

基于 SRAD 和 NSCT 的数字全息再现像 像质改善方法

吴一全^{1,2} 殷 骏¹ 朱 丽¹ 叶志龙¹

(¹南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210016)

(²瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)

摘要 针对数字全息再现像存在的散斑噪声干扰严重、对比度低等问题, 提出了基于散斑去噪各向异性扩散 (SRAD) 模型及非下采样 Contourlet 变换 (NSCT) 的数字全息再现像像质改善方法。采用 SRAD 模型消除再现像中的散斑噪声, 然后进行 NSCT 分解, 产生一个低频子带和若干高频子带。基于非线性增益函数和图像分割方法调整低频子带系数, 并利用改进的 NSCT 模极大值法对高频子带进行边缘增强。大量实验结果表明, 与近年来提出的非线性扩散去噪方法及 NSCT 增强方法相比, 所提出的方法能更有效地消除散斑噪声、提升再现像的对比度, 并得到光滑清晰的边缘, 从而提高后续数字全息识别与测量的准确度。

关键词 全息; 散斑去噪各向异性扩散; 非下采样 Contourlet 变换; 非线性增益函数; 模极大值法; 最大类间方差

中图分类号 O438.1; TN911.73; TB877 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209024

Method for Improving Reconstructed Image Quality of Digital Hologram Based on SRAD and NSCT

Wu Yiquan^{1,2} Yin Jun¹ Zhu Li¹ Ye Zhilong¹

¹College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China

²State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an, Shaanxi 710068, China

Abstract Reconstructed image of digital holography has problems such as serious interference of speckle noise, low contrast and so on. Thus a method based on speckle reducing anisotropic diffusion (SRAD) model and nonsubsampling contourlet transform (NSCT) is proposed for improving reconstructed image quality of digital hologram. SRAD model is adopted to eliminate speckle noise of reconstructed image. After NSCT decomposition, a low-frequency sub-band and several high-frequency sub-bands are produced. Low-frequency sub-band coefficients are adjusted based on a nonlinear gain function and an image segmentation method. In high-frequency sub-bands, edges are enhanced using a NSCT modulus maximum edge detection method. A large number of experimental results show that, compared with nonlinear diffusion denoising methods and NSCT enhancement methods proposed recently, the proposed method can more effectively eliminate speckle noise and improve the contrast of reconstructed image. Furthermore, the edges are smooth and clear. As a result, the accuracy of recognition and measurement in digital holography can be improved.

Key words holography; speckle reducing anisotropic diffusion; nonsubsampling contourlet transform; nonlinear gain function; modulus maximum method; maximum between-cluster variance

OCIS codes 090.1995; 100.2980; 110.6980; 110.7410

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(60872065)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLS201007)、江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 吴一全(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事数字全息和图像处理等方面的研究。

E-mail: nuuaimage@163.com

1 引言

数字全息结合了传统的光学全息技术与数字处理技术,是一种全新的无透镜成像技术。它利用电荷耦合器件(CCD)等光电传感器记录全息图,将其强度、相位信息以数字形式存入计算机,随后进行数字处理和全息再现。数字全息具有实现简单、速度快、精度高等优点,便于进行定量分析与测量。随着高性能 CCD 的出现和计算机速度、容量的大幅提升,数字全息广泛应用于三维物体识别、粒子场测定、显微等领域^[1-5]。然而,数字全息实际处理过程中,由于激光相干散斑噪声和零级像的干扰,再现像中的物像细节难以分辨,且图像整体暗淡不清,严重影响了数字全息再现像的像质,降低了后续识别与测量的精度^[6]。为此,必须研究改善数字全息再现像像质的去噪及增强方法,从而消除散斑噪声、提升对比度并增强物像边缘。

现有的再现像像质改善方法大多是消除散斑噪声。文献[7]将记录的全息图分割成若干子图,并进行再现叠加,可减小散斑噪声,但却大大降低了再现像的分辨率。中值滤波方法^[8]、小波方法^[9]也被用来消除散斑噪声,然而会损失大量的物像边缘信息。为了在减小散斑噪声的同时保持边缘,文献[10]在 Curvelet 变换域进行阈值量化处理,而文献[11]则进一步将多尺度变换与各向异性扩散模型相结合,更好地保留了再现像的细节纹理特征。然而,现有的基于多尺度变换的数字全息去噪方法对散斑噪声的抑制能力略差,并不适用于散斑噪声污染严重的情况。此外,经过去零级像处理后,再现像的对比度较低,致使细节特征难以分辨,因此需研究一种行之有效的数字全息再现像增强方法。现有的图像增强方法常采用多尺度变换,包括小波变换^[12]、Contourlet 变换^[8]、非下采样 Contourlet 变换(NSCT)^[13-14]等。文献[15]采用小波变换,在高频子带利用模极大值法检测再现像的边缘并进行边缘增强。由于小波变换处理二维图像时缺乏方向性,图像增强过程中会致使边缘形状发生畸变。与小波变换相比,Contourlet 变换具有多方向性的优点,能更好地表示边缘细节,文献[8]采用 Contourlet 变换,较为有效地增强了数字全息再现像的条纹对比度及纹理清晰度。NSCT 则进一步解决了 Contourlet 变换伪吉布斯失真的问题,能很好地保持边缘的光滑性。

基于上述分析,本文提出一种基于散斑去噪各向异性扩散(SRAD)模型及 NSCT 的数字全息再现

像像质改善方法,分为散斑噪声抑制和图像增强两步。散斑噪声抑制步骤考虑采用 SRAD 模型^[16]。该方法针对散斑噪声的乘性性质,改进了经典 Perona-Malik(PM)扩散模型的边缘检测算子和扩散系数,具有较强的去噪能力,但会弱化物像边缘。然后对去噪后图像进行增强处理,首先进行 NSCT 分解,产生一个低频子带和若干高频子带,然后对低频子带采用一种非线性增益函数,同时改进了其中的阈值确定方法,适当地拉伸再现像的对比度;对高频子带则采用一种改进的 NSCT 模极大值法检测、放大代表边缘的系数,以此消除残留的散斑噪声并增强被弱化的边缘。本文列举了所提出的数字全息再现像像质改善方法的步骤,并依据主观视觉和客观定量指标两个方面,与近年来提出的非线性扩散去噪方法、图像增强方法进行了比较。

2 数字全息再现像像质改善方法及步骤

2.1 基于 SRAD 模型的再现像去噪方法

基于偏微分方程的各向异性扩散(AD)方法广泛用于图像去噪。PM 扩散模型对于含较少加性噪声的图像能取得很好的降噪效果,然而对于噪声污染严重、含乘性噪声的图像去噪效果不佳。PM 扩散模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}[c(|\nabla I|) \cdot \nabla I] \\ I(t=0) = I_0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 ∇ 是梯度算子, div 是散度算子, $|\cdot|$ 表示幅度, $c(|\nabla I|)$ 是扩散系数, t 是时间算子, I_0 是原始图像。 $|\nabla I|$ 则可看成边缘检测器。

数字全息再现像中,存在大量的散斑噪声,它是一种具有复杂统计特性的乘性噪声。针对散斑噪声特点的各向异性扩散模型,可重新定义(1)式中的边缘检测器和扩散系数^[16]:

$$q(x, y; t) = \sqrt{\frac{(|\nabla I|/I)^2/2 - (\nabla^2 I/I)^2/4^2}{[1 + (\nabla^2 I/I)^2/4]^2}}, \quad (2)$$

$$c(x, y; t) = \frac{1}{1 + \{[q(x, y; t)]^2 - [q_0(t)]^2\} / \{[q_0(t)]^2 \{1 + [q_0(t)]^2\}\}}, \quad (3)$$

式中 $q(x, y; t)$ 是改进的边缘检测器,结合了梯度算子 $|\nabla I|$ 和拉普拉斯算子 $\nabla^2 I$, 能更准确地检测出散斑噪声污染的再现像中的边缘, $q_0(t)$ 则是 t 时刻的扩散门限值,

$$q_0(t) \approx q_0 \exp(-\rho t), \quad (4)$$

式中 ρ 为常数。由于数字全息再现像受散斑噪声污染严重,因此初值 q_0 取 1,尽可能地平滑噪声。然而该方法在有效抑制散斑噪声的同时,会弱化物像的边缘,且数字全息再现像还存在对比度低、残留少量噪声的问题,因此采用一种基于 NSCT 的图像增强方法,以提升再现像的对比度并增强被弱化的边缘。

2.2 基于 NSCT 的再现像增强方法

2.2.1 NSCT 的基本原理

NSCT 去除了 Contourlet 变换的下采样过程,由非下采样塔状滤波器(NSP)和非下采样方向性滤波器组(NSDFB)构成。NSP 是双通道结构,对滤波器进行上采样后作为下一级滤波器;NSDFB 采用 aTrous 算法设计,对方向滤波器进行适当的上采样

操作。上述构造使 NSCT 避免了频率混叠现象,具有平移不变性,与 Contourlet 变换相比,能更清晰、准确地表示图像中的边缘细节信息。

利用 NSCT 对数字全息再现像进行分解后,产生一个低频子带和若干高频子带,下面对各子带系数进行调整,实现图像增强。

2.2.2 基于非线性增益函数的低频子带对比度增强

经 NSCT 分解后的低频子带几乎不含噪声,包含数字全息再现像的大量基本信息。低频子带系数的幅值大小对应于低频重构图像的灰度级大小。因此可引入空间域灰度级变换方法,对低频子带系数进行拉伸,达到提升整体对比度的目的。采用一种正弦变换非线性增益函数

$$D(i, j) = \begin{cases} \text{sign}[d(x, y)] \cdot [|d(x, y)| - d_{\min}] \cdot \left\{ \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{|d(x, y)| - d_{\min}}{T - d_{\min}} \right] \right\}^k + d_{\min}, & d_{\min} \leq |d(x, y)| \leq T \\ \text{sign}[d(x, y)] \cdot [|d(x, y)| - d_{\max}] \cdot \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{|d(x, y)| - T}{d_{\max} - T} \right] \right\}^k + d_{\max}, & T < |d(x, y)| \leq d_{\max} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $d(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 分别为调整前后像素 (x, y) 处的低频子带系数, d_{\max} 和 d_{\min} 分别为低频子带系数的最大值和最小值, $\text{sign}(\cdot)$ 表示符号函数, k 为增益强度控制参数, T 为增益函数的拐点,即区分图像目标和背景的阈值。(5)式代表的非线性增益函数是 S 型曲线,即对低频图像进行暗区、亮区压缩,中间区域扩展,与双曲正切函数、Gamma 函数等传统的 S 型增益函数相比,具有易于控制形状、通用性强等优点。

文献[12]中给出了阈值 T 的确定方法,然而容易错分目标和背景。为此,提出利用最大类间方差法。首先将低频子带系数幅值线性映射到 $0 \sim 255$, 视为一幅灰度级图像。若 P_i 表示灰度值为 i 的像素出现的概率,阈值取 t' ,则背景类和目标类出现的概率分别为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{t'} P_i, \quad \omega_1 = \sum_{i=t'+1}^{255} P_i, \quad (6)$$

背景类和目标类的灰度均值分别为

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^{t'} iP_i}{\omega_0}, \quad \mu_1 = \frac{\sum_{i=t'+1}^{255} iP_i}{\omega_1}. \quad (7)$$

背景类和目标类的类间方差定义为

$$\sigma^2(t') = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (8)$$

式中 $\sigma^2(t')$ 达到最大时,对应的阈值 T 即为非线性增益函数的最优阈值:

$$T = \underset{0 \leq t' < L-1}{\text{argmax}} |\sigma^2(t')|. \quad (9)$$

该方法简单快速,能较为准确地分割出数字全息再现像的背景和目标,保证对比度的有效提升,凸显出物像细节。

2.2.3 基于改进 NSCT 模板极大值法的高频子带边缘增强

调整高频子带系数的目的是对数字全息再现像的边缘进行增强。然而,高频子带内仍存在少量散斑噪声且难以去除,因此可对高频子带进行边缘检测,再对检测出的边缘进行增强处理。传统的小波模板极大值法是根据高频梯度图像每一点的辐角确定边缘曲线梯度方向,然而 NSCT 的滤波器是不可分离的,高频子带包含足够的方向信息,可简化模板极大值法的计算步骤。假设数字全息再现像经 NSCT 分解后, j 尺度、 k 方向上 (x, y) 处的高频子带系数记为 $c_k^j(x, y)$,方向滤波器将各高频子带均划分为 8 个楔形子带,在尺度 j 上产生 8 个等效方向 $\arg c_k^j$,等效梯度方向 $\arg(\text{grad } c_k^j)$ 与之垂直。传统的 NSCT 模板极大值法是在同一子带内,将高频系数的模值与其对应梯度方向上的邻近两点进行比较,若是极大值点,则作为边缘奇异点保留。对于数字全息再现像,实验证明该方法并不能在散斑噪声环境下有效地检测出边缘。下面提出改进的 NSCT 模板极大值法,将各子带系数模值与垂直子带中同一位置的邻近系

数模值相比较,并判断是否为边缘点。对于高频子带 c_k^i ,同一尺度内与之垂直的子带记为 c_k^{i*} ,则 $c_k^i(x,y)$ 与 $c_k^{i*}(x,y)$ 的邻近点比较,可确定 $c_k^i(x,y)$ 是否代表边缘,若是,则保持,否则置0。

经上述改进的 NSCT 模极大值边缘检测后,还会存在少量噪声引入的伪边缘。现采用如下步骤去除伪边缘:

- 1) 设置双阈值 $t_L=0.1, t_H=0.25$;
- 2) 模值大于 t_H 的高频子带系数认为是边缘,小于 t_L 则为噪声置0;对模值介于 t_L 和 t_H 之间的系数进行逐一判断。若该系数的模值大于邻域的8个系数,则认为是边缘,否则置0;
- 3) 对检测到的所有边缘系数进行放大。

2.3 数字全息再现像像质改善方法的步骤

利用 SRAD 模型、NSCT 改善数字全息再现像像质的步骤如下:

- 1) 根据(1)~(3)式,对数字全息再现像进行基于 SRAD 模型的去噪;
- 2) 将数字全息再现像的灰度级线性映射至0~255;
- 3) 对数字全息再现像进行 NSCT 分解,产生一个低频子带和若干高频子带,其中方向滤波器分解的方向数为8;
- 4) 根据(5)式对低频子带系数进行非线性增强,其中,增益强度控制参数取2,阈值 T 根据(6)~(7)式选取;

5) 采用 2.2.3 节的改进 NSCT 模极大值法对高频子带进行边缘检测,并用双阈值法去除伪边缘,增强代表边缘的高频系数;

6) 进行非下采样 Contourlet 逆变换,得到最终像质改善后的数字全息再现像。

3 实验结果与分析

采用提出的数字全息再现像像质改善方法,对大量再现像进行了去噪、增强实验,并依据主观视觉、客观定量评价两个方面,与近年来提出的去噪、增强方法进行了比较。上述方法均是在 Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU 2.10 GHz/2 GB 内存、Matlab 2009a 环境中运行的。由于篇幅限制,现以两幅数字全息再现像的实验结果为例加以说明。

首先采用现有的小波收缩和全变差模型(WSTV)方法^[17]、Contourlet 变换和非线性扩散(CT_ND)方法^[18]、NSCT 和非线性扩散(NSCT_ND)方法^[19]、新的散斑去噪各项异性扩散模型(NSRAD)方法^[20]及 SRAD 方法对输入的原始数字全息再现像进行散斑噪声抑制处理。图 1~2 给出了两组原始图像及采用 WSTV、CT_ND、NSCT_ND、NSRAD、SRAD 等五种方法后的去噪结果。参数设置如下:WSTV 方法采用 Haar 小波,其中全变差模型的时间步长取 0.1;CT_ND 方法中的扩散步长为 1/7;NSCT_ND 方法中 P-Laplace 非线性扩散的迭代时间步长为 0.1;NSRAD 方法的迭代步长为 0.05。

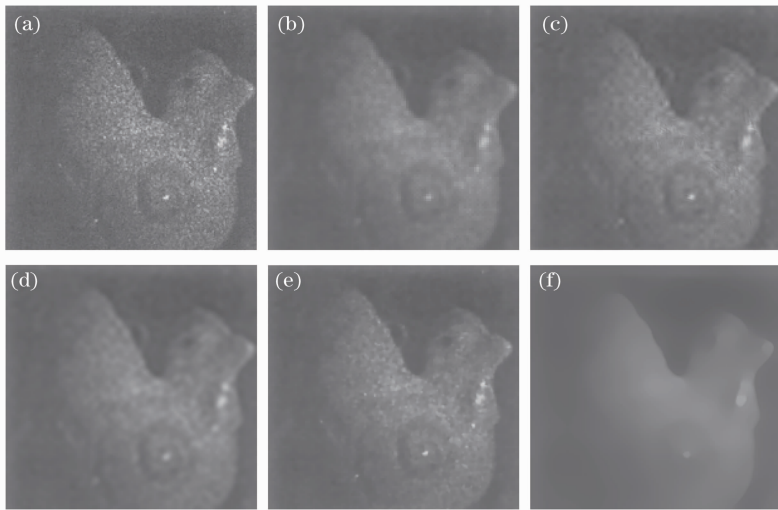


图 1 数字全息再现像 1 的去噪结果。(a) 原始图像;(b) WSTV 结果;(c) CT_ND 结果;(d) NSCT_ND 结果;(e) NSRAD 结果;(f) SRAD 结果($q_0=1$)

Fig. 1 Noise reduction results of reconstructed image of digital hologram 1. (a) Original image; results by (b) WSTV, (c) CT_ND, (d) NSCT_ND, (e) NSRAD, and (f) SRAD ($q_0=1$)

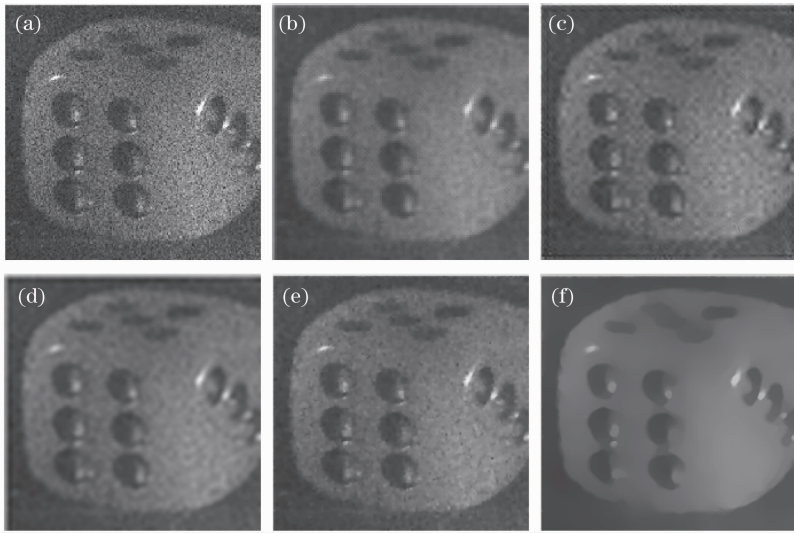


图 2 数字全息再现像 2 的去噪结果。(a) 原始图像；(b) WS_TV 结果；(c) CT_ND 结果；(d) NSCT_ND 结果；(e) NSRAD 结果；(f) SRAD 结果($q_0=1$)

Fig. 2 Noise reduction results of reconstructed image of digital hologram 2. (a) Original image; results by (b) WS_TV, (c) CT_ND, (d) NSCT_ND, (e) NSRAD, and (f) SRAD ($q_0=1$)

由图 1~2 可以看出：原始数字全息再现像均含有大量的散斑噪声。WS_TV 方法可较好地抑制散斑噪声；CT_ND 方法去噪后的图像仍保留较多的散斑噪声，平滑效果最差；采用 NSCT_ND 方法时，虽然一定程度上抑制了散斑噪声，但图像整体变得模糊；NSRAD 方法则在去噪的同时，最好地保留了物像的边缘细节，物像的清晰度最高，然而，仍保留了较多的散斑噪声，不利于后续的图像处理；SRAD 方法中， $q_0=1$ 时，几乎平滑了所有的散斑噪声。对

于数字全息图像 2，SRAD 方法在抑制噪声的同时造成上方黑点粘连，而现有去噪方法均无法在完全平滑散斑噪声的同时保证目标的高分辨率，因此还需进行深入的去噪研究。

为了定量评价上述去噪方法的平滑效果，表 1 给出了五种非线性扩散方法去噪后图像的等效视数 (ENL)。ENL 是常用的衡量散斑噪声强度的指标，ENL 越大，散斑噪声越少，图像越平滑。分析表 1 中的数据可知：SRAD 方法具有最佳的平滑效果。

表 1 五种非线性扩散方法的定量指标评价

Table 1 Quantitative index evaluation of five nonlinear diffusion methods

Experimental image	Index evaluation	WS_TV ^[17]	CT_ND ^[18]	NSCT_ND ^[19]	NSRAD ^[20]	SRAD ($q_0=1$)
Image 1	ENL	64.58	61.22	63.60	63.34	79.82
Image 2	ENL	19.60	16.39	19.96	16.44	20.68

经 SRAD 方法去噪后，边缘被弱化，且原始数字全息再现像对比度较低，为此，必须进行图像增强处理。首先将去噪后图像的灰度级线性映射至 0~255 作为输入图像，然后采用提出的基于 NSCT 的增强方法进行处理，并与近年来提出的两种 NSCT 增强方法进行对比。图 3~4 给出了两组原始图像、去噪后图像、线性拉伸后图像、及采用 NSCT 方法 1^[13]、NSCT 方法 2^[14] 和 NSCT 增强方法处理后的结果。三种增强方法中，NSCT 的分解级数均为 [3, 3]。

图 3~4 中，对去噪后图像进行线性拉伸后，对比度得到提高，显现出细节边缘与噪声，然而图像仍

偏灰，需进一步提升对比度，增强立体感。将线性拉伸后图像作为输入图像，对采用三种 NSCT 方法增强输入图像的结果进行比较，可以看出 NSCT 方法 1^[13] 和 NSCT 方法 2^[14] 均未能有效地提高输入图像的对比度，且由于两种方法的噪声阈值估计都不准确，也同时增强了噪声，使得物像表面显现较多噪声，物像的边缘变得模糊。而 NSCT 增强方法对低通子带进行了非线性增强，进行暗区、亮区压缩，中间区域扩展，有效提升了输入图像的对比度，物像的立体感得到增强；对高频子带采用了改进的模板大值边缘检测方法，仅仅对边缘进行增强，边缘附近没有噪声的干扰，可得到光滑的边缘。因此 NSCT 增

强方法增强后图像的视觉效果最佳。

与输入图像间的对比度增益指标。

表 2 给出了采用三种 NSCT 方法增强后图像

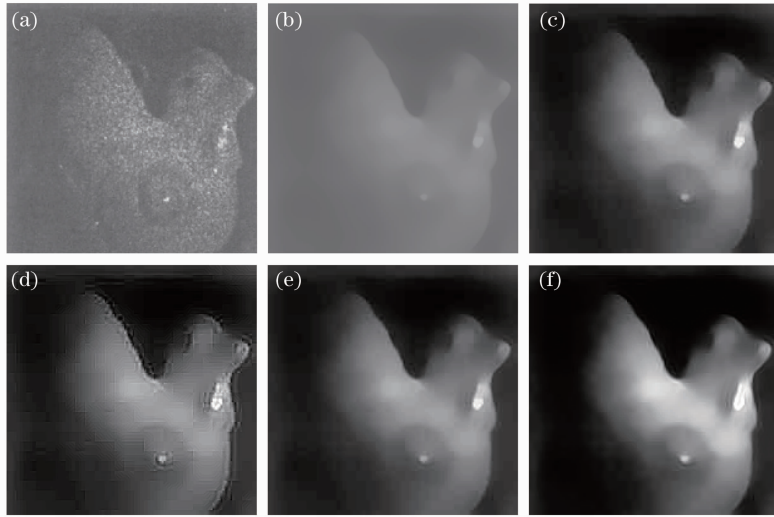


图 3 数字全息再现像 1 的增强结果。(a) 原始图像;(b) 去噪后图像;(c) 线性拉伸后图像;(d) NSCT 方法 1 结果;
(e) NSCT 方法 2 结果;(f) NSCT 增强方法结果

Fig. 3 Enhancement results of reconstructed image of digital hologram 1. (a) Original image; (b) image after noise reduction; (c) image after linear enhancement; results by (d) NSCT method 1, (e) NSCT method 2, and (f) proposed enhancement method of NSCT

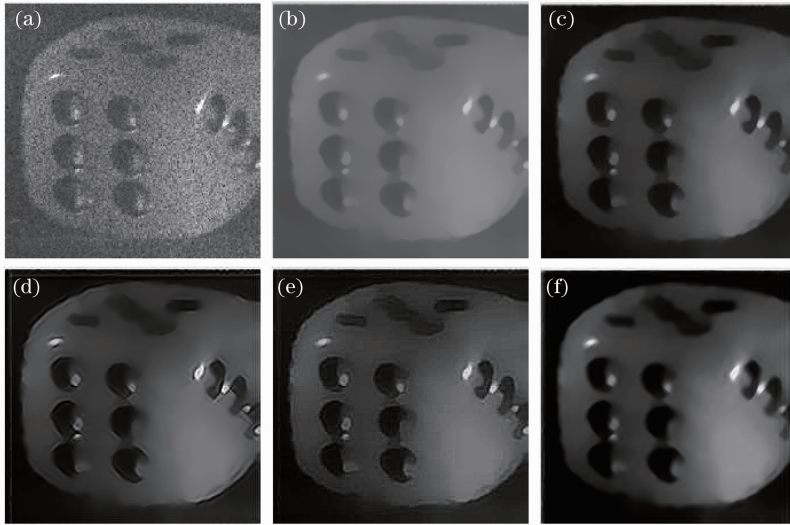


图 4 数字全息再现像 2 的增强结果。(a) 原始图像;(b) 去噪后图像;(c) 线性拉伸后图像;(d) NSCT 方法 1 结果;
(e) NSCT 方法 2 结果;(f) NSCT 增强方法结果

Fig. 4 Enhancement results of reconstructed image of digital hologram 2. (a) Original image; (b) image after noise reduction; (c) image after linear enhancement; results by (d) NSCT method 1, (e) NSCT method 2, and (f) proposed enhancement method of NSCT

表 2 三种 NSCT 增强方法的定量指标评价

Table 2 Quantitative index evaluation of three NSCT enhancement methods

Experimental image	Index evaluation	NSCT method 1	NSCT method 2	Proposed NSCT method
Image 1	Contrast gain	1.020	1.003	1.920
Image 2	Contrast gain	1.096	1.064	1.631

分析表 2 中数据发现: NSCT 方法 1 和 NSCT 方法 2 未能提升输入图像的对比度, 而采用 NSCT 增强方法则能适当地改善物像的对比度。

依据主观视觉效果和客观定量指标, 比较原始图像和最终处理后的图像发现, 本文方法使散斑噪声得到有效抑制, 物像的细节清晰可辨, 大大提升了再现像的分辨率。

4 结 论

提出了一种基于 SRAD 模型及 NSCT 的数字全息再现像像质改善方法。首先采用 SRAD 模型对整幅数字全息再现像进行散斑噪声抑制处理, 然后对去噪后图像进行 NSCT 分解, 产生一个低频子带和若干高频子带。利用一种非线性增益函数处理低频子带系数, 其中区分目标与背景的阈值由最大类间方差法确定; 对于高频子带, 则采用改进的 NSCT 模板大值法在噪声中提取边缘, 并进行边缘增强。对大量低对比度、散斑噪声干扰严重的数字全息再现像进行了去噪、增强实验, 结果表明, 与其他非线性扩散方法相比, 本文的 SRAD 模型能最有效地平滑噪声; 与近年来提出的两种 NSCT 增强方法相比, 提出的 NSCT 增强方法能有效提升去噪后图像的对比度, 增强物像的立体感, 同时能进一步去除再现像中残留的噪声, 得到光滑清晰的边缘。综合来看, 利用本文方法, 可使数字全息再现像像质得到明显改善, 便于后续数字全息的识别与测量。

参 考 文 献

- 1 Stern A, Javidi B. Theoretical analysis of three-dimensional imaging and recognition of micro-organisms with a single-exposure on-line holographic microscope[J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(1): 163-168.
- 2 Li Guangyong, Yang Yan. Digital holography particle image velocimetry applied for measurement of the rotating flow fields [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0609001.
李光勇, 杨 岩. 数字全息粒子图像测速技术应用于旋转流场测量的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0609001.
- 3 Pavillon N, Kuhn J, Moratal C, *et al.*. Early cell death detection with digital holographic microscopy[J]. *PLoS One*, 2012, 7(1): e30912.
- 4 Psota P, Ledl V, Dolecek R, *et al.*. Measurement of piezoelectric transformer vibrations by digital holography[J]. *IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(9): 1962-1968.
- 5 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309002.
马利红, 王 辉, 金洪震, 等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309002.
- 6 Zhang Yinke, Wang Cunshuai, Hao Jinbo. Background intensity compensation method for improving the reconstructed image quality of digital hologram[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 204-206.

- 张引科, 王存帅, 郝劲波. 改善数字全息再现像质量的背景强度补偿法[J]. *激光技术*, 2013, 37(2): 204-206.
- 7 Abolhassani M, Rostami Y. Speckle noise reduction by division and digital processing of a hologram[J]. *Optik*, 2012, 123(10): 937-939.
- 8 Wu Yiquan, Yin Jun. Reconstructed image enhancement of digital holography in contourlet domain based on particle swarm optimization[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0809002.
吴一全, 殷 骏. 粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像增强[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809002.
- 9 Akshay Sharma, Gyanendra Sheoran, Jaffery Z A, *et al.*. Improvement of signal-to-noise ratio in digital holography using wavelet transform[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2008, 46(1): 42-47.
- 10 Wang Liang, Feng Shaotong, Nie Shouping, *et al.*. Improving the reconstructed image quality of the digital holography through multi-scale transform[J]. *J Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(5): 625-628.
王 亮, 冯少彤, 聂守平, 等. 利用多尺度变换提高数字全息再现像质量[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(5): 625-628.
- 11 Wu Yiquan, Ye Zhilong, Wan Hong. Speckle noise suppression of reconstructed image based on dual-tree complex wavelet and anisotropic diffusion [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0409002.
吴一全, 叶志龙, 万 红. 双树复小波和各向异性扩散再现像散斑噪声抑制[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0409002.
- 12 Gong Changlai, Luo Cong, Yang Dongtao, *et al.*. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 703-707.
龚昌来, 罗 聪, 杨冬涛, 等. 一种基于平稳小波域的红外图像增强方法[J]. *激光与红外*, 2013, 43(6): 703-707.
- 13 Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei, *et al.*. Image enhancement based on the nonsubsampling contourlet transform and adaptive threshold[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(3): 527-530.
梁 栋, 殷 兵, 于 梅, 等. 基于非抽样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法[J]. *电子学报*, 2008, 36(3): 527-530.
- 14 Zhang Lin, Zhu Zhaoda. A novel nonlinear method for image enhancement based on nonsubsampling contourlet transform[J]. *J Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8): 1786-1790.
张 林, 朱兆达. 基于非降采样 Contourlet 变换的非线性图像增强新算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(8): 1786-1790.
- 15 Jia Qin, Li Zhiquan. A speckle denoising new method for reconstructed image of digital holography [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(9): 205-207.
贾 勤, 李志全. 数字全息再现图像散斑噪声消除新方法[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(9): 205-207.
- 16 Yu Y, Acton S T. Speckle reducing anisotropic diffusion[J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2002, 11(11): 1260-1270.
- 17 Wu Yadong, Sun Shixin. A new hybrid image de-noising algorithm based on 2D wavelet shrinkage and nonlinear diffusion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(1): 163-166.
吴亚东, 孙世新. 基于二维小波收缩与非线性扩散的混合图像去噪算法[J]. *电子学报*, 2006, 34(1): 163-166.
- 18 Qu Huaijing, Peng Yuhua. IVUS image denoising based on contourlet transform and nonlinear diffusion [J]. *Chinese J Biomedical Engineering*, 2009, 28(4): 490-495.
曲怀敬, 彭玉华. 基于 Contourlet 变换和非线性扩散的 IVUS 图像去噪[J]. *中国生物医学工程学报*, 2009, 28(4): 490-495.
- 19 Chen Jianjun, Tian Fengchun, Qiu Yu, *et al.*. Image denoising based on nonsubsampling contourlet and diffusion[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(14): 185-189.
陈建军, 田逢春, 邱 宇, 等. 基于非下采样 Contourlet 和扩散的图像去噪[J]. *计算机工程*, 2010, 36(14): 185-189.
- 20 Li Canfei, Wang Yaonan, Xiao Changyan, *et al.*. A new speckle reducing anisotropic diffusion for ultrasonic speckle [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(3): 412-419.
李灿飞, 王耀南, 肖昌炎, 等. 用于超声斑点噪声滤波的各向异性扩散新模型[J]. *自动化学报*, 2012, 38(3): 412-419.

栏目编辑: 何卓铭