

# 基于 Goldstein 滤波的数字散斑条纹图降噪方法

顾国庆 王开福 许 星

(南京航空航天大学航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 有效去除数字散斑条纹图中的噪声是散斑干涉测量技术中的关键问题。提出了一种基于 Goldstein 滤波的数字散斑条纹图平滑方法。该方法需要将散斑条纹图中的干涉相位转换为矢量空间中的单位矢量, 并进行快速傅里叶变换(FFT), 得到其频谱, 然后对频谱进行加权处理, 从而抑制噪声的频率成分, 再将加权处理后的频谱变换到空间域, 计算干涉相位, 得到原始散斑条纹图的滤波结果。将该滤波方法运用于四步相移数字散斑干涉条纹图像处理。实验结果表明, 该方法在滤除散斑噪声的同时能够有效地保护散斑条纹图的轮廓和细节信息, 增强了散斑干涉条纹的对比度。

**关键词** 图像处理; Goldstein 滤波; 数字散斑干涉; 傅里叶变换; 四步相移

中图分类号 TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.021002

## Digital Speckle Fringe Pattern Denoising Method Based on Goldstein Filtering

Gu Guoqing Wang Kaifu Xu Xing

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Getting rid of the noises is the key problem in digital speckle pattern interferometry (DSPI). A method based on Goldstein filtering for digital speckle fringe pattern smoothing is proposed. This algorithm maps the raw speckle interferogram to unit vectors in vector space and transforms them to frequency domain by fast Fourier transform (FFT). Then the weighting function is selected to weight the spectrum. The frequency of the speckle noises can be suppressed. Finally, the processed spectrum is transformed to space domain by inverse FFT and phases of filtering results are calculated. The filtering technique is used for the four-step phase-shifting digital speckle image processing. The experimental result shows that the speckle noise in the speckle fringe patterns is removed efficiently and the information of the fringe contour and structure is well preserved. The proposed method can increase the contrast of DSPI fringes.

**Key words** image processing; Goldstein filtering; digital speckle pattern interferometry; Fourier transform; four-step phase-shifting

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 120.6160; 120.6165

## 1 引言

数字散斑干涉技术(DSPI)是一种重要的现代光测实验力学技术,具有测量灵敏度高、全场非接触、可用于现场测量等优点。它被广泛应用于物体变形测量、振动分析、光学表面粗糙度测量、三维形貌测量、振动测试以及无损检测等领域<sup>[1~3]</sup>。高精度快速提取全场相位信息是数字散斑干涉技术成功应用的关键。相移法是目前精确提取全场相位信息的方法之一,它可以分为时间相移和空间相移。相移法需要用变形前或变形后至少3幅散斑条纹图来获得相位图,但是获得的相位图一般都存在很高的噪声,需要专门的方法来去除相

收稿日期: 2011-09-15; 收到修改稿日期: 2011-10-13; 网络出版日期: 2011-12-07

基金项目: 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ11-01)资助课题。

作者简介: 顾国庆(1984—),男,博士研究生,主要从事光学计量和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: gqgu@nuaa.edu.cn

导师简介: 王开福(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事现代光测力学技术及数字图像处理等方面的研究。

E-mail: kfwang@nuaa.edu.cn(通信联系人)

位图的噪声<sup>[3]</sup>,然后利用解包裹技术获得全场相位分布图。由于散斑干涉条纹图上总是附带有散斑噪声,因此,为了减少测量误差,在分析干涉条纹图之前,经常需要用适当的方法对其进行滤波降噪处理。由此可见,去除数字散斑干涉条纹图的噪声、增强条纹的对比度是相移技术应用的基础。

散斑干涉条纹图的滤波技术已有很多,主要可分为传统的滤波方法和针对条纹图特点的滤波方法。前者主要包括邻域均值滤波、中值滤波以及频域低通滤波方法<sup>[2]</sup>;后者主要有旋滤波、同态滤波、曲面大窗口滤波以及偏微分方程(PDE)滤波方法<sup>[4~9]</sup>。此外,还有其他的一些滤波方法,如小波变换法、窗口傅里叶变换法(WFT)、Gabor 滤波法<sup>[10~12]</sup>及基于剪切干涉原理的滤波算法<sup>[13]</sup>等。这些方法都在去除散斑干涉条纹图噪声方面取得了良好效果。

1998年,Goldstein等<sup>[14]</sup>提出了Goldstein滤波算法,即局域频率加权滤波方法,并将其应用于合成孔径雷达(SAR)干涉条纹图噪声去除中,去除了大量的噪声,取得了较好的滤波效果。考虑到数字散斑条纹图与合成孔径雷达条纹图都属于光学干涉条纹图,本文将Goldstein滤波算法用于数字散斑干涉条纹图的噪声滤除,并与传统滤波方法,如同态滤波、频域Butterworth低通滤波以及PDE滤波和Gabor滤波后的结果进行比较。由于充分利用了干涉条纹信息和噪声信息在频带上分布的差异性,该滤波方法在有效滤除散斑噪声的同时还较好地保留了散斑条纹图的条纹结构。

## 2 Goldstein 滤波基本原理

Goldstein滤波方法是一种频域非线性滤波方法,能够突出频域中的主要频率成分,抑制噪声。图1为Goldstein滤波方法的具体实施流程图<sup>[15]</sup>。为了便于说明滤波过程,设原始干涉条纹图像中的干涉相位值为 $\phi(x,y)+n(x,y)$ ,它映射到矢量空间中的单位矢量为 $\exp\{j[\phi(x,y)+n(x,y)]\}$ ,其中 $(x,y)$ 代表干涉图中某像素的位置, $n(x,y)$ 表示干涉图中像素 $(x,y)$ 处的相位噪声, $\phi(x,y)$ 表示真实干涉相位的主值。

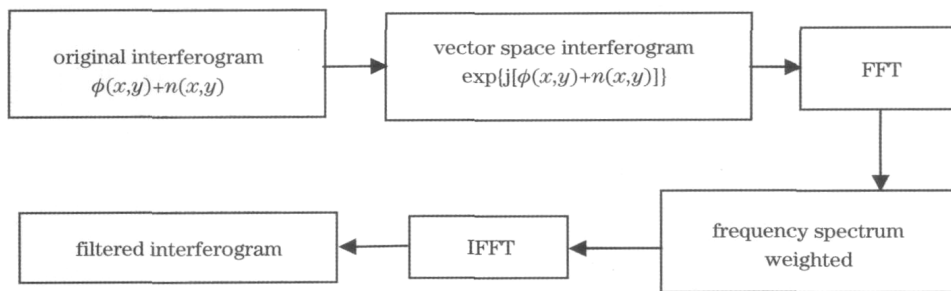


图1 Goldstein滤波方法流程图

Fig. 1 Flow chart of Goldstein filtering method

Goldstein滤波方法可以分为以下几个处理步骤<sup>[14]</sup>。

1) 将原始干涉条纹图的干涉相位 $\phi(x,y)$ 映射为矢量空间中的单位矢量:

$$E(x,y) = \exp[j\phi(x,y)] = \cos[\phi(x,y)] + j\sin[\phi(x,y)]. \quad (1)$$

2) 在 $E(x,y)$ 中选取一定大小的滤波窗口 $E^{(w)}(x,y)$ 进行二维快速傅里叶变换(FFT),获得频谱数据 $F^{(w)}(u,v)$ , $u$ 和 $v$ 表示空间频率。

3) 将频谱幅值 $|F^{(w)}(u,v)|$ 与选取的核函数 $K$ 做平滑处理,得到 $|F_K^{(w)}(u,v)|$ ,并按最大值 $\max |F_K^{(w)}(u,v)|$ 归一化。

4) 以

$$F^{(w)}(u,v) = F^{(w)}(u,v) |F^{(w)}(u,v)|^k \quad (2)$$

所示的加权函数对原始频谱数据 $F^{(w)}(u,v)$ 进行处理,然后对处理后的频谱做二维傅里叶逆变换(IFTT),即可得到滤波后的结果 $E_G^{(w)}(x,y)$ 。(2)式中 $k(0 \leq k \leq 1)$ 为频域滤波器加权函数的幂指数。对于频率的加权,可以采用幂函数加权、正弦函数加权以及指数函数加权等。

5) 将滤波窗口在 $E(x,y)$ 上顺序移动,进行上述滤波处理,直至 $E(x,y)$ 处理完毕,记滤波结果为 $E_G(x,y)$ ,然后再对 $E_G(x,y)$ 取相位主值,得到 $I_G(x,y)$ ,即为Goldstein方法干涉相位图的滤波结果。

### 3 Goldstein 滤波应用于数字散斑图像处理

双光束数字散斑干涉可以分别用来测量面内位移和离面位移。图 2 是测量离面位移的数字散斑干涉光路图。图 2 中物光波和参考光波由同一光源发出,经分光镜后分成两束相干光。一束光波照射到被测物体表面,由物体表面散射回来的光波透过分光棱镜到达 CCD 像面。由参考平面反射回来的参考光波经分光棱镜反射后也到达 CCD 像面。这样,在 CCD 成像面上物体表面散射光波与反射参考光波干涉形成散斑干涉场。

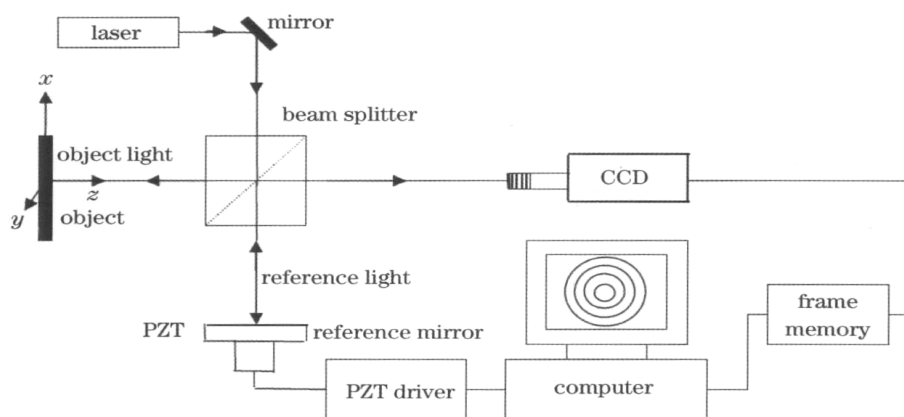


图 2 双光束数字散斑干涉原理图

Fig. 2 Schematic for dual-beam DSPI

物体变形前,像平面上任意一点 $(x, y)$ 的光强可表示为

$$I_1(x, y) = I_o + I_r + 2 \sqrt{I_o I_r} \cos \varphi, \quad (3)$$

式中 $I_o$ 和 $I_r$ 分别为物光和参考光强度, $\varphi$ 是一个随机散斑相位。

当物体某点 $(x, y)$ 沿观测方向(与像平面垂直)发生 $w$ 的离面变形后,将引起 $\delta$ 的相位改变,此时像面上点 $(x, y)$ 的光强可以表示为

$$I_2(x, y) = I_o + I_r + 2 \sqrt{I_o I_r} \cos(\varphi + \delta). \quad (4)$$

这里采用相减模式对变形前后的散斑干涉场图像进行处理,相减所得差的平方可表示为<sup>[2]</sup>

$$(I_1 - I_2)^2 = 8 I_o I_r \sin^2 \left( \varphi + \frac{\delta}{2} \right) (1 - \cos \delta), \quad (5)$$

式中 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} w$ ,即离面变形所引起的相位变化。(5)式有两个互相调制的函数项,后者变化幅度比较平缓,在傅里叶变换中产生低频,对应着数字散斑干涉条纹图中的条纹信息;前者反映了数字散斑干涉中的随机散斑噪声的特点,在傅里叶变换中与高频分量有关。

由于 Goldstein 滤波方法是一种频域非线性滤波方法,因此可以利用该滤波方法抑制数字散斑干涉条纹图中的相位噪声,即随机散斑噪声,而保留散斑干涉图的相位主值,即条纹信息。首先将原始散斑干涉条纹图的干涉相位主值转换为矢量空间中的正余弦单位矢量,并做傅里叶变换,选择合适的低通滤波窗口进行滤波得到频谱分布;然后对频谱幅值进行归一化并选择加权函数进行加权处理,频谱加权可以采用幂函数加权、正弦函数加权和指数函数加权等;最后对处理后的频谱做傅里叶逆变换,变换到空间域,得到矢量空间中的相应复数值,计算滤波后干涉图的相位值,从而得到滤波后的数字散斑干涉条纹图。

### 4 实验结果及分析

实验中被测对象是一块半径为 26 mm、厚度为 3 mm 的圆形铝板,周边固支,受到中心集中载荷的作用。实验中使用的光源是功率为 30 mW、波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器。图 3(a)(大小为 576 pixel × 768 pixel)为实验得到的原始散斑条纹图,它描述了周边固支、中心受载的圆板的离面位移。从图 3(a)可以看出,初始条纹图含有大量随机噪声。图 3(b)~(f)分别为其对应的同态滤波方法、频域 Butterworth 低通滤波方法、PDE

滤波方法、Gabor 滤波方法以及本文 Goldstein 滤波方法得到的滤波结果。对比实验结果发现,采用同态滤波方法滤波后的条纹内部仍有明显的噪声存在;频域 Butterworth 低通滤波方法虽然能滤除大量的散斑噪声,但是散斑条纹轮廓趋于模糊,条纹细节信息损失;PDE 滤波方法滤波后的散斑图像中存在严重的“块效应”;Gabor 滤波和 Goldstein 滤波方法都能保持条纹对比度和平滑条纹内部噪声。相比之下,Goldstein 滤波方法能更好地增强条纹对比度,因此滤波效果更佳。

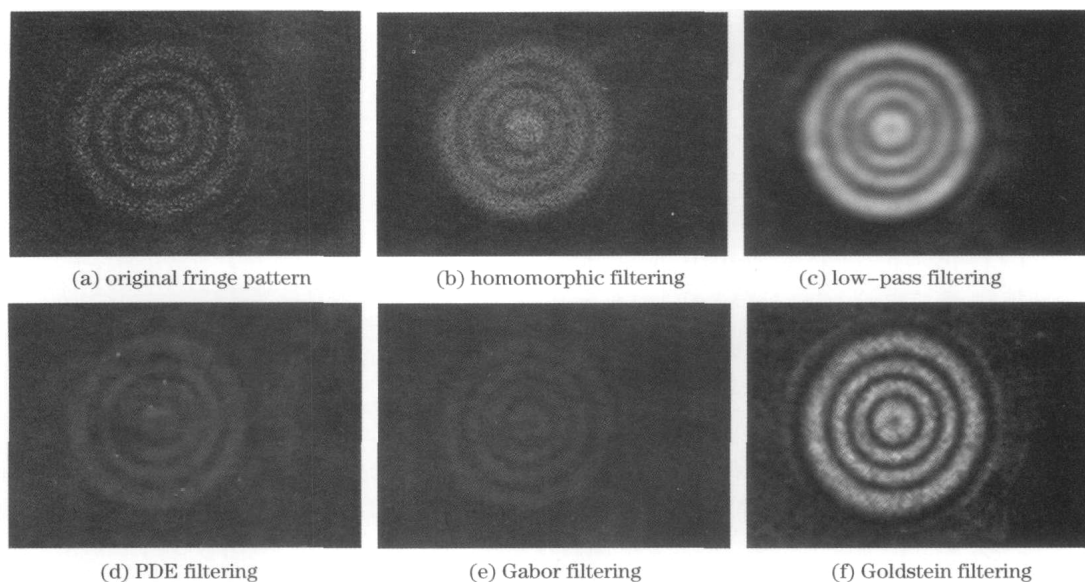


图 3 实验散斑条纹图及其滤波结果

Fig. 3 Experimental fringe patterns by DSPI and its filtered images

图 4 是图 3 的各个滤波结果中间行的灰度分布曲线。从曲线图中可以看出,图 4(a)曲线的波峰波谷过渡不自然,灰度曲线锯齿现象明显,这说明同态滤波的结果整体对比度最差;同时,在图 4(a)曲线的波峰处有明显的起伏,表明滤波后的亮条纹内部仍然存在较严重的噪声。图 4(b)曲线的波峰波谷差值很小,这说明频域 Butterworth 低通滤波的结果整体对比度较差,条纹轮廓不清晰。图 4(c)曲线的波峰有尖有平,表明 PDE 滤波后的结果中有严重的“块效应”,这也是传统 PDE 滤波算法不可避免的问题。图 4(d)、(e)曲线的

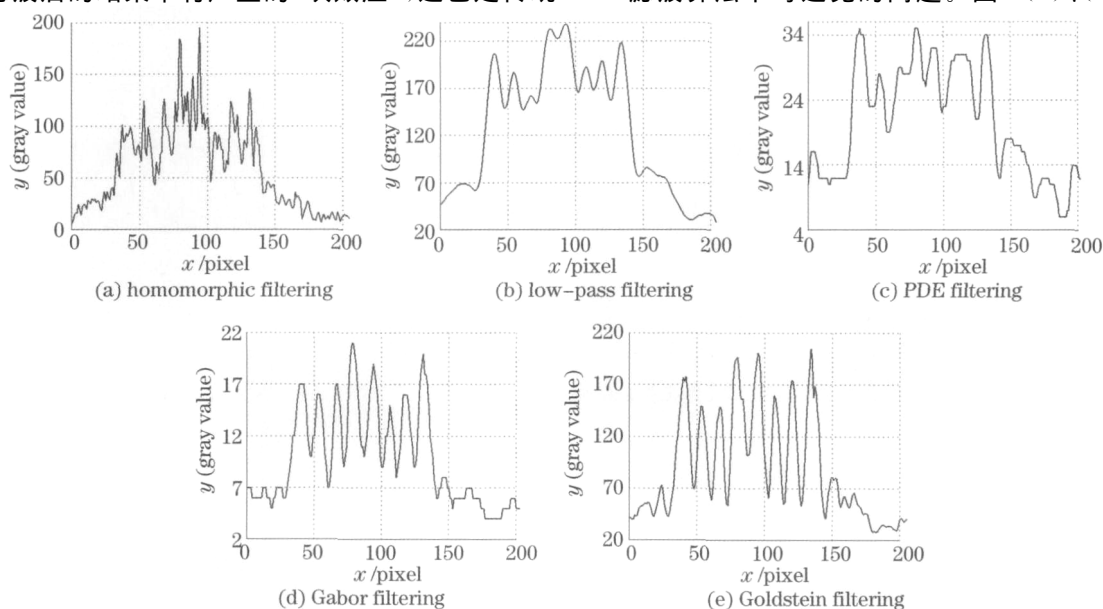


图 4 图 3 中各滤波结果中间行的灰度分布曲线

Fig. 4 Gray-distribution curves for the cross section of the middle-row of each filtered result in Fig. 3

波峰波谷过渡自然,曲线光滑,表明条纹对比度明显优于前三者滤波的结果。但是,图 4(d)曲线中灰度值明显降低,这说明经 Gabor 滤波后的条纹图变暗,对比度下降厉害,条纹轮廓信息不明显。相比之下,Goldstein 滤波方法能较好地去掉条纹图中的噪声和突出条纹轮廓细节,并很好地保持了原始散斑条纹图的相位信息。

由于对频谱加权可以采用不同的加权函数,因此有必要比较分析采用不同加权函数进行频谱加权时 Goldstein 滤波方法的滤波效果。分别选取幂函数、正弦函数和指数函数进行频谱加权,并选取不同的加权因子  $k$  对另一实验获得的数字散斑干涉条纹图分别进行滤波处理。图 5 为实验得到的一幅表示离面位移梯度(斜率)分布的数字散斑条纹干涉图。

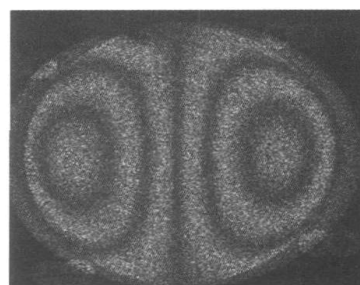


图 5 实验获得的表示离面位移梯度分布的数字散斑图像

Fig. 5 Experimental fringe pattern by DSPI corresponding to slope distribution

对于三种加权函数,分别采用加权因子  $k=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  等值进行了实验。图 6~8 分别为幂函数、正弦函数、指数函数加权滤波结果。从图中可以看出,幂函数加权和指数函数加权滤波效果相近,都可以很好地去除散斑噪声。而正弦函数加权滤波结果明显达不到满意的效果,随着加权因子逐渐增大,滤波效果也逐渐变差。因此,采用幂函数和指数函数加权相比正弦函数加权可以得到更好的滤波效果。同时从图 6、8 中还可以看出,加权因子越大,滤波后的干涉图中噪声也越少,但滤波后的干涉图越来越趋于模糊,可能会引起较大的相位改变。另外,当加权因子  $k=0.2$  时,幂函数加权滤波效果优于指数函数加权。综上所述,幂函数和指数函数加权的最佳加权因子为  $k=0.4$ 。

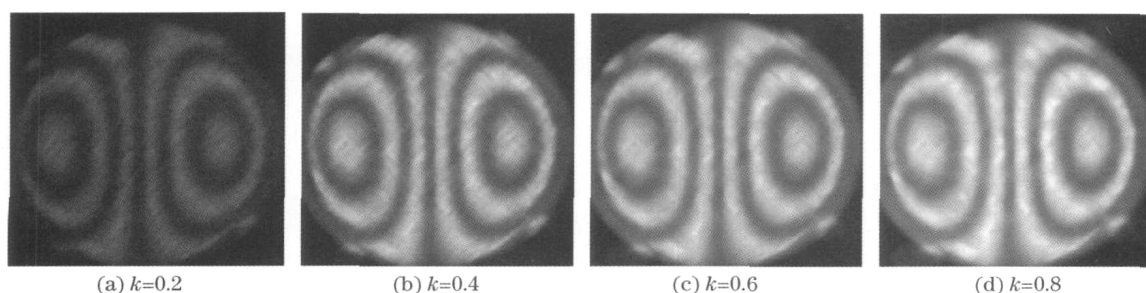


图 6 幂函数加权滤波结果

Fig. 6 Filtered results weighted by power function

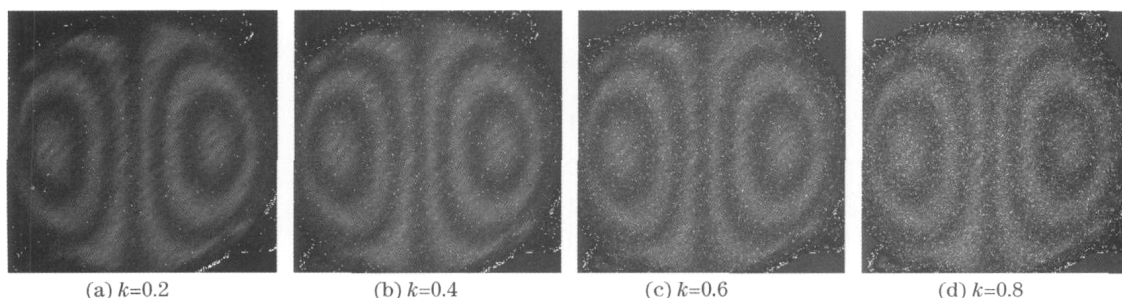


图 7 正弦函数加权滤波结果

Fig. 7 Filtered results weighted by sine function

为了验证 Goldstein 滤波方法去噪的有效性,对实验中得到的真实相移数字散斑条纹图进行处理。相移是通过驱动压电陶瓷相移器(PZT)引入的,相移步进量为  $2\alpha(110^\circ)$ 。本实验 Goldstein 滤波过程中频谱加权采用的是幂函数加权。图 9 显示了加权因子  $k=0.4$  时,用 Goldstein 滤波方法进行滤波处理的结果。可以看出,四幅相移散斑条纹图中的散斑噪声都得到了有效去除。与此同时,原始散斑条纹图中的条纹轮廓结

构与细节信息则被有效地保留了下来,条纹的对比度得到了很大的提高。

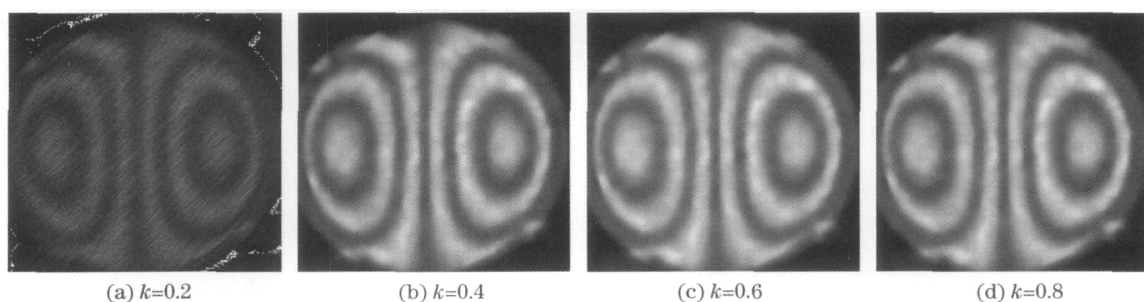


图 8 指数函数加权滤波结果

Fig. 8 Filtered results weighted by exponential function

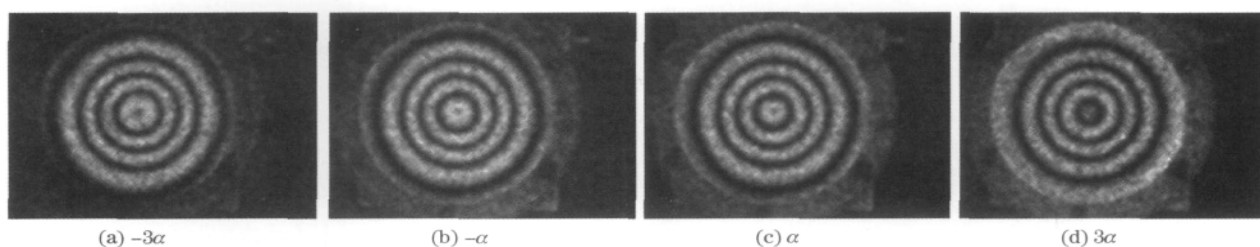


图 9 Goldstein 滤波后的相移数字散斑条纹图

Fig. 9 Phase-shifting digital speckle fringes processed by Goldstein filtering

另外,Goldstein 滤波效果的好坏也可以从通过等四步相移 Carré 算法计算得到的相位分布图来观察。相位分布图的差别可以反映滤波的好坏,因此可以根据相位分布图的连续性来检验滤波结果的有效性。图 10(a),(b)分别为 Goldstein 滤波后散斑解包裹相位二维(2D)和三维(3D)分布图。从图 10 可以看出,解包裹后的相位分布连续光滑,没有出现拉线间断的现象,从而说明 Goldstein 滤波方法用于散斑条纹图降噪处理是有效可行的。由于连续的相位分布反映了相位在空间的变化,而相位的变化又是由变形引起的,因此也可以从相位的空间分布看出物体变形的情况。

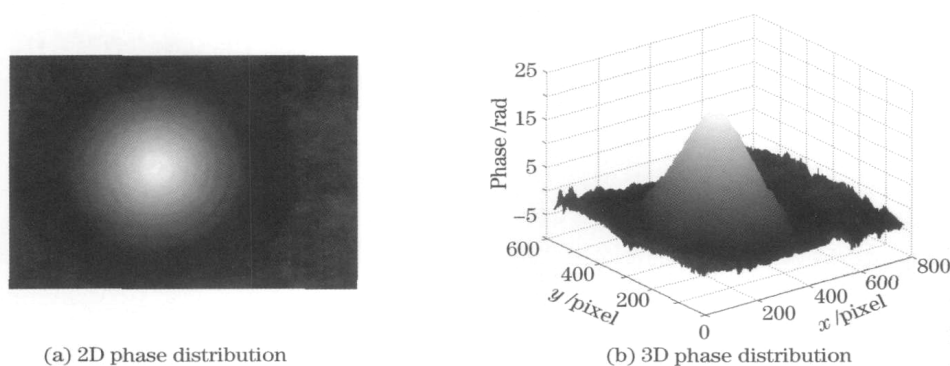


图 10 解包裹相位 2D,3D 分布图

Fig. 10 2D and 3D unwrapped phase distribution maps

本文的计算工作都是在 Matlab R2010b 语言环境下进行的。图像处理所用计算机为英特尔酷睿 2、四核、2.66 GHz 处理器,4 Gb 内存。数字散斑干涉条纹图 Goldstein 滤波处理过程所用时间约为 45 s。散斑条纹图中大量的噪声被滤除,条纹信息突出,相位解包裹采用的是简单的行列扫描解包裹算法。因此,Goldstein 滤波方法不仅滤波效果明显,还大大降低了后续相位展开的难度。

## 5 结 论

提出了一种基于 Goldstein 滤波的数字散斑条纹图降噪方法。与传统的滤波方法相比,Goldstein 滤波

方法充分利用条纹信息和噪声信息在频谱上分布的差异性进行噪声的去除;而较之针对条纹图特点的滤波方法,如旋滤波、PDE 滤波、Gabor 滤波等,该滤波方法具有算法简单、易编程、计算速度快等优点。Goldstein 滤波虽然属于频域滤波方法,但它是一种有效、简单的光学干涉条纹降噪处理的非线性滤波方法,它能很好地抑制噪声,较好地保持相位分辨率。将 Goldstein 滤波方法用于数字散斑干涉条纹图像的滤波降噪处理,取得了良好的滤波效果。经滤波降噪处理后的散斑干涉条纹图像呈现明显的亮带和暗带,对比度得到了进一步的提高,进而降低了后续相位解包裹的难度。相位分布图亮暗过渡平滑、连续性好。实验结果表明 Goldstein 滤波方法在去除大量散斑噪声的同时也很好地保护了数字散斑干涉条纹的轮廓与结构信息,是一种快速、有效的数字散斑条纹图滤波降噪方法。

### 参 考 文 献

- 1 P. K. Rastogi. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques [M]. New York: John Wiley and Sons Ltd., 2001. 141~224
- 2 Wang Kaifu, Gao Minghui. Speckle Metrology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. 94~107  
王开福, 高明慧. 散斑计量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010. 94~107
- 3 Jin Guanchang. Computer-Aided Optical Metrology (2nd ed.) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. 78~126  
金观昌. 计算机辅助光学测量(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. 78~126
- 4 Qifeng Yu, K. Andresen. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3705~3711
- 5 Yu Jingwei. A system of image processing based on ESPI [J]. *Information Technology*, 2003, **27**(4): 41~43  
于景伟. 基于 ESPI 的图像处理系统[J]. 信息技术, 2003, **27**(4): 41~43
- 6 Wang Qi, Jiang Lihui, Li Ning *et al.*. Based on combining homomorphic and adaptive fuzzy multilevel median filtering for restoration of image degraded by speckle noise [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 655~657  
王 骐, 蒋立辉, 李 宁 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): 655~657
- 7 Qifeng Yu, X. Sun, X. Liu. Spin filters with curve windows for interferometric fringes [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(14): 2650~2654
- 8 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
- 9 Tang Chen, Ren Hongwei, Chen Xia *et al.*. Reviews and trends of image processing method based on partial differential equations for electronic speckle pattern interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 021201  
唐 晨, 任宏伟, 陈 霞 等. 电子散斑干涉条纹处理偏微分方程方法的回顾与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 021201
- 10 L. R. Watkins, S. M. Tan, T. H. Barnes. Determination of interferometer phase distributions by use of wavelets [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13): 905~907
- 11 Qian Kema. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2695~2702
- 12 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
- 13 Qian Xiaofan, Rao Fan, Lin Chao *et al.*. Speckle noise reduction algorithm based on 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
- 14 R. M. Goldstein, C. L. Werner. Radar interferogram filtering for geophysical applications [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(21): 4035~4038
- 15 Jin Guowang, Xu Qing, Qin Zhiyuan. Filtering algorithms for INSAR interferograms [J]. *J. System Simulation*, 2006, **18**(9): 2563~2565  
靳国旺, 徐 青, 秦志远. INSAR 干涉图的滤波方法[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(9): 2563~2565