

基于剪切干涉原理的散斑噪声降噪算法

钱晓凡 饶帆 林超 李斌

(昆明理工大学理学院激光研究所, 云南 昆明 650051)

摘要 用光学干涉计量方法获得光场相位, 通常都需要做去噪运算。在光场相位空间变化频率不高的情况下, 目前的各种算法都能取得不错的效果。如果光场相位空间变化剧烈, 传统去噪算法常引起细节丢失、条纹断裂。针对这个问题, 通过引入光场的横向剪切, 显著降低光场相位的空间变化频率, 从而将噪声从光场中分离出来。给出了一种新的去噪算法和相应的理论分析, 通过模拟计算和实验验证, 证明该算法是可行和有效的, 在光场相位空间变化频率较高的情况下, 能得到比传统去噪算法更好的结果。

关键词 物理光学; 光学干涉计量; 散斑噪声; 去噪; 算法; 剪切干涉

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0708003

Speckle Noise Reduction Algorithm Based on Principle of Shearing Interferometry

Qian Xiaofan Rao Fan Lin Chao Li Bin

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

Abstract Denoising operation is usually needed for obtaining the phase of optical field by optical interferometry, and current denoise algorithms can achieve good results when the phase of optical field changes slowly. If the phase has high spatial variation frequency, the conventional denoise algorithms often cause loss of phase detail and fringe breaks. For this reason, by introducing shearing of optical field to reduce the frequency significantly and separating the speckle noise from optical field, a new denoise algorithm and corresponding theoretical analysis are presented. The validity of this new algorithm is showed in one simulated result and one experimental example of denoising; and the obtained phase approaches experimental value well, proved that this new algorithm is better than conventional algorithms.

Key words physical optics; optical interferometry; speckle noise; denoise; algorithm; shearing interferometry

OCIS codes 260.3160; 030.4280; 200.0200

1 引 言

在光学干涉计量中, 光电转换传感器、传输媒质、光路中的寄生光、背景光以及散斑均可以产生噪声, 但其中最难去除的是散斑噪声^[1], 所以去除散斑噪声一直是研究的热点。目前, 干涉计量中获得光场相位的方法主要有两种: 利用干涉条纹计算相位, 以及通过数字全息再现光场的复振幅计算相位。去噪声运算也主要有两种: 对干涉条纹(实函数)进行处理以及对再现光场的复振幅(复函数)进行处理。其实两种去噪都是对叠加有噪声的连续实函数进行

的。因为除了干涉条纹本身是实函数外, 对再现光场的复振幅去噪通常先从光场的复振幅中分别取出其实部和虚部, 得到两个连续实函数, 再分别对它们做去噪处理, 最后用去噪后的实部、虚部计算包裹相位。

去噪处理可以在空域进行, 也可以在频域完成。在空域中进行去噪处理时, 目前普遍使用的算法是加权(或不加权)的均值滤波、中值滤波或自适应中值滤波等。这些算法的主要缺点是在降低噪声的同时会使相位的细节丢失, 要更好地抑制噪声, 必须扩

收稿日期: 2011-01-28; 收到修改稿日期: 2011-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61067004)资助课题。

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

大模板,导致细节的丢失更严重,并往往引起条纹断裂^[2]。有研究者提出基于同态滤波与自适应模糊多级中值滤波级联算法^[3],或者新的相位恢复算法^[4],在一定程度上克服了上述问题。

在频域进行时,由于散斑噪声属于白噪声,常用各种类型的带通或低通滤波器处理,有研究者提出加窗的傅里叶变换^[5]、各向异性偏微分方程滤波算法^[6]等多种去噪算法^[7~9],随着小波变换的普及,基于小波变换原理的算法成为新的去噪算法^[10~13]。所有这些算法在一定条件下收到了不错的效果,但是,在频域中滤除噪声的同时也会滤除有用信息。

无论用什么算法去噪,基本要求是在降低噪声的同时又要保持光场的完整性和连续性,而基本模型都是将散斑噪声视为乘性的^[14],并且只是空间坐标的随机函数,即噪声在相邻的像素点是统计独立的,而相位则是缓慢变化且具有相似性的。在光场为缓变函数时该模型成立,各种算法都能取得不

错的效果。但对于光场相位空间变化剧烈的情况,干涉条纹和包裹相位会过于密集,相位的相似性、连续性不明显,模型不再成立,因而各种去噪算法的效果大打折扣。所以,在相位的空间变化频率较高时,有必要研究如何有效去除散斑噪声的问题。

2 利用剪切分离噪声的原理

对一个已经得到的数字化复光场分布,可用简单的方法实现横向剪切,从而降低光场相位的空间变化频率^[15],这种方法当然也可以降低有散斑噪声复光场的空间变化频率,并有助于将噪声从光场中分离出来。

设二维复光场分布在平面 (x_i, y_i) 上,离散化后,设该平面 x 方向和 y 方向上相邻坐标点的间距分别为 Δx_i 和 Δy_i ,则用 $M \times N$ 矩阵给出的二维含噪声复光场 $\tilde{U}(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 可以表示为

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

式中 $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ 分别是矩阵的行、列下标, $a(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 为振幅, $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 是没有噪声时光场的相位(理想相位),而 $\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 是叠加在其中的噪声相位。

将该复光场在平面内沿某个方向(以沿 x 方向为例)平移(剪切),平移量为 s 行,则创建了一个新光场 \tilde{U}' ,在 $(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 处可以表示为

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

若剪切量 s 不大,可以忽略光场 \tilde{U} 在 $(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 与 $[(m+s)\Delta x_i, n\Delta y_i]$ 点处振幅的差异。将两光场相除,得到一个新建剪切干涉光场

$$\frac{\tilde{U}'(m\Delta x_i, n\Delta y_i)}{\tilde{U}(m\Delta x_i, n\Delta y_i)} = \exp[j\Delta\varphi_{mm}^x(m\Delta x_i, n\Delta y_i) + j\Delta\eta_{mm}^x(m\Delta x_i, n\Delta y_i)], \quad (3)$$

式中

$$\Delta\varphi_{mm}^x(m\Delta x_i, n\Delta y_i) = \varphi[(m+s)\Delta x_i, n\Delta y_i] - \varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i) \approx \frac{\partial\varphi}{\partial x_i} s \Delta x_i \quad (4)$$

是 $(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 处两理想光场相位间的差值,而 $\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}$ 是 $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 在该点处沿 x 方向上的梯度。同样

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

是 $(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 处两光场噪声相位的差值,而 $\frac{\partial\eta}{\partial x_i}$

是该点处 $\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$ 沿 x 方向上的梯度。值得注意的是, $\Delta\varphi_{mm}^x$ 的数值通常要远小于 $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$

本身(特别是在剪切量 s 取1的情况下);另外, $\frac{\partial\eta}{\partial x_i}$ 一

般要远大于 $\frac{\partial\varphi}{\partial x_i}$,即 $\Delta\varphi_{mm}^x$ 的空间变化是缓慢的,而

$\Delta\eta_{mm}^x$ 的变化是快速的。基于此,可以将理想相位与噪声的相位有效地分离开,以利于进行去除噪声处理。用同样的方法可以得到沿 y 方向的剪切相位 $\Delta\varphi_{mm}^y$ 和 $\Delta\eta_{mm}^y$,也有相似的性质。

3 模拟计算

为了说明利用剪切是将噪声从相位变化较快的

光场中分离出来的,可以做模拟计算。计算选用 Matlab 中的 peaks 函数乘以 10,构建一个 256 pixel×256 pixel 的二维连续相位分布 $\varphi(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$, 叠加上一个数值在 $-\pi\sim\pi$ 变化,并服从均匀分布的随机相位 $\eta(m\Delta x_i, n\Delta y_i)$,用以模拟散斑噪声。图 1 给出了模拟光场(含噪声)的相位、包裹相位以及用(3)式

(取 $s = 1$) 计算得到的 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ 。

图 2(a)给出了包裹相位第 129 列(位置如图 1 中的白色虚线所示)的分布曲线,图 2(b)分别给出了 $\Delta\varphi_{nm}^x$ 以及 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ 在同一列上对应数值的分布曲线。

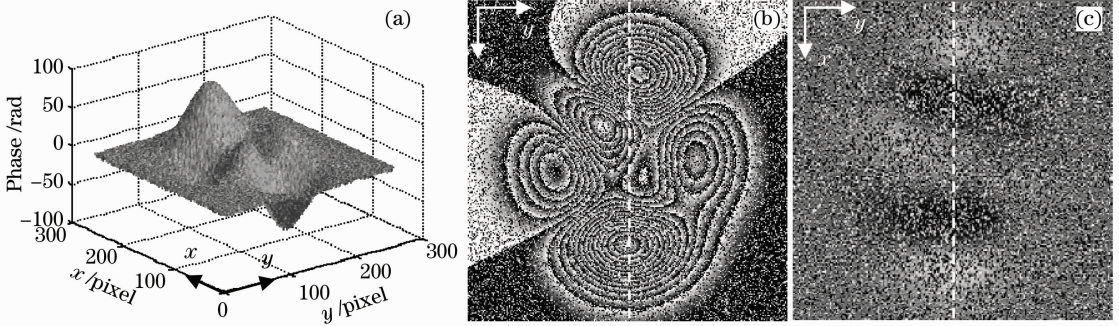


图 1 模拟光场的原始相位(a),截断相位(b)和 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ (c)

Fig. 1 Optical field for simulation about (a) original phase, (b) wrapped phase and (c) $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$

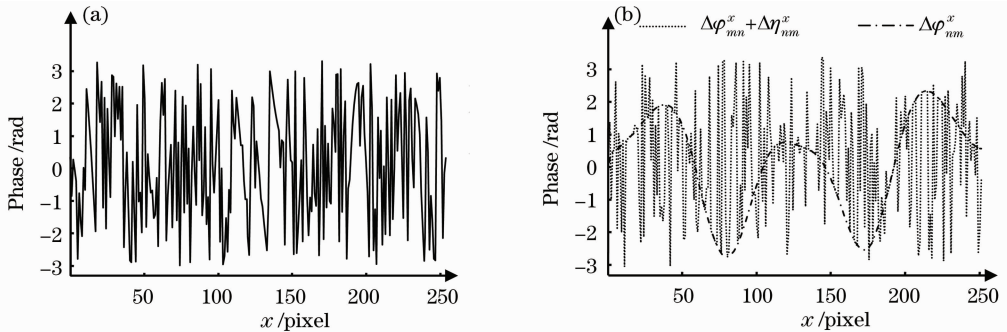


图 2 模拟光场剖面(第 129 列)比较。(a)截断相位;(b) $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ 和 $\Delta\varphi_{nm}^x$

Fig. 2 Comparison of hatching line(129th column). (a) Wrapped phase; (b) $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ and $\Delta\varphi_{nm}^x$

从图 1,2 可以看到,原光场的包裹相位具有较高空间变化频率,散斑噪声叠加其中很难去除,即使转换到光场的实部、虚部中做去噪运算,由于实部、虚部也具有较高空间变化频率,去噪效果也不会有明显改善。反过来看, $\Delta\varphi_{nm}^x$ 变化平缓,而 $\Delta\eta_{nm}^x$ 则变化很快,两者在空间频率上很好地分离开来,有利于做声噪处理。当然,还可以计算 $\Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$,也有同

样的性质。

为了验证和比较去噪效果,选用典型的 5×5 中值滤波器,分别对原模拟光场和剪切后得到的 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x, \Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$ 进行去噪处理(均分别对实部、虚部去噪),得到传统包裹相位和 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x, \Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$ 去噪后的结果,如图 3 所示。

从图 3 可以看到,传统算法直接对原光场去噪,

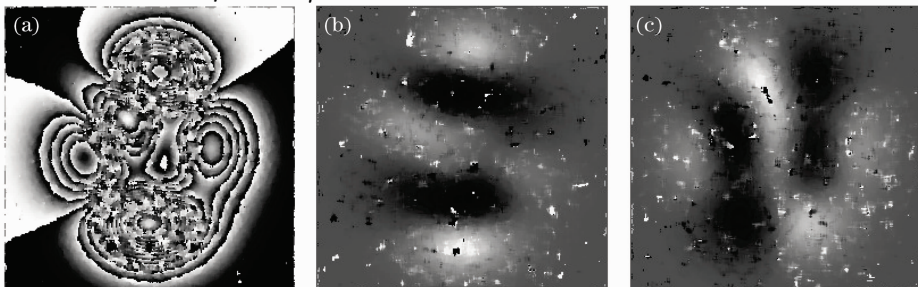


图 3 不同去噪算法效果比较。(a)传统算法;(b)对 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ 去噪;(c)对 $\Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$ 去噪

Fig. 3 Comparison of denoise results using different algorithms. (a) Conventional algorithm; (b) $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$; (c) $\Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$

除相位变化缓慢的区域有较好的效果外,其他区域明显出现了条纹中断和细节丢失。相反,新算法对 $\Delta\varphi_{nm}^x + \Delta\eta_{nm}^x$ 和 $\Delta\varphi_{nm}^y + \Delta\eta_{nm}^y$ 去噪,效果要好很多。如果不断扩大中值滤波器的窗口,传统算法导致的条纹中断和细节丢失会越来越严重,而用新去噪算法, $\Delta\varphi_{nm}^x$ 和 $\Delta\varphi_{nm}^y$ 的信息保留依然完整。

为方便比较,分别对模拟光场用传统和新算法去噪(均选用 5×5 中值滤波器),然后均用基于离散 Poisson 方程的最小二乘法解包裹法^[16]进行相位重构,结果如图 4 所示。

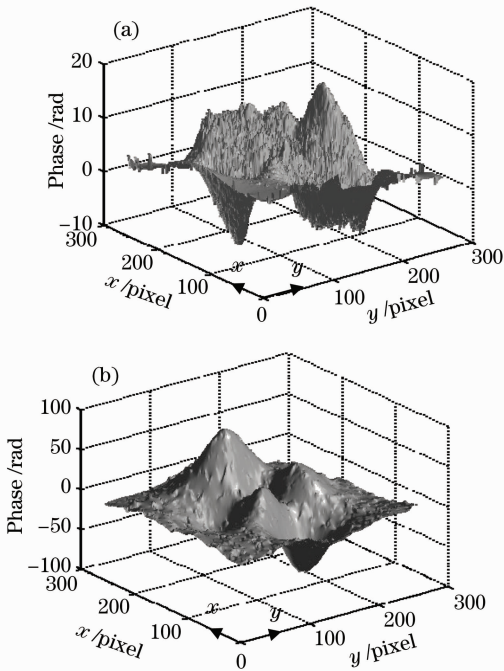


图 4 去噪后的相位解包裹结果。(a)传统算法;
(b)剪切算法

Fig. 4 Unwrapped phase using different denoise algorithms.

(a) Conventional algorithm; (b) shearing algorithm

将图 4(a), (b)分别与图 1(a)比较可以看到,由于传统去噪算法得到的包裹相位中有条纹中断,且细节丢失严重,解包裹后效果很差。而新算法很好地保留了 $\Delta\varphi_{nm}^x$ 和 $\Delta\varphi_{nm}^y$ 的信息,解包裹后效果好很多。上面的模拟计算表明,利用剪切干涉原理是可以较好地解决相位的空间中变化快时,传统算法容易导致去噪后部分较密的干涉条纹被一同消去,甚至出现条纹断裂这个难题的。

4 实验验证

图 5 是研究振动所用的数字全息光路示意图^[17]。倍频 YAG 激光器发出的激光束(波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$)通过分束镜 BS_1 分为两束,其中一束被反

射镜 M 反射后经透镜 L_3 扩束,照射到扬声器上(与音频信号源连接),反射光通过分束镜 BS_2 作为物光到达全息记录面;另一束经显微物镜 L_1 、针孔滤波器 h 和准直透镜 L_2 变为平行光,经分束镜 BS_2 反射后作为参考光到达全息记录面。参考光和物光在全息记录面干涉后用 CMOS 记录下来,得到数字全息图。实验中 CMOS 的分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$,像素大小为 $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$,扬声器到 CMOS 的距离 z_0 为 1.50 m 。

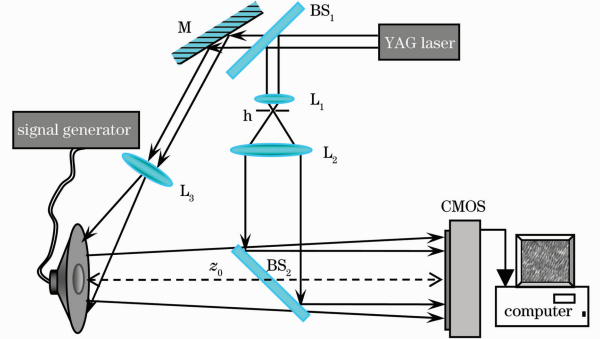


图 5 数字全息光路示意图

Fig. 5 Experimental setup for digital holography

先记录一幅扬声器没有振动时的全息图,接着,在扬声器上接入音频信号(信号频率为 200 Hz ,指示电压为 4.0 V),再记录一幅扬声器振动后的全息图。注意,由于全息图的曝光时间为 2 ms ,小于扬声器的振动周期,记录的并不是时间平均全息图。

分别用扬声器振动前、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,可以得到两者的相位差,对该相位差取余弦得到实验干涉条纹分布,它反映出扬声器振动前、后的形变情况。用传统算法和剪切算法去噪后做解包裹运算,得到的结果如图 6 所示(图像大小均为 $530 \text{ pixel} \times 570 \text{ pixel}$)。

图 6(a)是实验干涉条纹图,可看到局部位置处干涉条纹很密,由于再现光场中散斑噪声很重,不经去噪无法完成解包裹运算。图 7(a)是对再现光场用传统算法经 5×5 中值滤波器滤波,再经最小二乘法解包裹所得相位的 2D 分布,图 6(b)是该解包裹相位取余弦得到的干涉图;图 7(b)是用新算法去噪后,同样经最小二乘法解包裹^[15]所得相位的 2D 分布,图 6(c)是该解包裹相位取余弦得到的干涉图。比较图 6(a), (b)发现,传统算法去噪的效果很有限。比较图 6(a), (c)可以看到新算法得到的干涉条纹图更接近实验,说明其去噪效果要好很多。比较图 7(a), (b)也能得到这个结论。

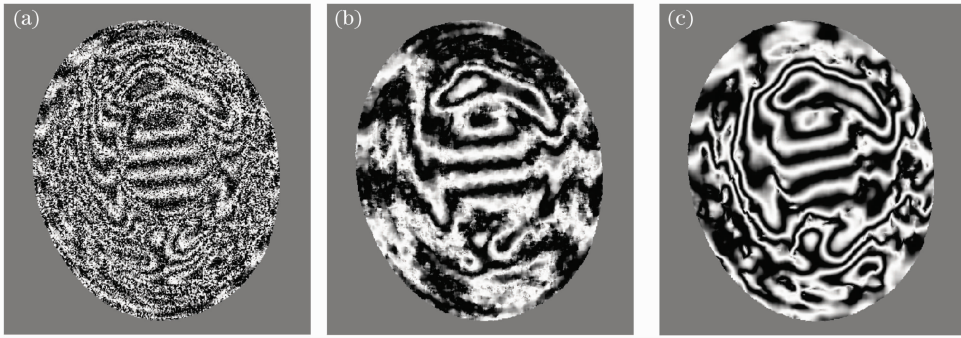


图6 实验测试(a),传统算法计算(b)和剪切算法计算(c)的干涉条纹图

Fig. 6 Interference patterns of (a) experiment, (b) conventional algorithm and (c) shearing algorithm

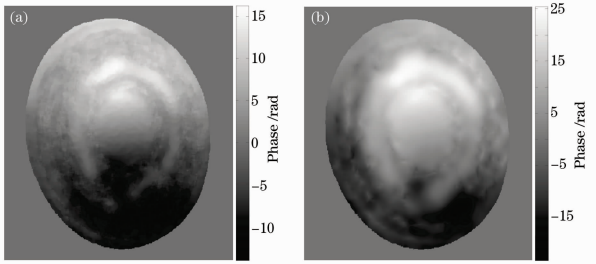


图7 传统算法(a)和剪切算法(b)计算的相位二维分布

Fig. 7 2D distribution of phase for (a) conventional algorithm and (b) shearing algorithm

5 结 论

通过引入光场的横向剪切,显著降低光场相位的空间变化频率,从而将噪声从光场中分离出来,方便完成去噪运算。给出了相应的理论分析和算法,并通过模拟计算和实验验证,证明该算法是可行和有效的,在光场相位空间变化频率较高的情况下,能得到比传统去噪算法更好的结果。

参 考 文 献

- 1 R. S. Sirohi. *Speckle Metrology* [M]. New York: CRC Press, 1993
- 2 G. Kaufmann, A. Davila, D. Kerr. Interview-smoothing of speckle interferometry fringe patterns [J]. *Opt. Test. Digest*, 1997, **2**(4): 4504~4509
- 3 Wang Qi, Jiang Lihui, Li Ningcheng *et al.*. Based on combining homomorphic and adaptive fuzzy multilevel median filtering for restoration of images degraded by speckle noise [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 587~589
王 骐, 蒋立辉, 李宁成等. 基于同态滤波与自适应模糊多级中值滤波级联算法的散斑噪声污染图像恢复[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7): 587~589
- 4 Huang Lixin, Yao Jun, Gao Fuhua *et al.*. Phase retrieval of complex optical fields based on rotated phase modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3066~3069
黄利新, 姚 军, 高福华等. 基于旋转相位调制的复杂光场相位恢复算法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3066~3069

- 5 Q. Kema. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2007, **45**(2): 304~317
- 6 Tang Chen, Han Lin, Ren Hongwei *et al.*. Second-order oriented partial-differential equations for denoising in electronic-speckle-pattern interferometry fringes [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2179~2181
- 7 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 76~79
陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 76~79
- 8 Fu Sihua, Lin Hui, Yu Qifeng *et al.*. Fringe-contoured-window sine/cosine filter for saw-tooth phase maps of electronic speckle pattern interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 864~870
伏思华, 林 珩, 于起峰等. 电子散斑相位主值图的等值线正余弦滤波方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 864~870
- 9 Yang Xia, Yu Qifeng, Fu Sihua. Adaptive window filter for electric speckle pattern interferometry fringe pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 625~630
杨 夏, 于起峰, 伏思华. 散斑条纹图的自适应窗口滤波方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 625~630
- 10 G. H. Kaufmann, G. E. Galizzi. Speckle noise reduction in television holography fringes using wavelet thresholding [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(1): 9~14
- 11 Zhou Canlin, Kang Yilan, Zhang Zhifeng. Application of wavelet transform in digital holography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 42~45
周灿林, 亢一澜, 张志锋. 小波变换在数字全息中的应用[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 42~45
- 12 Qian Kema, Xie Fushun. Speckle noise reduction in interferometric fringe patterns [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, **22**(3): 323~327
钱克矛, 谢福顺. 干涉条纹图中散斑噪声之滤除[J]. *实验力学*, 2007, **22**(3): 323~327
- 13 Li Kai, Zhang Qingchuan. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2751~2755
李 凯, 张青川. 基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2751~2755
- 14 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. *Introduction to Statistical Optics* [M]. Tianjin: Nankai University Press, 1987. 696~705
戚康男, 秦克诚, 程 路. *统计光学导论*[M]. 天津: 南开大学出版社, 1987. 696~705
- 15 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
- 16 Hui Mei, Wang Dongsheng, Li Qingxiang *et al.*. Phase unwrapping method based on the solution of discrete Poisson equation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1245~1249
- 惠 梅, 王东生, 李庆祥 等. 基于离散泊松方程解的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1245~1249
- 17 Qian Xiaofan, Wang Zhanliang, Zhang Haitao *et al.*. Vibration amplitude distribution measurement using phase of reconstructed wave in time-average digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 523~528
- 钱晓凡, 王占亮, 张海涛 等. 基于相位分析的时间平均数字全息测振研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 523~528