

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108510

# 采用自适应可靠因子的联合双边散斑条纹滤波方法<sup>\*</sup>

王会峰,何柱材,李云梦,黄 鹤,高 荣  
(长安大学电子与控制工程学院 西安 710064)

**摘 要:**在基于电子散斑干涉法的测量系统中,干涉条纹常常会存在大量噪声从而影响后续相位的提取。为解决双边滤波无法处理大噪声的问题,提出了一种融合加窗傅里叶滤波的联合双边滤波方法并用于处理存在高噪声的电子散斑干涉条纹。在该方法中,引入加窗傅里叶初步滤波后的图像作为联合双边滤波的导向图,并构建更可靠的自适应像素值相似度因子,从而提供更可靠的引导信息和更好的滤波效果。该方法被应用到高、中、低、可变密度 4 种不同密度的模拟条纹和实验采集到的大噪声条纹上,并将其与原始双边滤波和加窗傅里叶滤波相对比。实验结果表明:与其它滤波方法相比,该方法得到的条纹最光滑,结构最完整。对本文模拟的条纹滤波后峰值信噪比提高 1.0~4.2 dB,结构相似度和边缘保持指数最高,相位的均方误差最小。所提出的方法调整更方便,对 330×330 大小的模拟条纹处理时间仅为 4 s 左右。

**关键词:**电子散斑干涉术;图像处理;联合双边滤波;加窗傅里叶滤波;散斑条纹噪声

**中图分类号:** TH741 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## A joint bilateral filtering method based on adaptive reliable factor for fringe patterns of electronic speckle pattern Interferometry

Wang Huifeng, He Zhucai, Li Yunmeng, Huang He, Gao Rong  
(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In the measurement of electronic speckle pattern interferometry, interference fringes contain much noise that affects the subsequent phase extraction. To solve the problem that the bilateral filtering cannot effectively remove high noise, a joint bilateral filtering combined with the windowed Fourier filtering is proposed to deal with electronic speckle pattern interferometry fringes with high noise. In the method, an image after initial processing by the windowed Fourier filtering is introduced as the guiding map of the joint bilateral filtering. Then, an improved similarity factor of pixel value is introduced to provide more reliable guiding information and better filtering effect. The proposed method is applied to four different simulated electronic speckle pattern interferometry fringes with high, medium, low and variable densities and the real electronic speckle pattern interferometry fringes with high noise. In addition, the proposed method is compared with the bilateral filtering and the windowed Fourier filtering. Experimental results show that the fringe obtained by joint bilateral filtering is smoothest, and the structure is the most complete. The peak signal to noise ratio of the simulated fringe filtered by the new method is improved by 1.0~4.2 dB, the structural similarity index and edge preservation index are the highest, and the mean square error of the phase is the smallest. In addition, the proposed method is more convenient to adjust, and the calculation time for a 330×330 simulated fringe is only about 4 s.

**Keywords:** electronic speckle pattern interferometry; image processing; joint bilateral filtering; windowed Fourier filtering; speckle fringe noise

## 0 引 言

电子散斑干涉技术 (electronic speckle pattern

interferometry, ESPI) 是一种通过激光产生的散斑图案对物体进行检测和测量的光学无损检测技术,具有高灵敏度、全场检测、非接触等优点。目前被广泛用于内部缺陷定位、无损检测、微小形变和应变、位移测量等领域<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2021-09-02 Received Date: 2021-09-02

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(52172324)、陕西省重点研发计划项目(2021GY-285,2021SF-483)资助

散斑是一种随机分布的光学图案,通过散射形成具有各不相同的相位和振幅的独立子波分量,它们进行随机叠加时,这些信号就出现散斑现象<sup>[3]</sup>。电子散斑干涉技术检测原理是:通过激光发出相干光束,通过一个半透半反的分光镜分成透射和反射光束,其中一束光束作为参考光束,另外一束光束作为物光直接照射到被测物体表面,被测物体表面散射光和参考光束产生干涉形成散斑图案。对被测物体加载前后拍摄的散斑图案进行处理就可以得到蕴含物体形貌和表面结构信息的散斑条纹图案,通过分析散斑条纹可以得到物体的相位信息<sup>[4-5]</sup>。

条纹噪声不仅会影响条纹对比度,而且还会影响后续相位的提取。通过相移算法得到的相位其值被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 区间内,因而并不连续,需要通过相应的相位提取方法把相位展开。对于存在大量噪声的散斑条纹图案,其包裹相位往往会相位展开失败,得到错误的连续相位图,因而在实际应用中无法对缺陷正确定位或准确测量物体形变。因而去除散斑条纹噪声,保留条纹结构信息的滤波技术是电子散斑干涉技术的关键技术之一。

由于电子散斑干涉条纹图案中的相位信息与噪声信息是混叠的,因此传统滤波方法如中值滤波、均值滤波等在过滤一部分噪声的同时也损失了大量的相位信息。用于去除普通图像中高斯白噪声、椒盐噪声效果好的滤波方法如:三维块匹配滤波(block matching and 3 D filtering, BM3D)、非局部去噪(non local means, NLM)等直接应用到散斑条纹上也往往无法有效地去除条纹中的噪声。针对散斑干涉条纹滤波, Aebischer 等<sup>[6]</sup>提出各向异性正余弦均值滤波方法,将图像分为正弦和余弦分别在垂直和水平方向上重复进行各项异性滤波,可以有效地保护相位跳变信息。顾国庆等<sup>[7]</sup>基于同态滤波方法提出了一个低通滤波器用于过滤条纹中的高频噪声。Jia 等<sup>[8]</sup>结合改进旋滤波和小波去噪,首先使用小波去噪对边缘进行处理,再使用旋滤波去噪,这种方法相对旋滤波的滤波效果有所提高。Wang 等<sup>[9]</sup>在偏微分方程的基础上提出双向扩散模型(相干增强扩散),可以提高滤波的平滑度并有效地保留条纹信息。Zhu 等<sup>[10]</sup>使用多个变分图像分解模型根据密度将条纹分解成不同的部分,通过不同空间描述各部分,并通过空间范数的最小化能量泛函求取滤波后的图像,该法适用于可变密度条纹。Yan 等<sup>[11]</sup>通过使用一系列噪声条纹图案和相应的无噪声条纹图案来训练深度卷积神经网络(diffusion convolutional neural networks, DCNN)模型,将带有噪声的条纹图案用作 DCNN 模型的输入数据,并且可以在 DCNN 输出中预测没有噪声的条纹图案。Qian<sup>[12]</sup>提出了经典的加窗傅里叶滤波(windowed Fourier filtering, WFF),通过傅里叶变换将条纹图像由空域转换到频域,通过设置阈值的方

式过滤频谱系数小的噪声,再通过傅里叶反变换得到滤波后的图像。WFF 可以有效地将分离相位信息和噪声,取得很好的滤波效果。

Tomasi 等<sup>[13]</sup>提出了双边滤波(bilateral filtering, BF),该方法具有很好的边缘保持效果,但为了尽可能地保护有用信息就很难过滤掉和有用信息叠加的噪声。因此无法应用到高噪声散斑干涉条纹滤波上。在 BF 的基础上联合双边上采样滤波器(joint bilateral filtering, JBF)被提出<sup>[14-15]</sup>。此前,也未有将 JBF 运用到条纹滤波上的研究。WFF 采用固定的频谱系数阈值来选择性地去除噪声,这种处理取得了不错的效果。但仍会存在频谱系数突变,即保留了相对较大的噪声频谱系数,而去除了相对较小的条纹信息频谱系数,因而滤波后的条纹往往存在不够光滑,条纹结构相比原始条纹明显结构细化,丢失部分有用条纹信息的情况。且 WFF 处理时间很长,有多个参数需要设置,虽然已有文献对此进行研究<sup>[16]</sup>,但由于实际中采集装置不同所得到的条纹情况也差别很大,因而参数设置并不通用。一旦设置的参数不对就需要花费大量的时间去重新设置参数并重新滤波。为解决双边滤波无法过滤高噪声, WFF 丢失有用相位边缘信息的缺点,本文采用一种 JBF 和 WFF 相结合的方法,将 WFF 初步滤波后的图像作为导向图,解决重调整困难和条纹信息丢失的问题。

## 1 融合加窗傅里叶滤波的联合双边滤波方法

双边滤波虽然能够保护边缘,但图像存在大噪声时,像素信息与噪声混叠,邻域由大量噪声和相位信息构成,根据 BF 的原理,像素值相似度内核无法区分有用信息和噪声<sup>[17]</sup>。在考虑中心像素点与邻近像素点的距离与像素相似度的前提下,高斯函数的调整不能在“保边”和“滤波”之间达到好的平衡,散斑干涉条纹可能会过度平滑或者滤波效果不佳。当像素点没有相似的邻域,高斯加权内核无法可靠地平滑邻域中的一组像素。更糟糕的是,像素值相似度内核会因为图像边缘跳变而产生偏差,从而发生梯度反转。在双边滤波中,这种梯度反转不可避免,无法通过调节参数而改善。

为了改善其权值稳定性,引入一个合适的引导图像,可以为双边滤波器提供更好的像素值相似度权值,从而去除更大噪声。WFF 虽然可以有效地滤波,但由于阈值和频带的设定主观,选择的阈值较大可能会过滤掉相对较小的相位信息频谱,而保留相对较大的噪声频谱系数,因而条纹明显细化,结构完整性相对原始条纹下降<sup>[18]</sup>。选择的阈值较小则可能会使滤波后的条纹不够平滑。将 WFF 和 BF 相结合,使用 WFF 滤波后的图像作为 BF 的

引导图像构造 JBF, 其定义为<sup>[19]</sup>:

$$JBF_p^s = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) \tilde{G}_{\sigma_r}(\|\tilde{f}_{WFF_p} - \tilde{f}_{WFF_q}\|) I_{WFF_q} \quad (1)$$

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_d}(\|p - q\|) \tilde{G}_{\sigma_r}(\|\tilde{f}_{WFF_p} - \tilde{f}_{WFF_q}\|) \quad (2)$$

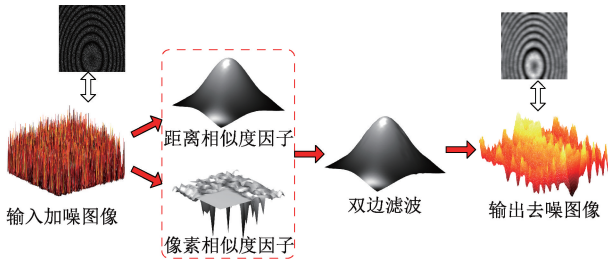
其中,  $W_p$  表示联合双边滤波中归一化因子,  $JBF_p^s$  为联合双边滤波后图像,  $G_{\sigma_d}$  是表示欧氏距离相似度的权重函数,  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  为引入 WFF 后得到的新的像素值相似度权重函数。  $p$  为待滤波图像中心点,  $S$  为中心像素  $p$  的邻域,  $q$  为邻域中的一个与  $p$  对应的像素点, 这里, 假设  $p$  坐标为  $(x, y)$ ,  $q$  坐标为  $(u, v)$ 。  $I_p$  和  $I_q$  分别为  $p$  和  $q$  像素点的灰度值。  $G_{\sigma_d}$  如式(3) 所示。

$$G_{\sigma_d}(\|p - q\|) = \exp\left(\frac{-[(x-u)^2 + (y-v)^2]}{2\sigma_d^2}\right) \quad (3)$$

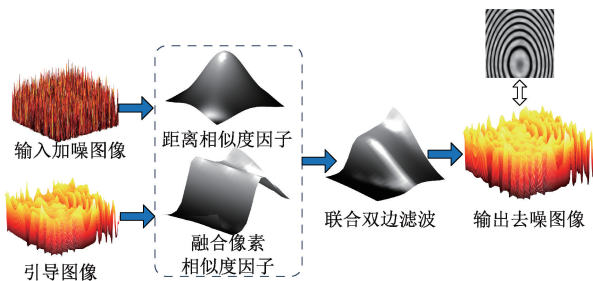
新的像素值相似度权重函数通过式(4) 计算:

$$\tilde{G}_{\sigma_r}(\|\tilde{f}_{WFF_p} - \tilde{f}_{WFF_q}\|) = \exp\left(\frac{-(I_{WFF_p} - I_{WFF_q})^2}{2\tilde{\sigma}_r^2}\right) \quad (4)$$

式中:  $\sigma_d$  和  $\tilde{\sigma}_r$  是基于高斯函数的标准偏差,  $\sigma_d$  用于调整对应像素欧氏距离权重,  $\tilde{\sigma}_r$  用于调整对应像素空间相似度权重。  $I_{WFF_p}$  和  $I_{WFF_q}$  分别为引入 WFF 图像中像素中心点  $p$  和邻域内像素点  $q$  的灰度值, 双边滤波中的像素灰度值  $I_p$  和  $I_q$  被  $I_{WFF_p}$  和  $I_{WFF_q}$  所代替。  $\tilde{\sigma}_r$  为新的像素值相似度权重因子。 原始双边滤波和融合引导图像的联合双边滤波原理如图1 所示。 通过调整  $\sigma_d$  和  $\tilde{\sigma}_r$  以及邻域  $S$  的大小可以调整图像边缘保持和滤波效果。



(a) 原始双边滤波原理  
(a) Principle of the original bilateral filtering



(b) 联合双边滤波原理  
(b) Principle of the joint bilateral filtering

图1 原始双边滤波和联合双边滤波原理对比

Fig. 1 Comparison of original bilateral filtering and joint bilateral filtering

## 2 构建自适应像素相似度因子

通常,  $\tilde{f}$  是一幅新的 WFF 图像, 这是 JBF 和 BF 的主要差异之一。 条纹图像经过 WFF 后, 大量噪声被过滤, 但此时的图像仍然存在噪声并且丢失掉了一部分条纹信息。 在处理条纹图像的边缘跳变区域时, 由于边缘邻域内的像素值变化大, 新的像素相似度函数  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  起主要作用, 可以提供更合适的像素值相似度高斯核权重。 且由于引入了 WFF 作为引导图像避免了滤波后的边缘像素值小于原始像素值, 以免出现梯度反转。 此外, JBF 不仅能和 WFF 组合应用, 还可以与其它滤波能力好的方法所结合。 在 JBF 中, 滤波效果主要取决于像素相似度函数  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  和距离相似度函数  $G_{\sigma_d}$ ,  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  在重要的像素跳变区域也就是条纹边缘和不平坦区域更是起主导作用,  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  由引导图所提供的信息所引导。 所以理论上引导图的质量越好 JBF 的滤波效果也就越好。

使用 JBF 处理每幅 ESPI 条纹时, 都必须先确定邻域  $S$  的半径, 像素欧氏距离权重因子  $\sigma_d$  以及新的像素值相似度权重因子  $\tilde{\sigma}_r$ 。 这些值通常由多次实验反复测试后设置, 一方面时间成本高, 另一方面参数设置主要依靠经验。 由分析知新的像素值相似度函数  $\tilde{G}_{\sigma_r}$  对 JBF 的滤波效果起主要作用, 因此引入结构相似度 (structural similarity index, SSIM) 作为评价指标来实现像素值相似度权重因子自适应。 SSIM 从亮度、对比度和结构三要素来计算图像的失真度, 越接近 1 说明失真度越小。 其中亮度、对比度和结构分别用待滤波图像中心点邻域内像素均值  $\mu_X, \mu_Y$ 、方差  $\sigma_X^2, \sigma_Y^2$  和协方差  $\sigma_{XY}$  表示<sup>[19]</sup>, 可得:

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}_r = SSIM(X, Y) \cdot \tilde{\sigma}_r(\max) \quad (6)$$

式中:  $SSIM$  为结构相似度, 取值为  $(0, 1]$ ;  $\mu_X, \mu_Y, \sigma_X^2, \sigma_Y^2, \sigma_{XY}$  表示图像  $X, Y$  的均值、方差、协方差;  $C_1, C_2$  为小的常量, 这里设为  $C_1 = C_2 = 0.05$ 。  $\tilde{\sigma}_r(\max)$  为参数  $\tilde{\sigma}_r$  能设置的最大值。  $\tilde{\sigma}_r$  为引入  $SSIM$  这一评价标准的自适应可靠像素值相似度因子使用  $\tilde{\sigma}_r$  代替  $\tilde{\sigma}_r$ 。

## 3 仿真研究及结果分析

在这一节中, 为了比较原始双边滤波, 加窗傅里叶滤波和融合加窗傅里叶滤波的联合双边滤波对电子散斑干涉条纹图的滤波效果, 我们分别模拟了高、中、低、可变 4 种密度的模拟条纹用以滤波。 为了使滤波效果贴近真实效果, 所模拟的条纹都添加了加性随机散斑噪声, 噪声与条纹结构随机混叠不易消除。 还模拟了 4 种密度条



纹做四步相移算法的四幅条纹和包裹相位,并对其通过条纹滤波后得到的包裹相位解相位。最后通过实验采集到的真实条纹验证所提出的算法的效果。图像降噪效果通常可以分为主观评价和客观评价方法。主观评价方法依靠人类视觉感知来衡量图像的质量,如:噪声去除效果,灰度平坦程度和图像结构的保持程度,如:边缘保持度,细节刻画等。客观评价方法则通过各种评价参数定性地评价图像质量。衡量图像的滤波效果要综合考虑主观和客观评价结果,以及噪声平滑效果和结构保存度。在本文中,分别通过主观和客观评价方法来评价条纹滤波效果。

### 3.1 模拟散斑条纹及相位

在电子散斑干涉中,采用典型的双光束法测物体面内位移时,物体变形前由成像器件所记录的光强为:

$$I_1 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_r - \phi_o) \quad (7)$$

对被测物体加载后,由于物体本身产生的微小形变使得光束光程差发生变化,从而使得产生干涉的物光和参考光产生了一个相对相位变化。因此物体变形后,成像器件所记录的光强为:

$$I_2 = I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos(\phi_r - \phi_o + \varphi) \quad (8)$$

将物体变形前后的散斑场光强分布相减即可得到散斑干涉条纹:

$$I_{sub} = |I_2 - I_1| = \left| 4\sqrt{I_o I_r} \sin\left(\phi_r - \phi_o + \frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right| \quad (9)$$

式中:  $\phi_r - \phi_o$ 、 $I_o$  和  $I_r$  是随机变量,其值分别在  $[-\pi, \pi]$ ,  $[0, I_m]$ , 和  $[0, \rho I_m]$  上均匀分布。其中,  $I_m$  为常数,  $\rho$  是归一化的可见度参数<sup>[20]</sup>。在本文中,设置  $I_m = 80$ ,  $\rho = 0.3$ 。

通过式(9)模拟出来的条纹其光强和相位分布最接近真实条纹,可以用来测试不同的滤波方法。高、中、低和可变密度条纹模拟公式如下所示,  $m$  和  $n$  是图像的高度和宽度,均设为 330 以获得  $330 \times 330$  尺寸的条纹,  $(i, j)$  为像素点坐标<sup>[21]</sup>。

$$\varphi(i, j) = 70 \times \exp\left(-\frac{(i - 0.5 \times m)^2 + (j - 0.5 \times n)^2}{9\,000}\right) \quad (10)$$

$$\varphi(i, j) = 50 \times \exp\left(-\frac{i^2}{90\,000} - \frac{3 \times (j - 0.5 \times m)^2}{200\,000}\right) + 100 \times \exp\left(-\frac{(i - n)^2}{90\,000} - \frac{3 \times (j - 0.5 \times m)^2}{200\,000}\right) \quad (11)$$

$$\varphi(i, j) = 25 \times \exp\left(-\frac{(i - 0.5 \times m)^2 + (j - 0.65 \times n)^2}{10\,000}\right) - \exp\left(-\frac{(i - 0.5 \times m)^2 + (j - 0.35 \times n)^2}{8\,000}\right) \quad (12)$$

$$\varphi(i, j) = 70 \times \exp\left(-\frac{(0.9 \times i - 0.5 \times m)^2}{16\,000} - \frac{(j - 0.25 \times m)^2}{6\,000}\right) + 40 \times \exp\left(-\frac{(i - 0.3 \times m)^2}{24\,000} - \frac{(j - 0.7 \times n)^2}{20\,000}\right) + 40 \times \exp\left(-\frac{(i - 1.2 \times m)^2 + (1.45 \times j - 0.65 \times n)^2}{12\,000}\right) \quad (13)$$

得到的高、中、低、可变密度模拟条纹分别如图 2(a)、(c)、(e)、(g) 所示,其未加噪条纹如图 2(b)、(d)、(f)、(h) 所示。

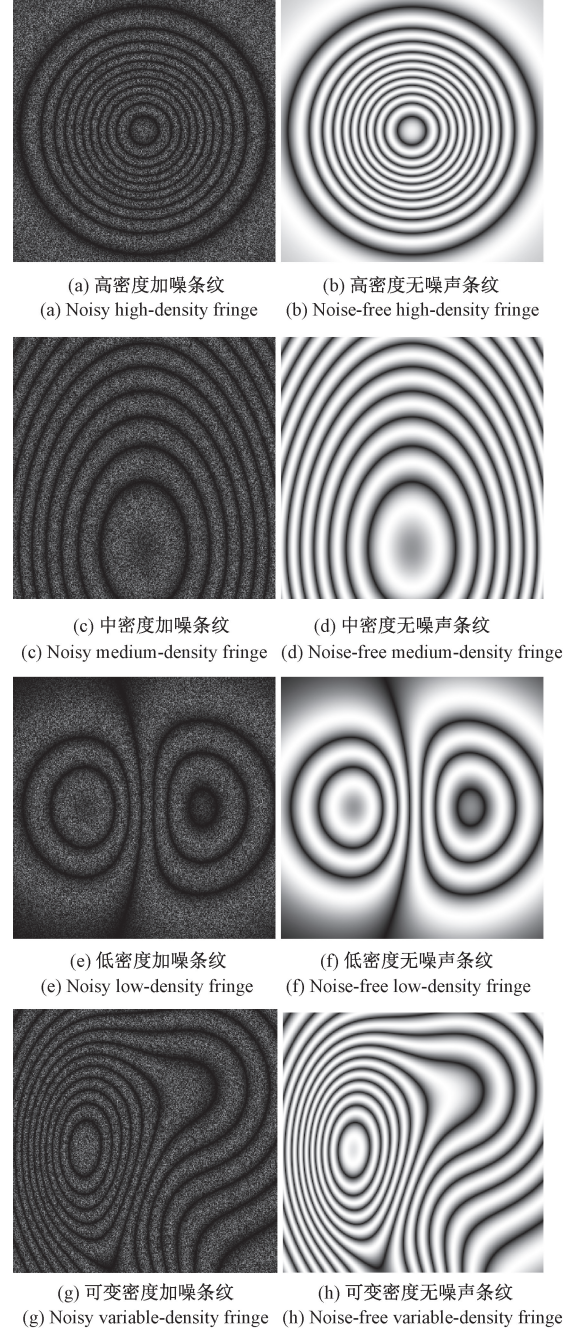


图 2 模拟加噪条纹和无噪声条纹

Fig. 2 Computer-simulated noisy and noiseless fringes



### 3.2 条纹滤波效果

采用模拟的高、中、低、可变密度条纹来测试 BF、WFF 和 JBF 的滤波效果。加噪声条纹被命名为 Noisy, 无噪声条纹命名为 Clean。将无噪声条纹作为 JBF 的引导图进行滤波, 可以得到理论上 JBF 的最佳滤波效果, 被命名为 Ideal。而在真实条纹的滤波中, 无噪声条纹不是先验可知的, 因此不可能达到理论 JBF 滤波效果, 这里只将其设为对照组用于证明引导图质量对 JBF 滤波效果的影响。因此共存

在 BF、WFF、JBF、Noisy、Clean、Ideal 6 组条纹图, 其中主要比较 BF、WFF 和 JBF 的滤波效果, Noisy、Clean、Ideal 作为对照组, 分别展示未滤波的效果、理想效果、JBF 理论最佳滤波效果。BF、JBF、WFF、Ideal 滤波后所得到的条纹图如图 3 所示, 所用参数如表 1 所示。WFF 的参数主要通过经验选取。JBF 所用导向图为对应 WFF 滤波后图像, 领域窗口大小  $w \times w$  决定了滤波速度和效果, 通常选取  $15 \times 15$ , 通常选取 15,  $\sigma_d$  决定条纹平滑程度, 通常选取 8。

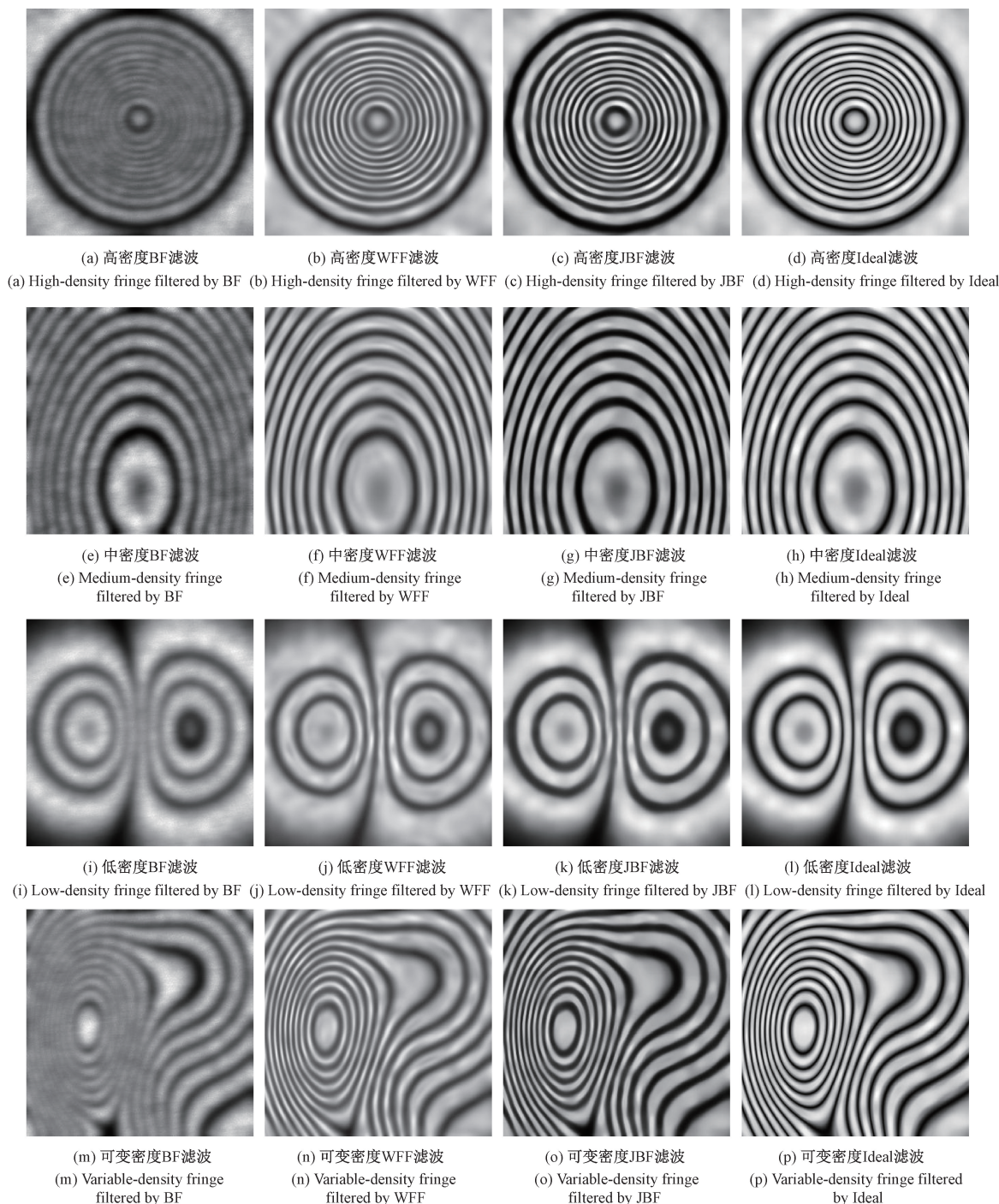


图 3 图 2 中加噪声条纹采用 3 种滤波方法结果  
Fig. 3 Filtered results of Fig. 2 by the three filters

表 1 图 3 滤波方法所用参数

Table 1 The parameters used in the filtering method of Fig. 3

| 滤波方法  | 高密度                                                                               | 中密度                                                                               | 低密度                                                                               | 可变密度                                                                              |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| BF    | $w = 15, \sigma_d = 8, \sigma_r = 0.1$<br>$\sigma_x = 10, \sigma_y = 10, Thr = 4$ | $w = 15, \sigma_d = 8, \sigma_r = 0.1$<br>$\sigma_x = 20, \sigma_y = 20, Thr = 3$ | $w = 15, \sigma_d = 8, \sigma_r = 0.2$<br>$\sigma_x = 10, \sigma_y = 10, Thr = 3$ | $w = 15, \sigma_d = 8, \sigma_r = 0.1$<br>$\sigma_x = 10, \sigma_y = 10, Thr = 3$ |
| WFF   | $\xi_l = -1, \xi_h = 1, \xi_i = 0.1$<br>$\eta_l = -1, \eta_h = 1, \eta_i = 0.1$   | $\xi_l = -1, \xi_h = 1, \xi_i = 0.05$<br>$\eta_l = -1, \eta_h = 1, \eta_i = 0.05$ | $\xi_l = -1, \xi_h = 1, \xi_i = 0.1$<br>$\eta_l = -1, \eta_h = 1, \eta_i = 0.1$   | $\xi_l = -1, \xi_h = 1, \xi_i = 0.1$<br>$\eta_l = -1, \eta_h = 1, \eta_i = 0.1$   |
| JBF   | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            |
| Ideal | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            | $w = 15, \sigma_d = 8$                                                            |

如图 3 所示,经过 BF 滤波的条纹图被高度模糊,条纹边缘没有得到很好的保护,而且仍残留大量噪声。经过 WFF 滤波的条纹图去除了一部分噪声,但跳变区域也被模糊,且滤波后的条纹不够平滑。经过 JBF 滤波后的条纹图其条纹边缘清晰可见,条纹级间对比度更高。条纹结构得到了很好的保存,并且滤波后的条纹相比 WFF

更平滑。经过 Ideal 滤波后的滤波效果最好,最接近无噪声条纹。反映滤波效果差异的中密度条纹剖面图如图 4 所示。WFF, BF 在波谷波峰皆存在明显分叉与无噪声条纹差别较大, JBF 其条纹剖面整体轮廓及细节更接近于无噪声条纹,而 Ideal 条纹剖面最接近。

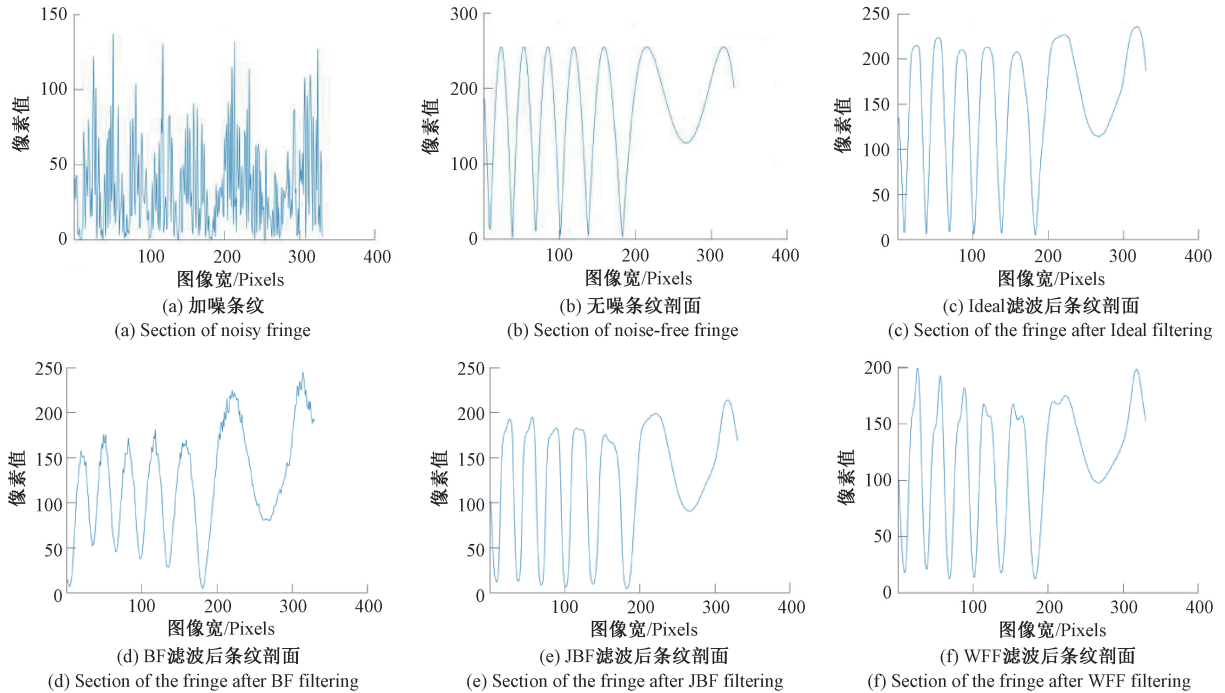


图 4 无噪声条纹、加噪条纹及其 3 种滤波方法结果剖面图

Fig. 4 The profile of noise-free fringe, noise-added fringe and corresponding three kinds of filter method results

通过 Hilditch 算法<sup>[22]</sup>提取滤波后条纹的骨架,如图 5 所示。条纹中 BF 滤波的条纹过度模糊,边缘及结构没有得到很好的保护,因此几乎没有提取出任何骨架;WFF 只提取出了部分骨架,且存在大量断裂和缺失;JBF 提取的骨架完整光滑,在密度比较高的条纹区域中这种情况更加明显。

为了进一步对比 BF、WFF、JBF 滤波效果,本文选用了峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR)<sup>[23]</sup>、

SSIM<sup>[24]</sup> 和边缘保持指数 (edge preservation index, EPI)<sup>[25]</sup> 3 种客观评价参数来对滤波后的条纹质量进行综合评价。PSNR 是一种基于像素点之间误差的评价参数,反映了图像细节信息的保持能力,其值越大表示图像细节保护的越好,定义为式 (14)。SSIM 反映保真度,其值越接近于 1 说明保真度越好,定义为式 (5)。在 PSNR 和 SSIM 中,都是将滤波后的条纹图像与无噪声条纹图像相比较。EPI 可以评价图像的边缘保持能力,其值越接



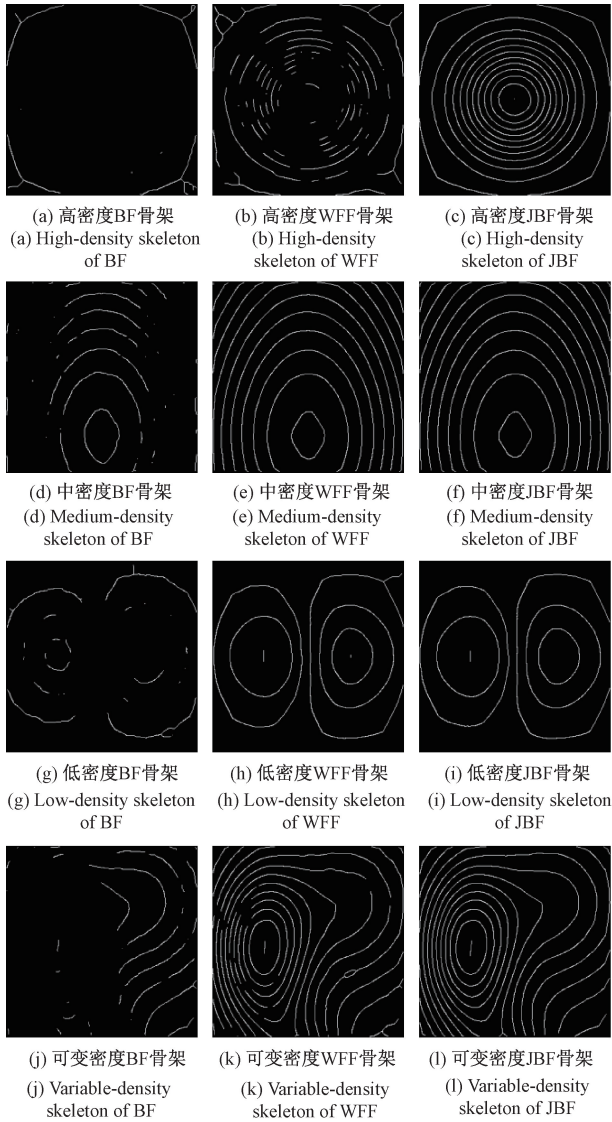


图 5 从图 3 条纹中提取的骨架

Fig. 5 Skeletons of filtered results of Fig. 3

近于 1, 说明条纹边缘结构保护得越好, 定义为式 (15)。

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I_0(i,j)]^2} \quad (14)$$

其中,  $I_0(i,j)$  和  $I(i,j)$  分别是条纹图滤波前后图像的灰度值。M、N 为图像行数和列数。

$$EPI =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|p_s(i,j) - p_s(i+1,j)| + |p_s(i,j) - p_s(i,j+1)|)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|p_o(i,j) - p_o(i+1,j)| + |p_o(i,j) - p_o(i,j+1)|)} \quad (15)$$

式中:  $p_s$  代表滤波后的条纹图像;  $p_o$  表示无噪声条纹。

采用 BF、WFF、JBF 3 种滤波方法对加噪条纹进行降噪, 分别计算高、中、低、可变密度 4 种密度条纹的 PSNR、SSIM、EPI。如表 2 所示, 高、中、低、可变密度条纹采用 JBF 滤波后 PSNR 值比 WFF 滤波分别高出 2.903 5、1.546 8、4.232 5、1.049 9 dB; JBF 滤波后的 SSIM 和 EPI 值高于 WFF 滤波和 BF 滤波。采用 JBF 滤波的 4 种密度条纹评价参数都是最好的, 这与主观视觉感受所一致。说明 JBF 滤波后的条纹图细节刻画能力、边缘保护能力、结构完整度都优于 BF 和 WFF 滤波。Ideal 作为 JBF 理论最佳滤波效果主观感受滤波效果最好, 其客观评价参数也与主观感知一致, 提供了最优秀的评价参数。

### 3.3 相位滤波效果

时间相移算法是目前精度较高的相位提取方法, 而在时间相移算法中最常用的方法是四步相移算法<sup>[26]</sup>。为进一步比较 BF、WFF、JBF 在相位上的滤波效果, 分别模拟 4 种密度条纹的四步相移加噪条纹和参考相位, 相移量分别为  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。由于篇幅所限, 这节只展示了高密度条纹。其中高密度模拟的四步相移条纹和参考相位如图 6 所示。

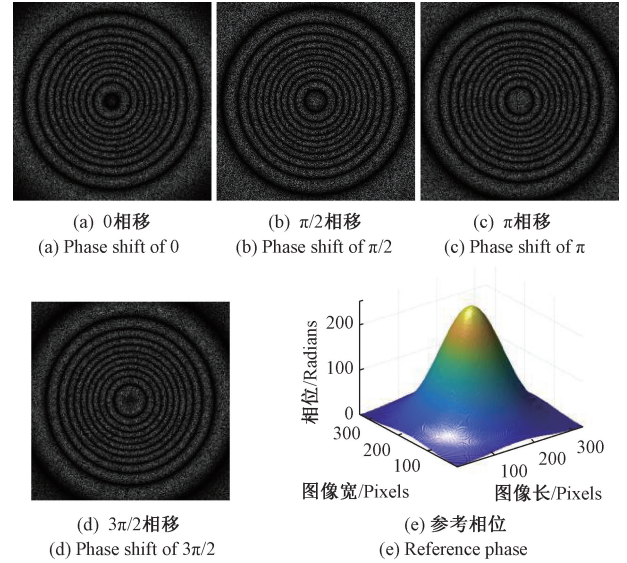


图 6 模拟四步相移条纹和参考相位图

Fig. 6 Simulated four-step phase shift fringe and reference phase

分别使用 BF、WFF、JBF 对 4 幅条纹滤波, 滤波后的 4 幅条纹采用如式所示的四步相移法得到包裹相位:

$$\varphi(x,y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (16)$$

式中:  $I_1, I_2, I_3, I_4$  为图中四幅相移量分别为  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  的条纹,  $\varphi(x,y)$  为包裹相位。采用逐行逐列解相位法解包裹, 这种相位解包裹的方法将相邻像素差值与阈值相比, 并根据比较结果对包裹相位相加 (或减)  $2\pi$  的整数倍, 从而得到相位值连续的解包裹相位。如果包裹



表 2 图 3 滤波后图像评价参数  
Table 2 Evaluation parameters of filtered Fig. 3

| 条纹密度 | 评价参数    | BF       | WFF      | JBF             | Ideal    | Noisy   |
|------|---------|----------|----------|-----------------|----------|---------|
| 高密度  | PSNR/dB | 9.641 0  | 11.908 9 | <b>14.812 4</b> | 21.698 5 | 4.490 5 |
|      | SSIM    | 0.287 5  | 0.727 1  | <b>0.824 2</b>  | 0.949 3  | 0.096 8 |
|      | EPI     | 0.276 7  | 0.578 3  | <b>0.699 0</b>  | 0.866 3  | —       |
| 中密度  | PSNR/dB | 10.162 2 | 12.741 4 | <b>14.288 2</b> | 21.140 5 | 4.636 1 |
|      | SSIM    | 0.417 1  | 0.784 8  | <b>0.791 8</b>  | 0.933 3  | 0.095 1 |
|      | EPI     | 0.429 6  | 0.668 4  | <b>0.730 0</b>  | 0.868 3  | —       |
| 低密度  | PSNR/dB | 15.519 3 | 16.002 4 | <b>20.234 9</b> | 24.511 3 | 4.858 2 |
|      | SSIM    | 0.661 9  | 0.782 4  | <b>0.831 9</b>  | 0.910 1  | 0.075 4 |
|      | EPI     | 0.599 0  | 0.629 5  | <b>0.658 2</b>  | 0.806 3  | —       |
| 可变密度 | PSNR/dB | 11.085 4 | 12.791 2 | <b>13.841 1</b> | 21.006 2 | 4.730 6 |
|      | SSIM    | 0.313 8  | 0.755 9  | <b>0.787 1</b>  | 0.939 4  | 0.103 5 |
|      | EPI     | 0.269 2  | 0.563 2  | <b>0.616 2</b>  | 0.854 5  | —       |

相位存在大量噪声或者丢失相位信息,逐行逐列解相位法就很容易引起拉丝等现象,因此采用该法非常考验相位图的滤波效果。分别展开 BF、WFF、JBF 滤波得到的包裹相位,如图 7 所示。从图中可以看出,通过 BF 方法滤

波的相位解包裹失败,而 JBF 展开相位比 WFF 更光滑, Ideal 展开相位最接近于参考相位。解包裹相位剖面图同样可以验证这一点。将不同滤波方法得到的解包裹相位与参考相位相比较得到相位误差,如图 7 所示。

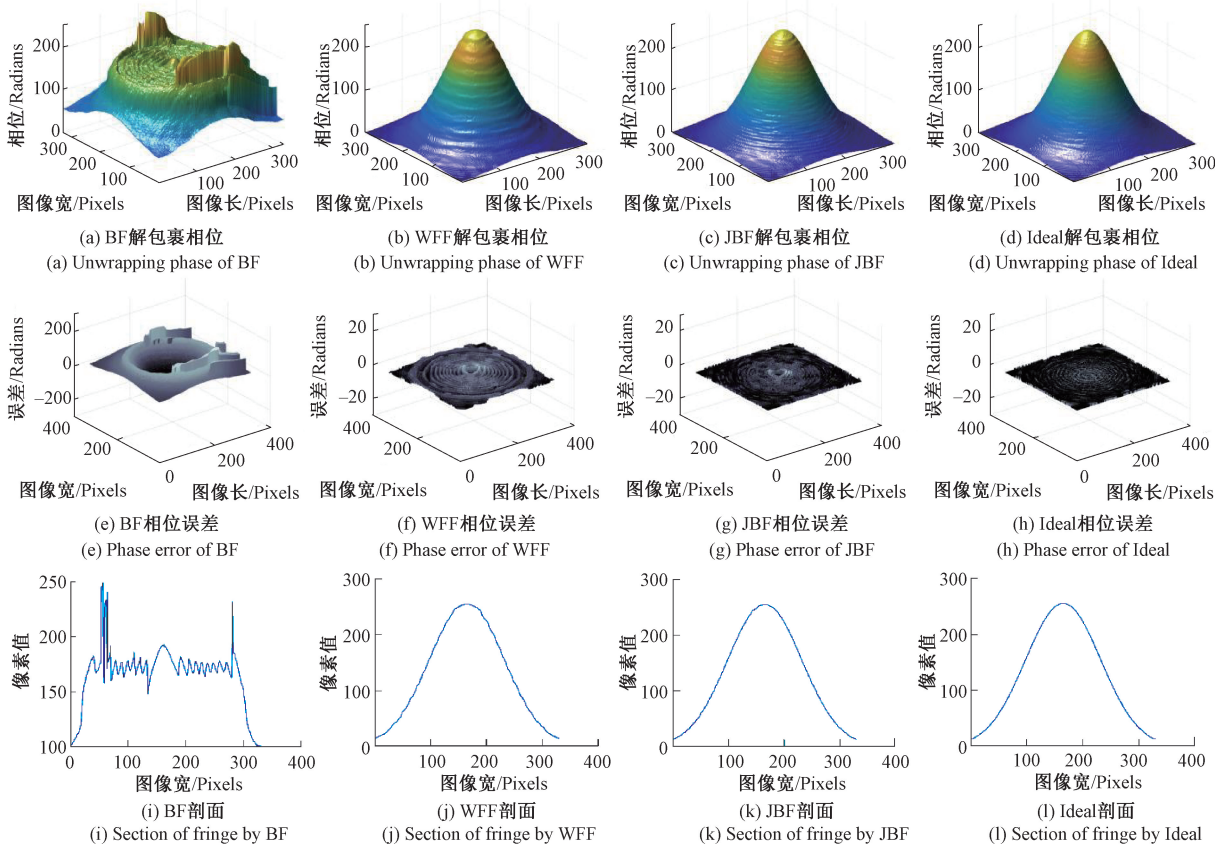


图 7 高密度条纹经 3 种滤波方法后展开得到的相位图及相位误差  
Fig. 7 Phase image and phase error of high-density fringe by the three filters

为量化 JBF 的相位滤波效果,采用均方误差(mean square error, MSE)来计算相位误差<sup>[27]</sup>:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [u(i,j) - I(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j)]^2} \quad (17)$$

式中:  $I(i,j)$  为参考相位图,  $u(i,j)$  为滤波后展开相位图,  $M$ 、 $N$  为图像行数和列数。滤波后相位图 MSE 值如表 3 所示。从表 3 中可以看出, JBF 滤波后相位图 MSE 值小于 WFF, 且远远小于 BF, 这说明通过 JBF 滤波后解得的相位是 3 种滤波方法中最接近参考相位的。而 Ideal 的 MSE 值最小, 说明 JBF 的理论相位滤波效果很好, 与参考相位的误差非常小。且 JBF 对单幅条纹滤波所需时间是最短的, 这说明针对滤波效果重新进行调整参数时, JBF 比 WFF 要快得多。

表 3 图 7 解包裹相位误差和计算时间

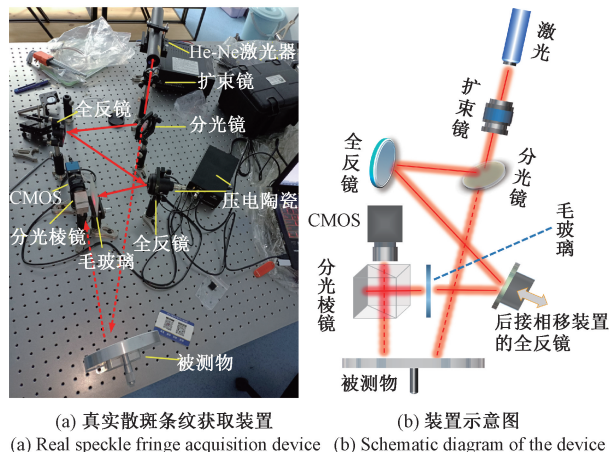
Table 3 Phase error and computational time of Fig. 7

| 条纹密度 | 方法         | MSE                                      | 计算时间/s     |
|------|------------|------------------------------------------|------------|
| 高密度  | BF         | $8.83 \times 10^{-6}$                    | 5          |
|      | WFF        | $3.34 \times 10^{-9}$                    | 20         |
|      | <b>JBF</b> | <b><math>6.39 \times 10^{-10}</math></b> | <b>4</b>   |
|      | Ideal      | $2.39 \times 10^{-10}$                   | 3.9        |
| 中密度  | BF         | $4.27 \times 10^{-7}$                    | 6          |
|      | WFF        | $1.21 \times 10^{-9}$                    | 21         |
|      | <b>JBF</b> | <b><math>7.72 \times 10^{-10}</math></b> | <b>4</b>   |
|      | Ideal      | $2.80 \times 10^{-10}$                   | 3.8        |
| 低密度  | BF         | $1.38 \times 10^{-6}$                    | 6          |
|      | WFF        | $3.60 \times 10^{-7}$                    | 21         |
|      | <b>JBF</b> | <b><math>1.35 \times 10^{-9}</math></b>  | <b>4</b>   |
|      | Ideal      | $8.70 \times 10^{-10}$                   | 4.1        |
| 可变密度 | BF         | $2.21 \times 10^{-6}$                    | 6          |
|      | WFF        | $2.09 \times 10^{-6}$                    | 20         |
|      | <b>JBF</b> | <b><math>8.17 \times 10^{-10}</math></b> | <b>3.6</b> |
|      | Ideal      | $2.44 \times 10^{-10}$                   | 3.7        |

## 4 实验研究及结果分析

将 BF、WFF、JBF 3 种滤波方法运用到实验获得的真实散斑条纹以对比滤波效果。实验装置如图 8 所示, 激光发出的光束先通过准直扩束镜扩束, 再通过分光镜分为物光和参考光。虚线代表物光, 实线代表参考光。参考光经过两个全反镜反射后垂直入射毛玻璃, 物光直射到被测圆盘, 被测物表面散射的物光和参考光通过分光

棱镜产生干涉。所采用的铝制圆盘试件直径为 130 mm, 周边固支, 通过调节圆盘背面中心的精密螺栓对圆盘加载。由于振动, 杂散光散射以及模拟传输噪声等影响, 实验采集的 ESPI 条纹普遍存在噪声。

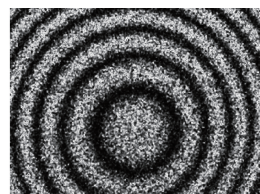


(a) 真实散斑条纹获取装置 (b) 装置示意图  
(a) Real speckle fringe acquisition device (b) Schematic diagram of the device

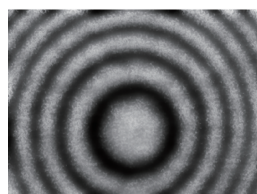
图 8 ESPI 条纹获取实验装置

Fig. 8 ESPI fringe acquisition experimental device

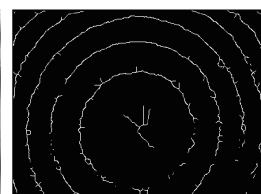
通过实验装置采集到的散斑条纹如图 9、10 所示, 并给出了不同滤波方法的结果和对应的条纹骨架。可以看出, JBF 滤波后的条纹图在噪声去除和边缘保持方面都好于其它滤波方法。比较明显的是, 在滤波条纹中心条纹处, JBF 滤波后的条纹光滑度, 对比度, 边缘结构明显



(a) 真实高对比度条纹  
(a) Real high-contrast fringes



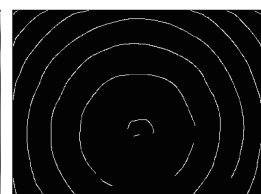
(b) BF 滤波图像  
(b) Filtered image by BF



(c) BF 提取高对比度条纹骨架  
(c) High-contrast fringe skeleton of BF



(d) WFF 滤波图像  
(d) Filtered image by WFF



(e) WFF 提取高对比度条纹骨架  
(e) High-contrast fringe skeleton of WFF



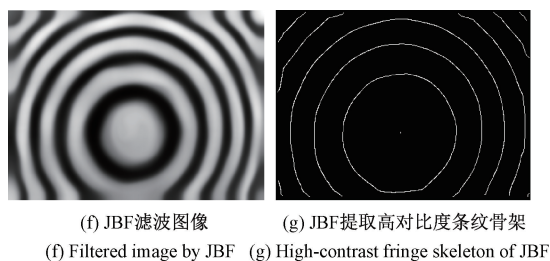


图 9 高对比度真实条纹滤波效果对比

Fig. 9 Comparison of the effects of different filtering methods for high-contrast real fringes

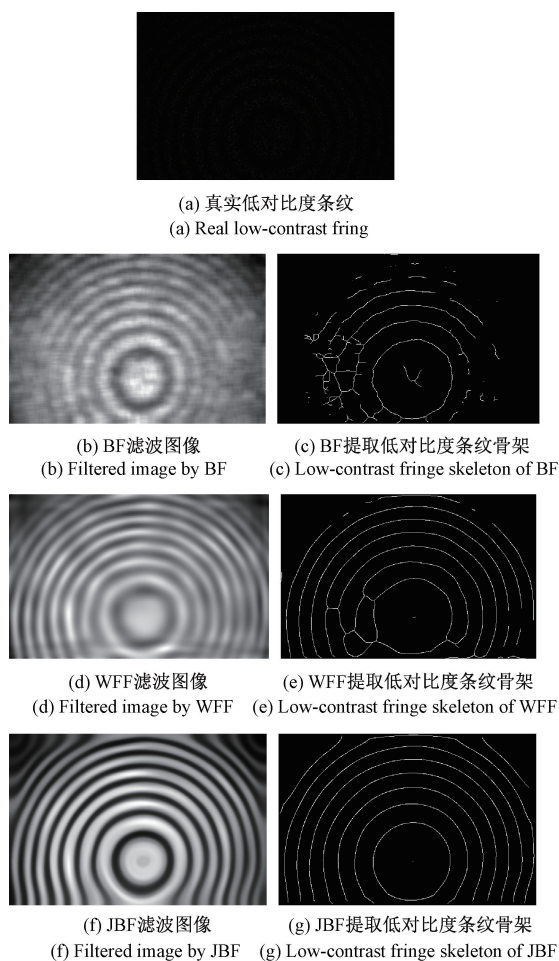


图 10 低对比度真实条纹滤波效果对比

Fig. 10 Comparison of the effects of different filtering methods for low-contrast real fringes

好于 BF 和 WFF, BF 中仍残留大量噪点, WFF 中仍有类似于网格状的不光滑区域。此外,从图中所提取的骨架线所示, BF 滤波结果中提取的骨架线含有许多分支和断裂, WFF 滤波结果中提取的骨架线存在缺失, 只有 JBF 滤波结果中提取出了完整的骨架线。

从模拟条纹滤波后图像观感对比、条纹剖面对比、骨架线提取、多个图像评价参数对比和模拟相位滤波后相位图观感对比、相位误差图、相位剖面对比、相位误差量化参数对比等实验结果, 可以得出:

1) 针对大噪声条纹图像, 双边滤波不能有效地去除噪声且会使图像高度模糊从而失去条纹的边缘。

2) 加窗傅里叶滤波效果好于双边滤波, 但仍存在部分噪声且丢失了部分相位信息, 模糊了条纹边缘。

3) 通过联合双边滤波的条纹光滑, 边缘清晰, 对比度好, 结构完整性最为接近于无噪声条纹, 滤波后条纹均提取出了完整且光滑的条纹骨架。且重调整时间少于加窗傅里叶滤波。

## 5 结 论

我们提出了融合加窗傅里叶滤波的联合双边滤波, 该方法基于一个自适应可靠像素相似度因子, 用于对不同密度的 ESPI 条纹进行滤波。与现有的双边滤波方法相比, 该方法的主要优势在于它能够有效地去除高噪声条纹里的噪声。此外, 该法结合了双边滤波保护边缘, 加窗傅里叶滤波能力强的优点, 同时解决了: 双边滤波无法有效去除大噪声; 加窗傅里叶滤波丢失有用相位信息使得条纹结构细化; 参数依靠经验选取而重调整时间过长。所提出的方法在高、中、低、可变密度 ESPI 条纹上应用后都可得到更光滑, 边缘细节更完整的滤波条纹。通过本文方法滤波的模拟条纹和真实条纹都成功提取出清晰且完整的条纹骨架线, 而加窗傅里叶滤波存在断裂, 双边滤波存在缺失和粘连。此外, 针对实验所用的不同密度模拟条纹, 本文方法比加窗傅里叶的 PSNR 值分别高出 2.903 5、1.546 8、4.232 5、1.049 9 dB; PSNR、SSIM 和 EPI 值均高于双边滤波和加窗傅里叶滤波。说明该滤波方法图像细节和结构保护能力、保真度都好于对比方法。

## 参考文献

- [1] 王永红, 吕有斌, 高新亚, 等. 剪切散斑干涉技术及应用研究进展 [J]. 中国光学, 2017, 10(3): 300-309.  
WANG Y H, LYU Y B, GAO X Y, et al. Research progress in shear speckle interferometry and its application [J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 300-309.
- [2] 钟诗民, 孙方圆, 陈维杰, 等. 马赫曾德双成像的镜面材料内部缺陷检测系统 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 25-32.  
ZHONG SH M, SUN F Y, CHEN W J, et al. Internal defect detection of material with specular using double

- imaging Mach-Zehnder system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(8): 25-32.
- [3] GOODMAN J W. 光学中的散斑现象: 理论与应用 [M]. 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- GOODMAN J W. Speckle phenomenon in optics: Theory and application [M]. CAO Q ZH, CHEN J B, Transl. Beijing: Science Press, 2009.
- [4] 孙流星, 于瀛洁, 周文静. 颜色分光电子散斑干涉瞬态三维变形测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(3): 656-663.
- SUN L X, YU Y J, ZHOU W J. Transient 3D deformation measurement method with color splitting based on ESPI [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(3): 656-663.
- [5] 袁腾飞, 吴思进, 李伟仙, 等. 数字散斑干涉面内变形内窥测量方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7): 93-98.
- YUAN T F, WU S J, LI W X, et al. Research on method of endoscopic measurement of in-plane deformation using digital speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7): 93-98.
- [6] AEBISCHER H A, WALDNER S. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Optics Communications*, 1999, 162(4): 205-210.
- [7] 顾国庆, 王开福, 燕新九. 基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理 [J]. *激光技术*, 2010, 34(6): 750-752, 797.
- GU G Q, WANG K F, YAN X J. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 750-752, 797.
- [8] JIA D, ZHANG Y, LI S, et al. Combined denoising filter for fringe pattern in electronic speckle shearing pattern interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(4): 043105.
- [9] WANG H, KEMAO Q, GAO W, et al. Fringe pattern denoising using coherence-enhancing diffusion [J]. *Optics letters*, 2009, 34(8): 1141-1143.
- [10] ZHU X, TANG C, REN H, et al. Image decomposition model BL-Hilbert-L 2 for dynamic thermal measurements of the printed circuit board with a chip by ESPI [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 63(6): 125-131.
- [11] YAN K, YU Y, HUANG C, et al. Fringe pattern denoising based on deep learning [J]. *Optics Communications*, 2018, 437(1): 148-152.
- [12] QIAN K. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [13] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. 6th International Conference on Computer Vision, IEEE, 1998: 839-846.
- [14] KOPF J, COHEN M F, LISCHINSKI D, et al. Joint bilateral upsampling [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2007, 26(3): 96-es.
- [15] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-409.
- [16] KEMAO Q. On window size selection in the windowed Fourier ridges algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 45(12): 1186-1192.
- [17] 任芬. 基于联合双边滤波的图像去噪与融合方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- REN F. Research on image denoising and fusion based on joint bilateral filtering [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [18] KEMAO Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 45(2): 304-317.
- [19] 王得成, 陈向宁, 易辉, 等. 基于自适应联合双边滤波的深度图像空洞填充与优化算法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 294-301.
- WANG D CH, CHEN X N, YI H, et al. Depth image hole filling and optimization algorithm based on adaptive joint bilateral filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 294-301.
- [20] DCHOA N A, SANTOYO F M, MOORE A J, et al. Contrast enhancement of electronic speckle pattern interferometry addition fringes [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(13): 2783-2787.
- [21] XU W J, TANG C, SU Y G, et al. Image decomposition model Shearlet-Hilbert-L-2 with better performance for denoising in ESPI fringe patterns [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(4): 861-871.
- [22] NACCACHE N J, SHINGHAL R. An investigation into the skeletonization approach of Hilditch [J]. *Pattern Recognition*, 1984, 17(3): 279-284.
- [23] 贾大功, 马彩缤, 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): 72-77.

JIA D G, MA C B, WU L Q, et al. Electronic speckle pattern filtering method based on improved spin filtering [J]. Acta optica Sinica, 2012, 32 (3): 72-77.

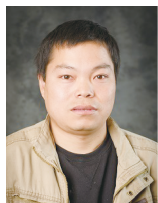
[24] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

[25] JOSEPH J, PERIYASAMY R. An image driven bilateral filter with adaptive range and spatial parameters for denoising magnetic resonance images [J]. Computers and Electrical Engineering, 2018, 69(1): 782-795.

[26] WANG C, ZHANG X Z, JIANG J F, et al. A demodulation method of spatial domain for low-coherence interferometry with high accuracy and adaptability [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-11.

[27] TOUNSI Y, KUMAR M, NASSIM A, et al. Speckle noise reduction in digital speckle pattern interferometric fringes by nonlocal means and its related adaptive kernel-based methods [J]. Appl Opt, 2018, 57 (27): 7681-7690.

## 作者简介



王会峰, 1999 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2009 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为长安大学电子与控制工程学院教授。主要研究方向为智能测控及嵌入式系统应用、机器视觉与图像处理、智能感知与精密测量等。

E-mail: hfwang@chd.edu.cn

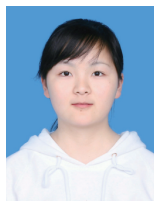
**Wang Huifeng**, received his B.Sc. degree in 1999 and Ph.D. degree in 2009 both from Xidian University. Now, he is a professor in the School of Electronic Control at Chang'an University. His main research interests include intelligent measurement and control and embedded system applications, machine vision and image processing, intelligent perception and precision measurement, etc.



何柱材 (通信作者), 2019 年于南阳理工学院获得学士学位, 现为长安大学硕士研究生。主要研究方向为电子散斑干涉术。

E-mail: hezhucui123@foxmail.com

**He Zhucui** (Corresponding author), received his B.Sc. degree in 2019 from Nanyang Institute of Technology. He is currently a master student at Chang'an University. His main research interest includes electronic speckle pattern interferometry.



李云梦, 2019 年毕业于河南理工大学, 现为长安大学硕士研究生。目前研究方向为三维测量与重构。

E-mail: 740665343@qq.com

**Li Yunmeng** received her B.Sc. degree in 2019 from Henan Polytechnic University. She is currently a master student at Chang'an University. Her main research interest includes 3D measurement and reconstruction.



黄鹤, 2002 年、2006 年、2010 年于西北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位, 现为长安大学电控学院副教授。主要研究方向为人工智能与信息融合、无人车感知等。

E-mail: huanghe@chd.edu.cn

**Huang He** received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Northwestern Polytechnical University in 2002, 2006 and 2010. Now, he is an associate professor in the School of Electronic Control at Chang'an University. His main research interests include artificial intelligence and information fusion, unmanned vehicle perception, etc.



高荣, 2010 年、2014 年于长安大学分别获得学士、硕士学位, 主要研究方向为深度学习。

E-mail: gr@chd.edu.cn

**Gao Rong** received his B.Sc. degree and M.Sc. degree from Chang'an University in 2010 and 2014. His main research interest includes deep learning.