

文章编号: 1001-3806(2012)05-0632-04

离轴数字全息零级像和共轭像的消除方法

侯瑞宁 闫友房

(陕西科技大学 理学院, 西安 710021)

摘要: 为了提高离轴数字全息图的再现像质量, 提出了一种消除离轴数字全息零级像和共轭像的方法。该方法通过对参考光进行一次 π 相移、记录两幅全息图, 对两幅全息图作差后进行傅里叶变换, 结合频谱滤波的方法用矩形窗函数从中滤出包含有物光波频率成分的频谱, 然后对其进行数字再现。结果表明, 在零级像和 ± 1 级像有重叠的情况下, 该方法能有效地消除零级像和共轭像的干扰, 有效提高再现像质量。

关键词: 全息; 数字全息术; π 相移技术; 频谱滤波

中图分类号: TB877.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.014

Elimination method of zero-order image and conjugate image of off-axis digital hologram

HOU Rui-ning, YAN You-fang

(College of Science, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the reconstructed image quality of off-axis digital hologram, an elimination method of zero-order image and conjugate image of off-axis digital hologram was presented. Based on reference light with a π phase shift and recording two holograms, Fourier transform was made for two subtracted holograms. Combined with spectral filtering method, the associated spatial frequencies was filtered out with rectangular window function. Then digital reconstruction was made. Experiments show that the method can eliminate the zero-order image and conjugate image even in the case that the zero-order image and others images overlap seriously, so the method can effectively improve the quality of reconstructed image in digital holography.

Key words: holography; digital holography; π phase shift; spectral filtering method

引言

GOODMAN 在 20 世纪 60 年代首次提出数字全息^[1], 其用 CCD 代替全息干版等全息记录介质记录全息图, 用计算机模拟光学衍射过程来进行再现, 从而实现了全息图记录、存储、处理及再现过程的数字化。离轴全息由于能实现 ± 1 级衍射像与零级像在空间上的分离而被重视, 但在对其进行数字再现时, 共轭像与零级像仍将对再现像造成干扰, 特别是零级干扰像由于占有绝大部分的光能量, 从而使真实像对比度下降, 不宜观察与测量。另一方面, 离轴全息对 CCD 的分辨率提出了更高的要求。因此, 如何较好地消除零级像和共轭像对真实像的影响, 并且最大限度地降低对 CCD 分辨率的要求, 成为离轴全息数字再现的主要研究课题。

一些文献中提出了些消除零级像和共轭像干扰的有效方法^[2-5], 比较常用的有如下几种: 其中基于相移方法^[6]的数字全息处理中, 需要用到 4 幅位相依次相差的参考光记录的全息图, 对记录的全息图进行数字相加处理后进行再现, 再现结果中零级像和共轭像能得到很好地消除, 但该方法需要精密的相移器来实现相移, 对实验装置要求较高; 用频谱滤波的方法^[7]和用拉普拉斯算符图像处理^[8]的方法再现全息像时, 通过对原始的数字全息图进行直接的数字处理, 部分消除零级衍射斑后可以提高再现像的质量, 但后两种方法适用于零级像和 ± 1 级像没有重叠的情况。

本文中结合相移技术和频谱滤波的方法, 提出一种消除离轴数字全息零级像和共轭像的方法, 该方法需一次相移, 记录两幅全息图, 对两幅全息图作差后进行傅里叶变换, 用矩形窗函数从中滤出包含有物光波频率成份的频谱, 数字再现时即可得到没有零级像和共轭像干扰的再现像。实验证明该方法不仅降低了系统的复杂性, 而且在零级像和 ± 1 级像有重叠的情况下, 也能有效地消除零级像和共轭像的干扰, 这就使得在光路不变的情况, 采用低分辨率的 CCD 进行记录成

作者简介: 侯瑞宁(1980-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光学信息处理方面的研究。

E-mail: hrm1999@163.com

收稿日期: 2012-01-13; 收到修改稿日期: 2012-02-29

为可能。

1 实验原理

1.1 一次相移数字全息原理

离轴数字全息记录光路如图 1 所示,平面 x_0-y_0 是物平面,平面 $x-y$ 是全息记录平面。在平面 x_0-y_0 处复振幅分布为 $o(x_0, y_0)$ 的物光波,向前传播距离 d 到达平面 $x-y$,根据菲涅耳近似条件,在平面 $x-y$ 处物光场分布为:

$$o(x, y) = \iint_{x_0, y_0} o(x_0, y_0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2d} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 = O(x, y) \exp[i\varphi_o(x, y)] \quad (1)$$

式中 $O(x, y)$ 、 $\varphi_o(x, y)$ 分别表示 $x-y$ 面处物光波的振幅和相位。

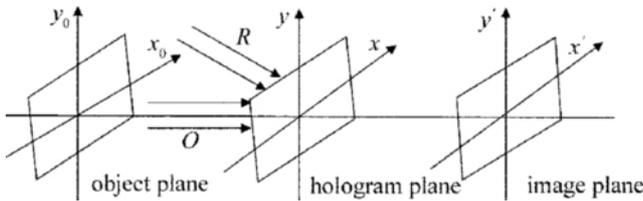


Fig. 1 Schematic diagram of the recording and reconstructing system of off-axis hologram

参考光选择为平面光波,波前表示为:

$$r(x, y) = R \exp[ik(x \sin \alpha + y \sin \beta)] \quad (2)$$

式中 R 表示参考光振幅, $\sin \alpha$ 和 $\sin \beta$ 为参考光波矢量的方向正弦。则通过 CCD 可以记录物光波和参考光波的干涉图样,其光强分布为:

$$I_1(x, y) = |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + o(x, y) r^*(x, y) + o^*(x, y) r(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R|^2 + O(x, y) R \times \exp\{-i[2\pi(xf_{0x} + yf_{0y}) - \varphi(x, y)]\} + O(x, y) R \exp\{i[2\pi(xf_{0x} + yf_{0y}) - \varphi(x, y)]\} \quad (3)$$

式中 $f_{0x} = \frac{\sin \alpha}{\lambda}$, $f_{0y} = \frac{\sin \beta}{\lambda}$ 。对(3)式表示的全息图进行数字再现,第 1 项与第 2 项合起来构成零级衍射斑,第 3 项与第 4 项分别表示物体的真实像与共轭像。若在上述参考光中引入 π 相移,则在全息记录平面上的光强分布为:

$$I_2(x, y) = |o(x, y)|^2 + |r(x, y)|^2 + o(x, y) r_1^*(x, y) + o_1^*(x, y) r_1(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R|^2 - O(x, y) R \times \exp\{-i[2\pi(xf_{0x} + yf_{0y}) - \varphi(x, y)]\} - O(x, y) R \exp\{i[2\pi(xf_{0x} + yf_{0y}) - \varphi(x, y)]\} \quad (4)$$

(3) 式减去(4)式得:

$$I(x, y) = 2o(x, y) r^*(x, y) + 2o_1^*(x, y) r(x, y) \quad (5)$$

对(5)式进行数字再现,即可得到没有零级像的再现像。

1.2 数字全息图的频谱特性及滤波原理

对上述(3)式记录的数字全息图进行傅里叶变换,得到其频谱分布为:

$$I_1(f_x, f_y) = I_0(f_x, f_y) + B(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + B^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}) \quad (6)$$

式中 $I_0(f_x, f_y)$ 是 $|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2$ 的傅里叶变换谱, $B(f_x, f_y)$ 表示 $O(x, y) R \exp[i\varphi(x, y)]$ 的傅里叶变换,* 表示共轭运算,物光波在 x, y 方向的空间频率可分别表示为:

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}, f_y = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (7)$$

$I_0(f_x, f_y)$ 位于频谱面的中心原点处,频谱宽度为 $4f_{x, \max} \cdot 4f_{y, \max}$ 。 $B(f_x, f_y)$ 和 $B^*(f_x, f_y)$ 的中心分别位于频谱面的 $(-f_{0x}, -f_{0y})$ 和 $(+f_{0x}, +f_{0y})$ 处,频谱宽度为 $2f_{x, \max} \cdot 2f_{y, \max}$ 。其中 $f_{x, \max}$ 、 $f_{y, \max}$ 分别表示物光在两个方向上的最高频率。

(1) 式表示的全息图再现时,实现诸像分离的条件是上述 3 个频谱相在频谱空间中必须相互完全分离^[8-10] 即:

$$f_{0x} \geq 3f_{x, \max} \text{ 且 } f_{0y} \geq 3f_{y, \max} \quad (8)$$

而对(5)式进行傅里叶变换,得到其频谱分布为:

$$I_1(f_x, f_y) = 2B(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) + 2B^*(f_x + f_{0x}, f_y + f_{0y}) \quad (9)$$

由(9)式可以看出,通过相移法作差消除零级衍射斑后,要实现 ± 1 级衍射像频谱的分离,参考光的空间频率需要满足:

$$f_{0x} \geq f_{x, \max} \text{ 且 } f_{0y} \geq f_{y, \max} \quad (10)$$

比较(8)式和(10)式可以发现,消除了零级衍射斑后,实现各个像分离所需要的物参光夹角仅为消除之前的 $\frac{1}{3}$,从而对 CCD 分辨率的要求大大降低了。

当(10)式能够满足时,可以通过频谱滤波的方法从(9)式中滤出包含物光波的频率成分,表示为:

$$2B(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y}) = \mathcal{F}\{2o(x, y) r^*(x, y)\} = I_1(f_x, f_y) \cdot w(f_x, f_y) \quad (11)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换, $w(f_x, f_y)$ 表示滤波窗口函数^[10]。滤波函数可以手工选择,确定滤波窗口的位置和大小,从而滤出 $2B(f_x - f_{0x}, f_y - f_{0y})$ 分量。比较常用的滤波窗口函数是矩形滤波窗口。

2 维矩形滤波窗口函数表达形式如下:

$$w(f_x, f_y) = \begin{cases} 1 & (f_{1x} < f_x < f_{2x}, f_{1y} < f_y < f_{2y}) \\ 0 & (f_x, f_y \text{ 为其它}) \end{cases} \quad (12)$$

式中 f_{1x} 和 f_{1y} 分别是 x 方向和 y 方向的频率最小值 f_{2x} 和 f_{2y} 分别是 x 方向和 y 方向的频率最大值。对 (11) 式进行逆傅里叶变换, 然后计算其菲涅耳衍射光场, 即可得到没有共轭像干扰的原物体的再现像。

2 实验及结果

实验中采用如图 2 所示的记录光路。光源选为 He-Ne 激光器, 波长为 632.8nm, 激光束经分束镜 BS_1 后分为两束, 一束被平面镜 M_2 反射, 反射光经透镜 2 准直后照射被记录物体, 另一束通过相移器, 经透镜 1

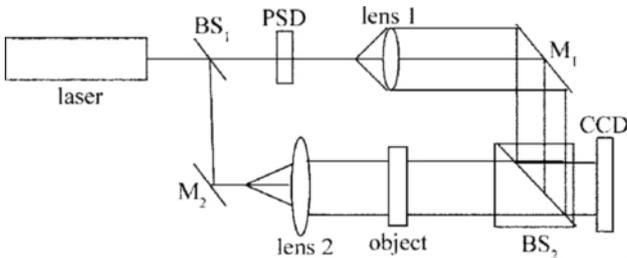


Fig. 2 Digital holographic recording setup, BS—beam splitting; PSD—phase shift device

准直后经反射镜 M_1 反射作为参考光, 最终物光与参考光经 BS_2 后到达 CCD 靶面, 形成离轴菲涅耳全息记录光路, CCD 和计算机连接。实验中所用的 CCD 为 DAL-SA1M30 Camera, 光敏面尺寸为 6.4mm × 4.8mm, 敏感像素数为 756 × 472。实验所选的物体为一写在不透明片上的透明汉字“大”, 汉字的大小为 0.6mm × 0.4mm, 物光波经 87cm 到达 CCD 平面。将 CCD 采集到的全息图依次存入计算机。实验过程中, 采用 $\lambda/2$ 波片作为相移器, 使参考光的相位改变 π 。首先使波片光轴与激光偏振方向一致, 拍摄相移前的数字全息图, 然后旋转波片, 使其光轴转过 90° , 参考光的相位将改变 π , 记录相移后的全息图。对记录的全息图先作频谱分析并直接进行数字再现, 结果如图 3 所示。再按照上述介绍的方法进行实验: 首先把相移前后的全息图作差后进行数字再现, 然后对差值进行傅里叶变换, 观察其频谱图, 用手动的方法找出包含有物光波的基频的位置和频谱宽度, 用 (12) 式确定出滤波窗口函数, 滤出该频谱, 然后进行数字再现。实验结果如图 4 所示。

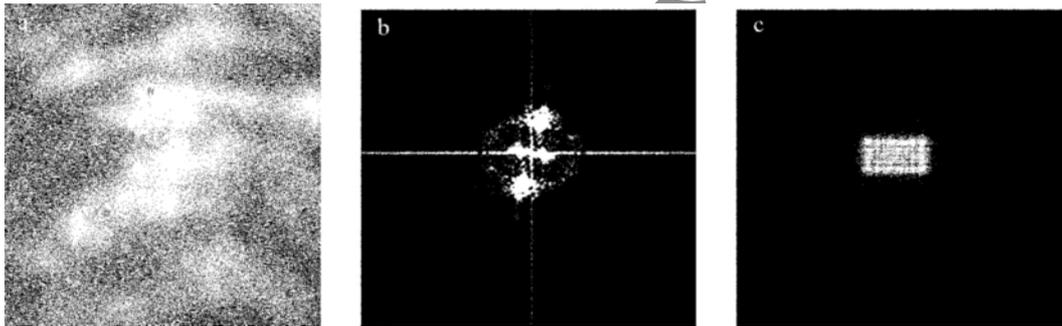


Fig. 3 Experimental results

a—the first acquired digital hologram b—the 2-D Fourier spectrum of Fig. 3a c—the intensity of the reconstructed object wave obtained from the numerical reconstruction of Fig. 3a

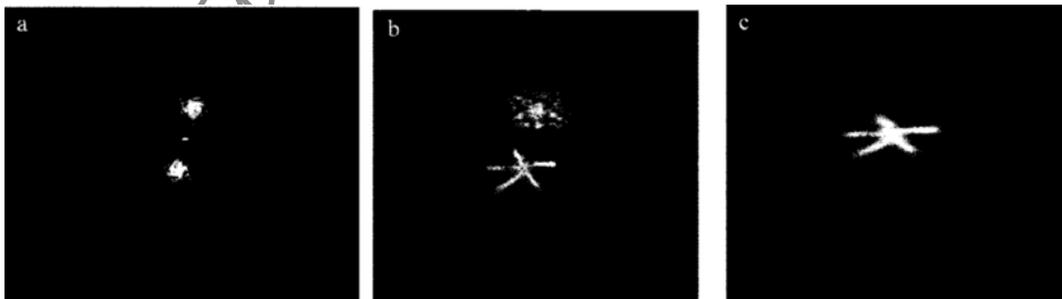


Fig. 4 Experimental results using the novel method

a—the 2-D Fourier spectrum of subtracted hologram b—the numerically reconstructed image of subtracted hologram c—the reconstructed image obtained by filtered hologram

图 3a 为实验中所记录的相移前的全息图。图 3b 为图 3a 数字计算的 2-D 傅里叶谱, 位于中间的为零级谱, 两边的分别为 ± 1 级谱。从频谱图中可知, 零级谱与 ± 1 级谱已经重叠。对图 3c 为图 3a 的全息图的再现结果, 从图中可以看出, 再现结果中包含有原始像、直透光和共轭像, 其中零级直透光能量较高, 占据的图

像面积较大, 原始像对比度较差, 细节辨认不清。而且零级像、原始像和共轭像已严重重叠。图 4a 为相移前后记录的数字全息图差值的频谱图, 从图中知零级频谱已被有效去除, 只剩余了互相分离的 ± 1 级谱。数字再现结果如图 4b 所示, 此时再现像中零级像得到有效消除, 再现像的对比度得到显著提高, 但还存在共轭

像的干扰。图4c为滤波后的再现像,图中只剩下了原始像,再现像的质量得到进一步改善。

3 结 论

采用相移前后所记录的数字全息图进行相减处理来进行再现,可以有效地消除再现结果中的零级像,然后利用频谱滤波的方法滤出包含有物光频率的频谱成分,再现后可以获得没有共轭像干扰的再现像。该方法可以有效地提高数字全息再现像的质量。该方法在零级像和 ± 1 级像有重叠的情况下也适用,在光路不变的情况下降低了对CCD分辨率的要求。

参 考 文 献

- [1] GOODMAN J W, LAWRENCE R W. Digital image formation from electronically detected holograms [J]. Applied Physics Letter, 1967, 11(3): 77-79.
- [2] ZENG R, ZHAO H F, LIU Sh T. Zero-order image elimination in digital holography by means of image processing [J]. Acta Photonica Sinica 2004, 33(10): 1229-1232(in Chinese).
- [3] ZHUY L, ZHOU H, GU J H. A pre-process method based on spatial filter for zero-order image elimination in digital off-axis holography [J]. Laser & Infrared 2010, 40(7): 795-798(in Chinese).
- [4] LI Y Y, CAI H Y, HUANG Zh H, *et al.* The elimination of the zero-order diffraction spot in the reconstruction of the off-axis digital hologram [J]. Journal of University of South China(Science and Technology Edition) 2007, 21(2): 98-101(in Chinese).
- [5] PAVILLON N, ARFIRE C, BERGOEND I, *et al.* Iterative method for zero-order suppression in off-axis digital holography [J]. Optics Express 2010, 18(15): 15318-15330.
- [6] TAKAKI Y, KAWAI H, OHZU H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images [J]. Applied Optics, 1999, 38(23): 4990-4996.
- [7] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSINGE C. Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography [J]. Applied Optics 2000, 39(23): 4070-4075.
- [8] LIU Ch, LI Y Zh, LI L Y, *et al.* Digital holography free of zero-order diffraction and conjugate images [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 427-431(in Chinese).
- [9] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. Beijing: Science Press, 1976: 321-322(in Chinese).
- [10] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J. Analysis of recording conditions of digital hologram by maximum spatial frequency [J]. Acta Photonica Sinica 2007, 36(4): 645-649(in Chinese).