

文章编号: 1001-4888(2017)05-0620-07

加窗傅里叶滤波和相干增强扩散 在条纹去噪中的比较分析^{*}

王海霞¹, 彭柔¹, 钱克矛²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江杭州 310014; 2. 南洋理工大学 计算机科学与工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 光学干涉测量具有非接触、高精度和全场测量的优点, 能对形变、折射率、位移等信息进行测量。噪声滤除是光学干涉测量产生的条纹图像处理的一个关键问题。加窗傅里叶滤波(Windowed Fourier Filtering, WFF)与自适应加窗傅里叶滤波(Adaptive Windowed Fourier Filtering, AWFF)是有效的频域去噪算法。相干增强扩散(Coherence Enhancing Diffusion, CED)则是基于偏微分方程的空域去噪算法。针对条纹去噪问题, 比较了 WFF、AWFF 和 CED 在不同密度和不同噪声类型的条纹图上的表现, 分析了它们的适用条纹类型。

关键词: 条纹图; 相干增强扩散; 加窗傅里叶滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-301

0 引言

光学干涉测量^[1]具有非接触、高精度和全场测量的优点, 能对形变、折射率、位移等物理量进行测量, 广泛应用于机械、材料、无损检测以及生物工程等研究与应用领域中。光学干涉测量结果普遍表现为条纹图像。在条纹处理中, 噪声具有很大的干扰, 会降低测量精度, 有时甚至导致相位解调失败。可以认为, 噪声滤除是条纹图处理的关键问题之一。

条纹图的噪声处理有两类算法: 频域算法与空域算法^[2-8]。加窗傅立叶滤波(Windowed Fourier Filtering, WFF)是一种典型的频域去噪算法, 它通过对条纹图进行加窗傅里叶变换, 在频谱设置阈值去除条纹噪声^[5,6]。自适应加窗傅立叶滤波(Adaptive Windowed Fourier Filtering, AWFF)进一步对 WFF 算法中的频带进行自适应设置^[2]。在空域算法中, 基于条纹图的流状结构特点, 相干增强扩散滤波(Coherence Enhancing Diffusion, CED)^[7,8]可以建立偏微分方程模型, 根据条纹方向去噪, 并控制条纹平行和垂直两个方向上的平滑程度, 在消除噪声的同时又不导致图像模糊。无论是 WFF、AWFF 还是 CED, 在条纹去噪中, 都取得了各自良好的效果。

WFF、AWFF 和 CED 在对不同频域范围和噪声类型的条纹图进行去噪时表现各有优劣。本文将对它们的表现作系统的比较研究, 从而探讨它们可有效处理的条纹图范围, 以便为研究人员在不同条纹图下的去噪算法选取提供参考依据。

^{*} 收稿日期: 2017-05-11; 修回日期: 2017-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(61602414)

通讯作者: 王海霞, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为条纹图的分析处理。

钱克矛, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为条纹图的分析处理。

1 加窗傅里叶滤波

1.1 加窗傅里叶滤波

噪声随机地分布在条纹图的各个部分。WFF 认为噪声频谱渗透在整个加窗傅里叶变换域(Windowed Fourier Transform, WFT)中,同时具有较小的频谱系数。因此,在 WFT 域中设置阈值是有效的消除噪声的手段,这也是 WFF 的基本思想。无论在理论还是实践中,WFF 的有效性都得到了充分的证明^[2, 5, 6]。

WFT 可以表示为:

$$Sf(u, v, \xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) g_{u, v, \xi, \eta}^*(x, y) dx dy \quad (1)$$

其逆变换(IWFT)为:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Sf(u, v, \xi, \eta) g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) d\xi d\eta du dv \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, $f(x, y)$ 是条纹图; $g_{u, v, \xi, \eta}(x, y)$ 是基函数; $g_{u, v, \xi, \eta}^*(x, y)$ 是 $g_{u, v, \xi, \eta}(x, y)$ 的复共轭。 $g_{u, v, \xi, \eta}$ 有四个参数,故 $f(x, y)$ 的 WFT 频谱存在于四维空间中。基函数定义为:

$$g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) = g(x - u, y - v) \exp(j\xi x + j\eta y) \quad (3)$$

式中, $g(x - u, y - v)$ 为高斯窗。高斯窗的存在使 WFT 可以用来分析条纹图的局部特征。WFF 的基本原理是通过对 WFT 域中的噪声频谱设置阈值来消除条纹图中的噪声,其流程可以概述为:

- 1) 对条纹图 $f(x, y)$ WFT 变换,并获得其频谱 $Sf(u, v, \xi, \eta)$;
- 2) 对 $Sf(u, v, \xi, \eta)$ 设置阈值,如果小于阈值,则设为 0,反之,则保留,并获得结果 $\overline{Sf}(u, v, \xi, \eta)$;
- 3) 对 $\overline{Sf}(u, v, \xi, \eta)$ 进行 IWFT 逆变换,并获得最终结果 $\bar{f}(x, y)$ 。

在第 3) 步中,由于信号往往是集中在一定频率范围内,相对于从 $-\infty$ 到 ∞ 进行积分, IWFT 可以进行一定频率范围内的积分,即对 ξ 和 η 分别从 ξ_l 到 ξ_h 和 η_l 到 η_h 进行积分,表示为:

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\xi_l}^{\xi_h} \int_{\eta_l}^{\eta_h} \overline{Sf}(u, v, \xi, \eta) g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) d\xi d\eta du dv \quad (4)$$

因此, IWFT 的计算只需要针对 $[\xi_l, \xi_h] \times [\eta_l, \eta_h]$ 频带中的频谱。频带的估计可以通过条纹密度或条纹图的傅里叶频谱来实现。假设条纹图的频带是 $[a, b] \times [c, d]$, 考虑到频谱泄露,需要稍作扩展来设置滤波频带^[2]:

$$[\xi_l, \xi_h] \times [\eta_l, \eta_h] = [a - (2/\sigma_x), b + (2/\sigma_x)] \times [c - (2/\sigma_y), d + (2/\sigma_y)] \quad (5)$$

式中, σ_x 和 σ_y 表示窗口的大小。通过设置 $[\xi, \eta] \in [\xi_l, \xi_h] \times [\eta_l, \eta_h]$ 来代替 $[\xi, \eta] \in [-\infty, \infty] \times [-\infty, \infty]$, 不仅能节省计算时间,也能在阈值之前自动排除频带外的噪声,更多的内容参见文献^[2, 5]。

1.2 自适应加窗傅里叶滤波

WFF 算法主要是通过阈值和频带两个方面进行去噪。一方面,当噪声严重时,需要较高的阈值来消除噪声,同时需要较低的阈值来维持信号。阈值的设置主要看噪声的大小。另一方面,信号被认为只存在于频带范围中,频带外的 WFT 频谱被默认为无关信号可作为噪声去除。因而,频带的范围不受条纹图所包含噪声水平的影响,精确的频带设置可以更好地为去噪服务。虽然 WFF 算法具有局部处理的特点,整个条纹图中不同局部却采用了固定的频带。为了让该频带适用于所有局部信号,它的设置只能采用最包容的形式,即根据最高局部频率的像素来进行设置。然而,条纹图的频率分布并不总是均匀的,对于具有较低局部频率的像素来说,窄频带显然是更好的选择。基于此思想,AWFF 根据条纹图的局部频率,为每个像素自适应地设置频带范围,即式(4)中的 IWFT 更改为:

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\xi_l(x, y)}^{\xi_h(x, y)} \int_{\eta_l(x, y)}^{\eta_h(x, y)} \overline{Sf}(u, v, \xi, \eta) g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) d\xi d\eta du dv \quad (6)$$

式中,每个像素都有自己的频带范围 $[\xi_l(x, y), \xi_h(x, y)] \times [\eta_l(x, y), \eta_h(x, y)]$ 。同时,根据高频信号与低频信号的特点,AWFF 定义了一种类型的自适应频带。对于每个像素点,如果其局部频率 $[\omega_x, \omega_y]$ 满足 $[\omega_x/(2/\sigma_x)]^2 + [\omega_y/(2/\sigma_y)]^2 \leq 1$,即条纹局部密度低时,频带定义为:

$$[\xi_l, \xi_h] \times [\eta_l, \eta_h] = [-\omega_x - (4/\sigma_x), \omega_x + (4/\sigma_x)] \times [-\omega_y - (4/\sigma_y), \omega_y + (4/\sigma_y)] \quad (7)$$

否则,则视为高密度,频带定义为:

$$[\xi_l, \xi_h] \times [\eta_l, \eta_h] = [\omega_x - (2/\sigma_x), \omega_x + (2/\sigma_x)] \times [\omega_y - (2/\sigma_y), \omega_y + (2/\sigma_y)] \cup [-\omega_x - (2/\sigma_x), -\omega_x + (2/\sigma_x)] \times [-\omega_y - (2/\sigma_y), -\omega_y + (2/\sigma_y)] \quad (8)$$

式(7)和式(8)中的局部频率 $[\omega_x, \omega_y]$ 可通过加窗傅立叶脊(Windowed Fourier Ridge, WFR)等算法进行估计。WFR 是另一种基于 WFT 的算法,可以直接估计相位和频率^[2, 5]。由于 WFR 仅用于频带估计,而不是准确地相位和局部频率的确定,为节省计算时间,频率采样间隔可以更加稀疏。

2 相干增强扩散滤波

CED 是根据条纹流线形的图像特点来建立偏微分方程的,分别对条纹进行条纹平行方向与垂直方向的平滑^[7, 8]。CED 可以平滑不同密度的条纹图并保留细节信息,用以下迭代方程表示:

$$\partial f(x, y, t)/\partial t = \text{div}(D \nabla f(x, y, t-1)), f(x, y, 0) = f_0(x, y) \quad (9)$$

式中, $f(x, y, t)$ 表示在时间 t 的条纹图,可以通过时间 $t-1$ 的条纹图演化迭代生成; $f_0(x, y)$ 表示原始条纹图;为简便起见,本文省略坐标变量 (x, y) ,扩散张量 D 可以由如下公式得到:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} + \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)(j_{11} - j_{22})}{2\sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}} & \frac{j_{12}(\lambda_1 - \lambda_2)}{\sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}} \\ \frac{j_{12}(\lambda_1 - \lambda_2)}{\sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}} & \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} - \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)(j_{11} - j_{22})}{2\sqrt{(j_{11} - j_{22})^2 + 4j_{12}^2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别表示垂直和平行于流动方向上的控制量; $\begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{12} & j_{22} \end{bmatrix}$ 的计算如下:

$$J_\rho(\nabla f_\sigma) = K_\rho * (\nabla f_\sigma \otimes \nabla f_\sigma) = \begin{bmatrix} K_\rho * (f_{xx}f_{xx}) & K_\rho * (f_{xx}f_{yy}) \\ K_\rho * (f_{yy}f_{xx}) & K_\rho * (f_{yy}f_{yy}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{12} & j_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, K_ρ 是具有标准偏差 ρ 的高斯核; $\nabla f_\sigma = [f_{xx} \ f_{yy}]^T$ 是条纹图经过标准偏差 σ 的高斯平滑后在 x, y 方向上的梯度。通过调整 λ_1 和 λ_2 的值,可以控制 CED 在垂直与平行方向上的平滑程度,其取值范围如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \begin{cases} \alpha & t \leq N \\ \max(\alpha, (d - thr)/\max(d)) & t > N \end{cases} \\ \lambda_2 = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, d 为条纹图密度。为了消除噪声, λ_2 设置为 1,使得沿条纹方向的平滑最大化。就理论而言,可将 λ_1 设置为 0,以防止垂直条纹方向的平滑。然而将 λ_1 设置为一个较小的值(通常为 0.01)进行轻微平滑却往往是有益的。当条纹图稀疏时,更需要增强条纹垂直方向上的平滑力度,以便完全消除噪声。因此,当迭代次数达到 N ,并且条纹图案的骨架明显时,可以通过条纹骨架之间的距离 d 进行 λ_1 的设置。如果距离 d 小于阈值 thr (通常为 14),则认为条纹图是稠密的,保持 λ_1 为 α 从而使得这些稠密区域不会模糊。反之,则认为条纹图是稀疏的,可以通过密度情况设置 λ_1 的数值。因此,平滑度将主要沿着高密度区域的流动方向进行以保持结构,而在低密度区域沿着平行和垂直两个方向进行以平滑噪声。

3 实验结果分析与讨论

本文采用不同频率和不同噪声类型的条纹图测试 WFF、AWFF 和 CED 的去噪效果。基于对三个算法的理论分析与实验经验,模拟了三种具有代表性的大小为 300×300 的包含低、中、高频率的条纹图,如图 1 所示,图中最高频率分别为 0.25rad/pixel, 0.50rad/pixel, 0.75rad/pixel。需要注意的是,这些条纹具有一定的频率丰富性以免模拟的条纹过于简单。在这三种条纹图中,分别加入加性噪声与

散斑噪声,共产生六张包含噪声的条纹图。其中加性噪声为均值为0,标准偏差约为0.5的随机噪声;散斑噪声根据文献[9]中的方式模拟而成。利用WFF、AWFF和CED分别对这六张噪声图去噪,并对其去噪结果进行定量的比较与分析。

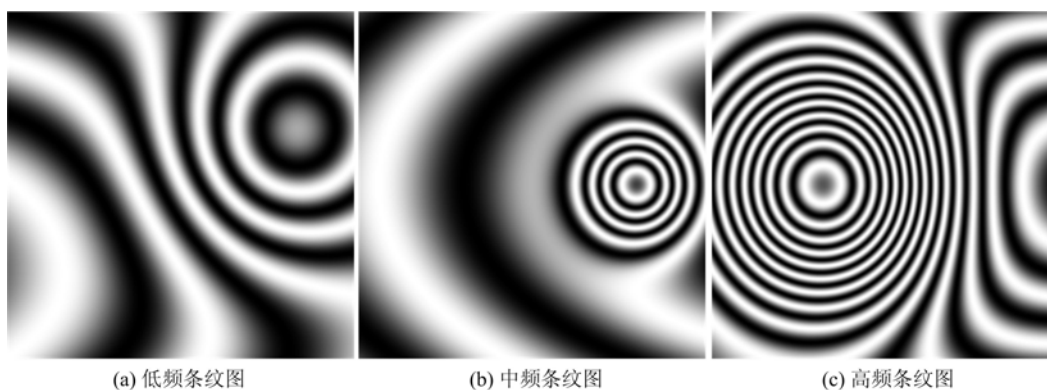


图1 不同频率模拟条纹图

Fig. 1 Simulated fringe patterns

图2是WFF、AWFF和CED对加入加性噪声模拟图的去噪结果,从左到右依次是噪声图、WFF、AWFF和CED的结果图。去噪的结果图与图1的无噪声图进行均方误差的计算之后,列于表1中。当只有加性噪声存在条纹图中时,无论WFF、AWFF和CED都取得了近乎完美的结果。定量而言,WFF、AWFF和CED的表现随频率增加略有降低,各自之间的差距很小。由此可知,在条纹图中存在加性噪声的情况下,可选择任一种算法。

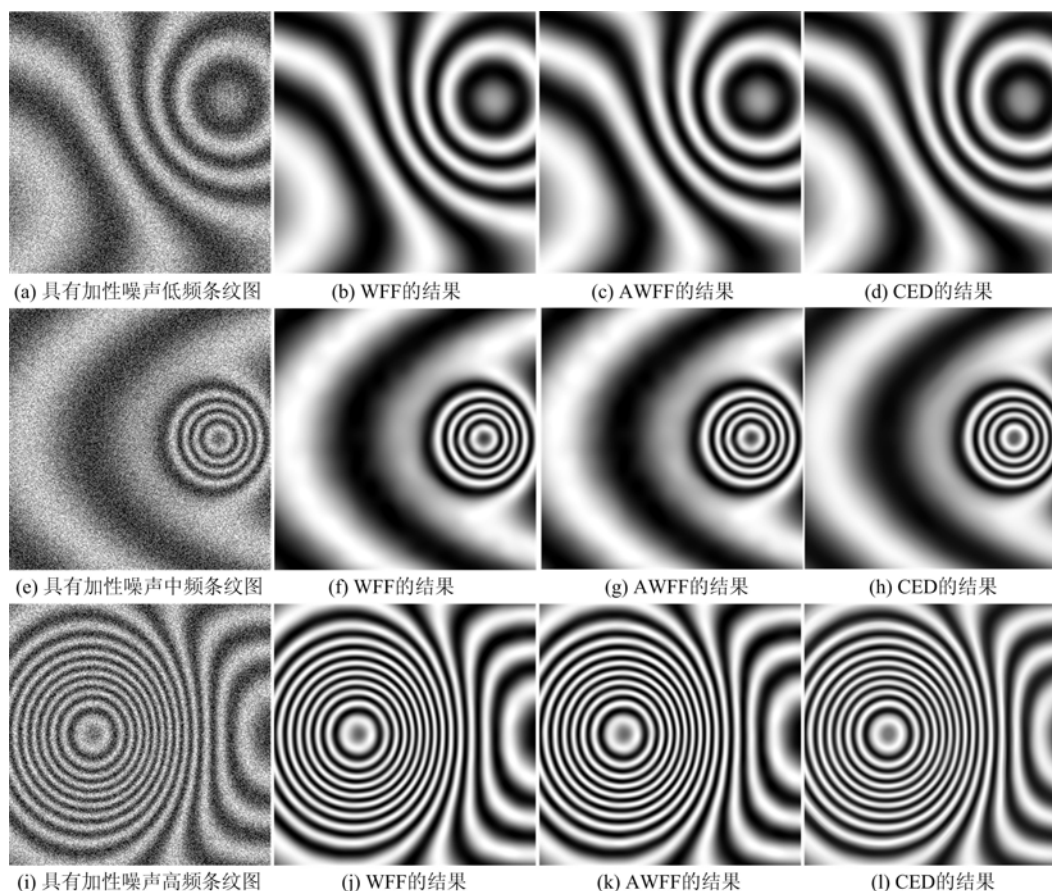


图2 条纹图去噪结果

Fig. 2 Fringe patterns denoising results

表 1 去噪结果的均方误差
Tab.1 Mean Square Errors of denoising results

噪声类型	频率	WFF	AWFF	CED	优先推荐使用方法
加性	低 (Fig. 2(a))	0.0014 (Fig. 2(b))	0.0014 (Fig. 2(c))	0.0020 (Fig. 2(d))	任意
	中 (Fig. 2(e))	0.0021 (Fig. 2(f))	0.0021 (Fig. 2(g))	0.0021 (Fig. 2(h))	任意
	高 (Fig. 2(i))	0.0031 (Fig. 2(j))	0.0030 (Fig. 2(k))	0.0036 (Fig. 2(l))	任意
散斑	低 (Fig. 3(a))	0.0200 (Fig. 3(b))	0.0200 (Fig. 3(c))	0.0222 (Fig. 3(d))	任意
	中 (Fig. 3(e))	0.0502 (Fig. 3(f))	0.0455 (Fig. 3(g))	0.0342 (Fig. 3(h))	CED
	高 (Fig. 3(i))	0.1160 (Fig. 3(j))	0.0909 (Fig. 3(k))	0.1165 (Fig. 3(l))	AWFF

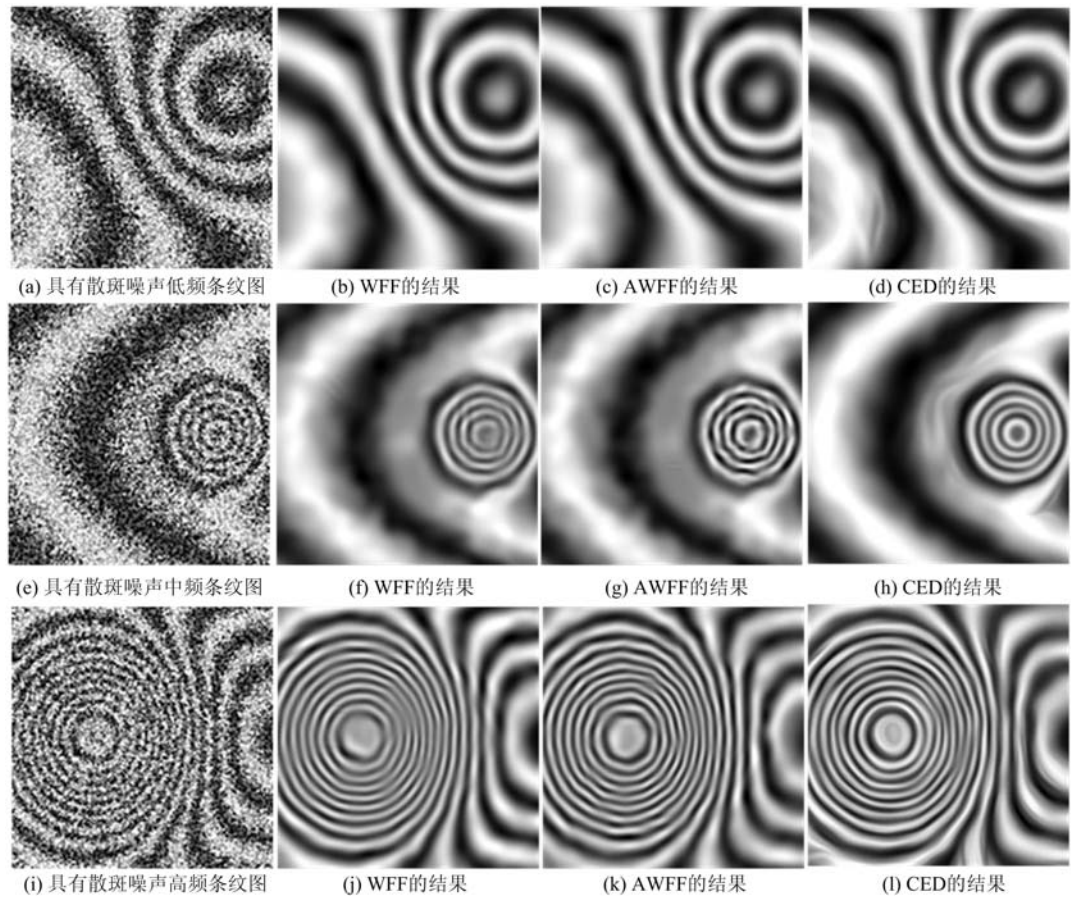


图 3 条纹图去噪结果

Fig.3 Fringe patterns denoising results

图 3 是 WFF、AWFF 和 CED 对加入强散斑噪声模拟图的去噪结果,从左到右依次是噪声图、WFF、AWFF 和 CED 的结果图。去噪的结果图与图 1 的无噪声图进行均方误差的计算,同样列于表 1 中。对于低频散斑条纹图而言,如图 3(b-d)所示,WFF、AWFF 和 CED 都有很好的表现。对于中频散斑条纹图,如图 3(f-h)所示,CED 产生的效果比 WFF 和 AWFF 略好一些,而 AWFF 又比 WFF 略好。为了更多地去除噪声,较高的阈值设置导致 WFF 在高密度区域有点模糊。AWFF 的频带设置降低了阈值的设置要求,更好地保留了高密度区域。CED 很好地保持了高密度区域的流状结构,平滑了低密度区域的噪声。对于高频散斑条纹图,如图 3(j-l)所示,WFF、AWFF 和 CED 的性能随着频率的增加都有所下降。AWFF 与 WFF 相比保留了更多的高频细节,而局部 CED 结果已经有所模糊。以下是对实验结果的进一步分析。

1) 不严重的加性噪声:对 WFF 和 AWFF,它们的阈值处理即可有效抑制噪声,频带选择变得不重要。因此 WFF 和 AWFF 的表现相似。对 CED,由于可以准确估计条纹方向,滤波效果也很好。

2) 含有强散斑噪声的低频条纹:由于条纹频率低,无论是 WFF 还是 AWFF,它们的频带都很窄,严重噪声的寄生空间很小,滤波效果都很好。CED 在这种情况下可以很好地估计条纹方向,效果也很好。

3) 含有强散斑噪声的中频条纹:噪声起伏会扭曲条纹的频谱,影响 WFF 和 AWFF 的滤波结果。相较于 WFF,AWFF 能够自适应地设置频带,在阈值和重建之前预先排除更多的噪声,取得较好的结果。对 CED 而言,它仍可估计条纹方向,且其滤波对条纹方向的误差不甚敏感^[2]。更重要的是,CED 采用迭代方式进行渐进滤波,逐步改进滤波结果,因此其表现相对更好。

4) 含有强散斑噪声的高频条纹:所有方法的表现都变差。AWFF 由于对频带的自适应控制,表现优于 WFF。CED 面临方向估计不准确的问题,容易模糊条纹细节。相比而言,AWFF 的适应性强于 CED。

基于以上分析,对不同情况去噪方法的选择可以参考表 1 最后一列。在条纹图中信号的整体走势仍然可以分辨的时候,可以选择 WFF、AWFF 或者 CED 算法。随着频率和噪声高到一定程度,CED 无法准确估算方向,WFF 或者 AWFF 是更好的选择。

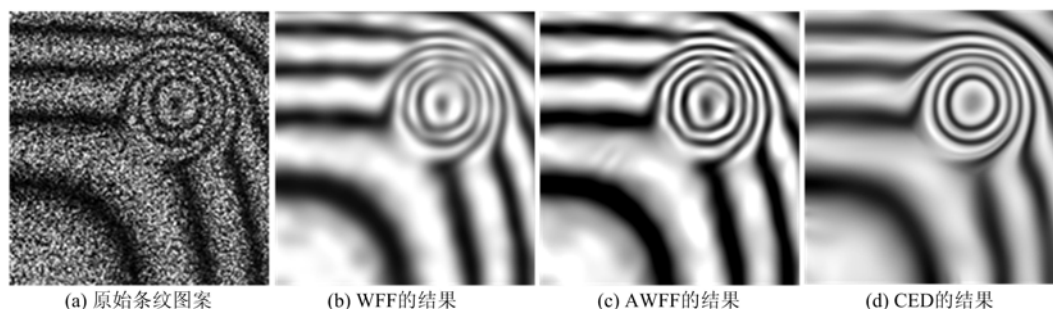


图 4 电子散斑干涉图的去噪结果

Fig. 4 Denoising results of fringe pattern from electronic speckle pattern interferometry

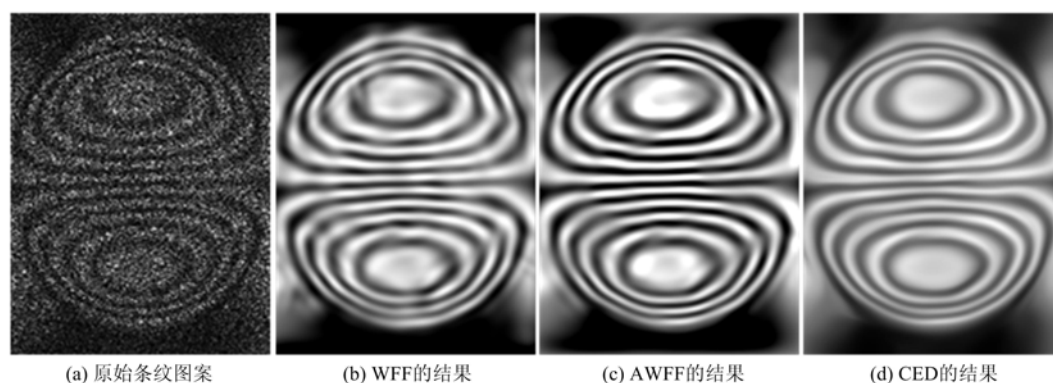


图 5 剪切散斑干涉图的去噪结果

Fig. 5 Denoising results of fringe pattern from speckle shearography

为了进一步验证这三种算法的有效性,将 WFF、AWFF 和 CED 应用在电子散斑干涉图与剪切散斑干涉图中,并选择常见的中频条纹图进行测试。图 4 从左到右依次为实验图、WFF、AWFF 和 CED 的滤波图,图 5 与图 4 相同。滤波结果与图 3 的模拟数据一致。

4 结论

本文对加窗傅立叶滤波(WFF)、自适应加窗傅里叶滤波(AWFF)和相干增强扩散(CED)在条纹图去噪中的效果进行比较。研究不同条纹频率和不同噪声情况下三种算法的表现。在加性噪声条纹图与散斑噪声低频条纹图中,这三种算法都有很好的表现。在散斑噪声中频条纹图中,CED 效果要略优于

WFF 和 AFFF。而对于散斑噪声高频条纹图而言, WFF 和 AFFF 的结果更好。在 WFF 和 AFFF 中, 由于 AFFF 在频带设置中的自适应性, 其性能略优于 WFF。

参考文献:

- [1] Robinson D W, Reid G T. Interferogram analysis: digital fringe pattern measurement techniques[M]. Bristol, England: Institute of Physics, 1993.
- [2] Kemao Q. Windowed fringe pattern analysis[M]. Bellingham, Wash, USA: SPIE Press, 2013.
- [3] 贾大功, 马彩宾, 武立强, 等. 基于改进旋滤波的电子散斑干涉图滤波方法[J]. 光学学报, 2012, 32(3):64—69 (JIA Dagong, MA Caibin, WU Liqiang, et al. Denoising of electronic speckle intererogram based on improved spin filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3):64—69 (in Chinese))
- [4] 郭媛, 毛琦, 陈小天, 等. 干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6):151—155 (GUO Yuan, MAO Qi, CHEN Xiaotian, et al. Study of a fast windowed Fourier filtering method for interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6):151—155 (in Chinese))
- [5] Kemao Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45:304—317.
- [6] Kemao Q, Wang H, Gao W. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses[J]. Applied Optics, 2008, 47:5408—5419.
- [7] Weickert J. Coherence-enhancing diffusion filtering[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 31:111—127.
- [8] Wang H, Kemao Q, Gao W, et. al. Fringe pattern denoising using coherence enhancing diffusion[J]. Optics Letters, 2009, 34:1141—1143.
- [9] Kaufmann G H, Gustavo E G. Speckle noise reduction in TV holography fringes using wavelet thresholding[J]. Optical Engineering, 1996, 35(1): 9—14.

Comparison of Windowed Fourier Filtering and Coherence Enhancing Diffusion for Fringe Pattern Denoising

WANG Hai-xia¹, PENG Rou¹, QIAN Ke-mao²

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract: Optical interferometry has the advantages of non-contact, high accuracy and full field measurement. Fringe patterns produced by various optical interferometric techniques encode the information of deformation, refractive index, vibration, etc. Noise is one of the key problems affecting fringe pattern processing. Windowed Fourier filtering (WFF) and adaptive windowed Fourier filtering (AFFF) are effective frequency domain denoising methods. Coherence enhancing diffusion (CED) is a spatial domain denoising method based on partial differential equation (PDE). In this paper, the performances of WFF, AFFF and CED are compared by applying them to fringe patterns with different frequencies and different noise types. Applicable types of fringe pattern for WFF, AFFF and CED are identified respectively.

Keywords: fringe pattern; coherence enhancing diffusion; windowed Fourier filtering