

文章编号 1004-924X(2012)01-0148-09

## 无零级衍射分量的高带宽离轴数字全息

潘卫清<sup>1\*</sup>, 朱勇建<sup>2</sup>

(1. 浙江科技学院 理学院, 浙江 杭州 310023;  
2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**提出了一种消除零级衍射分量对离轴数字全息影响的方法以提高离轴数字全息的有效空间带宽。该方法在大的物参光强比记录条件下,用预先记录的参考光强对全息图进行归一化,并做对数变换和一维离散希尔伯特变换去除零级衍射分量。然后,通过指数变换恢复出物波光场,从而实现无零级衍射分量的高带宽离轴数字全息。从理论上对方法原理进行了分析,给出了基于有限脉冲响应的一维离散希尔伯特变换算法。最后,通过实验对本文方法进行了验证,并讨论了光强比对零级衍射分量抑制效果的影响。结果表明,无论零级与一级衍射谱是否发生混叠,当参考光强度比物光强度大 5 倍以上时,采用本文方法均可以有效去除零级衍射分量的影响。

**关键词:**傅里叶光学;离轴数字全息;零级衍射;对数变换;希尔伯特变换

**中图分类号:**O438.1;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122001.0148

## High bandwidth off-axial digital holography without zero-order diffraction term

PAN Wei-qing<sup>1\*</sup>; ZHU Yong-jian<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Zhejiang Science and Technology University,  
Hangzhou 310023, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University,  
Changsha 410082, China)

\* Corresponding author, E-mail: pan\_weiqing@163.com

**Abstract:** A recording method to suppress the zero-order diffraction term in an off-axial digital hologram and to improve its effective bandwidth is proposed. The method records the hologram on the condition that the reference intensity is more stronger than that of the object. Then, the recorded hologram is normalized by the recorded reference intensity beforehand. The natural logarithm operation and Hilbert transform are applied to the normal hologram to suppress the zero-order diffraction and the object complex field is recovered by an exponential operation. The theory of the method is analyzed. It shows that the logarithm operation can suppress the zero-order term and the Hilbert transform can filter the desired term. Finally, the experiments are performed to validate the method. The results show that the method can suppress the zero-order diffraction term efficiently even in the case of

收稿日期:2011-07-05;修订日期:2011-08-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51005212);浙江省公益技术项目(No. 2010C31095);浙江科技学院交叉学科预研重点资助项目(No. F703108);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 200805321035)

the strong spectral overlap between the zero-order term and the diffraction orders. The influence of the intensity ratio of the light of reference to that of object on the suppression efficient of zero-order diffraction term is analyzed. It shows that the zero-order term can be efficiently suppressed through the proposed method when the intensity ratio is above 5.

**Key words:** Fourier optics; off-axial digital holography; zero-order diffraction; logarithm operation; Hilbert transform

## 1 引言

数字全息是一种基于传统全息干涉原理的测量技术。与传统全息不同的是用电子探测器代替全息干板进行全息记录,用数字衍射代替光学衍射实现全息再现。数字全息可以同时获取记录波前的精确振幅和相位信息,已被广泛应用于各领域的高精度三维形面分析<sup>[1]</sup>、振动变形测量<sup>[2]</sup>及生物医学检测等。近年来,数字全息与显微成像技术相结合,发展了数字全息显微测量技术<sup>[3]</sup>,在生物细胞分析<sup>[4-5]</sup>、微生物检测<sup>[6-7]</sup>及微电子机械系统(MEMS)<sup>[8]</sup>等微观测量领域取得了非常好的应用效果。

数字全息记录的是物光与参考光的干涉条纹,其中包含 3 个衍射分量,即携带物波复振幅信息的 $\pm 1$ 级衍射分量和物光与参考光光强构成的零级衍射分量。在同轴全息中,这 3 个衍射项在全息再现时会重叠出现,对再现像产生严重地干扰,特别是零级衍射分量,由于占据了大部分能量,使得再现像难以分辨。为了消除各衍射分量之间的干扰,目前普遍采用两种处理方法,即相移同轴全息技术<sup>[9]</sup>和离轴全息技术<sup>[10]</sup>。时域相移技术需要依次拍摄 4 幅高精度相移全息图,再通过解方程处理提取无其他衍射项干扰的物波信息,该方法的不足是需要高精度的相移器件,对测试环境要求很高,而且不能用于动态测量。离轴数字全息技术是在全息记录时引入一定的物参光入射夹角,实现 $\pm 1$ 级衍射分量的载波调制,解决 3 个衍射分量频谱图的重叠干扰问题。在数字全息再现时,这 3 个衍射分量的像可以分离开来,但由于零级衍射分量的能量比较集中,往往会降低聚焦像的清晰度,给测量分析带来不便<sup>[11]</sup>。为了解决这一问题,迄今国内外的研究人员已提出了

多种抑制零级衍射分量的处理方法,其中较早出现的有频域高通滤波和空域切趾相结合的直流分量消除方法<sup>[12-13]</sup>,然而这种方法由于采用全局滤波,会影响再现像的场分布。用全息图与物体散斑像相减处理<sup>[14]</sup>,可以有效消除直流分量,但需要预先记录物体的强度图,不便于实际使用,更无法用于动态或在线测量。与此类似的方法是将全息图与其平均强度值相减,但该方法的适用性不强<sup>[15]</sup>。采用数字滤波等图像处理算法也是消除数字全息直流分量的一种常见方法,具体包括拉普拉斯滤波<sup>[16]</sup>和基于有限脉冲响应滤波器的空域滤波<sup>[17]</sup>等。最近国外还有人提出采用循环迭代算法<sup>[18]</sup>和非线性滤波<sup>[19-20]</sup>等方法来消除零级衍射分量的影响,取得了很好的抑制效果,但迭代算法需要比较长的运算时间,并且结果受初始条件影响,非线性滤波方法局限于 1/4 象限频谱区域使用,而且需要在傅里叶频谱区域设置滤波窗口。

虽然以上方法在数字全息再现中可以去除零级衍射分量的影响,但大多数方法使用的前提是要确保全息图的各级衍射谱之间不发生相互重叠。而零级衍射分量的带宽积是 $\pm 1$ 级衍射分量的 2 倍,因此占据了 CCD 很大一部分的频带资源,限制了有用信息的记录带宽,降低了离轴全息的分辨率等技术性能。为此本文在单曝光同轴数字全息算法<sup>[21-22]</sup>研究的基础上,提出了一种简便有效地去除零级衍射分量的方法。

## 2 方法原理

### 2.1 零级衍射分量的抑制方法

关于离轴数字全息的记录光路与方法在很多文献里面都有详细介绍,为了分析方便只给出相应的全息方程。假设到达 CCD 面上的物光为  $O(x, y)$ ,参考光为平面光表示为  $\text{Re}^{i(k_x x + k_y y)}$ ,其中  $(k_x,$

$k_y$ )为参考平面光的入射波矢,  $R$ 为常数表示平面光的振幅, 则物参光的干涉条纹图可表示为

$$I(x, y) = [Re^{j(k_{rx}x+k_{ry}y)} + O(x, y)] [Re^{j(k_{rx}x+k_{ry}y)} + O(x, y)]^*, \quad (1)$$

式中  $*$  表示共轭运算。将式(1)除以参考光强  $R^2$  则得到

$$\frac{I(x, y)}{R^2} = \left[ 1 + \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right] \times \left[ 1 + \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right]^*, \quad (2)$$

设  $R \gg |O|$ , 则式(2)可近似为

$$\frac{I(x, y)}{R^2} \approx \exp \left[ \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)} + O^*(x, y)e^{j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right], \quad (3)$$

对式(3)取对数, 则得到

$$\begin{aligned} \ln \frac{I(x, y)}{R^2} &= \ln \left[ 1 + \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right] + \\ &\ln \left[ 1 + \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right]^* \approx \\ &\frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)} + O^*(x, y)e^{j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R}. \end{aligned} \quad (4)$$

显然式(4)中不存在直流衍射分量, 由此可见, 在参考光与物光强度比较大的条件下, 通过对数变换可有效去除零级衍射项, 只保留 $\pm 1$ 级衍射项, 而这两个衍射项之间的相对位置由参考光的波矢( $k_x, k_y$ )给定, 在物参光夹角较大的情况下,  $\pm 1$ 级衍射项可以完全分离, 所以通过滤波则可以提取其中的一项如  $T = \ln \left[ 1 + \frac{O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)}}{R} \right]$  用于恢复 CCD 面上的物波光场, 其恢复处理算法为

$$O(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)} = R(e^T - 1), \quad (5)$$

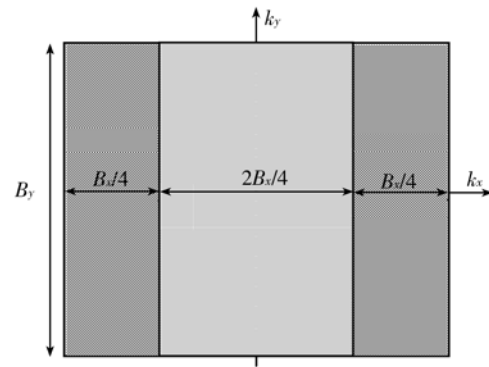
等式左边的线性相位因子只起载波的作用, 可通过频谱居中或波前拟合等方法去除, 等式右边的参考光振幅  $R$  可由预先记录的参考光光强分布得到。因此本文的零级衍射分量去除方法对记录波前没有任何预设要求, 唯一的要求是在全息记录时要调节物光与参考光的光强比。

## 2.2 离轴数字全息的带宽分析

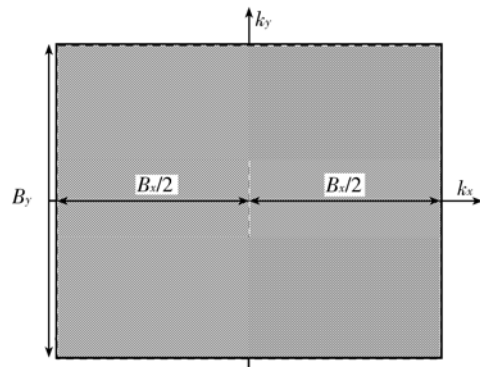
将全息方程式(1)展开整理得到

$$I(x, y) = R^2 + |O|^2 + RO(x, y)e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)} + RO^*(x, y)e^{j(k_{rx}x+k_{ry}y)}, \quad (6)$$

式(6)中前两项为零级衍射项, 后两项为携带物波信息的 $\pm 1$ 级衍射项。对其做傅里叶变换, 则可以得到相应的频谱分布, 由傅里叶变换的性质可知, 物波光强 $|O|^2$ 的频谱宽度是 $\pm 1$ 级衍射谱宽度的两倍, 为了避免发生干扰, 应选择较大的参考光波矢( $k_x, k_y$ ), 使各项频谱得以分离, 如图1(a)所示。设 CCD 的频谱带宽为  $B_x B_y$ , 调节全息干涉条纹方向, 使全息频谱沿  $x$  频谱方向布置, 在 CCD 空间频谱充分利用的情况下, 零级衍射谱所占带宽为  $2B_x B_y/4$ , 而实际可利用的高级衍射频谱带宽仅为  $B_x B_y/4$ , 因此在零级衍射分量的影响下, 离轴数字全息存在很大的频谱资源浪费, 并影响其分辨率等技术性能。采用本文提出的无零级衍射分量的离轴数字全息, 其频谱分布如图1(b)所示,  $\pm 1$ 级衍射谱分别占据 CCD 的  $x$  频谱分量的正负两个区, 因此实际可利用的频谱



(a) 未消除零级衍射分量的频谱  
(a) Before zero-order term suppressing



(b) 消除零级衍射分量后的频谱  
(b) After zero-order term suppressing

图 1 离轴数字全息频谱图

Fig. 1 Fourier spectra of off-axis hologram in case

带宽为  $B_x B_y / 2$ , 是一般离轴数字全息的两倍。为了恢复所需要的物波场分布, 我们只需要将  $x$  频谱分量的单边谱提取即可, 即

$$T = \ln \left[ 1 + \frac{O(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)}}{R} \right] =$$

$$FT^{-1} \left\{ FT \left\{ \ln \frac{I(x, y)}{R^2} \right\} [1 + \text{sgn}(k_x)] \right\} =$$

$$\ln \frac{I(x, y)}{R^2} + j HT \left\{ \ln \frac{I(x, y)}{R^2} \right\}, \quad (7)$$

式(7)中  $FT^{-1}\{\cdot\}$  和  $FT\{\cdot\}$  分别是逆傅里叶变换和傅里叶变换,  $\text{sgn}(\cdot)$  是符号函数,  $HT\{\cdot\}$  是一维希尔伯特变换, 即

$$HT\{f(x)\} = FT^{-1}\{-j \text{sgn}(k_x) \cdot FT\{f(x)\}\}, \quad (8)$$

由式(7)可见, 通过单边谱提取可去除共轭衍射分量的影响, 而单边谱的提取可通过一维希尔伯特变换实现。

### 2.3 一维离散希尔伯特变换

式(8)给出了一维连续希尔伯特变换在频域的定义式。由此可见, 一个信号经过希尔伯特变换后, 其相位要做  $90^\circ$  相移, 因此希尔伯特变换又称为  $90^\circ$  相移滤波或垂直滤波。在计算机数字处理中, 数据均是有限长的离散实数序列(即全息干涉信号), 为了在空域实现全息图的离散希尔伯特变换, 需要设计与式(8)相应的有限脉冲响应滤波器(FIR)<sup>[23]</sup>。

设离散数据的抽样步长为  $\Delta x$ , 则希尔伯特变换传递函数带宽为  $1/2\Delta x$ , 即

$$H(k_x) = -j \text{sgn}(k_x) = \begin{cases} -j; & 0 < k_x < \pi/\Delta x \\ j; & -\pi/\Delta x < k_x < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

则对应的离散脉冲响应函数为

$$h(n) = \frac{\Delta x}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta x}^{\pi/\Delta x} H(k_x) \exp(jk_x n \Delta x) dk_x =$$

$$\frac{\Delta x}{2\pi} \left[ \int_{-\pi/\Delta x}^0 j \cdot H(k_x) \exp(jk_x n \Delta x) dk_x - \right.$$

$$\left. \int_0^{\pi/\Delta x} j \cdot H(k_x) \exp(jk_x n \Delta x) dk_x \right] =$$

$$\begin{cases} 0 & ; |n| = 2m \\ \frac{2}{\pi(2m-1)} & ; |n| = 2m-1 \end{cases}. \quad (10)$$

然而, 实际中的离散信号都是有限长度的, 因此需要对无限脉冲响应函数式(10)进行截断, 使

之仅有有限的样本点( $N$ 点)。虽然截断的傅里叶级数就其误差平方积分最小而言属于最优, 但它往往在频率响应呈现陡变的各点附近有较大的波纹(吉布斯现象), 影响滤波效果, 为了减小脉冲信号截断带来的吉布斯效应, 可采用适当的窗口函数如汉明窗(Hamming Window)来对截断函数进行修正, 我们采用的汉明窗函数为

$$\omega(n) = \frac{1}{2} \left[ 1.08 + 0.92 \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right) \right], \quad (11)$$

修正后的离散希尔伯特脉冲响应函数为

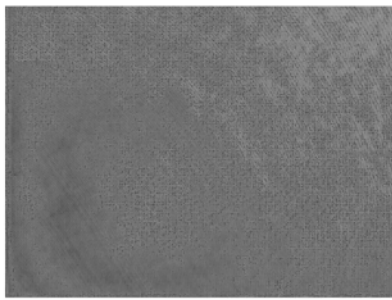
$$\hat{h}(n) = h(n) \omega(n) =$$

$$\begin{cases} \frac{2}{\pi(2m-1)} \cdot \omega(2m-1); & n = 2m-1, |n| \leq N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (12)$$

## 3 实验与分析

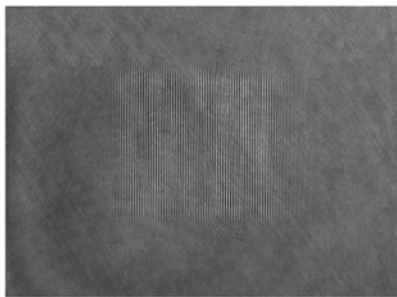
为了验证本文方法的效果, 并分析物参光强度比对结果的影响, 我们进行了实验研究。实验光路根据记录物体的不同分别采用透射式和反射式两种离轴数字全息光路结构。全息记录的 CCD 为 8 位单色数字 CCD(scA1390-17 gm), 像素尺寸为  $9.3 \mu\text{m} \times 9.3 \mu\text{m}$ , 像素规模  $1392 \times 1040$ , 激光波长为  $632.8 \text{ nm}$ , 物参光强比用偏振片调节。

首先我们对一根黄色小鸭绒毛进行了透射式全息记录, 记录距离为  $64 \text{ mm}$ , 参考光和物光的平均强度比为  $17.2$ , 对应振幅比为  $4.14$ 。在全息记录之前我们预先记录了参考光强度分布图(图 2(a)), 然后记录全息图(图 2(b)), 为了便于一维希尔伯特滤波, 我们将全息图中的干涉条纹调整为竖条纹。根据式(4), 将图 2(b)除以图 2(a), 并做对数变换得到图 2(c)。然后用式(2)提供的一维离散希尔伯特变换脉冲响应(汉明窗宽度为 300)对对数变换后的全息图(图 1(c))进行希尔伯特变换滤波, 并用式(5)恢复出无零级衍射项干扰的物波波前分布。为了比较本文方法对零级衍射分量的抑制效果, 我们对原始全息图(图 2(b))和减去参考光后的全息图(图 2(b)减图 2(a))也进行了希尔伯特单边高通滤波和全息重建, 其结果对比如图 3 所示。其中图 3(a)是未做任何处理的全息图经离散希尔伯特单边高通滤波后的频



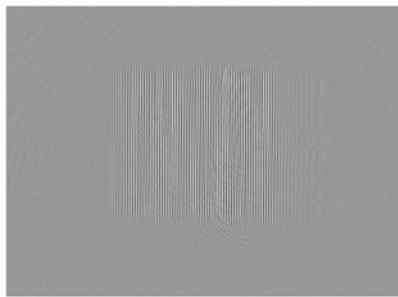
(a) 预先记录的参考光强度分布图

(a) Reference intensity recorded beforehand



(b) 光强比为 17.2 的数字全息图

(b) Digital hologram recorded with intensity ratio of 17.2



(c) 经参考光强归一化和对数变换后的数字全息图

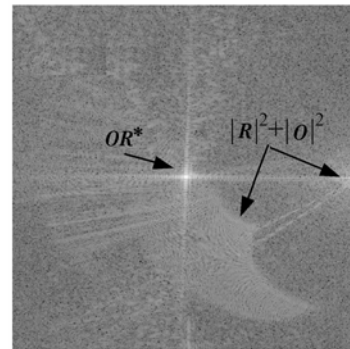
(c) Hologram normalized by reference intensity and taken by logarithm operation

图 2 实验记录图像及其处理

Fig. 2 Recording images and processing result

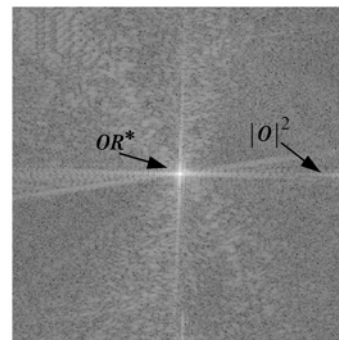
谱图,其频谱成分比较复杂,其中包含了由物光和参考光强度谱构成的零级衍射分量和全息重建所需要的一级衍射项分量,由于直流分量频谱范围比较宽,而物参光夹角又比较小,所以这些频谱成份混叠在一起,无法通过常用的高通滤波<sup>[10]</sup>等方法去除,用角谱衍射算法对该频谱进行全息重建得到图 3(d)所示的全息再现像,观察可见再现图中存在大量的波纹噪声,这是由频谱中混叠的零

级衍射分量干扰导致的。图 3(b)是减去参考光强后的频谱图,减光强法<sup>[12]</sup>也是常用的零频分量消除方法,对比图 3(a)可见,减去参考光强后,全息频谱图中只剩下物光光强产生的零级衍射分量,它同样与一级衍射分量产生了重叠,由于在动态全息中无法对物光光强进行实时记录,因此物光引起的零级衍射分量无法用减光强法进行消



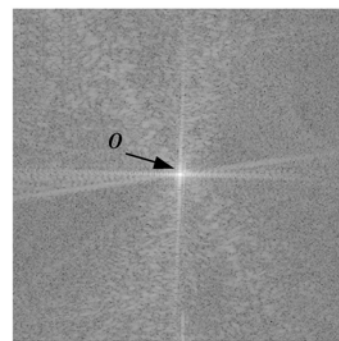
(a) 原始全息图单边频谱

(a) Spectrum of original hologram



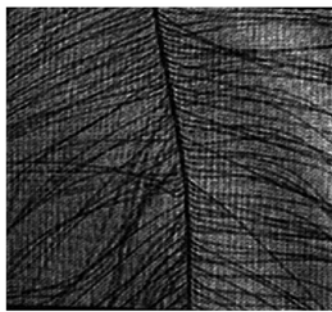
(b) 减参考光后的单边频谱

(b) Spectrum after subtracting reference intensity

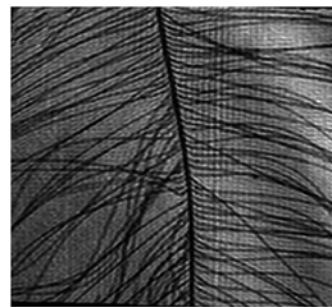


(c) 采用本文方法消除零级衍射分量后的单边频谱

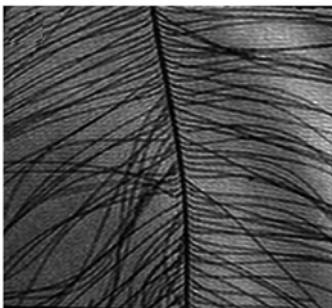
(c) Spectrum after suppressing zero-order term with proposed method



(d) (a)对应的再现像  
(d) Reconstructed image of (a)



(e) (b)对应的再现像  
(e) Reconstructed image of (b)



(f) (c)对应的再现像  
(f) Reconstructed image of (c)

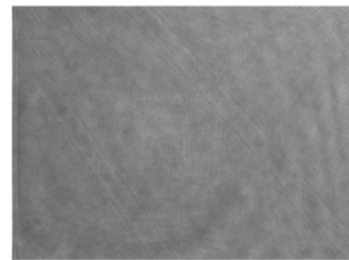
图 3 经希尔伯特滤波后的鸭绒毛单边全息频谱及再现像比较

Fig. 3 Comparison of single-sideband spectra for duck down after Hilbert filtering and corresponding reconstruction images

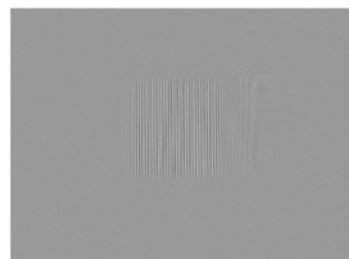
除,从该频谱相应的重建像图 3(e)可见,受物光零级衍射分量影响图中仍然存在一些竖向波纹噪声。采用本文提出的数字全息处理算法得到的全息频谱如图 3(c)所示,图中的零级衍射分量被完全去除,而且由式(5)可知,该频谱中的一级衍射项完全由物光复振幅  $O$  产生,图 3(f)是与该频谱

对应的全息再现像,对比前两幅重建图像可见,重建像中的波纹噪声已经被全部去除,图像非常干净清晰,从而有力的证实了本文提出的无零级衍射分量数字全息处理方法的有效性,而且无论零级衍射分量的频谱是否与一级衍射分量产生重叠本文方法都可适用。

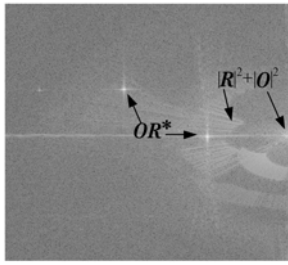
为了进一步验证本文方法对相位物体有同样的处理效果,采用反射式数字全息记录光路对一片带划伤缺陷的反射镜进行了全息记录和处理,在参考光强与物光光强比为 12.6,记录距离为 57.4 mm 时拍摄得到的数字全息如图 4(a)所示,将全息图除以参考光强并取对数运算得到图 4(b),对比两幅全息图可见,做对数运算后的全息图干涉条纹对比度明显提高,说明直流分量已被去除。图 4(c)是原始全息图 4(a)的单边频谱,图 4(d)是由图 4(b)经希尔伯特滤波和反对数变换还原物波的单边频谱,对比两幅频谱,进一步说明通过本文方法可有效去除与一级衍射谱相重叠的零级衍射分量。图 5(a)和(b)分别是由全息频谱图 4(d)经全息重建得到的反射镜全息像的振幅和相位图,其中相位图采用了余弦相位解包裹算法<sup>[24]</sup>,并进行了畸变矫正<sup>[25]</sup>。从重建图中可见反射镜存在严重的横向划伤缺陷,并有少量尘粒污点附着在上面,这些因素导致了镜面反射光的频谱比较复杂并存在较高的分立频谱成分(见图 4(d))。



(a) 原始全息图  
(a) Original hologram

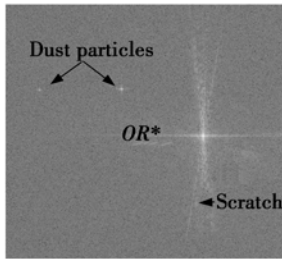


(b) 经参考光归一化和对数变换后的全息图  
(b) Hologram after logarithm operation



(c) 原始全息图的单边频谱

(c) Single-sideband spectrum of original hologram



(d) 去零级衍射分量后的全息单边频谱

(d) Single-sideband spectrum after zero-order term suppressed with proposed algorithm

图 4 反射镜的数字全息图及频谱对比

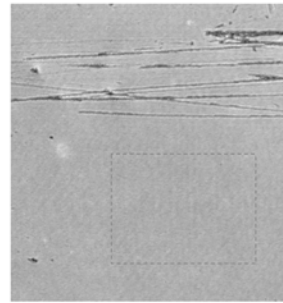
Fig. 4 Comparison of holograms for scratch mirror and corresponding spectra

为了研究物参光强比对零级衍射分量去除效果的影响,本文选取了反射镜质量比较好的区域,如图 5 虚线框所示。在理想情况下该区域的振幅和相位分布可认为是均匀的,其分布的标准偏差为零,所以通过比较该区域的振幅和相位分布在不同光强比条件下的标准偏差变化,可反映光强比对零级衍射分量的抑制效果和再现质量的影响。本文所选取的计算区域大小为  $200 \text{ pixel} \times 130 \text{ pixel}$ ,所采用的标准偏差(Standard Devia-



(a) 振幅

(a) Amplitude



(b) 相位

(b) Phase

图 5 带划痕缺陷的反射镜全息重建图

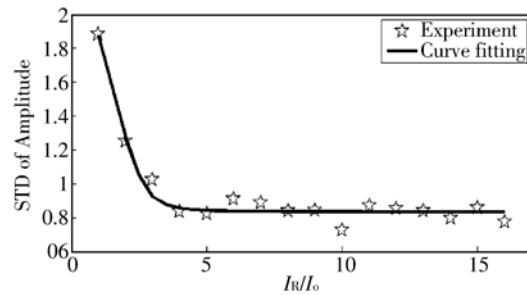
Fig. 5 Reconstruction image of scratch mirror

tion,STD)计算公式为

$$STD = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

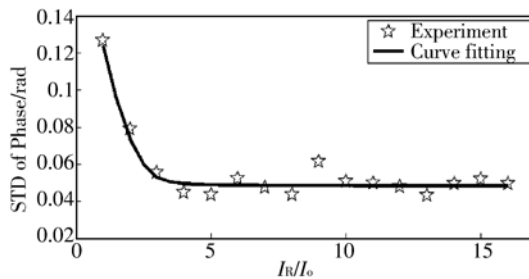
其中  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $x$  为振幅或相位,  $n = 200 \times 130$ 。

通过选用不同的参考光与物光强度比(从 1



(a) 振幅

(a) Amplitude



(b) 相位

(b) Phase

图 6 重建图像的振幅和相位在图 5 虚线框区域的标准偏差随光强比的变化曲线

Fig. 6 Standard deviation of amplitude and phase on the measured regions of Fig. 5 as a function of light intensity ratio

到16),我们拍摄了16幅全息图,在同一区域计算得到的标准偏差变化分布如图6所示,比较可见,虽然振幅和相位的标准偏值大小不同,但它们随光强比的变化趋势是完全一致的,随着参考光与物光光强比的增加,标准偏差会快速减小,当光强比大于5以后标准偏差的变化逐渐趋于稳定,由此可见用本文方法去除零级衍射分量时,为了取得理想的效果要确保全息记录的参考光强与物光光强之比大于5。

## 4 结 论

提出了一种无零级衍射分量的高带宽离轴数字全息方法,该方法只对参考光与物光的强度比有一定要求,对记录物体没有任何预设条件,实验操作简单,数据处理不需要迭代运算,因此具有很好的适用性和方便性。理论分析表明,在参考光

强度远大于物光的记录条件下,通过全息图对参考光强的归一化和对数变换处理可有效去除零级衍射分量,然后经过一维离散希尔伯特变换可提取包含物波复振幅信息的单边频谱,最大限度地提高离轴数字全息的有效空间带宽。通过借助通信处理中常用的一维离散希尔伯特变换滤波器,可快速实现物波光场的自动滤波和提取,从而避免了离轴数字全息中需要手工确定滤波窗口在傅里叶频谱面上的位置和尺寸的问题。用实验对本文方法进行验证,结果表明在物参光夹角比较小致使一级频谱与零级频谱发生重叠的情况下,本文方法仍可以很好地去除零级衍射分量的影响,得到高质量的重建全息像。通过实验研究了物参光强度比对零级衍射分量抑制效果的影响,结果发现要获得好的零级衍射抑制效果,要求参考光强比物光光强大5倍以上。本文方法可方便地用于各种记录物体无零级衍射分量的高带宽动态离轴数字全息技术。

## 参考文献:

- [1] 朱越,刘文耀,刘方超,等. 用数字全息术检测轮胎起泡缺陷[J]. 光学精密工程,2009,17(5):1099-1104.  
ZHU Y, LIU W Y, LIU F C, *et al.*. Inspection of air bubble defect in tires by digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1099-1104. (in Chinese)
- [2] 周文静,彭娇,于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. 光学精密工程,2005,13(增):46-51.  
ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):46-51. (in Chinese)
- [3] CUCHE E, MARQUET P, DEPEURSINGE C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999,38(34): 6994-7001.
- [4] MARQUET P, RAPPAZ B, MAGISTRETTI P J, *et al.*. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Opt. Lett.*, 2005,30(5): 468-470.
- [5] RAPPAZ B, CHARRIERE F, DEPEURSINGE C, *et al.*. Simultaneous cell morphometry and refractive index measurement with dual-wavelength digital holographic microscopy and dye enhanced dispersion of perfusion medium[J]. *Opt. Lett.*, 2008,33(7): 744-746.
- [6] JAVIDI B, MOON I, YEOM S, *et al.*. Three-dimensional imaging and recognition of microorganism using single-exposure on-line (SEOL) digital holography[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(12): 4492-4506.
- [7] SHIN D, DANESH PANAH M, ANAND A, *et al.*. Optofluidic system for three-dimensional sensing and identification of micro-organisms with digital holographic microscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(23): 4066-4068.
- [8] PETITGRAND S. 3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes by stroboscopic microscopic interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,36(2):77-101.
- [9] YAMAGUCHI I, ZHANG T. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1997,22(14):1268-1270.
- [10] LEITH E N, UPATNIEKS J. Reconstructed wavefronts and communication theory [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962,52(10):1123-1130.

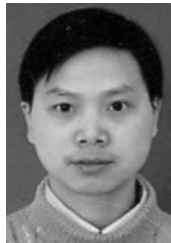


- [11] TAKAKI Y, KAWAI H, OHZU H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38 (23): 4990-4996.
- [12] KREIS T M, JÜPTNER W P O. Suppression of the dc term in digital holography[J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(8):2357-2360.
- [13] LIU C, LI Y, CHENG X, *et al.*. Elimination of zero-order diffraction in digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(10):2434-2437.
- [14] DEMOLI N, MEMTROVIC J, SOVIC I. Subtraction digital holography [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42 (5):798-804.
- [15] KREIS T M, JPTNER W P O. Suppression of the dc term in digit al holography[J] . *Opt. Eng.*, 1997, 36(8):2357-2360.
- [16] 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[J]. *中国激光*, 2001, 28 (11): 1024-1026.  
LIU C, LI Y Z, LI L Y, *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28 (11): 1024-1026. (in Chinese)
- [17] 刘雯雯,戴宜全,康新,等. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. *光学学报*, 2008, 28 (5):856-859.  
LIU W W, DAI Y Q, KANG X, *et al.*. Zero-order image elimination in digital hologram based on finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 1024-1026. (in Chinese)
- [18] PAVILLON N, ARFIRE C, BERGOND I, *et al.*. Iterative method for zero-order suppression in off-axis digital holography [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(15):15318-15331.
- [19] PAVILLON N, SEELAMANTULA C, KUHN J, *et al.*. Suppression of the zero-order term in off-axis digital holography through nonlinear filtering[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48 (34): H186-H195.
- [20] WENG J, ZHONG J, HU C. Digital reconstruction based on angular spectrum diffraction with the ridge of wavelet transform in holographic phase-contrast microscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, 16 (26): 21971 21981.
- [21] PAN W Q, LU W, ZHU Y J, *et al.*. One-shot in-line digital holography based Hilbert phase-shifting[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, 7(7): 1123-1125.
- [22] PAN W Q, ZHU Y J, FAN Y F. One-shot in-line digital holography based two-dimensional Hilbert demodulation technique[J]. *SPIE*, 2010, 7790: 779016-1-10.
- [23] STEARNS S D, DAVID R A. *Signal Processing Algorithms*[M]. New Jersey:Prentice hall, 1988: 297-302.
- [24] KERR D, KAUFMANN G H, GALIZZI G E. Unwrapping of interferometric phase-fringe maps by the discrete cosine transform[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(5):810-816.
- [25] 潘卫清,朱勇建,郎海涛. 基于系统标定的相衬显微数字全息方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(7):1812-1820.  
PAN W Q, ZHU Y J, LANG H T. Phase-contrast imaging technology with digital holographic microscope based system calibration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(7):1812-1820. (in Chinese)

#### 作者简介:



潘卫清(1976—),男,浙江临安人,工学博士,副教授,2003年于武汉大学获得硕士学位,2006年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事信息光学与光电检测方面的研究。E-mail:pan\_weiqing@163.com



朱勇建(1979—),男,江西九江人,工学博士,2007年毕业于中科院上海光机所,主要从事光学测量方面的研究。E-mail:zhuyongjian\_hn@126.com