

# 剪切量选择对剪切干涉降噪的影响

林超 钱晓凡 饶帆 李斌 李兴华

(昆明理工大学理学院 激光研究所, 云南 昆明 650051)

**摘要** 在全息干涉计量法获得的干涉光场相位中不同程度地存在散斑噪声,为顺利完成相位解包裹,降噪处理是必要的。通过剪切将噪声从光场中分离出来是一种有效方法,但剪切量的选择对去噪的影响还需要研究。通过理论分析、模拟计算和实验验证发现:剪切量会影响理想剪切光场相位与含噪声剪切光场相位之间的线性相关性,继而改变降噪难度;选取合适的剪切量可以使该线性相关系数达到最大,从而获得最佳的降噪效果。

**关键词** 全息干涉计量; 降噪; 剪切; 线性相关系数; 剪切量

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030901

## The Influence of Shearing Quantity Selection in Shearing Interferometry Noise Reduction

Lin Chao Qian Xiaofan Rao Fan Li Bin Li Xinghua

(Laser Institute, Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China)

**Abstract** As there exists speckle noise in the phase of optical field obtained from holographic interferometry, it is necessary to reduce noise so that phase unwrapping can be successfully completed. Separating noise from the optical field through shearing is an effective method, but the study on influence of shearing quantity selection is still needed. Through theoretical analysis, simulation computation and experimental validation, it is proved that shearing quantity has influence on the linear correlation between the phase of ideal shearing optical field and the phase of shearing optical field containing noise, and the difficulty of noise reduction is changed. The phase linear correlation coefficient reaches a maximum through selecting appropriate shearing quantity, thus the best noise reduction result can be achieved.

**Key words** holographic interferometry; noise reduction; shearing; linear correlation coefficient; shearing quantity

**OCIS codes** 090.2880; 030.4280

## 1 引言

全息干涉计量因具有非接触、非破坏、实时、全场和高精度的特点而迅速应用到众多领域<sup>[1]</sup>,但是获得的光场往往因存在散斑噪声而难以求解相位,因此如何有效地对该光场进行降噪是很有意义的工作<sup>[2,3]</sup>。对散斑噪声进行降噪处理的方法很多,且具有各自的优缺点<sup>[4]</sup>。对降噪的算法基本要求是在降低噪声的同时保持光场的完整性和连续性。在光场相位变化不太剧烈时,各种去噪算法都能取得不错的效果,但在光场相位空间变化剧烈的情况下,干涉条纹和包裹相位将过于密集,相位相似性、连续性不明显,各种降噪算法的降噪效果将减弱<sup>[5]</sup>。在相位空间变化频率较高时,如何有效降低散斑噪声文献<sup>[5]</sup>提出了剪切算法,取得了不错的效果,但就剪切量的选择对去噪的影响没有做专门研究。在实际应用中,获得的光场受散斑噪声污染的程度不同,当噪声较小时,不同剪切量对降噪效果影响不大;但噪声增大后,选取不同的剪切量将明显影响降噪效果。本文针对用剪切干涉原理进行降噪运算时,选取不同的剪切量将如何影响降噪效果进行了讨论,给

**收稿日期**: 2011-07-17; **收到修改稿日期**: 2011-09-02; **网络出版日期**: 2011-12-23

**基金项目**: 国家自然科学基金(61067004)资助课题。

**作者简介**: 林超(1987—),男,硕士研究生,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: linchaoyue@sina.com

**导师简介**: 钱晓凡(1963—),男,教授,硕士生导师,主要从事数字全息方面的研究。E-mail: qianxiaofan1@sina.com

出了选取最佳剪切量的方法,并用模拟和实验进行了验证。

## 2 剪切干涉法降噪原理

设含有散斑噪声的二维复光场分布在  $(x_i, y_i)$  平面上,离散化后共有  $M \times N$  个像素( $x, y$  方向相邻像素间距分别为  $\Delta x_i, \Delta y_i$ ),离散后含噪声的复光场分布可表示为

$$\tilde{U}(m\Delta x_i, n\Delta y_i) = A(m\Delta x_i, n\Delta y_i) \exp\{j[\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i) + \eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)]\}, \quad m \in [1, M], n \in [1, N] \quad (1)$$

式中  $A(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  为光场振幅,  $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  为理想相位,  $\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  为噪声相位。将离散化的复光场沿  $y$  方向平移(剪切) $s$ (称为剪切量)列,得到一个新光场,并表示为

$$\tilde{U}'(m\Delta x_i, n\Delta y_i) = \tilde{U}[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i] = A[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i] \exp\{j[\varphi[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i] + \eta[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i]]\}. \quad (2)$$

当剪切量  $s$  不大时,可以忽略振幅的变化,即

$$A(m\Delta x_i, n\Delta y_i) \approx A[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i]. \quad (3)$$

将  $\tilde{U}'$  与  $\tilde{U}$  相除便得到新建的剪切干涉光场:

$$\frac{\tilde{U}'(m\Delta x_i, n\Delta y_i)}{\tilde{U}(m\Delta x_i, n\Delta y_i)} = \exp\{j[\Delta\varphi^y(m\Delta x_i, n\Delta y_i) + \Delta\eta^y(m\Delta x_i, n\Delta y_i)]\}, \quad (4)$$

式中

$$\Delta\varphi^y(m\Delta x_i, n\Delta y_i) = \varphi[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i] - \varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i) \approx \frac{\partial\varphi}{\partial y_i} s \Delta y_i, \quad (5)$$

$$\Delta\eta^y(m\Delta x_i, n\Delta y_i) = \eta[m\Delta x_i, (n+s)\Delta y_i] - \eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i) \approx \frac{\partial\eta}{\partial y_i} s \Delta y_i, \quad (6)$$

$\frac{\partial\varphi}{\partial y_i}, \frac{\partial\eta}{\partial y_i}$  分别是  $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i), \eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  沿  $y$  方向的梯度。

在同一个空间点处,通常  $\Delta\varphi_{mm}^y$  要远小于  $\varphi_{mm}^y$  (特别是当  $s$  较小时),同时  $\frac{\partial\eta}{\partial y_i}$  一般要远大于  $\frac{\partial\varphi}{\partial y_i}$ 。也就是说,  $\Delta\varphi_{mm}^y$  在空间变化较缓,而  $\Delta\eta_{mm}^y$  在空间变化快速,由此可以将噪声相位与理想相位有效分离,从而利于降噪处理<sup>[5]</sup>。 $x$  方向处理相同,此处不再赘述。

## 3 不同剪切量对降噪效果的影响

由于去噪的前提是相位必须有相似性和连续性,而相关性系数<sup>[6]</sup>可以表征两函数或变量之间的相关程度,因此为研究不同剪切量  $s$  对降噪效果的影响,可以用模拟的方法,计算不含噪声时剪切光场相位  $\Delta\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  与含有噪声时剪切光场相位  $\Delta\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i) + \Delta\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$  之间的线性相关系数:

$$\rho_{\Delta\varphi_{mm} \cdot \Delta\varphi_{mm} + \Delta\eta_{mm}} = \frac{\text{cov}(\Delta\varphi_{mm}, \Delta\varphi_{mm} + \Delta\eta_{mm})}{\sqrt{\Delta\varphi_{mm}} \sqrt{\Delta\varphi_{mm} + \Delta\eta_{mm}}}. \quad (7)$$

选择某个剪切量  $s$ ,若相关系数较大,表明两者的线性相关程度高(降噪难度较低),反之则表示选择的  $s$  不合适,没有降低降噪难度。用 Matlab 中的 peaks 函数乘以 3.5,构建一个 256 pixel  $\times$  256 pixel 的二维分布相位  $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ ,再叠加上一个数值在  $-\pi \sim \pi$  间变化,均值  $\mu = 0$ ,方差  $\sigma^2$  分别为 0.5, 0.7 和 0.9 的均匀分布随机相位  $\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ ,用以模拟散斑噪声。分别取  $s = 1, 2, 3, 4$  对模拟的理想光场与含噪声光场沿  $x$  方向进行剪切,得到  $\Delta\varphi_{mm}^x$  与  $\Delta\varphi_{mm}^x + \Delta\eta_{mm}^x$ ,再用(7)式分别计算不同噪声及不同剪切量  $s$  情况下的相关系数,结果列于表 1 中。同时图 1(a) ~ (d) 分别给出了  $\sigma^2 = 0.5$  情况下  $s$  取 1, 2, 3 和 4 时  $\Delta\varphi_{mm}^x$  与  $\Delta\varphi_{mm}^x + \Delta\eta_{mm}^x$  第 129 列的相位分布曲线。

计算表明:相关系数随噪声增大而减小,但在同一噪声情况下,相关系数是随着剪切量增加而增大的。当噪声较小时,可以用较小的剪切量(如  $s = 1$ )进行降噪处理;但当噪声较大时,选用较小的剪切量不能改善降噪效果,这时应该增大剪切量,但持续增大剪切量将导致剪切光场的相位出现包裹,给相位解包裹带来新

的困难,所以最佳选择是选取能使剪切光场相位不出现包裹的最大剪切量。

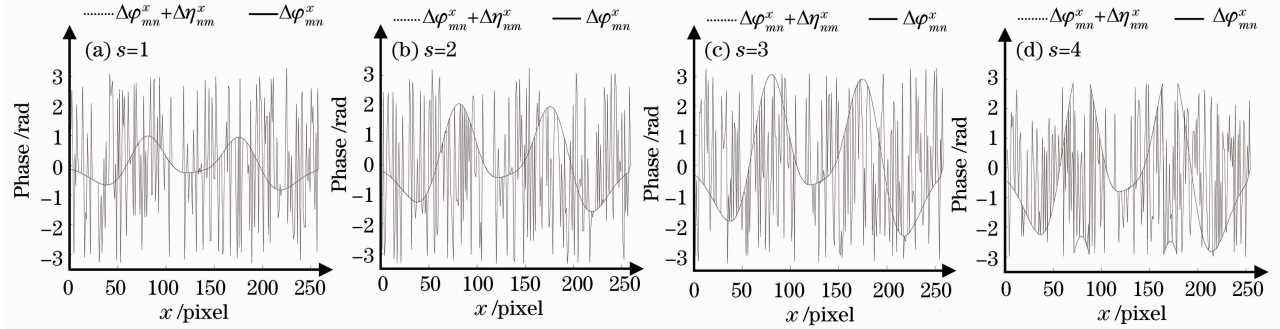


图1 不同剪切量下的  $\Delta\varphi_{mn}^x + \Delta\eta_{nm}^x$  与  $\Delta\varphi_{mn}^x$  比较(第129列)

Fig. 1 Comparing  $\Delta\varphi_{mn}^x + \Delta\eta_{nm}^x$  with  $\Delta\varphi_{mn}^x$  under different shearing quantities (the 129th column)

表1 相关系数与噪声、剪切量大小的关系

Table 1 Correlation coefficients under different noise and shearing quantities

Noise	Correlation coefficient			
	$s=1$	$s=2$	$s=3$	$s=4$
$\mu=0, \sigma^2=0.9$	0.0894	0.1829	0.2558	0.3108
$\mu=0, \sigma^2=0.7$	0.0795	0.1490	0.2221	0.2682
$\mu=0, \sigma^2=0.5$	0.0607	0.1163	0.1733	0.2181

由图1可见,经过剪切  $\Delta\varphi_{mn}^x$  变化平缓而  $\Delta\eta_{nm}^x$  变化较快,将二者在空间频率上很好地分离有利于降噪。图1(d)显示  $s=4$  时剪切光场的相位  $\Delta\varphi_{mn}^x$  已经包裹(需二次解包裹)。因此  $s=3$  应为最佳剪切量。

为比较降噪效果,分别取剪切量  $s=1, 2, 3, 4$  对含服从均匀分布随机噪声( $\sigma^2=0.5$ )的模拟相位光场完成剪切,并用经典的  $5 \times 5$  中值滤波方法进行滤波(分别对实部虚部),然后用基于离散泊松方程的最小二乘法完成解包裹<sup>[7]</sup>,结果如图2所示。

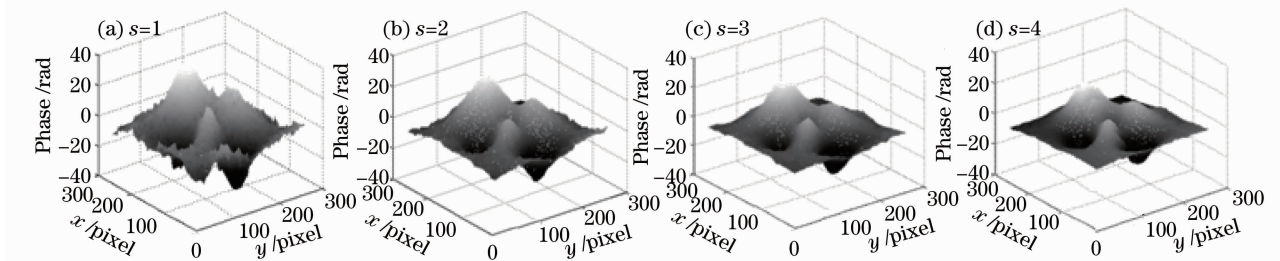


图2 不同剪切量降噪后解包裹相位比较

Fig. 2 Comparison of unwrapped phases using different shearing quantities

图2(a)~(d)为分别取  $s=1, 2, 3, 4$  时,经剪切滤波后的解包裹相位。从图中可明显看到, $s$ 取4时解包裹失败(因剪切光场的相位已经包裹), $s$ 取3时效果最佳, $s$ 取2时次之,由于噪声严重, $s$ 取1的结果很差。结论与理论分析完全吻合。

## 4 实验验证

用全息光弹三点弯实验验证我们的结论,实验光路如图3所示。倍频 YAG 激光器发出的激光束(波长  $\lambda=533 \text{ nm}$ )通过分束镜  $BS_1$  分为两束,其中一束被反射镜  $M_1$  反射后经显微物镜  $L_1$ 、针孔滤波器  $h_1$  和准直透镜  $L_2$  变为平行光穿过光弹薄板,透射光经分束镜  $BS_2$  和会聚透镜  $L$  作为物光到达全息记录面;另一束经反射镜  $M_2$  反射后经显微物镜  $L_3$ 、针孔滤波器  $h_2$  和准直透镜  $L_4$  变为平行光,经分束镜  $BS_2$  反射、透镜  $L$  会聚后作为参考光到达全息记录面。物光和参考光在全息记录面干涉后用 CMOS 相机记录下来并送入计算机保存,得到数字全息图。实验中使用的 CMOS 为  $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$ ,像素大小为  $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$ ,

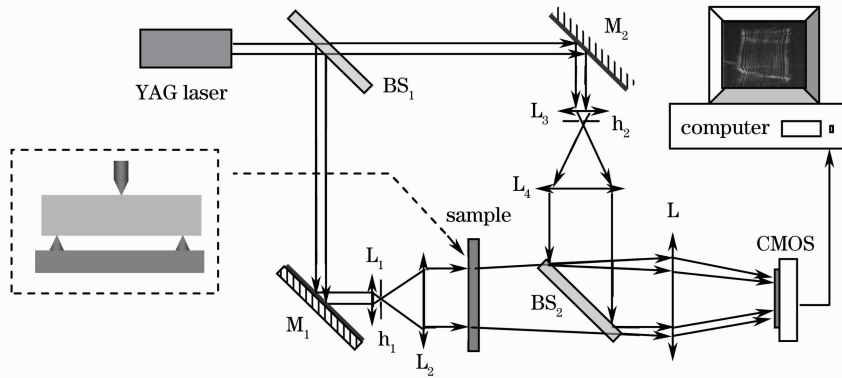


图3 全息光弹实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of holographic photoelasticity experiment

光弹薄板到 CMOS 的距离为 0.90 m。

分别用光弹薄板受应力前、后记录的全息图,通过衍射计算得到各自的再现光场,将两再现光场相除可以计算出二者的相位差,对该相位差取余弦得到实验干涉条纹分布,它反映出光弹薄板加力前、后的应力分布情况。用剪切量  $s$  分别取 1~9 进行剪切降噪并解包裹,得到的结果如图 4 所示(为节省篇幅只给出了  $s=1, 3, 9$  的结果,图像大小均为  $1040 \text{ pixel} \times 280 \text{ pixel}$ )。

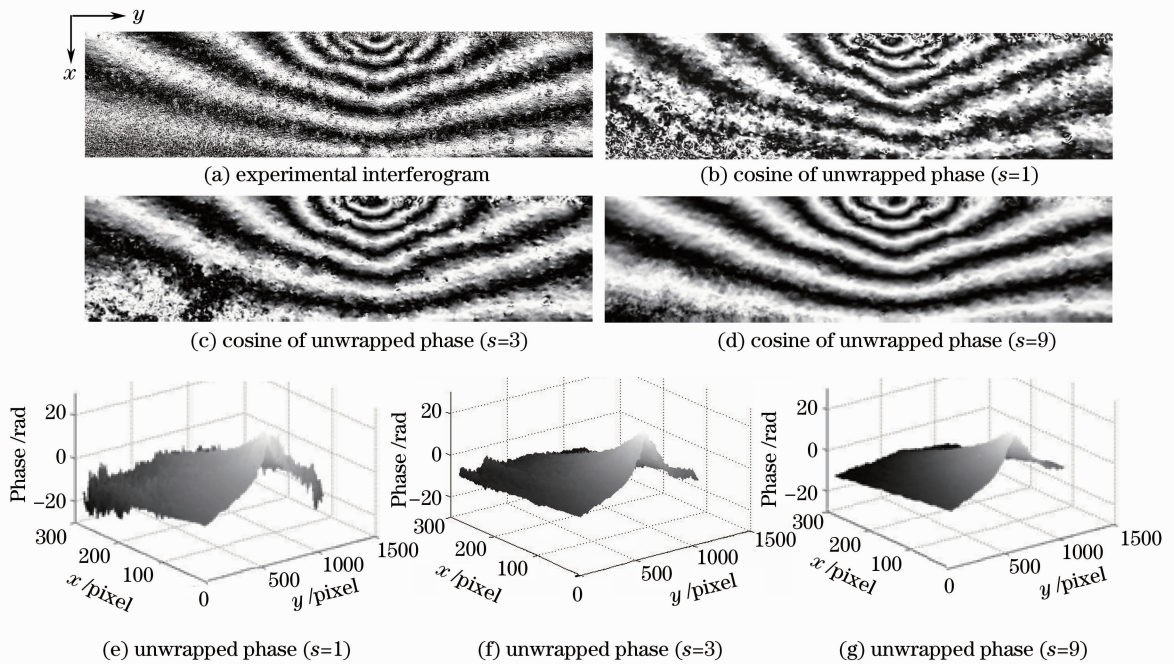


图4 不同剪切量降噪比较

Fig. 4 Comparison of noise reduction with different shearing quantities

图 4(a)为实验干涉条纹分布,散斑噪声很严重;图 4(b)~(d)分别为取  $s=1, 3, 9$  对光场剪切后用  $5 \times 5$  中值滤波器滤波,然后用最小二乘法解包裹后得到实验相位分布,再对该相位取余弦得到的干涉图;图 4(e)~(g)是解包裹相位的分布图。将图 4(a)分别与图 4(b)~(d)比较可见:用相关系数最大时的剪切量  $s=9$ (剪切光场相位还没有包裹)获得的降噪效果最好,结果也最接近实验值。

## 5 结 论

通过理论分析、模拟计算和实验验证表明:剪切量会影响理想剪切光场相位与含噪声剪切光场相位之间的线性相关性,而且剪切量增加,线性相关性也相应地增加,但可能导致剪切光场中出现相位包裹。因此选

择保证剪切光场不出现相位包裹的最大剪切量,可以使相位线性相关系数达到最大,继而获得最佳的降噪效果。

### 参 考 文 献

- 1 Xiong Bingheng. Recent situation of real-time holographic testing and its application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(5): 3~8  
熊秉衡. 实时全息及其应用近况[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(5): 3~8
- 2 K. Creath. Phase Measurement Interferometry Techniques. In E. Wolf (ed.). *Progress in Optics* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1988. 349~393
- 3 G. Kaufmann, A. Davila, D. Kerr. Interview smoothing of speckle interferometry fringe patterns [J]. *Optical Testing Digest*, 1997, **2**(4): 4504~4509
- 4 Fu Sihua, Yu Qifeng. Filtering methods of the digital speckle fringe pattern[J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(4): 5~8  
伏思华, 于起峰. 数字散斑条纹图的滤波方法[J]. 应用光学, 2005, **26**(4): 5~8
- 5 Qian Xiaofan, Rao Fan, Lin Chao *et al.*. A speckle noise reduction algorithm based on the principle of shearing interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708003  
钱晓凡, 饶帆, 林超等. 基于剪切干涉原理的散斑噪声降噪算法[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0708003
- 6 Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi *et al.*. *Probability and Mathematical Statistics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 129~133  
盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 129~133
- 7 Qian Xiaofan, Wang Zhanliang, Hu Te *et al.*. Reconstructing the phase of wavefront using digital hologram and the principle of shearing interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1821~1826  
钱晓凡, 王占亮, 胡特等. 用单幅数字全息和剪切干涉原理重构光场相位[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1821~1826