

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0929-06

基于自适应滤波器的相位连续化算法及其在移相干涉术中的应用

钱 锋, 王向朝, 王学锋

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 提出一种非线性自适应数字滤波器对通过移相干涉术得到的原理相位图进行去噪声处理。这种数字滤波器的窗口尺寸可以根据其在相位图中的不同位置而变化。在有噪声(尤其是靠近 2π 相位跳变处的噪声)存在的情况下, 相位连续化过程仍可以有效地进行以重建被测物体表面形貌的真实相位图。详细介绍了这一技术的原理及实验结果。

关键词 移相干涉术, 自适应数字滤波器, 相位连续化

中图分类号 TH 744.3; TN 713 **文献标识码** A

Adaptive Filter for Unwrapping Noisy Phase Image in Phase-stepping Interferometry

QIAN Feng, WANG Xiang-zhao, WANG Xue-feng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract An adaptive filter for preprocessing wrapped phase image with high noise content has been developed. The window size of this median filter is adjustable according to its location in the noisy phase image. Phase unwrapping can then be done to recover the real phase image without the hampering influence of noise, especially the noise near the phase jumps. Both numerical simulation and experimental results used to examine the effectiveness of this adaptive filter are presented.

Key words phase-stepping interferometry, adaptive digital filter, phase unwrapping

1 引 言

随着光学面阵探测器和计算机技术的快速发展, 激光干涉术已经成为人们进行高精度测量的主要手段^[1~4]。相位连续化是利用激光干涉技术进行物体表面形貌测量时重建其真实相位图的过程。在用反正切函数进行相位值的计算时, 所得到的相位是在 $-\pi$ 到 π 之间的原理相位值。因此, 为了重建被测物体形貌的真实相位图, 我们必须对原理相位图进行相位连续化处理来消除原理相位图中的 2π 跳变。最传统的相位连续化方法是逐行或逐列比较相邻两点的相位值, 如果它们的相位差超过了 π , 那么就通过加减整数倍 2π 的值来使相位差小于 π 。这种

方法简单并且快速, 但是当原理相位图中有噪声存在时, 由于噪声积累, 这种方法很难得到正确的真实相位图。因此, 人们已经发展了许多相位连续化算法来克服原理相位图中噪声的影响^[5~10]。

近些年来, 由于数字图像处理技术的快速发展, 人们开始将相应的技术用于相位连续化问题的解决上^[11~18]。在基于图像处理的相位连续化方法中, 如何正确地分辨出原理相位图中的相位跳变是最重要的, 因为只有这样才能进行正确的相位补偿来消除 2π 相位跳变。在数字图像处理技术中, 非线性滤波器具有较好的边缘和细节保留能力^[19, 20]。在已报道的相位连续化算法中, 标准的中值滤波器通常被用来消除原理相位图中的噪声。1997 年, A.

收稿日期 2001-08-06; 收到修改稿日期 2001-09-18

基金项目 国家自然科学基金(69978024)和国家重点基础研究发展规划 G1999033108 资助项目。

作者简介 钱锋(1973—)男, 主要从事光学测试、图像处理、光通信等领域的研究工作。E-mail: fengqian@yahoo.com

Capanni^[18]等提出了用基于直方图分布的自适应滤波器进行去除噪音处理,这种滤波器对去除相位跳变处的噪音非常有效。但是,由于它的窗口尺寸是固定的,因此在有效去除噪音的同时不能保证具有很好的图像细节保留能力。本文进一步发展了这种自适应滤波器,其窗口尺寸能根据它在原理相位图中的位置的不同而改变。这样,它不仅能够分辨出原理相位图中被噪音污染的相位跳变区域,而且能很好地保留相位图中的细节信息。计算机模拟和实验结果证明了这种尺寸可变自适应滤波器的有效性。

2 窗口可变自适应滤波器原理

最常用的非线性滤波器就是中值滤波器。它是一种邻域运算,类似于卷积,它的运算是将窗口区域中的像素灰度级进行排序,然后选择该组的中间值

作为输出像素值。中值滤波器具有一定的去除噪音和保留图像细节能力,但是在原理相位图中,如果有噪音靠近相位跳变,标准的中值滤波器就有可能不能正常工作。图 1(a)是一个一维信号,在它的相位跳变处有一个噪音像素存在。图 1(b)和(c)分别是使用长度为 5 个和 7 个像素的中值滤波器进行滤波后的结果。作为比较,图 1(d)是使用 5 个像素的平均滤波器滤波后的结果。可以看到,相位跳变处的噪音仍然存在,而且信号的部分细节由于滤波器的平滑作用而损失了。被 5 个像素和 7 个像素的中值滤波器及 5 个像素的平均滤波器处理过的信号的均方根值分别是 0.63 rad, 0.79 rad 和 0.94 rad。很明显,长度较长的中值滤波器具有较强的图像平滑能力,也就是说,它的图像细节保留能力较弱。希望能有一种数字滤波器不仅能够很好地分辨出相位跳变,而且能够尽可能地保留相位图中的细节信息。

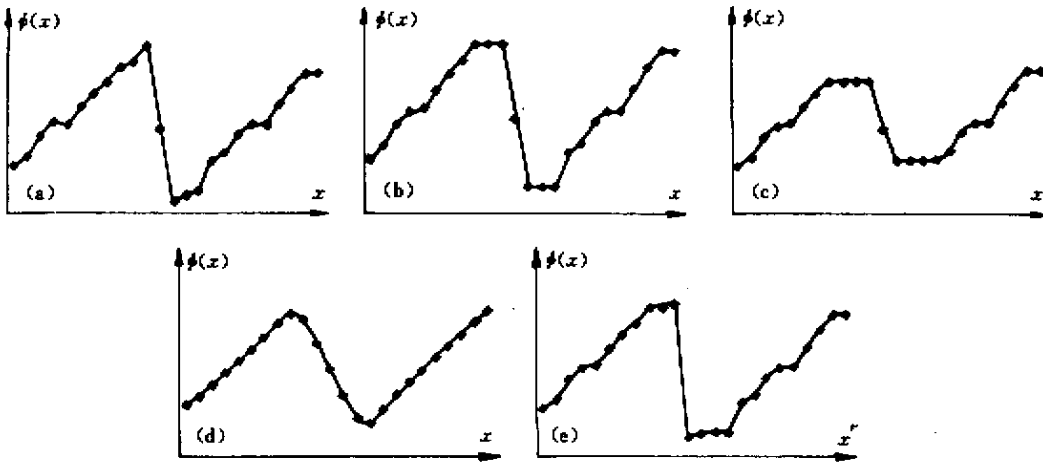


图 1 (a) 相位跳变处有噪音的一维信号 (b) 用 5 个像素长的中值滤波器滤波后的结果 (c) 用 7 个像素长的中值滤波器滤波后的结果 (d) 用 5 个像素长的平均滤波器滤波后的结果 (e) 用 5 个像素长的 Capanni 自适应滤波器滤波后的结果
 Fig.1 1-D signal (a) with a noisy point close to the phase jump ; (b) filtered with 5-pixel median filter ; (c) filtered with 7-pixel median filter ; (d) filtered with 5-pixel mean filter ; (e) filtered with 5-pixel Capanni's adaptive median filter

为达此目的,可以利用待处理信号的特征来设计自适应数字滤波器。原理相位图中的相位值的范围是从 $-\pi$ 到 π 的,并且相位跳变处两边的像素的相位差大于 π 。根据滤波器窗口中像素的灰度直方图形状,可以估计出滤波器窗口在原理相位图中的位置,并因此选择窗口中部分像素的中值相位作为滤波器的输出^[18]。为了简化,区间 $[-\pi, \pi]$ 被分为三个相等的子区间,即 $[-\pi, -\frac{1}{3}\pi)$ $[-\frac{1}{3}\pi, \frac{1}{3}\pi)$ 和 $[\frac{1}{3}\pi, \pi]$ 。图 2 列出了滤波器在原理相位图中的 5 种可能的位置,以及在不同情况下选择那些点进

行中值运算作为输出像素值。需要说明的是,这些滤波器的窗口尺寸是固定的,与其位置无关。图 1(e)是使用 5 个像素长的这种滤波器滤波后的结果,它的均方根值是 0.36 rad。可以看到,相位跳变处的噪音被滤掉了。然而,当相位跳变处有更多的噪音像素存在的话(图 3(a)),5 个像素长的滤波器将不能去除这些噪音,而 7 个和 9 个像素的滤波器则可以。但是,后两种滤波器使图像细节损失较多。相应的结果见图 2(b)(c)和(d),它们的均方根值分别是 1.47 rad, 1.06 rad 和 1.22 rad。因此希望自适应滤波器的窗口尺寸是可以变化的,在噪音较少

和离相位跳变处较远的区域,滤波器窗口尺寸应该较小以保留相位图信息,而在高噪音区域或包含相位跳变的区域,滤波器应具有较大的窗口以保证有效地滤波和分辨相位跳变。

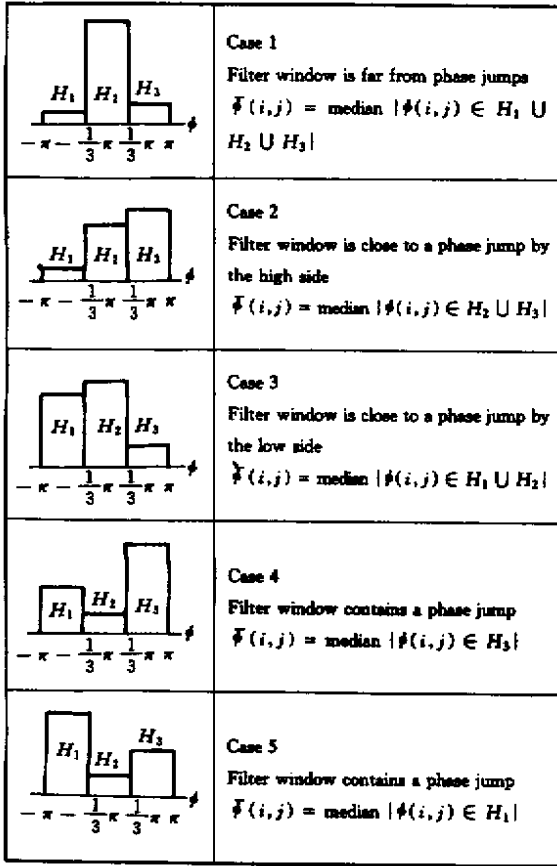


图 2 根据滤波器窗口中像素灰度级的直方图分布来确定输出相位值 $\hat{\phi}(i, j)$
 H_1, H_2 和 H_3 分别是子区间

$$\left[-\pi, -\frac{1}{3}\pi\right], \left[-\frac{1}{3}\pi, \frac{1}{3}\pi\right] \text{ 和 } \left[\frac{1}{3}\pi, \pi\right] \text{ 的直方图}$$

Fig. 2 Selection of the phase value $\hat{\phi}(i, j)$ according to the histogram of the filter window, which has five possible cases

H_1, H_2 , and H_3 are local histograms of the subintervals of

$$\left[-\pi, -\frac{1}{3}\pi\right], \left[-\frac{1}{3}\pi, \frac{1}{3}\pi\right] \text{ and } \left[\frac{1}{3}\pi, \pi\right], \text{ respectively}$$

本文提出了一种窗口尺寸可以变化的自适应滤波器。由于窗口较大的滤波器具有较强的去噪音能力,因此根据该窗口内的像素,能较准确地判断出滤波器窗口在原理相位图中所处的位置。当然,干涉条纹的间距应该比窗口的宽度大。图 2 列出了滤波器在原理相位图中的位置的 5 种可能情况,在不同情况下,滤波器选择其中部分或全部像素进行中值计算。在点 (i, j) 根据图 2 所列规则,窗口尺寸为 $L_{\max} \times L_{\max}$ 的一个二维自适应滤波器被用来确定它

在原理相位图中的位置,其中 L_{\max} 是滤波器窗口宽度 L 所能取的最大值。接着,应用了尺寸为 $(L_{\max} - k) \times (L_{\max} - k)$ 的滤波器,其中 k 为步长。这个过程将一直重复直到窗口宽度达到它所允许的最小值 L_{\min} 。这 $(L_{\max} - L_{\min} + k)/k$ 个滤波器中的每一个都将给出它们对滤波器位置的估计结果。那么下一步就是决定选择哪一个滤波器来确定点 (i, j) 的相位值。需要说明的是,在这里相位跳变的确定比图像细节的保留具有高的优先级。因此如果一个或几个滤波器均表明其窗口中包含相位跳变,那么将选择窗口尺寸最小的那个。选择窗口小的滤波器是为了更好地保留相位图细节。如果没有滤波器表明其窗口中包含相位跳变,将根据滤波器的判断结果得出哪种情况出现次数最多。也就是判断滤波器最有可能处于哪个位置。接着,选择这些滤波器中尺寸最小的一个来决定该点的相位。为了评价这种尺寸可变自适应滤波器,用它来处理图 3(a) 所示的一维信号。不失一般性,在这里利用一维信号而不是二维信号,设 $L_{\max} = 11, L_{\min} = 5, k = 2$ 。从图 3(e) 可以看到,相位跳变处的噪音被滤掉了。滤波后的信号均方根值 0.9 rad 比 Capanni 的尺寸固定的自适应滤波器要低。证明了这种尺寸可变滤波器具有更好的图像细节保留能力。

3 移相干涉术中物体表面形貌的测量

3.1 计算机模拟结果

首先通过计算机模拟将尺寸可调自适应滤波器用于移相干涉术中。使用的是每步移相为 $\pi/2$ 的四步算法。这 4 幅干涉图可以表示为

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma \cos[\phi(x, y)]\} \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \{1 - \gamma \sin[\phi(x, y)]\} \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = I_0(x, y) \{1 - \gamma \cos[\phi(x, y)]\} \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma \sin[\phi(x, y)]\} \quad (4)$$

这里 $I_0(x, y)$ 为探测器上点 (x, y) 所探测到的平均强度, γ 为调制深度, $\phi(x, y)$ 为被测波前在点 (x, y) 的相位。点 (x, y) 的相位可以表示为

$$\hat{\phi}(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (5)$$

由于反正切函数的存在,此时得到的值是模为 2π 的原理相位值。其真实相位值为

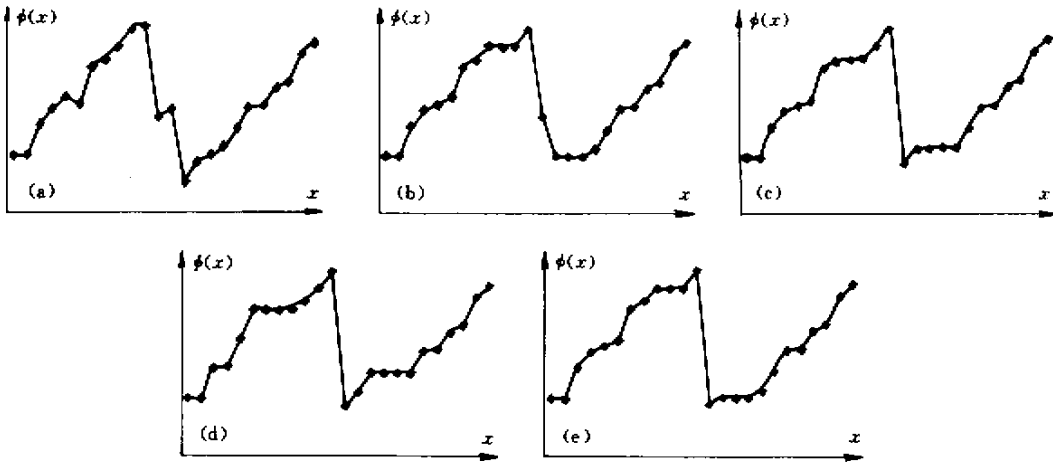


图 3 (a) 相位跳变处有两个噪音点的一维信号 ;用 5 个像素长 (b) 7 个像素长 (c) 和用 9 个像素长 (d) 的 Capanni 自适应滤波器滤波后的结果 (e) 用 5 个像素长的尺寸可变自适应滤波器滤波后的结果

Fig.3 1-D signal (a) with two noisy point close to the phase jump ; (b) filtered with 5-pixel Capanni' s adaptive median filter ; (c) filtered with 7-pixel Capanni' s adaptive median filter ; (d) filtered with 9-pixel Capanni' s adaptive median filter ; (e) filtered with proposed size-adjustable adaptive filter

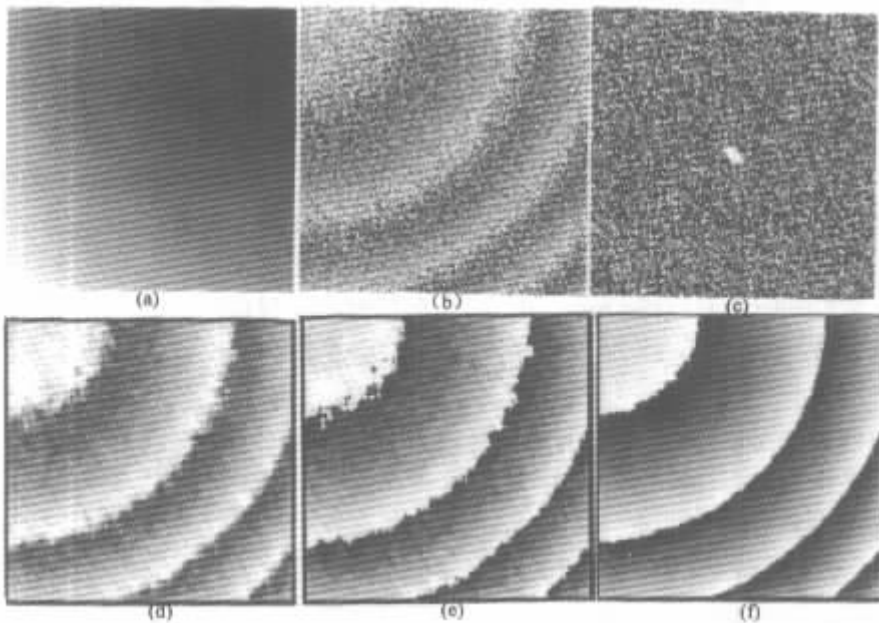


图 4 (a) 计算机模拟的原始相位图 (b) 有噪音的原理相位图 (c) 图 (b) 的功率谱分布 (d) 用 7x7 中值滤波器滤波后的结果 (e) 用 7x7 Capanni 自适应滤波器滤波后的结果 (f) 用尺寸可变自适应滤波器滤波后的结果

Fig.4 (a) Original phase map ; (b) Calculated noisy wrapped phase map ; (c) The power spectra of Fig.4 (b) ; (d) The wrapped phase map after using 7 x 7 standard median filter ; (e) The wrapped phase map after using 7 x 7 Capanni' s adaptive median filter ; (f) The wrapped phase map after using proposed size-adjustable adaptive median filter

$$\phi_r(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi n(x, y) \quad (6)$$

式中 $n(x, y)$ 为整数。相位连续化处理实际上是通过求出 $n(x, y)$ 来确定 $\phi_r(x, y)$ 的过程。接着就可以由下式求出点 (x, y) 的高度 H

$$H(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_r(x, y) \quad (7)$$

这里 λ 为光源波长。

图 4 (a) 是计算机产生的相位图。它的大小是 200×200 个像素, 每个像素具有 256 个灰度级。我们给 4 幅干涉图加入噪音, 然后根据公式 (5) 得到含有噪音的原理相位图, 如图 4 (b) 所示。与图 4 (a) 相

比,它的均方根值是 0.02 rad 。此原理相位图的功率谱分布如图 4(c)所示。图 4(d)是使用 7×7 的标准滤波器处理后的相位图,可以看到噪音和相位跳变都被平滑掉了。图 4(e)是用 7×7 Capanni 的滤波器滤波后的结果,虽然可以分辨出 2π 相位跳变,但相位跳变处附近仍有噪音存在,这将影响下面区域分辨和相位补偿的进行。这两个相位图的均方根值分别是 $6.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 和 $5.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。图 4(f)是使用尺寸可调自适应滤波器滤波后的结果,在这里

取 $L_{\max} = 11, L_{\min} = 5, k = 2$ 。根据该图可以判断出由相位跳变和图像边缘所划分的不同区域。不同的区域在图 5(a)中用不同的灰度级表示。最后一步相位补偿是给不同区域内的所有点加减 2π 整数倍的相位值来消除原理相位图中的相位跳变。图 5(b)和(c)是最后得到的重建的真实相位图以及根据公式(7)得到的三维表示。它的均方根值 $4.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 或 $3.6 \times 10^{-4} \lambda$ 小于使用标准中值滤波器和 Capanni 尺寸固定滤波器滤波后的结果。

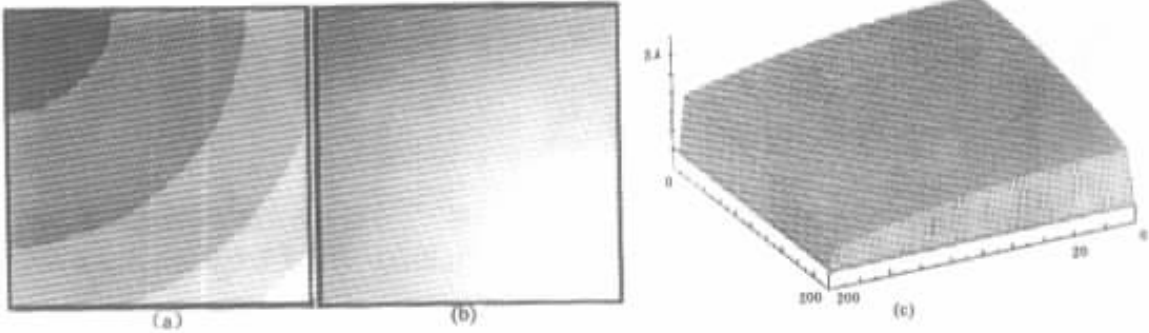


图 5 (a) 用不同的灰度级表示的相位区域 (b) 重建的真实相位图 (c) 物体表面形貌的三维显示

Fig.5 (a) Regions marked by gray color with different scales ;(b) Reconstructed phase map ;(c) 3-D surface roughness

3.2 实验结果

图 6 是使用移相干涉术进行物体表面形貌测量的实验装置图。光源是波长 λ 为 532 nm 的半导体激光抽运固体激光器。参考物镜由压电陶瓷驱动在参考光和物光之间引入相位差以实现移相功能。干涉图由 CCD 探测器记录,并通过一个 8 位 A/D 转换器输入到计算机进行处理。每个图像有 512×512

个像素。实验中,被测物体是光纤连接器的端面。图 7(a)是一幅干涉信号图,图 7(b)是计算得出的原理相位图,两个相邻相位跳变处的间隔至少有 50 个像素。设 $L_{\max} = 15, L_{\min} = 5, k = 2$ 。图 7(c)是该滤波器滤波后的结果,通过区域分辨,不同区域用不同的灰度级表示,见图 7(d)。最后一步是根据不同区域及相位跳变处两边的相位值进行相位补偿。真实相位图和相应的三维表示如图 7(e)和(f)所示。根据图 7(f),可以求得该端面曲率半径为 19 mm ,光纤芯相对于连接器轴心的偏差为 $0.4 \mu\text{m}$ 。

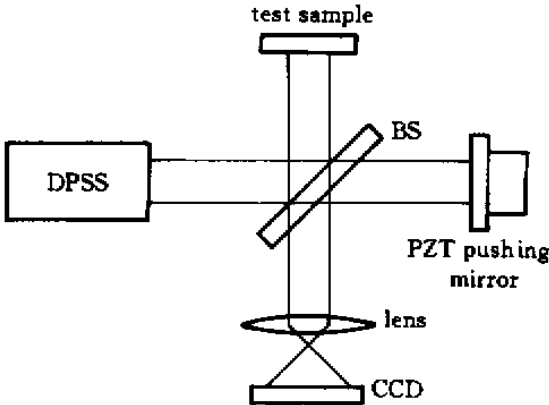


图 6 移相干涉仪的实验装置图

DPSS : 半导体激光抽运固体激光器 ;BS : 分束器 ;PZT : 压电陶瓷

Fig.6 Phase-stepping interferometer with typical

Twyman-Green optical configuration

DPSS : laser-diode-pumped solid-state laser ; BS : beam splitter ;

PZT : piezoelectric transducer

4 结 论

本文提出了一种尺寸可变的自适应滤波器对原理相位图进行去噪音处理。这种滤波器的尺寸可以通过它在原理相位图中的不同位置而变化。在噪音较少或离相位跳变较远的区域,滤波器窗口较小以尽可能保留相位图的细节;相反,在高噪音或包含 2π 相位跳变的区域,滤波器窗口较大以保证有效去除噪音和分辨出相位跳变。与标准中值滤波器和尺寸固定的 Capanni 自适应滤波器相比,这种尺寸可变的自适应滤波器不仅能有效地去除噪音,而且具有很好的相位跳变分辨和图像细节保留能力。

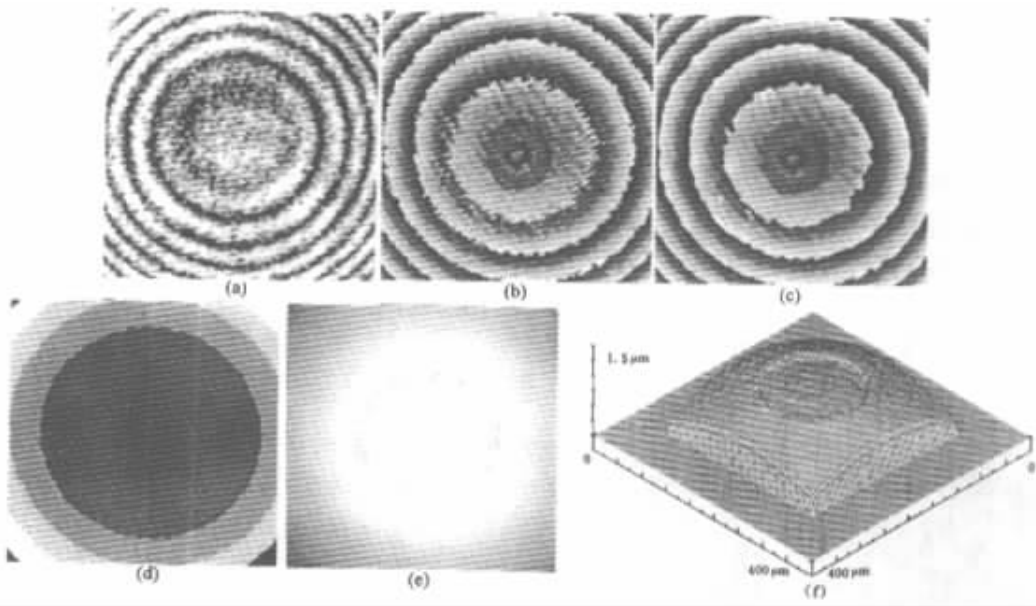


图 7 (a)干涉信号图 (b)被测物体表面的原理相位图 (c)用尺寸可变自适应滤波器滤波后的结果;
(d)用不同的灰度级表示的相位区域 (e)重建的真实相位图 (f)物体表面形貌的三维显示

Fig.7 (a) Interferogram ;(b) wrapped phase map of the measured mirror surface ;(c) filtered phase map by using proposed size-adjustable adaptive filter ;(d) regions marked by gray color with different scales ;(e) reconstructed phase map ;(f) 3-D surface roughness

参 考 文 献

- 1 K. Creath. Phase-measurement interferometry techniques [J]. *Prog. Opt.* , 1988 , **26** 349 ~ 393
- 2 J. H. Bruning , D. R. Herriott , J. E. Gallagher *et al.* . Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Appl. Opt.* , 1974 , **13** (11) 2693 ~ 2703
- 3 X. Z. Wang , O. Sasaki , Y. Takebayashi *et al.* . Sinusoidal phase-modulating Fizeau interferometer using a self-pumped phase conjugator for surface profile measurements [J]. *Opt. Eng.* , 1994 , **33** (8) 2670 ~ 2674
- 4 X. Z. Wang , O. Sasaki , T. Suzuki *et al.* . Response characteristics of a self-pumped phase-conjugate mirror to spatially nonuniform phase changes of an incident wave and their applications [J]. *Opt. Eng.* , 1995 , **34** (4) :1184 ~ 1190
- 5 D. C. Ghiglia , M. Pritt. Two-dimensional Phase Unwrapping : Theory , Algorithms , and Software [M]. New York : Wiley , 1998
- 6 D. C. Ghiglia , G. A. Mastin , L. A. Romero. Cellular-automata method for phase unwrapping [J]. *J. Opt. Soc. Am. A* , 1987 , **4** (1) 267 ~ 280
- 7 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm [J]. *Appl. Opt.* , 1989 , **28** (15) 3268 ~ 3270
- 8 J. J. Gierloff. Phase unwrapping by regions [C]. *SPIE* , 1987 , **818** 2 ~ 9
- 9 Donald J. Bone. Fourier fringe analysis : the two-dimensional phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.* , 1991 , **30** (25) : 3627 ~ 3632
- 10 J. M. Huntley , H. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl. Opt.* , 1993 , **32** (17) 3047 ~ 3052
- 11 R. Muller , L. Saackel. Complete automatic analysis of photoelastic fringes [J]. *Exper. Mech.* , 1979 , **19** (5) 245 ~ 251
- 12 S. Nakadate , T. Yatagai , H. Saito. Electronic speckle pattern interferometry using digital image processing techniques [J]. *Appl. Opt.* , 1979 , **19** (11) :1879 ~ 1883
- 13 David W. Robinson. Automatic fringe analysis with a computer image-processing system [J]. *Appl. Opt.* , 1983 , **22** (14) : 2169 ~ 2176
- 14 Sridhar Krishnaswamy. Algorithm for computer tracing of interference fringes [J]. *Appl. Opt.* , 1991 , **30** (13) :1624 ~ 1628
- 15 J. Sirkis , Y. Chen , H. Singh *et al.* . Computerized optical fringe pattern analysis in photomechanics : a review [J]. *Opt. Eng.* , 1992 , **31** (2) 304 ~ 314
- 16 M. Rivera , R. Rodriguez-Vera , J. Marroquin. Robust procedure for fringe analysis [J]. *Appl. Opt.* , 1997 , **36** (32) 8391 ~ 8396
- 17 Q. Lin , J. Vesecky , H. Zebker. Phase unwrapping through fringe-line detection in synthetic aperture radar interferometry [J]. *Appl. Opt.* , 1994 , **33** (2) 201 ~ 208
- 18 A. Capanni , L. Pezzati , D. Bertani *et al.* . Phase-shifting speckle interferometry : a noise reduction filter for phase unwrapping [J]. *Opt. Eng.* , 1997 , **36** (9) 2466 ~ 2472
- 19 I. Pitas , A. Venetsanopoulos. Nonlinear Digital Filters : Principles and Applications [M]. Boston , MA : Kluwer Academic , 1990
- 20 H. A. David. Order Statistics [M]. New York : Wiley , 1981