

一种消除数字离轴全息零级像的实验方法*

吕且妮 葛宝臻 张以谟

(天津大学精仪学院、光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要 提出一种消除数字离轴全息零级像的实验方法. 这种方法是将全息衍射光栅作为分光元件, 形成数字离轴全息记录系统, 通过调节记录光路系统中平面镜, 改变物光波到达 CCD 的入射方向而引入相移, 从而得到不同记录参数的全息图. 再通过对不同记录参数全息图的数字处理, 即可达到零级像消除的目的, 并对这种方法进行了理论分析和实验验证. 给出了利用这种方法获得的实验结果. 实验结果证明了该方案的可行性, 并且具有光路系统简单、操作和处理容易等特点.

关键词 数字离轴全息术; 数字再现; 零级像消除

中图分类号 TB877.1 **文献标识码** A

0 引言

随着计算机和 CCD 的发展, 全息图的数字记录和数字再现已成为可能, 并应用于科学、工程等领域, 如粒子场测试^[1,2], 形变测量^[3,4], 全息显微术^[5-7]等. 在数字离轴全息领域, 目前有两种类型的方法用于消除零级像: 一类是基于光学信息处理技术而提出的数字处理方法, 如 E Cuch^[8] 提出利用频域滤波方法消除零级像和共轭像. 文献[9]提出利用空域滤波数字处理方法消除零级像. 另一类消除零级像和共轭像的方法是基于实验方案, 如 Y Takaki^[10] 利用快门和相位调制器消除零级像和共轭像, 这种方法其实质上是基于相移技术. 本文提出另一种消除零级像的实验方法. 全息衍射光栅作为分光元件, 形成全息记录系统, 通过调节反射镜来改变物光波入射方向而引入相移, 从而得到不同记录参数的数字全息图. 再通过对不同记录参数全息图的数字处理实现零级像的消除. 这种方法完全是一种数字方法, 并不需要其它辅助的相移器材, 而且实验系统简单, 操作容易.

1 全息图的数字记录和数字再现

图 1 为数字离轴全息记录光路系统. 平面平行光波通过低频全息衍射光栅, 经光栅衍射, 产生三个不同衍射方向的平面平行光, 即 0 级, ±1 级衍射光. 零级衍射光作为参考光垂直入射到 CCD 记录靶面. 设投射到 CCD 上的参考光为 $r(x, y) = R$; +1 级衍射

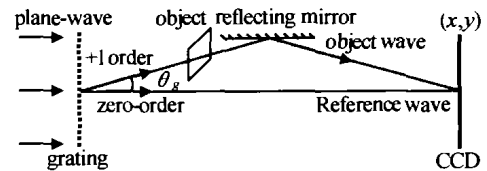


图 1 数字离轴全息记录系统的光路图

Fig. 1 Schematic diagram of the recording system of off-axis hologram

光照射物体, 经平面镜反射到达 CCD 记录靶面. 设投射到 CCD 上的物光波为 $O(x, y) = |O(x, y)| \cdot \exp j\theta(x, y)$, 则记录在 CCD 上的干涉场的分布为

$$I(x, y) = |O(x, y)|^2 + R^2 + R|O(x, y)| \cdot$$

$$\exp j\theta(x, y) + R|O(x, y)| \exp [-j\theta(x, y)] \quad (1)$$

式中 $|O(x, y)|^2$ 表示物光波的强度分布, R^2 表示参考波的强度分布, 第三项和第四项为干涉项, 其数字化的全息图为

$$I(k, l) = I(x, y) \text{rect} \left(\frac{x}{M\Delta x}, \frac{y}{N\Delta y} \right) \sum_{k=-M/2}^{M/2} \sum_{l=-N/2}^{N/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (2)$$

利用离散化的菲涅耳衍射公式对式(2)进行数字计算, 再现实像面上的光场复振幅分布为

$$u(m, n) = \frac{\exp j \frac{2\pi d}{\lambda}}{j\lambda d} \exp \left[\frac{j\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta x^2 + n^2 \Delta y^2) \right] \times$$

$$\text{FFT} \{ I(k, l) \exp j \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2) \} \quad (3)$$

式中 k, l, m, n 为整数, $m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N-1; \Delta x, \Delta y$ 表示 CCD 象素尺寸; $\Delta x', \Delta y'$ 表示再现像面上象素尺寸; $\Delta x, \Delta y$ 与 $\Delta x', \Delta y'$ 间的关系为 $\Delta x' = \lambda d / M\Delta x, \Delta y' = \lambda d / N\Delta y$, FFT 表示快速傅里叶变换. 式(3)中含有三项: 零级像项、原始像项、共轭像项.

2 零级像的消除

在式(1)中, 右边的前两项在再现像中将形成

* 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金资助项目(51480030203ZW0803)和国家自然科学基金资助项目(No. 60077028)

Tel: 022-27402594 Email: qienil@sohu.com

收稿日期: 2004-01-16

直透项,即零级像. 因此,为了消除零级像项,必须消除这两项. 在图 1 的实验系统中,通过调节反射镜,改变物光波的入射方向,可以达到消除零级像的目的. 不失一般性,设调节反射镜后的物光波分布表达式为 $O'(x,y) = |O'(x,y)| \times \exp j\theta'(x,y)$, 则记录在全息图上的干涉场的强度分布为

$$I'(x,y) = |O'(x,y)|^2 + R^2 + R|O'(x,y)| \cdot \exp j\theta'(x,y) + R|O'(x,y)| \exp [-j\theta'(x,y)] \quad (4)$$

将式(4)与式(1)相减,得

$$\Delta I(x,y) = \{|O(x,y)|^2 - |O'(x,y)|^2\} + R\{|O(x,y)| \exp j\theta(x,y) - |O'(x,y)| \exp j\theta'(x,y)\} + R\{|O(x,y)| \exp [-j\theta(x,y)] - |O'(x,y)| \exp [-j\theta'(x,y)]\} \quad (5)$$

在式(5)中, $\{|O(x,y)|^2 - |O'(x,y)|^2\}$ 表示物光波的残余项. 若 $\theta'(x,y) \neq \theta(x,y)$, 则 $\Delta I(x,y) \neq 0$. 将 $I(k,l)$ 代入式(3)进行数字再现即可得到再现像的光场分布.

当 $|O(x,y)| - |O'(x,y)| \neq 0$, 则 $u(m,n)$ 中含有五项: 式(5)中的第一项再现后形成零级衍射像; 第二项再现后形成两个虚像 RO 和 RO' ; 第三项再现后形成两个原始实像 RO^* 和 RO'^* .

当 $|O(x,y)| - |O'(x,y)| = 0$, 则式(5)可以表示为

$$\Delta I(x,y) = RO(x,y)\{1 - \exp j\Delta\theta(x,y)\} + RO^*(x,y)\{1 - \exp [-j\Delta\theta'(x,y)]\} \quad (6)$$

式中 $\Delta\theta(x,y) = \theta'(x,y) - \theta(x,y)$, 则 $u(m,n)$ 中含有四项: 分别为两个虚像项 RO 、 RO' 和两个实像项 RO^* 、 RO'^* .

若 $\Delta\theta(x,y)$ 为一常数, 即两个相减全息图之间相差一常数相位差, 则式(6)中的 $\{1 - \exp j\Delta\theta(x,y)\}$ 和 $\{1 - \exp [-j\Delta\theta'(x,y)]\}$ 为一常数系数, 这时式(6)中仅含有 RO 和 RO^* 两项, 这相当于在物光波中引入常数相移.

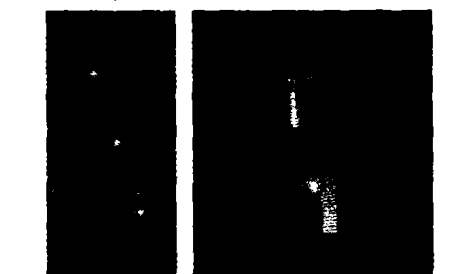
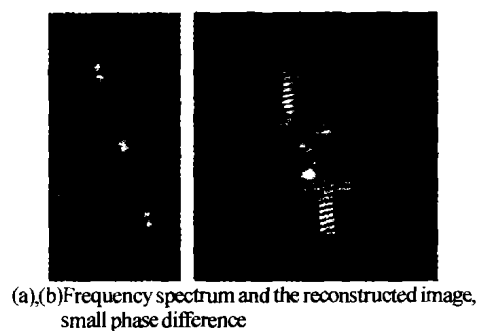
由于两个相减全息图之间存在着相位差, 故再现像中的两个实像之间干涉, 同样两个虚像之间也发生干涉. 干涉条纹间距取决于相位差的大小, 相位差越大, 条纹越密.

3 实验结果与分析

按图 1 所示的光路系统搭建了实验装置. 实验所用的激光器为波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 最大输出功率为 10 mW 的 He-Ne 激光器, 经扩束准直系统, 变为直径为 25 mm 的平行光束. 实验所选的物体为一写在不透明片上的透明字母“T”, 字母的大小为 $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 记录距离为 685 mm . 实验所用的 CCD 为 DALSA 1M30Camera, 敏感像素数为 $1024 \times$

1024 , 像素尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. 图 2(a) 为两个全息图相减后的反差全息图的频谱图, 位于中间的为两个全息图相减后物光波残余项的频谱, 即为 $F\{|O(x,y)|^2 - |O'(x,y)|^2\}$, F 为傅里叶变换, 两边的分别为正负一级频谱. 图 2(b) 为这两个数字全息图相减后的反差全息图的数字再现像. 位于图 2(b) 中间的为相减后物光波的残余项再现后形成的零级像. 它是强度量, 因此不发生干涉, 这一成像方式相当于普通照相机成像. 位于零级像下面的为实像, 上面的为虚像. 由于两个全息图之间存在相位差, 因而在实像和虚像上均看到了干涉条纹, 如图 2(b). 另外, 从频谱图 2(b) 中可以看出, 调节平面镜后, 物体仅仅在一个方向上有平移. 因此, 设投射到 CCD 上的物光波为 $O(x,y) = |O(x,y)| \cdot \exp j2\pi x \sin \theta / \lambda$. 调节反射镜后, 投射到 CCD 上的物光波为 $O'(x,y) = |O'(x,y)| \exp j2\pi x \sin \theta' / \lambda$. 则物体两次平移产生的相位差为 $\Delta\varphi(x,y) = 2\pi x[\sin \theta' - \sin \theta] / \lambda$. 由于平面镜的调节角度很小, 则两个全息图之间的相位差可以表示为 $\Delta\varphi(x,y) \approx 2\pi dx \cos \theta / (\lambda L)$, 式中 d 为平面镜沿 x 方向移动的距离, L 为平面镜两个螺母之间的间距.

图 2(c) 为另两个数字全息图相减后的频谱图, 图 2(d) 为这两个数字全息图相减后的反差全息图的再现像. 从图 2(d) 中可以看出, 零级像基本消除. 与图 2(b) 相比, 图 2(d) 干涉像中的条纹很密, 这就表明两个相减全息图之间的相位差很大. 这一点也可以从图 2(a) 和图 2(c) 的频谱图中看出, 图 2(c)



(a),(b) Frequency spectrum and the reconstructed image, small phase difference

(c),(d) Frequency spectrum and the reconstructed image, big phase difference

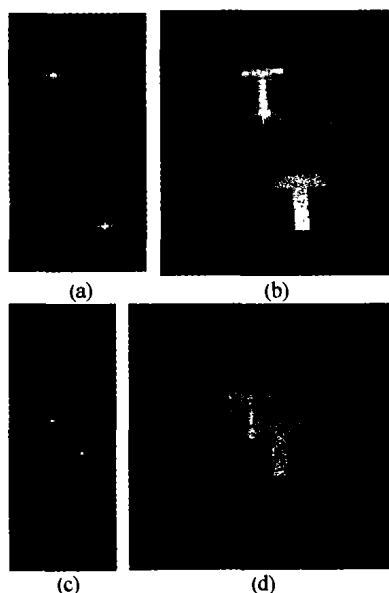
图 2 两个全息图相减后的反差全息图的 2D 傅里叶变换谱及其数字再现像

Fig. 2 The 2D fourier spectrum and numerically reconstructed image of subtracted hologram

中的两个全息图之间的频移大于图2(a)中的频移. 同时图2(d)中的实验结果表明,两个全息图相减可以达到消除零级像的目的.

图3(a)为两个数字全息图相减后的频谱图,位于频谱图中心的零级谱已经消除,这表明两个相减全息图中的物光波振幅相等,即 $|O(x,y)| = |O'(x,y)|$. 因此,两个全息图相减后,零级项减掉,在频谱图中已不含零级谱. 图3(b)为这两个数字全息图相减后的反差全息图的再现像. 从图3(b)中可以看出,位于中间的零级像已经消除,而且显示在图3(b)中的再现实像和虚像非常清楚,看不到干涉条纹. 同时从图3(a)中看不到这两个全息图之间的频移,这就意味着图3(a)中的频谱项只有两项 RO 、 RO^* ,其再现像中只含有实像项和虚像项,这一点已在图3(b)中得到证实. 这就表明,两个相减全息图的相位相差一常数相位因子,即相位差 $\Delta\theta(x,y)$ 为常数. 对于相位差为常数的两个全息图相减,再现像中只含有两个像:实像和虚像,这一实验结果与式(6)理论描述相符. 可以说两个常数相位差的全息图相减,可以实现零级像的消除,这正是我们所感兴趣的结果,这一结果具有实际性的意义.

图3(c)和图3(d)为不同两个数字全息图相减后的频谱图及其再现像.



(a),(c)The 2D fourier spectrum;(b),(d)The reconstructed image, the spatial frequencies in (a),(b)are higher than in (c),(d)

图3 零级像消除的实验结果

Fig.3 The experimental results of the zero-order image elimination

4 结论

理论分析和实验结果表明,用本文提出的零级像消除方法可以达到消除零级像的目的,且去除效果满意. 由于零级像的消除,从而增强了再现像的对比度,改善了再现像的像质. 这种方法完全是一种数字方法,并不需要其它辅助的相移器材,仅仅通过调节图1中的反射镜M来改变物光波入射方向而引入相移,得到不同记录参数的数字全息图,实现零级像的消除,并具有实验系统简单,操作容易等特点.

参考文献

- 1 Ge Baozhen, Lü Qieni, Zhang Yimo. Particle digital in-line holography with spherical wave recording. *China Opt Lett*, 2003, **1**(9):517 ~ 519
- 2 Murata S, Yasuda N. Potential of digital holography in particle measurement. *Opt Laser Technol*, 2000, **32**(8):567 ~ 574
- 3 Schnars U, Jüptner W. Digital recording and numerical reconstruction of holograms. *Meas Sci Technol*, 2002, **13**(9):R85 ~ R101
- 4 Wagner C, Seebacher S, Osten W, et al. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology. *Appl Opt*, 1999, **38**(22):4812 ~ 4820
- 5 Yamaguchi I, Kato J, Ohta S, et al. Image formation in phase-shifting digital holography and application to microscopy. *Appl Opt*, 2001, **40**(34):6177 ~ 6186
- 6 Cuhe E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms. *Appl Opt*, 1999, **38**(34):6994 ~ 7001
- 7 刘诚,刘志刚,薄峰,等. 数字全息中再现像分离问题的研究. *光子学报*, 2003, **32**(5):588 ~ 591
Liu C, Liu Z G, Bo F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):588 ~ 591
- 8 Cuhe E, Marquet P, Dpeursinge C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography. *Appl Opt*, 2000, **39**(23):4070 ~ 4075
- 9 刘诚,李银柱,李良钰,等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法. *中国激光*, 2001, **28**(11):1024 ~ 1026
Liu C, Li Y Z, Li L Y, et al. *China Journal of Lasers*, 2001, **28**(11):1024 ~ 1026
- 10 Takaki Y, Kawai H, Ohzu H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images. *Appl Opt*, 1999, **38**(23):4990 ~ 4996

An Experimental Method of Eliminating Zero-order Diffraction in Digital Off-axis Holography

Lü Qieni, Ge Baozhen, Zhang Yimo

College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering, Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2004-01-16

Abstract An experimental method of eliminating zero-order diffraction in the reconstructed image of off-axis digital holography is presented. Holographic diffraction grating acts as a beam splitter, and an off-axis holography system is formed. The holograms of object with different recording parameters are obtained by adjusting reflecting mirror in recording optical system to vary incidence orientation of the object beam in CCD to introduce phase shift. The zero-order image can be eliminated by numerically processed the hologram of object with different recording parameters. The theoretical analysis has been done in detail, and the experimental results are also given. The experimental results show that the method presented in this paper is feasible, simple in optical structure and easy in operation and data processing.

Keywords Digital off-axis holography; Numerical reconstruction; Eliminating zero-order diffraction



Lü Qieni was born in Shaanxi province in 1966. She graduated from the Physics Department of Shaanxi Normal University with M. S. in 2000 and from College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering of Tianjin University with Ph. D. in 2003. At present, she works in a post-doctorate mobile station with Tianjin University. Her research interests are optical information processing and digital holography.