

文章编号 1004-924X(2014)08-2007-07

基于光强自标定移相算法检测光学面形

刘 江^{1,2*}, 苗二龙¹, 曲 艺¹, 隋永新¹, 杨怀江¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:考虑菲佐型波长移相干涉仪中波长可调谐激光器光强与调节电压之间的关系会对相位计算精度造成影响, 本文提出了一种基于光强自标定的波长移相算法。首先, 分析了波长可调谐激光器调节电压与输出光强之间的关系, 建立了数学模型; 然后, 依据最小二乘判据, 推导出了波长移相干涉仪的光强自标定移相算法。最后, 实施了仿真实验, 通过计算机生成背景光强具有一定变化的 12 幅干涉图, 利用所提出的算法进行了相位恢复。结果表明, 提出的算法可以很好地免疫激光器的光强变化, 实现高精度的相位恢复。对口径为 100 mm 的平面镜的测量结果显示 RMS 为 0.005λ , PV 为 0.073λ 。与 ZYGO 干涉仪测量结果比较显示, 两次测量面形的偏差 RMS 为 0.0014λ , PV 为 0.022λ 。得到的结果证明了算法的可行性及在菲佐型波长移相干涉仪中的实用性。

关键词:菲佐干涉仪; 波长移相; 移相算法; 光强自标定; 面形检测

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2007

Measurement of optical surface based on intensity self-calibration phase-shift algorithm

LIU Jiang^{1,2*}, MIAO Er-long¹, QU Yi¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

- (1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
* Corresponding author, E-mail: liujiang0521@gmail.com

Abstract: As the relationship between output intensity and modulation voltage of a modulation laser in Fizeau interferometer will effect the accuracy of phase calculation, this paper proposes an intensity self-calibration phase-shifting algorithm. Firstly, the relationship between output intensity and modulation voltage of the modulation laser was analyzed, and a mathematical model was established. Then, on the basis of least square estimation, the intensity self-calibration phase-shifting algorithm was deduced. Finally, a simulation experiment was performed. The 12 interferograms with changed backgrounds were generated by computers, and their phases were retrieved. The experiment indicates that the algorithm immunes the intensity change well, and retrieves the phase accurately. The measuring results for a flat mirror with a caliber of 100 mm show that the calculated phase precision is RMS of 0.

收稿日期: 2013-07-30; 修订日期: 2013-09-26.

基金项目: 国家重大科技专项资助项目 (No. 2009X02205)

005λ, and PV of 0.073λ. As a comparison with a ZYGO interferometer for the same flat mirror, the deviations are RMS of 0.0014λ, and PV of 0.022λ. Both simulation and experiment results show that the proposed intensity self-calibration phase-shifting algorithm is feasible and practical in the Fizeau interferometer with wavelength tuning.

Key words: Fizeau interferometer; wavelength phase-shifting; phase-shifting algorithm; intensity self-calibration; surface measurement

1 引言

在高精度光学检测中,移相干涉检测可以实现波长量级的非接触式检测,应用最为广泛。目前,移相干涉仪常用压电陶瓷(PZT)元件推动参考镜来实现移相,同时根据特定移相步长采集若干幅干涉图,并通过相应的移相算法求解出待测波前的相位分布^[1-3]。然而,在使用 PZT 作为移相器件进行移相时,不可避免地会出现机械应力的变化,特别是当待测光学面较大时,PZT 在推动光学面移动时会出现不均匀的应力,从而出现非直线运动;同时,由于光学面的运动和受力不均匀,也会导致测量系统产生内部振动,从而引起误差,导致测量结果的准确性下降^[4-5]。

波长移相检测通过改变可调谐激光器的波长来实现,不需要硬件推动参考镜,从而简化了干涉仪的机械结构,减少了误差源,进一步提高了检测精度^[6-8]。在实际测量中,由于可调谐激光器调节电压光强及波长之间存在一定的非线性关系,即移相干涉中,随着输出波长的变化,每幅干涉图的背景光强是变化的。若直接应用 PZT 移相干涉中的算法,会造成计算误差。针对此问题,研究人员提出了多种计算波长移相干涉中实际相位分布的算法^[9-13]。于瀛洁等^[9]提出了基于时域傅里叶变换的波长移相算法。该方法通过改进 Takeda 算法,结合傅里叶变换和差分计算来得到相位分布,但是受到傅里叶变换自身精度的限制,精度只能达到微米量级。郭仁慧等^[11]提出了波长调谐随机移相算法,在长干涉腔条件下,选取若干幅随机移相干涉图进行迭代计算;但移相量要小于 2π ,且在长腔条件下对可调谐激光器的波长分辨率要求较高,调节精度要达到 10^{-6} nm。

本文结合实验室自行研制的菲佐型波长移相干涉仪所用的可调谐激光器及上述研究中存在的

问题,首先分析了一般可调谐激光器的电压、光强和波长的关系,并建立相应的数学模型,进而通过最小二乘判据推导出适用于干涉仪自补偿标定的波长移相算法。仿真实验中,通过计算机生成背景光强具有一定变化的 12 幅干涉图,利用所提出的算法进行相位恢复。同时,在实际实验中测试了标准的参考平面,并与 ZYGO 公司的干涉仪测量结果进行了比较。

2 波长移相干涉仪算法的理论分析

2.1 可调谐激光器标定及分析

实验室自行研制的菲佐型波长移相干涉仪的光路结构如图 1 所示。

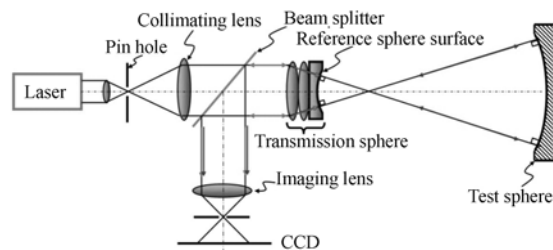


图 1 菲佐型波长移相干涉仪光路图

Fig. 1 Optical scheme of Fizeau interferometer

用菲佐型干涉仪测量光学面形,得到的干涉图光强分布为:

$$I_j(x, y) = I_M \cdot \{1 + \gamma \cdot \cos[\varphi(x, y) + \delta_j]\}, \quad (1)$$

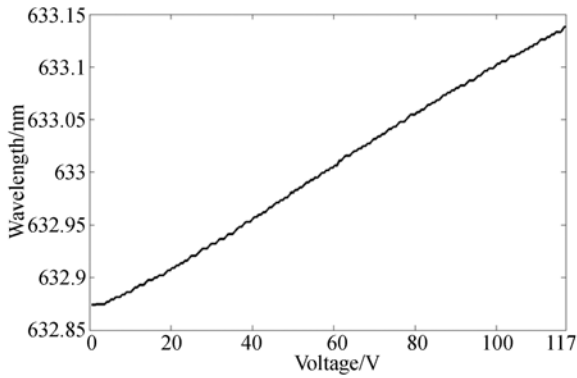
式中: I_M 为基准光强, δ_j 为移相相位, γ 为对比度, $\varphi(x, y)$ 为实际待测相位, j 为移相干涉图序号。

在波长移相干涉中,移相相位与波长之间的关系为:

$$\delta_j = \frac{\Delta\lambda(x, y)}{\lambda_0^2} 4\pi[W(x, y) + L], \quad (2)$$

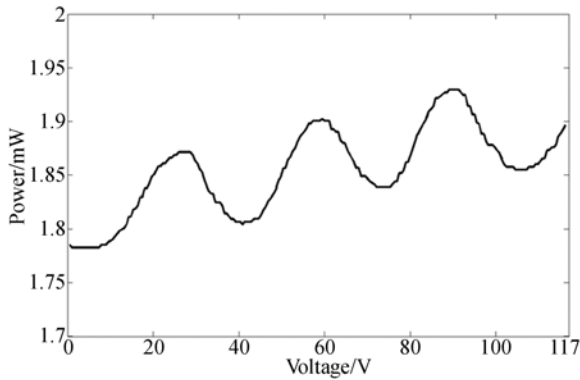
式中: $\Delta\lambda$ 为波长变化量, λ_0 为中心波长, $W(x, y)$ 为面形高度, L 为干涉腔长。

一般来说,波长可调谐激光器的电压调制与输出波长呈线性关系,而电压调制与输出功率则呈非线性关系。例如实验室所用的 NewFocus 公司的 6000Vortex 型可调谐激光器,其中心波长为 632.99 nm,波长调节分辨率为 10^{-5} nm,实验标定出其电压调制与输出波长之间的关系和电压调制与输出光功率之间的关系如图 2 所示。



(a) 输出波长与电压调制的关系

(a) Relation between output wavelength and modulation voltage



(b) 输出光功率与电压调制的关系

(b) Relation between output laser power and modulation voltage

图 2 6000Vortex 可调谐激光器电压调制和输出波长及输出光功率之间的关系

Fig. 2 Relations of output wavelength and laser power with modulation voltage of 6000Vortex laser

由图 2 可以看出,输出波长与调制电压呈良好的线性关系,因此,波长变化量与电压变化量的关系为:

$$\Delta\lambda = \rho \cdot \Delta V, \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为波长变化量, ΔV 为电压变化量, ρ 为

波长变化的电压调制系数。而输出光功率与电压调制之间的关系较为复杂,是余弦函数和线性函数的叠加,因此,拟合输出光功率与电压调制之间的关系得到:

$$\Delta I = \alpha \cdot \Delta V + \beta \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{T_i}(V_0 + \Delta V)\right], \quad (4)$$

式中: ΔI 为输出光功率的变化量, ΔV 为电压变化量, α, β 为调制系数, T_i 为调制周期, V_0 为调制偏移电压。

同时,从可调谐激光器的标定图中可以看出,光功率的变化约为最大值的 5%,在恢复待测面形时会引入相应的相位计算误差。因此,需要设计相应的移相算法,以消除光强变化对测量精度的影响。

2.2 自标定补偿的波长移相干涉算法

通过实验标定结果,结合式(1)、式(2)、式(3)、式(4)可以得出:

$$I_j(x, y) = I_{M0} \cdot \{1 + \alpha \cdot C \cdot \delta_j + \beta \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{T_i}(V_0 + C \cdot \delta_j)\right]\} \cdot \{1 + \gamma \cdot \cos[\varphi(x, y) + \delta_j]\}, \quad (5)$$

其中: C 为光强自标定系数,

$$C = -1 / \left[\frac{4\pi}{\lambda_0^2} \cdot (L) \cdot \rho \right], \quad (6)$$

L 是干涉仪腔长。

展开式(5),分离出每次相位变化量与光强变化之间的关系,得到:

$$I_j(x, y) = A_1 + A_2 \cdot \cos(\delta_j) + A_2 \cdot \sin(\delta_j) + A_4 \cdot \delta_1 + A_5 \cdot \delta_1 \cdot \cos(\delta_j) + A_6 \cdot \delta_j \cdot \sin(\delta_j) + A_7 \cdot \cos(C \cdot \delta_j) + A_8 \cdot \cos(C \cdot \delta_j) \cdot \cos(\delta_j) + A_9 \cdot \cos(C \cdot \delta_j) \cdot \sin(\delta_j) + A_{10} \cdot \sin(C \cdot \delta_j) + A_{11} \cdot \sin(C \cdot \delta_j) \cdot \cos(\delta_j) + A_{12} \sin(C \cdot \delta_j) \cdot \sin(\delta_j), \quad (7)$$

其中:

$$A_2 = I_{M0} \cdot \gamma \cdot \cos[\varphi(x, y)], \quad (8)$$

$$A_2 = -I_{M0} \cdot \gamma \cdot \sin[\varphi(x, y)]. \quad (9)$$

因此,待测面形相位可以由式(8)、式(9)求得:

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \cdot \left[\frac{A_3(x, y)}{A_2(x, y)} \right]. \quad (10)$$

依据最小二乘判据,测量值与实际值间的误差为:

$$S = \sum_{j=1}^N (I_j' - I_j)^2, \quad (11)$$

式中: I_j' 为实际测量的干涉图光强分布。

由式(11)得到式(7)中系数 $A_1 \sim A_{12}$, 为:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{X}(\delta_j)^{-1} \cdot \mathbf{B}(\delta_j), \quad (12)$$

其中: $\tilde{\mathbf{A}}$ 为系数 $A_1 \sim A_{12}$ 组合的列向量, $\mathbf{X}(\delta_j)$ 为变量 δ_j 组合的 12×12 矩阵, $\mathbf{B}(\delta_j)$ 为测量光强值 I_j' 与变量 δ_j 调制的列向量。

在矩阵 $\mathbf{X}(\delta_j)$ 和 $\mathbf{B}(\delta_j)$ 中均存在着光强自标定系数 C , 因此, 算法应与可调谐激光器标定相结合, 从而计算得出系数向量 $\tilde{\mathbf{A}}$, 进而通过式(10)恢复出待测面形相位。

由实验室的非佐型波长移相干涉仪所使用的可调谐激光器标定图可以看出, 波长调节约为 0.28 nm , 若腔长为 5 mm , 单次移相步长不能超过 0.0233 nm , 此时对应的相位变化为 1.17π ; 若腔长为 1 mm , 此时对应的相位为 0.23π , 因此, 干涉腔长应尽量大于 5 mm , 以方便调节。同时, 由于可调谐激光器的调节分辨率为 10^{-5} nm , 调节精度在 $3 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5} \text{ nm}$, 干涉腔长应尽量小于 100 mm , 否则所需的单次调节步长小于调节精度, 无法进行调节。

3 数值仿真实验及分析

为了验证本文算法的可行性, 设定待测面形为抛物斜面 $Z = 0.25(X^2 + Y^2) + 0.05X + 0.02Y$, 利用计算机生成移相步长为 $\pi/4$ 的 12 幅干涉图样, 干涉图大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 如图 3 所示。中心波长 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$, 光强变化的调



图 3 可调谐激光器光强变化下的 12 副干涉图

Fig. 3 Twelve interferograms with changing of laser power intensity

制系数 $\alpha = 0.0015$, $\beta = 0.05$, 光强变化周期 $T_i = 32$, 调制偏移电压 $V_0 = 10 \text{ V}$, 波长变化的调制系数 $\rho = 0.0024$, 干涉腔长为 5 mm , 由此计算出标定补偿系数 $C = -2.657$ 。

通过所给出的移相算法计算式(12)和式(7), 代入上述系数, 得出此时的相位恢复计算公式为:

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \cdot \left\{ \frac{A_3(x, y)}{A_2(x, y)} \right\},$$

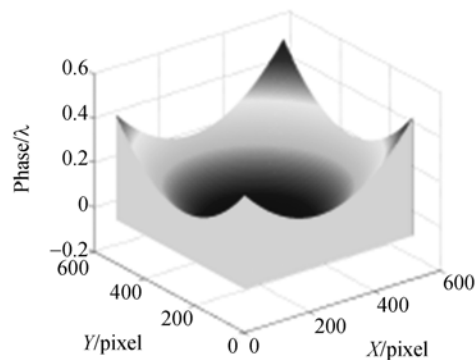
$$A_3(x, y) = 0.193 I_1 - 0.164 I_2 + 0.215 I_3 - 0.17 I_4 - 0.296 I_5 - 0.01 I_6 - 0.0796 I_7 + 0.2 I_8 + 0.116 I_9 + 0.0362 I_{10} + 0.268 I_{11} - 0.307 I_{12}, \quad (13)$$

$$A_2(x, y) = 0.0344 I_2 - 0.277 I_3 - 0.0907 I_4 + 0.114 I_5 + 0.123 I_6 + 0.1 I_7 + 0.123 I_8 + 0.114 I_9 - 0.0907 I_{10} - 0.277 I_{11} + 0.0344 I_{12}. \quad (14)$$

通过式(13), 式(14)计算出待测面形的相位分布, 与标准理想平面的偏差如图 4 所示。

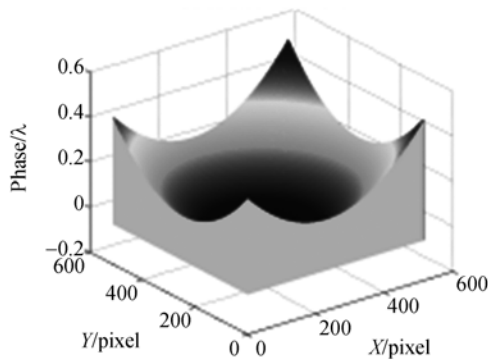
从图 4 可以看出, 应用光强自标定波长移相算法计算还原得到的波前相位与原始波前相位相差在 $10^{-5} \lambda$ 。分析结果可知, 波前相位残差 RMS 为 $1.5545 \times 10^{-6} \lambda$, PV 为 $1.4089 \times 10^{-5} \lambda$ 。仿真结果表明, 自补偿标定移相算法可以满足非佐型波长移相干涉仪高精度测量光学表面的要求。

同时, 考虑到实际检测中环境因素对测量结果的影响, 在计算机上模拟环境对测得干涉条纹造成的影响, 范围在 $\pm 0.02 \text{ fringe}$; 以及测量系统的响应误差, 范围在 $\pm 0.01 \text{ fringe}$, 模拟 50 次, 用于评价算法的抗干扰能力。实验结果如图 5 所示。

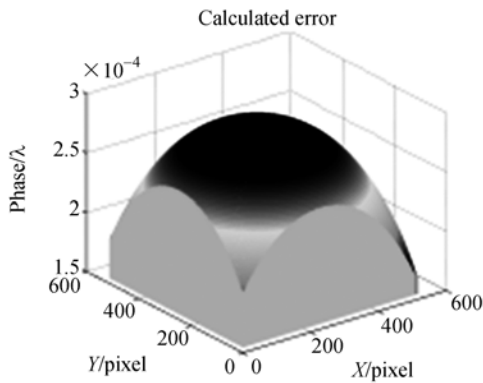


(a) 原始面形波前图

(a) Original wavefront



(b) 计算恢复波前图
(b) Calculated wavefront



(c) 计算波前相位残差图
(c) Error between original and calculated wavefronts
图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

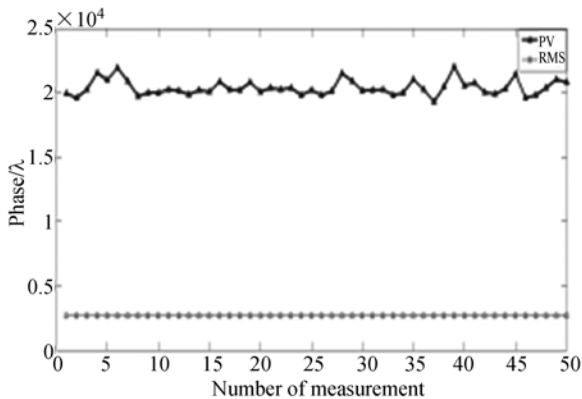
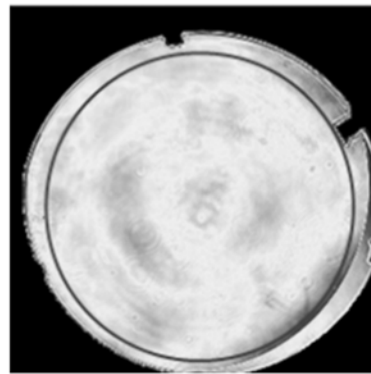


图 5 引入环境因素,50 次仿真计算得到的 PV 和 RMS
Fig. 5 PV and RMS calculated from 50-time simulations with environmental disturbance

由图 5 可以看出,在有一定环境扰动情况下,算法精度依然很高,PV 在 $2 \times 10^{-5} \lambda$ 左右,RMS 在 $2.5 \times 10^{-6} \lambda$ 左右。

4 实 验

本文应用自行研制的非佐型波长干涉仪对口径为 100 mm 的平面镜进行实验测量,其中干涉腔长为 5 mm。首先,通过干涉仪所用的 6000Vortex 型可调谐激光器标定结果,计算可以得出波长自标定波长系数 $C = -2.5486$; 然后进行 12 步移相测量标准平面镜。在处理数据时,由于边缘部分为装调部分,因此只取了镜面中央 87%(圈内)计算 RMS 和 PV,去除离焦和倾斜后 PV 为 0.073λ ,RMS 为 0.005λ ,如图 6 所示。



PV = 0.073λ, RMS = 0.005λ

图 6 光强自标定移相算法的平面测量结果
Fig. 6 Result of flat mirror measurement with self-calibration phase-shifting algorithm

同时,应用实验室的 ZYGO 公司的 Veri-FireMST™型干涉仪对同样的平面镜做了测量,测量结果为 PV = 0.055λ,RMS = 0.005λ,如图 7 所示。

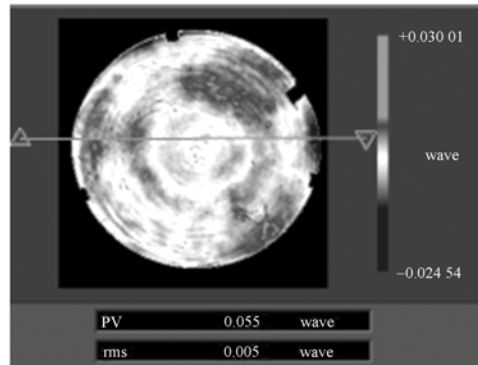
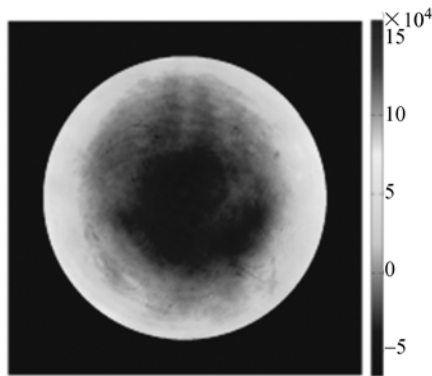


图 7 ZYGO 干涉仪测量平面结果
Fig. 7 Result of flat mirror measurement with ZYGO interferometer

由于两个干涉仪所用 CCD 的分辨率不一样 (波长移相为 $1\,024 \times 1\,024$, ZYGO 为 992×992), 因此在进行点对点的结果对比时, 对该结果进行了插值处理。同样的, 只选取镜面中央 87% 的部分, 消除离焦和倾斜后残差对比结果如图 8 所示。



PV=0.022 λ , RMS=0.0014 λ

图 8 两次测量结果的点对点残差计算

Fig. 8 Point to point deviation of two measurements

为了验证算法的稳定性, 重复标定激光器并测量平面镜, 50 次测试结果如图 9 所示。50 次测量 PV 的标准差为 $2.737\,8 \times 10^{-3} \lambda$, RMS 的标准差为 $1.090\,0 \times 10^{-4} \lambda$, 即 RMS 重复性在万分之一波长。实验结果表明, 在非佐波长移相干涉仪中, 光强自标定波长移相算法的精度与稳定性都达到了较高的水平。

参考文献:

- [1] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [2] GREIVENKAMP J E, BRUNING J H. *Phase Shifting Interferometry in Optical Shop Testing* [M]. 2nd Edition, New York: Wiley, 1992.
- [3] 任寰, 马力, 刘旭, 等. 多表面干涉下的光学元件面形检测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1144-1150.
REN H, MA L, LIU X, *et al.*. Optical element test with multiple surface interference[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1144-1150. (in Chinese)
- [4] de GROOT P J, DECK L L. Numerical simulation

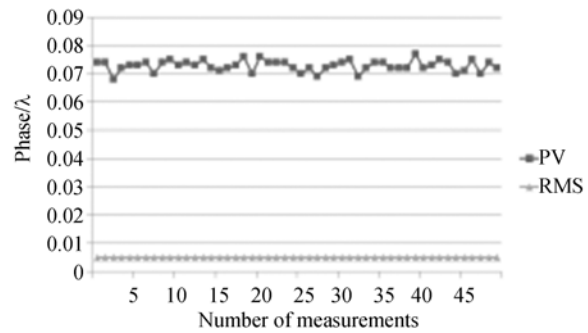


图 9 50 次对平面镜测量结果的 RMS 和 PV

Fig. 9 RMS and PV of fifty-time measurements on flat mirror

5 结 论

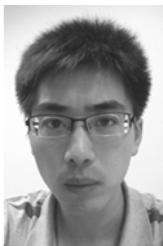
本文首先分析了可调谐激光器的标定曲线, 得出其调谐电压与输出光强和输出波长的一般性函数关系; 依据最小二乘判据, 推导得出适用于菲佐波长移相干涉仪的光强自标定移相算法。然后通过数值仿真验证了算法精度, 最后进行了光学平面镜实验测量。实验结果显示, PV 为 0.073λ , RMS 为 0.005λ , 并与 ZYGO 公司干涉仪的测量结果对比, 两者残差的 PV = 0.022λ , RMS = $0.001\,4 \lambda$, 同时通过 50 次测量验证了算法的稳定性, RMS 重复性在万分之一波长。由此表明, 光强自标定的波长移相算法在非佐型波长移相干涉中具有较高的实用性

of vibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(13): 2172-2178.

- [5] de GROOT P J. Vibration in phase shifting interferometry[J]. *JOSA A*, 1995, 12:354-365.
- [6] 王平, 王汝东, 田伟, 等. Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2100-2107.
WANG P, WANG R D, TIAN W, *et al.*. Design and analysis of the thermal stability for main frame in Fizeau interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2100-2107. (in Chinese)
- [7] 赵智亮, 夏伯才, 陈立华, 等. 相移干涉测量中相移误差的自修正[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1117-1121.
ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H, *et al.*. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2013, 21(5): 1117-1121. (in Chinese)
- [8] ISHII Y, ONODERA R. Phase-shift-locked interferometer with a wavelength-modulated laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42: 91-96.
- [9] 于瀛洁,张本好,焦云芳. 基于时域傅里叶变换的波长移相算法[J]. 计量学报, 2004, 25(4):301-313.
YU Y J, ZHANG B H, JIAO Y F. Algorithm of phase-shifting by wavelength tuning based on temporal DFT[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(4):310-313. (in Chinese)
- [10] 苏志德,史振广,苏东奇,等. 在随机和倾斜移相下光强归一化的迭代移相算法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112001.
SU ZH D, SHI ZH G, SU D Q, *et al.*. Iterative phase shifting algorithm with normalized intensity in the presence of random and tilt phase shifts[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):0112001. (in Chinese)
- [11] 郭仁慧,李建欣,朱日宏,等. 长干涉腔波长移相计算的自适应相位筛选法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112004.
GUO R H, LI J X, ZHU R H, *et al.*. An adaptive phase selecting method of wavelength tuning at long interference cavity length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):0112004. (in Chinese)
- [12] 郭仁慧,李建欣,朱日宏,等. 波长调谐随机移相算法的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0508002.
GUO R H, LI J X, ZHU R H, *et al.*. Research on the randomly phase shifting algorithm with wavelength tuning[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, 39(5):0508002. (in Chinese)
- [13] 苏志德,史振广,彭吉,等. 菲索干涉仪中精确移相的实现[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 244-250.
SU ZH D, SHI ZH G, PENG J, *et al.*. Implementation of accurate phase shift in Fizeau interferometer[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 244-250. (in Chinese)

作者简介:



刘 江(1988—),男,甘肃天水人,博士研究生,2011年于浙江大学获得学士学位,主要从事超高精度光学元件检测方面的研究。Email: liujiang0521@gmail.com

导师简介:



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1993年于长春理工大学获得硕士学位,1996年于北京理工大学获得博士学位,主要从事紫外光刻技术、光学信息融合、网络信息安全等方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)