

基于分区背景估计的两步相移干涉相位盲解调算法

周志盛^{1,2}, 董玉明^{1,2*}, 焦国华^{1,2}, 鲁远甫^{1,2}, 吕建成^{1,2}

¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

²香港中文大学, 香港 999077

摘要 为了提高两步相移干涉测量术的相位重建精度,提出了一种基于分区背景估计的相位盲解调算法。该算法选取干涉图中的一系列零值点作为种子,围绕种子生成 Voronoi 图,并将干涉图划分为若干区域,将区域内全部点背景设置为种子点背景,最后拼接为完整背景。对该算法进行了数值模拟和实验分析。数值模拟结果表明,理想情况下该算法解调相位的均方根误差(RMSE)接近实际背景法。实验结果表明,相比传统低通滤波方法,该算法解调相位的 RMSE 降低了 16%。

关键词 测量; 相干光学; 相移干涉; 解调相位; 分区背景估计

中图分类号 TB96 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011201

Phase Blind Demodulation Algorithm for Two-Step Phase-Shifting Interferometry Based on Zoned Background Estimation

Zhou Zhisheng^{1,2}, Dong Yuming^{1,2}, Jiao Guohua^{1,2}, Lu Yuanfu^{1,2}, Lü Jiancheng^{1,2}

¹Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

²The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

Abstract To improve the phase reconstruction accuracy of two-step phase-shifting interferometry measurement method, a phase blind demodulation algorithm based on zoned background estimation is proposed. In the algorithm, a sequence of zero value points in interferograms are picked out as seeds. A Voronoi figure surrounding these seeds is created, and the Voronoi figure segments each interferogram into several zones. The background of all points in these zones is set as the seed background, and a whole background is obtained when we combine these seed backgrounds. Numerical simulation and experimental analysis are conducted. Numerical simulation results show that the root-mean-square error (RMSE) of demodulation phase of the proposed algorithm is close to that of the method with real background. Experimental results show that the demodulation phase RMSE is reduced by 16% compared with the traditional low-pass filtering method.

Key words measurement; coherent optics; phase-shifting interferometry; demodulation phase; zoned background estimation

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 120.4630

1 引言

相移干涉测量术(PSI)是实现光学相位测量的有效方法之一^[1]。传统相移干涉测量需要干涉图间产生特定或者相等的相移,但实际中相移值往往偏离理想值,使得测量精度急剧下降^[2]。广义相移干涉术(GPSI)作为该问题的一种解决方法,能够从任意未知相移值的多幅干涉图中恢复待测相位^[3-4]。其中,两步相移干涉只需要相移一次,系统结构和测量过程简单,能够有效避免机械振动和空气扰动的影响,而且可以测量动态相位,吸引了越来越多研究人员的关注^[5]。两步相移干涉研究的重点和难点在于相移值的提取和

收稿日期: 2016-08-31; **收到修改稿日期:** 2016-09-13; **网络出版日期:** 2016-12-29

基金项目: 深圳市技术开发项目(CXZZ20140903152826677)

作者简介: 周志盛(1987—),男,博士,助理研究员,主要从事光电测量技术方面的研究。E-mail: zs.zhou@siat.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: ym.dong@siat.ac.cn

相位的重建。研究人员对两步相移值的提取算法进行了大量的研究^[6-11]。Muravsky 等^[7]提出的相关系数法和 Niu 等^[10]提出的内积商法的计算过程简单,在条纹数较多时具有较高精度;Deng 等^[8]提出了最大比率法,在条纹数较少时也能够获得较好的效果。目前,虽然相移值提取算法已经成熟,但对相位重建方法的研究仍然较少。当前使用最广泛的相位重建方法是计算测量相位的正切函数^[7-10],该方法需要去除干涉图背景,因此背景的获取精度决定了相位重建的精度。获取背景的简单方法是记录物光和参考光的强度图^[7,9],该方法相位重建精度高,但是总共需要记录 4 幅图像,该方法的操作复杂度与四步随机相移法相同,未发挥两步相移测量的优势,而且在某些情况下(如同轴光路中)很难分时记录物光和参考光的强度图。因此,纯粹记录两步相移干涉图的盲解调算法更具有实际意义。通用的方法为采用低通滤波获取背景估计^[8,10],但是条纹数过少或相位分布不均匀会导致估计精度不高,从而影响相位重建精度。

针对以上问题,提出了一种基于分区背景估计的两步相移干涉相位盲解调算法。首先寻找干涉图中满足特定条件的点,计算这些点的准确背景数据,以这些点为种子生成相应的区域,用种子点的背景组成区域内全部点的背景。该方法是一种局部平均的方法,理论上能够准确体现背景分布趋势。基于该算法,进行了数值模拟和实验,得到了较好的结果。

2 算法理论

2.1 基本理论

两步相移干涉图的强度 I_1 、 I_2 可以表示为

$$\begin{cases} I_1 = A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos \varphi \\ I_2 = A_o^2 + A_r^2 + 2A_o A_r \cos(\varphi + \theta) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 A_o 、 A_r 分别为物光和参考光的振幅, φ 为需要测量的相位, θ 为相移值。定义干涉图的反衬度 $\gamma = 2A_o A_r / (A_o^2 + A_r^2)$, 背景值 $a = A_o^2 + A_r^2$, 则(1)式可改写为

$$\begin{cases} I_1 = a(1 + \gamma \cos \varphi) \\ I_2 = a[1 + \gamma \cos(\varphi + \theta)] \end{cases}. \quad (2)$$

选取 $I_1 = 0$ 和 $I_2 = 0$ 的点作为特殊点。假设 $I_1(x_k, y_k) = 0$, 由于 $|\cos \varphi| \leq 1, 0 \leq \gamma \leq 1$, 因此 $\cos \varphi = -1, \gamma = 1$ 。 $\varphi(x_k, y_k) = \pi \pm 2k\pi$, 将上述信息代入(2)式可得

$$a(x_k, y_k) = I_2(x_k, y_k) / [1 + \cos(\pi + \theta)], \quad (3)$$

式中 θ 可以通过已有的两步提取算法得到。

通过上述方法,可以得到一系列点的集合 $P = \{(x_k, y_k)\}$ 。将点集合 P 称为种子,这些种子点的干涉图背景是可以准确估计的。围绕种子生成多个区域,将干涉图划分为各个分区的组合,并采用 Voronoi 图法进行区域生成^[12-13]。记 S 为平面上 n 个点的集合,对于 S 中任意两个不同的点 p 和 q ,将平面上到 p 的距离不大于到 q 的距离的全部点的集合定义为 p 的优势区域,即

$$D_{\text{dom}}(p, q) = \{x \in R^2 \mid \delta(x, p) \leq \delta(x, q)\}, \quad (4)$$

式中 $\delta(\cdot)$ 为欧几里得距离函数。明显优势区域为由 pq 连线垂直平分线划分的半个平面。对于 S 内全部 $q \neq p$ 的点,求 p 的优势区域 $D_{\text{dom}}(p, q)$, 然后求全部优势区域的交集,即

$$R_{\text{reg}}(p) = \bigcap_{q \in S - \{p\}} D_{\text{dom}}(p, q). \quad (5)$$

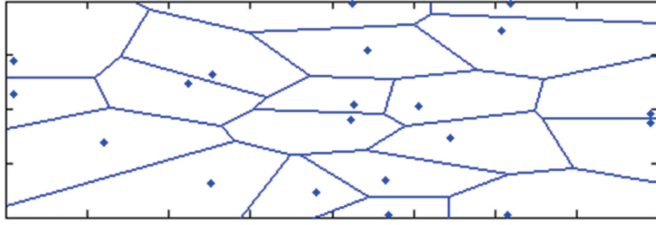
(5)式为 $n-1$ 个平面的交集,构成边数不大于 $n-1$ 的凸多边形,称为点 p 的 Voronoi 多边形。图 1 为种子 P 生成 Voronoi 图的示意图。图中方点为种子,包围种子的多边形为相应的 Voronoi 多边形。

利用 Voronoi 图将干涉图分为若干区域的集合 $Z = \{z_k\}$ 。对于区域 z_k 内的全部点,认为其背景等于对应种子点的背景,由其生成干涉图背景值 a 的估计值,即

$$\hat{a} = \{a = a_k \mid a \in z_k\}. \quad (6)$$

为了减小某些不具有区域代表性的区域种子点背景数据引入的误差,假设背景连续变化,以此对 a 进行平滑滤波,可得

$$a' = L_{\text{pf}}(a), \quad (7)$$

图1 种子 P 生成的 Voronoi 图示意图Fig. 1 Diagram of Voronoi figures generated by P seeds

式中 L_{pl} 为低通滤波器的滤波函数。两幅干涉图去除背景后的光斑强度分布 \tilde{I}_1 、 \tilde{I}_2 以及需要测量的相位 φ 可以表示为^[8]

$$\begin{cases} \tilde{I}_1 = I_1 - a, \tilde{I}_2 = I_2 - a \\ \varphi = \arctan [(\tilde{I}_1 \cos \theta - \tilde{I}_2) / \tilde{I}_1 \sin \theta] \end{cases} \quad (8)$$

现有的解调方法几乎都是围绕(8)式开展,对于

$$\tan \varphi = \cot \theta - \tilde{I}_2 / (\tilde{I}_1 \sin \theta) \quad (9)$$

令 $k = \tilde{I}_2 / \tilde{I}_1$, 可得 $\Delta\varphi = -\Delta k \cos^2 \varphi / \sin \theta$ 。相位重建误差与 Δk 成比例,假设背景的估计误差为 Δa , 则有

$$\Delta k = \frac{(I_2 - I_1)\Delta a}{(I_1 - a)^2} \quad (10)$$

由(10)可知,相位重建误差与背景估计误差成比例,背景估计精度越高,相位重建精度越高。

上述方法只需要记录两幅干涉图,不需要记录物光和参考光的强度分布,属于一种盲解调方法。在盲解调方法中,传统的背景估计采用低通滤波的方法^[8,10],利用全局平均值代替真实值,该方法仅适用于背景变化幅度较小的情况,当背景变化幅度较大或者相位分布不均匀时,该方法存在较大误差。基于分区背景估计的方法,并采用局部平均的思想,使用特殊点的背景值代替局部区域的背景值,可充分得到背景强度的分布趋势,并且得到较高的特殊点背景值的计算精度。

2.2 等效零值点选取

由于存在对比度,干涉图某些区域不会出现零值点(即使相位分布足够均匀),因此只能指定阈值,认为绝对值小于阈值的点为等效零值点。当阈值过小时,某些区域找不到等效零值点,这些区域的背景估计误差较大;当阈值过大时,某些区域将会出现密集等效零值点,增加了计算负担,阈值过大还会增大计算背景误差。因此,需要设计合理的等效零值点指定方法。具体实现方法如下:

- 1) 指定一个较大阈值 t , 认为 $|I(p_k)| < t$ 的点为初始零值点,得到一系列覆盖干涉图的初始零值点集合 $\{p_k\}$;
- 2) 将干涉图均匀划分为 $M \times N$ 个区域 $\{z_{ij}\}$, 每个区域内包含 0 个或多个初始零值点;
- 3) 寻找每个区域 z_{ij} 内的初始零值点 p_{ij} , 使 $|I(p_{ij})|$ 最小,得到最终等效零值点集合 $\{p_{ij}\}$;
- 4) 按照集合 $\{p_{ij}\}$ 生成 Voronoi 图,对于干涉图进行区域划分并估计背景分布。

3 数值模拟

对该算法进行数值模拟仿真。仿真参数为:CCD 像素分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $15 \mu\text{m}$;参考光波分布 $A_r(x, y) = A_{r0} \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma_r^2]$, 其中 $A_{r0} = 7.5, \sigma_r = 0.01$ 。物光波分布 $A_o(x, y) = A_{o0} \exp[-(2x^2 + y^2)/2\sigma_o^2]$, 其中 $A_{o0} = 7, \sigma_o = 0.01$ 。待测相位分布 $\varphi(x, y) = \lambda \times 2\pi [3(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] / h + \text{peaks}(512)$, 式中 h 为相位调制系数, $h = 33$;激光波长 $\lambda = 512 \text{ nm}$; $x_0 = 150 \text{ pixel}$; $y_0 = 170 \text{ pixel}$; $\text{peaks}(\cdot)$ 为产生一个包含 6 个局部极值点曲面的函数。两幅干涉图间的相移值为 $\pi/3 \text{ rad}$;随机噪声为高斯白噪声,信噪比为 20。仿真生成的干涉图如图 2 所示。

基于内积商法提取得到的相移值为 1.06 rad 。按照记录真实背景法、低通滤波法、分区背景估计法 3 种

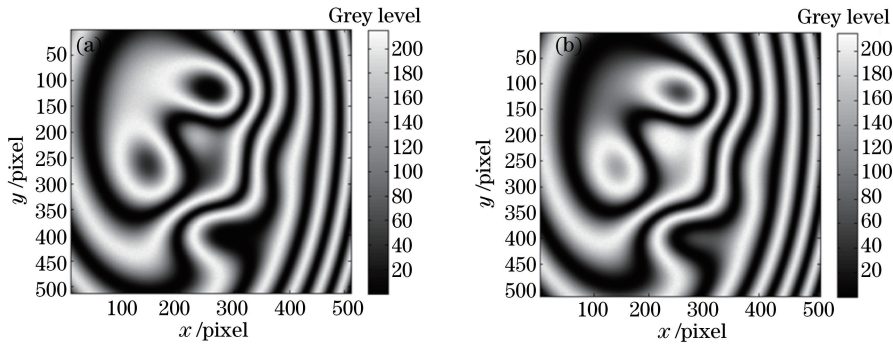


图 2 仿真生成的干涉图。(a) 初始干涉图；(b) 相移后的干涉图

Fig. 2 Interferograms generated in simulation. (a) Initial interferogram; (b) interferogram after phase-shifting

方法进行解调。图 3 为利用分区背景估计法估计背景的过程,图 3(a)~(d)分别为初始零值点、最终等效零值点、初始背景和滤波背景。图 4 为 3 种方法获取的结果,其中,图 4(a)~(c)为背景图像对比图,图 4(d)~(f)为解调相位误差对比图。与低通滤波法相比,分区背景估计法获得的背景更接近真实背景分布。图 4(d)~(f)对应的均方根误差(RMSE)分别为 0.019,0.071,0.027 rad。分区背景估计法的均方根误差比低通滤波法小,而且接近真实背景法的均方根误差。

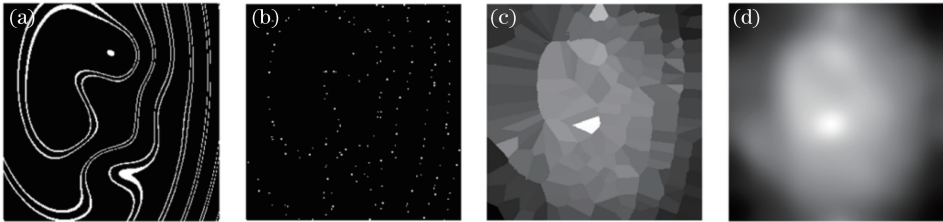


图 3 (a) 初始零值点；(b) 最终等效零值点；(c) 初始背景；(d) 平滑滤波背景

Fig. 3 (a) Initial zero points; (b) final equivalent zero points; (c) initial background; (d) smooth filtering background

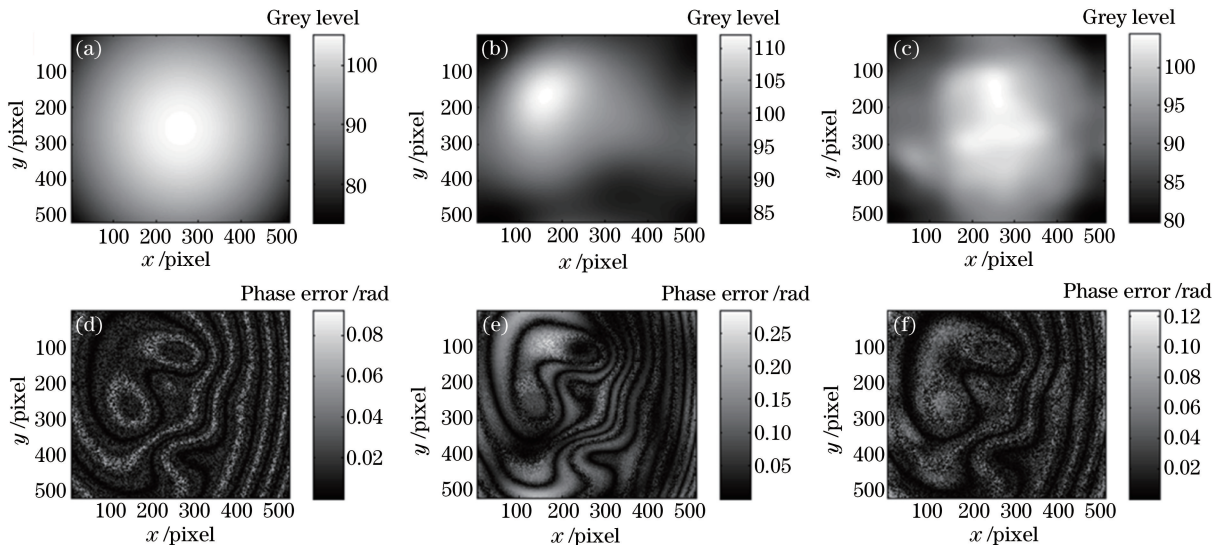


图 4 不同方法的解调结果。(a) 真实背景法；(b) 低通滤波法；(c) 分区背景估计法；

(d)~(f) 分别为背景对应于图 4(a)~(c)的相位重建误差

Fig. 4 Demodulation results of different methods. (a) Real background method; (b) low-pass filtering method;

(c) zoned estimation background method; (d)-(f) phase reconstruction errors corresponding to Fig. 4(a)-(c)

研究不同参数组合下低通滤波法和分区背景估计法得到解调相位的均方根误差。首先分析调制度的影响,表 1 为不同 A_{00} 下低通滤波法和分区背景估计法的解调相位的均方根误差。由表 1 可见,物光和参考光的振幅相差越大,条纹调制度越低,区域零值点缺失越严重,背景估计误差越大;当调制度过低时,分区背景

估计法的重建误差比直接滤波法大。其次,分析相位分布的影响,表2为不同 h 下低通滤波法和分区背景估计法的解调相位的均方根误差,由表2可知, h 越大,相位变化范围越小,干涉条纹数越少;无论是低通滤波法还是分区背景估计法,其重建误差都随条纹数的减少而增大,其中分区背景估计法误差更小,只有当条纹数小于1且大部分区域零值点缺失时,相位重建误差才会急剧上升。表1、2表明,分区背景估计法的效果依赖于零值点分布的均匀性,但是大多数情况下优于低通滤波法。令低通滤波法的解调相位的均方根误差为 E_{LPF} ,分区背景估计法的解调相位的均方根误差为 E_{Zoned} 。

表1 不同 A_{00} 下两种方法的解调相位的均方根误差($A_{r0}=7.5$)Table 1 RMSE of demodulation phase under different A_{00} ($A_{r0}=7.5$)

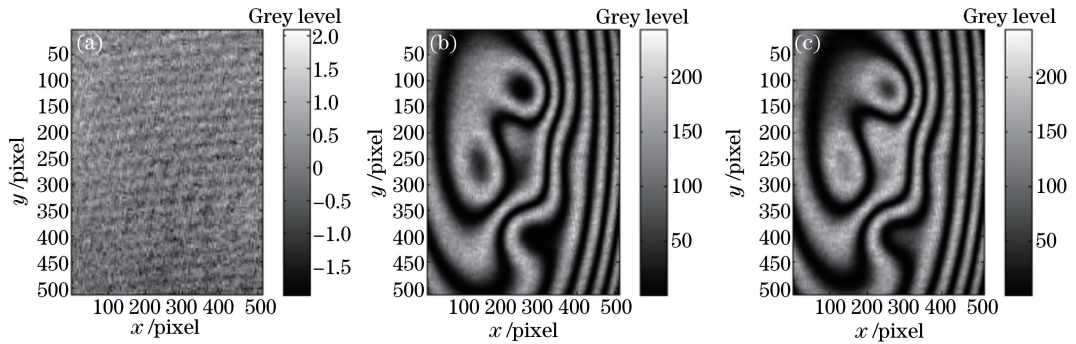
A_{00}	7.5	6.5	5.5	4.5	3.5
$E_{\text{LPF}}/\text{rad}$	0.071	0.071	0.071	0.071	0.072
$E_{\text{Zoned}}/\text{rad}$	0.026	0.027	0.052	0.118	0.218

表2 不同 h 下两种方法的解调相位的均方根误差($A_{00}=7$)Table 2 RMSE of demodulation phase under different h ($A_{00}=7$)

h	15	33	50	100	200
$E_{\text{LPF}}/\text{rad}$	0.063	0.071	0.105	0.174	0.236
$E_{\text{Zoned}}/\text{rad}$	0.026	0.027	0.034	0.064	0.195

上述数值模拟中,物光和参考光是光滑分布的,而实际中由于漫反射和散射的作用,光斑呈随机散斑分布。光斑的随机涨落使单点的振幅和周边区域振幅的一致性减弱,降低了分区背景估计法的效果。

从实验中采集了一幅参考光斑的图像强度 I_r ,计算其振幅 A_r 并进行归一化处理,将归一化振幅叠加到 $A_r(x,y)$ 和 $A_0(x,y)$ 上,模拟光斑的随机涨落,将涨落幅度与光斑强度的比例系数设为 κ ,模拟得到的振幅分布 A_r 和模拟干涉图如图5所示。表3为不同 κ 下低通滤波法和分区背景估计法的解调相位的均方根误差。散斑随机涨落对两种方法都有影响,且对分区背景估计法的影响更大。当散斑涨落幅度超过一定范围时,分区背景估计法的效果不如传统的低通滤波法的效果好,因此需要控制散斑效应对光斑振幅的影响,这也与高精度干涉测量中需要采用旋转扩散器均匀化^[14]等方法控制光斑均匀性是一致的。

图5 考虑散斑效应的仿真图。(a) 振幅分布 A_r ; (b) 初始干涉图; (c) 相移后的干涉图Fig. 5 Simulation figures considering speckle effect. (a) Amplitude distribution A_r ;

(b) initial interferogram; (c) interferogram after phase-shifting

表3 不同 κ 下两种方法的解调相位的均方根误差Table 3 RMSE of demodulation phase under different κ

κ	0.05	0.10	0.30	0.50	0.70
$E_{\text{LPF}}/\text{rad}$	0.072	0.075	0.105	0.154	0.265
$E_{\text{Zoned}}/\text{rad}$	0.032	0.037	0.082	0.144	0.387

4 实验

实验系统原理图如图6(a)所示,光束经过分光后,一束光透过待测物体后被反射镜反射,将再次通过物体的反射光作为物光;另一束光通过光楔后被反射镜反射,将再次通过光楔的反射光作为参考光;物光和参

考光发生干涉后被探测器接收。在垂直光束的方向上(图中箭头方向)移动光楔,参考光束的光程整体发生改变,从而引入相移^[15-16]。待测物体为一个双凸透镜。实验中,激光波长为 632.8 nm,探测器像素尺寸为 $2.5 \mu\text{m}$,分辨率为 $2080 \text{ pixel} \times 1552 \text{ pixel}$,从中截取 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的区域作为干涉图。实验中记录了相移前后的两幅干涉图,并记录了物光和参考光的强度分布,获取的干涉图如图 6(b)、(c)所示。

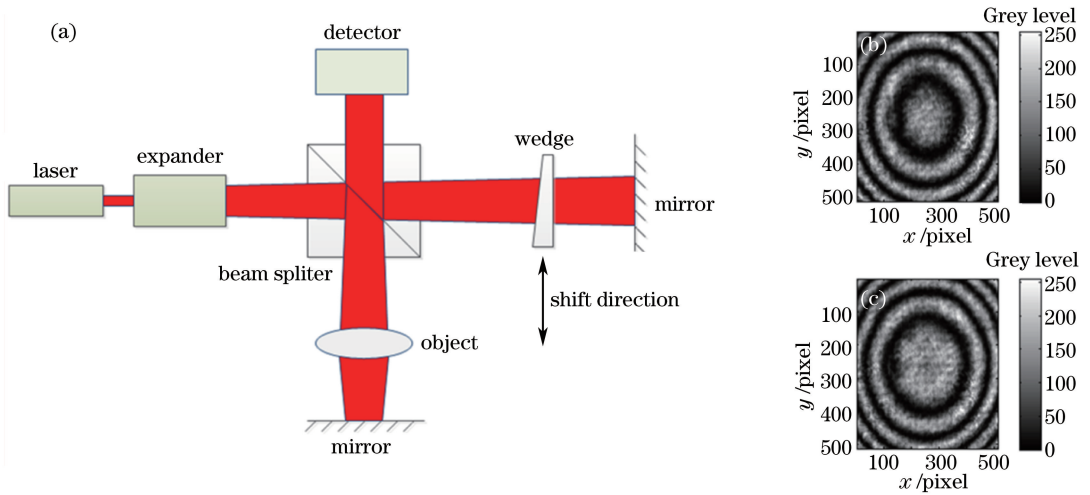


图 6 (a) 实验系统原理图; (b) 初始干涉图; (c) 相移后的干涉图

Fig. 6 (a) Diagram of experimental system; (b) initial interferogram; (c) interferogram after phase-shifting

采用内积商法提取相移值,得到相移值为 1.54 rad。采用真实背景法、低通滤波法以及分区背景估计法分别进行相位解调,获取的缠绕相位如图 7 所示。由于真实背景法的解调精度较高,重建误差很小,因此将真实背景法得到的解调相位作为参考相位,计算解调相位的均方根误差。采用低通滤波法和分区背景估计法得到的解调相位的均方根误差分别为 0.245 rad 和 0.206 rad。相比低通滤波法,利用分区背景估计法得到的解调相位的均方根误差降低了 16%,但是误差降低的幅度不大,说明分区背景估计法仍然存在一定的局限性,该局限性是由于测量透镜的透过率较高,物光和参考光变化幅度非常小,因此散斑效应的随机涨落影响非常明显。根据记录的物光强度图像,计算涨落幅度的相对平均值系数 κ ,得到 $\kappa = 0.3$,与表 3 结果相吻合,即高的涨落系数会使解调效果变差。因此,测量光斑应尽量均匀,以减少散斑的影响。为提高光斑均匀性,一方面可以通过在硬件上添加旋转扩散器、空间滤波器等来减弱随机散斑,另一方面可以在软件上进行干涉图滤波以进一步降低环境因素的影响。

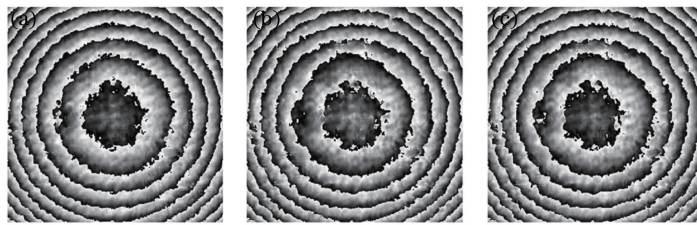


图 7 不同方法得到的解调缠绕相位。(a) 真实背景法; (b) 低通滤波法; (c) 分区背景估计法

Fig. 7 Wrapped phases demodulated obtained with different methods. (a) Real background method; (b) low-pass filtering method; (c) zoned background estimation method

5 结 论

提出了一种基于分区背景估计法两步相移干涉相位盲解调算法。选取干涉图零值点计算其背景,以此作为种子点将干涉图分成若干区域,再将种子点背景作为区域内全部点的背景。该方法属于局部平均思想,可表征背景强度的分布趋势。对该算法进行了数值模拟和实验分析,结果表明,分区背景估计法相比传统低通滤波法,解调相位的均方根误差降低了 16%。但是,该方法要求干涉图零值点分布均匀性好,而且受散斑随机涨落的影响较大。因此,该方法适用于干涉条纹均匀性较好的场合,在测量中应该尽量减小散斑效

应。后续工作将会针对如何降低散斑随机涨落的影响展开。

参 考 文 献

- [1] Schwider J, Falkenstoefer O R, Schreiber H, *et al.* New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(8): 1883-1885.
- [2] Zheng Donghui, Chen Lei, Li Jinpeng, *et al.* Position registration for interferograms and phase-shifting error calibration in dynamic interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0226002.
郑东晖, 陈磊, 李金鹏, 等. 动态干涉仪干涉图位置配准及相移误差校正[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0226002.
- [3] Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong, *et al.* An adaptive phase selecting method of wavelength tuning at long interference cavity length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112004.
郭仁慧, 李建欣, 朱日宏, 等. 长干涉腔波长相移计算的自适应相位筛选法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112004.
- [4] Wen Gang, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.* Calibration of Fizeau wavelength-tuned phase-shifting interferometer based on two-frame differential average phase-shifting algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1108004.
文刚, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于两帧差分平均相移算法标定斐索型波长相移干涉仪[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1108004.
- [5] Deng Lijun, Yang Yong, Shi Bingchuan, *et al.* Two-step phase-shifting digital holography based on extraction of phase shift[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209014.
邓丽军, 杨勇, 石炳川, 等. 基于相移量提取的两步相移数字全息术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209014.
- [6] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, *et al.* Simple direct extraction of unknown phase shift and wavefront reconstruction in generalized phase-shifting interferometry: Algorithm and experiments[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 776-778.
- [7] Muravsky L I, Ostash O P, Voronyak T I, *et al.* Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3): 305-312.
- [8] Deng J, Wang H, Zhang F, *et al.* Two-step phase demodulation algorithm based on the extreme value of interference[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4669-4671.
- [9] Guo C S, Sha B, Xie Y Y, *et al.* Zero difference algorithm for phase shift extraction in blind phase-shifting holography[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 813-816.
- [10] Niu W, Zhong L, Sun P, *et al.* Two-step phase retrieval algorithm based on the quotient of inner products of phase-shifting interferograms[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(8): 085703.
- [11] Zhou Zhisheng, Dong Yuming, Zhang Yizhou, *et al.* Phase shift extraction algorithm by special points in two-step generalized phase-shifting interferometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0508004.
周志盛, 董玉明, 章逸舟, 等. 特殊点的两步广义相移干涉相移值提取算法[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0508004.
- [12] Aurenhammer F. Voronoi diagrams - a survey of a fundamental geometric data structure[J]. *ACM Computing Surveys*, 1991, 23(3): 345-405.
- [13] Fortune S. A sweep line algorithm for Voronoi diagrams[J]. *Algorithmica*, 1987, 2(1-4): 153-174.
- [14] Lowenthal S, Joyeux D. Speckle removal by a slowly moving diffuser associated with a motionless diffuser[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(7): 847-851.
- [15] Song J B, Lee Y W, Lee I W, *et al.* Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(20): 3989-3992.
- [16] Disawal R, Dhanotia J, Prakash S. Phase-shifting lateral shearing interferometry using wedge-plate and interferometric grating[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7534-7539.