 Leith 等人对超短脉冲激光透过高散射介质的电子学全息成像技术进行了深入的研究<sup>[4-6]</sup>, 1991 年他们用这种方法得到了 6 mm 厚鸡肉中两根直径为 0.55 mm 交叉金属丝的图像, 1994 年他们又用此方法透过 6 mm 厚的人手肌肉组织, 对直径为 2 mm 和 1.5 mm 的金属丝成像, 得到了较好的结果, 为光学层析在医学上应用作了初步准备. 但是, 这种技术在国内尚未见报道.

本文根据超短脉冲激光电子学全息透过高散射介质成像原理, 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. 采用该系统透过厚度为 12 mm、体积百分比为 5% 的鲜奶和水的混合散射液体, 对直径为 0.65 mm 的金属丝实现了成像.

## 2 原 理

超短脉冲激光电子学全息方法透过高散射介质成像技术是基于最早到达光概念<sup>[7]</sup>. 一个

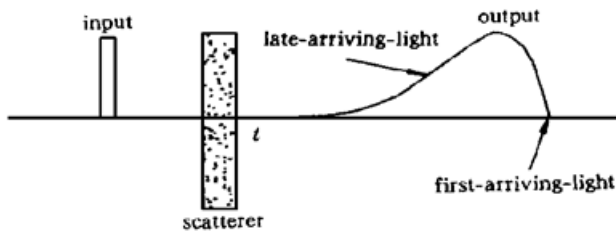


Fig. 1 Schematic of an ultrashort laser pulse propagating through a highly scattering medium

窄的光脉冲透过高散射介质后, 从介质的另一面出射的光是依次射出的, 散射不严重的光较早地出现于介质的另一侧, 而严重散射的光较迟地出现, 这样, 通过散射介质以后的光脉冲将被展宽, 很容易展宽到上百倍, 如图 1 所示. 展宽后的脉冲可分为三部分: 弹道光、蛇行光和散射光. 弹道光沿着入射光方向直线透过散射介质, 最早出现于介质的另一侧, 其强度随散射介质厚度增加而指数衰减, 这部分光可形成达到衍射极限的

像. 蛇行光在介质内散射次数不多, 光在前进方向上很小的一个锥角内传播, 光走过的路径象蛇一样弯曲前进, 它仅次于弹道光出现于介质的另一面, 这部分光仍然保留着一些成像信息, 但得到的像已不能达到衍射极限. 散射光在介质中严重散射, 走过曲折的路径, 最后出现于介质的另一侧, 这部分光影响成像质量, 严重时将完全淹没成像目标的像. 一般来说, 对于不很厚的高散射介质, 弹道光就已不存在了, 那就只能选通出处在出射光脉冲前沿的蛇行光(最早到达光)来成像.

超短脉冲激光全息选通技术是以参考光作为选通快门的. 光路安排如图 2 所示. 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. 物光束通过成像目标、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没有与参考光相遇, 不能形成干涉条纹, 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.

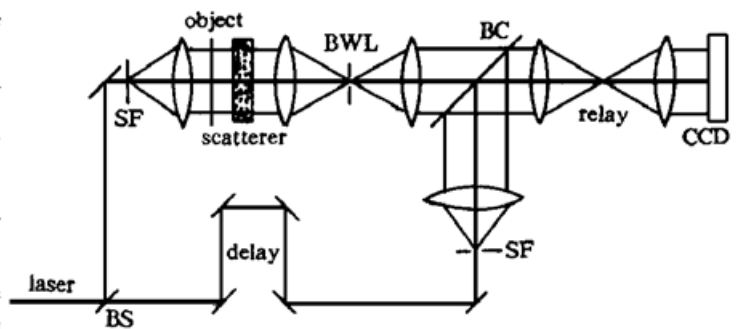


Fig. 2 Optical system for electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through a highly scattering medium. BS: beam splitter; relay: relay lens system; SF: spatial filter; delay: system for the optical path delay of the reference; BC: beam combiner; BWL: bandwidth-limiting spatial filter

CCD 把全息图数据输入微机, 通过微机把全息图以类似于光学再现的方式进行数字化处理. 首先将全息图数据进行傅里叶变换, 再作频率滤波处理, 只保留一级衍射项, 并在频域中进行坐标平移, 再反傅里叶变换即得到再现像. 散射光在 CCD 靶面上形成的亮背景在全息图中以直流成分出现, 通过滤波处理将其滤掉, 而只有最早到达光与参考光干涉形成的全息图可产生吸收体的像. 这样, 通过全息技术将最早到达光从散射光中分离出来, 实现了从单幅全息图解调出吸收体的像.

但是, 在记录的全息图中, 非常微弱的最早到达光信号叠加在很强的后续到达光亮背景中, 再现像信噪比很低. 为了进一步提高信噪比, 可以将多幅全息图再现像叠加处理, 前提条件是多幅再现像散斑之间互不相关. 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  $N^{1/2}$  倍<sup>[8]</sup>. 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, 结合 CCD 摄像机、图像采集处理机, 建立了一套完整的适合于透过高散射介质成像的电子学全息系统.

### 3 实 验

实验中采用图 2 所示光路和上述建立的电子学全息系统, 光源为自己研制的钛宝石自锁模飞秒脉冲激光器(泵浦源采用输出功率为 5 W 的  $\text{Ar}^+$  激光器). 锁模激光脉冲重复频率为 100 MHz, 中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 20 fs, 输出功率为 70 mW.

散射介质是置于样品盒中的体积百分比为 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. 成像系统将散射液体出射表面成像在 CCD 靶面上, 放大率大约为 1. 参考光路中延迟线调节精度为 0.01 mm.

图 3(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象; (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, 只要形成较好全息图的地方, 都较好地实现了再现, 图像有较好的对比度. 当然, 没有较好形成全息图的地方, 背景比较暗, 图像对比度不好. 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.

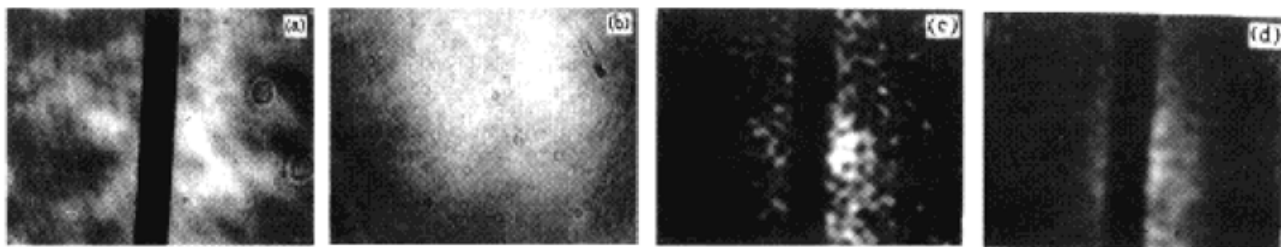


Fig. 3 The results of experiment. (a) The image of metal wire through water; (b) A hologram of metal wire through scatter; (c) The image obtained from a single hologram; (d) The image obtained from 25 holograms

实验用的 CCD 为 512×512 像素的面阵，分辨率很低，全息图干涉条纹只有 15 条/毫米左右，使得物、参光夹角很小，约为 0.779°。这样，在空间频率域内，全息图零级的一些高频散射光与±1 级衍射项有重叠，滤波时不能完全消除这些散射光的影响，这将降低图像的质量、信噪比以及系统的分辨率。为了降低这种影响，在解调软件中空间频率域滤波处理时，使滤波窗口减小，但这样又会丢掉待测目标的高频信息，使再现像的边沿不太清楚。因此，在选择滤波窗口大小时，必须考虑两个因素，即既要较好地降低散射光的影响，又要较好地保留待测目标的高频信息。

### 4 该技术对激光脉冲宽度的的要求

该成像技术选择超短脉冲激光源时，除了考虑有较好的激光模式、合适的输出功率等因素外，还要考虑脉冲宽度的影响。

#### 4.1 脉冲宽度对再现像分辨率的影响

该成像技术是以参考光作为选通快门的，超短激光脉冲的时间宽度也就是选通快门的宽度。如果成像目标在散射介质的入射一侧，并且选通出最早到达光成像，那么这个成像系统对再现像的空间分辨率 Δx 为<sup>[9]</sup>：

$$\Delta x = 1.95(c\tau d)^{1/2}$$

其中，c 为散射介质内的光速，τ 为激光脉冲的宽度，d 为散射介质的厚度。可见，脉冲宽度越小，空间分辨率越高。但是，脉冲宽度越小，意味着选通出的有用信号越弱，这样再现像的信噪比越低。因此，激光器必须有一个合适的脉冲宽度，既要再现像有较好的空间分辨率，又要有较好的信噪比。另外，上式中的 τ 是指入射到散射介质上的脉冲宽度，而成像系统光路中在散射介质的前后还有其它光学元件，这些元件对脉冲还有一个展宽，况且脉冲越窄，展宽越严重。所以，在考虑脉冲宽度时，还要考虑光学元件对脉冲的展宽效应。

#### 4.2 脉冲宽度对有效全息图宽度的影响

一般认为，超短激光脉冲的时间宽度就是它的时间相干长度，如果物光和参考光的光程

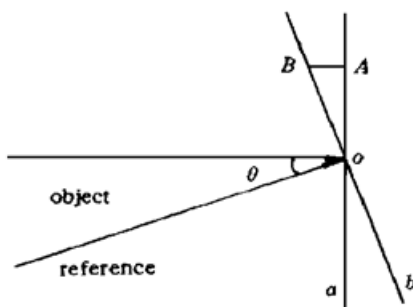


Fig. 4 Schematic of interference between object and reference lights

差大于这个相干长度，就不会发生干涉形成全息图。因此，脉冲的宽度将影响着有效全息图的宽度，也将影响着成像的质量。假设物、参两光的夹角是 θ，如图 4 所示，a 是物光到达 CCD 靶面的波面，b 是参考光到达 CCD 靶面的波面，A、B 是两波面在 CCD 靶面上将要形成干涉的两点，这两点间的光程差为  $AB = AO \sin \theta$ 。只要  $AB$  小于脉冲激光的空间相干长度，即  $AB \leq c_0\tau_0$ ，就可以在 A 点干涉形成较好的全息图，否则就不会形成较好的全息图，其中  $c_0$  是光在空气中的光速， $\tau_0$  为激光脉冲在 CCD 靶面处的脉冲宽度。所以，有效全息图的宽度 L 为：

$$L = 2c_0\tau_0/\sin \theta$$

可见，脉宽越宽，有效全息图越宽，反之则反；θ 越小，L 越大；θ 越大，L 越小。为了充分利用 CCD 靶面的大小，有效全息图的宽度要不小于 CCD 靶面的宽度。这就要求激光器有一个合适的脉冲宽度。

从图 3(b) 可以看出，实验中所用的激光脉冲宽度较小，有效全息图只在中央部分形成，

而在两边没有形成较好的干涉. 再现像的两边也就没有较好地甩掉背景.

实验中可以看到, 当调节参考光路中的延迟线时, 由于物、参两光波面的交点  $o$  移动, 有效全息图区域也在左右移动. 当拍摄全息图时, 应该调节延迟线, 尽量使目标的像处于有效全息图的中心区域. 实验中还可以看到, 当调节物、参光的夹角时, 干涉条纹变密, 而且有效全息图区域的宽度也增大.

## 5 讨 论

电子学全息方法省去了传统的干版全息中必需的曝光、显影、定影、漂洗、干燥等一系列处理过程, 简化了再现过程; CCD 芯片具有很高的量子效率, 很适合于微弱信号的记录, 只需要较低的功率. 重要的是, 这种方法可以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. 另外, 这种方法采用了全息技术, 通过解调再现得到再现像的复振幅分布, 因此在图像处理时不仅可以处理图像的强度, 还可以处理图像的复振幅, 这一点是其它成像技术所不具有的.

但是由于 CCD 分辨率很低, 影响了图像的质量, 限制了系统的分辨率. 尽管目前已有几千乘几千像素的面阵 CCD, 但是还将受到计算机的存贮能力和运算能力的限制, 随着像素数的增加, 图像采集时间和全息图解调时间大大增加, 给实际应用带来一些困难. 另外, 目前飞秒激光器的效率很低, 高能耗, 低输出, 系统成本和使用费用都很高, 给该技术的应用也带来了一些限制.

该技术的研究虽然得到了一些结果, 但是对高散射介质还应设法提高探测深度, 同时又要有一定的分辨率. 目前的研究还没有涉及到层析问题, 为了将来的应用, 这个问题是必须解决的一个课题.

总之, 尽管存在一些问题, 超短脉冲激光电子学全息方法透过高散射介质成像还是有它的优势, 随着超短脉冲激光技术、CCD 技术、计算机技术和信号处理技术的发展, 这种成像技术必将有着很好的发展前景.

衷心感谢中国科学院西安光机所的王国志研究员及成铎同志的有益的讨论和提供的帮助.

## 参 考 文 献

- [1] Wang L, Ho P P, Liang X *et al.*. Kerr-Fourier imaging of hidden objects in thick turbid media. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 241~ 243
- [2] Yoo K M, Xing Qirong, Alfano R R. Imaging objects hidden in highly scattering media using femtosecond second-harmonic-generation cross-correlation time gating. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(13): 1019~ 1021
- [3] Hebden J C, Kruger R A, Wong K S *et al.*. Time resolved imaging through a highly scattering medium. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7): 788~ 794
- [4] Chen H, Chen Y, Dilworth D *et al.*. Two dimensional imaging through diffusing media using 150 fs gated electronic holography techniques. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7): 487~ 489
- [5] Chen H, Shih M, Arons E *et al.*. Electronic holographic imaging through living human tissue. *Appl.*

*Opt.*, 1994, **33**(17) : 3630~ 3632

- [6] Leith E, Chen H, Chen Y *et al.*. Electronic holography and speckle methods for imaging through tissue using femtosecond gated pulses. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(29) : 4204~ 4210
- [7] Yoo K M, Alfano R R. Time-resolved coherent and incoherent components of forward light scattering in random media. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(6) : 320~ 322
- [8] 周新伦, 柳 健, 刘志华. 数字图像处理. 北京: 国防工业出版社, 1986. 128~ 129
- [9] Chen Ye. Characterization of the image resolution for the first-arriving-light method. *Appl. Opt.*, **33**(13) : 2544~ 2552

## Electronic Holography Using Ultrashort Laser-Pulse For Imaging Through Highly Scattering Media

Hou Bixue      Chen Guofu      Feng Shan      Wang Shuyan  
Wang Yishan      Hao Zhiqi

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

(Received 15 September 1997; revised 4 January 1998)

**Abstract** According to the principle of electronic holography using ultrashort laser-pulse for imaging through highly scattering media, an electronic holography system is established which is suitable for imaging through highly scattering media. This system consists of CCD camera, imaging processor and program of the system for numerical reconstructing and image process. Using this system, an image of metal wire with diameter of 0.65 mm has been obtained, through a 12 mm thick scattering liquid mixture of fresh milk and water. The volume ratio of fresh milk and water is 5%. The demand of this technique on pulse-width is analyzed.

**Key words** highly scattering media, image, electronic holography.