

文章编号: 1001-3806(2004)05-0482-03

离轴数字全息记录条件的研究

袁操今, 钟丽云, 王艳萍, 吕晓旭, 钱晓凡
(昆明理工大学 激光所, 昆明 650051)

摘要: 用振幅全息和菲涅耳衍射理论, 分析离轴数字全息记录系统结构参数对数字全息再现的影响, 并进行相应的实验验证。理论分析和实验研究结果都表明, 如果记录物体和 CCD 的尺寸固定, 记录物体和 CCD 之间的记录距离将直接影响数字全息再现像的分离状况和系统的分辨率, 在保证再现像分离的前提下, 缩短物体和 CCD 之间的距离将有利于数字全息再现像分辨率的提高。

关键词: 离轴数字全息; 记录距离; 菲涅耳全息; 分辨率

中图分类号: TB877 **文献标识码:** A

The analysis of off-axis digital holographic recording conditions

YUAN Caorjin, ZHONG Lìyun, WANG Yanping, Lǚ Xiǎoxu, QIAN Xiaofan
(Institute of Laser, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract By utilizing the theories of Fresnel diffraction and amplitude holography, the effects of configuration parameters on the numerical reconstruction of off axis digital holographic recording system are analyzed and the corresponding experiment is operated. The results of theoretical analysis and experiment show: if the sizes of recorded object and CCD are fixed, the distance between the recorded object and CCD has a direct impact on the resolution of the system and the separation of the three images in reconstruction plane. If the premise of separation status of the reconstructed images is satisfied, shortening the distance between the object and CCD redounds to improving the resolution of reconstructed image.

Key words: off axis digital holography; recording distance; Fresnel holography; resolution

引 言

数字全息术是一种新的成像技术^[1], 它继承了传统光学全息的基本思想, 但对全息图的记录、存储和再现手段进行了变革, 用数字光敏器件取代传统记录材料全息干版, 用离散傅里叶变换处理代替光学衍射来实现所记录波前的数字再现。

数字全息的理论早在 20 世纪 70 年代就由顾德曼提出, 但由于当时计算机发展水平和数字光敏器件的性能所限, 多年来一直没有太大的发展。直到 90 年代后期, 随着计算机技术的进步和高质量电荷耦合成像器件 CCD 的出现, 这方面的研究工作才逐渐增多, 目前已被用于光纤、微电路、形变测量、振动

测量、生物粒子监视、构件缺陷检测等一系列领域^[2~7]。

由于离轴数字全息的再现实像不受虚像和零级像的干扰, 所以, 在数字全息技术的发展和应用中具有独特的优势。但与传统的全息记录介质相比, 一方面, 目前记录数字全息图的 CCD 像素尺寸大, 从而使再现像的分辨率降低, 像质较差; 另一方面, 由于 CCD 记录面的尺寸有限, 使记录的参物光夹角小, 只能记录物体空间频谱中的低频部分, 故只适应于小物体、远距离记录, 从而使再现像面散斑尺寸增大, 横向分辨率也降低。作者用振幅全息和菲涅耳衍射理论, 分析了离轴数字全息记录系统结构参数对数字再现像的分离和分辨率的影响, 并有针对性地提出一些相应的解决办法。

1 数字全息记录和再现的基本原理

数字全息的记录光路和传统的振幅全息是相同的, 图 1 是数字全息记录和再现系统的坐标变换示意图。设被记录的物体位于 $x\sigma y_0$ 平面, 记录全息图

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目
(2002F0030M)

作者简介: 袁操今(1981), 女, 硕士研究生, 研究方向是数字全息技术。

E-mail: 13099922879@yn133165.com

收稿日期: 2003-09-28

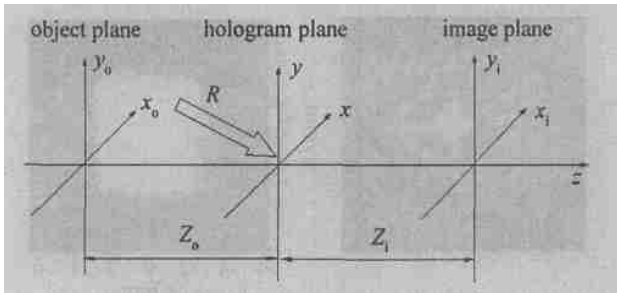


Fig. 1 Recording and reconstructing coordinates of the off axis digital hohgram

的 CCD 光敏面位于 $x-y$ 平面, 再现像位于 x_i-y_i 平面, CCD 记录面与物平面和再现像平面的距离分别为 Z_0 和 Z_i 。

当位于 x_0-y_0 平面的物光场分布为 $O(x_0, y_0)$, 并满足菲涅耳衍射条件时, 经菲涅耳衍射公式计算, CCD 记录面上的物光场分布为:

$$O(x, y) = \frac{\exp(jkZ_0)}{jkZ_0} \exp\left[j\frac{k}{2Z_0}(x^2 + y^2)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} O(x_0, y_0) \exp\left[j\frac{k}{2Z_0}(x_0^2 + y_0^2)\right] \times \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda Z_0}(xx_0 + yy_0)\right] dx_0 dy_0 \quad (1)$$

为简单起见, 假设参考光 R 为平面波, 其在 $x-y$ 平面上的光场分布则为:

$$R = A_R \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(x \cos\theta_{Rx} + y \cos\theta_{Ry})\right] \quad (2)$$

式中, A_R 为振幅, λ 为激光波长, θ_{Rx} 和 θ_{Ry} 分别为传播方向与 x 轴和 y 轴的夹角。参物光叠加后的全息图光强分布为:

$I(x, y) = |O + R|^2 = R^2 + O^2 + R^*O + O^*R$
数字全息的再现与传统全息的光学再现不同, 它是通过计算机模拟一束再现光 $C(x, y)$ 照射到全息图上, 再将 (3) 式代入离轴全息的菲涅耳再现公式进行数字再现^[6], 从而得到所记录物体的再现像分布 $\phi(x_i, y_i)$, 即:

$$\phi(x_i, y_i) = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) C(x, y) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda Z_i}(xx_i + yy_i)\right] dx dy \quad (4)$$

式中, $\phi(x_i, y_i)$ 是 $z = Z_i$ 处再现光场的复振幅, 其模平方 $|\phi(x_i, y_i)|^2$ 表示被记录物体的亮度信息, 相位表示被记录物体的表面轮廓信息。

2 离轴数字全息拍摄参数的选择

2.1 满足采样和再现光场分离的记录条件

图 2 是离轴数字全息的记录光路结构示意图, 其中 Z_0 是物体至 CCD 的距离, CCD 阵列面的尺寸为 $L_{x\text{CCD}} \times L_{y\text{CCD}}$, $L_{x\text{obj}}$ 和 $L_{y\text{obj}}$ 分别是物体的长和宽, b 是物体中心到 CCD 中心法线的距离, $\theta_{OR\text{max}}$ 是参考光与物光的最大夹角, P_1, P_2, P_3 和 P_4 分别是物体和 CCD 上的边缘。为简单起见, 下面仅讨论 $x-O-z$ 平面内的情况。

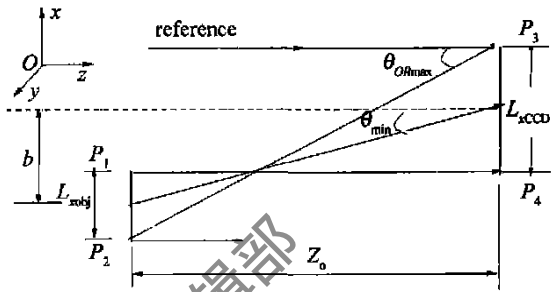


Fig. 2 Digital recording mechanism of the off axis setup

为了保证抽样定理(Nyquist 定理)的前提条件, 物光和参考光的干涉场强度分布的最大空间频率就应小于 CCD 记录条纹的空间频率。当 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ 时, $\theta_{OR\text{max}} \approx 1^\circ$, 那么就存在一个 $Z_{0\text{min}}$ 使物光和参考光之间的夹角小于 $\theta_{OR\text{max}}$ 。当 $\theta_{OR\text{max}}$ 很小时, 根据图 2 所示几何关系, 有:

$$Z_{0\text{min}} = \frac{L_{x\text{CCD}} + L_{x\text{obj}} + 2b}{2\theta_{OR\text{max}}} \quad (5)$$

同时根据再现像的分离条件, 为使孪生像和零级像分开, 物体与 CCD 法线之间应有一个偏角, 这个角度的最小值为:

$$\theta_{\text{min}} = \sin^{-1}(3W_x \lambda) \quad (6)$$

式中, λ 是波长, $W_x = L_{x\text{obj}}/(2Z_0)$ 是物光在 x 方向的最高空间频率。若 θ_{min} 很小并且物体的一边平行于 x 轴, 则:

$$\theta_{\text{min}} \approx \frac{3L_{x\text{obj}}}{2Z_0} \quad (7)$$

根据几何关系, $b = \theta_{\text{min}} Z_{0\text{min}}$, 结合(7)式, (5)式即可表示为:

$$Z_{0\text{min}} = \frac{L_{x\text{CCD}} + 4L_{x\text{obj}}}{2\theta_{OR\text{max}}} \quad (8)$$

(8) 式为满足记录采样和再现像分离的数字全息的最小记录距离, 即如果记录物体和 CCD 的尺寸固定不变, 只要记录距离大于 $Z_{0\text{min}}$, 离轴数字全息再现光场的 3 个部分是完全分离的。

2.2 数字全息的分辨率与记录距离的关系

目前, 数字全息主要应用于微观测量领域, 其系统分辨率是非常重要的评价指标。根据菲涅耳全息理论, 数字全息再现像分辨率可定义为^[8]:

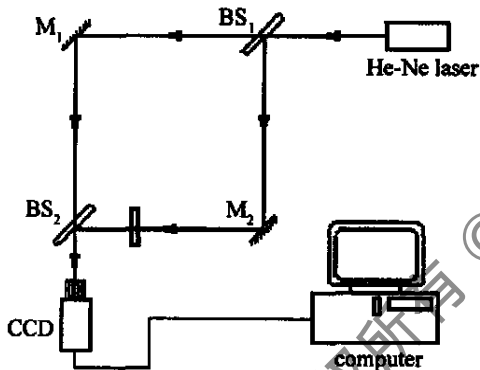
$$\sigma = \lambda Z_i / L_{\text{CCD}} \quad (9)$$

式中, λ 为再现光波长, Z_i 为再现像平面与 CCD 记录面之间的距离, L_{CCD} 为 CCD 光敏面的尺寸。为了避免再现畸变, 一般情况下使 λ 等于记录波长, 并让再现距离与记录距离相等即 $Z_o = Z_i$ 。

一般来说, CCD 的光敏面尺寸是固定不变的, λ 也是定值, 那么, 再现像的分辨率 σ 就只与记录距离 Z_o 有关, 且与之成正比, 当 Z_o 越小, 数字再现像的分辨率就越高。如前(8)式所述, 满足记录采样和再现分离的 Z_o 有一个最小值, 让记录距离大于但尽可能接近最小值 Z_{omin} 是提高数字全息分辨率的一个有效途径。虽然, 目前国际上也已开始尝试用合成孔径的方法即增大记录光敏面的尺寸 L_{CCD} 来提高分辨率^[9], 但此方法应用起来还比较繁杂。

3 实验及结果分析

为了进行上述讨论的实验验证, 下面采用如图 3 所示的光路进行实验, 其中准直后的 He-Ne 激光



经分束镜 BS_1 后分为两束, 其中一束通过反射镜 M_2 后直接照射到物体上, 另一束通过反射镜 M_1 反射作为参考光, 两束光通过分束镜 BS_2 后照射到 CCD 芯片上记录离轴全息图。用于实验记录数字全息图的 CCD 是卸去镜头的 MTV-1802CB 摄像头, 像素数为 $795(H) \times 596(V)$, 像素大小为 $0.0100\text{mm} \times 0.0108\text{mm}$, 数字全息图的大小为 $5.12\text{mm} \times 5.54\text{mm}$; 被记录的物体是“十字叉”图案的黑白胶片, “十字叉”的尺寸为 $1.924\text{mm} \times 1.723\text{mm}$, 线宽为 0.149mm 。根据(8)式计算最小记录距离为 204mm 。

图 4、图 5 和图 6 分别给出在其它记录条件不变的情况下, 记录距离分别为 200mm , 260mm 和 660mm , 实验所记录的“十字叉”数字全息图(图 a)和再现光场图(图 b)。在图 4 中, 由于记录距离小于最小记录距离 204mm , 虽然在零级衍射像的右侧

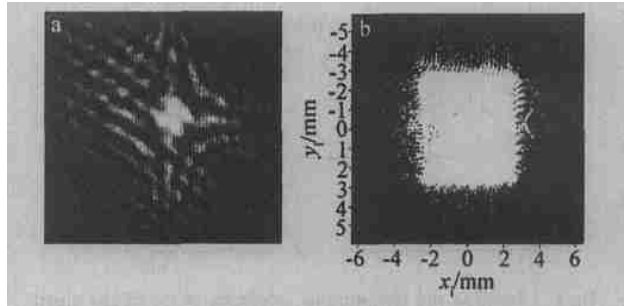


Fig. 4 a—experimental digital hologram of the cross frame at $Z_o = 200\text{mm}$ b—digital reconstructing image

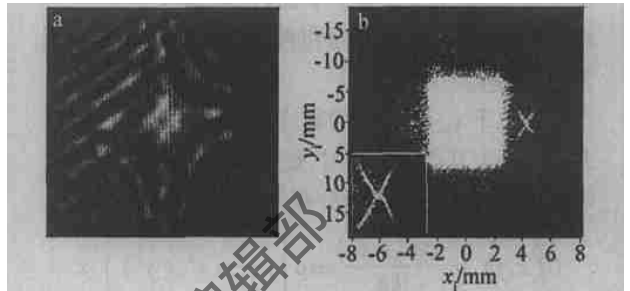


Fig. 5 a—experimental digital hologram of the cross frame at $Z_o = 260\text{mm}$ b—digital reconstructing image

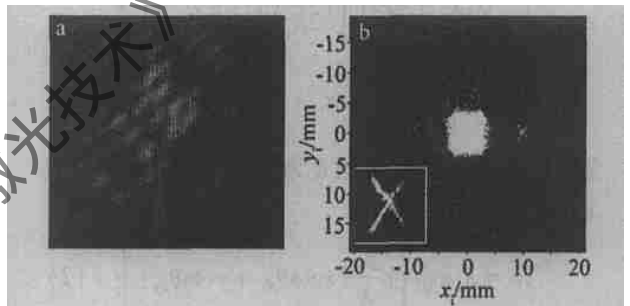


Fig. 6 a—experimental digital hologram of the cross frame at $Z_o = 660\text{mm}$ b—digital reconstructing image

能看到半个实像, 但再现光场图(见图 4b)所示的 3 个再现像不能完全分开, 严重影响数字再现像的分辨率; 当记录距离增大至 260mm , 再现光场(如图 5b 所示)的 3 个再现像完全分离, 从左下角给出的放大实像可以看出, 再现像的边缘轮廓清晰, 对比度好, 经测量再现实像的尺寸为 $1.9861\text{mm} \times 1.7714\text{mm}$, 与原物的误差约为 3% , 线宽为 0.161mm , 略有展宽; 随着记录距离进一步增大至 660mm 时, 比较图 4a、图 5a 和图 6a 可以看出, CCD 所记录到干涉场中的高频信息逐渐减小。再现光场(如图 6b 中)的再现像的边缘模糊, 对比度下降, 部分细节变得难以辨认, 通过测量得到再现像的尺寸为 $2.0323\text{mm} \times 1.8487\text{mm}$, 与原物相比误差约为 7% , 再现像的线宽已经由物体的 0.149mm 展宽到了 0.326mm 。

从上面的分析可以看出, 数字全息记录系统结构参数直接影响数字全息的再现质量, 在记录物体

(下转第 538 页)

测出光束实际形状与理想平面波之间的差别,然后通过由计算机控制的众多致动器使变形镜表面的小单元产生微小的位移,以校正光的畸变,从而获得高品质的激光输出。

3 结束语

作为第2代战术激光武器的候选者之一,二极管抽运固体热容激光器具有光明的应用前景,其要达到100kW级输出,技术上并不存在大的障碍。最终应用的关键是激光二极管的成本要降下来,100kW固体热容激光器需要400kW的抽运光功率(25%的光-光效率),以目前固体激光器激光二极管的成本为20美元/W,仅激光二极管的总成本就达800万美元,军方难以承受,若降到1美元/W,则激光二极管的总成本40万美元。

我国有关方面应重视二极管抽运固体热容激光器的发展,尽早开展二极管抽运固体热容激光器的基础与应用研究工作,并安排相关的大功率、高占空比激光二极管阵列研制和高光束质量、大尺寸Nd:GGG晶体的生长技术的攻关。

(上接第484页)

和CCD的尺寸固定不变的情况下,通过控制记录距离来达到提高分辨率是一种既实用又简捷的途径。

另外,在实验中也发现,由于照明光场的不均匀性、物光衍射光场的调制和CCD动态范围的影响,再则参考光也不可能是理想的准直光,所以导致再现图像的部分畸变,影响系统的测量精度,同时由于CCD记录面的尺寸有限,使记录的参物光夹角小,只能记录物体空间频谱中的低频部分,从而会丢失包含物体边缘的高频部分信息,使物体边界变得模糊,最终导致测量系统误差增大。

参 考 文 献

- [1] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formulation from electronically detected hologram [J]. A P L, 1967, 11(3): 77~79.
- [2] ADAMA M, KREIS T, JUPTNER W. Partical size and position

参 考 文 献

- [1] PARKER A. World's most powerful solid state laser [J]. S & TR, 2002(10): 8~9.
- [2] PARKER A. Bright future for compact tactical laser weapons [J]. S & TR, 2002(4): 19~21.
- [3] ALBRECHT G, GEORGE E V, KRUPKE W F *et al.* High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. U S Patent: 5526372, 1996-06-11.
- [4] ROTTER M, DANE C B. A 10kW solid state heat capacity laser system installed at HELSTF white sands missile range [J]. Laser Science & Technology, 2001(12): 1.
- [5] ROTTER M, MITCHELL S. Diode pumped Nd:GGG laser- first light [J]. Laser Science & Technology, 2002(12): 1.
- [6] YAMAMOTO B, ROTTER M, MITCHELL S *et al.* First light from battery powered solid state heat capacity laser for missile defense [J]. Laser Science & Technology, 2003(4): 1.
- [7] HEWISH M. Solid state lasers break out of the lab [J]. Jane's International Defense Review, 2003, 36(2): 20~22.
- [8] 任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来 [J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 211~217.
- [9] ALBRECHT G T, SUTTON S B, GEORGE E V *et al.* The heat capacity disk laser [J]. SPIE, 1998, 3343: 661~666.
- [10] HECHT J. Solid state high energy laser weapons [J]. Optics & Photonics News, 2003(1): 42~47.

measurement with digital holography [J]. Proc SPIE, 1997, 3098: 234~240.

- [3] YAMAGUCHI I, ZHANG T. Phase shifting digital holography [J]. Opt Lett, 1997, 22(16): 1268~1270.
- [4] MARQUARDT E, RICHER J. Digital image holography [J]. Opt Engng, 1998, 37(5): 1514~1519.
- [5] CUCHE E, BEVILACCAQUA F, DEPEURSING C. Digital holography for quantitative phase contrast imaging [J]. Appl Opt, 1999, 38: 6994~7001.
- [6] CUCHEE, MARQUET P, DEPEURSING C. Spatial filtering for zero order and twin image elimination in digital off axis holography [J]. Appl Opt, 2000, 39(23): 4070~4075.
- [7] XU L, MIAO J M, ASUNDL A. Properties of digital holography based on in line configuration [J]. Opt Engng, 2000, 39(12): 3214~3219.
- [8] 于美文, 张静方. 光全息术 [M]. 北京: 北京教育出版社, 1995. 63~65.
- [9] leCLERC F, GROSS M, COLLO L. Synthetic aperture experiment in the visible with on axis digital heterodyne holography [J]. Opt Lett, 2001, 26: 1550~1552.