

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104497

# 散斑干涉条纹 Kaiser-Hamming 窗口 傅里叶快速滤波方法\*

王会峰<sup>1,2</sup> 何柱材<sup>1</sup> 李云梦<sup>1</sup> 李晋康<sup>1</sup> 王鹏雁<sup>1</sup> 郝婷<sup>1</sup> 黄鹤<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学电子与控制工程学院 西安 710064; 2. 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心 西安 710064)

**摘要:**针对加窗傅里叶滤波(WFF)对电子散斑干涉条纹滤波时间长的局限性,提出了一种基于二维 Kaiser-Hamming 窗口的傅里叶快速滤波法(KH-WFF)。首先,将 Kaiser 窗和 Hamming 窗组合,设计了二维 Kaiser-Hamming 窗口,然后将 WFF 中的 Gaussian 窗口替换为二维 Kaiser-Hamming 窗,去掉多余的非正交基函数从而减少时间复杂度。把 KH-WFF 和 WFF 应用到模拟条纹和真实条纹,结果表明滤波后的条纹光滑度,细节保护程度和保真度相差不大,都成功得到了连续性好解包裹相位,而 KH-WFF 对实际应用环境下采集到的一副条纹的滤波速度是 WFF 的 12 倍。最后分析不同图像尺寸、窗口大小和频带宽下 KH-WFF 和 WFF 的执行速度,证明 KH-WFF 的时间复杂度更低。实验证明提出的方法在减少执行时间的同时也提供了几乎相同的滤波效果。

**关键词:** 电子散斑干涉测量法;加窗傅里叶滤波;二维 Kaiser-Hamming 窗口;条纹去噪;相位解包裹;滤波速度

**中图分类号:** TN247;TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Faster Fourier filtering based on Kaiser-Hamming window for fringe of electronic speckle pattern interferometry

Wang Huifeng<sup>1,2</sup> He Zhucui<sup>1</sup> Li Yunmeng<sup>1</sup> Li Jingeng<sup>1</sup> Wang Pengyan<sup>1</sup> Hao Ting<sup>1</sup> Huang He<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Road Traffic Intelligent Detection and Equipment Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the long runtime of windowed Fourier filtering (WFF) in the filtering of fringes of electronic speckle pattern interferometry, a faster Fourier filtering method based on a two-dimensional Kaiser-Hamming window (KH-WFF) is proposed. First, the Kaiser window and Hamming window are combined to design a two-dimensional Kaiser-Hamming window, and then the Gaussian window in WFF is replaced with the two-dimensional Kaiser-Hamming window. The time complexity is reduced due to the removal of redundant non-orthogonal basis functions. KH-WFF and WFF are applied to the simulated fringe and the experimental fringe, and the results show that the smoothness, detail protection, and fidelity of the filtered fringe are not much different. Moreover, both methods have obtained the unwrapping phase with good continuity, while the filtering speed of KH-WFF for a fringe in practical application is 12 times that of WFF. Finally, the time complexity analysis of KH-WFF and WFF under different image sizes, window sizes, and bandwidths proves that KH-WFF is faster. Experiments prove that the proposed method provides almost the same result while reducing the execution time.

**Keywords:** electronic speckle pattern interferometry; windowed Fourier filtering; two-dimensional Kaiser-Hamming window; fringe denoising; phase unwrapping; filtering speed

## 0 引言

电子散斑干涉技术 (electronic speckle pattern

interferometry, ESPI) 是一种起源于 20 世纪 60 年代末的光学计量技术,随着数字图像处理技术和工业器件如 CCD、CMOS 和激光器等的迅速发展,电子散斑干涉术的操作性和应用性都得到了加强。ESPI 具有无损检测、实

收稿日期: 2021-07-05 Received Date: 2021-07-05

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52172324)、“十三五”国家重点研发计划项目(SQ2018YFB16003105)、“十三五”装备预研基金项目(61403120105)资助

时性、高精度、测量范围广等特点,因而被广泛用于应变、三维形变、粗糙度、离面和面内位移测量和无损检测领域<sup>[1-4]</sup>,如今汽车轮胎、航天工业、土木工程、机械制造、复合材料及生物医学等行业都有 ESPI 测量设备和技术的广泛应用。

ESPI 通过图像采集设备采集被测物体表面的散斑场,通过处理获得变形前后的 ESPI 图像。由于采集环境普遍存在振动、散射光噪声及器件采集噪声,因而 ESPI 条纹会存在大量的散斑噪声。当大量的噪声与所需要提取的有用相位信息相互渗透时,很容易破坏 ESPI 条纹的周期性。从而导致解包裹操作失败得到不连续的相位图,进而影响后续对被测物体的分析。因此,条纹滤波操作是 ESPI 的关键技术之一,与 ESPI 的精度和准确性直接相关。

ESPI 滤波技术主要可以分为两大类:空域和频域滤波。空域滤波对图像像素直接进行操作,执行速度快,但在去除条纹噪声的同时也造成大量有用信息的丢失。传统的空域滤波有:均值滤波和中值滤波等,这类方法应用在 ESPI 滤波上常常会造成严重的图片模糊并且也不能有效去除散斑噪声。频域滤波将图像由空域转换到频域,再通过选择最优截止频率的方式去除噪声频率成分,这种方式可以更好地保存图像细节。但频域转换和复数计算的引入也增加了计算机执行相应算法的计算量,即时间复杂度更高。在传统滤波的基础上,相关学者针对 ESPI 滤波提出了大量滤波算法。如贾大功等<sup>[5]</sup>提出了一种基于模糊方向的旋滤波,比传统旋滤波的效果好。Tang 等<sup>[6]</sup>和 Xu 等<sup>[7]</sup>根据图像变分解模型采用偏微分方程对 ESPI 条纹进行滤波,对密度变换大的散斑条纹滤波效果更好。钱晓凡等<sup>[8]</sup>通过引入横向剪切的方式将散斑条纹噪声分离出来。此外相干增强扩散<sup>[9]</sup>、深度神经网络滤波<sup>[10]</sup>及高斯卷积滤波<sup>[11]</sup>等去噪算法也得到运用。传统的傅里叶滤波通过全局变换对图像频域进行滤波,针对相位突变和欠采样的 ESPI 条纹效果并不好,Kemao 等<sup>[12-14]</sup>通过加窗的方式提出加窗傅里叶用于 ESPI 滤波,通过加窗后的傅里叶变换滤波可以防止频谱泄露并且转换为局部频域处理。

加窗傅里叶滤波(windowed Fourier filter, WFF)由于窗函数的存在使得频谱不再无限扩张,局部时间范围内处理条纹特征的方式使得其对 ESPI 条纹有较好的效果<sup>[15-17]</sup>。WFF 采用了非正交的高斯窗函数增加了计算量,并且存在通带、窗口尺寸及阈值 9 个参数需要调整。针对当前高分辨率的散斑图像,WFF 实时性不高,且由于参数都需要估计,重调整后再进行滤波的时间代价很大。由此,Gao 等<sup>[18]</sup>提出使用多核 CPU 并行计算来加快 ESPI 条纹滤波处理,Gao 等<sup>[19]</sup>则通过 GPU 实现了每秒 4 帧的 256×256 尺寸 ESPI 条纹计算。这些方法都是基于

硬件基础实现对 WFF 方法的提速,并没有从原理上对 WFF 做出根本的改进,因此具有局限性。本文通过分析二维窗口函数,提出一种使用 Kaiser-Hamming 窗口的加窗傅里叶快速滤波方法(Kaiser-Hamming window Fourier filter, KH-WFF),从原理上减少了 WFF 的时间复杂度。

## 1 Kaiser-Hamming 窗口傅里叶快速滤波理论

在 ESPI 中,通常采取对被测物体加载的方式获取物体表面变形前后的散斑图像,通过相加、相减或相关处理得到 ESPI 条纹。ESPI 条纹的光强图像可以表示为<sup>[20]</sup>:

$$f(x, y) = P(x, y) + Q(x, y) \cos \varphi(x, y) + N(x, y) \quad (1)$$

其中,  $P(x, y)$  为背景光强;  $Q(x, y)$  为条纹幅值;  $\varphi(x, y)$  为相位场,  $N(x, y)$  为加性随机噪声。

ESPI 条纹图的二维加窗傅里叶变换(windowed Fourier transform, WFT)可以表示为<sup>[12-14, 21]</sup>:

$$Sf(u, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) W_{u, \omega}^*(t) dt \quad (2)$$

逆变换(IWFT)可以表示为:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Sf(u, \omega) W_{u, \omega}(t) d\omega du \quad (3)$$

其中,  $u$  是图像进行 WFT 的位置信息,  $W_{u, \omega}$  是内核半径为  $r$  的高斯窗函数。

$$W_{u, \omega}(t) = W(t - u) e^{j\omega t} \quad (4)$$

$e^{j\omega t}$  为傅里叶变换基,  $W_{u, \omega}^*(t)$  是  $W_{u, \omega}(t)$  的复共轭,  $W$  可以表示为:

$$\begin{cases} W(t) = 0, t \notin [-r, r] \\ \int_{-\infty}^{\infty} W^2(t) dt = 1 \end{cases} \quad (5)$$

由式(2)~(5)可以得到:

$$Sf(u, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (f(t) e^{-j\omega t}) W(t - u) dt \quad (6)$$

即可表达为卷积形式如下。

$$Sf(u, \omega) = (f_{\omega} \otimes W)(u) \quad (7)$$

其中,

$$f_{\omega}(t) = f(t) e^{-j\omega t} \quad (8)$$

同样可以得到:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (Sf_{\omega} \otimes W)(t) e^{j\omega t} d\omega \quad (9)$$

其中,  $Sf_{\omega}(t) = Sf(t, \omega)$ 。

这里所采用的窗口函数  $W$  为高斯函数,虽然这种窗函数有利于函数估计且不容易失真,但是由于基函数是多余且正交的,因此 WFT 计算时间很长。其他窗口可以给出稍差但是几乎相同的滤波结果,然而采用其他窗口

可以大大加快 WFT 的运行速度。如采用矩形窗口进行卷积实际上就相当于在实现更快的均值滤波。通过对比分析 Kaiser-Hamming 窗、Hamming 窗和矩形窗,综合选择了性能最好的二维 Kaiser-Hamming 窗口用于 WFT,分析过程如第 2 节所示。二维 Kaiser-Hamming 窗口的定义如下<sup>[22]</sup>。

$$W_{KH}(n_1, n_2) = \begin{cases} I_0\left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}{N-1}\right)^2}\right) \\ 0.5 \frac{\beta}{\beta} + \\ 0.27 - 0.23\cos 2\pi\left(\frac{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}{N-1} + 0.5\right), |n| \leq \frac{N-1}{2} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$ ,  $N \times N$  为二维 Kaiser-Hamming 窗口的尺寸。窗口函数时域的主瓣宽度和旁瓣衰减程度由  $\beta$  来调节,  $I_0(x)$  为零阶第 1 类修正贝塞尔(Bessel)函数,其级数形式为:

$$I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{k!} \left(\frac{x}{2}\right)^k \right]^2 \quad (11)$$

接着对于每个局部频谱:

$$\overline{Sf(u, \omega)} = \begin{cases} Sf(u, \omega), |Sf(u, \omega)| \geq \text{thr} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$\overline{f_1(t)} = (\overline{Sf_\omega} \otimes W_{KH})(t) e^{j\omega t} \quad (13)$$

更新滤波后的条纹为:

$$\overline{f(t)} = \overline{f(t)} + \overline{f_1(t)} \quad (14)$$

图 1 展示了使用二维 Kaiser-Hamming 窗口的傅里叶快速滤波算法流程。在 KH-WFF 算法中,使用二维 Kaiser-Hamming 窗口有两个主要原因<sup>[23]</sup>。1) 该窗口在固定窗口长度下可以通过调整独立参数来提供多个窗口特性。2) 在固定窗口长度和通带宽度的情况下,与 Kaiser 窗、Cosh 窗、指数窗和 Hamming 窗相比,该窗口具有更好的阻带最小衰减,因而表现出更好的滤波性能。

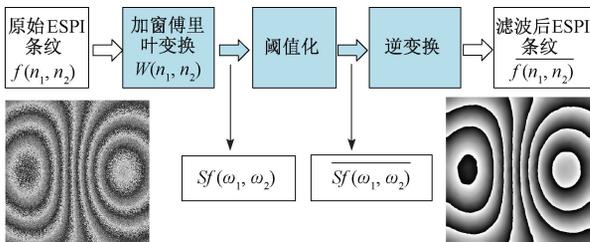


图 1 二维 Kaiser-Hamming 窗口傅里叶快速滤波算法框图

Fig. 1 Block diagram of Fourier fast filter algorithm based on 2D Kaiser-Hamming window

## 2 实验分析

在本节中所设置的实验展现了本文所提出 KH-WFF 方法和原始 WFF 方法在不同情况下所表现出来的性能。这些方法在 MATLAB 2019 中实现,基于 CPU i7-6200 M 和 Windows 10 平台。

### 2.1 窗口滤波性能比较

将使用 Hamming 窗、矩形窗和 Kaiser-Hamming 窗的加窗傅里叶运用到模拟条纹以及实验获取的真实条纹上比较不同窗口的滤波性能。其中 Hamming 窗口和 Kaiser-Hamming 窗的定义如式(10)所示,矩形窗口定义如下<sup>[21]</sup>:

$$W(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2r+1}}, t \in [-r, r] \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

根据式(1)模拟相减模式的 ESPI 条纹图像,其中  $N(x, y)$  是在  $[0, I_m]$  内均匀分布的随机值,这里设置  $P(x, y) = 80$ ,  $Q(x, y) = 24$ ,  $I_m = 80$ ,  $\varphi(x, y)$  由下式给出<sup>[20]</sup>:

$$\varphi_{1(x,y)} = 30 \times \exp\left(-\frac{(x - 0.5 \times m)^2 + (y - 0.5 \times n)^2}{15\,000}\right) \quad (16)$$

$$\varphi_{2(x,y)} = 40 \times \exp\left(-\frac{(x - 0.5 \times m)^2 + (y - 0.65 \times n)^2}{30\,000}\right) - \exp\left(-\frac{(x - 0.5 \times m)^2 + (y - 0.35 \times n)^2}{25\,000}\right); \quad (17)$$

其中,  $m$  和  $n$  分别为模拟条纹图像的宽和高,且  $x$  的值为  $1, 2, \dots, m$ ;  $y$  的值  $1, 2, \dots, n$ 。

式(16)获得的无噪声 ESPI 条纹图通过四步相移算法得到未加噪的理想 ESPI 包裹相位,如图 2(a) 所示,加入加性随机噪声的 ESPI 包裹相位如图 2(b) 所示。式(17)获得的未加噪的理想 ESPI 包裹相位如图 2(c) 所示,加入加性随机噪声的 ESPI 包裹相位如图 2(d) 所示:

采用 Hamming 窗、矩形窗和 Kaiser-Hamming 窗分别对图 2 的 ESPI 包裹相位进行滤波,得到滤波后的图像如图 3(a)~(c) 和图 5(a)~(c) 所示。并通过质量图导向法<sup>[24]</sup>对滤波后包裹相位执行解包裹操作,得到解包裹相位分别如图 4(a)~(c) 和图 6(a)~(c) 所示。从图 3 和 5 可以看出,采用 Kaiser-Hamming 窗滤波的包裹相位图最光滑,而采用 Hamming 窗滤波的图像吉布斯现象最为严重。从图 4 和 6 可以看出,采用 Kaiser-Hamming 窗滤波后的 ESPI 图像解出来的相位图最为连续,最接近于理论解包裹相位。从图 6(b) 中可以发现,采用矩形窗滤波的包裹相位解包裹失败,出现了明显的“拉丝”现象。

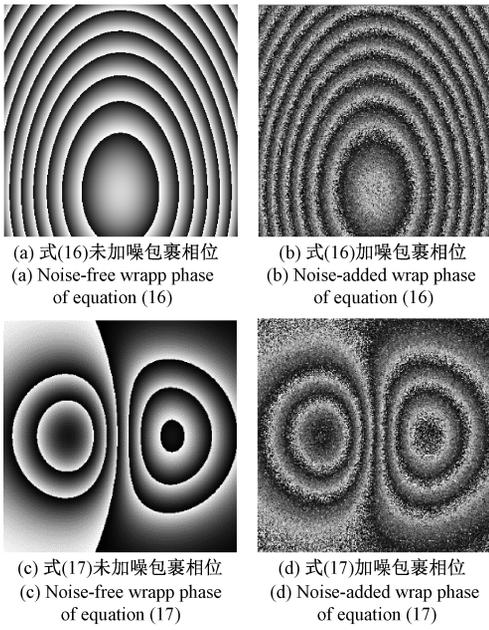


图 2 式 (16) 和 (17) 获得的模拟 ESPI 条纹

Fig. 2 ESPI fringes simulated by equations (16) and (17)

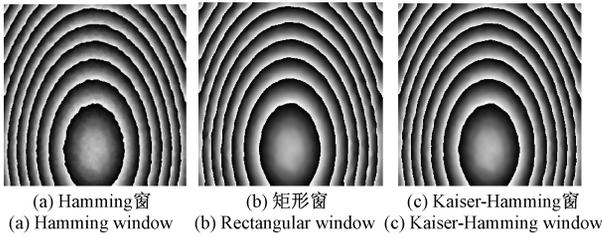


图 3 图 2(b) 加噪包裹相位采用不同窗口滤波的效果

Fig. 3 Filtering results using different windows for the noise-added wrap phase in Fig. 2(b)

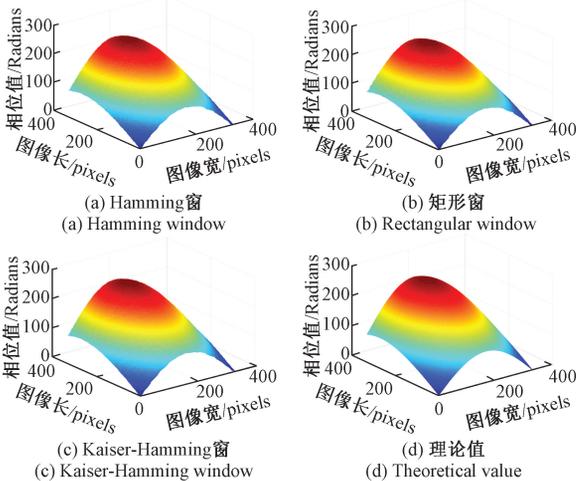


图 4 图 2(b) 采用不同窗口滤波后解包裹相位图

Fig. 4 Unwrapped phase after filtering with different windows in Fig. 2(b)

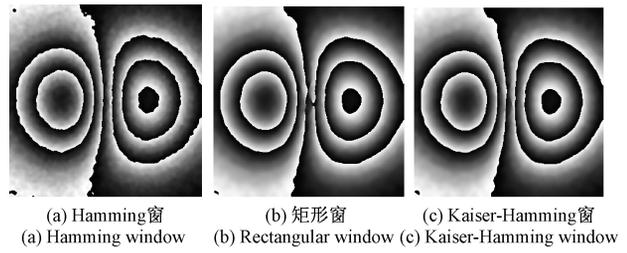


图 5 图 2(d) 加噪包裹相位采用不同窗口滤波的效果

Fig. 5 Filtering results using different windows for the noise-added wrap phase in Fig. 2(d)

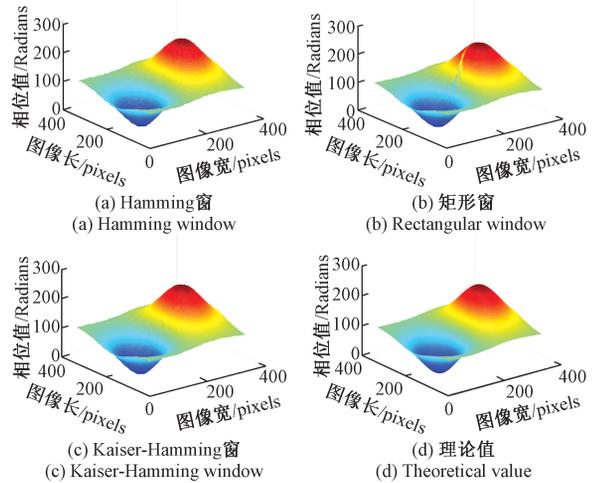


图 6 图 2(d) 采用不同窗口滤波后解包裹相位图

Fig. 6 Unwrapped phase after filtering with different windows in Fig. 2(d)

同时,采用峰值信噪比 (PSNR)<sup>[5]</sup> 和结构相似度 (SSIM) 这两种客观评价参数对滤波后条纹进行定量分析,计算所得的参数如表 1 所示。其中 PSNR 反映对 ESPI 条纹边缘突变等细节信息的保护能力,其值越大说明滤波效果越好。SSIM 表示滤波后 ESPI 条纹与无噪声条纹的结构相似度,其值越接近 1 说明滤波后的条纹越接近理想的真实条纹。由表 1 可知 Kaiser-Hamming 窗的 PSNR 皆为最高,SSIM 值和矩形窗接近。综合图像主观分析和客观评价参数可知 Kaiser-Hamming 窗的滤波性能最好。

表 1 不同窗口滤波性能客观评价参数  
Table 1 Objective evaluation parameters of filtering performance in different windows

所测条纹	评价参数	Hamming 窗	矩形窗	Kaiser-Hamming 窗
式(16)条纹	PSNR	14.278 1	14.245 9	14.326 1
	SSIM	0.774 9	0.784 2	0.786 7
式(17)条纹	PSNR	16.285 7	16.693 9	16.717 6
	SSIM	0.827 5	0.867 4	0.866 1

### 2.2 WFF 与 KH-WFF 滤波性能比较

将前面所提出的 KH-WFF 方法与原始 WFF 方法用于同一加噪条纹,通过比较滤波后的输出图像和滤波所消耗的时间比较两种方法的性能。通过第 2 节的模拟条纹公式得到一个  $256 \times 256$  和  $330 \times 330$  尺寸的 ESPI 条纹图,并分别加入高斯白噪声和加性散斑随机噪声,如图 7 和 8 所示。由图 7 和 8 可以发现 WFF 和 KH-WFF 滤波效果差别不大。

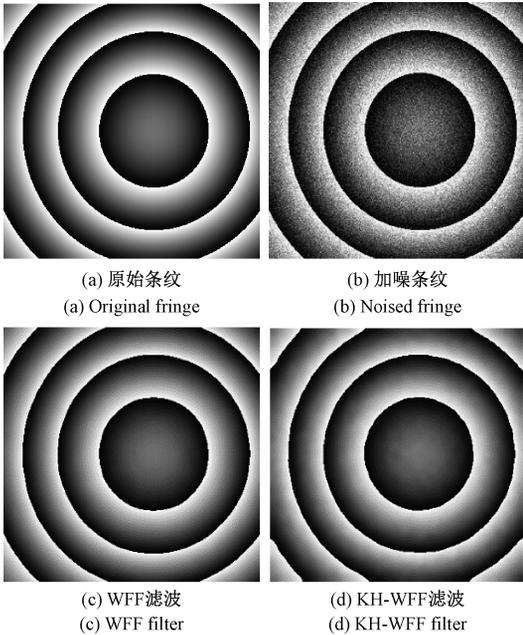


图 7 高斯白噪声滤波效果

Fig. 7 Filtering results of Gaussian white noise

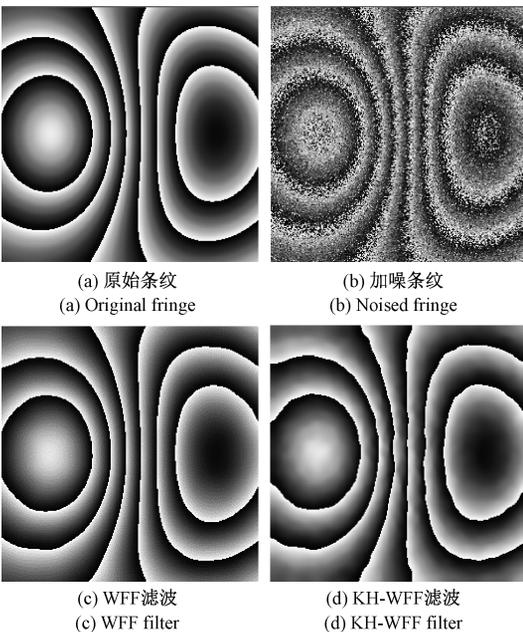


图 8 加性散斑随机噪声滤波效果

Fig. 8 Filtering results of additive speckle random noise

此外,将 KH-WFF 方法与原始 WFF 方法同时用于实验中采集到的真实 ESPI 条纹,通过对比两种方法以判断 WFF 和 KH-WFF 在工程实际运用的效果。ESPI 采集系统如图 9(a) 所示,ESPI 光路如图 9(b) 所示。由激光产生的相干光束首先通过准直扩束镜扩束,接着经过半透半反的分光镜分为物光和参考光。物光直接照射到被测物体表面。被测物体表面散射回来的光波经过分光棱镜和参考光束产生干涉,并由成像器件所记录。

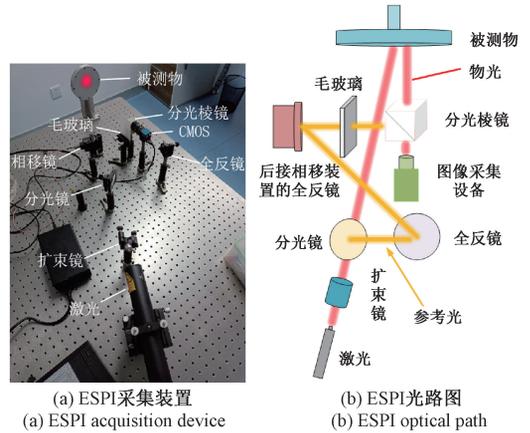


图 9 实验所用 ESPI 条纹采集装置

Fig. 9 ESPI fringe acquisition device used in the experiment

通过该装置采集到一副  $1066 \times 720$  大小的 ESPI 包裹相位如图 10 所示,可见原始包裹相位存在着大量噪声。使用 WFF 和 KH-WFF 分别对其进行滤波后得到图 11(a) 和 (b),可见两种方法都得到了光滑的 ESPI 条纹,且条纹边缘特征得到很好保存。采用质量图导向法对滤波后的 ESPI 包裹相位图解包裹,得到的连续相位如图 12 所示。从图 12 可以看出,两种方法滤波后得到的 ESPI 包裹包裹相位图都成功的完成了解包裹,且得到的相位图连续性较好。

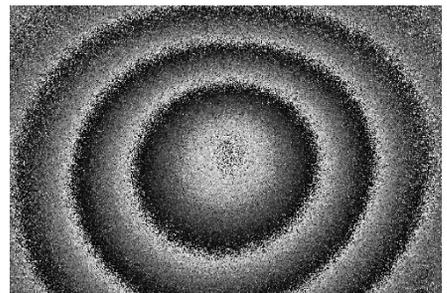


图 10 真实环境下采集到的 ESPI 包裹相位

Fig. 10 ESPI wrap phase collected in the actual environment

综合分析模拟 ESPI 条纹和真实 ESPI 条纹滤波效果图,可以得出 KH-WFF 和 WFF 滤波效果相差不大。接着分析两种方法的执行时间,KH-WFF 和 WFF 在本节中滤

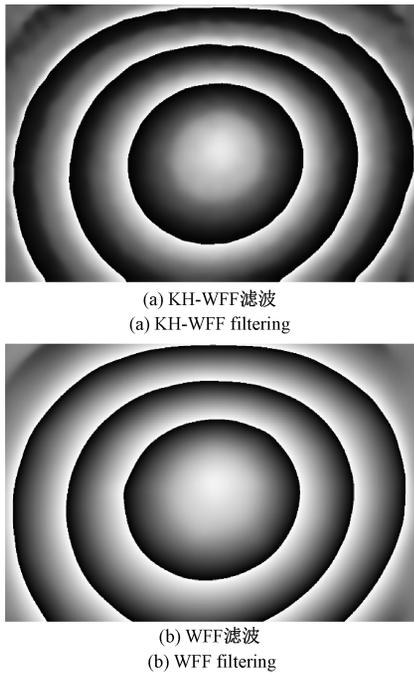


图 11 真实条纹 WFF 和 KH-WFF 滤波效果

Fig. 11 Filtering results of actual fringe using WFF and KH-WFF

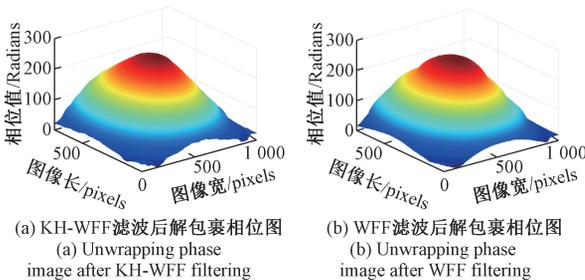


图 12 真实条纹解包裹相位图

Fig. 12 Unwrapping phase of actual fringe

波处理所消耗时间如表 2 所示。可见无论是模拟条纹还是真实条纹, KH-WFF 的执行效率都更高。在实际应用中, 针对图 11 所示 ESPI 条纹, KH-WFF 的滤波速度是 WFF 的 12 倍, 且表现出了和 WFF 相差很小的滤波效果。

表 2 模拟条纹和真实条纹滤波所用时间

Table 2 Filtering consumption time of simulated fringe and actual fringe

条纹图	滤波方法	执行时间/s
高斯白噪声模拟条纹	WFF	26.547 9
	KH-WFF	14.268 9
加性随机散斑噪声模拟条纹	WFF	12.487 2
	KH-WFF	7.551 0
真实环境采集条纹	WFF	1 838.052 0
	KH-WFF	151.659 0

### 2.3 时间复杂度分析

对于设置的带宽  $S_\psi$  和  $S_\xi$ , 原始 WFF 每次循环需要执行  $2 \times |S_\psi| \times |S_\xi|$  次 2 维卷积, 而提出的 KH-WFF 执行  $|S_\psi| \times |S_\xi|$  次卷积, 每次循环 KH-WFF 将会执行 1 次点乘运算, 1 次加法运算和 2 次卷积滤波。因此 KH-WFF 一次滤波的时间复杂度为  $O(mn)$ , 其中  $m, n$  分别为图像横向与纵向的像素个数。KH-WFF 相比 WFF 显著提高了运行速度, 因此本节将对两者的时间复杂度进行更加详细的对比分析。分别生成  $200 \times 200, 400 \times 400, 600 \times 600, 800 \times 800, 1\ 000 \times 1\ 000$  尺寸大小的模拟 ESPI 条纹。采用 KH-WFF 和 WFF 对各个尺寸的条纹图像进行滤波操作, 滤波所用时间如图 13 所示。可见 WFF 随着处理图像的尺寸增加时间复杂度显著增加, 而 KH-WFF 的执行时间增长曲线比较平缓。由于目前大部分图像采集设备如 CCD 和 CMOS 都是百万级像素, 可知在实际情况下执行滤波的 ESPI 条纹图尺寸接近于  $1\ 000 \times 1\ 000$ , KH-WFF 的处理效率更高, 更适合实时性要求高的运用场景。

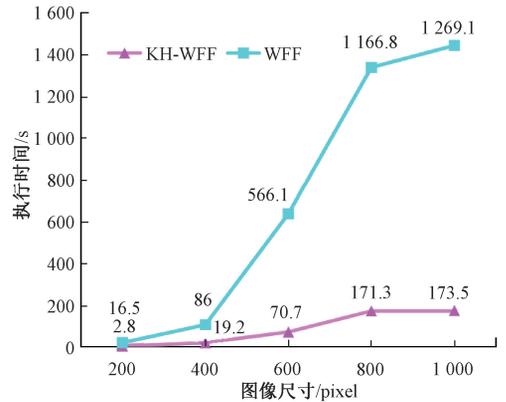


图 13 两种方法对不同尺寸模拟条纹滤波所用时间

Fig. 13 Filtering consumption time of simulated fringe with different sizes by two methods

从所提出的 KH-WFF 原理可知, KH-WFF 滤波方法的另一个优点是不再受滤波器内核大小影响。因此 KH-WFF 的窗口大小不再是影响滤波速度的一个主要问题, 在 KH-WFF 中可以自由调整窗口大小以确定指定条纹滤波最佳窗口。将 KH-WFF 和 WFF 运用到  $600 \times 600$  尺寸大小的 ESPI 条纹上, 并调整窗口大小分别进行滤波操作。如图 14 所示, WFF 滤波时间会随着窗口大小增加而大幅增长, KH-WFF 滤波时间则不受窗口大小影响。

频带宽也是影响 WFF 滤波速度的一大因素, 对  $330 \times 330$  尺寸的 ESPI 条纹使用半径为 5 的内核大小的 KH-WFF 和 WFF 分别进行滤波, 并调整频带宽来分析两者滤波时间。得到的结果如图 15 所示, WFF 滤波时间随着频带加宽显著上升, 而 KH-WFF 时间增长曲线平缓。

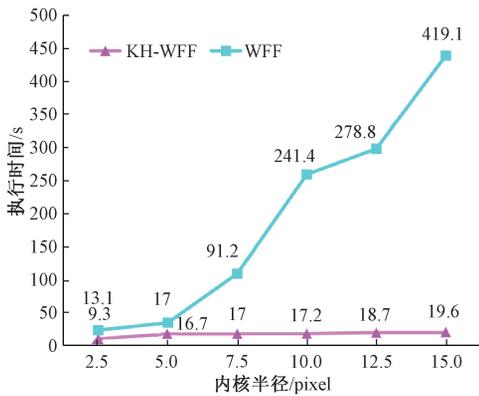


图 14 600×600 条纹选用不同窗口大小滤波所用时间  
Fig. 14 Filtering consumption time of 600×600 fringe with different window sizes by two methods

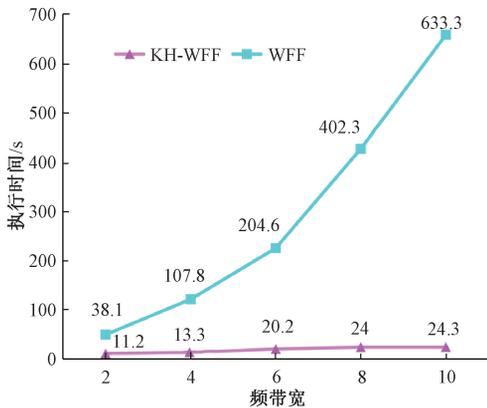


图 15 330×330 条纹设置不同频带宽两种方法滤波时间  
Fig. 15 Filtering consumption time of 330×330 fringe with different bandwidths by two methods

### 3 结 论

在本文中,分析了传统加窗傅里叶滤波法(WFF)的原理,修改了传统的高斯窗函数并提出二维 Kaiser-Hamming 窗。首先将其与常用的矩形窗、Hamming 窗相比较,发现采用矩形窗滤波后的 ESPI 条纹解包裹失败,采用 Hamming 窗滤波后的条纹吉布斯现象明显。相比之下,二维 Kaiser-Hamming 窗滤波可以得到更加光滑的 ESPI 条纹和更连续的解包裹相位,其客观评价参数 PSNR 最高,SSIM 值大于 Hamming 窗。接着将基于二维 Kaiser-Hamming 窗口的傅里叶滤波(KH-WFF)和传统加窗傅里叶滤波方法应用到模拟条纹和真实条纹,得到两者滤波效果相差很小,都得到了连续的解包裹相位图。针对实验中所用的实际应用环境下采集的真实条纹,KH-WFF 是 WFF 的 12 倍。最后,详细分析了不同尺寸、不同窗口大小和不同频带宽下 KH-WFF 和 WFF 的时间

复杂度,证明了 KH-WFF 的执行速度更快。然而,本方法仍需要手动确定频率范围。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 李开平, 蔡萍. 数字图像相关方法的亚像素算法性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 180-187.  
LI K P, CAI P. Study on the performance of sub-pixel algorithm for digital image correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 180-187.
- [3] 李忠明, 唐延甫, 李俊霖, 等. 迈克尔逊干涉条纹位移信息提取研究 [J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 51-54.  
LI ZH M, TANG Y F, LI J L, et al. Research on displacement information extraction from Michelson interference fringes [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(5): 51-54.
- [4] 王鹏, 张苗苗. 碳纤维复合材料受热应变测试方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(8): 6-10.  
WANG P, ZHANG M M. Research on thermal strain comparison test of carbon fiber composite materials [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(8): 6-10.
- [5] 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. Denoising of electronic speckle interferogram based on improved spin filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 72-77.
- [6] TANG C, ZHANG F, LI B, et al. Performance evaluation of partial differential equation models in electronic speckle pattern interferometry and the  $\delta$ -mollification phase map method [J]. Applied Optics, 2006, 45(28): 7392-7400.
- [7] XU W, TANG C, ZHENG T, et al. A shape-preserving oriented partial differential equation based on a new fidelity term for electronic speckle pattern interferometry fringe patterns denoising [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 279-290.
- [8] 钱晓凡, 饶帆, 林超, 等. 基于剪切干涉原理的散斑噪声降噪算法 [J]. 中国激光, 2011, 38(7):

- 211-216.  
QIAN X F, RAO F, LIN CH, et al. Speckle noise reduction algorithm based on shear interference principle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 211-216.
- [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] REYES-FIGUEROA A, FLORES V H, RIVERA M. Deep neural network for fringe pattern filtering and normalization [J]. Applied Optics, 2021, 60(7): 2022-2036.
- [11] VILLA J, GONZ LEZ E, MORENO G, et al. Fringe pattern denoising using spatial oriented gaussian filters [J]. Optics Communications, 2020, 457: 124704.
- [12] KEMAO Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis [J]. Applied Optics, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [13] KEMAO Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Principles, applications and implementations [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(2): 304-317.
- [14] KEMAO Q, SOON S H. Two-dimensional windowed Fourier frames for noise reduction in fringe pattern analysis [J]. Optical Engineering, 2005, 44(7): 075601.
- [15] LV C, WANG K, GU G, et al. Accurate full-edge detection and depth measurement of internal defects using digital speckle pattern interferometry [J]. NDT & E International, 2019, 102: 1-8.
- [16] ZHANG C, ZHAO H, QIAO J, et al. Three-dimensional measurement based on optimized circular fringe projection technique [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2465-2477.
- [17] 史红健, 朱飞鹏, 何小元. 动态投影栅线的加窗傅里叶分析方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 409-413.  
SHI H J, ZHU F P, HE X Y. Windowed Fourier analysis for dynamic fringe projection [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(2): 409-413.
- [18] GAO W, KEMAO Q, WANG H, et al. Parallel computing for fringe pattern processing: A multicore CPU approach in MATLAB® environment [J]. Optics and lasers in engineering, 2009, 47(11): 1286-1292.
- [19] GAO W, HUYEN N T T, LOI H S, et al. Real-time 2D parallel windowed Fourier transform for fringe pattern analysis using graphics processing unit [J]. Optics Express, 2009, 17(25): 23147-23152.
- [20] 张芳. 散斑干涉信息提取技术及其应用研究[D]. 天津:天津大学, 2009.  
ZHANG F. Speckle interferometry information extraction technology and application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [21] LE T, KEMAO Q. Faster window Fourier transform filters for fringe pattern analysis [C]. Ninth International Symposium on Laser Metrology, 2008: 71550T.
- [22] AVCI K. Two dimensional digital filter design using Kaiser-Hamming window structure and Huang transform and image enhancement application [J]. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2018, 33(4): 1459-1473.
- [23] AVCI K. Kaiser-Hamming window and its performance analysis for nonrecursive digital filter design [J]. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2014, 29(4): 823-833.
- [24] ZHAO M, HUANG L, ZHANG Q, et al. Quality-guided phase unwrapping technique: Comparison of quality maps and guiding strategies [J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6216-6224.

## 作者简介



王会峰, 毕业于西安电子科技大学, 现任长安大学电控学院教授, 目前研究方向为车路协同智能车辆环境感知与群体控制、三维数字化测量装配与质量控制等。

E-mail: hfwang@chd.edu.cn

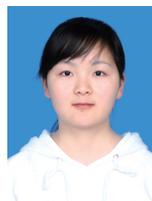
**Wang Hui Feng** graduated from Xidian University and is currently a professor at the School of Electronic Control of Chang'an University. The current research direction is vehicle-road collaborative intelligent vehicle environment perception and group control, three-dimensional digital measurement assembly and quality control, etc.



何柱材(通信作者), 毕业于南阳理工学院, 现为长安大学硕士研究生, 目前研究方向为电子散斑干涉术。

E-mail: hezhucui123@foxmail.com

**He Zhucui** (Corresponding author) graduated from Nanyang Institute of Technology, and is currently a master's degree student of Chang'an University. The current research direction is electronic speckle pattern interferometry.



李云梦, 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** graduated from Henan Polytechnic University, and is currently a

master's degree student of Chang'an University. The current research direction is 3D measurement and reconstruction.



**李晋庚**,毕业于中北大学。现为长安大学硕士研究生,目前研究方向为人工智能与图像处理、GNSS 导航定位等。

E-mail: 18234108928@163.com

**Li Jingeng** graduated from North University of China, and is currently a master's

degree student of Chang'an University. The current research direction is artificial intelligence and Image processing, GNSS navigation and positioning, etc.



**王鹏雁**,毕业于河南理工大学,现为长安大学硕士研究生,目前研究方向为嵌入式开发。

E-mail: huanghe@chd.edu.cn

**Wang Pengyan** graduated from Henan Polytechnic University, and is currently a

master's degree student of Chang'an University. The current research direction is embedded development.



**郝婷**,毕业于西安建筑科技大学,现为长安大学硕士研究生,目前研究方向为计算机视觉。

E-mail: 1215203737@qq.com

**Hao Ting** graduated from Xi'an University of Architecture and Technology, and

is currently a master's degree student of Chang'an University. The current research interest is deep learning and computer vision.



**黄鹤**,毕业于西北工业大学,现任长安大学电控学院副教授,目前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** graduated from Northwestern Polytechnical University and is currently an

associate professor in the School of Electronic Control, Chang'an University. The current research direction is artificial intelligence and information fusion, unmanned vehicle perception, etc.