

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312753

融合小波与非局部均值滤波的 DSPI 相位图去噪^{*}

刘 源 吴思进 李伟仙 司娟宁 牛海莎

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

摘 要: 相位图去噪是数字散斑干涉测量的关键技术,但现有以正余弦均值滤波与窗口傅立叶变换滤波为代表的去噪方法在相位保真、自适应降噪、操作简便等方面不能完全满足要求。提出了一种新的自适应相位图去噪方法,首先计算原始相位图的噪声方差,然后对图像分别进行正弦与余弦变换后得到两幅图像,再对这两幅图像进行小波同态阈值去噪与非局部均值滤波,最后将处理后的两幅相位图反正切运算并再次估计噪声方差,根据图像噪声方差的收敛情况判断是否继续迭代处理,以实现相位图的自适应降噪。实验结果表明:针对同一张含噪相位图与传统正余弦均值滤波相比,本文方法噪声方差减少了 0.38、L 算子和减少了 0.2、SSIM 提高了 0.16,同时,图像信息熵仅相差 0.1。该方法能够有效抑制相位图中的相干噪声,充分保留相位边缘信息,同时能够有效避免因不适当的迭代滤波次数所导致的相位失真或噪声残留。

关键词: 数字散斑干涉技术;相位图去噪;非局部均值滤波;小波阈值去噪

中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Denoising of DSPI phase maps based on wavelet and non-local mean filtering

Liu Yuan Wu Sijin Li Weixian Si Juanning Niu Haisha

(School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Phase denoising is a key technology for digital speckle pattern interferometry, but the existing denoising methods represented by sine-cosine mean filtering and window Fourier transform filtering cannot fully meet the requirements in terms of phase fidelity, adaptive noise reduction, and ease of operation. In this article, a new adaptive denoising method is proposed. The method estimates the noise variance of a raw phase map at the first, and then performs the sine-cosine transformation of the phase map to obtain two phase maps. The two phase maps are then smoothed respectively by using several layers of wavelet threshold denoising and non-local mean filtering. The two phase maps are subjected to arctangent operation and their noise variances are estimated again. The above-mentioned denoising operations are iteratively performed according to the criterion of image noise variance to realize adaptive noise reduction of the phase maps. Experimental results show that compared with the traditional sin-cosine mean filtering, The noise variance of the proposed method is reduced by 0.38, the sum of L operators is reduced by 0.2, and the SSIM is increased by 0.16. Meanwhile, the difference of image information entropy is only 0.1. This method can effectively suppress the coherent noise in the phase maps, preserve the phase edge information, and avoid phase distortion or noise residue caused by inappropriate filtering cycles.

Keywords: digital speckle pattern interferometry; phase map denoising; non-local mean filter; wavelet denoising

0 引 言

数字散斑干涉技术(digital speckle pattern interferometry, DSPI)是一种能精确检测物体表面形变的非接触全场光学

测量技术,已广泛应用于航空航天、生物医学和精密制造等领域。该技术通过计算干涉相位的变化,来测量待测物由于加载所产生的的形变量,相位的测量精度直接影响了变形的测量精度。由于散斑干涉的天然属性,DSPI 所得到的

收稿日期:2023-02-06

^{*} 基金项目:北京市自然科学基金(4212047,4214080)、国家自然科学基金(52075045,52075044)项目资助

原始相位图充满着高能量级的散斑噪声,导致图像信噪比低,严重影响后续的解包裹操作。因此需要对原始相位图进行去噪,同时还需保留由于相位截断所导致的相位突变信息,获取平滑的包裹相位图^[1-3]。

针对 DSPI 相位图滤波,目前主流的算法可以分为空域滤波法、变换域滤波法与偏微分方程法三类。国内外很多学者对 DSPI 相位图滤波方法进行了研究。空域法有: Aebischer 提出了正余弦变换均值滤波法,对正余弦变换后的相位图进行均值滤波^[4]。正余弦变换,即首先对原始相位图进行正/余弦变换得到两幅相位图,消除相位的不连续性;然后再对两幅变换后的图片分别进行空域或变换域滤波;最后执行反正切运算来还原相位图。该工作为后续学者的研究奠定了基础。Yu 等^[5]提出了自旋滤波法;Chen 等^[6]提出了沿条纹切线的最小二乘滤波法;Bernini 等^[7]提出了基于二维经验模态分解(bidimensional empirical mode decomposition, BEMD)的方法,该方法将 DSPI 相位图分解成若干个频率不同的模态分量,再去除高频噪声分量后,对剩余分量进行合成,减弱散斑噪声对图像带来的影响;Tang 等^[8]提出了定向空间掩模滤波,建立只突出显示噪声而不突出图像边缘的导数算子,再从原始图像中减去定向导数图像即可得到去噪后图像。变换域法有:Qian^[9]提出了基于窗口傅里叶变换的相位图快速滤波法;Shulev 等^[10]在窗口傅里叶变换基础上提出滑动窗口傅里叶变换;Zada 等^[11]提出了基于小波变换滤波法,该方法能够有效地抑制散斑噪声,保留图像部分细节特征。偏微分方程法有:Cheng 等^[12]提出了用于散斑干涉 S 纹滤波的四阶偏微分方程并取得了良好的效果。

上述方法能够有效抑制相位图中的噪声,但也存在着一些问题。首先,这些方法本质上只属于空域或变换域,不能兼顾空域与变换域各自的优点。其次,有些方法在滤波过程中无可避免地对图像的边缘细节与纹理信息造成破坏,因此很难兼顾噪声抑制与相位边缘信息以及相位突变信息的保留。此外,部分方法中循环的次数需要手工设定,次数太少会导致噪声能量依旧很高,效果不理想;次数太多则会过度平滑,引入较大的相位失真^[13-14]。

本文提出了一种结合小波与非局部均值滤波的自适应相位图降噪法,该方法以结合小波同态阈值去噪与非局部均值滤波^[15-18]的组合滤波方案为手段,兼顾空域与变换域滤波方法的优势。此外,通过计算图像中噪声分量的方差^[19-20]评估噪声能量,作为噪声是否被充分滤除的判据,从而使算法具有自适应性(无需设置迭代次数)。本文分别进行算法验证实验、仿真实验与真实实验,综合分析对比不同算法处理后的滤波效果与几种参数指标^[21-22]以验证本文方法的有效性。

1 算法分析

1.1 非局部均值滤波

非局部均值滤波(non-local means, NL-mean)充分利

用图像中源于结构相似性的冗余信息,在去噪的同时能最大程度地保持图像的细节特征。算法基本思想如图 1 所示,当前像素点的灰度值不仅仅由当前窗口内其他像素点的灰度值来决定,而是利用图像整体的结构相似性来决定。首先在整幅图像中寻找与当前块相似的图像块,再根据图像块之间的相似度大小赋予其不同的权值,以此来实现图像滤波。该算法可在滤波的同时尽可能地保留图像的边缘信息与细节特征。

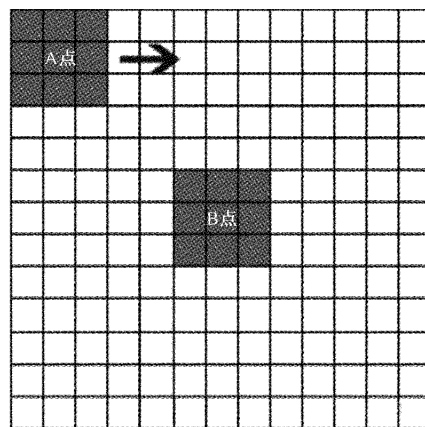


图 1 非局部均值执行示意图

图中 B 点为待处理的像素点,以 B 点、A 点为中心的两个灰色区域分别是滤波窗口与搜索窗口,搜索窗口按照一定的规则在图像中滑动,依次寻找匹配与滤波窗口相似程度较高的若干个图像块,再计算这些相似块与当前窗口间的相似程度并以此赋以相似块一定的权值,待处理像素点的灰度值便由这些相似块与权值共同决定。

假定含噪图像为:

$$G(I) = Y(I) + N(I) \quad (1)$$

其中, G 、 Y 、 N 分别表示含噪图像、不含噪声的原始图像与噪声分量。经过非局部均值滤波后的中像素点 x 处的灰度值可表示为:

$$\tilde{G}(x) = \sum_{y \in I} w(x, y) \times G(y), (x \in I) \quad (2)$$

其中, $\tilde{G}(x)$ 表示经过滤波后的 x 点处像素灰度值, $w(x, y)$ 表示基于 x 点与 y 点两点相似度的权值,由以 x 、 y 为中心的窗口或称邻域灰度值向量之间的距离(相似性)来决定,并满足条件 $0 \leq w(x, y) \leq 1$ 和 $\sum w(i, j)$, $G(y)$ 表示原始图像中 y 点灰度值。以 x 、 y 两点为中心的两个邻域灰度值向量 $v(G(x))$ 、 $v(G(y))$ 之间的相似性由高斯加权的欧氏距离来决定:

$$d(x, y) = \|v(G(x)) - v(G(y))\|_2^2 \quad (3)$$

权重 $w(x, y)$ 为:

$$w(x, y) = \frac{1}{Z(x)} \exp\left(-\frac{d(x, y)}{h^2}\right) \quad (4)$$

其中, $Z(x) = \sum_y \exp\left(-\frac{d(x, y)}{h^2}\right)$ 为归一化系数。

将权值映射到区间 $[0, 1]$ 之间, h 为平滑参数, 控制着高斯函数的衰减程度。 h 越大高斯函数变化越平缓, 噪声抑制水平越高; 反之边缘细节成分保持得越多, 但会使残留噪点过多。

1.2 基于主成分分析的噪声方差估计

图像的噪声估计是评估去噪效果的重要途径, 目前主流的噪声评估方法有滤波法、变换域法与图像分块法。基于主成分分析(principal component analysis, PCA)的噪声方差估计法继承了图像分块法的基本思想, 并在其基础上融合了主成分分析的思想而进一步发展所形成。PCA 是一种常用的多变量统计方法, 通过某种正交变换将一组可能存在相关性的变量数据, 转换为的一组线性无关的变量。PCA 将 n 维输入数据缩减为 r 维 ($r < n$), 实质上是一个基变换, 使变换后各数据线性无关。

设输入的原始含噪声图像尺寸为 $M \times N$, 划分后的子块尺寸为 $m \times m$, 则划分的子块数量为:

$$s = (M - m + 1)(N - m + 1) \quad (5)$$

此时原始含噪图像被划分为了 s 个大小相等的子块, 假设每一个子块都受到高斯白噪污染的影响, 则有以下模型关系:

$$G_k(i, j) = Y_k(i, j) + N_k(i, j) \quad (6)$$

将 s 个子块构成的灰度值矩阵向量化后重构为 $r = s^2$ 维的矩阵, 该矩阵的协方差矩阵为:

$$\Sigma = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s (g_k - u_k)(g_k - u_k)^T \quad (7)$$

其中, $u_k = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s g_k$ 为子块向量的均值, 对式(7)做特征值分解可得:

$$\Sigma_x = \mathbf{R} \mathbf{A} \mathbf{R}^T = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_T \end{bmatrix} \mathbf{R}^T \quad (8)$$

在式(8)中得到的 r 个特征值中选取最小特征值 λ_{\min}^0 作为噪声方差的初始估计值 σ_0 。计算阈值, 将迹小于阈值的子块筛选出来, 剩下的子块重新向量化并构建出新的矩阵计算其协方差矩阵, 仍找出协方差矩阵中的最小特征值 λ_{\min}^1 , 以此作为第一次的噪声方差估计值 σ_1 。重复上述步骤, 最后对得到的噪声方差序列进行最小二乘拟合, 当 n 次估计后的方差 σ_n 趋于收敛, 将该收敛值作为图像噪声方差的最终估计值。

1.3 滤波效果评价指数

为了定量分析比较滤波效果, 本文采取信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)、结构相似度(structural similarity, SSIM)、拉普拉斯算子和、图像信息熵这 4 个指数, 综合比较不同滤波方法的性能。

1) 峰值信噪比即峰值信号的能量与噪声的能量之比, 是客观衡量图像质量的指标, 可评估经过处理后的图像与

原始图像之间的差异。本文用该指数衡量不同方法对原始相位图中噪声的抑制水平, 其表达式为:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (9)$$

其中, MSE 为两幅图像的均方误差, MAX 为图像中最大灰度值。若图像为 8 位, 则灰度图像最大值为 255。

2) 结构相似度从图像中提取亮度、对比度和结构 3 个关键特征组合为一个特征值, 该特征值反映了两幅图像在轮廓细节等方面的相似度, 可定量分析两张图像之间的相似性。当两幅图像越相似, SSIM 越趋近于 1。本文将该指数用于衡量滤波后相位图对原始相位图细节保留程度, 表达式为:

$$SSIM(G, I) = \frac{(2\mu_G\mu_I + c_1)(\sigma_{GI} + c_2)}{(\mu_G^2 + \mu_I^2 + c_1)(\sigma_G^2 + \sigma_I^2 + c_2)} \quad (10)$$

其中, μ_G 与 μ_I 是两幅图像的均值, σ_G 是两幅图像的协方差, σ_G 与 σ_I 是两幅图像的方差, C_1 和 C_2 是两个常数。

3) 归一化拉普拉斯算子和(L 算子和): 拉普拉斯算子是一种边缘检测算子, 可以利用拉普拉斯算子和来判断图像中灰度变化的剧烈程度。计算过程为用拉普拉斯算子将图像二值边缘化后, 再除以图像灰度值之和将数值归一化。若一幅图像轮廓清晰, 则算子和越大; 若图像轮廓模糊不清, 则算子和越小。该指数衡量包裹相位图对相位边缘突变信息的保留程度。表达式为:

$$L_k = \frac{\sum_{(x,y) \in \omega} \begin{vmatrix} 8f_k(x,y) - f_k(x-1,y) - f_k(x+1,y) \\ -f_k(x,y-1) - f_k(x,y+1) - f_k(x-1,y-1) \\ -f_k(x-1,y+1) - f_k(x+1,y-1) - f_k(x+1,y+1) \end{vmatrix}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(i,j)} \quad (11)$$

其中, $f(x, y)$ 为图像像素灰度值, $p(i, j)$ 为图像灰度值之和。

4) 图像信息熵: 表示图像所包含的平均信息量的多少, 熵值越大则所含信息量越多。表达式为:

$$H(X) = \sum_{x \in X} p(x) \log p(x) \quad (12)$$

1.4 噪声数学模型

在干涉成像系统中光场一般可以表示为:

$$E = A_s \exp(i\varphi_s) + A_n \exp(i\varphi_n) \quad (13)$$

其中, A_s 为物光与参考光的合光场, A_n 为散斑场光场。则成像系统光强为^[23]:

$$I = A_s^2 + A_n^2 + 2A_s A_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) = I_s + I_n + I_{sn} \quad (14)$$

$I_s = A_s^2$ 为干涉场光强, $I_n = A_n^2$ 为散斑光强, $I_{sn} = 2A_s A_n \cos(\varphi_s - \varphi_n)$ 为干涉光场与散斑场光场的寄生光场光强。

已知散斑复振幅为:

$$A = A_n \exp(i\varphi) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^N a_j \exp(i\varphi_j) \quad (15)$$

散斑像光强、散斑场光强与散斑场光强均值之间的关系为^[24 25]:

$$I_m(a) = I_s \frac{I_n(a)}{\langle I_n(a) \rangle} \quad (16)$$

散斑场光强服从负指数分布:

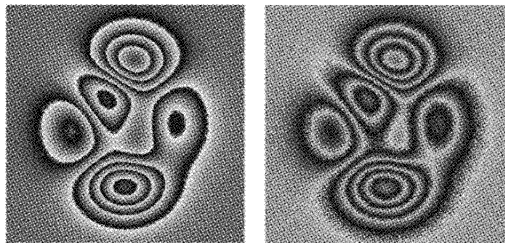
$$p(I_n) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

散斑干涉条纹图可表示为:

$$I(x, y) = 4 \sqrt{I_r I_o} \left| \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right| \left| \sin \frac{\Delta\phi}{2} \right| \quad (18)$$

从式(17)可以看出散斑干涉条纹频谱与噪声频谱混杂在一起,若物光与参考光分布不均匀,则导致条纹振幅不均匀。

由等式(13)~(18)可知,可以将散斑场光强等效为一种服从负指数分布乘性噪声,相机记录的散斑光强则可以看作是被乘性噪声干扰的信号。在整个测量过程中,有效相位信息同时受到了服从负指数分布的乘性散斑噪声与服从高斯分布的加性背景光噪声的干扰,因此测量过程中的噪声可以被近似为同时包含加性与乘性的复合噪声。图 2 展示了仅含加性噪声与同时包含两种类型噪声之间的区别。



(a) 含加性噪声相位图 (b) 含乘性加性复合噪声相位图

图 2 含不同类型噪声的包裹相位图

1.5 算法流程

整体算法流程如图 3 所示,包含以下步骤:1)首先对原始含噪声图像进行噪声方差估计得到 σ_n ; 2)对图像分别进行正余弦变换后再对正弦相位图与余弦相位图进行小波同态阈值去噪与非局部均值滤波; 3)对经过处理的正余弦相位图反正切操作,重新估计滤波后的图像噪声方差,重复上述步骤;直到 σ_n 趋于收敛。

由噪声数学模型可知,散斑干涉相位图中同时包含乘性噪声与加性噪声。先使用小波同态滤波将乘性噪声转换为加性噪声滤除一次。由于乘性噪声相当一部分存在于相位边缘突变处,小波同态滤波能够有效抑制相位边缘突变信号中包含的乘性噪声。此外,借助小波阈值去噪多分辨率的特性,尽可能保留相位边缘突变有效信息。再利用非局部均值滤波对孤立噪点与加性噪声有效滤除,尽可能地保留图像的细节特征,在滤波的同时减少有效信息的损失。在较少的迭代次数内,完成对复合噪声充分地抑制。

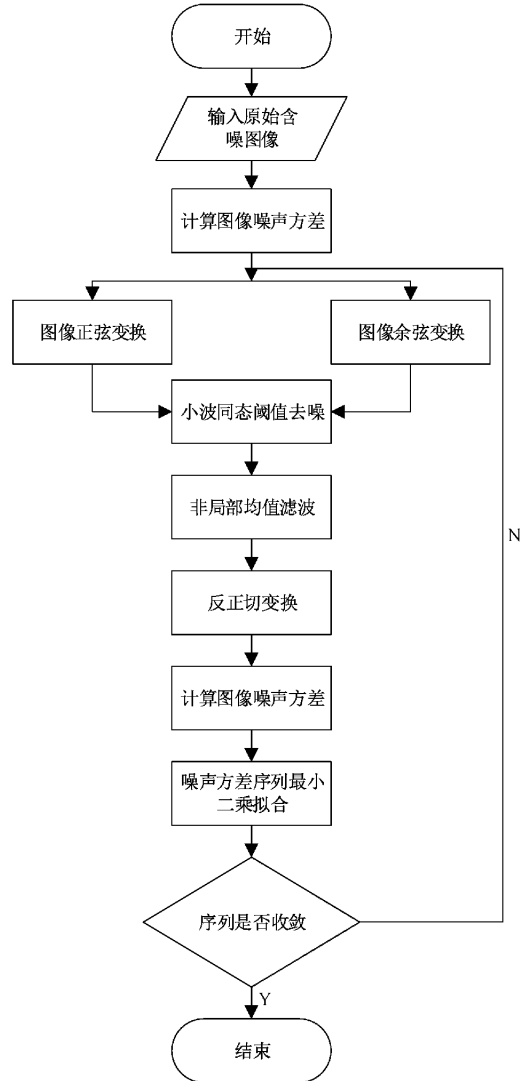
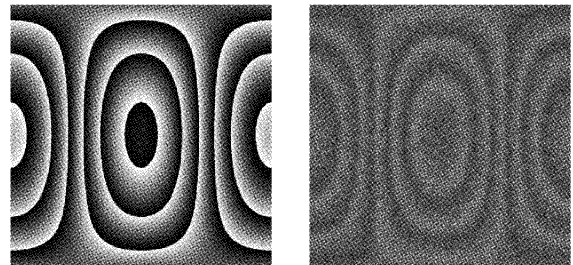


图 3 算法整体流程

2 算法验证与仿真实验

为了模拟 DSPI 测量过程中的噪声,在原始包裹相位图中添加含有乘性散斑与加性背景光噪声的复合噪声,得到的原始相位图与含噪相位图,如图 4 所示。



(a) 原始包裹相位图 (b) 添加噪声后包裹相位图

图 4 含噪包裹相位图

2.1 算法有效性验证实验

图 5 分别为采用非局部均值滤波法、采用组合滤波

法与采用自适应组合滤波法所得相位图。其中组合滤波指结合小波与非局部均值滤波；自适应组合滤波即本文方法，指在组合滤波的基础上进一步结合 1.2 节中所述的噪声方差评估，当方差趋于收敛，则结束迭代输出

图像。比较图 5(a)~(c) 可直观地看出，相比于仅采用非局部均值滤波处理后的相位图，采用组合滤波法与自适应组合滤波所得相位图中噪声得到了更为充分的滤除。

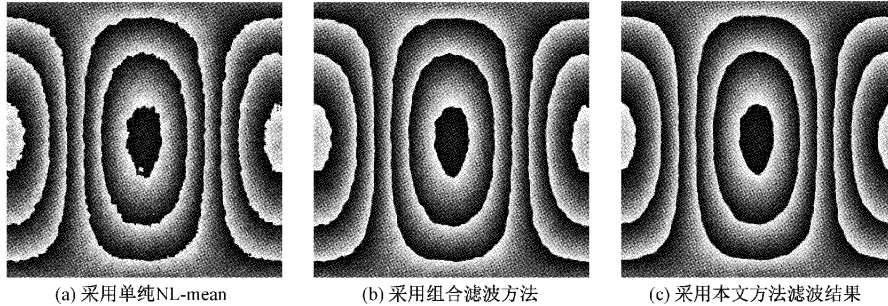


图 5 3 种滤波方法结果对比

表 1 为 3 种滤波手段的滤波评估指数比较。其中 PSNR 与 SSIM 两项指数是联合图 5(a)~(c) 与图 4(a) 进行计算所得，L 算子和为分别计算图 5(a)~(c) 每张图像的拉普拉斯算子和。由图 5 与表 1 可知，与纯非局部均值滤波相比，组合滤波能以较少的循环次数充分抑制图像中的复合噪声，信噪比也得到了提高，图像结构相似性也得到了保护。由归一化 L 算子和可知，相位边缘突变信息中的乘性噪声得到了较好地抑制。尽管可能会丢失部分有效信息，但在可接受范围内(相位重构验证后)。而纯非局部均值滤波则对复合噪声滤除效果较差，噪点仍残留严重。与组合滤波相比，自适应组合滤波信噪比更高，在更为充分地滤除噪声的基础上对图像结构相似度的保护程度较高，同时无需像组合滤波那样反复尝试以寻找最优效果，而是由算法自动给出最优滤波结果。

表 1 3 种滤波方法指数比较

参数	NL-mean	组合滤波法	本文方法
PSNR	14.77	15.35	16.47
SSIM	0.84	0.91	0.90
L 算子和	1.52	1.45	1.46
迭代次数	4	3	4

图 6 记录了在经过不同滤波迭代次数下(1~8 次)，组合滤波法得到相位图的 PSNR、SSIM 与拉普拉斯算子和 3 项指数的变化图。综合表 1 与图 6 可知，SSIM 在 4 次迭代滤波前呈稳步上升趋势，L 算子和在 4 次迭代滤波前呈稳步下降趋势，而在经过 4 次迭代滤波后两参数趋于稳定；PSNR 在 4 次迭代前呈稳步上升后出现波动。综合 3 项指数的变化趋势，可知经过 4 次迭代后各指数性能达到最优，同时自适应组合滤波对应结束迭代输出次数同样也为 4 次，与综合分析 3 项指数所得到的结果相符合，印证了本文方法自适应滤波能力的可靠性。

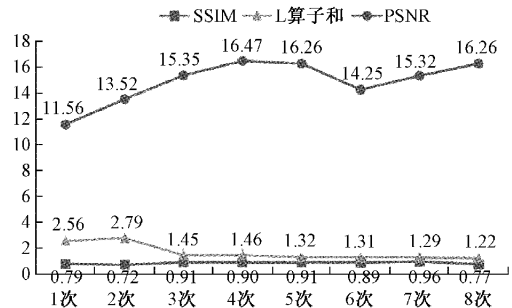


图 6 不同迭代次数下的组合滤波指数

2.2 与其他算法对比实验

常用的相位图滤波手段有正余弦均值滤波与窗口傅里叶变换，在本节中，比较了本文方法与上述两种方法的滤波结果。

1) 本文方法与正余弦均值滤波对比

与本文提出的方法相比，传统非自适应方法需要手工设置迭代滤波次数，故此会出现迭代次数偏少造成的欠滤波、迭代次数较为合适的正常滤波与迭代次数过多造成的过滤波三类情况。本实验采用正余弦均值滤波法作为本文方法的对比手段，对含噪包裹相位进行滤波，采用 7×7 模板，分别经过 4 次、18 次、36 次迭代滤波，以此来模拟欠滤波、正常滤波、过滤波 3 种情况。

图 7(a) 为本文方法处理后的相位图，图 7(b)、(c) 和(d) 分别为传统正余弦均值滤波方法在欠滤波、正常滤波、过滤波 3 种情况下所得相位图。可以看出当传统方法设置滤波迭代次数过少时，无法充分滤除相位图中的噪声，图像中仍包含高能噪声分量；设置滤波迭代次数过多，则会出现过滤波、过平滑过拟合的现象，造成某种程度上的相位失真。

为直观对比正余弦均值滤波与本文方法的滤波效果，选取过相位图中心沿水平方向(如图 7(a) 所示)的相位分布进行比较，如图 8 所示。其中图 8(a)~(d) 分别显示本

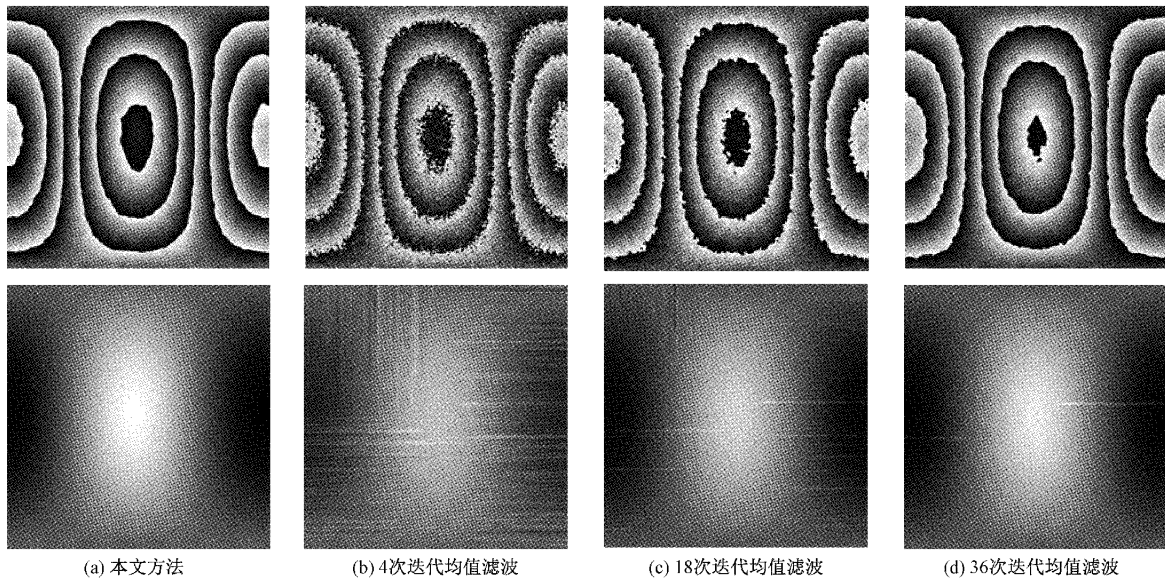


图 7 不同方法滤波后的包裹相位图与解包裹相位图

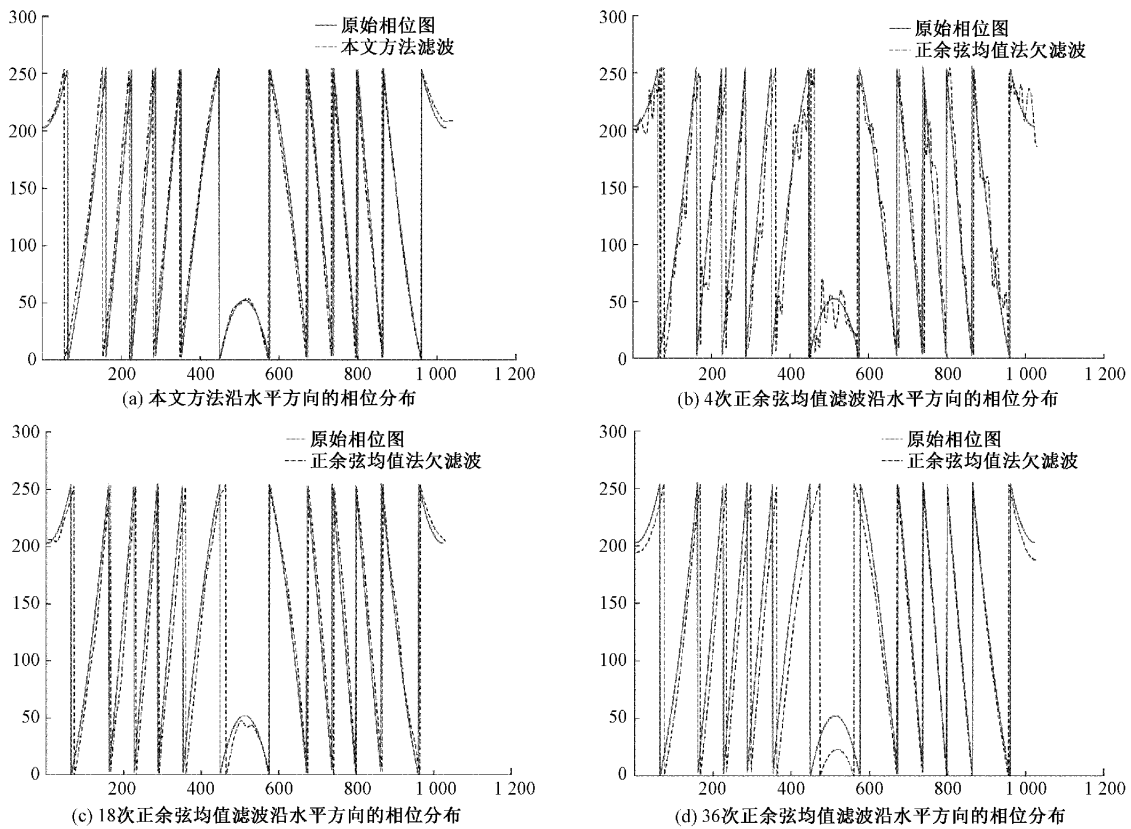


图 8 不同方法所得到的沿水平方向的相位分布

文方法与传统正余弦均值滤波执行 4、18 和 36 次迭代滤波后所得的沿水平方向相位分布。

从图 8(b)~(d)可知传统方法迭代滤波次数偏多,出现过滤波现象,其表现为相位整体朝某个方向偏移,此时处理后的相位图无法有效保留相位边缘信息;迭代滤波

次数偏少,则噪声抑制效果较差,出现欠滤波现象,表现为图像曲线不平滑,与高频谐波相耦合,相位有效信息与噪声混叠在一起,受噪声严重干扰。

表 2 记录了在不同滤波迭代次数下(4~36 次),传统正余弦均值滤波法与本文方法滤波后图像 PSNR、SSIM

与拉普拉斯算子和 3 项指数的变化对比。3 项指数是联合处理后的滤波相位图与图 4(a) 计算所得。由表 2 可知传统正余弦均值滤波指数性能不随迭代滤波次数的增加而线性增长,其 SSIM 与拉普拉斯算子和在经过 18 次迭代滤波后处于震荡,无显著增长;PSNR 在经过 12 次迭代后最优。无论如何调整迭代次数所得 3 项指数最优值均不如本文方法。可以看出传统方法的各项指数存在极限,并不简单地同滤波次数之间呈正相关,为找出最优滤波效果对应的滤波次数须反复尝试。一旦设置次数不当,极易出现过滤波与欠滤波现象。此外传统正余弦均值法很难同时兼顾各项参数,往往不同的最优参数对应着不同的迭代次数,因而在实际操作中难以做出取舍。本文方法基于噪声方差这一判据,实现相位图的自适应滤波,无需人为设置循环次数,且滤波效果优于正余弦滤波法,对噪声抑制更加充分。

表 2 本文方法与不同次数正余弦滤波指数比较

方法	PSNR	SSIM	L 算子和
本文方法	16.47	0.90	1.46
4 次迭代正余弦均值滤波	12.85	0.64	2.83
8 次迭代正余弦均值滤波	12.96	0.64	2.79
12 次迭代正余弦均值滤波	13.64	0.66	2.25
16 次迭代正余弦均值滤波	13.62	0.76	1.76
18 次迭代正余弦均值滤波	13.01	0.82	1.45
22 次迭代正余弦均值滤波	13.25	0.77	1.36
28 次迭代正余弦均值滤波	13.23	0.64	1.40
36 次迭代正余弦均值滤波	13.66	0.59	1.39

本文方法在兼顾有效滤除噪声与保留相位边缘信息的前提下,以较少的次数(图 7(a)的结果对应于 4 次迭代运算)完成滤波过程,使迭代次数、噪声方差、相位边缘突变信息保留三者之间达到平衡,有较好的相位保真度。

2) 本文方法与窗口傅里叶变换方法对比

图 9 为本文方法滤波后与窗口傅里叶变换滤波后(选择合适的滤波窗口与阈值)与解包裹后得到的结果。可以看出两种方法的滤波效果接近。

表 3 为两种方法的 3 项指数比较,3 项指数是联合处理后的滤波相位图与图 4(a) 计算所得。由图 9 与表 3 可知,上述两种方法的 PSNR、SSIM 与 L 算子和 3 项参数较为接近,互有长短。须指出的是窗口傅里叶变换法在操作层面存在着问题,该方法需要选择合适的滤波窗口,其次在阈值选择策略上也需要根据最大频谱系数、邻域灰度值等参数进行综合考虑,人为地做出选择取舍。而滤波窗口与阈值的选取会直接影响滤波效果的优劣,因此该方法需要使用者反复尝试,不断调节各项参数,以达到最佳滤波效果,实际操作较为困难。本文方法无需手动调节参数,仅输入原始图像,即可得到理想的滤波后相位图。

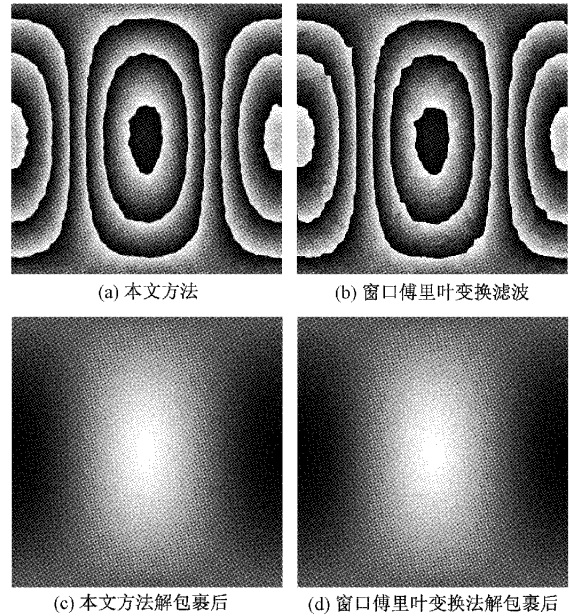


图 9 本文方法与窗口傅里叶变换滤波方法比较

表 3 本文方法与窗口傅里叶变换滤波方法不同指数比较

指数	本文方法	窗口傅里叶变换滤波
PSNR	16.47	17.30
SSIM	0.90	0.90
L 算子和	1.46	1.43

3 真实实验

3.1 实验系统

实验系统如图 10 所示,为大视场空间载波数字散斑干涉测量系统,用于物体表面离面位移测量。激光器发出的激光被分光镜分为两束,一路经扩束镜后照射在物体表面,反射光经过成像透镜、4F 系统与光阑后与另一路经过光纤的参考光束在相机图像传感器上相遇并形成干涉。实验系统中,相机为凯视佳公司工业相机 MU3S230M,光源为美国相干公司 Verdi G5 激光器,4F 系统由两个 100 mm 焦距平凸透镜组成,待测物为可进行中心加载的圆盘状铜板。

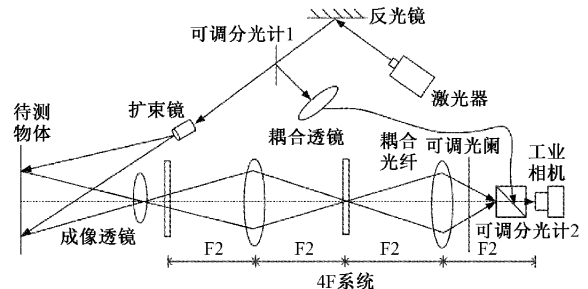


图 10 空间载波 DSPI 离面位移测量系统光路与被测物

3.2 相位图采集与处理

图 11 为实验采集所得到的原始相位图以及对应的二

值化骨架图(形态学处理后)。图 12(a)、(b)分别为 14 次(较为合适的滤波次数)正余弦均值滤波所得到的相位图以及本文方法滤波后所得到的相位图。从图中可以看出 14 次正余弦均值处理后的相位图,噪声残留严重,部分区域相位边缘出现间断。本文方法处理后的相位图,图像质量明显高于前者所得结果,噪声被充分滤除。图 12(c)、(d)分别为两种方法处理后的拉普拉斯算子二值化边缘图,可以直观地看出正余弦均值法处理后的相位边缘不平滑,会对后续图像解包裹造成极为不利的影响;本文方法处理后相位边缘较为平滑且间断少。图 12(e)、(f)分别为两种方法处理后的解包裹相位图,可以看出传统正余弦均值滤波法处理后的相位图拉丝严重,未充分滤除的噪声造成了相位信息丢失;而本文方法则有效地保留了更多的相位信息。

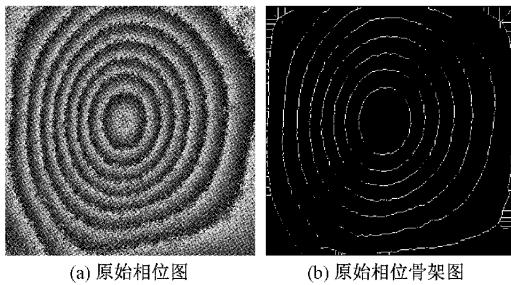
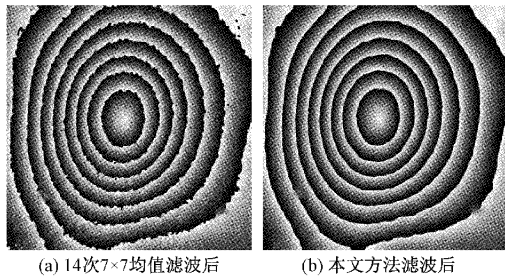
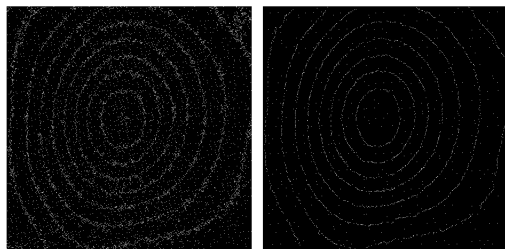


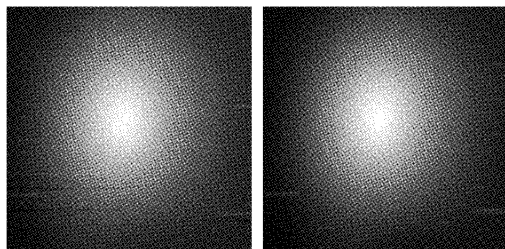
图 11 原始相位图与相位骨架图



(a) 14次7×7均值滤波后 (b) 本文方法滤波后



(c) 14次7×7均值滤波拉普拉斯算子边缘提取 (d) 本文方法拉普拉斯算子二值化边缘提取



(e) 14次7×7均值滤波解包裹后 (f) 本文方法解包裹后

图 12 采用本文方法和传统方法去噪后所得到的相位图

真实实验不同于仿真实验,无法预先得到真实包裹相位图,也无法准确地分离出图像中的噪声分量与有效分量,因此此处不再计算图像尖峰信噪比,而是计算噪声方差与图像信息熵,将这两个参数作为评价指标。直接计算滤波后相位图与原始含噪相位图之间的 SSIM 也失去了意义,因此转而计算原始相位骨架图与滤波后相位图的边缘图之间的 SSIM。表 4 为本文方法和传统 14 次正余弦均值滤波针对噪声方差、L 算子和、图像信息熵与 SSIM 4 项参数的对比,其中噪声方差、L 算子和、图像信息熵是分别对图 12(a)、(b)图像计算所得,SSIM 为联合图 11(b)与图 12(c)、(d)计算所得。可知,正余弦均值滤波的噪声方差远高于本文方法,表明该方法处理后的图像噪声残留多、信噪比低。与此相对,本文方法只需 3 次迭代即可充分抑制噪声分量,且图像信息熵高于正余弦滤波法,说明充分滤波的同时图像所蕴含相位信息几无损失。L 算子和的结果说明本文方法在对乘性噪声充分抑制的前提下,对相位边缘细节信息的保留较传统正余弦法较为充分。最后由 SSIM 结果可知,在图像结构的保存度上本文方法优于正余弦均值法。

表 4 采用本文方法和传统方法所得到的相位图的指数比较

指数	本文方法(3次)	14次均值滤波
噪声方差	0.14	0.52
L 算子和	1.10	1.30
图像信息熵	8.0	7.90
SSIM	0.66	0.50

4 结 论

本文提出了一种基于小波与非局部均值滤波的自适应数字散斑干涉相位图滤波方法。该方法与传统方法相比,既充分保留了相位边缘信息,能以较少的循环次数完成对噪声的充分抑制,又避免了传统算法由于循环次数过多造成的过拟合,降低了相位失真程度。且无需设置和调节任何参数,仅需输入待处理图像,实现了对 DSPI 相位图的高效滤波。

参考文献

- [1] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P, et al. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS) [J]. Optics Express, 2006, 14(24): 11598-11607.
- [2] YANG L, XIE X, ZHU L, 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.

- [3] LI Z, ZHONG P, CHEN Y, et al. Simultaneous measurement of three-dimensional deformation based on digital speckle pattern interferometry technology [J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126423.
- [4] AEBISCHER H A, WALDNER S. Simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Optics Communications*, 1999, 162(4): 205-210.
- [5] YU Q, LIU X, ANDRESEN K. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(17): 3705-11.
- [6] CHEN T, WANG W, YAN H, et al. Tangent least-squares fitting filtering method for electrical speckle pattern interferometry phase fringe patterns [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(15): 2907-2913.
- [7] BERNINI M B, FEDERICO A, KAUFMANN G H. Noise reduction in digital speckle pattern interferometry using bidimensional empirical mode decomposition [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(14): 2592-2598.
- [8] TANG C, GAO T, YAN S, et al. The oriented spatial filter masks for electronic speckle pattern interferometry phase patterns [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8942-8947.
- [9] QIAN K. A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform: A note on the threshold selection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(8): 1091-1098.
- [10] SHULEV A A, GOTCHEV A. A sliding-window transform-domain technique for denoising of DSPI phase maps [C]. *Image Processing: Algorithms and Systems XII*. SPIE, 2014, 9019: 193-201.
- [11] ZADA S, TOUNSI Y, KUMAR M, et al. Contribution study of monogenic wavelets transform to reduce speckle noise in digital speckle pattern interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(3): 034109-034109.
- [12] CHENG L, CHEN T, SI Y, et al. New fourth-order partial differential equations for filtering in electronic speckle pattern interferometry fringes [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5549-5555.
- [13] BARRERA E S, CUELLO J L E. Measuring material thickness changes through tri-aperture digital speckle pattern interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(1): 014108.
- [14] WU S, ZHU L, PAN S, et al. Spatiotemporal three-dimensional phase unwrapping in digital speckle pattern interferometry [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1050-1053.
- [15] MITTAL H, SARASWAT M. An optimum multi-level image thresholding segmentation using non-local means 2D histogram and exponential Kbest gravitational search algorithm [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, 71(MAY): 226-235.
- [16] QIAN Y, SHEN Y, YE M, et al. 3-D nonlocal means filter with noise estimation for hyperspectral imagery denoising [C]. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2012: 1345-1348. DOI:10.1109/IGARSS.2012.6351287.
- [17] PHADIKAR S, SINHA N, GHOSH R, et al. Automatic muscle artifacts identification and removal from single-channel eeg using wavelet transform with meta-heuristically optimized non-local means filter [J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2948.
- [18] LI H J. A novel Non-local means image denoising method based on grey theory [J]. *Pattern Recognition*, 2016, 49(1): 237-248.
- [19] LIU X, TANAKA M, OKUTOMI M. Noise level estimation using weak textured patches of a single noisy image [C]. *2012 19th IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 2012: 665-668. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6466947.
- [20] CHEN G, ZHU F, ANN H P. An efficient statistical method for image noise level estimation [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015: 477-485. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6466947.
- [21] MOORTHY A K, BOVIK A C. Blind image quality assessment: From natural scene statistics to perceptual quality [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3350-3364.
- [22] SETIADI D R I M. PSNR vs SSIM: Imperceptibility quality assessment for image steganography [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(6): 8423-8444.
- [23] CHOI H, JEONG J. Despeckling algorithm for reducing speckle noise in images generated from active sensors [J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(17): 876-879.
- [24] 李自勤, 王骐, 李琦, 等. 激光成像雷达系统中散斑像的乘法模型及其滤除 [J]. *中国激光*, 2003, 30(8): 717-720.
- [25] YAHIA M, ALI T, MORTULA M M, et al. Polarimetric SAR image filtering by infinite number of looks prediction technique [J]. *IEEE Journal of*

Selected Topics in Applied Earth Observations and
Remote Sensing, 2021, 14: 4167-4184.

E-mail: 534154762@qq.com

作者简介

刘源, 硕士研究生, 主要研究数字散斑干涉技术。

吴思进(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为数字散
斑干涉技术等全场光学测试技术。

E-mail: swu@bistu.edu.com