

数字全息测量系统的散斑噪声抑制

牛瑞¹, 田爱玲^{1*}, 王大森², 刘丙才¹, 王红军¹, 钱晓彤¹, 刘卫国¹¹西安工业大学光电工程学院陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021;²中国兵器科学院宁波分院, 浙江 宁波 310022

摘要 数字全息测量系统中, 记录过程引入的散斑噪声严重影响全息图质量, 导致三维重建结果存在误差。相位提取是数字全息三维测量系统中影响精度的关键技术, 而相位解包是获得正确连续相位的关键环节。为了抑制数字全息测量系统中的散斑噪声, 提出了一种处理包裹相位的散斑噪声抑制方法。首先应用二维高斯窗口在频域内对包裹相位进行局部分析, 并基于窗口傅里叶基函数与包裹相位的高相关性选取阈值; 然后根据阈值舍弃噪声频谱, 获得低散斑噪声的包裹相位。以微透镜阵列为测试对象, 实现了数字全息测量系统中散斑噪声的有效抑制。实验结果表明, 所提方法保留了包裹相位的 2π 跳变边界, 有效提高了数字全息测量系统的三维重建精度, 与未去噪的结果相比, 残差降低了 28.35% (峰谷值) 和 20.23% (均方根)。

关键词 全息; 数字全息; 散斑噪声; 二维高斯窗口; 包裹相位; 三维重建

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1609002

Speckle Noise Suppression of Digital Holography Measuring System

Niu Rui¹, Tian Ailing^{1*}, Wang Dasen², Liu Bingcai¹, Wang Hongjun¹, Qian Xiaotong¹,
Liu Weiguo¹¹Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;²The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 310022, Zhejiang, China

Abstract In the digital holographic measurement system, the speckle noise introduced during recording severely affects the hologram quality, leading to errors in the three-dimensional (3D) reconstruction results. Phase extraction is instrumental in affecting accuracy in a digital holographic 3D measurement system, and the result of phase unwrapping is crucial in obtaining the correct continuous phase. To suppress the speckle noise in the digital holographic measurement system, this study proposes a suppression method dealing with the wrapped phase. A two-dimensional Gaussian window was used to locally analyze the wrapped phase in the frequency domain. The threshold was selected based on the high correlation between the window Fourier basis function and wrapped phase. According to the threshold, the noise spectrum was discarded to obtain the wrapped phase with low speckle noise. The digital holographic measurement system with effective speckle noise suppression was realized using the microlens array as the test object. Results show that the proposed method protects the 2π jump boundary of the wrapped phase and can effectively improve the 3D reconstruction accuracy of the digital holographic measurement system. Compared with the unfiltered result, the residual error of the proposed method is reduced by 28.35% (peak valley) and 20.23% (root mean square).

Key words holography; digital holography; speckle noise; two-dimensional Gaussian window; wrapped phase; three-dimensional reconstruction

1 引言

数字全息测量技术作为微纳米领域的一种重要表

征及测试手段, 不仅具有高精度、非接触及实时性等光学干涉技术的普遍特点, 而且具有微米甚至亚微米级的横向分辨率和亚纳米级的纵向分辨率^[1], 在光学测

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-06-18; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 基础科研项目(JCKY2018426C002, JSZL2018411C001)、科技厅项目(2019KW-016)

通信作者: *ailintian@xatu.edu.cn

量^[2]、粒子跟踪^[3]、生物医学^[4]等领域有着广泛的应用。在数字全息测量系统中,高质量的全息图是获取精确测量结果的前提。但是目前的研究发现,噪声是影响全息图质量的关键因素,因此对全息图中噪声的抑制非常必要。数字全息系统的噪声主要分为两类:系统噪声和散斑噪声。系统噪声主要体现于全息图背景光强及条纹幅值的大小;散斑噪声是由于激光的高相干特性产生的,当相干光波在粗糙物体表面、划痕、缺陷处发生散射时^[5],物体上各点散射的子波在空间相干叠加,在记录平面形成了空间强度随机分布的散斑噪声,以颗粒状的明暗光斑呈现在全息图上。全息测量系统中的散斑噪声降低了图像的信噪比,影响了三维重建精度,限制了数字全息在微结构测量和微小物体识别等方面的应用。因此,关于数字全息测量系统中散斑噪声抑制的研究一直是数字全息研究中的重要问题,在对微小样品的形貌特征测量等方面都具有重大意义和价值。

1976年,Arseault等^[6]证明了全息图中的散斑噪声是一种乘性噪声,且由于其强度大,所涉及的尺寸大,对全息图质量的影响最大。目前,散斑噪声的抑制方法可以分为三大类:低相干光源照明法、多幅全息图叠加平均法和数字图像处理法。低相干光源照明法利用低相干光作为光源,如LED^[7]、白光光源^[8]等。低相干光源的光路对光程差要求极高,虽然在一定程度上抑制了散斑噪声对全息图的干扰,但降低了可操作性。多幅全息图叠加平均法利用叠加平均效应实现散斑噪声的抑制,如角度^[9]、波长^[10]多样化等。但使用多幅全息图进行叠加平均需要采集多幅全息图且设备复杂,难以实现实时测量。数字图像处理法可以克服上述问题,通过建立散斑噪声滤波模型来提取物体信息进行重建,从而消除散斑噪声的影响。2009年,翁嘉文等^[11]应用二维高斯窗口傅里叶变换对全息图分进行局部分析,提高了再现像质量;2012年,Uzan等^[12]采用non local means(NLM)滤波算法取得了良好的散斑噪声抑制效果;2020年,周文静等^[13]采用频谱卷积神经网络的方法,仅使用一幅全息图就可以有效地处理不同等级的散斑噪声;2020年,张华等^[14]构建了一种基于衍射传输的无透镜压缩数字全息成像模型,并开发了基于全变分正则化约束和两步迭代收缩阈值的优化算法,该算法提高了三维图像重建的信噪比。目前许多方法虽取得了很好的散斑噪声抑制效果,但不能同时满足抑制散斑噪声和保留原始相位信息的需求。

针对上述问题,本文提出了一种在数字全息三维重建过程中处理包裹相位的散斑噪声抑制方法。首先,对数字全息三维重建过程中窗口傅里叶滤波(WFF)处理包裹相位的原理展开研究;然后,搭建透射式离轴数字全息测量系统完成微透镜阵列(MLA)的全息图采集;最后,分别从散斑噪声抑制程度和三维

重建精度两个方面,验证所提方法在数字全息测量系统中抑制散斑噪声的有效性。

2 基本原理

2.1 全息图记录与散斑噪声

在数字全息测量系统记录过程中,当激光照射到粗糙物体表面时,由于激光的高相干性,任意物点的散射光与其他物点产生的散射光发生干涉,从而形成了无规则分布的散斑图样。激光散斑的产生原理如图1所示。

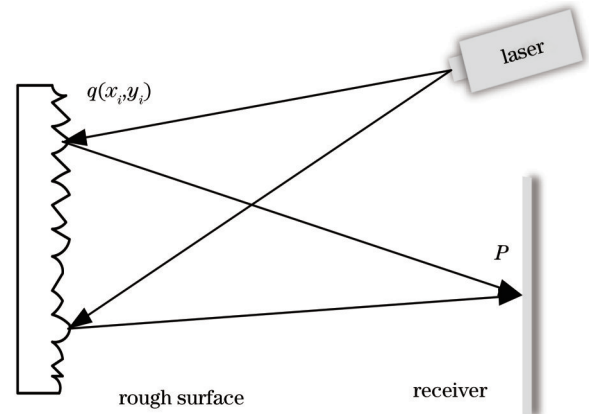


图1 激光散斑的基本原理

Fig. 1 Principle of laser speckle

假设散射表面上有 N 个独立的散射点源,散射表面第 i 个散射点 $q(x_i, y_i)$ 散射到接收面上,此时考查点 P 的基元光波复振幅可表示为

$$E_i(P) = a(x_i, y_i) \exp[j\varphi_R(x_i, y_i)] \exp[j\varphi(r)], \quad (1)$$

式中: $a(x_i, y_i)$ 表示散射表面反射光的振幅; $\varphi_R(x_i, y_i)$ 表示散射表面粗糙不平引入的随机相位; $\varphi(r)$ 表示光传播相位因子。

P 点复振幅是由 N 个独立散射点源光波传播到该点的叠加。因此, P 点散斑的光强可表示为

$$I(P) = |E(P)|^2 = \left| \sum_{i=1}^N a(x_i, y_i) \exp[j\varphi_R(x_i, y_i)] \exp[j\varphi(r)] \right|^2. \quad (2)$$

因为 $a(x_i, y_i)$ 和 $\varphi_R(x_i, y_i)$ 都是随机分布的,所以接收面上复振幅 $E(P)$ 的分布也是随机的。对于不同的考查点,光强分布随机且不同,从而形成散斑图样。

在数字全息测量系统中,散斑噪声往往被看作是降低全息再现像质量的一种光学噪声。数字全息记录过程中,物光 $O(x, y)$ 和参考光 $R(x, y)$ 干涉的强度公式可表示为

$$I(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + I(P), \quad (3)$$

式中:前两项分别为物光和参考光的强度分布,仅与振幅有关; $I(P)$ 为噪声引起的强度变化。

2.2 散斑噪声的抑制

数字全息再现过程中,用计算机模拟再现光 C 的照明全息图,利用角谱衍射理论重建物光场,其再现面的复振幅分布为

$$U_{z_1}(x_1, y_1) = F^{-1} \left\{ F \left[I(x, y) C(x, y) \right] \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} z_1 \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: $I(x, y)$ 表示物光 $O(x, y)$ 和参考光 $R(x, y)$ 干涉的强度; z_1 表示再现距离; f_x, f_y 表示观察平面上的角谱; F 和 F^{-1} 分别表示二维傅里叶变换和逆傅里叶变换。

由式(4)可得,包裹相位分布的表达式为

$$\varphi(x_1, y_1) = \arctan \frac{\text{Im} [U_{z_1}(x_1, y_1)]}{\text{Re} [U_{z_1}(x_1, y_1)]}, \quad (5)$$

式中: $\text{Im} [U_{z_1}(x_1, y_1)]$ 和 $\text{Re} [U_{z_1}(x_1, y_1)]$ 分别表示 $U_{z_1}(x_1, y_1)$ 的虚部和实部。

为避免包裹相位图中不同位置之间的信号产生干扰,引入高斯窗口在频域对包裹相位进行局部滤波。由于相位只是信号的特征,一般不能直接对其进行滤波。因此,包裹相位通常需要被转换成指数场,即

$$f(x_1, y_1) = b(x_1, y_1) \exp [j\varphi(x_1, y_1)], \quad (6)$$

式中: $b(x_1, y_1)$ 为调制度分布,可近似为常数; $\varphi(x_1, y_1)$ 表示包裹相位。包裹相位对应的窗口傅里叶谱表达式为

$$\text{SF}(u, v; \xi, \eta) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} f(x_1, y_1) g_{u, v; \xi, \eta}^*(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (7)$$

式中: $\text{SF}(u, v; \xi, \eta)$ 表示相位在频域内的窗口傅里叶谱; (ξ, η) 表示频域坐标;*表示共轭; (u, v) 表示窗口中心平移因子, (u, v) 的改变会引起窗口中心在整幅相位图上逐点移动。

窗口傅里叶基函数 $g_{u, v; \xi, \eta}(x_1, y_1) = g(x_1 - u, y_1 - v) \exp(j\xi x_1 + j\eta y_1)$,窗口函数 $g(x_1, y_1)$ 选取高斯窗口,其表达式为

$$g(x_1, y_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_{x_1}\sigma_{y_1}}} \exp \left(-\frac{x_1^2}{2\sigma_{x_1}^2} - \frac{y_1^2}{2\sigma_{y_1}^2} \right), \quad (8)$$

$\sigma_{x_1} > 0, \sigma_{y_1} > 0$

式中: σ_{x_1} 和 σ_{y_1} 分别表示高斯窗口在 x_1, y_1 方向的窗口尺寸,控制 $g(x_1, y_1)$ 的空间扩展。

在包裹相位的窗口傅里叶谱中,由于窗口傅里叶

基函数与包裹相位图的相关性较高,窗口傅里叶谱较大^[15],然而散斑噪声的随机性会导致窗口傅里叶谱较小。窗口傅里叶变换作为一种冗余变换,即使有用的频谱被阈值化处理破坏,也不会影响相位分布。因此,本实验组通过设置阈值的方式将小于阈值的窗口傅里叶谱舍弃,其阈值函数为

$$\overline{\text{SF}}(u, v; \xi, \eta) = \begin{cases} \text{SF}(u, v; \xi, \eta), & |\text{SF}(u, v; \xi, \eta)| \geq t_{\text{threshold}} \\ 0, & |\text{SF}(u, v; \xi, \eta)| < t_{\text{threshold}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $t_{\text{threshold}}$ 表示阈值; $\overline{\text{SF}}(u, v; \xi, \eta)$ 表示经过阈值处理后的窗口傅里叶谱。

经过窗口傅里叶逆变换,即可得到降噪后的包裹相位分布:

$$\bar{f}(x_1, y_1) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \overline{\text{SF}}(u, v; \xi, \eta) g_{u, v; \xi, \eta}(x_1, y_1) d\xi d\eta dudv. \quad (10)$$

则被测样本形貌高度的表达式为

$$h(x_1, y_1) = \frac{w[\bar{f}(x_1, y_1)]\lambda}{2\pi}, \quad (11)$$

式中: $w[\cdot]$ 表示解包裹运算; λ 表示光源波长。

3 实验

3.1 实验装置

根据马赫-曾德尔干涉光路,搭建的透射式离轴数字全息测量系统如图2所示。激光器(LWRL635-100 mw)为波长 635 nm 的固体激光器;CMOS 相机(DMK 42AUC03)分辨率为 1280 pixel×960 pixel,像

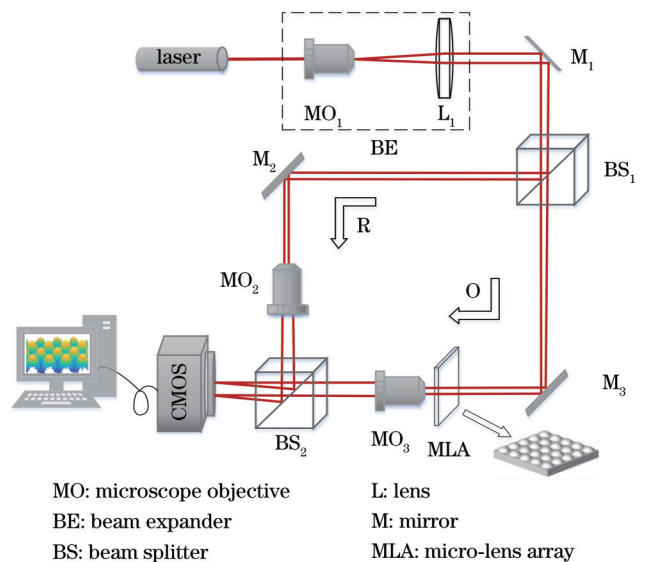


图2 透射式离轴数字全息测量系统实验装置

Fig. 2 Experimental setup of transmissive off-axis digital holographic measurement system

素尺寸为 $3.75\ \mu\text{m} \times 3.75\ \mu\text{m}$; MLA 单个透镜直径为 $150\ \mu\text{m}$, 矢高为 $2.6\ \mu\text{m}$ 。激光器发出的光经过 $40\times$ 显微物镜 (MO_1) 和透镜 (L_1) 组成的扩束准直系统, 并由平面反射镜 (M_1) 转向, 经分光棱镜 (BS_1) 1:1 分成两路, 一路为物光 (O), 一路为参考光 (R)。物光经过平面反射镜 (M_3) 将光路转向, 并透过 MLA, 携带波前相位信息的物光波再经过 $10\times$ 显微物镜 (MO_3) 到达分光棱镜; 参考光由平面反射镜 (M_2) 转向经过 $10\times$ 显微物镜 (MO_2) 放大。物光波和参考光波经过分光棱镜 (BS_2) 合束后发生全息干涉, 再由 CMOS 相机记录全息图。

3.2 实验结果

通过第 2.1 节所述实验光路采集的 MLA 全息图如 [图 3(a)] 所示。利用傅里叶空频分析法, 对 MLA 全息图进行傅里叶变换得到的全息频谱图如 [图 3(b)] 所示。虽然几种衍射像在成像平面分离, 但零级衍射像具有很高的能量且扩展范围很宽, 这种情况容易造成频谱混叠, 并且严重干扰全息再现像。为消除这一干扰, 先使用矩形滤波器提取正一级频谱并移中, 再经逆

傅里叶变换得到预处理后的全息图, 如 [图 3(c)] 所示。全息图经过傅里叶空频分析法后, 有效去除了零级衍射像和孪生像对全息再现像造成的干扰, 使用角谱法再现物光场, 得到的包裹相位如 [图 3(d)] 所示。应用二维高斯窗口处理包裹相位, 窗口越小误差越小, 窗口越大降噪性能越强; 阈值过小不利于散斑噪声的抑制, 过大会造成信息的丢失。窗口大小及阈值与三维重建精度的关系表明, 当窗口尺寸 $\sigma_{x_1} = \sigma_{y_1} = 10\ \text{pixel}$, 阈值 $t_{\text{threshold}} = 140$ 时, 去除散斑噪声和消除“振铃”效应的性能最佳。因此, 在上述条件下进行实验, 得到的去噪后包裹相位如 [图 3(e)] 所示。从图中可以看出, 包裹相位跳变处还原效果较好, 既抑制了散斑噪声又消除了“振铃”效应。然后, 采用基于离散余弦变换的最小二乘法对包裹相位进行解包裹处理, 获得连续相位。由于实验光路中光学元件会引入相位畸变, 相位畸变远大于被测件的相位信息, 因此想要获得准确的相位信息, 必须进行相位畸变校正。本实验组采用相位畸变补偿算法消除光学元件引起的相位畸变, 处理后的 MLA 三维重建相位如 [图 3(f)] 所示。

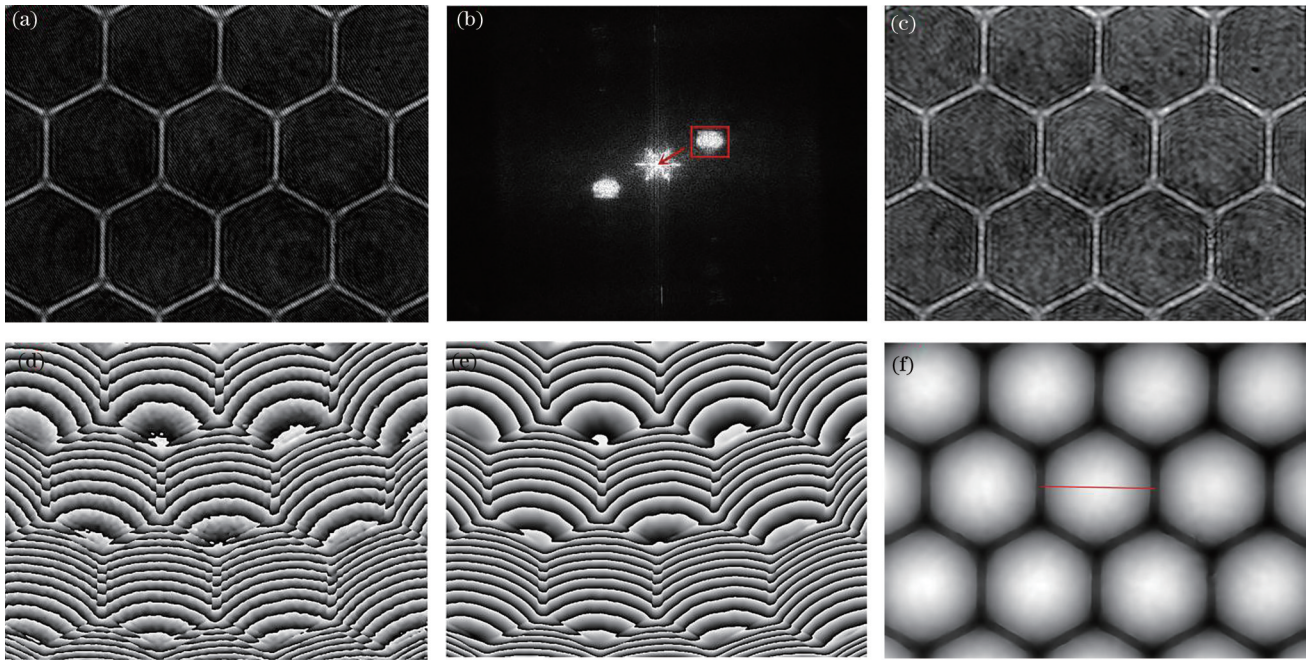


图 3 散斑噪声抑制实验结果。(a) MLA 全息图; (b) 全息频谱图; (c) 去除背景噪声的全息图; (d) 包裹相位; (e) 所提方法处理后的包裹相位; (f) MLA 重建相位

Fig. 3 Experimental results of speckle noise suppression. (a) MLA hologram; (b) spatial spectrogram; (c) hologram without background noise; (d) wrapping phase; (e) wrapping phase after proposed method; (f) MLA reconstruction phase

4 分析与讨论

4.1 滤波算法比较

为验证所提方法的有效性, 将中值滤波、NLM 滤波与所提方法进行了对比实验, 实验结果如图 4 所示, 其中 [图 4(a)] 为未滤波包裹相位图, 由于受到散斑噪声的影响, 相位跳变边界不平滑, [图 4(b)~(d)] 分别为中值滤波、NLM 滤波及所提方法处理后的包裹相位

图, [图 4(e)~(h)] 分别为 [图 4(a)~(d)] 包裹相位划线位置处的截面线。

从 [图 4(b)~(d)] 可以看出, 中值滤波和 NLM 滤波的去噪效果不理想, 在去除噪声的同时模糊了相位信息, 而所提方法能更好地消除散斑噪声, 使包裹相位图质量提升。从 [图 4(e)~(h)] 包裹相位的截面线可以看出: 中值滤波参考邻域像素值消除噪声点, 抑制噪声的同时平滑了相位跳变处的信息, 导致相位信息丢

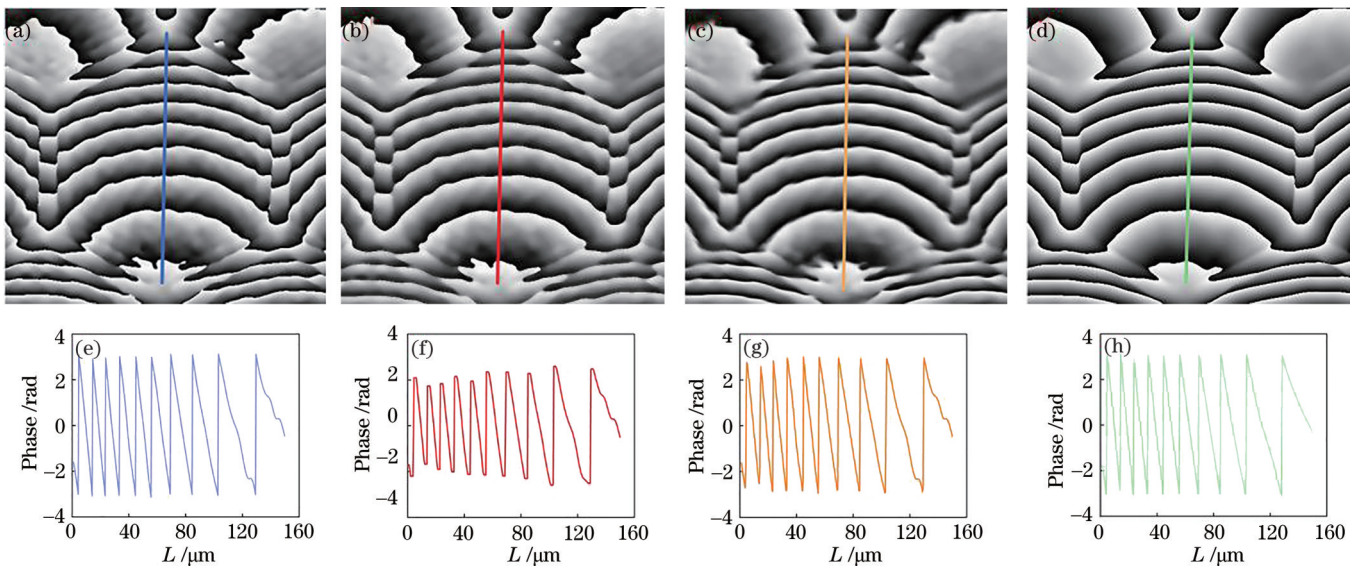


图 4 不同方法处理的包裹相位实验结果。(a)~(d)未滤波、中值滤波、NLM 滤波和所提方法处理的包裹相位;(e)~(h)对应(a)~(d)划线位置处的包裹相位

Fig. 4 Experimental results of package phases processed by different methods. (a)~(d) Wrapped phases after without filtering, median filtering, NLM filtering, and proposed method; (e)~(h) wrapped phases at (a)~(d) marking positions

失,从而使全息重建相位图模糊;NLM 滤波位于图像块中心的任何有噪声的像素,都可以从图像中任何具有相似结构块的位置构建相关统计达到去噪的目的,虽保留了部分边缘跳变处的信息平滑效果好,但导致相位出现误差;所提方法利用二维高斯窗口作用将不同区域的频谱分割开来,减少了各个部分之间的相互影响,很大程度上保留了包裹相位的 2π 跳变边界,有效抑制散斑噪声的同时保留了原始相位信息。

为客观评估以上方法,用散斑抑制指数 (SSI) 和平均保持指数 (SMPI) 定量地评价不同处理方法的降噪效果,使用结构相似度指数 (SSIM) 来评价图像保存的完整性,评价结果如表 1 所示。SSI 表示去噪图像和含噪图像噪声之间的比率,SSI 越小,散斑噪声抑制效果越好;SMPI 表示噪声抑制性能和图像均值保存性能,SMPI 越小,图像在噪声抑制和均值保持方面的效果越好;SSIM 表示原始图像和去噪图像之间的相似性,SSIM 值越大,图像保留效果越好。

表 1 不同滤波方法的噪声抑制能力评价

Table 1 Evaluation of noise suppression ability of different filtering methods

Method	Evaluation index		
	SSI	SMPI	SSIM
Median filtering	0.7810	0.8932	0.9026
NLM filtering	0.7277	0.8381	0.9372
Proposed method	0.6867	0.7983	0.9864

由表 1 定量分析可以看出,所提方法的 SSIM 最大,SSI 和 SMPI 最小,说明所提方法在量化评价去噪能力方面有更好的性能且去噪的相位图与原始相位图之间的结构相似性较高。

4.2 三维重建精度分析

为验证所提方法三维重建的精确性,将未去噪的三维重建结果 (before)、所提方法的三维重建结果 (after) 与白光干涉仪测量结果 (WLI) 三者进行比较,选取单个微透镜相同位置处的截面线 [图 3(f)], 结果如图 5 所示。

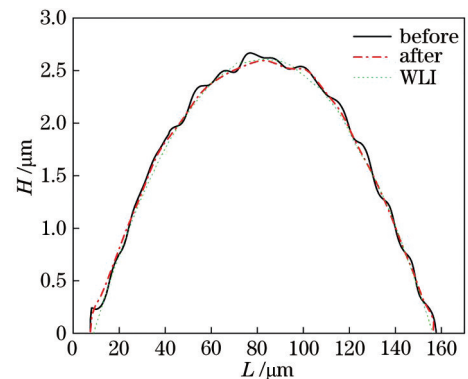


图 5 相同位置处的截面线对比图

Fig. 5 Comparison of cross-sectional lines at the same position

从图 5 可以看出,未去噪的截面线误差较大,所提方法的三维重建结果与白光干涉仪测量结果吻合度更高,截面线更平滑,三维重建结果更精确。

将所提方法和未去噪的三维重建结果分别与白光干涉仪测量结果进行残差估计,结果如图 6 所示。采用峰谷值 (PV)、均方根 (RMS) 作为评价指标,实验结果如表 2 所示。

从表 2 的残差对比结果可以看出:去噪的三维重建结果与白光干涉仪测量结果在截面线处的残差估计的 PV 值为 $0.3411 \mu\text{m}$, RMS 值为 0.0667 ;所提方法的

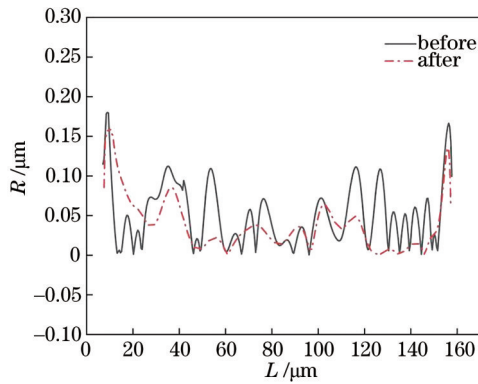


图 6 残差对比结果分析

Fig. 6 Comparative analysis of resid

表 2 残差对比结果分析

Table 2 Comparative analysis of resid

Residual	PV / μm	RMS
Before	0.3411	0.0667
After	0.2444	0.0532

三维重建结果与白光干涉仪测量结果在相同截面线处的残差估计的PV值为0.2444 μm , RMS值为0.0532。后者残差的PV和RMS值与前者相比,分别降低了28.35%和20.23%。即所提方法的三维重建结果更接近于实际值,表明该方法抑制散斑噪声的同时提高了数字全息测量系统的三维重建精度。

5 结 论

数字全息测量系统中散斑噪声的产生影响三维重建精度,针对散斑噪声的抑制问题,提出了一种在数字全息三维重建过程中处理包裹相位的散斑噪声抑制方法。二维高斯窗口的局部特性以及窗口傅里叶基函数与包裹相位的高相干性使得该方法具有良好的降噪效果。通过搭建透射式离轴数字全息测量系统采集MLA的全息图,利用SSI、SMPI和SSIM对均值滤波、NLN滤波以及所提方法处理的结果进行定量分析,实验结果表明,所提方法的散斑噪声抑制性能较好。通过对比不同方法降噪后的包裹相位截面线发现,所提方法利用二维高斯窗口分割不同区域的频谱,减少了各部分之间的相互影响,抑制散斑噪声的同时保留了包裹相位的 2π 跳变边界。将所提方法和未去噪的三维重建结果分别与白光干涉仪测量结果进行残差估计,前者的残差相比后者降低了28.35%(PV)和20.23%(RMS),说明所提方法在有效抑制散斑噪声的同时,提高了数字全息测量系统的三维重建精度。

参 考 文 献

[1] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(34): 6994-7001.

[2] 冯方, 田爱玲, 刘丙才, 等. 基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0409003.
Feng F, Tian A L, Liu B C, et al. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0409003.

[3] DeWolfe O, Levin J, Smith G. Multipartite optimized correlation measures and holography[J]. *Physical Review D*, 2020, 102(6): 066001.

[4] Nygate Y N, Singh G, Barnea I, et al. Simultaneous off-axis multiplexed holography and regular fluorescence microscopy of biological cells[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2587-2590.

[5] 陈亚红, 蔡阳健. 激光相干性调控及应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026002.
Chen Y H, Cai Y J. Laser coherence modulation and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026002.

[6] Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(11): 1160-1630.

[7] 秦怡, 钟金钢. 基于发光二极管的弱相干光数字全息理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2236-2241.
Qin Y, Zhong J G. Theoretical and experimental research of digital holography with partially coherent light based on light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2236-2241.

[8] Bhaduri B, Pham H, Mir M, et al. Diffraction phase microscopy with white light[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1094-1096.

[9] 王大勇, 王云新, 郭莎, 等. 基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(15): 154205.
Wang D Y, Wang Y X, Guo S, et al. Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(15): 154205.

[10] Turko N A, Eravuchira P J, Barnea I, et al. Simultaneous three-wavelength unwrapping using external digital holographic multiplexing module[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1943-1946.

[11] 翁嘉文, 杨初平, 黄迪. 应用二维窗口傅里叶变换实现全息图数值再现[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(4): 45-48, 57.
Weng J W, Yang C P, Huang D. Numerical reconstruction of holography based on two-dimensional window Fourier transform[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(4): 45-48, 57.

[12] Uzan A, Rivenson Y, Stern A. Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering[J]. *Applied Optics*, 2012, 52(1): A195-A200.

[13] 周文静, 邹帅, 何登科, 等. 频谱卷积神经网络实现全息图散斑降噪[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0509001.
Zhou W J, Zou S, He D K, et al. Speckle noise reduction of holograms based on spectral convolutional

- neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0509001.
- [14] 张华, 曹良才, 金国藩, 等. 基于压缩感知算法的无透镜数字全息成像研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 080001.
Zhang H, Cao L C, Jin G F, et al. Progress on lensless digital holography imaging based on compressive holographic algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 080001.
- [15] Qian K M. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(2): 304-317.