

文章编号 1004-924X(2018)04-0936-08

基于能量的 DSPI 相位图正余弦降噪

肖启阳¹, 李 健^{1*}, 吴思进^{2*}, 杨连祥^{2,3}, 董明利², 曾周末¹

(1. 天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100101;

3. 奥克兰大学 机械工程系, 美国密歇根州罗彻斯特 48309)

摘要:针对数字散斑干涉(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)测量中散斑噪声干扰会导致相位提取困难、测量灵敏度降低的问题,提出基于能量的 DSPI 相位图正余弦滤波法,克服传统滤波方法不具有自适应性的不足,提高了相位图质量。该方法根据正交小波包能量估算 DSPI 相位图中的噪声能量;对相位图分别进行正余弦变换,采用均值法平滑处理;利用噪声能量设定滤波阈值,实现相位图有效滤波,文中将噪声能量与正余弦滤波结合可以自适应地进行降噪处理,利用能量控制图像滤波效果。仿真和实验结果表明,基于能量的正余弦滤波法较传统方法可以减少 50% 的循环次数。证明了本文提出的方法能够有效地对数字散斑干涉相位图进行滤波,提高信噪比。

关键词:数字散斑干涉技术;相位图;正余弦滤波;噪声能量

中图分类号:0439 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182604.0936

Denoising of DSPI phase map using sine-cosine filtering and signal energy

XIAO Qi-yang¹, LI Jian^{1*}, WU Si-jin^{2*}, YANG Lian-xiang^{2,3}, DONG Ming-li², ZENG Zhou-mo¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information
Science and Technology University, Beijing 100192;

3. Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester MI48309, USA)

* Corresponding author, E-mail: tjupipe@tju.edu.cn; swu@bistu.edu.cn

Abstract: The speckle noise in digital speckle pattern interferometry (DSPI) results in difficulty in phase extraction and decreases measurement sensitivity. A denoising method using sine-cosine filtering and signal energy was proposed to smooth phase maps of DSPI. It exceeded traditional sine-cosine denoising method in adaptively and phase map quality. In the method, noise energy of DSPI phase map was estimated by energy of orthogonal wavelet packet. The phase map was transformed by sine-cosine method and was smoothed by average filtering. The phase map was finally denoised efficiently after the noise threshold was set by the noise energy. The combination of noise energy and sine-cosine

收稿日期:2017-08-22;修订日期:2017-09-26.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2016YFF0101802);国家自然科学基金资助项目(No. 51675055)

filtering reduced noise adaptively. The image filtering effect was controlled by the noise energy. Emulational and experimental results both show that the proposed method can reduce the number of cycles by 50% compared to conventional methods. The proposed method can also filter the DSPI phase maps effectively and improve the noise ratio.

Key words: Digital Speckle Pattern Interferometry(DSPI); phase map; sine-cosine filtering; noise energy

1 引言

数字散斑干涉技术(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)是一种全场光测量技术,它具有非接触、实时测量、高精度以及高灵敏度等特点,因此在无损检测、生物医学检测、精密机械制造、振动测量和材料力学性能评估等领域获得广泛应用^[1-3]。DSPI通过计算干涉相位图来确定最终待测的物理量,然而测量所得的相位图由于散斑噪声干扰,导致信噪比差、相位测量灵敏度低,严重影响后续相位解包裹的结果和精度^[4-5]。因此,有必要对散斑相位图进行降噪处理,提高图像的信噪比,减小测量误差。

由于相位求解过程中反正切函数值域的限制,DSPI所测得的原始相位 2π 图是真实相位的余数,在 $[-\pi, \pi]$ 区间内变化,存在相位突变现象^[6]。对于这种不连续的数字图形,常规的降噪方法——均值滤波法和中值滤波法均存在各自的问题^[7]。均值滤波法是一种线性滤波方法,该方法是将图像上的目标像素点的值用以其为中心的周围的若干个像素值的平均值来代替^[8]。均值滤波法在滤除噪声的同时也破坏了图像的细节部分,导致处理后的图像变得模糊,使相位突变的信息丢失^[9];中值滤波法是将目标点的领域内各点的中值用来代替该点的值,该方法是一种非线性降噪方法^[10]。与线性滤波方法相比,中值滤波方法在降噪的同时可以保留边缘信息,且方法简单,易于实现,然而该方法计算时间长,平滑效果较差。对于DSPI相位图,正余弦滤波法是一种有效的降噪方法^[11]。该方法对相位进行正余弦变换,并对变换后的正余弦函数进行均值平滑处理,该方法在滤波的同时能够保留相位图的突变信息,增强干涉条纹的清晰度,因此在DSPI检测方面获得广泛应用^[12-13]。然而,该方法不具备自适应性,需要人工预先设置循环次数,容易导致欠滤

和过滤现象。欠滤无法完全消除噪声,会影响后续相位解包裹过程;过滤则导致相位失真现象严重,会增大DSPI测量误差。

本文针对传统正余弦滤波方法不具有自适应性的不足,提出基于能量的DSPI相位图正余弦滤波方法。该方法以噪声能量作为判断依据,通过评估滤波前后相位图噪声能量的变化,可以自动、准确地确定合适的滤波循环次数,增强滤波效果,提高相位图质量,同时也消除了人工干预步骤,提高了相位图滤波的自动化程度。

2 基于能量的 DSPI 相位图正余弦降噪

高斯白噪声广泛存在于各种信号中,该噪声由于具有特有的统计特性获得广泛关注^[14-15]。高斯白噪声在任意两个不同时刻上的随机变量之间,不仅互不相关,而且还是统计独立的,它的均值为零,方差为固定值。为此,结合小波包分解,根据高斯白噪声的能量估计DSPI相位图的噪声能量,根据能量设定滤波阈值,控制滤波循环次数,可以对相位图进行有效降噪处理。具体步骤如下:

(1)对任意含加性噪声图片的数学表达式如下:

$$\varphi(i, j) = u(i, j) + n(i, j), \quad (1)$$

其中: $\varphi(i, j)$ 为含噪图片, $n(i, j)$ 为噪声分量, $u(i, j)$ 为降噪后的分量。

(2)对其进行离散小波包分解,分解结果如下:

$$W_f(i, j) = W_u(i, j) + W_n(i, j). \quad (2)$$

(3)计算离散小波包分解后的能量;

$$E_f(i, j) = E_u(i, j) + E_n(i, j). \quad (3)$$

式中 $E_f(i, j)$, $E_u(i, j)$, $E_n(i, j)$ 分别为含噪图片、降噪后图片及噪声分量的小波包能量。其中,噪

声的小波包能量为:

$$E_n(i, j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [W_n(i, j)]^2. \quad (4)$$

(4) 高斯白噪声均值为 0, 方差为 δ^2 , 那么噪声的小波包能量还可以表达为:

$$E_n(i, j) = 2^m M \times N \times \delta^2 [\sum h^2(i)] [\sum g^2(i)], \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\text{Median}(|Y_{ij}|)}{0.6745}, \quad (6)$$

其中: $M \times N$ 表示图像大小, Y_{ij} 是小波包分解出的第一层小波系数, h 和 g 分别为小波函数的低通和高通滤波器系数。

(5) 根据小波包分解的正交定理, 那么:

$$\sum h^2(i) = \sum g^2(i) = 1. \quad (7)$$

噪声分量的总能量数学表达式为:

$$E_n(i, j) = 2^m M \times N \times \delta^2. \quad (8)$$

当对图像进行降噪处理, 噪声的方差保持不变, 根据式(8)可估算噪声能量, 利用噪声能量获得降噪后图片的能量。随着滤波次数的增加, 降噪后的能量将逐步减小, 最终趋向固定值, 即图像能量收敛于某一数值。

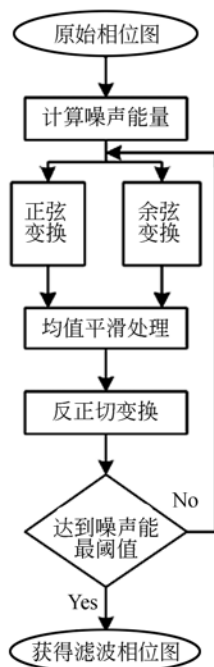


图 1 基于能量正余弦滤波流程图

Fig. 1 Flow chart of sine-cosine filtering based on signal energy

基于能量的正余弦滤波法根据小波包时频分解的噪声能量保持特性估计噪声能量, 利用噪声能量作为阈值, 对循环滤波后的结果进行判断, 经过多次循环获得合适的滤波相位图。该方法流程图如图 1 所示。

3 正余弦滤波

3.1 原理

传统的正余弦滤波法是一种将正余弦变换与均值平滑处理相结合的方法, 该方法在滤除噪声的同时能够保留图像的阶跃信息, 其具体步骤如下:

(1) 假设原始相位图的值为 ϕ , 相位图任意一点为 (i, j) , 分别计算正余弦图, 得到:

$$t_1 = \sin \phi, \quad t_2 = \cos \phi, \quad (9)$$

$$-\pi \leq \phi \leq \pi, \quad 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N$$

其中: t_1 为正弦图, t_2 为余弦图, $M \times N$ 表示图像大小。

(2) 采用均值滤波的方法分别对正余弦图平滑处理, 结果如下:

$$T_1(i, j) = \frac{1}{P \times Q} \sum_{k=i-P/2}^{i+P/2} \sum_{l=j-Q/2}^{j+Q/2} t_1(k, l), \quad (10)$$

$$T_2(i, j) = \frac{1}{P \times Q} \sum_{k=i-P/2}^{i+P/2} \sum_{l=j-Q/2}^{j+Q/2} t_2(k, l), \quad (11)$$

其中: $P \times Q$ 表示以点 (i, j) 为中心的滤波窗口, T_1, T_2 表示平滑后的正弦图、余弦图。

(3) 利用平滑后的正余弦图计算相位图:

$$\phi = \arctan\left(\frac{T_1}{T_2}\right). \quad (12)$$

传统的正余弦滤波法计算简单, 且能够有效地滤除噪声干扰, 因此获得广泛应用。然而该方法滤波前需要人工设定循环次数, 通过观察图像质量的变化, 来确定滤波次数是否合适。由于人工判断不够精确, 容易导致滤波循环次数过少或过多, 无法控制滤波后的图像质量。循环次数较少会无法完全滤除噪声, 导致相位解包裹误差变大, 甚至失败; 循环次数过多则会造成相位失真, 同样降低了测量精度。且人工干预滤波过程也降低了测量过程的自动化。

下面以仿真相位图为例对传统正余弦滤波方法的局限性进行阐述。

3.2 仿真实验

DSPI 所测得的原始相位是真实相位关于模为 2π 的包裹相位,其数学表达式如下:

$$\varphi_2 = \text{mod}(\varphi_1, 2\pi), \quad (13)$$

其中 φ_1 为真实相位。假设 φ_1 沿图像宽度方向线性变化,沿图像高度方向不变,根据式(13),可得到仿真包裹相位图,取其中一行的数据进行分析,结果如图 2 所示。将均值为 0,方差为 0.75 的随机散斑噪声加入图 2 中,得到如图 3 所示的含有噪声的模拟相位图。该相位图与 DSPI 实际所测得的原始相位图类似。

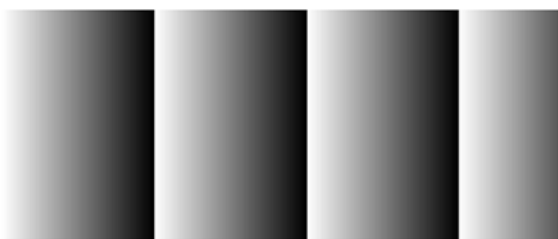


图 2 仿真相位图

Fig. 2 Simulated phase map

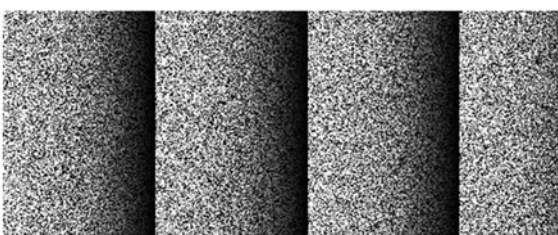


图 3 含有噪声的仿真相位图

Fig. 3 Simulated phase map with noise

采用传统的正余弦滤波法对含噪相位图进行处理,分别进行 5 次循环和 40 次循环滤波,对应欠滤和过滤两种情况。结果如图 4 和图 5 所示。

观测图 4,采用传统滤波方法对相位图处理的时候,当滤波循环次数较少的时候,该方法不能

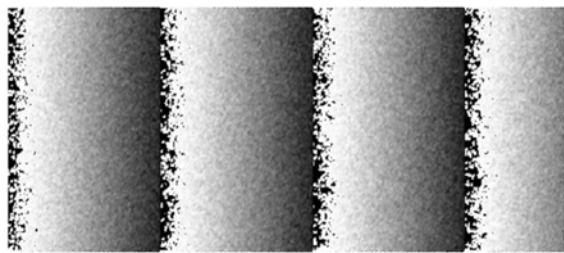


图 4 5 次循环滤波后的相位图

Fig. 4 Smoothed phase map obtained after 5-circle denoising



图 5 40 次循环滤波后的相位图

Fig. 5 Smoothed phase map obtained after 40-circle denoising

完全滤除噪声,相位图中还含有部分噪声。分析图 5,采用 40 次循环滤波,相位图向右移动,虽然能够完全滤除噪声,但相位图严重失真,导致较大的测量误差。两种情况下所得到的相位图与图 2 所示的仿真相位图相比差别较大,说明了欠滤和过滤两种情况都不能得到正确的结果,增加了测量误差。而传统正余弦法由于采用人工判断控制循环次数,容易导致欠滤和过滤的情况,因此滤波效果欠佳。

为了对比,采用基于能量的 DSPI 相位图正余弦滤波法对图 2 所示的仿真图片进行处理。首先估计图片的噪声能量,估计的噪声能量为 238.828 J,基本上接近加入的噪声能量。然后根据噪声能量进行正余弦循环滤波法,控制滤波后的图片质量。所得到的滤波后的相位图如图 6 所示,可以看出,与图 2 所示的原始图像非常相似,说明滤波效果理想,引起误差较小。

为了更加清晰地对比本方法和传统正余弦滤波法的效果,分别取图 6 和图 5 中间一行的数据与图 2 所示的原数据进行对比,结果如图 7 所示。

分析图 7 可知,传统的正余弦法过滤时产生的相位存在明显的移位,测量误差较大。本文提

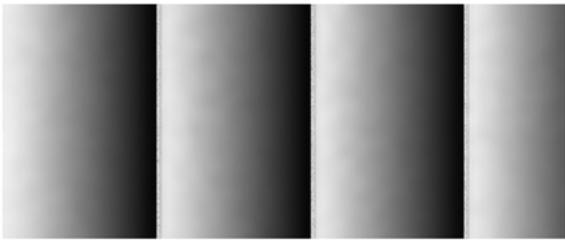


图 6 基于能量正余弦滤波方法所得到的相位图

Fig. 6 Smoothed phase map obtained by sine-cosine filtering based on signal energy

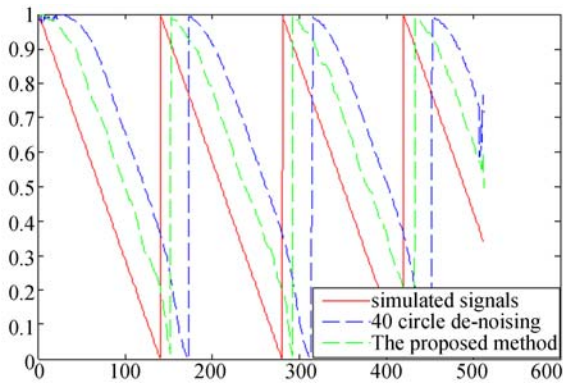


图 7 相位沿水平方向变化曲线

Fig. 7 Phase distributions in horizontal direction

出的方法尽管也有一定的移位,但条纹位置基本不变,所以该方法不仅能够自适应地滤除噪声,且能够最大程度地保留相位信息,减小滤波导致的相位误差。

为了进一步验证本文提出的方法,采用实测实验数据进行分析。

4 实验结果与分析

4.1 采集散斑干涉相位图

搭建如图 8 所示的数字散斑干涉测量系统,其中图像传感器采用日本的 SENTECH 公司的 STC-CL152A 数字相机,其 CCD 靶面尺寸为 1/2 in, $h \times v = 6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$,成像镜头采用日本腾龙公司的焦距 f 为 8 mm 的镜头(2/3 in),光源采用波长为 532 nm 的单纵模固体激光器,被测物为四周固定、中心加载的圆盘状铜片。

通过对圆盘中心加载,使之产生面外变形,测量得到其面外变形相位图,如图 9 所示。可以看出该图包含较多散斑噪声,需要对其进行降噪处理,以便进行后续相位解包裹操作。

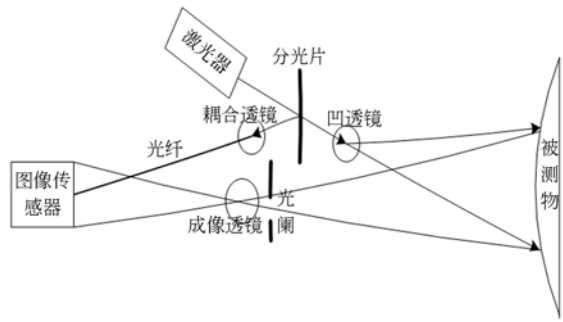


图 8 DSPI 物体面外变形测量光路示意图

Fig. 8 Optical set of out-of-plane deformation measurement using DSPI

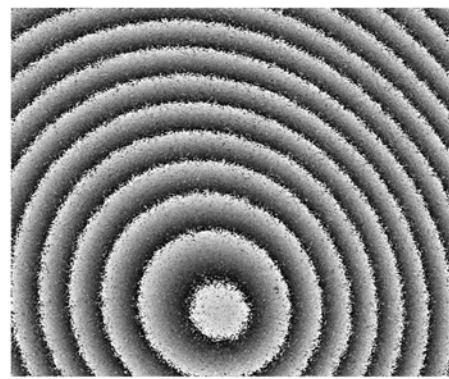
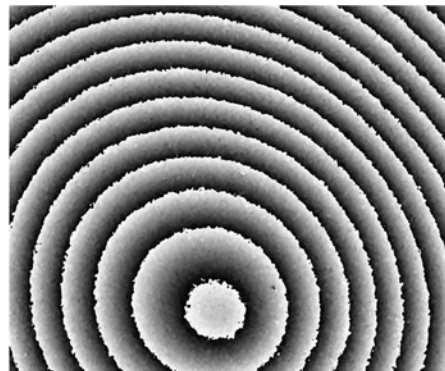


图 9 面外变形相位图

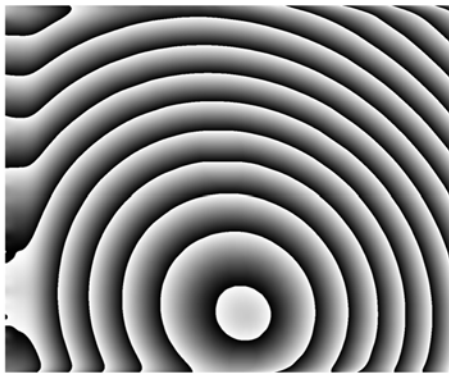
Fig. 9 Phase map of out-of-plane deformation

4.2 对相位图进行降噪处理

针对实验所得到的原始相位图,首先利用传统的正余弦相位滤波法进行处理,循环次数分别设定为 8 次和 40 次,滤波结果如图 10(a)和 10(b)所示。



(a) 8 次循环滤波
(a) Eight cycles



(b) 40 次循环滤波
(b)Forty cycles

图 10 传统正余弦滤波法所得到的实测相位图

Fig. 10 Real smoothed phase maps obtained by traditional sine-cosine filtering

分析图 10,采用传统的正余弦相位滤波法设定循环次数为 8 次,滤波后图像质量较差,相位图中还包含有不少噪声;40 次循环滤波能够有效的滤除噪声干扰,然而在去除噪声干扰的同时也使相位信息发生变化,导致失真现象。

采用本文提出的基于能量的 DSPI 相位图滤波法对所得到的相位图进行分析,估计相位图噪声能量并设定降噪阈值,根据能量阈值进行滤波处理,控制滤波后的图像质量,提高信噪比和对比度,既能完全滤除噪声干扰,又能完整地保存相位信息。滤波结果如图 11 所示。

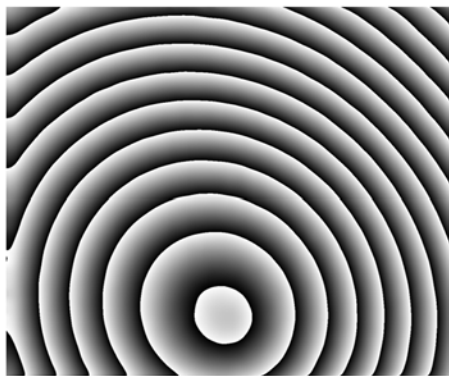


图 11 基于能量正余弦滤波法所得到的实测相位图

Fig. 11 Real smoothed phase map obtained by sine-cosine filtering based on signal energy

4.3 评价降噪效果

为了进一步对比,采用峰值信噪比和散斑指数对滤波效果进行评价^[16-17],峰值信噪比反映对图像细节的保持能力,峰值信噪比越大表示细节保护的

越好;散斑指数反映噪声抑制能力,散斑指数越小表示去噪能力越强。它们的数学表达式如下:

$$R_{PSN} = 10 \times \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i, j) - I_0(i, j)]^2}, \quad (14)$$

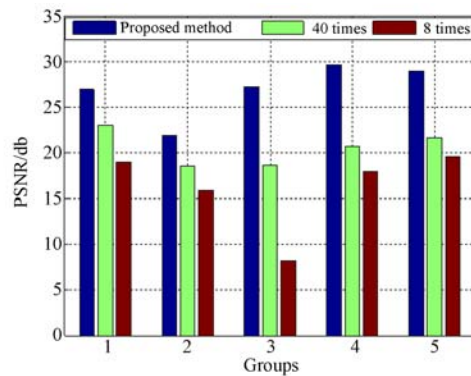
$$I_s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\sigma(i, j)}{\mu(i, j)}, \quad (15)$$

其中: R_{PSN} 为峰值信噪比, I_s 为散斑指数,分别采用本文提出方法和传统正余弦相位滤波法对采集的面外变形相位图进行滤波处理,计算 3 种方法滤波后的峰值信噪比和散斑指数,结果如表 1 和图 12 所示。

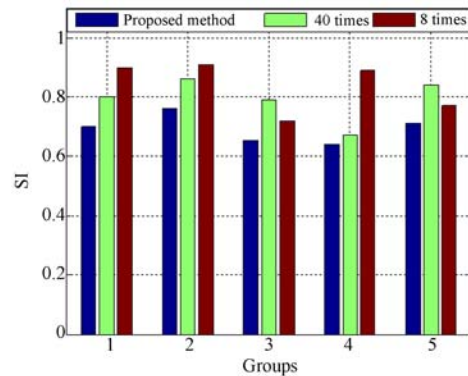
表 1 滤波后的指标参数对比

Tab. 1 Comparison of different methods using R and I values

	本文方法	40 次循环滤波	8 次循环滤波
R	27.60	28.30	25.91
I	0.58	0.63	0.77



(a) PSNR



(b) SI

图 12 不同方法降噪后的 PSNR 和 SI

Fig. 12 Comparison of results of three denoised methods

如表 1 和图 12 所示,3 种方法滤波结果的峰值信噪比 PSNR 和散斑指数 I 不一样。其中 8 次循环方法为欠滤波,滤波后图像中包含部分噪声,因此,峰值信噪比较小,散斑指数较大;40 次循环方法为过滤波,完全滤除噪声,同时也丢失了相位信息,滤波后峰值信噪比最大,散斑指数较本文方法大;本文提出的方法根据能量进行滤波,能够有效控制图像质量,散斑指数最小,峰值信噪比与 40 次循环方法接近,远大于 8 次循环方法。由此可得,传统的正余弦相位法容易导致欠滤波和过滤波,无法控制滤波后的图像质量。

参考文献:

- [1] YANG L X, XIE X, ZHU L Q, *et al.*. Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] 肖志涛, 袁泉, 张芳, 等. 结合非连续性测度的方向偏微分方程在电子散斑干涉中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(11): 2600-2606.
- XIAO ZH T, YUAN Q, ZHANG F. *et al.*. The oriented partial differential equation based on the discontinuities measure for electronic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2600-2606. (in Chinese)
- [3] WU S J, DONG M L, FANG Y, *et al.*. Universal optical setup for phase-shifting and spatial-carrier digital speckle pattern interferometry[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2016, 12: 14.
- [4] KEMAO Q, GAO W J, WANG H X. Windowed Fourier-filtered and quality-guided phase-unwrapping algorithm[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5420-5428.
- [5] WU S J, ZHU L Q, PAN S Y, *et al.*. Spatiotemporal three-dimensional phase unwrapping in digital speckle pattern interferometry[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1050-1053.
- [6] 张晓磊, 张祥朝, 肖虹, 等. 针对结构表面的数字全息相位重构散斑去除方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0726002.
- ZHANG X L, ZHANG X CH, XIAO H, *et al.*. Speckle removal in phase reconstruction of digital

5 结 论

数字散斑相位图成像过程中不可避免受到大量噪声干扰,测量结果误差较大,根据仿真和实际试验结果得出如下结论:

针对传统的正余弦滤波法参数设置多,容易导致过滤波或欠滤,本文提出的相位滤波方法根据能量设定滤波阈值,参照阈值进行滤波,能够自适应地进行滤波并获取良好的滤波效果。

- holography for structured surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45(7): 0726002. (in Chinese)
- [7] 伏思华, 林琚, 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.
- FU S H, LIN H, YU Q F, *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. (in Chinese)
- [8] ZHU R, WANG Y. Application of improved median filter on image processing[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(4): 838-841.
- [9] AEBISCHER H A, WALDNER S. A simple and effective method for filtering Speckle-interferometric phase fringe patterns[J]. *Optics Communications*, 1999, 162(4-6): 205-210.
- [10] 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.
- LI K, ZHANG Q CH. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2751-2755. (in Chinese)
- [11] FRANCIS D, TATAM R P, GROVES R M. Shearography technology and applications; a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 102001.
- [12] STEINCHEN W, YANG L X. *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry* [M]. Washington DC, USA: SPIE Express, 2003.
- [13] 张芳, 刘文耀, 代雷, 等. 散斑干涉条纹图的总变分去噪方法[J]. *光电工程*, 2009, 36(1): 26-30.
- ZHANG F, LIU W Y, DAI L, *et al.*. Total vari-

- ation denoising algorithm of speckle pattern interferometry fringe [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 26-30. (in Chinese)
- [14] DWIVEDI U D, SINGH S N. A robust energy features estimation for detection and classification of power quality disturbances[C]. *Proceedings of 2006 IEEE Power India Conference, IEEE*, 2006: 7.
- [15] 孔英会, 车麟麟, 孙中伟, 等. 基于能量特征估计的电能质量扰动消噪方法研究[J]. *华北电力大学学报*, 2008, 35(4): 87-92.
KONG Y H, CHE L L, SUN ZH W, *et al.*. Denoising method of power quality disturbance based on energy features estimation [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2008, 35(4): 87-92. (in Chinese)
- [16] 贾大功, 马彩缤, 武立强, 等. 基于改进旋滤波的电子散斑干涉图滤波方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0311001.
JIA D G, MA C B, WU L Q, *et al.*. Denoising of Eelectronic speckle Interferogram based on improved spin filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0311001. (in Chinese)
- [17] 闻东海, 江月松, 张绪国, 等. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311003.
WEN D H, JIANG Y S, ZHANG X G, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despecking algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311003. (in Chinese)

作者简介:



肖启阳(1987—),男,河南人,博士研究生,2012年于郑州大学获得学士学位,2015年于燕山大学获得硕士学位,主要从事无损检测,激光散斑测量。E-mail: yisuoyanyu058@126.com



吴思进(1979—),男,浙江人,副教授,2001年于北京信息科技大学获得学士学位,2011年于北京交通大学获得博士学位,2009~2011年在美国奥克兰大学做访问学者。主要从事数字散斑干涉技术研究,数字剪切散斑干涉技术研究。E-mail: swu@bistu.edu.cn

导师简介:



李健(1974—),男,山东人,教授,博士生导师,分别于1994年、1997年和2000年在天津大学获得工学学士、硕士和博士学位。主要从事管道泄漏检测、管道安全预警和新型管道内检测器。E-mail: tjupipe@tju.edu.cn