中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法

吴荣 陆阳 欧阳爱国

A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern

WU Rong, LU Yang, OUYANG Ai-guo

引用本文:
吴荣, 陆阳, 欧阳爱国. 正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法[J]. 中国光学, 2024, 17(2): 435–443. doi: 10.37188/CO.2023–0072
WU Rong, LU Yang, OUYANG Ai-guo. A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 435-443. doi: 10.37188/CO.2023-0072

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023–0072

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

剪切散斑干涉技术及应用研究进展
Research progress in shearography and its applications
中国光学（中英文）. 2017, 10(3): 300 https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0300

基于散斑干涉的光滑表面变形快速检测
Fast detection of smooth surface deformation based on DSPI
中国光学（中英文）. 2018, 11(2): 248 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0248

基于区域滤波的模糊星图复原方法
Restoration method for blurred star images based on region filters
中国光学（中英文）. 2019, 12(2): 321 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0321

自适应上下文感知相关滤波跟踪
Adaptive context–aware correlation filter tracking
中国光学（中英文）. 2019, 12(2): 265 https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0265

高温下数字图像相关散斑最优成像探究
Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature
中国光学（中英文）. 2018, 11(5): 728 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728

数字图像相关中的散斑区域自动提取研究
Automatic extraction of speckle area in digital image correlation
中国光学（中英文）. 2019, 12(6): 1329 https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1329

文章编号 2097-1842(2024)02-0435-09

正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法

吴 荣[1*], 陆 阳[2], 欧阳爱国[2]
（1. 南昌航空大学 测试与光电工程学院，江西 南昌 330063；
2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院，江西 南昌 330013）

摘要: 剪切散斑干涉是一种非接触式、全场高精度光学变形测量技术, 由于环境等因素导致采集的散斑条纹图像存在大量随机噪声,进而影响测量精度。传统去噪方法在滤除噪声的同时, 容易导致条纹边缘信息的丢失甚至破坏。针对该问题, 本文提出基于正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法。该方法首先对相位条纹图进行正余弦变换获得两幅图像, 其次对这两幅图像分别运用双调滤波方法进行去噪, 最后将滤波后的两幅图像合并为最终的相位条纹图。实验结果表明: 经本文方法滤波后的相位图散斑抑制指数为 0.999, 平均保持指数为 2.995, 证明该方法较传统去噪方法能更好地改善相位图质量, 且能较大程度地保留相位条纹的细节及边缘信息。

关 键 词: 剪切散斑; 干涉; 光学测量; 去噪; 双调滤波
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2023-0072

A denoising method combining bitonic filtering and sine-cosine transform for shearography fringe pattern

WU Rong[1*], LU Yang[2], OUYANG Ai-guo[2]
（1. *School of Measuring and Optical Engineering*, *Nanchang Hangkong University*, *Nanchang* 330063, *China*;
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *East China Jiaotong University*, *Nanchang* 330013, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *rongwu@ecjtu.edu.cn*

Abstract: Shearography is a non-contact, full-field, and high-precision optical deformation measurement technology. There is a lot of random noise in the acquired speckle fringe pattern caused by environmental factors, which affects the measurement accuracy. The traditional denoising methods easily cause the fringe information to be lost or even damaged while filtering out the noise. To solve this problem, we propose an image denoising method by combining sine and cosine transform and bitonic filtering. In this method, the phase fringe image is firstly obtained by sine and cosine transform. Secondly, the two images are denoised by the bitonic filtering method respectively. Finally, the filtered two images are merged into the final phase

收稿日期: 2023-04-23; **修订日期:** 2023-05-15
基金项目: 国家自然科学基金（No. 52305576）
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52305576)

fringe image. Experimental results show that for the filtered phase pattern, the speckle suppression index is 0.999 and the average retention index is 2.995, which prove that the proposed method can improve the quality of the phase pattern better than the traditional denoising method, and can preserve the details and edge information of the phase fringes to a large extent.

Key words: shearography; interference; optical measurement; denoise; bitonic filtering

1 引 言

当激光照射在检测对象的粗糙表面上时，反射的散射光在检测对象周围发生相互干涉，从而形成大量随机分布散斑，产生散斑现象。这些随机分布散斑的亮度、大小都不尽相同，且随着检测对象的变化而变化。数字散斑干涉技术利用散斑具有强度可测及确定的相位等特点，能够实现被测对象的非接触全场实时变形测量。由于其具有无损、测量高效、高精度等优点，被广泛应用于航空航天、军工、汽车、电子、建筑等领域复合材料的缺陷检测[1-2]。

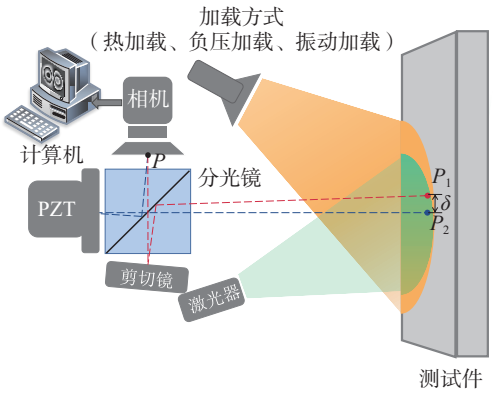
数字散斑干涉技术在测量过程中利用相移法[3-4]获取散斑干涉相位条纹图像，并将检测对象的变形或位移信息包裹于 [−π,π] 值之间[5]。为了提取这些被包裹的信息，需要对其进行相位解包裹运算。然而，由于获取的数字散斑干涉相位条纹图像中通常包含有大量的随机噪声，这将严重影响相关信息的提取，最终降低测量精度。对获取的散斑干涉相位条纹图像有效地进行滤波去噪处理、提高相位条纹对比度是改善成像质量和测量精度的关键。

传统的散斑干涉图像滤波方法通常可分为空间域滤波和频率域滤波。空间域滤波是指在空间域对图像中邻域内的像素灰度值进行数学运算的滤波技术。常见的空间域滤波主要包括均值滤波[6]、中值滤波[7]、傅立叶变换滤波[8]等。频率域滤波以傅立叶变换为基础，将空间域图像转化为频率域图像，并通过不同频率信息的抑制或增强，最后计算频率域图像的傅立叶逆变换得到滤波图像。例如，Aebischer[9]等使用正余弦平均滤波器，通过正余弦变换将散斑图像解析成正弦/余弦图像，并对正弦/余弦图像采用均值法处理，最后，对其进行反正切变换，获得最终的滤波结果，该方法能够有效保留图像的“尖峰”信号；蒋汉阳[10]等结合正余弦滤波提出了根据散斑相位条纹图的条纹方向自动选取滤波窗口大小的自适应滤波方法，该方法能够很好地保持条纹原有的走向以及分布特性，提高了条纹自动化处理能力；王智鑫[11]等提出了基于正余弦变换和块匹配（BM3D）滤波的数字散斑干涉（DSPI）图像去噪方法，能够有效消除 DSPI 图像中的噪声信息，同时有效地保留了相位的边缘信息；王永红[12]等提出了一种散斑干涉相位条纹图的正余弦频域滤波处理方法，可以较好地保留干涉图像的“尖峰”信息，并有效避免了包裹于相位条纹图像中的相位信息丢失问题。然而，目前的去噪方法在边缘信息及相位细节改善方面仍存在不足。

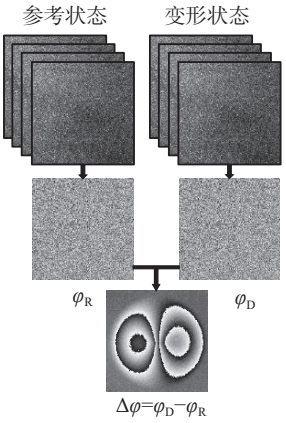
双调（Bitonic）滤波器[13]建立在双调信号的基础上，由非线性形态学算子和线性算子组成。它比中值滤波具有更好的边缘和细节保持性能，并且具有与高斯滤波相似的降噪能力。本文将传统的正余弦变换算法和双调滤波算法相结合，提出一种正余弦变换和双调滤波相结合的剪切散斑干涉图像去噪方法。

2 剪切散斑干涉原理

本文对基于数字剪切散斑干涉的离面位移测量方法展开研究，离面位移测量光路通常采用经典的迈克尔逊型错位干涉装置。该光路系统主要由激光器、迈克尔逊型错位干涉装置、CCD 相机、剪切镜、压电驱动反射镜（PZT）等组成。其中迈克尔逊型错位装置的作用是将入射的光束分成两束光，CCD 相机用于捕捉两个错位的像。如图 1（彩图见期刊电子版）所示，激光器发出的激光光束通过扩束镜照射在测试件表面，激光在测试件表面发生漫反射，产生的光束通过迈克尔逊型错位装置形成两束错位光束，两光束分别通过反射镜 1 和 2 进行反射，两束反射光相互干涉并由 CCD 相机记录散斑干涉条纹图像。



(a) 激光剪切散斑干涉测量光路系统示意图
(a) Schematic diagram of laser shearography system



(b) 四步相移法示意图
(b) Schematic diagram of the four-step phase shift method

图 1　剪切散斑干涉原理

Fig. 1　Principle of shearography interference

目前最常用的散斑干涉条纹成像方法为时间相移法, 常见的时间相移法根据图像采集帧数的不同可分为单步相移法、三步相移法、四步相移法、五步相移法等。本文采用广泛使用的四步相移法, 图 1(b) 为四步相移法获取散斑相位条纹图像的示意图。

剪切散斑干涉图像散斑场的光强分布可表示为:

$$I_i = I_0\{1+\mu\cos[\varphi+(i-1)\Phi]\},(i=1,2,\cdots,N) \quad , \tag{1}$$

其中: I_0表示背景光强; μ表示调制度; φ表示随机相位; Φ 表示相移量; i 表示相移步数。上式包含背景光强I_0、调制度μ、相移量Φ 3 个未知量, 至少需要列 3 个方程进行求解。通过将 PZT 四步相移法的相移步长设置为 π/2, 参考光的相位初值设为零, 则可得到如下 4 个等式:

$$\begin{cases} I_1 = I_0[1+\mu\cos\varphi] \\ I_2 = I_0[1+\mu\cos(\varphi+\pi/2)] \\ I_3 = I_0[1+\mu\cos(\varphi+\pi)] \\ I_4 = I_0[1+\mu\cos(\varphi+3\pi/2)] \end{cases} , \tag{2}$$

其中 I_1、I_2、I_3、I_4 分别为每步相移的剪切散斑干涉图的光强, 联立方程组中的 4 个方程可得到当前状态的相位, 其表达如下:

$$\varphi = \arctan\frac{I_4-I_2}{I_1-I_3} \quad . \tag{3}$$

假设加载前获得的相位为φ_0, 加载后的获得的相位为φ_1, 则由物体离面位移变化引起的相位差$\Delta\varphi$可表示为:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 \quad , \tag{4}$$

从而可得到物体离面位移 x:

$$x = \frac{\lambda\Delta\varphi}{4\pi} \quad , \tag{5}$$

其中, λ为所使用激光波长。

3　基于正余弦变换和双调滤波的去噪方法

3.1　双调滤波原理

如上文所述, 剪切散斑干涉条纹通常呈现为“蝴蝶斑”状图案, 存在较多“尖峰”和边缘信息。双调滤波依赖于局部窗口噪声模型, 信号被定义为局部双调(只有一个极大值和一个极小值)。它是一种基于数学形态(排序)的局部自适应滤波方法, 是形态学(开运算和闭运算)和线性算子(高斯滤波)的结合, 可以适应局部图像中的信号和噪声水平, 在没有噪声的情况下可精确地保持图像平滑。

双调滤波器先使用 100(最大)百分位(膨胀)的排序滤波器进行操作, 紧接着使用另一个 0(最小)百分位(侵蚀)的排序滤波器进行操作, 这会导致一个形态学闭操作。闭操作会保留具有局部最大值的信号, 同时拒绝具有局部最小值的信号。反之, 反转排序会导致一个具有相反作用的形态学开操作。该操作会消除图像的细小的结构元素。然后, 使用一个足够小但不是最小值的小百分位 c 操作, 并用 (100−c)代替最大值的形态学开操作。使用小百分位可以对脉冲噪声进行一定的

抑制。因为，所有占用滤波范围的脉冲噪声都将被去除[14]。双调滤波器的操作包括位置 x 处信号 $I(x)$的鲁棒性开操作$O_{w,c}(x)$和鲁棒性闭操作$C_{w,c}(x)$：

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{w,c}(\boldsymbol{I}(x)) = \underset{y\in w(x)}{c^{th}}\ \text{centile}\{\boldsymbol{I}(x+y)\} \\ \boldsymbol{R}_{w,c}^{-1}(\boldsymbol{I}(x)) = \underset{-y\in w(x+y)}{c^{th}}\ \text{centile}\{I(x+y)\} \\ \boldsymbol{O}_{w,c}(x) = \boldsymbol{R}_{w,100-c}(\boldsymbol{R}_{w,c}(\boldsymbol{I}(x))) \\ \boldsymbol{C}_{w,c}(x) = \boldsymbol{R}_{w,c}(\boldsymbol{R}_{w,100-c}(\boldsymbol{I}(x))) \end{cases}, \quad (6)$$

式中，$R_{w,c}$为秩滤波器；$R_{w,c}^{-1}$为反向秩滤波器；w 为滤波窗口，大小为$|w|$；y 为滤波窗口 w 内接近 x 位置的矢量距离。

由于鲁棒性开闭操作的数据值是不对称的，开闭操作只完成所需的一半，这也将只保留局部最小值或最大值，不能保持平均信号强度。为了克服这一不足，将原始信号与每个开闭信号进行比较，得出差值，并对其进行加权。由于高斯滤波器具有良好的降噪特性，选择用高斯线性滤波器对差值进行平滑处理。

将高斯线性滤波器定义为$G_\sigma(x)$，对开操作和闭操作进行加权，结果如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_O(x) = \left|\boldsymbol{G}_\sigma(\boldsymbol{I}(x) - \boldsymbol{O}_{w,c}(x))\right| \\ \varepsilon_C(x) = \left|\boldsymbol{G}_\sigma(\boldsymbol{C}_{w,c}(x) - \boldsymbol{I}(x))\right| \\ \boldsymbol{b}_{w,c} = \dfrac{\varepsilon_O^m(\boldsymbol{C}_{w,c} - \varepsilon_C) + \varepsilon_C^m(\boldsymbol{O}_{w,c} + \varepsilon_O)}{\varepsilon_O^m + \varepsilon_C^m} \end{cases}, \quad (7)$$

其中，$b_{w,c}$表示滤波器的输出；m 用于控制$C_{w,c}$和$O_{w,c}$之间的过渡锐度，设置 m=3；ε_O和ε_C分别表示开操作和闭操作下从原始信号中去除双调信号后的残差。利用开操作、闭操作进行有效检测，去除了双调信号，从而降低了包括跨信号边缘在内的所有区域的噪声。

就信噪比和视觉效果而言，双调滤波器虽然不是性能最好的滤波器，但是它比其他线性滤波器更适合某些情况的滤波。当噪声在图像上随机分布时，双调滤波器在某些区域能够实现有效降噪，并能很好地保存边缘信号。对于低噪声图像，双调滤波器可以平滑重复细节（超过滤波器长度），同时能很好地保留细节和“尖峰”信号，也可用边缘提取、背景提取、特征增强等图像处理操作。

3.2 基于正余弦变换和双调滤波相结合的去噪方法

本文将正余弦变换与双调滤波相结合，首先将二维的相位条纹图像分别进行正余弦变换得到一幅正弦相位图和一副余弦相位图；然后，对这两幅相位图分别进行双调滤波处理；最后，对双调滤波后的两幅正/余弦相位图做反正切变换最终得到滤波后的相位条纹图像，既可实现对相位图的有效去噪且可保留边缘有效信息。图 2 为正余弦变换和双调滤波相结合的图像去噪方法流程图。

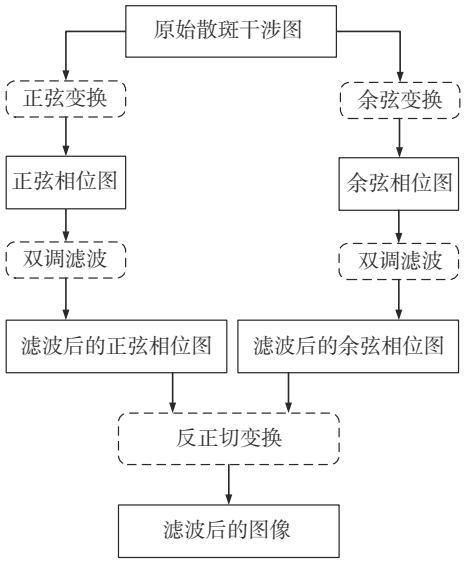


图 2 正余弦变换和双调滤波相结合的去噪方法

Fig. 2 Denoising method based on bitonic filtering and sine-cosine transform

相位条纹图的正余弦变换按如下等式执行：

$$\begin{cases} g_1(x,y) = \left[\sin\dfrac{g(x,y)\times 2\pi}{255} + 1\right]\times\dfrac{255}{2} \\ g_2(x,y) = \left[\cos\dfrac{g(x,y)\times 2\pi}{255} + 1\right]\times\dfrac{255}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中，$g(x,y)$为原始含噪相位图的灰度值，$g_1(x,y)$为正弦相位图的灰度值，$g_2(x,y)$为余弦相位图的灰度值。

为实现图像的去噪与边缘信息保留，对正余弦变换所得的图像分别进行双调滤波处理，得到$\overline{g_1}$和$\overline{g_2}$。最终对滤波结果做反正切变换，得到最终的相位条纹图像：

$$\overline{g}(x,y) = \arctan\frac{\overline{g_1}(x,y)}{\overline{g_2}(x,y)}. \quad (9)$$

4 实验与结果

4.1 变形测量实验

为了验证本文提出的正余弦变换和双调滤波

相结合方法的效果, 根据如图 1 所示激光散斑干涉测量光路系统示意图搭建了如图 3 所示的激光散斑干涉测量光路系统。需要说明的是系统部件均在同一水平面。系统主要由剪切镜、PZT、相机、分光镜、四周固定加载装置(螺旋测微头、被测面板)和激光器组成。

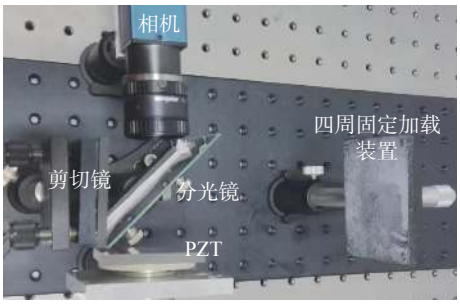
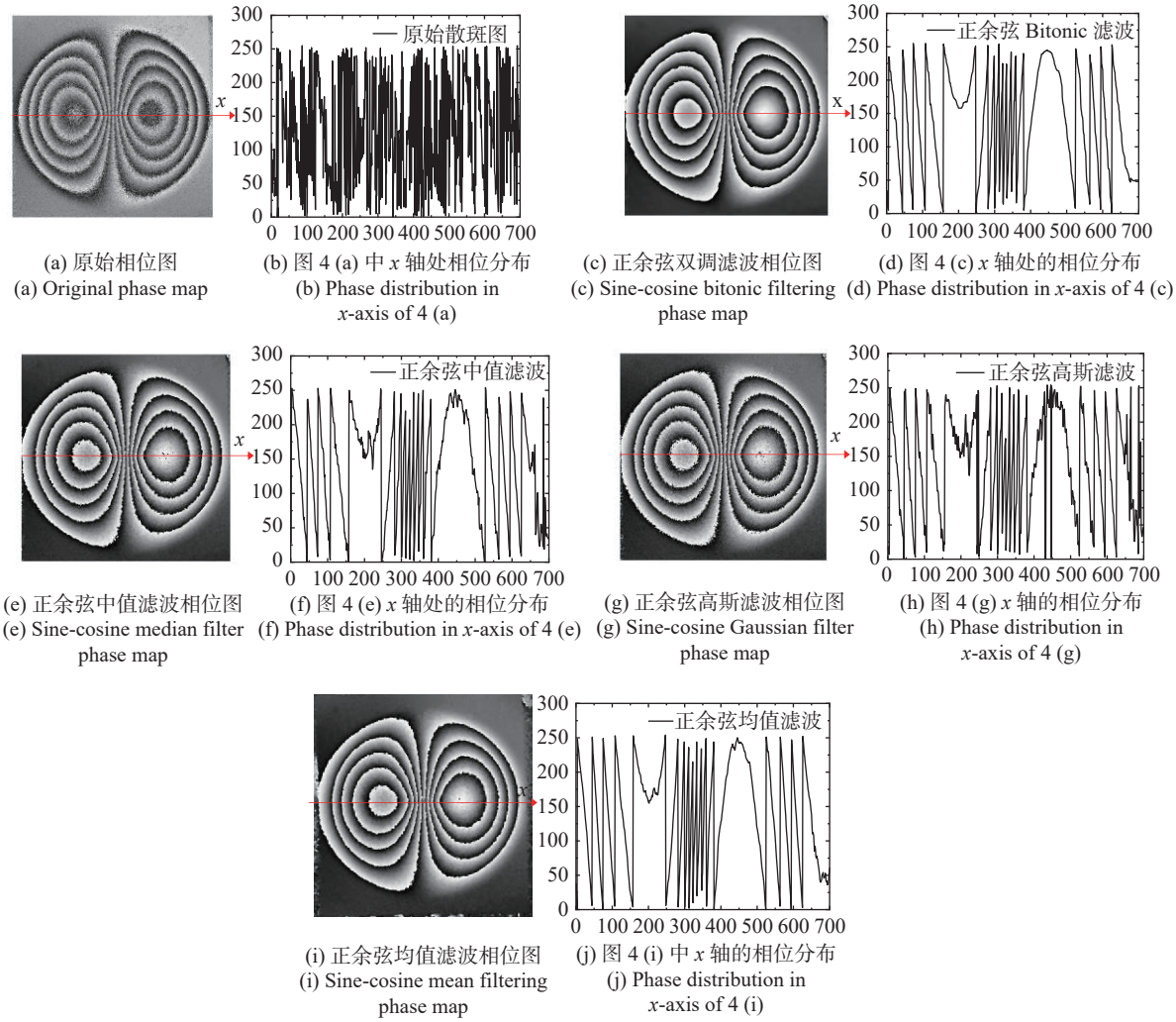


图 3　激光剪切散斑干涉测量实验装置

Fig. 3　Experimental setup of shearography system

实验中, 使激光均匀照射被测平板。该被测平板四周固定, 这样可以减小环境噪声带来的影响。手动调节螺旋测微头使平板进行微小移动, 同时利用四步相移法采集其变形前后的 4 幅散斑干涉图。利用四步相移法计算得到由变形引起的相位差条纹图如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可看出, 直接由相移法得到的相位图存在大量噪声。进一步, 提取图 4(a) 中原始散斑干涉图像 x 轴处的相位, 得到图 4(b) 所示原始散斑干涉图像 x 轴处的相位分布图。由图 4(b) 可知, 相位分布图中存在大量“毛刺”噪声, 导致难以有效提取相位信息。

利用本文提出的基于正余弦变换和双调滤波相结合的图像处理方法对原始散斑图进行滤波处理。利用式 (8) 对原始散斑图进行正余弦变换, 得到如图 5(a) 和图 5(b) 所示的正弦相位图和余弦相位图。



(a) 原始相位图
(a) Original phase map

(b) 图 4 (a) 中 x 轴处相位分布
(b) Phase distribution in x-axis of 4 (a)

(c) 正余弦双调滤波相位图
(c) Sine-cosine bitonic filtering phase map

(d) 图 4 (c) x 轴处的相位分布
(d) Phase distribution in x-axis of 4 (c)

(e) 正余弦中值滤波相位图
(e) Sine-cosine median filter phase map

(f) 图 4 (e) x 轴处的相位分布
(f) Phase distribution in x-axis of 4 (e)

(g) 正余弦高斯滤波相位图
(g) Sine-cosine Gaussian filter phase map

(h) 图 4 (g) x 轴的相位分布
(h) Phase distribution in x-axis of 4 (g)

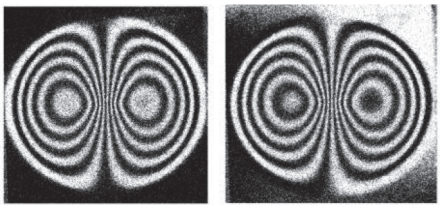
(i) 正余弦均值滤波相位图
(i) Sine-cosine mean filtering phase map

(j) 图 4 (i) 中 x 轴的相位分布
(j) Phase distribution in x-axis of 4 (i)

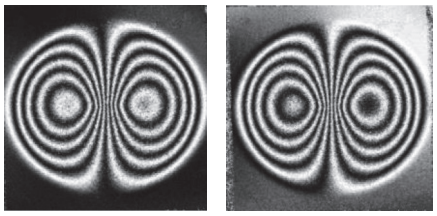
图 4　各种方法滤波后的相位图及其 x 轴处相位分布图

Fig. 4　Phase maps after filtering and diagrams of phase distribution in x-axis

其次，利用式 (6) 和式 (7) 的双调滤波原理对正余弦变换后的相位图进行滤波处理，得到如图 5(c) 和图 5(d) 所示双调滤波后的正余弦相位图。最后将双调滤波处理后的正余弦相位图按等式(9)做反正切变换求得最终的去噪图像。基于正余弦变换和双调滤波相结合的滤波结果，如图 4(c) 所示。



(a) 正弦相位图 (a) Sine phase map　(b) 余弦相位图 (b) Cosine phase map



(c) 滤波正弦图 (c) Filtered sine map　(d) 滤波余弦图 (d) Filtered cosine map

图 5　滤波前后的正余弦相位图

Fig. 5　Sine and cosine phase maps before and after filtering

为了验证本文所述方法的可靠性，分别用正余弦中值滤波、正余弦高斯滤波、正余弦均值滤波对原始散斑图像进行滤波操作，滤波窗口大小均设置为 7×7，得到图 4(e)~图 4(i) 的滤波后的相位条纹图。

为了进一步定量地判断本文去噪方法及其他方法的性能，用等效外观数量 (ENL)、散斑抑制指数 (SSI) 和平均保持指数 (SMPI) 定量地评价各滤波方法的去噪效果[15]。

等效外观数量 (ENL) 用于评价滤波器在图像均匀区域的噪声平滑能力，可以用以下公式计算：

$$\mathrm{ENL}=\left[\frac{Mean(I_1)}{\sqrt{Var(I_1)}}\right]^2 , \qquad (10)$$

其中，I_1表示滤波后的相位条纹图；$Mean(I_1)$表示滤波后相位条纹图的均值；$Var(I_1)$表示滤波后相位条纹图的方差。ENL 值越高，滤波器在均匀区域散斑噪声的平滑能力就越强。

散斑抑制指数 (SSI) 为滤波后相位条纹图与原始散斑图像之比，可以用以下公式计算：

$$\mathrm{SSI}=\frac{\sqrt{Var(I_1)}}{Mean(I_1)}\times\frac{Mean(I_0)}{\sqrt{Var(I_0)}} , \qquad (11)$$

其中，I_0表示原始散斑图像；$\sqrt{Var(I_1)}/Mean(I_1)$表示图像均匀区域的散斑强度；$Mean(I_0)$表示原始散斑图像均值；$Var(I_0)$表示原始散斑图像的方差。SSI 越低，该滤波器的抑制能力就越强。

当滤波器高估了均值时，ENL 和 SSI 便不在可靠。而平均保持指数 (SMPI) 可以很好地评价散斑抑制性能和均值保存性能，可以用以下公式计算：

$$\mathrm{SMPI}=Q\times\frac{\sqrt{Var(I_1)}}{\sqrt{Var(I_0)}} , \qquad (12)$$

其中，$Q=1+|Mean(I_0)-Mean(I_1)|$，SMPI 值越低，表明该滤波器在均值保存和降噪方面的性能越好。

各滤波方法的等效外观数量、散斑抑制指数和平均保持指数如表 1 所示。另外，表 1 最后一行对本文提出的方法与传统方法的计算时间进行了对比。

表 1　实验 1 中各滤波方法不同评价参数对比

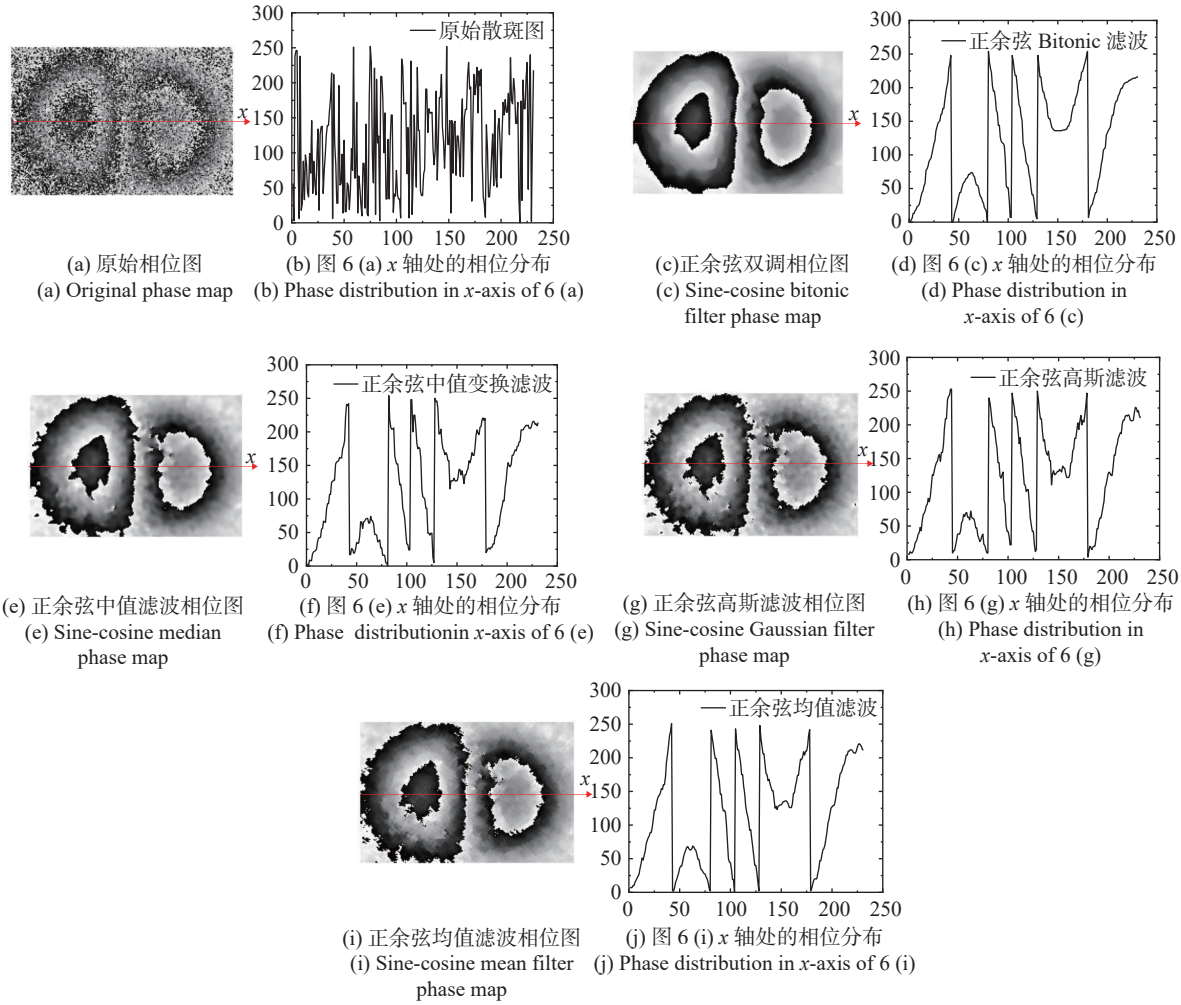
Tab. 1　Comparison of evaluation parameters of different filtering methods in experiment 1

	本文方法	正余弦中值	正余弦高斯	正余弦均值	原始图
ENL	**3.338**	3.327	3.324	3.329	3.124
SSI	**0.999**	1.001	1.002	1.002	1
SMPI	**1.210**	1.226	1.305	1.264	1
耗时(s)	**11.36**	0.79	0.58	0.89	-

4.2　无损检测实验

为了进一步验证本文滤波方法在实际应用中的效果，利用图 3 所示的激光剪切散斑干涉系统对金属橡胶粘接材料进行无损检测实验。在金属橡胶粘接实验材料的内部人为设置了一个圆形的脱粘缺陷。实验中，利用高功率卤素加热灯对其表面进行加热，同时运用剪切散斑干涉系统采集其表面的散斑图像。得到的原始散斑干涉图像如图 6(a) 所示，并对其 x 轴处进行相位提取，提取的相位分布图如 6(b) 所示。与前文类似，利用本文滤波方法、正余弦中值滤波、正余弦高斯滤波、正余弦均值滤波对采集到的原始散斑图像分别进行滤波处理，滤波窗口大小均设置为 7×7，得到滤波

处理后的相位图, 如图 6(a)、6(e)、6(g)、6(i) 所示。对四幅滤波后的相位图 x 轴处进行相位提取, 得到各相位图 x 轴处的相位分布图, 如图 6(d)、6(f)、6(h)、6(j) 所示。



(a) 原始相位图 (a) Original phase map　(b) 图 6 (a) x 轴处的相位分布 (b) Phase distribution in x-axis of 6 (a)

(c)正余弦双调相位图 (c) Sine-cosine bitonic filter phase map　(d) 图 6 (c) x 轴处的相位分布 (d) Phase distribution in x-axis of 6 (c)

(e) 正余弦中值滤波相位图 (e) Sine-cosine median phase map　(f) 图 6 (e) x 轴处的相位分布 (f) Phase distributionin x-axis of 6 (e)

(g) 正余弦高斯滤波相位图 (g) Sine-cosine Gaussian filter phase map　(h) 图 6 (g) x 轴处的相位分布 (h) Phase distribution in x-axis of 6 (g)

(i) 正余弦均值滤波相位图 (i) Sine-cosine mean filter phase map　(j) 图 6 (i) x 轴处的相位分布 (j) Phase distribution in x-axis of 6 (i)

图 6　各滤波后的相位图及其 x 轴处相位分布图

Fig. 6　Phase maps after filtering and corresponding phase distributions in x-axis

与实验一类似, 各滤波方法的等效外观数量、散斑抑制指数和平均保持指数如表 2 所示。表 2 的最后一行给出了本文方法与传统方法的用时对比。

表 2　各滤波方法不同评价参数对比

Tab. 2　Comparison of evaluation parameters of different filtering methods

	本文方法	正余弦中值	正余弦高斯	正余弦均值	原始图
ENL	**10.236**	9.586	10.052	10.059	9.368
SSI	**0.957**	0.989	0.965	0.965	1
SMPI	**2.995**	3.440	3.135	3.136	1
耗时(s)	**9.76**	0.41	0.25	0.24	-

4.3　讨　论

为了验证本文所提方法对剪切散斑干涉图像强大的滤波效果, 将其与传统的基于正余弦变换和中值滤波、高斯滤波、均值滤波相结合的方法进行了比较, 得到图 4(e)、4(g)、4(i) 和图 6(e)、6(g)、6(i) 所示滤波相位图像。同时, 提取了滤波后的图像在图像中心 x 方向上的相位, 得到 4(f)、4(h)、4(j) 和图 6(f)、6(h)、6(j) 所示的相位分布图。从螺旋测微头变形测量实验可以看出, 图 4 中各滤波方法的图像视觉效果存在一定差异, 其中高斯滤波和中值滤波后, 图像中仍存在一定噪声, 效果最差, 均值滤波和本文提出的滤波方法效果相当。根据图 4 的相位曲线可知, 通过双调滤波方

法得到的滤波后的相位分布曲线明显更加平滑。在真实的无损检测实验中同样可以得出相似的结论。从图 4 和图 6 可以看出，传统方法对于噪声水平较大的图像，滤波效果较差，而利用本文提出的方法则能够有效抑制噪声。并且可以看出，本文提出的双调滤波方法在大幅度消除散斑图像“毛刺”噪声的同时，能够完整地保留“尖峰”处的信号。

根据表 1 和表 2 的定量结果可知，相比传统的正余弦均值滤波、正余弦中值滤波以及正余弦高斯滤波方法，本文提出的正余弦双调滤波方法的 ENL 最大且 SSI 最小。这表明本文提出的去噪方法的噪声平滑能力以及噪声抑制能力均最强。同时，本文提出的去噪方法的 SMPI 值也是最小的，表明 ENL 和 SSI 值的结果有效，进一步证明了提出的正余弦双调滤波方法在均值保存和降噪方面有较好的性能。

虽然提出的正余弦双调滤波方法在降噪方面具有强大的性能，然而由于该方法中包含了排序和形态学操作，比传统方法需要更多的计算时间，故本方法只适用于离线滤波处理。对于实时去噪场合，需要对提出的正余弦双调滤波方法在计算效率方面做更深入的研究。

5 结 论

剪切散斑干涉图像中含有大量随机噪声和相位跳变信息。针对这一问题，传统的滤波方法在滤除噪声的同时难以较好地保留相位跳变信息。本文鉴于正余弦滤波能够很好地保留相位跳变信息，而双调滤波可以很好地保留细节和“尖峰”信号，本文提出了基于正余弦变换和双调滤波的剪切散斑干涉图像去噪方法。实验表明：经该方法滤波后的相位图散斑抑制指数为 0.999，平均保持指数为 2.995。证明该方法能够在有效滤除噪声的同时很好地保留原始的相位细节以及跳变信息，有效地提高了包裹于主值范围[$-\pi$，π]之间的变形或位移信息的提取精度。

参考文献：

[1] 程茶园, 林鑫, 葛丽, 等. 航天泡沫材料的声激励激光错位散斑检测[J]. 无损检测, 2020, 42(9): 74-76.
CHENG CH Y, LIN X, GE L, *et al*.. Acoustic excited laser shearography testing of aerospace foam materials[J]. *Nondestructive Testing*, 2020, 42(9): 74-76. (in Chinese)

[2] 程茶园, 林鑫, 孙霖, 等. 自由装填式药柱包覆层黏接质量的错位散斑检测[J]. 无损检测, 2021, 43(8): 58-61,66.
CHENG CH Y, LIN X, SUN L, *et al*.. Detection of the cladding bonding quality of free loading powder charge by shearography[J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(8): 58-61,66. (in Chinese)

[3] ANISIMOV A G, GROVES R M. Extreme shearography: Development of a high-speed shearography instrument for quantitative surface strain measurements during an impact event[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106502.

[4] YAN P ZH, LIU X W, DONG J T, *et al*.. Robust dynamic phase-shifting common-path shearography using LCPG and pixelated micropolarizer array[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 153: 106997.

[5] 徐媛媛, 时刻, 王亚伟, 等. 相移干涉技术及相移获取方法研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020004.
XU Y Y, SHI K, WANG Y W, *et al*.. Research progresses of phase-shifting interferometry technology and phase shift extraction method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020004. (in Chinese)

[6] HOSSEINI H, HESSAR F, MARVASTI F. Real-time impulse noise suppression from images using an efficient weighted-average filtering[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(8): 1050-1054.

[7] JAYARAJ V, EBENEZER D. A new switching-based median filtering scheme and algorithm for removal of high-density salt and pepper noise in images[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010(1): 690218.

[8] ROBINSON D W, REID G T, DE GROOT P. Interferogram analysis: digital fringe pattern measurement techniques[J]. *Physics Today*, 1994, 47(8): 66.

[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] 蒋汉阳, 戴美玲, 苏志龙, 等. 基于散斑相位条纹方向的自适应正弦/余弦滤波[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0910001.
JIANG H Y, DAI M L, SU ZH L, *et al*.. An adaptive sine/cosine filtering algorithm based on speckle phase fringe

orientation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0910001. (in Chinese)

[11] 王智鑫, 胡烁陶, 夏振涛, 等. 基于正余弦变换和BM3D滤波的DSPI图像去噪方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(6): 1-6,10.
WANG ZH X, HU SH T, XIA ZH T, *et al*.. DSPI image denoising method based on sine-cosine decomposition and BM3D filtering[J]. *Automation & Instrumentation*, 2021(6): 1-6,10. (in Chinese)

[12] 王永红, 李骏睿, 孙建飞, 等. 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 389-395.
WANG Y H, LI J R, SUN J F, *et al*.. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 389-395. (in Chinese)

[13] TREECE G. Morphology-based noise reduction: structural variation and thresholding in the bitonic filter[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, 29: 336-350.

[14] TREECE G. The bitonic filter: linear filtering in an edge-preserving morphological framework[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5199-5211.

[15] KULKARNI R, RASTOGI P. Fringe denoising algorithms: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106190.

通讯作者:

吴　荣(1988—), 男, 江西鄱阳人, 博士, 讲师, 2012 年于华东交通大学获得学士学位, 2017 年于上海大学获得博士学位, 主要从事光学测量与图像处理方面的研究。E-mail: rongwu@ecjtu.edu.cn