

## 基于同态滤波的正余弦全变分融合降噪方法

周洪星<sup>1</sup>, 周晚林<sup>1</sup>, 崔海华<sup>1\*</sup>, 徐小伟<sup>2</sup>, 王波<sup>2</sup><sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210000;<sup>2</sup>中航西安飞机工业集团股份有限公司复合材料厂, 陕西 西安 710089

**摘要** 针对数字剪切散斑干涉技术在检测过程中得到的包裹相位图中存在噪声干扰的问题, 本文提出了一种基于同态滤波的正余弦全变分融合降噪的激光散斑图像噪声抑制方法。首先对同态滤波后的包裹相位图进行正余弦分解, 然后在分解的基础上通过全变分滤波来抑制噪声, 最终通过散斑抑制指数的变化自适应地判断滤波是否完成。通过仿真与实验对所提方法的有效性进行了验证。首先向仿真包裹相位图中添加噪声并采用所提方法进行噪声抑制, 根据散斑抑制指数验证所提方法的可行性; 然后对预制缺陷的复合材料试件进行检测, 并采用所提方法进行噪声抑制; 最后通过散斑抑制指数和相位展开结果对所提方法的滤波效果进行验证。结果表明: 采用所提方法得到的散斑抑制指数相较于传统的正余弦全变分滤波方法约降低了 10.7%, 同时有效地保护了相位信息不被破坏。

**关键词** 测量; 融合滤波; 数字剪切散斑干涉术; 散斑图像; 噪声抑制

中图分类号 TP391.41; TN247 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230940

## 1 引言

数字剪切散斑干涉技术是一种具有非接触、全场测量、灵敏度高等优点的无损检测技术, 已被广泛应用于航空、航天、汽车、新材料和机械等领域的无损检测中<sup>[1]</sup>。剪切散斑干涉图像是经由剪切散斑干涉装置和相移方法得到的包裹相位图, 相位图中包含着检测物体在加载情况下的形变信息<sup>[2-3]</sup>, 因此, 得到准确的包裹相位图对于剪切散斑干涉技术的应用来说至关重要。在实际检测过程中, 由于所使用激光光源的相干性和外部各种因素的干扰, 得到的包裹相位图中往往包含着大量的噪声, 这些噪声主要可以分为乘性噪声和加性噪声两种<sup>[4]</sup>。目前, 针对散斑干涉相位图像噪声的滤除, 国内外学者进行了大量的研究。

针对乘性噪声的去除, 顾国庆等<sup>[5]</sup>提出了基于同态滤波的散斑干涉图像滤波方法, 该方法可以去除乘性噪声, 但仍然存在加性噪声去除不充分和条纹边界模糊等问题; 张海锋等<sup>[6]</sup>提出了同态滤波与中值滤波相结合的方法, 该方法可以去除乘性噪声和部分加性噪声, 但仍存在条纹边界模糊的问题; Fan 等<sup>[7]</sup>提出了同态滤波与全变分滤波相结合的级联复合去噪方法, 该方法对乘性噪声和部分加性噪声的滤除效果较好, 但不能很好地去除加性噪声中的周期性噪声。针对加性噪声的去除, Aebischer 等<sup>[8]</sup>将正余弦分解的滤波方法应用于散斑干涉图像的降噪, 有效地去除了加性噪

声中的周期性噪声; Rudin 等<sup>[9]</sup>提出了将全变分模型应用于图像滤波的降噪方法, 该方法可以很好地去除噪声, 但存在阶梯效应; 在此基础上, Song<sup>[10]</sup>提出了基于范数的全变分降噪模型, 该模型解决了部分阶梯效应的问题, 但仍存在灰度分布较为平坦的区域会产生阶梯效应的问题, 并且该模型对范数中参数的选取十分敏感; 王永红等<sup>[11]</sup>提出了将正余弦分解滤波和频域滤波相结合的方法; 刘吉等<sup>[12]</sup>提出了一种基于正余弦分解的全变分降噪滤波方法, 该方法在去除周期性噪声的同时能够较好地保护条纹的边缘, 但其对乘性噪声的滤除效果较差。除此之外, 研究人员也将深度学习应用于散斑图像的去噪, 如: 林薇等<sup>[13]</sup>提出了一种基于深度学习的散斑条纹图滤波方法, 该方法通过生成对抗网络实现散斑图像噪声的去除; 曹锐虎等<sup>[14]</sup>提出了一种基于注意力机制的图像去雾算法, 该方法对散斑噪声也有一定的去除效果。

上述各种滤波方法都不能在滤除乘性噪声和加性噪声的同时保护条纹边缘, 这将会使后续的处理分析过程产生较大的误差, 甚至难以进行。针对该问题, 本文提出了一种基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波方法。该方法可以在较好地去除散斑图像中的乘性噪声和加性噪声的同时保护条纹边缘, 有效保护了包裹相位图中的信息。通过散斑抑制指数对去噪效果进行定量评价, 同时通过相位展开对相位信息的保护效果进行评价, 验证了所提方法的有效性。

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-08-24; 录用日期: 2023-09-12; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3401700)、南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20220509)

通信作者: \*E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

## 2 基本原理

### 2.1 同态滤波模型

同态滤波就是将图片的入射分量和反射分量分离,之后经过一定的处理,使图像实现噪声去除和对比度增强的一种方法<sup>[15]</sup>。使用同态滤波对剪切散斑干涉包裹相位图进行处理可以去除剪切散斑干涉包裹相位图中的乘性噪声。其基本流程为:1)对输入的预处理好的图像作对数分解,将相位图中的乘性噪声转化为加性噪声,如式(1)所示;2)将对数分解的结果进行傅里叶变换,如式(2)所示;3)根据剪切散斑干涉图像中噪声的特点,设计如式(3)所示的同态滤波器;4)频域滤波之后进行傅里叶逆变换得到滤波结果,接着进行指数运算返回同态滤波后的图像。

$$I_{\ln} = \ln(I_d * I_n) = \ln(I_d) + \ln(I_n), \quad (1)$$

$$\text{DFT}(I_{\ln}) = \text{DFT}(I_d + I_n), \quad (2)$$

$$H_l(x, y) = (\gamma_H - \gamma_L) * H_0(x, y) + H(\gamma_L), \quad (3)$$

式中: $I_{\ln}$ 表示经对数分解后的图像; $I_d$ 表示图像中的入射分量; $I_n$ 表示图像中的反射分量; $\ln$ 表示取对数运算; $\text{DFT}$ 表示傅里叶变换; $H_l(x, y)$ 表示同态滤波器; $\gamma_H$ 和 $\gamma_L$ 用来控制滤波器幅度的范围, $\gamma_H > 1, \gamma_L < 1$ ; $H_0(x, y)$ 表示所使用的频域滤波器的类型; $H(\gamma_L)$ 表示与滤波器等大的向量。

### 2.2 正余弦滤波模型

正余弦分解滤波能够在滤除噪声的同时保留图像的阶跃信息。传统的正余弦滤波方法是将正余弦变换和图像均值化处理相结合的一种方法<sup>[16]</sup>。使用正余弦滤波模型对剪切散斑干涉包裹相位图进行处理的主要目的是去除图像中包含的周期性噪声。其主要流程为:1)采用正余弦分解将包裹相位图分解成正弦包裹图和余弦包裹图,如式(5)所示;2)分别对正弦包裹图和余弦包裹图进行滤波处理;3)对滤波后的包裹图进行反正切变换,得到滤波后的包裹相位图。反正切变换的公式为

$$I_t(x, y) = \arctan \left[ \frac{I_{\sin}(x, y)}{I_{\cos}(x, y)} \right], \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} I_{\sin}(x, y) = \left\{ \sin \left[ I_0(x, y) \cdot \frac{2\pi}{255} \right] + 1 \right\} \cdot \frac{255}{2} \\ I_{\cos}(x, y) = \left\{ \cos \left[ I_0(x, y) \cdot \frac{2\pi}{255} \right] + 1 \right\} \cdot \frac{255}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $I_0$ 是原始输入的含噪声图像; $I_{\sin}$ 和 $I_{\cos}$ 分别是原始图像经过正余弦分解之后得到的正弦相位图和余弦相位图; $I_t$ 是经过正余弦分解滤波处理后得到的相位图(滤波后的相位图)。

### 2.3 全变分滤波模型

全变分滤波对待处理图像的内部进行平滑处理,同时尽可能对图像的边缘不进行平滑处理<sup>[17]</sup>。对剪切散斑干涉包裹相位图进行全变分滤波可以在实现噪声去除的同时保护图像的边缘。进行全变分滤波时首先需要列出待处理图像的TV范数,TV范数的公式为

$$\text{TV}[u(x, y)] = \iint |\nabla u(x, y)|^{p(x, y)} dx dy, \quad (6)$$

其中,

$$p(x, y) = 1 + \frac{1}{1 + |\nabla u_0(x, y)|^2}, \quad (7)$$

式中: $u(x, y)$ 表示原始图像的像素点; $\nabla u(x, y)$ 表示此像素点处的梯度; $p(x, y)$ 是决定全变分模型的最关键参数。在含有噪声的相位图中,其TV范数大于不含噪声或含噪声较少图像的范数,因此全变分滤波可以转化为在给定约束条件下使TV范数最小化的问题,即将TV范数转化为全变分能量泛函,如式(8)所示。在此基础上可以得到图像全变分滤波的欧拉-拉格朗日公式,如式(9)所示。经过梯度下降后可以得到全变分滤波模型,最后再经过有限差分便可求得近似解,如式(10)所示。

$$J[u(x, y)] = \iint |\nabla u(x, y)|^p dx dy + \frac{\lambda}{2} \iint [u(x, y) - u_0(x, y)]^2 dx dy, \quad (8)$$

$$u(x, y) = u_0(x, y) + \nabla \frac{\nabla u(x, y)}{|\nabla u(x, y)| \cdot \lambda}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial t} = \nabla \left[ \frac{\nabla u(x, y)}{|\nabla u(x, y)|^2} \right] - \lambda [u(x, y) - u_0(x, y)], \quad (10)$$

式中: $J$ 为滤波过程中的能量泛函; $\lambda$ 是用来平衡滤波和保真之间关系的参数。式(8)等号后面第一项主要用于去除包裹相位图中的噪声;第二项是保真项,用来保证滤波后图像与原始图像的接近程度,防止图像失真。

### 2.4 滤波质量评价指标

在对剪切散斑干涉包裹相位图进行滤波之后,如何评价滤波后的结果对于比较不同方法的滤波效果具有重要意义。本文拟采用计算图像散斑抑制指数的方法对滤波结果进行定量评价,同时采用分析后续相位展开结果与相位残差点的方法对滤波结果进行定性与定量评价。其中散斑抑制指数在评价过程中无需参考图像便可对相位条纹图的去噪结果进行定量分析<sup>[18]</sup>。散斑抑制指数对散斑干涉图像进行滤波质量评价的原理是:当散斑图像中含有大量未抑制噪声时,噪声图像像素值与图像灰度平均值相差较大,因此计算图像灰

度标准差的平方根可以反映图像中像素值整体偏离像素平均值的程度。在没有进行噪声抑制时其值较大,而在进行噪声抑制时其值较小。将像素灰度平均值作为除数,以便于将滤波后与滤波前的图像灰度标准差进行标准化,进而尽可能在相同的原则下进行比较,避免其他因素的干扰。散斑抑制指数的计算公式为

$$I_{\text{SSI}} = \frac{\sqrt{\sigma(I_t)}}{\mu(I_t)} \cdot \frac{\mu(I_0)}{\sqrt{\sigma(I_0)}}, \quad (11)$$

式中:  $I_{\text{SSI}}$  为散斑抑制指数,指数越低,包裹相位图的滤波效果越好<sup>[19]</sup>;  $I_0$  为原始未滤波图像;  $I_t$  为滤波后图像;  $\mu$  为图像像素灰度值的平均值;  $\sigma$  为图像像素灰度值的标准差。

### 2.5 基于融合滤波的激光散斑图像噪声抑制方法

在上述各种针对不同噪声的滤波方法的基础上,本文提出了一种基于同态滤波的正余弦全变分融合

滤波方法,用于对剪切散斑包裹相位图进行降噪。本文所提方法的具体流程如图 1 所示。首先对输入的噪声图像进行同态滤波。同态滤波主要包括对输入图像像素进行对数化并进行傅里叶变换,同时在频域上利用设计的滤波器进行滤波,对频域滤波后的结果作傅里叶逆变换,然后对逆变换结果进行反对数变换,将图像像素值映射回原来的值域,完成同态滤波过程。接着,在同态滤波的基础上,对滤波结果进行正余弦相位分解,分别得到正弦包裹相位图和余弦包裹相位图,然后利用全变分模型分别对正弦包裹相位图和余弦包裹相位图进行降噪。全变分模型降噪通过迭代能量函数的最小值实现,是否完成滤波过程则通过每次迭代后的图像散斑抑制指数与前一次迭代的散斑抑制指数相比来判断,若二者的差值小于设定阈值则结束此滤波过程。最后,在上面各步骤滤波完成的基础上对滤波后的正弦相位图和余弦相位图进行反正切变换,从而得到经过融合滤波后的散斑干涉包裹相位图。

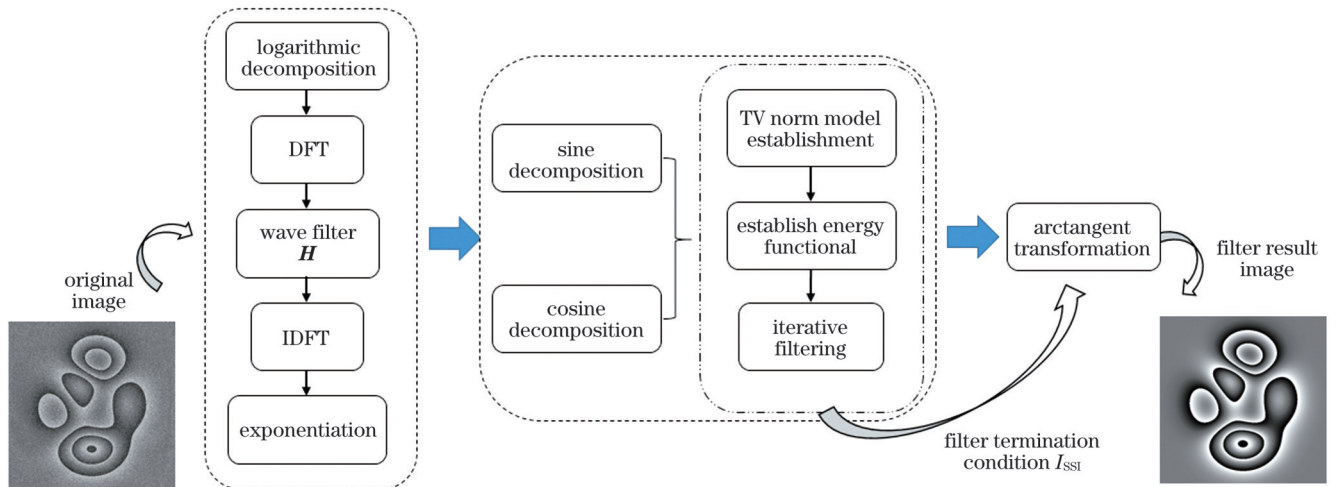


图 1 基于融合滤波的激光散斑图像噪声抑制过程

Fig. 1 Laser speckle image noise suppression process based on fusion filtering

所提方法结合了同态滤波去除乘性噪声、正余弦分解去除周期性噪声、全变分滤波去除加性噪声并保持相位图边缘细节的优点,相比于其他几种单独的滤波方法对剪切散斑干涉包裹相位图的噪声去除具有更好的效果。同时,所提方法引入散斑抑制指数作为判断滤波是否完成的依据,即分别计算前后两次滤波相对于原始图像的散斑抑制指数,当二者之间的差值小于预设值时即可认为滤波完成并输出滤波结果。整个过程由程序进行判断,无须人工干预,其实验验证分析见下节。

## 3 分析与讨论

### 3.1 仿真实验分析与讨论

在对实际采集数据进行滤波之前,首先对仿真包裹相位图进行手动添加噪声来验证滤波方法的可行

性。仿真滤波实验所采用的原始包裹相位图如图 2(a) 所示,在该图的基础上添加均值为 0 且方差为 0.02 的高斯噪声、噪声图像像素数目为 0.02 的椒盐噪声、泊松噪声、噪声图像像素数目为 0.02 的随机散斑噪声。添加噪声后的包裹相位图如图 2 所示。

分别使用正余弦滤波(Method 1)、正余弦+全变分滤波(Method 2)、正余弦+同态滤波(Method 3)、基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波(Method 4)对含有噪声的模拟包裹相位图进行滤波降噪,降噪后的结果如图 3 所示。

模拟包裹相位图像滤波结果的散斑抑制指数对比如表 1 所示。可以看出基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波方法具有最低的散斑抑制指数,即其噪声滤除效果最好。由此通过仿真实验验证了本文所提融合滤波方法的可行性。

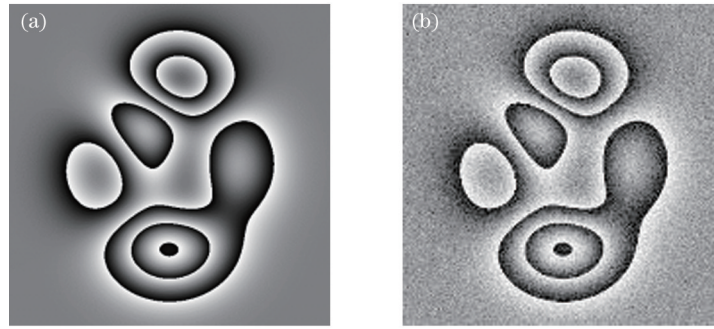


图 2 仿真实验图。(a)模拟原始包裹相位图;(b)添加噪声后的包裹相位图

Fig. 2 Simulation experimental diagrams. (a) Simulated original package phase diagram; (b) package phase map after adding noise

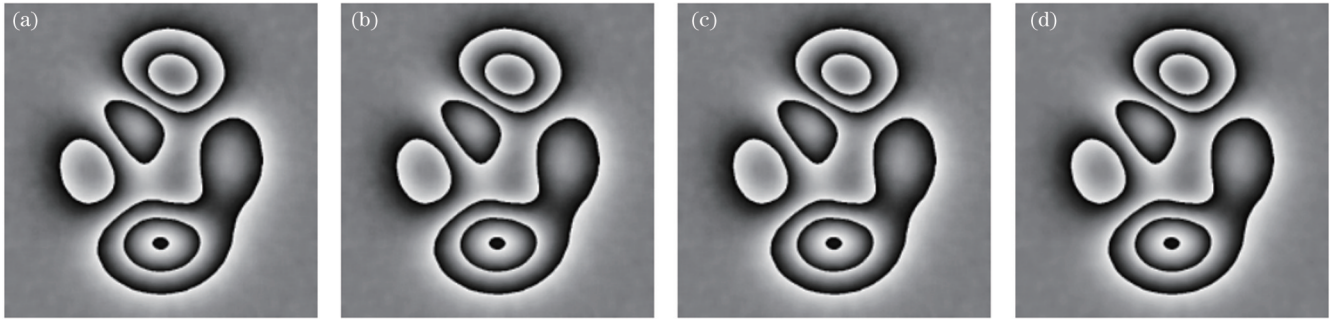


图 3 滤波结果图。(a)正弦余弦滤波;(b)正弦余弦+全变分滤波;(c)正弦余弦+同态滤波;(d)融合滤波

Fig. 3 Images after filtering. (a) Sine cosine filtering; (b) sine cosine full variation filtering; (c) homomorphic sine cosine filtering; (d) fusion filtering

表 1 模拟包裹相位图滤波结果的散斑抑制指数对比

Table 1 Comparison of speckle suppression index of simulated package phase map filtering results

Filtering method	Sine cosine filtering (Method 1)	Sine cosine full variation filtering (Method 2)	Homomorphic sine cosine filtering (Method 3)	Fusion filtering (Method 4)
Speckle suppression index	0.8312	0.8305	0.6268	0.6231

### 3.2 蜂窝复合材料试件的实验分析与讨论

为了验证所提滤波降噪方法的有效性,笔者在实验中选择一批经过特殊加工的预制缺陷的蜂窝复合材

料作为待测试件,预制缺陷的类型是实际蜂窝复合材料中可能出现的分层和脱黏缺陷。具体的缺陷规格以及试件如图 4 所示。

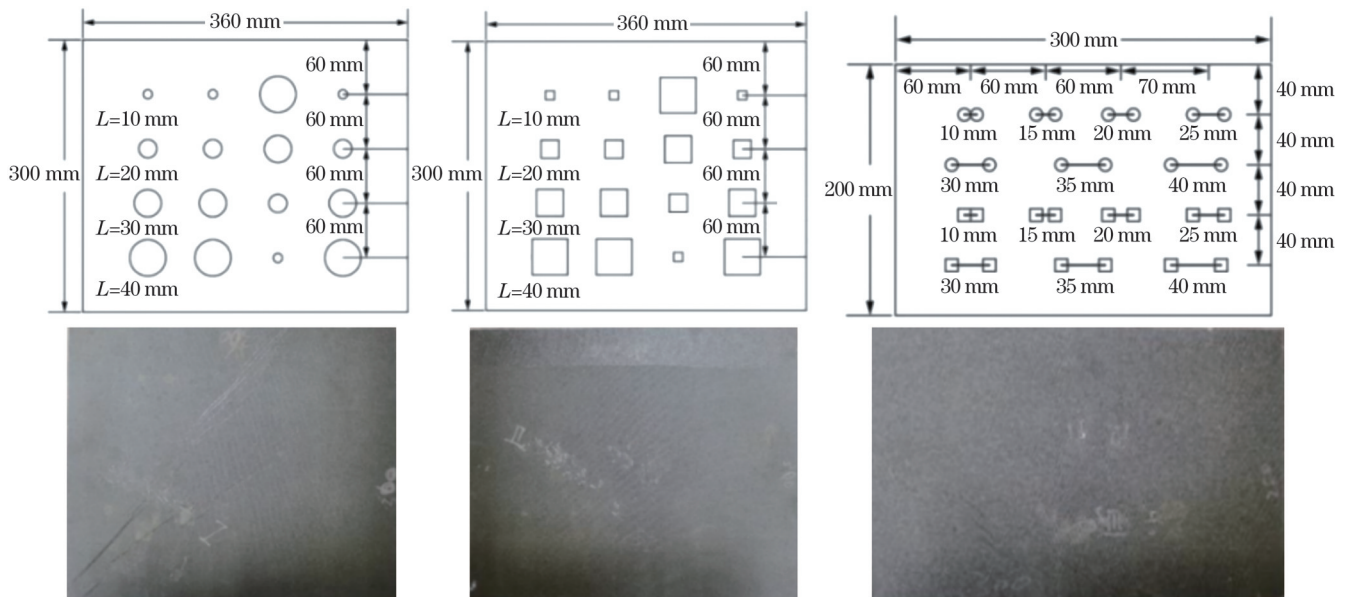


图 4 预制缺陷的复合材料试件的规格

Fig. 4 Specification of composite specimens with preset defects

搭建实验用剪切散斑干涉无损检测系统,其采用基于四步相移的方法进行检测。系统组成主要包括激光器、扩束镜、成像镜头、 $4f$ 光学系统、分光棱镜、迈克耳孙型剪切装置、压电陶瓷控制器、工业相机以及包含控制系统程序的计算机,系统的具体组成如图 5 所示。

实验过程中采用热加载的方式对蜂窝复合材料试件进行加载,具体加载装置为红外热加载实验灯具。采集未加载图像后再进行加载操作,实验中每次加载操作的时间为 40 s,加载温度为  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载方位为待加载物体上方 3 cm 处。

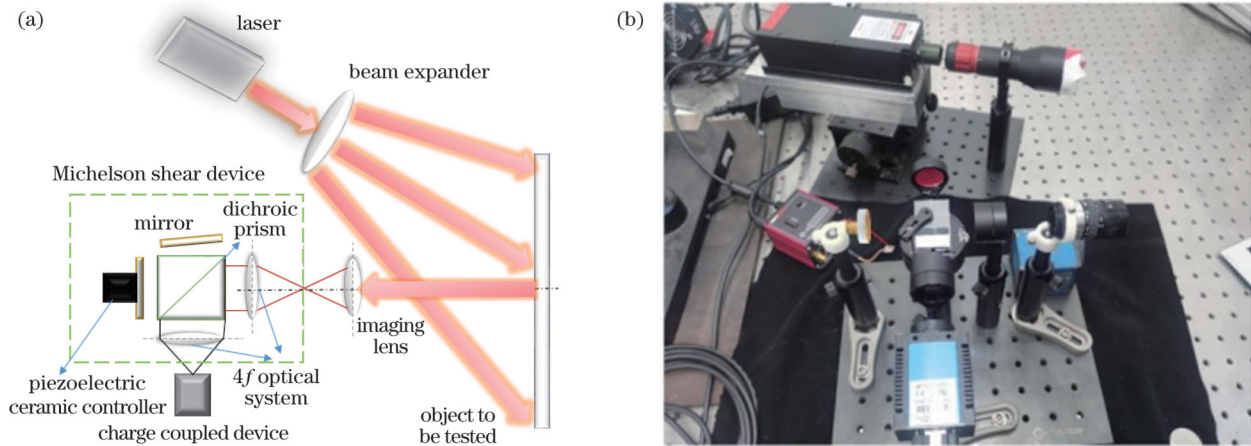


图 5 数字剪切散斑干涉系统组成。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 5 Composition diagram of digital shearing speckle interferometry system. (a) Schematic diagram; (b) photo

采集预制缺陷的蜂窝复合材料变形前后的相位图,采用四步相移的方式获得剪切散斑干涉包裹相位图。采集方式为:在加载后的不同时刻分别采集同一试件的图像,同一试件采集 4 张图像。分别采集三个

不同的预制缺陷的蜂窝复合材料试件。采集到的原始包裹相位图如图 6 所示,其中 1\_1、1\_2、1\_3、1\_4 分别表示在 4 个时刻采集的试件 1 的图像,其他编号的含义与此类似。

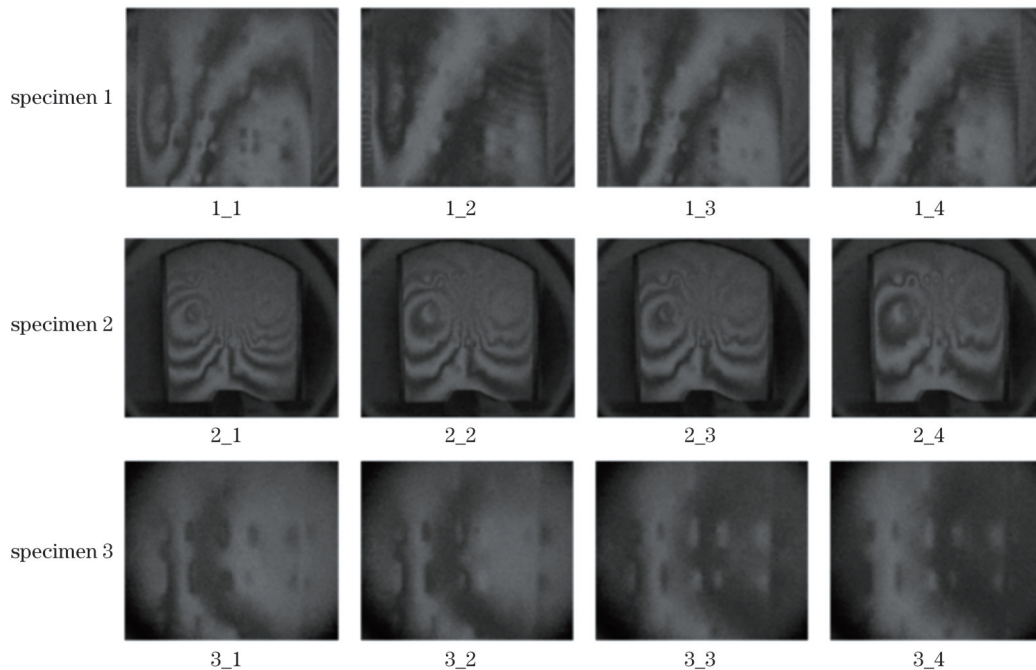


图 6 复合材料试件的原始包裹相位图

Fig. 6 Original package phase diagrams of the composite specimens

分别采用正余弦滤波(Method 1)、正余弦+全变分滤波(Method 2)、同态+正余弦滤波(Method 3)、基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波方法(Method 4)对上述剪切散斑包裹相位图进行滤波,滤波结果如图 7 所示。

通过散斑抑制指数和相位展开结果对上述滤波结果进行评价,其中使用上述各种滤波方法后得到的滤波相位图与原始包裹相位图相比的散斑抑制指数如表 2 所示。根据表 2 绘制了不同滤波方法的散斑抑制指数,如图 8 所示。

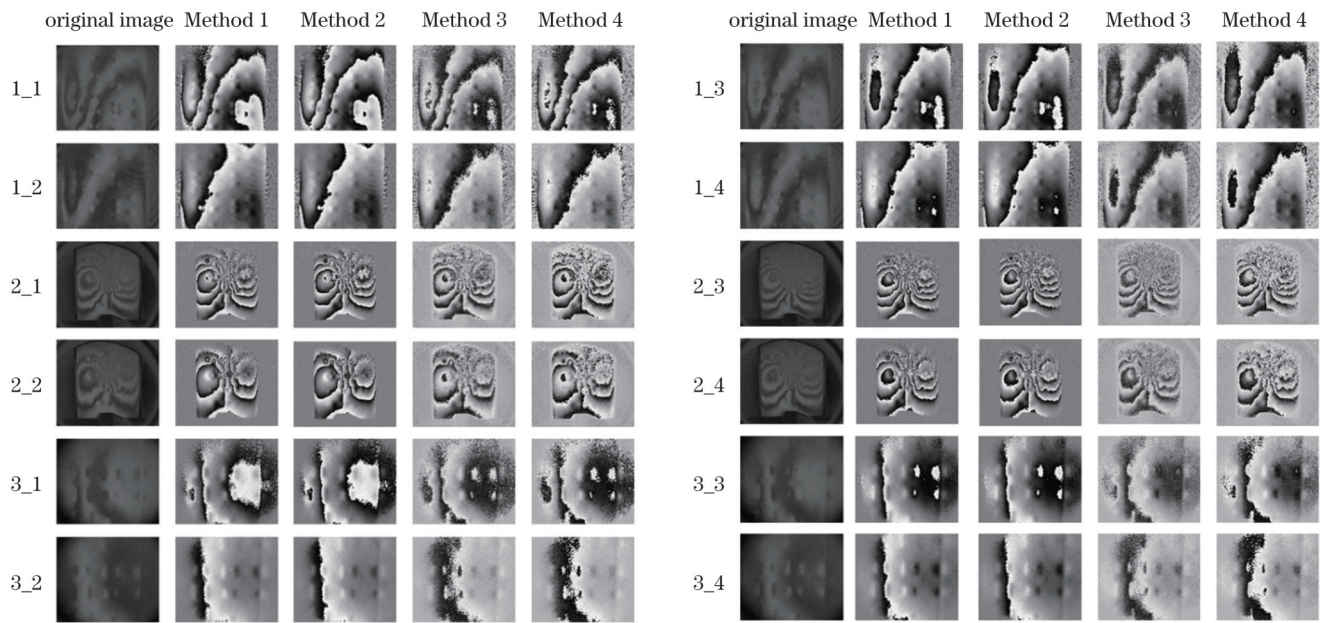


图 7 预置缺陷的复合材料试件的滤波结果

Fig. 7 Filtered results of different preset defective composite material specimens

表 2 不同滤波方法的散斑抑制指数

Table 2 Speckle suppression index for different filtering methods

Filtering method	Speckle suppression index											
	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4	3_1	3_2	3_3	3_4
Method 1	0.7092	0.6057	0.7149	0.6675	0.4197	0.4162	0.4020	0.4001	0.6740	0.4313	0.6551	0.4520
Method 2	0.6911	0.5921	0.7142	0.6667	0.3981	0.3975	0.4009	0.3992	0.6686	0.4235	0.6546	0.4532
Method 3	0.7089	0.6023	0.6783	0.6038	0.4162	0.4127	0.3603	0.3594	0.6859	0.4306	0.5170	0.4152
Method 4	0.6878	0.5344	0.6705	0.5898	0.3718	0.3707	0.3417	0.3442	0.6288	0.4168	0.5047	0.4008

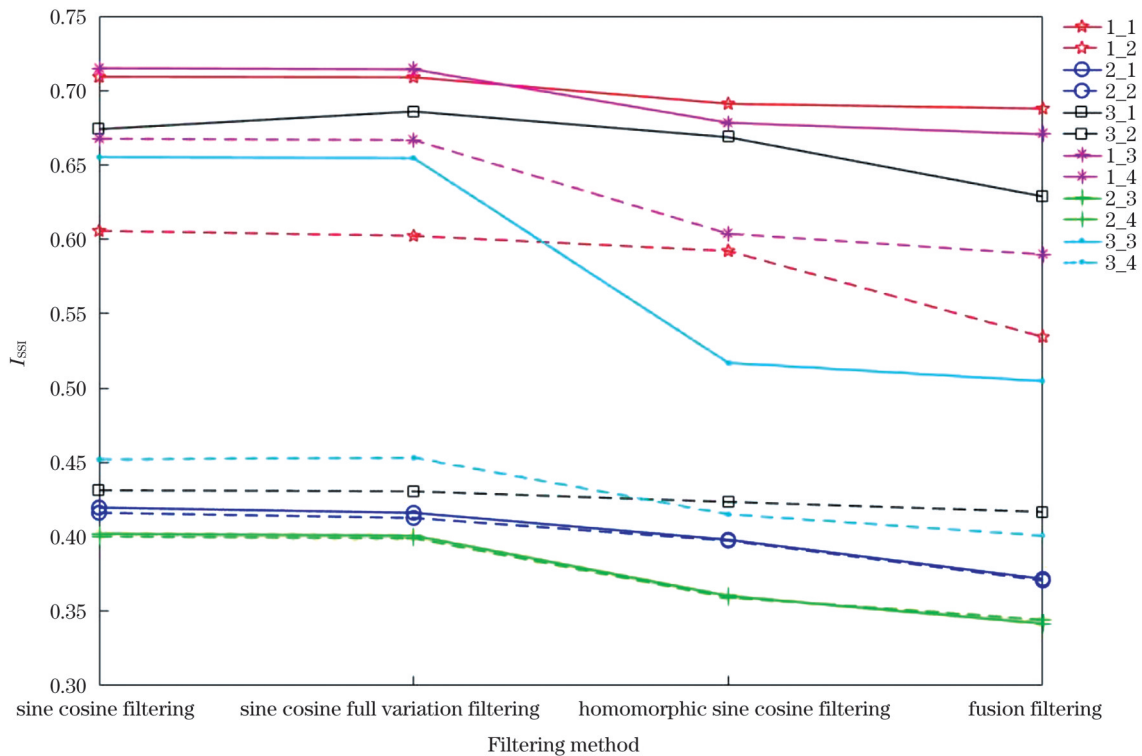


图 8 不同滤波方法的散斑抑制指数对比

Fig. 8 Comparison of speckle suppression index for different filtering methods

由表 2 所示的滤波结果的散斑抑制指数可知,融合滤波方法的散斑抑制指数最低,即相对于其他几种方法来说,该方法的滤波效果更好。相较于常见的正余弦+全变分滤波方法,基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波方法的散斑抑制指数平均降低了约

10.7%,滤波效果有较大提升。下面通过相位展开的方式对各种滤波结果进行评价,结果如表 3 和图 9 所示。通过分析滤波结果的相位残差点数量可知,采用融合滤波的方法得到的滤波结果中包含的相位残差点最少,即该方法对噪声的抑制效果最好。

表 3 不同滤波结果的相位残差点数量  
Table 3 The number of phase residual points for different filtering results

Filtering method	The number of phase residual points											
	1_1	1_2	1_3	1_4	2_1	2_2	2_3	2_4	3_1	3_2	3_3	3_4
Method 1	172341	110607	64041	59811	544792	477548	442251	423643	197967	8152	69946	47525
Method 2	11604	7840	8212	7067	62117	46883	63404	79964	12519	14668	28220	15126
Method 3	471640	281888	699187	571680	592437	520614	869965	868960	534251	97765	750659	419293
Method 4	3467	2309	3646	3035	33117	35845	37974	34250	3293	621	5912	814

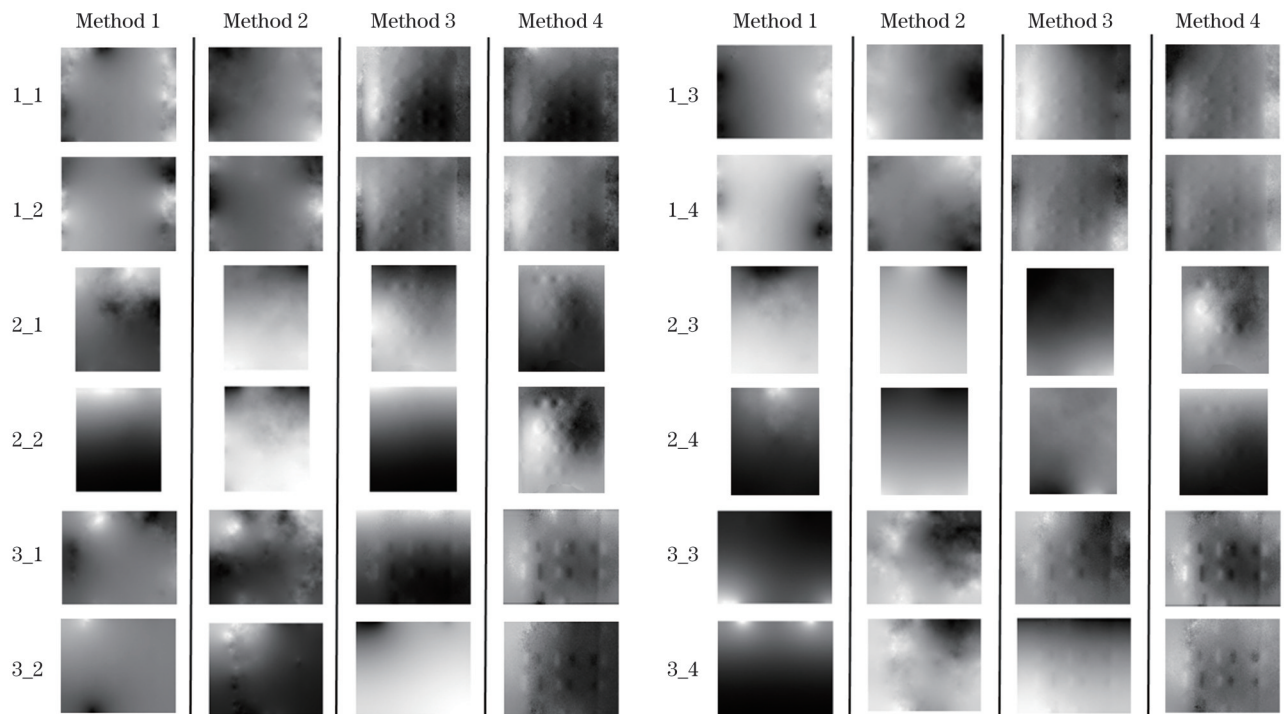


图 9 不同滤波结果的相位展开对比

Fig. 9 Phase unwrapping comparison of different filtering results

分析试件 1 在 4 个不同时刻的缺陷相位展开图可知:采用融合滤波方法降噪得到的相位展开图与采用基于正余弦全变分方法降噪得到的相位展开图的图像质量相近,但前者的散斑抑制指数更小并且相位残差点数量更少,因而更有利于进行后续的表面形变位移反演和缺陷识别、表征等过程。分析试件 2 和试件 3 在 4 个不同时刻的缺陷相位展开图可知:采用融合滤波方法得到的相位展开图均优于其他滤波方法,且稳定性更高。

综合散斑抑制指数和相位展开图对上述各种滤波方法进行评价,可以发现融合滤波方法相较于其他方法具有更好的散斑噪声抑制性能,并且稳定性更高,能够在降噪过程中有效地保护相位信息,从而保证了后

续相位展开的顺利进行。

## 4 结 论

针对剪切散斑干涉获得的包裹相位图中存在噪声的问题,采用基于同态滤波的正余弦全变分融合滤波方法,实现了对各种噪声的抑制与去除,保证了后续包裹相位图相位展开的顺利进行。相较于传统的基于正余弦分解的全变分降噪,所提方法的散斑抑制指数减小了约 10.7%,同时可以对相位信息进行保护,便于进行后续的相位展开过程,而且展开过程中的相位残差点较少,实现了稳定的滤波效果。首先通过仿真包裹相位的方法手动添加噪声,以验证所提方法的可行性与有效性;然后对预制缺陷的复合材料试件进行检测,

获得含噪声的包裹相位图,对其进行滤波并通过散斑抑制指数定量评估滤波效果,同时通过相位展开的方式评估所提方法对相位信息的保护效果;最后通过仿真实验和实际检测实验验证了所提方法的有效性与优越性。

### 参 考 文 献

- [1] 王永红, 姚彦峰, 李骏睿, 等. 剪切散斑干涉关键技术研究及应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(14): 1415004.  
Wang Y H, Yao Y F, Li J R, et al. Research and application progress of key technologies of shear speckle interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(14): 1415004.
- [2] 李洋洋, 吴思进, 李伟仙, 等. 双功能数字散斑干涉位移及空间梯度同时测量[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 0612002.  
Li Y Y, Wu S J, Li W X, et al. Simultaneous measurement of displacement and slope with dual-function digital speckle pattern interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0612002.
- [3] 吴敏杨, 马银行, 程昊, 等. 基于彩色相机的双波长剪切散斑干涉法同步测量面内外位移导数[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1812002.  
Wu M Y, Ma Y H, Cheng H, et al. Color-camera-based dual-wavelength shearography for simultaneously measuring in-plane and out-of-plane displacement derivatives[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1812002.
- [4] 程志远, 李治国, 折文集, 等. 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法[J]. 物理学报, 2019, 68(5): 054206.  
Cheng Z Y, Li Z G, Zhe W J, et al. Compound denoising method of laser speckle noise in laser inherent field imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(5): 054206.
- [5] 顾国庆, 王开福, 燕新九. 基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理[J]. 激光技术, 2010, 34(6): 750-752, 797.  
Gu G Q, Wang K F, Yan X J. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering[J]. Laser Technology, 2010, 34(6): 750-752, 797.
- [6] 张海锋, 胡春海. 同态滤波与中值滤波相融合的散斑噪声污染图像恢复[J]. 激光杂志, 2016, 37(4): 77-79.  
Zhang H F, Hu C H. Image restoration of speckle noise pollution based on homomorphic filtering and median filtering[J]. Laser Journal, 2016, 37(4): 77-79.
- [7] Fan Y C, Zhang L X, Guo H C, et al. Image processing for laser imaging using adaptive homomorphic filtering and total variation[J]. Photonics, 2020, 7(2): 30.
- [8] Aebischer H A, Waldner S. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns[J]. Optics Communications, 1999, 162(4/5/6): 205-210.
- [9] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1/2/3/4): 259-268.
- [10] Song B. Topics in variational PDE image segmentation, inpainting and denoising[D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2003.
- [11] 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.
- [12] 刘吉, 黄晓慧, 武锦辉, 等. 基于正余弦分解的自适应全变分散斑去噪方法[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1004004.  
Liu J, Huang X H, Wu J H, et al. Adaptive total variation speckle denoising method based on sine-cosine decomposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1004004.
- [13] 林薇, 崔海华, 郑炜, 等. 基于深度学习的剪切散斑干涉条纹图滤波方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 2210009.  
Lin W, Cui H H, Zheng W, et al. Filtering method of shearing speckle interference fringe pattern based on deep learning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 2210009.
- [14] 曹锐虎, 张鹏超, 王磊, 等. 基于注意力机制的单图像去雾算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(2): 0210011.  
Cao R H, Zhang P C, Wang L, et al. Single image defogging algorithm based on attention mechanism[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(2): 0210011.
- [15] Kaur K, Jindal N, Singh K. Improved homomorphic filtering using fractional derivatives for enhancement of low contrast and non-uniformly illuminated images[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 27891-27914.
- [16] 肖启阳, 李健, 吴思进, 等. 基于能量的 DSPI 相位图正余弦降噪[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 936-943.  
Xiao Q Y, Li J, Wu S J, et al. Denoising of DSPI phase map using sine-cosine filtering and signal energy[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(4): 936-943.
- [17] 鲁思琪, 周先春, 汪志飞. 改进型自适应全变分图像降噪模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 236-243.  
Lu S Q, Zhou X C, Wang Z F. Improved adaptive total variational image denoising model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 236-243.
- [18] 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 Z X, Hu S T, Xia Z T, et al. DSPI image denoising method based on sine-cosine decomposition and BM3D filtering[J]. Automation & Instrumentation, 2021(6): 1-6, 10.
- [19] 张洪科. 数字全息再现像中的噪声抑制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.  
Zhang H K. Noise suppression in digital holographic reconstructed images[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.

## Sine Cosine Full Variation Fusion Denoising Method Based on Homomorphic Filtering

Zhou Hongxing<sup>1</sup>, Zhou Wanlin<sup>1</sup>, Cui Haihua<sup>1\*</sup>, Xu Xiaowei<sup>2</sup>, Wang Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Composite Plant of AVIC Xi'an Aircraft Industrial Corporation Co., Ltd., Xi'an 710089, Shaanxi, China

### Abstract

**Objective** In the process of using digital laser shearing speckle interferometry technology for measurement and detection, owing to the different interference characteristics of the laser and the measurement environment, there will be multiplicative and additive noise



of different properties in the phase map wrapped in the measurement results. However, noise presented in the wrapped phase diagram makes it difficult to conduct and ensure accurate subsequent phase unwrapping. Therefore, investigating how best to suppress and remove noise contained in wrapped phase diagrams is crucial for measurement applications involving shear speckle interferometry. Currently, problems remain with noise suppression and the removal of speckle interference-wrapped phase maps. For example, traditional noise suppression methods (such as sine cosine full variation filtering) consistently fail to fully suppress both multiplicative and additive noise while protecting wrapped phase information, which makes the analysis error from subsequent processing either too large or complex to conduct. Hence, in this study, we propose a homomorphic filtering-based sine cosine full variation fusion filtering method that effectively removes multiplicative and additive noise while protecting wrapped phase map information. Subsequently, the effectiveness of the proposed method is experimentally verified.

**Methods** This study proposes the suppression and removal of wrapped phase map noise during digital laser shearing speckle interferometry measurements using a homomorphic filtering-based sine cosine full variation fusion filtering method. First, homomorphic filtering is performed on the original wrapped phase image containing noise to suppress and remove multiplicative noise components from the wrapped phase image. Subsequently, the filtering results undergo sine and cosine decomposition to remove the periodic noise components in the wrapped phase diagram. Finally, the decomposed sine and cosine images are subjected to full variational filtering to remove the remaining additive noise components. Simultaneously, the speckle suppression index is introduced as a criterion to determine whether the filtering process has completed while suppressing the noise. Subsequently, the decomposed sine and cosine images are subjected to arctangent transformation to achieve filtering recovery of the final wrapped phase image. Additionally, the effectiveness of the filtering method is verified through simulation experiments and composite test pieces with preset defects.

**Results and Discussions** It was confirmed that the proposed fusion filtering method achieved the goal of protecting phase information while removing multiplicative and additive noise in wrapped phase images. By simulating the wrapped phase diagram and its corresponding noisy image, noise suppression results were obtained using the proposed method alongside other traditional methods (Fig. 3). From their speckle suppression indices, it can be observed that the speckle suppression index obtained using the proposed fusion filtering method was the smallest, indicating that this noise suppression effect is the best. Thus, verifying the feasibility of the proposed method. The proposed filtering method was validated using composite materials with preset defects. According to the filtering results, it can be observed that the speckle suppression index of the image obtained using the proposed method after filtering was approximately 10.7% lower than that of traditional sine cosine full variation filtering. After phase unwrapping the filtering results, the number of phase residual points in the noise suppression image obtained using the proposed method was the smallest, and the phase unwrapping results stabilized, thus, verifying the stability and superiority of the proposed fusion filtering method.

**Conclusions** This study proposed a sine cosine full variation fusion filtering method based on homomorphic filtering to address the issue of noise in a wrapped phase map obtained from shear speckle interference. By considering different noise properties, we effectively achieved the suppression and removal of various noises, ensuring smooth future phase unwrapping. Compared to the traditional full variation denoising process based on sine cosine decomposition, this solution reduces the speckle suppression index by approximately 10.7% and protects phase information for subsequent phase unwrapping processes. Moreover, the filtering effect stabilized with fewer phase residual points during the unwrapping process. First, the feasibility and effectiveness of the method were verified by manually adding noise through a wrapped phase simulation. Subsequently, the actual wrapped phase map containing noise obtained by detecting the composite specimen plate with preset defects was filtered, and the filtering effect was quantitatively evaluated using the speckle suppression index. The phase information protection effect was also evaluated through phase unwrapping, and the effectiveness and superiority of the proposed method were verified using both simulation and practical detection experiments.

**Key words** measurements; fusion filtering; digital shearing speckle interferometry; speckle image; noise suppression