

# 基于时空条纹图法的光纤干涉条纹投影 三维面形测量技术

李浩宇, 朱荣刚, 何勇\*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 研究了传统时空条纹图法相位提取技术,通过对移相条纹图存在线性载频时移相量的修正,完善了该技术。将修正后的技术技术应用到光纤干涉条纹投影三维面形测量中,并将其相位提取结果与传统的四步移相法、重叠四步平均法和改进迭代法进行对比,结果表明:修正后的技术不仅有效抑制了光纤干涉条纹投影装置中移相器移相不准确和环境因素等引起的移相误差,还能够消除杂散光等引起的高频噪声,起到滤除高频噪声的作用。

**关键词** 测量; 时空条纹图; 移相误差; 光纤干涉投影; 干涉测量

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101203

## Fiber-Optic Interferometer Projection Based on Spatial-Temporal Fringes for Three-Dimensional Surface Measurement Technique

Li Haoyu, Zhu Ronggang, He Yong\*

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** The phase extraction technique based on the traditional spatial-temporal fringe pattern method is studied, which is perfected by correcting the phase-shift of the phase-shift fringer pattern with a linear carrier frequency. This technique is also applied to the fiber-optic interferometer projection for three-dimensional surface measurements. Compared with the traditional four-step phase-shifting method, overlapping averaging four-frame algorithm, and the advanced iterative algorithm, the phase extraction technique based on the spatial-temporal fringe pattern method can effectively suppress the phase-shifting error caused by phase-shifting inaccuracy of the phase-shifter in the fiber-optic interference fringe projection device and environmental factors. Further, it can eliminate the high-frequency noise caused by factors, including stray light.

**Key words** measurement; spatial-temporal fringes; phase-shifting error; fiber-optic interference projection; interferometry

**OCIS codes** 120.3180; 120.5050; 120.2650

## 1 引言

光纤干涉条纹投影法<sup>[1-2]</sup>具有投影条纹正弦性好、结构灵活和环境适应性强的优点,被广泛应用于结构照明的光学三维面形测量<sup>[3-6]</sup>中。光纤干涉条纹投影法的相位提取主要有两种方法:一种是以傅里叶变换为主的单幅图处理方法,包括傅里叶变换法<sup>[7]</sup>、窗口傅里叶变换法<sup>[8]</sup>和小波变换法<sup>[9-10]</sup>等。

测量过程中仅需要一幅条纹图就能够实现动态测量,但这种方法存在频谱泄漏,不能绝对真实地恢复面形。另一种是以移相法为基础的多幅图处理方法<sup>[11]</sup>,该方法具有计算速度快、测量精度高等特点,但移相法往往会因移相器移相不准确以及气流、振动等环境因素<sup>[12-13]</sup>而对测量结果的稳定性及精度产生影响。为了应对这种影响,一些专家提出了降低移相误差的算法。例如:朱日宏等<sup>[14]</sup>提出了通过连

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(11473017)

\* E-mail: heyong@mail.njust.edu.cn

续多次平均具有  $90^\circ$  相位差的相位测量结果来实现消除移相误差功能的重叠四步平均 (OAF) 法; Okada 等<sup>[15]</sup> 将移相量看作是随机值, 采用最小二乘迭代法求取相位分布; Wang 等<sup>[16]</sup> 在 Okada 迭代法的基础上提出了改进的迭代法 (AIA), 提高了迭代效率, 并且该方法不用限定迭代的初始值。

2008 年, Servin 等<sup>[17]</sup> 提出一种新的相位提取算法, 这种算法可以看成是移相法和单幅图相位提取算法的一种组合。该算法将测试过程中的每幅移相干涉图按照一种排列顺序进行组合, 组合后的条纹图将原本只包含空域信息 (相位分布) 的条纹图转变成一幅同时包含空域信息和时域信息的时空条纹 (STF) 图。在 STF 图的频谱中, 由于时域移相量的存在, 0 级背景谱和  $\pm 1$  级信号谱相互分离, 从而可以通过滤波提取出  $+1$  级信号频谱重构相位。Li 等<sup>[18-20]</sup> 基于此原理提出了载频交叠重构干涉术 (CSI), 用以抑制压电陶瓷 (PZT) 移相不准确以及环境因素带来的测量误差。但在该算法的相位提取过程中, 信号谱周围存在一个明显的干扰频谱。本文着重研究了在移相条纹图本身存在线性载频的情况下, 如何通过修正移相步进量来消除这一干扰频谱。

## 2 原理

### 2.1 移相法光纤干涉条纹投影三维面形测量原理

移相法光纤干涉条纹投影三维面形测量原理如图 1 所示, 激光二极管 (LD) 产生的单色光经过 50:50 的耦合器分成两路: 其中一路缠绕在 PZT 上, 通过精密电压源调整 PZT 的伸缩, 以达到投影条纹相位移动的目的; 另一路经由偏振控制器, 通过控制出射光的偏振态来调整光场的对比度。最后经由紧密贴合在一起的出射端投向被测件。光纤出射端可以看作是两个标准球面波, 假设两球面波的偏振方向相同, 则在任意与出射光线光轴垂直的平面上, 光强分布可以表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left(\frac{2\pi d}{D\lambda}x + \delta\right), \quad (1)$$

式中:  $a(x, y)$  为背景光强分布;  $b(x, y)$  为条纹强度分布;  $d$  为光纤出射端面的中心距离;  $D$  为光纤出射端面沿光轴到成像面的垂直距离;  $\lambda$  为测量单色光波长;  $\delta$  为两路光的初始光程差。

图 1 中的  $O_p$  为光纤投影中心,  $O_c$  为相机中心, 两者连线与参考面平行, 距离为  $d_{pc}$ 。相机焦距为  $f$ , 其光轴与参考面垂直, 相机中心到参考面的垂

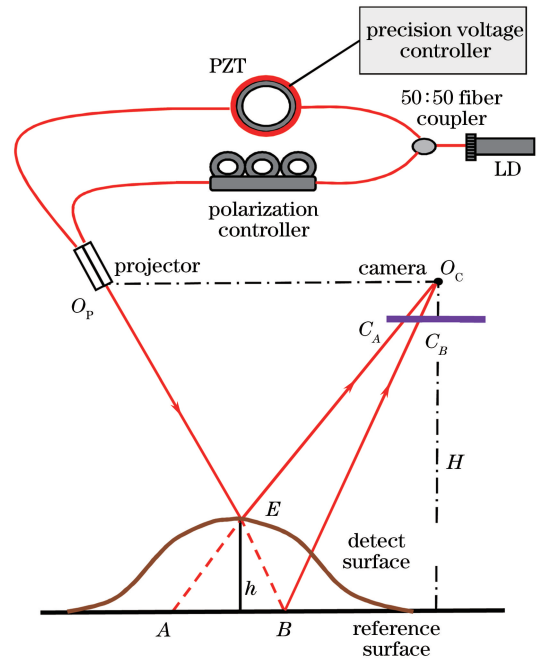


图 1 光纤干涉条纹投影三维面形测量原理图  
Fig. 1 Schematic of 3D surface measurement using fiber-optic interferometer projection

直距离为  $H$ 。以测试面上的  $E$  点为例, 当未放置测试件时, 相机靶面上  $C_A$  点求解的相位值是条纹投射在参考面上  $A$  点的相位  $\phi_A$ ; 当放置测试件时, 相机靶面上  $C_A$  点求解的相位值是条纹投射在测试面上  $E$  点的相位  $\phi_E$ , 此相位值等同于未放置测试件时相机靶面上  $C_B$  点求解的相位值  $\phi_B$ , 即  $\phi_B = \phi_E$ 。假设相机靶面上求解的参考面相位分布函数为  $\varphi_0 = p(x_c, y_c)$ , 则有  $x_c = q(\varphi_0, y_c)$ 。因此  $C_A, C_B$  两点靶面距离可表示为

$$l_{C_A C_B} = q[p(x_A, y_A) + \Delta\varphi, y_B] - x_A, \quad (2)$$

式中:  $(x_A, y_A)$  为  $C_A$  点的靶面坐标;  $\Delta\varphi = \phi_B - \phi_A$  为相机靶面上求解的  $C_A, C_B$  两点的相位差。

在远心光路模型中, 当投影中心和相机中心距被测件足够远时, 相机靶面上得到参考面上的相位在相机坐标  $x_c$  方向上呈线性分布。因此,  $C_A, C_B$  两点的靶面距离可以近似看成是一个仅与相位差  $\Delta\varphi$  有关的线性函数, 此时有

$$l_{C_A C_B} = k\Delta\varphi, \quad (3)$$

式中:  $k = \frac{D\lambda}{2\pi d \tan(\theta)}$ ;  $\theta$  为投影光纤的入射角。

根据三角形相似原理可以求得测试面上  $E$  点的高度  $h$  为

$$h = \frac{1}{\frac{1}{H} + \frac{d_{pc}f}{l_{C_A C_B} H^2}}. \quad (4)$$

遍历整个相机靶面上的有效点,就可以恢复出完整的测试面面形。

2.2 时空条纹图法相位提取原理

构建 STF 图的具体方法如图 2 所示,其由  $N$  幅移相条纹图通过交叠重构的方式组成。

图 2 中  $I_1 \sim I_N$  代表  $N$  幅移相条纹图。假设单幅原始移相条纹图由  $M$  列组成,则按列构造的 STF 图包含  $M \times N$  列,且按顺序每个  $N$  列是由原来  $N$  幅移相条纹图中的对应列提取后组合得到的。

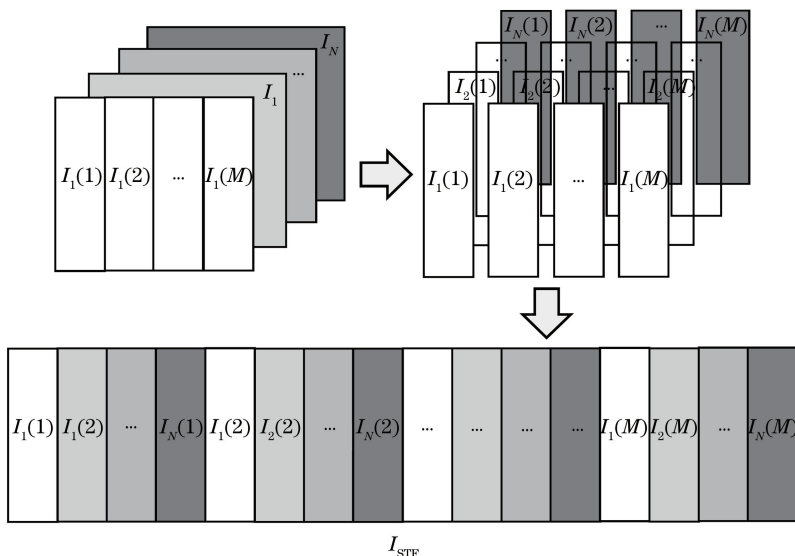


图 2 STF 图构建方法

Fig. 2 Construction method of STF image

以四步移相法为例,当原始移相条纹图存在线性载频时,移相条纹图可表示为

$$I_i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \varphi(x, y) + i\delta], \quad (5)$$

式中:  $f_x, f_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向载频条纹的频率;  $\varphi(x, y)$  为待测相位;  $\delta = \pi/2$  为移相步进量 ( $i = 0, 1, 2, 3$ )。

仿真过程中假定待测相位分布为一常数,且仅在  $x$  方向上存在线性载频 ( $f_y = 0$ ),如图 3 所示。图 3(a) 为 4 幅线性载频移相干涉条纹图中的一幅,图 3(b) 为其傅里叶变换后的频谱图。4 幅移相条纹图按列顺序通过交叠重构的方式构建 STF 图,如图 4

所示,构建后的 STF 图在  $x$  方向扩展了 4 倍,用  $x'$  代替新的  $x$  方向的坐标,则构建后的 STF 图可表示为

$$I'(x', y) = a \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] + b \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] \times \cos \left\{ 2\pi f_x x' + 2\pi f_x f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right) + \Delta\varphi \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] \right\}, \quad (6)$$

式中:余弦项内  $2\pi f_x f_{\text{INT}}(x'/4)$  项为离散函数,可将其写成连续函数和周期函数的组合形式;  $f_{\text{INT}}$  为取整操作;  $f_x = 1/N$ , 为 STF 图中的归一化空域载频,是由原始移相条纹图的时域移相频率转化得到的。此时,(6)式可改写成

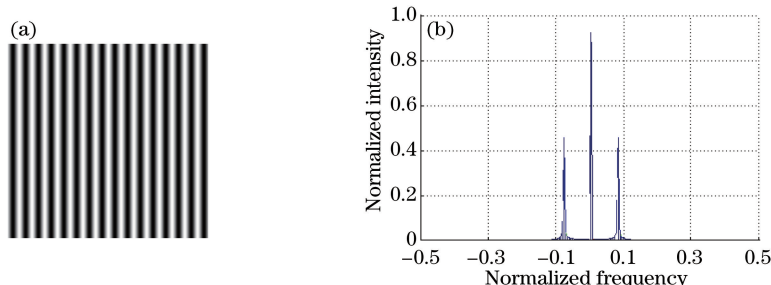


图 3 (a) 线性载频移相干涉条纹图及 (b) 其频谱

Fig. 3 (a) Fringe pattern of linear carrier frequency phase-shift interference and (b) frequency spectrum

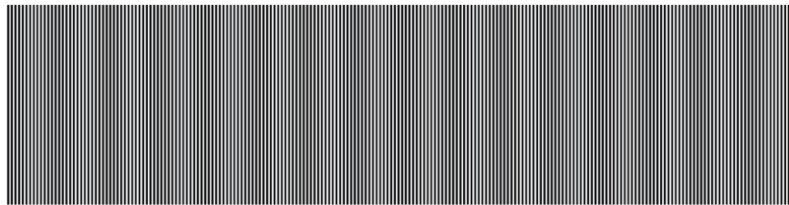


图4 构建的 STF 图

Fig. 4 Constructed STF image

$$I'(x', y) = a \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] + b \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] \times \cos \left\{ 2\pi (f_s + f_t) x' + \Delta\varphi \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] + \sigma_t(x') \right\}, \quad (7)$$

式中:  $f_s = f_x/4$ , 为单幅移相条纹图空间频率在扩展后的 STF 图中的空间频率; 误差项  $\sigma_t(x') = -2\pi f_s f_{\text{MOD}}(x'/4)$  为空间载频  $f_s$  的一个函数, 且是一个周期为 4 的小量;  $f_{\text{MOD}}$  为取余操作。

图 5 是图 4 傅里叶变换后的频谱图。在此频谱中, 信号谱周围存在一个明显的干扰频谱。比较可知, 该频谱与 CSI 算法中存在移相误差时构建的 STF 图的频谱形式相同, 且 (7) 式本身也与 CSI 法分析过程中存在移相误差时的表达形式相同<sup>[18-19]</sup>。可见, 即便是按照无移相误差的方式来构建 STF 图, 其频谱中仍然存在“误差”谱。

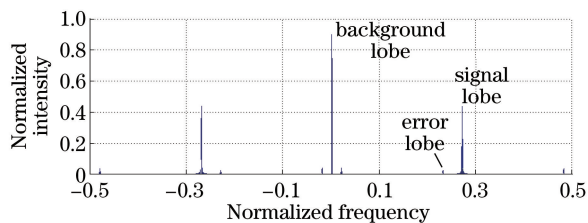


图 5 线性载频条纹图在移相量修正前构建的 STF 图频谱  
Fig. 5 Constructed frequency spectrum of STF image before correcting the phase-shift of linear carrier fringe diagram

由于误差项  $\sigma_t(x')$  在同一时变周期内具有线性变化的特性, 因此, 对构建 STF 图所需移相条纹图的移相步进量进行适当修正即可消除误差干扰项。修正后的移相条纹图的移相步进量可表示为

$$\delta' = \frac{2\pi + f_x}{4}. \quad (8)$$

此时构建的 STF 图可表示为

$$I'(x', y) = a \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] + b \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] \times \cos \left\{ 2\pi (f_s + f_t) x' + \Delta\varphi \left[ f_{\text{INT}} \left( \frac{x'}{4} \right), y \right] \right\}. \quad (9)$$

图 6 为线性载频条纹图在移相量修正后构建的 STF 图频谱, 对比图 5 可以发现修正后的信号谱周围无任何误差干扰谱。这说明, 在四步移相法中, 构建 STF 图所需的移相条纹图的移相步进量并非简单的  $\pi/2$ , 应当考虑移相条纹图本身线性载频的大小, 将移相步进量设定为 (8) 式所示的值。

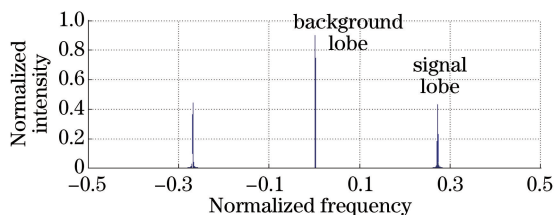


图 6 线性载频条纹图在移相量修正后构建的 STF 图频谱  
Fig. 6 Constructed frequency spectrum of the STF image after correcting the phase-shift of linear carrier fringe diagram

### 3 实验与分析

#### 3.1 实验

在实验中, 光源选取具有高相干性保偏激光器, 本实验中选用 JDSU-1003P 型激光器, 其输出波长  $\lambda$  为 632.8 nm 的保偏激光, 谱宽达到  $10^{-4}$  nm; 光纤选取单模保偏光纤, 本实验中采用的是 Thorlabs PM630-HP 型单模保偏光纤, 此款光纤纤径为 3.5  $\mu\text{m}$ , 光纤包层直径为 125  $\mu\text{m}$ , 即光纤间距  $d = 125 \mu\text{m}$ ; 条纹投射方向角  $\theta = 15^\circ$ ; 光纤发射端到被测件所在平面的中心距离  $D = 0.75$  m。为计算方便, 将其看成是远心光路, 由此可计算出 (3) 式中的  $k$  值为 2.3 mm/rad。

实验于存在气流和空气振动的普通环境中进行, 实验被测件为一个棱台。实验中采集的被测件的干涉图如图 7 所示, 图 7 (a)~(d) 采集的是移相步进量修正后 [即  $\delta = (\pi_2 + f_s)/4$ ] 的 4 幅经过物体高度调制的变形干涉图, 图 7 (e) 是由这 4 幅变形干涉图构建的 STF 图。

对构建出的 STF 图进行傅里叶变换操作, 其频谱如图 8 所示, 此时信号谱周围并无干扰频谱。



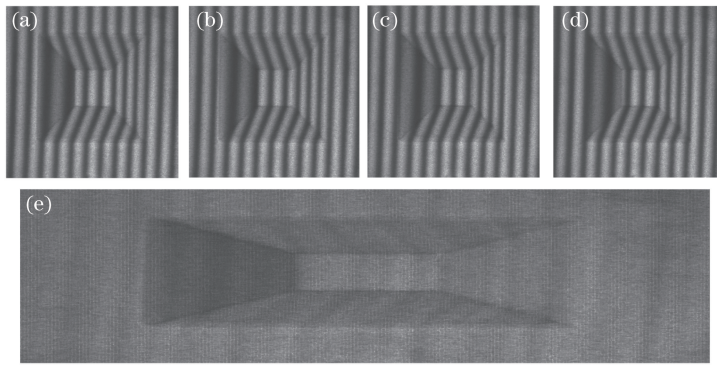


图7 采集的条纹图。(a)~(d)顺序采集的4幅移相变形干涉图;(e)由4幅干涉图构建的STF图

Fig. 7 Captured fringes. (a)-(d) Four phase-shift deformation interferograms captured orderly;

(e) constructed STF image with the four interferograms

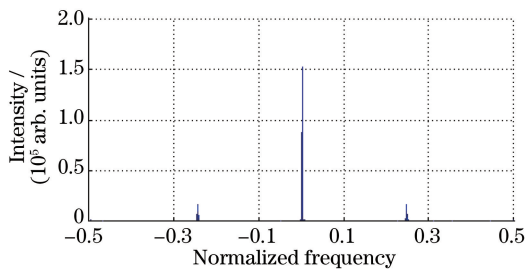


图8 STF图频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of STF image

对信号谱进行相位提取,此时得到的相位是STF图中的相位 $\Delta\varphi(x'/4, y)$ ,再对此相位按顺序抽取便得到最终要求取的相位 $\Delta\varphi(x, y)$ ,图9是根据此相位求得的三维面形复原图。测量结果显示,STF图相位提取技术能够准确地提取相位,因而能够较真实地实现被测件的三维重建。

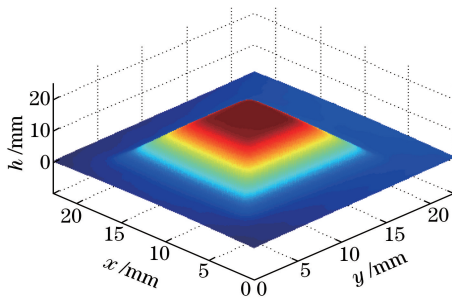


图9 面形复原图

Fig. 9 Restored map of surface

### 3.2 分析

在光纤干涉条纹投影三维面形测量中,通过精密电压源控制PZT的伸缩量来改变光程,从而实现相位移动。电压和相位移动量具有线性关系,但在实际测量过程中,需要标定移相量随电压变化的关系曲线,而这势必会引入移相误差。同时,光纤结构

本身对外部环境变化比较敏感,光纤干涉投影的条纹图容易受到气流、振动等环境因素的影响。

将STF法的相位提取结果与传统的四步移相法以及两种传统的移相误差抑制相位提取算法——OAF法<sup>[14]</sup>和AIA法<sup>[16]</sup>进行比较。图10为以上几种相位提取算法的相位提取结果比较。图10(a)为STF图法得到的相位提取结果;图10(b)为传统的四步移相算法得到的相位提取结果,可以看到明显的衍生条纹,说明该测量系统中存在移相误差;图10(c)和图10(d)分别为OAF法和AIA法得到的相位提取结果,这两种方法能在一定程度上抑制移相误差,但不能完全消除移相误差,并且相位提取结果中的高频噪声比较明显;图10(e)为上述4种相位提取方法中间一个截面的测试结果对比图。对比上述测量结果可以发现,STF图法相位提取技术不仅能够抑制移相误差对测试结果的影响,还能消除测试结果中的高频噪声,起到滤波的作用。

## 4 结论

首先讨论了在STF图法相位提取技术中,当移相条纹图本身存在线性载频时,通过对移相步进量的适当修正来消除信号谱周围存在的干扰频谱的可行性;然后将STF图法相位提取技术应用到光纤干涉条纹投影三维面形的测量中,得到了良好的面形复原结果。进一步,将STF法与传统的四步移相法、OAF法和AIA法的相位提取精度进行比较,结果显示:STF法不仅能够有效抑制移相器不准确以及气流、振动等环境因素引起的移相误差,还可以消除杂散光等引起的高频噪声,起到滤波的作用。STF法同样也适用于其他与移相法相位提取技术相关的应用中,通过抑制移相误差来提高测量精度。

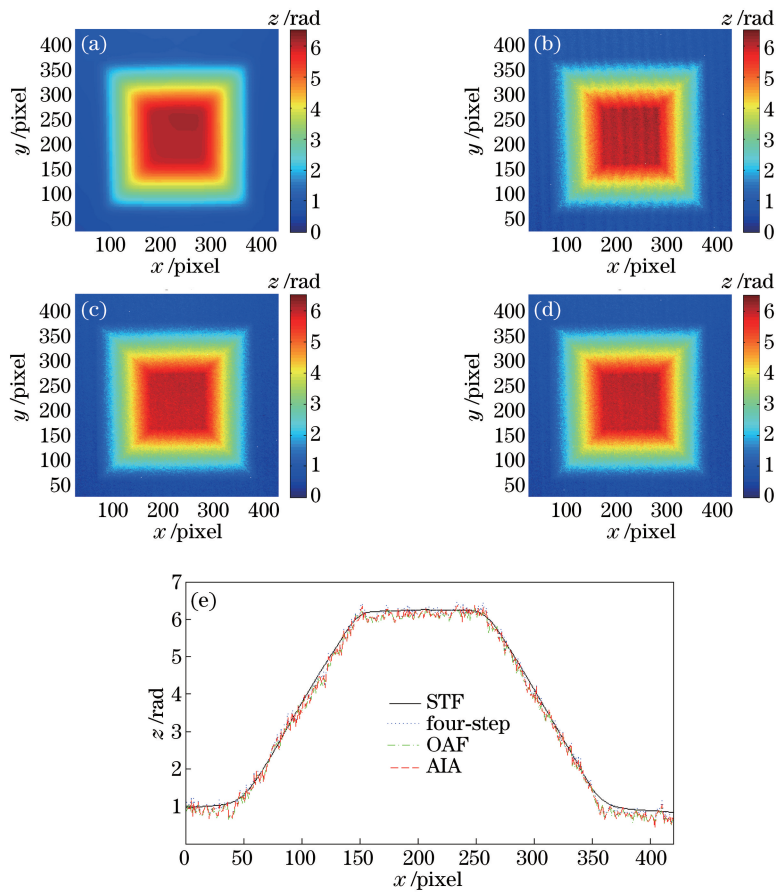


图 10 4 种相位提取方法的提取结果。(a) STF 图法;(b) 四步移相法;(c) OAF 法;(d) AIA 法;  
(e) 4 种方法中间一个截面的对比图

Fig. 10 Extraction results using four phase extraction methods. (a) STF method; (b) four-step phase-shift method;  
(c) OAF method; (d) AIA method; (e) comparison of the four methods in a cross section

## 参 考 文 献

- [1] Fan H, Tian F, Tan Y S. Three dimensional profilometry using a single mode optical fiber phase shifting method [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(2): 135-138.  
范华, 田丰, 谭玉山. 单模光纤相移三维轮廓测量术 [J]. 中国激光, 1998, 25(2): 135-138.
- [2] Mao X J, He Y, Zhu R G. Fiber-optic interferometer projection based on wavelength phase-shifting for three-dimensional profile measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101202.  
毛心洁, 何勇, 朱荣刚. 基于波长移相的光纤投影三维轮廓测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101202.
- [3] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [4] Flores J L, Muñoz A, Ordoñez S, *et al.* Color-fringe pattern profilometry using an efficient iterative algorithm [J]. Optics Communications, 2017, 391: 88-93.
- [5] Sun S J, Zhai A P, Cao Y P. A fast algorithm for obtaining 3D shape and texture information of objects [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312001.  
孙士杰, 翟爱平, 曹益平. 一种快速获取物体三维形貌和纹理信息的算法 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312001.
- [6] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070003.
- [7] Su X Y, Tan S X, Xiang L Q, *et al.* Complex object shape measurement using FTP method [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(9): 1228-1233.

- 苏显渝, 谭松新, 向立群, 等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1228-1233.
- [8] Kemaio Q, Wang H X, Gao W J. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses[J]. Applied Optics, 2008, 47(29): 5408-5419.
- [9] Huang J J, Chen W J, Su X Y, *et al.* Application of wavelet transform in modulation measurement profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0707001.  
黄静静, 陈文静, 苏显渝, 等. 小波变换在调制度测量轮廓术中的应用[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0707001.
- [10] Li J X, Cui Y J, Zhu R H, *et al.* Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0808002.  
李建欣, 崔艳军, 朱日宏, 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808002.
- [11] Zhu R H, Chen L, Wang Q, *et al.* Phase-shift interferometry and its application[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 85-88.  
朱日宏, 陈磊, 王青, 等. 移相干涉测量术及其应用[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 85-88.
- [12] Schwider J, Burow R, Elssner K E, *et al.* Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. Applied Optics, 1983, 22(21): 3421.
- [13] de Groot P J. Vibration in phase-shifting interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(2): 354-365.
- [14] Zhu R H, Chen J B, Wang Q, *et al.* A new algorithm on phase shifting interferometry—the overlapping averaging 4-frame algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(12): 1288-1293.  
朱日宏, 陈进榜, 王青, 等. 移相干涉术的一种新算法: 重叠四步平均法[J]. 光学学报, 1994, 14(12): 1288-1293.
- [15] Okada K, Sato A, Tsujiuchi J. Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase shift in phase shifting interferometry[J]. Optics Communications, 1991, 84(3/4): 118-124.
- [16] Wang Z Y, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms[J]. Optics Letters, 2004, 29(14): 1671-1673.
- [17] Servin M, Cywiak M, Malacara-Hernandez D, *et al.* Spatial carrier interferometry from M temporal phase shifted interferograms: squeezing interferometry[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9276-9283.
- [18] Li B, Chen L, Tuya W L, *et al.* Carrier squeezing interferometry: suppressing phase errors from the inaccurate phase shift[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 996-998.
- [19] Li B, Chen L, Xu C, *et al.* The simultaneous suppression of phase shift error and harmonics in the phase shifting interferometry using carrier squeezing interferometry[J]. Optics Communications, 2013, 296: 17-24.
- [20] Cheng J L, Gao Z S, Yuan Q, *et al.* Carrier squeezing interferometry with  $\pi/4$  phase shift: phase extraction in the presence of multi-beam interference[J]. Applied Optics, 2016, 55(8): 1920-1928.