

改进阈值的窗口傅里叶变换滤波

蔡长青 张永山*

广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006

摘要 固定阈值算法对由噪声引起的小的频谱系数进行归零,可以取得较好的去噪效果。但由于其阈值函数不连续,在阈值附近具有突变,所以会对一些大的噪声频谱系数有所保留,对小的信息频谱系数造成丢失。为了改善窗口傅里叶变换滤波算法中的阈值选取方法,提出了自适应阈值方法。通过模拟散斑干涉相位图验证可知,所提出的自适应阈值方法可以对噪声进行有效的滤除,同时对信号信息进行很好的保留。

关键词 测量; 散斑干涉; 窗口傅里叶变换滤波; 固定阈值; 自适应阈值

中图分类号 O348.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.031204

Windowed Fourier Transform Filter Method with Improved Threshold

Cai Changqing Zhang Yongshan

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Fixed threshold algorithm can achieve better denoising effect due to the small spectral coefficients caused by noise being set to zero. But because of its threshold function is not continuous and a mutation in the vicinity of the threshold, so some big noise spectral coefficients' reservations and small spectral coefficients result in the loss of information. In order to improve filtering algorithm threshold for windowed Fourier transform method, an adaptive threshold method is proposed. Through the verification of simulated speckle pattern interferometer phase map, the adaptive threshold method can effectively filter out the noise with the signal information well retained.

Key words measurement; speckle pattern interferometry; windowed Fourier transform filter; fixed threshold; adaptive threshold

OCIS codes 120.3180; 100.2000

1 引言

数字散斑干涉术(DSPI)作为一种全场、非接触的高精度测量方法已经在位移^[1]、变形^[2]和无损检测领域^[3]得到了广泛应用。该方法以不同时刻从具有光学粗糙表面的被测物反射的散射光相干涉而将位移和变形的信息以条纹的形式显示出来。通过时间相移^[4]和空间相移^[5]提取方法可以将条纹图转换成相位图。通过相应光路信息就可以得到最终的位移和变形等信息。

为了满足动态测量需求,近年来国内外学者先后提出了不需要相移和载波的基于一幅条纹图进行相位提取的方法,如基于窗口傅里叶变换^[6]和连续小波变换^[7]的方法。然而,不论是哪一种方法,散斑干涉条纹图都含有大量散斑噪声,图像信噪比较低,对相位信息提取的精度和缺陷识别的准确度产生影响。鉴于此,很好地滤除散斑干涉条纹图中的噪声并对原有的条纹信息进行保留是数字散斑干涉术图像处理中至关重要的一步。

针对散斑干涉条纹图的滤波方法有很多种,大致可以分为两大类:基于空域变换和基于频域变换。基于空域变换的方法主要有均值滤波^[8]、中值滤波、双边滤波、等值线滤波、旋滤波和方向偏微分滤波^[9-11]等。

收稿日期: 2014-09-10; 收到修改稿日期: 2014-10-25; 网络出版日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(51378135)、广州大学2013年新苗计划项目(CCQ1-1407)、广州大学引进人才科研启动项目(2221)

作者简介: 蔡长青(1985—),男,博士,讲师,主要从事无损检测、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: 409414771@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 993486551@qq.com

其中,均值滤波和中值滤波处理方法简单,但滤波效果不佳;双边滤波通过灰度加权和距离加权的非线性组合,滤波效果有了大大提高;旋滤波基于条纹的方向性,在条纹的切线方向进行低通滤波,与常用的滤波方法相比能更好地保护条纹的细节;等直线滤波将曲面窗口代替旋滤波的直线窗口,取得了更好的效果;方向偏微分方程滤波、方向相干扩散方程滤波等方法,也利用了条纹的方向性,等值线滤波方法相比,该类方法不需要逐个像素建立小的滤波窗口。而以上利用条纹方向性的算法均依赖于对每一个像素点条纹方向的准确估计,而条纹图中大量的噪声势必会影响条纹方向的准确估计。频域滤波方法中用于散斑干涉条纹图滤波的常用方法有 Gabor 滤波^[12]、小波变换滤波^[13-14]、窗口傅里叶变换滤波等。其中以窗口傅里叶变换滤波方法的滤波效果最佳。窗口傅里叶变换滤波的精髓在于对频谱系数进行处理,目前对频谱系数进行处理是采用固定阈值法。这种固定阈值的算法由于对噪声引起的小的频谱系数进行归零,可以取得较好的去噪效果。但由于其阈值函数不连续,在阈值附近具有突变,会对一些大的噪声频谱系数有所保留,对小的信息的频谱系数造成丢失。

针对窗口傅里叶变换^[6,15-16],滤波中固定窗口在阈值处理时遇到的问题,提出了一个新的阈值选取方法——自适应阈值法。该方法在消除噪声、提高相位图质量方面具有明显的效果。

2 原理

2.1 窗口傅里叶变换滤波原理

2.1.1 窗口傅里叶变换

窗口傅里叶变换和窗口傅里叶逆变换是一对互逆的变换,分别表示如下:

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

$$\mathcal{F}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S\mathcal{F}(u, v, \xi, \eta) g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) d\xi d\eta dudv, \quad (2)$$

式中*表示共轭复数, (x, y) 表示图像每个点的坐标, (u, v) 表示窗口的尺寸, (ξ, η) 表示频域坐标。

傅里叶变换基于下式

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

式中 $y(x, y)$ 一般取高斯函数作为窗口函数,表示为

$$y(x, y) = \exp(-x^2/2\sigma_x^2 - y^2/2\sigma_y^2). \quad (4)$$

2.1.2 窗口傅里叶滤波

将傅里叶变换后的频域图通过阈值处理和傅里叶逆变换,即可得到滤波相位图。阈值函数和逆变换公式分别为

$$\overline{S\mathcal{F}}(u, v, \xi, \eta) = \begin{cases} S\mathcal{F}(u, v, \xi, \eta), & |S\mathcal{F}(u, v, \xi, \eta)| \geq T_{th} \\ 0, & |S\mathcal{F}(u, v, \xi, \eta)| < T_{th} \end{cases} \quad (5)$$

$$\overline{\mathcal{F}}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{S\mathcal{F}}(u, v, \xi, \eta) g_{u, v, \xi, \eta}(x, y) d\xi d\eta dudv, \quad (6)$$

式中 T_{th} 为表示阈值。

2.2 改进阈值的窗口傅里叶变换滤波方法

由(5)式可知,固定阈值法是对频谱系数小于阈值的归零,对大于阈值的保持不变。由于其阈值函数不连续,在阈值附近具有突变,会对一些大的噪声频谱系数有所保留,对小的信息的频谱系数造成丢失。为了改善窗口傅里叶变换滤波算法中的阈值选取方法,提出了自适应阈值方法。

自适应阈值方法为

$$\overline{S\mathcal{F}}(u, v, \xi, \eta) = S\mathcal{F}(u, v, \xi, \eta)^\alpha. \quad (7)$$

该方法利用了指函数中当 $\alpha > 1$ 时,当对大于 1 的自变量进行放大,对小于 1 的自变量进行压缩的特性,故能取得好的滤波效果。当 α 取大于 1 的数时,自适应阈值法表现为对大的频谱系数进行放大,对小的频谱系数进行压缩。因为信号都是集中于大的频谱系数区。故这种操作能有效放大信号而抑制噪声。另

外由于该操作不会使频谱系数出现跳变,故不会使图像出现人为的噪声点。大量模拟散斑干涉图实验研究表明,当 α 取值在2~7范围内时能得到最佳的滤波效果。

3 实验验证

为了比较固定阈值方法和自适应阈值方法在图像滤波方面的效果,模拟了散斑干涉相位图。应用模拟散斑干涉相位图的优势在于其有精确的相位值,有助于评价对加噪图像的滤波效果。

模拟散斑干涉相位图的公式为

$$\psi_{i,j} = 60 \times \exp \left\{ \left[-\frac{\left(i - \frac{M}{4t}\right)^2 + \left(j - \frac{N}{4t}\right)^2}{250000} \right] - \exp \left[-\frac{\left(i - \frac{3M}{4t}\right)^2 + \left(j - \frac{3N}{4t}\right)^2}{250000} \right] \right\}. \quad (8)$$

图1(a)为无噪声的相位图,图1(b)为加噪相位图。图2(a)为采用固定阈值处理的结果,图2(b)为采用本文提出的自适应阈值处理的结果。实验中所有的固定阈值 T_{th} 均取为6,自适应阈值中 α 均取为3。

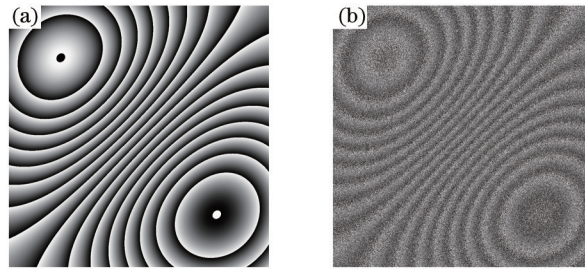


图1 模拟相位图。(a) 无噪声相位图;(b) 加噪声相位图

Fig.1 Simulated phase maps. (a) Phase map without noise; (b) phase map with noise

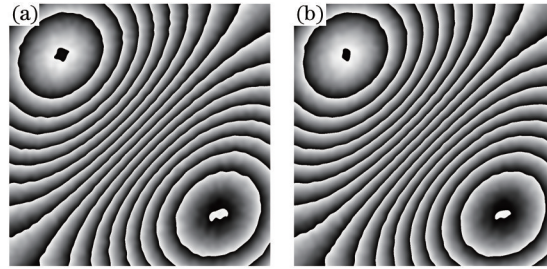


图2 对图1滤波后的相位图。(a) 固定阈值;(b) 自适应阈值

Fig.2 Filtered phase maps for Fig.1. (a) Fixed threshold; (b) self-adaptive threshold

为了定量比较滤波效果,求得了滤波后图像与原图像的均值信噪比^[17]为

$$R_{MSE} = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\psi(i,j) - \psi_0(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\psi_0(i,j)]^2}, \quad (9)$$

式中 M 、 N 为图像像素的行程、列数, $\psi_0(i,j)$ 和 $\psi(i,j)$ 分别为滤波后和无噪声相位图。

对比图1和图2可知,本文提出的阈值选取方法是一种有效的方法,优于固定阈值法,可以用于去噪领域。

为了证明上述结论的正确性,另外模拟两幅散斑干涉相位图,模拟公式分别为

$$\psi_{i,j} = 100 \times \left\{ \exp \left[-\frac{(2i - M)^2 + \left(2j - \frac{3N}{2}\right)^2}{20000} \right] + \exp \left[-\frac{(2i - M)^2 + \left(2j - \frac{N}{2}\right)^2}{30000} \right] \right\} 15 \times \left[\left(\frac{i - \frac{M}{2}}{3} \right)^2 + \left(\frac{j - \frac{N}{3}}{3} \right)^2 \right], \quad (10)$$

$$\psi_{i,j} = 4.5 \times \pi \times \left[-0.02 \times j + \left(\frac{2i - M}{M} \right)^2 + \left(\frac{2j - N}{N} \right)^2 \right]. \quad (11)$$

表1 图1滤波后均值信噪比

Table 1 Mean signal-to-noise ratio after Fig.1 filtered

Fixed threshold	Self-adaptive threshold
1.8639×10^{-7}	1.6021×10^{-7}

图3(a)和图5(a)分别为模拟的两幅散斑干涉图像,图3(b)和图5(b)分别加噪声图像。同时采用原来的固定阈值方法和本文提出的阈值方法进行去噪,得到结果分别如图4(a)、(b)和图6(a)、(b)所示。

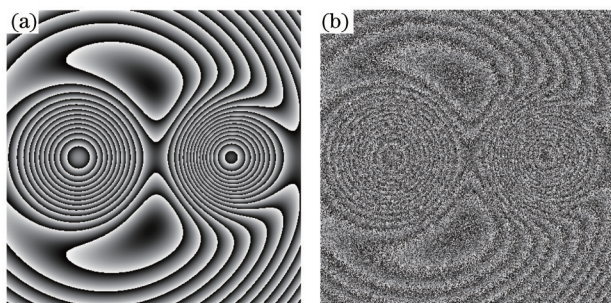


图3 模拟相位图。(a) 无噪声相位图; (b) 加噪声相位图

Fig.3 Simulated phase maps. (a) Phase map without noise; (b) phase map with noise

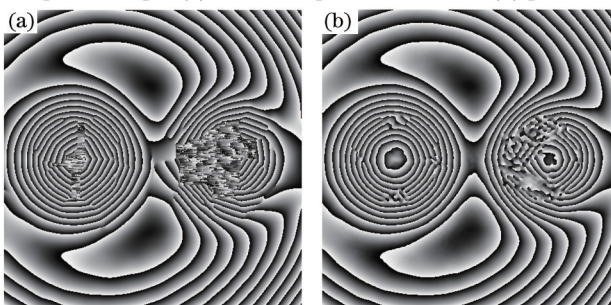


图4 对图3滤波后的相位图。(a) 固定阈值; (b) 自适应阈值

Fig.4 Filtered phase maps for Fig.3. (a) Fixed threshold; (b) self-adaptive threshold

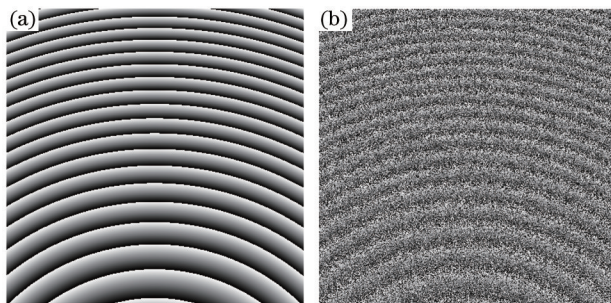


图5 模拟相位图。(a) 无噪声相位图; (b) 加噪声相位图

Fig.5 Simulated phase maps. (a) Phase map without noise; (b) phase map with noise

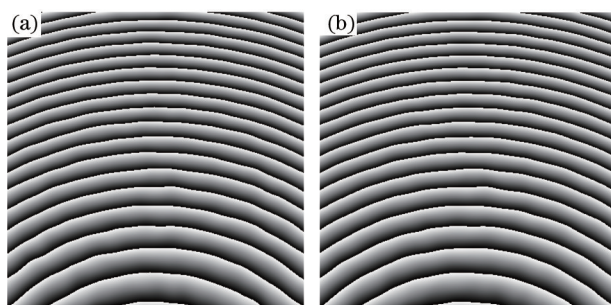


图6 对图5滤波后的相位图。(a) 固定阈值; (b) 自适应阈值

Fig.6 Filtered phase maps for Fig.5. (a) Fixed threshold; (b) self-adaptive threshold

表2 图3滤波后均值信噪比

Table 2 Mean signal-to-noise ratio after Fig.3 filtered

Fixed threshold	Self-adaptive threshold
2.6548×10^{-6}	1.9208×10^{-6}

表3 图5滤波后均值信噪比

Table 3 Mean signal-to-noise ratio after Fig.5 filtered

Fixed threshold	Self-adaptive threshold
1.0823×10^{-6}	9.5719×10^{-4}

由上述对加噪的模拟散斑干涉相位图的滤波效果对比可知,与固定阈值去噪方法相比,本文提出的自适应阈值去噪方法明显具有良好的去噪性能,对于加噪图像基本恢复出原始图像。而固定阈值方法则较大地受到噪声的影响。

由表1~3可知,第二组模拟图对比最为明显,图像相位变化最剧烈,可以得出自适应阈值在相位变化明显的地方比固定阈值法的效果更优。

4 结 论

窗口傅里叶变换滤波中的固定阈值算法是取一个合适的阈值,对绝对值大于阈值的频谱系数给予保留,而对绝对值小于阈值的频谱系数取零。这种固定阈值的算法由于对由噪声引起的小的频谱系数进行归零,可以取得较好的去噪效果。但由于其阈值函数不连续,在阈值附近具有突变,会对一些大的噪声频谱系数有所保留,对小的信息的频谱系数造成丢失。为了改善窗口傅里叶变换滤波算法中的阈值选取方法,提出了自适应阈值方法。通过验证模拟散斑干涉相位图可知,所提出的自适应阈值方法可以对噪声进行有效滤除的同时,对信号信息进行很好的保留。

参 考 文 献

- 1 Yang Zhenyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of large-range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412007.
杨振宇,王 鸣,夏 巍,等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412007.
- 2 Sun P. Evaluation of two-dimensional displacement components of symmetrical deformation by phase-shifting electronic speckle pattern interferometry [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(15): 2859-2862.
- 3 Wang Fengpeng, Zeng Quanrong, Ye Shangchen, *et al.*. Experiments of soybean vitality detection using laser speckle [J]. *Applied Laser*, 2013, 33(4): 452-455.
王凤鹏,曾全荣,叶尚臣,等. 基于激光散斑的大豆活力检测实验研究[J]. *应用激光*, 2013, 33(4): 452-455.
- 4 Cai Lulu, Ren Zhiqian, Wan Yuliang, *et al.*. Study on chaotic controlling via feedback phase periodicity in He-Ne laser [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 011404.
蔡璐璐,任秩倩,万玉良,等. 氦氖激光器混沌反馈相位周期控制方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 011404.
- 5 Zhu Meng, Huang Zhanhua, Li Xiangyu, *et al.*. Spatial carrier speckle interferometry technique research based on Fresnel Bi-Prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912003.
朱 猛,黄战华,李翔宇,等. 菲涅耳双棱镜载频散斑干涉形变测量系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912003.
- 6 Yuan Shuyun, Liu Shouxian, Wang Detian, *et al.*. Displacement mode analysis method for data processing of photonic doppler velocimetry[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030602.
袁树云,刘寿先,王德田,等. 光纤多普勒测速仪位移模式数据处理新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030602.
- 7 Li Kai, Zhang Dazhi, Wang Jingjing, *et al.*. Phase extraction of an ESPI fringe pattern by using two-dimensional continuous wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 733-738.
李 凯,张大治,王晶晶,等. 基于二维连续小波变换的ESPI条纹图相位提取方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 733-738.
- 8 Kerr D, Santoyo F M, Tyrer J R. Manipulation of the Fourier components of speckle image fringe patterns as a part of an interferometry analysis process[J]. *Journal Modern Optics*, 1989, 36(2): 195-203.
- 9 Carnec C, Delacourt C. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry near Gardanne france[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43(1): 43-54.

- 10 Wang Yu, Xue Hong. Applying oriented fourth-order partial-differential equations to fluorescence microscopic image denoising[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(8): 3121-3124.
王 瑜, 薛 红. 基于方向四阶偏微分方程的荧光显微图像去噪[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(8): 3121-3124.
- 11 Roger M G, Stephen W J, Ralph P T. Shape and slope measurement by source displacement in shearography[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(4): 621-634.
- 12 Goodman J W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Application[M]. Greenwood Village: Roberts & Company Publishers, 2007.
- 13 Bai Junqing, Zhang Ke, Zhang Qi. The application of the wavelet filter method in the fiber optic gyro initial alignment of inertial navigation system[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2014, 44(3): 370-372.
白俊卿, 张 科, 张 琪. 小波滤波方法在光纤陀螺惯导系统初始对准中的应用[J]. 西北工业大学(自然科学版), 2014, 44(3): 370-372.
- 14 Yang Xiufang, Zhang Wei, Yang Yuxiang. Denoising technology of radar life signal based on lifting wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0328003.
杨秀芳, 张 伟, 杨宇祥. 基于提升小波变换的雷达生命信号去噪技术[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0328003.
- 15 Kema 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.
- 16 Qian K, Soon S H, Asundi A. A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform [J]. Optics & Laser Technology, 2005, 37(6): 458-462.
- 17 Bhaduri B, Mohan N K, Kothiyal M P, *et al.*. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS)[J]. Opt Express, 2006, 14(24): 11598-11607.

栏目编辑: 苏 芬