

# 基于正余弦分解的自适应全变分散斑去噪方法

刘吉<sup>1,2</sup>, 黄晓慧<sup>2\*</sup>, 武锦辉<sup>1</sup>, 苏凝钢<sup>2</sup>, 于丽霞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 为解决相位图在去噪过程中出现的散斑噪声残留和边缘纹理模糊问题, 基于正余弦分解提出了一种自适应全变分去噪方法。首先, 用正余弦函数将原始相位图分解成两幅相位图; 然后用自适应全变分算法处理分解后的相位图; 最后, 通过反正切运算合成去噪后的相位图, 以快速去除大量散斑噪声并保留图像的边缘信息。对去噪结果进行定量评价和分析表明, 与其他降噪方法相比, 本方法得到的图像峰值信噪比提高了 2.0 dB, 且结构相似度较高。同时可以自适应地选择参数, 减少去噪后相位图的波动性, 改善相位图的质量。

**关键词** 测量与计量; 散斑干涉技术; 相位图; 散斑噪声; 正余弦分解; 自适应全变分算法

中图分类号 O436.1; TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1004004

## Adaptive Total Variation Speckle Denoising Method Based on Sine-Cosine Decomposition

Liu Ji<sup>1,2</sup>, Huang Xiaohui<sup>2\*</sup>, Wu Jinhui<sup>1</sup>, Su Ninggang<sup>2</sup>, Yu Lixia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>College of Information and Communications Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to solve the speckle noise residue and edge texture blur in phase image denoising, an adaptive total variation denoising method based on sine-cosine decomposition is proposed in this work. First, the original phase image is decomposed into two phase images by sine and cosine function. Then, the decomposed phase image is processed by adaptive total variation algorithm. Finally, the denoised phase image is synthesized by arctangent operation to quickly remove a large amount of speckle noise and retain the edge information of the image. The quantitative evaluation and analysis of the denoising results show that, compared with other denoising methods, the peak signal-to-noise ratio of the image obtained by this method is improved by 2.0 dB, and the structure similarity is higher. At the same time, the parameters can be adaptively selected to reduce the fluctuation of the phase image and improve the its quality.

**Key words** measurement and metrology; speckle interference technique; phase image; speckle noise; sine-cosine decomposition; adaptive total variational denoising algorithm

**OCIS codes** 120.6160; 120.5050; 100.2980

## 1 引言

散斑干涉测量技术利用激光照射粗糙表面产生的散斑作为信息载体, 对物体表面的微小形变和离面位移进行测量, 是一种非接触、高精度、实时全场

光学测量技术<sup>[1]</sup>。用相移技术得到的原始相位图是一个模为  $2\pi$ 、条纹状的包络图, 可根据其前后形变的相位变化量反演出被测物的真实形变量, 广泛应用于航空航天、兵器、船舶等领域<sup>[2]</sup>。包裹相位图中的散斑颗粒噪声会影响解包裹过程, 进而影响测量

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-19; 录用日期: 2020-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(61603352)、装备预研领域基金(61400030302, 6140003050110)、国防科技重点实验室基金(6142001180413)、山西省自然科学基金(201901D111159)、山西省归国留学基金(2019-68)

\* E-mail: 1095067965@qq.com

形变量的准确度<sup>[3]</sup>。因此,包裹相位图的滤波降噪处理是相位信息准确提取的关键,理想效果是最大程度消除噪声的同时能最大范围地保留相位边缘信息,得到信息完整、纹理清晰的相位图<sup>[4-5]</sup>。

Rudin 等<sup>[6]</sup>提出的全变分(TV)去噪模型可以很好地去除噪声,但会产生阶梯效应。Song<sup>[7]</sup>提出了一种基于  $L^{1+p}$  ( $0 < p < 1$ ) 范数的广义 TV 去噪模型,但对  $p$  的选取十分敏感,且对于相位灰度分布平坦的区域会产生明显的阶梯效应。为了减少阶梯效应,张红英等<sup>[8]</sup>提出了一种自适应正则项的 TV 去噪模型,通过选取扩散参数得到保边效果较好的 TV 模型。姜博宇等<sup>[9]</sup>提出了一种双保真全变差去噪模型,引入了自适应参数作为保真项的权重,使模型能根据不同区域控制保真强度,增加了模型的自适应去噪能力。芦碧波等<sup>[10]</sup>提出了引导滤波及 Split Bregman 方法,将图像作为各向异性 TV 的引导图像进行计算,以提高算法的稳定性。唐晨等<sup>[11]</sup>提出了基于变分图像分解的电子散斑干涉信息提取方法,取得了比较理想的降噪结果。为了更好地保留相位图中的边缘纹理信息,Aebischer 等<sup>[12]</sup>提出了正余弦分解滤波方法,王永红等<sup>[13]</sup>提出了正余弦滤波和频域滤波结合的方法,蒋汉阳等<sup>[14]</sup>提出了基于散斑相位条纹方向的自适应正弦/余弦滤波,可在滤波的同时有效保留相位跳变信息。邱岳等<sup>[15]</sup>提出了基于剪切波变换的改进 TV 散斑去噪方法,将空间域和变换域的优点相结合,能更好地保持相位图的结构。

包裹相位图条纹暗带中掺杂了大量亮噪声点,条纹亮带中掺杂了大量暗噪声点,且暗条纹带和亮条纹带边缘的纹理跳变严重,会影响相位信息的提取。针对该问题,本文提出了一种基于正余弦分解的自适应 TV 去噪方法,可在提升相位图去噪能力的同时有效保留相位信息,并对去噪效果和相位信息的保留进行定量评价,验证了该方法的有效性。

## 2 基本原理

### 2.1 自适应全变分去噪模型

TV 范数可表示为

$$X_{TV}[u(x, y)] = \int_{\Omega} |\nabla u(x, y)|^p dx dy, \quad (1)$$

式中,  $p$  为决定 TV 模型的关键参数,  $\Omega$  为二维图像像素点的邻域,  $\nabla u(x, y)$  为图像的梯度,  $(x, y)$  为图像像素点的坐标。由于含噪图像的 TV 范数明显大于不含噪图像, TV 去噪可演化为求 TV 范数在给

定约束下的最小化问题,约束条件可表示为

$$\int_{\Omega} u(x, y) dx dy = \int_{\Omega} u_0(x, y) dx dy, \quad (2)$$

$$\int_{\Omega} [u(x, y) - u_0(x, y)]^2 dx dy = \sigma^2, \quad (3)$$

式中,  $u_0(x, y)$  为原始含噪图像,  $u(x, y)$  为去噪后的图像,  $\sigma^2$  为噪声方差。TV 能量泛函  $J[u(x, y)]$  可表示为

$$J[u(x, y)] = \frac{1}{p} \int_{\Omega} |\nabla u(x, y)|^p dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} |u(x, y) - u_0(x, y)|^2 dx dy, \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为拉格朗日算子。等号右边第一项主要用于去除图像中的噪声,第二项用于保证去噪后图像和原始图像的接近程度,  $\lambda$  用于平衡这两项<sup>[16]</sup>。

TV 去噪模型的欧拉-拉格朗日方程为

$$\lambda [u(x, y) - u_0(x, y)] - \nabla \left[ \frac{p \nabla u(x, y)}{|\nabla u(x, y)|^{2-p}} \right] = 0. \quad (5)$$

传统 TV 去噪模型中,参数  $p$  一般为固定值,可以看出,当  $p=2$  时,称(5)式为基于  $L^2$  范数的各向同性扩散调和模型,第二项扩散项的扩散系数为 1,即模型朝各个方向扩散的能力相同,虽然可以去除噪声,但保留边缘的能力很弱。当  $p=1$  时,称(5)式为基于  $L^1$  范数的 TV 模型,由于相位图不同梯度区域的扩散能力不同,因此能保持相位图的细节部分,但图像处理过程中容易形成阶梯效应<sup>[17]</sup>。为了减少阶梯效应,引入自适应参数  $p(x, y)$  代替固定值  $p$ ,可表示为

$$p(x, y) = 1 + 1 / [1 + \nabla |G_{\delta}(x, y) * u_0(x, y)|^2], \quad (6)$$

式中,  $G_{\delta}(x, y)$  为高斯滤波器,  $\delta$  为滤波器的方差,  $*$  为卷积符号。滤波器的选取与噪声图像的信噪比有关,首先用一个高斯滤波器对噪声图像作预处理<sup>[18]</sup>,改进后的自适应全变分(ATV)去噪模型的能量泛函和欧拉-拉格朗日方程可表示为

$$J[u(x, y)] = \frac{1}{p(x, y)} \int_{\Omega} |\nabla u(x, y)|^{p(x, y)} dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} |u(x, y) - u_0(x, y)|^2 dx dy, \quad (7)$$

$$\lambda [u(x, y) - u_0(x, y)] - \nabla \left[ \frac{p \nabla u(x, y)}{|\nabla u(x, y)|^{2-p(x, y)}} \right] = 0. \quad (8)$$

ATV 去噪模型的最速下降方程可表示为

$$\frac{\partial u(x,y)}{\partial t} = \nabla \left[ \frac{p \nabla u(x,y)}{|\nabla u(x,y)|^{2-p(x,y)}} \right] - \lambda [u(x,y) - u_0(x,y)]. \quad (9)$$

当时间参数不断增加时,下降方程趋向稳定收敛解,即可以根据图像中每一点的梯度大小,自适应选取合适的  $p(x,y)$ ,以消除 TV 去噪过程中的边缘模糊和阶梯效应问题。

## 2.2 正余弦分解去噪算法

对于一幅包裹相位图,其边缘处信息损失的本质是相位图本身的周期函数不连续,可将不连续的函数变为连续的周期函数,即将不连续的相位变为连续的相位后进行有规律的去噪处理。去噪前将明暗相间的原始含噪相位图进行正余弦函数变换,分解成正弦相位图和余弦相位图,将跃变信息转换为连续量;然后分别对正弦相位图和余弦相位图进行 ATV 去噪处理;最后对去噪后的分量相位图进行反正切运算,合成一幅相位图,从而实现有效去噪和保留边缘信息,得到纹理清晰的包裹相位图,可表示为

$$S(x,y) = \{\sin[G(x,y) \times 2\pi/255] + 1\} \times 255/2, \quad (10)$$

$$C(x,y) = \{\cos[G(x,y) \times 2\pi/255] + 1\} \times 255/2, \quad (11)$$

式中,  $G(x,y)$  为原始相位图的灰度值,进行正弦、余弦变换处理得到分量  $S(x,y)$ 、 $C(x,y)$ 。采用

ATV 模型分别对正弦相位图和余弦相位图进行处理,得到图像的灰度值为  $s(x,y)$ 、 $c(x,y)$ ,对滤波后的分量相位图作反正切处理,得到

$$\Delta(x,y) = \arctan[s(x,y)/c(x,y)], \quad (12)$$

式中,  $\Delta(x,y)$  为去噪和平滑边缘纹理后相位图的灰度信息。

## 3 分析与讨论

### 3.1 实验对比

为验证本方法的有效性,通过计算机得到数值模拟的数学模型,输入待检测系统和待测物材料表面的特征参数,输出含相位信息的相位图。其中,光源波长为 532 nm,将模拟得到不含环境噪声的相位图作为实验测试对象,如图 1(a)所示;图 1(b)为添加方差为 0.1 的噪声后的含噪相位图,对比发现,只经过 TV 模型处理的相位图可去除大量噪声,但存在明显的阶梯效应,虽然可以保留完整的边缘信息,但在图像较为平滑的灰色渐变区域会产生虚假边界,如图 1(c)所示;ATV 模型综合了调和模型和 TV 模型的优点,具有良好的去噪能力和保边能力,如图 1(d)所示;而本方法不论在平滑区还是边缘纹理区域的去噪效果均优于其他两种去噪方法,在平滑区域克服了阶梯效应,且边缘纹理清晰,最接近模拟的原始图像,如图 1(e)所示。

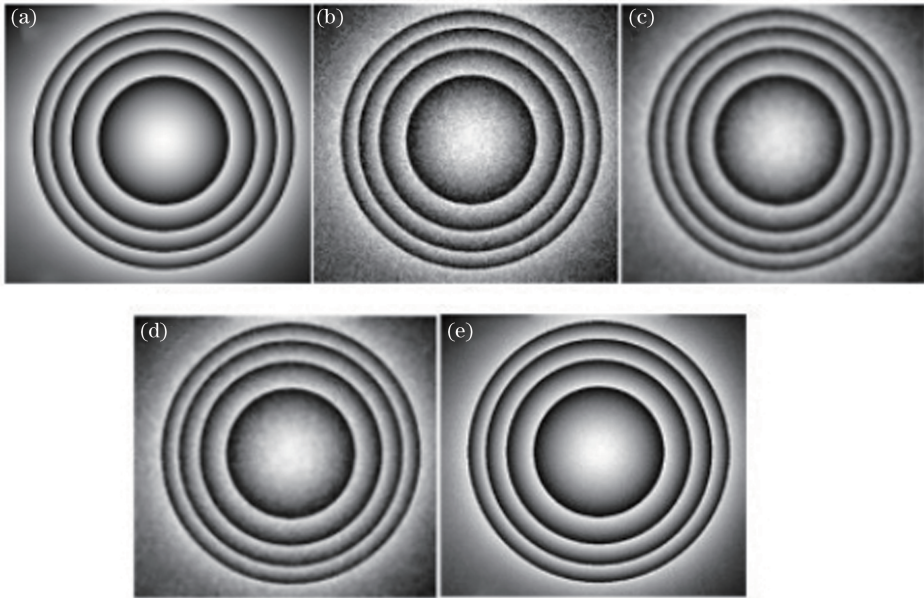


图 1 不同去噪方法的效果。(a)模拟相位图;(b)含噪相位图;(c) TV;(d) ATV;(e)本方法

Fig. 1 Effect of different denoising methods. (a) Simulated phase image; (b) noisy phase image; (c) TV; (d) ATV; (e) our method

### 3.2 基于正余弦分解的全变分去噪过程

通过数字散斑干涉技术对待测物表面形变进行

快速检测时,被测物形变由高精度螺旋加载到其中心产生。设定形变值为 1400 nm,采用空间载波傅

里叶变换法得到原始相位图受多种噪声影响的相位图,如图 2(a)所示。可以发现,相位图明暗相间,且整体含散斑噪声过多、明暗带和其边缘相位信息跳变剧烈,导致图像纹理不清晰。本方法对原始相位图的处理过程:首先,用正余弦函数分解算法将相位图分解成正弦相位图和余弦相位图,如图 2(b)、图 2(c)所示;然后,通过 ATV 去噪算法处理正弦相位

图和余弦相位图,图像的去噪效果随自适应参数  $p(x,y)$  的变化而不同,选取  $p(x,y)=1.5$ ,得到的去噪结果如图 2(d)、图 2(e)所示;最后,进行反正切运算,得到去噪后的完整相位图,如图 2(f)所示。可以发现,相位图中的斑颗粒噪声全部被去除,并消除了阶梯效应,且明暗带和边缘纹理更清晰。这表明相比其他传统去噪方法,本方法的去噪效果更明显。

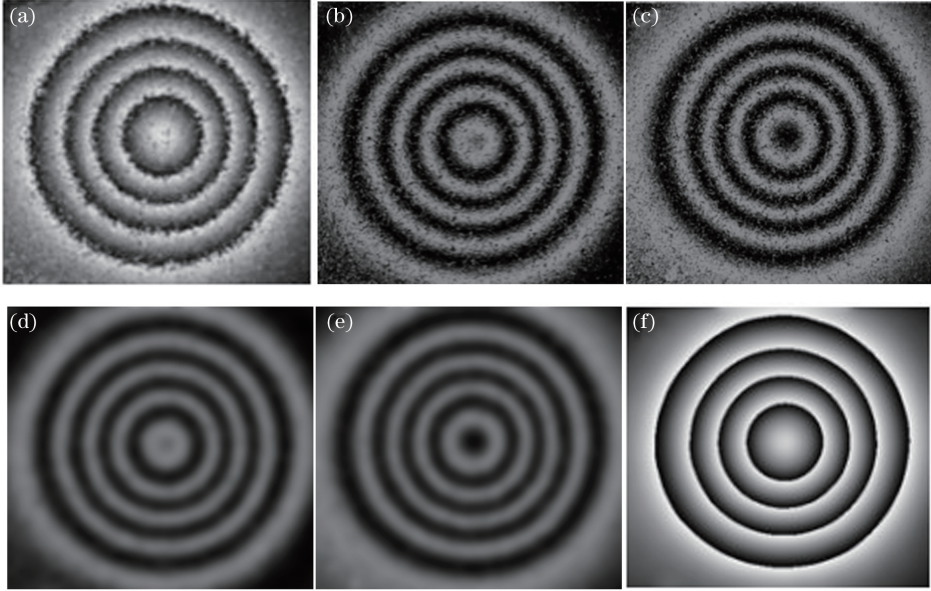


图 2 正余弦分解算法的 ATV 去噪过程。(a)原始相位图;(b)正弦变换相位图;(c)余弦变换相位图;(d)经 ATV 去噪后的正弦变换相位图;(e)经 ATV 去噪后的余弦变换相位图;(f)反正切合成的相位图

Fig. 2 ATV denoising process of the sine-cosine decomposition algorithm. (a) Original phase image; (b) phase image obtained by sine transformation; (c) phase image obtained by cosine transformation; (d) phase image of sine transformation obtained by ATV denoising; (e) phase image of cosine transformation obtained by ATV denoising; (f) phase image of arctangent synthesis

### 3.3 自适应参数的选取

本方法中自适应参数  $p(x,y)$  的选取是散斑图去噪和保留图像边缘信息的关键,其大小由原始相位图经高斯滤波在每个点像素处的梯度值  $|\nabla[G_\delta(x,y) * u_0(x,y)]|^2$  决定。对于相位图中较平滑的区域,即明暗带间的灰色区域,因其梯度较小,  $|\nabla[G_\delta(x,y) * u_0(x,y)]|^2$  趋于 0,使  $p(x,y)$  趋于 2,可以有效去除平滑区域的阶梯效应;对于相位图中明暗带边界区域,因其梯度较大,  $|\nabla[G_\delta(x,y) * u_0(x,y)]|^2$  趋于无穷大,使  $p(x,y)$  趋于 1,可以保留更多的边缘细节。由于实验获得的相位图含噪程度不同,为了验证自适应参数对本方法的影响,使  $p(x,y)$  的取值范围为(1,2),去噪后的结果如图 3 所示。可以看出,  $p(x,y)$  越接近于 1 或 2 时,去噪效果越差;趋于范围的中间值时,去噪效果最好。这表明本方法可自适应选取优于原

始固定值的  $p(x,y)$ ,从而减少去噪效果的波动,使去噪后的相位图鲁棒性更强。

## 4 评价分析

为了定量评价本方法的去噪能力,用峰值信噪比(PSNR)和结构相似度(SSIM)两个指标对不同方法去噪后的相位图进行评价,可表示为

$$X_{\text{PSNR}}(x,y) = 10 \log_{10} \left[ \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - Y_{ij})^2} \right], \quad (13)$$

$$X_{\text{SSIM}}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_x\sigma_y + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (14)$$

式中,  $X$  为模拟的无噪图像,  $Y$  为去噪后的图像,  $M$ 、 $N$  分别为图像的行列数,  $\mu_x$ 、 $\mu_y$ 、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_{xy}$  分别为

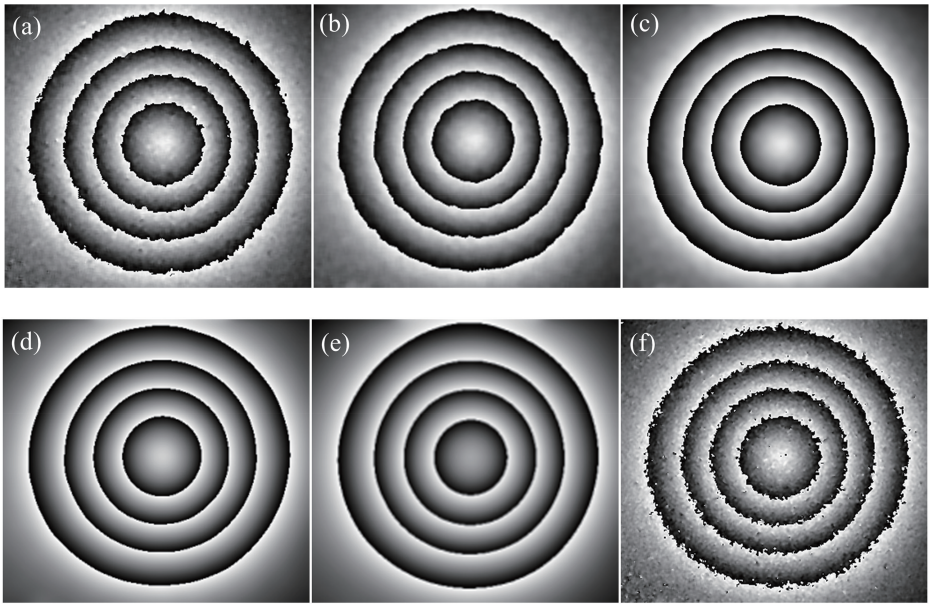


图 3 不同  $p(x, y)$  的去噪效果。(a)  $p(x, y)=1.10$ ; (b)  $p(x, y)=1.30$ ; (c)  $p(x, y)=1.45$ ;  
(d)  $p(x, y)=1.50$ ; (e)  $p(x, y)=1.55$ ; (f)  $p(x, y)=1.90$

Fig. 3 Denoising effect of different  $p(x, y)$ . (a)  $p(x, y)=1.10$ ; (b)  $p(x, y)=1.30$ ; (c)  $p(x, y)=1.45$ ;  
(d)  $p(x, y)=1.50$ ; (e)  $p(x, y)=1.55$ ; (f)  $p(x, y)=1.90$

$X$  和  $Y$  的均值、方差、协方差,  $C_1$ 、 $C_2$  为防止分母为 0 的常数。PSNR 表示原图像与降噪图像噪声水平的差异, 可直接反映模型消除噪声的能力。SSIM 将两幅图像的结构相似程度作为评价标准, SSIM 越大, 表明去噪效果越好, 在相位图中体现为灰度信息的损失程度。不同算法的去噪结果如表 1 所示, 可以发现, 本方法去噪后的 PSNR 比 ATV 模型约高 2.0 dB, SSIM 也明显大于其他去噪方法, 这表明本方法去噪后的相位图灰度信息损失最少, 充分保留了相位图中的信息。

表 1 相位图的去噪效果对比

Table 1 Comparison of denoising effects of phase image

Method	TV	ATV	Our proposed
PSNR /dB	28.1665	31.1392	33.1776
SSIM	0.8912	0.9072	0.9478

为验证本方法的有效性, 根据相位图去噪前后灰度值的变化情况, 确定相位图去噪后的效果以及明暗带灰度值跳变处相位信息的保留程度。取相位图中水平中心轴处的相位分布及灰度值曲线, 用  $x$  轴表示像素大小,  $y$  轴表示灰度值。图 4(a) 为图 1(a) 沿水平中心轴线的相位分布, 可以发现, 相邻完整亮暗条纹之间的灰度值为 255, 即明暗条纹过渡区域光滑, 灰度值没有损失; 图 4(b) 为图 1(b) 沿水平中心轴线的相位分布, 可以发现, 因相位图中暗带、亮带和边缘处包含大量噪声, 导致区域内的灰度

值变化剧烈且频繁, 呈锯齿形分布; 图 4(c) 为图 1(d) 沿水平中心轴线的相位分布, 可以发现, 阶梯效应使相位图中心亮条纹处的灰度值存在跃变, 造成局部相位信息损失; 图 4(d) 为图 1(e) 沿水平中心轴线的相位分布, 可以发现, 在像素范围内, 去噪后相位图灰度值稳定, 峰值处没有明显的跳变, 可以准确确定峰值处的灰度值。

可用去噪后相位图的相位估计离面形变量, 设整幅相位图中的条纹级数为  $K$ , 由亮条纹级数  $K$  对应相位变化, 可得到离面形变  $\Delta L$  为

$$\Delta L = \frac{K\lambda}{2}, \quad (15)$$

式中,  $K = m + n$ ,  $m$  为图中完整的条纹级数,  $n$  为非完整的条纹级数。以图中对称的亮暗条纹峰谷数为基准, 将亮条纹数定义为整数级数, 由于相邻、完整的明暗条纹之间的灰度值差为 255, 即对应的相位变化为  $\pi$ , 若其中一条不完整的条纹对应的灰度值为  $a$ , 则该条纹对应的级数可表示为

$$n = (255 - a) / (2 \times 255). \quad (16)$$

由于图 4(a) 中的灰度值不丢失, 全部为完整的亮条纹, 级数为 5, 根据 (15) 式计算出形变量为 1330 nm; 而图 4(b) 在未滤波情况下, 无法确定形变量; 图 4(c) 由于去噪效果不佳, 中央亮条纹的灰度值有跳变, 只取峰值最靠近的灰度值计算非完整条纹的级数, 使形变量比实际值低, 导致相对误差过

大;在去噪效果较好的情况下,图 4(d)中的相位分布整体光滑,确定亮条纹处的灰度值后,可得到 4 条完整的亮条纹和一条不完整的亮条纹,不完整的亮

条纹实际灰度值为 238,即实际亮条纹的级数为 4.033,相位图的形变量为 1072.78 nm。

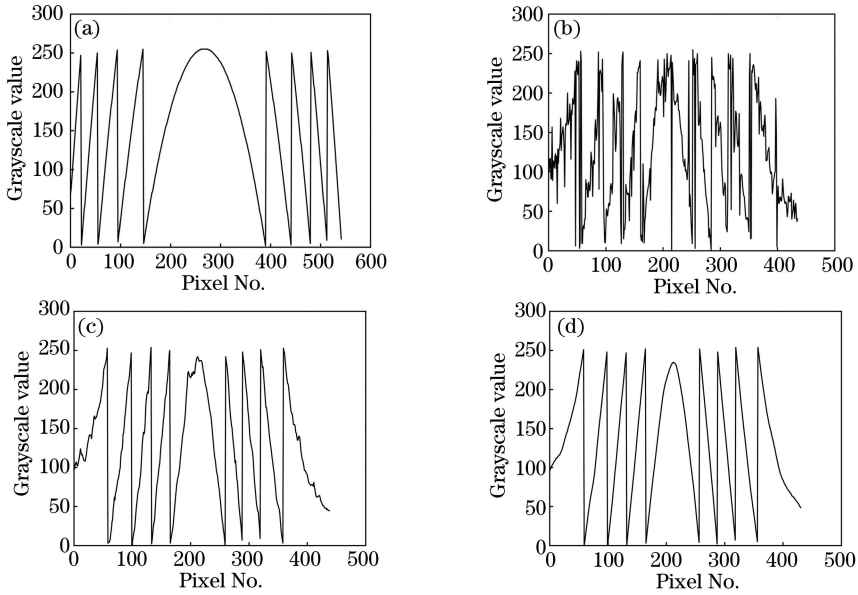


图 4 水平中心轴线处的相位分布。(a)模拟相位图;(b)原始相位图;  
(c) ATV 方法去噪后的相位图;(d)本方法去噪后的相位图

Fig. 4 Phase distribution of the horizontal center axis. (a) Simulated phase image; (b) original phase image;  
(c) phase image after denoising by ATV method; (d) phase image after denoising by our method

为了在解包裹后计算形变量,需对包裹相位图进行去噪,而解包裹的效果受去噪水平的影响。图 5(a)为图 2(a)的解包裹结果,可以发现,受大量噪声影响,解包裹后图像中出现严重的“拉线”现象,未经去噪的相位图解包裹失败,无法看出物体真实的相位变化趋势;图 5(b)为图 2(a)经 TV 方法去噪后解包裹的效果图,可以发现,随着噪声的减少,解包裹图可以看出相位的变化趋势,但仍然存在大量的“拉线”现象;图 5(c)为图 2(a)经 ATV 方法去噪后解包裹的效果图,由于去噪后相位图噪声明显减少,只有个别边缘处存在噪声颗粒引起的“拉线”现

象,解包裹效果有明显的改善;图 5(d)为图 2(a)经本方法去噪后的解包裹效果图,可以发现,相位图解包裹区域无“拉线”现象,可以直观看出真实的相位变化趋势。将解包裹后的相位图依次进行三维显示,以表现被测物表面的形变场分布,直接提取相位图中的相位信息,获得真实测量的形变量,如图 6(a)~图 6(d)所示。从图 6(a)~图 6(c)可以发现,经 TV 和 ATV 方法去噪后相位图的解包裹效果不佳,无法测出准确的形变量;从图 6(d)可以发现,利用本方法去噪后解包裹成功的相位图可以测出真实的形变量。

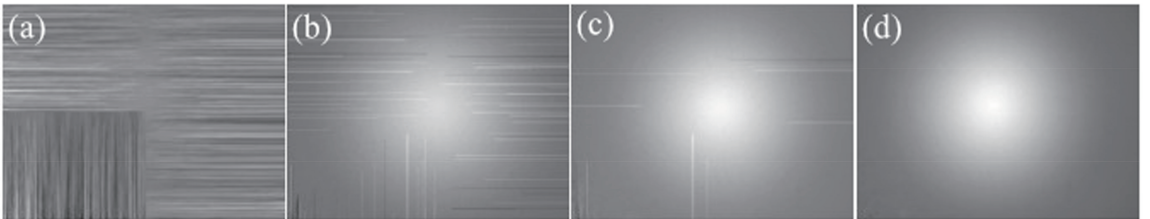


图 5 不同方法得到的解包裹图。(a)原始相位图;(b) TV;(c) ATV;(d)本方法

Fig. 5 Unwrapping image obtained by different methods. (a) Original phase image; (b) TV; (c) ATV; (d) our method

为验证本方法中自适应参数  $p(x, y)$  对去噪效果的影响,对图 3 中解包裹后的相位图进行三维显示,如图 7 所示。可以发现,从图 7(a)~图 7(f)得到的形

变量依次为 1334, 1338, 1341, 1354, 1348, 1328 nm, 这表明选取合适的自适应参数,可提高去噪效果,使测得的形变量与预设的中心形变值 1400 nm 更接近。

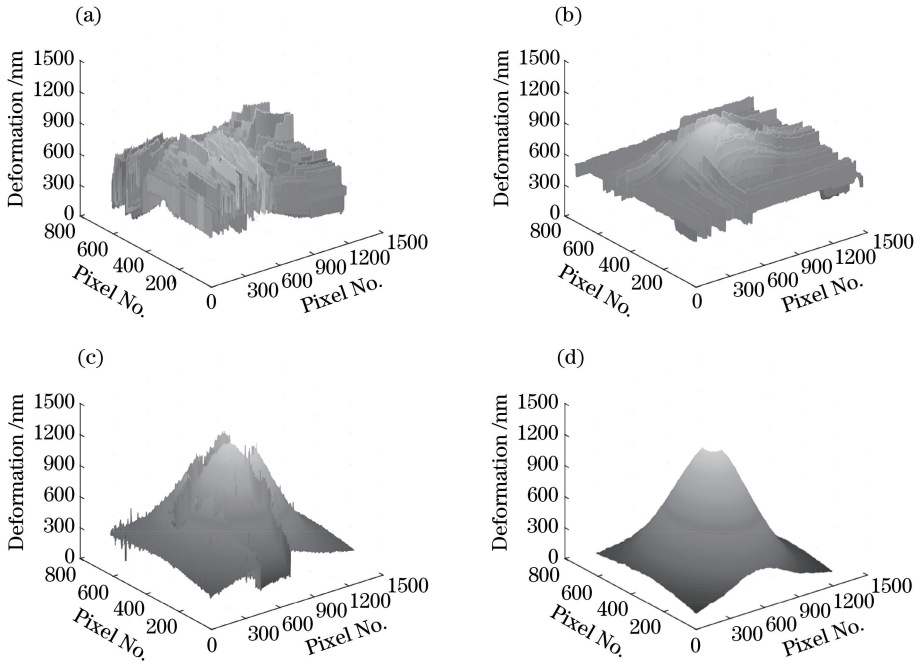


图 6 不同去噪方法得到的被测物形变场分布。(a)~(d)图 5(a)~图 5(d)对应的形变场分布  
 Fig. 6 Deformation field distribution of the measured object obtained by different denoising methods.  
 (a)-(d) Deformation field distribution corresponding to Fig. 5(a)-Fig. 5(d)

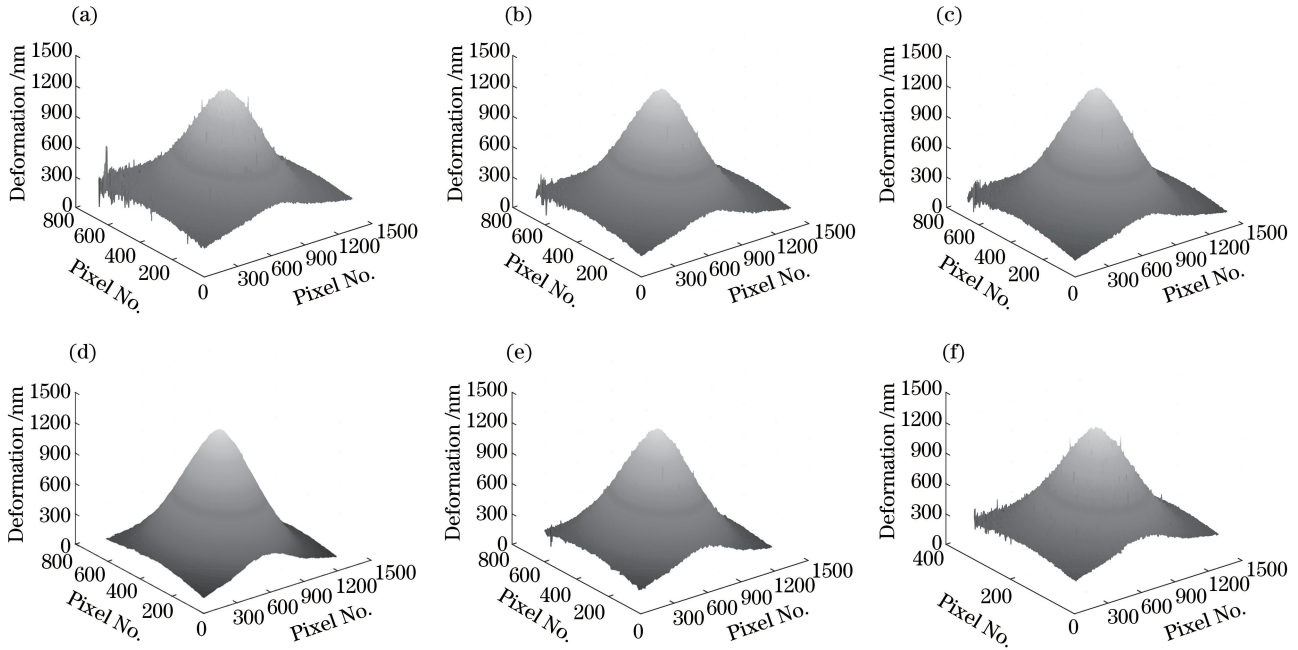


图 7 不同参数  $p(x, y)$  时被测物的形变场分布。(a)~(f)图 3(a)~图 3(f)对应的形变场分布  
 Fig. 7 Deformation field distribution of the measured object with different parameter  $p(x, y)$ .  
 (a)-(f) Deformation field distribution corresponding to Fig. 3(a)-Fig. 3(f)

## 5 结 论

针对含噪包裹相位图边缘处的相位随去噪或滤波处理的损失问题,提出了一种基于正余弦分解的 ATV 散斑去噪方法。采用相位预处理方法保护相

位图边缘处的信息,结合 ATV 去噪模型,有效去除相位图中的大量散斑噪声并保留相位图中明暗带边缘处的纹理细节。相比传统 TV 去噪模型,本方法不仅可以有效去除相位图中的噪声、保护边缘信息,且去噪后的相位分布整体更平滑,几乎没有灰度值

跳变现象,提高了解包裹的精度。对不同方法去噪图像的定量评价结果表明,相比传统方法,本方法得到的图像 PSNR 提高了约 2.0 dB,SSIM 值偏大,表明本方法可以减少灰度信息的损失。同时可以根据原始相位图的优劣情况,增强算法的自适应性。通过缩小自适应参数范围,提高模型的去噪能力。从相位图解包裹和三维显示结果来看,本方法提取的最大形变量为 1354 nm,最接近预设值,证明了本方法的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] Hung Y Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 213391.
- [2] Wang Y H, Thomas D, Zhang P, et al. Whole field strain measurement on complex surfaces by digital speckle pattern interferometry[J]. *Materials Evaluation*, 2008, 66(5): 507-512.
- [3] Herráez M A, Burton D R, Lalor M J, et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7437-7444.
- [4] Capanni A, Pezzati L, Bertani D, et al. Phase-shifting speckle interferometry: a noise reduction filter for phase unwrapping[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(9): 2466-2472.
- [5] Wang Y H, Liang H, Wang S, et al. Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2013, 6(4): 470-480.  
王永红, 梁恒, 王硕, 等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 470-480.
- [6] 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.
- [7] Song B. Topics in variational PDE image segmentation, inpainting and denoising [D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2003.
- [8] Zhang H Y, Peng Q C. Adaptive image denoising model based on total variation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3): 50-53.  
张红英, 彭启琮. 全变分自适应图像去噪模型[J]. *光电工程*, 2006, 33(3): 50-53.
- [9] Jiang B Y, Zhang J. Denoising model based on double-fidelity total variation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021004.  
姜博宇, 张剑. 双保真全变差去噪模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021004.
- [10] Lu B B, Wang L R, Wang Y M, et al. Anisotropic total variation guided filtering and its Split Bregman algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 051005.  
芦碧波, 王乐蓉, 王永茂, 等. 各向异性全变分引导滤波及其 Split Bregman 方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 051005.
- [11] Tang C, Chen M M, Chen X, et al. Information extraction methods based on variational image decomposition for electronic speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328002.  
唐晨, 陈明明, 陈霞, 等. 基于变分图像分解的电子散斑干涉信息提取方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328002.
- [12] 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.
- [13] 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 Journal of Optics*, 2014, 7(3): 389-395.  
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.
- [14] Jiang H Y, Dai M L, Su Z L, et al. An adaptive sine/cosine filtering algorithm based on speckle phase fringe orientation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0910001.  
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.
- [15] Qiu Y, Tang C, Xu M, et al. Shearlet-transform-based improved total variation speckle denoising method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021003.  
邱岳, 唐晨, 徐敏, 等. 基于剪切波变换的改进全变分散斑去噪方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021003.
- [16] Chen D L, Chen Y Q, Xue D Y. Fractional-order total variation image denoising based on proximity algorithm[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, 257(15): 537-545.
- [17] Zhu L X, Xia D S. Staircase effect alleviation by coupling gradient fidelity term [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(8): 1163-1170.
- [18] Davila A, Kaufmann G H, Kerr D. Scale-space filter for smoothing electronic speckle pattern interferometry fringes [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(12): 3549-3554.