

文章编号: 1001-3806(2015)04-0501-05

相位凝固技术中干涉信号调制解调误差分析

张晓青^{1,2}, 贾豫东^{1,2}, 曹文娟²

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院 测控技术与仪器系, 北京 100192; 2. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192)

摘要: 为了进一步减小基于相位凝固技术的激光反馈干涉系统测量运动物体微位移时的测量误差, 采用 MATLAB 数值仿真及曲线拟合的方法, 对移相间隔和外腔反射面振动幅度引起的系统误差进行了理论分析。在系统实验中依据相位凝固原理对物体运动产生的干涉信号进行采样, 获取多组光功率曲线, 在光功率曲线上实时判向并标记特征点。根据特征点重构被测物体的微位移曲线, 对重构得到的微位移台阶曲线进行多项式拟合以提高测量精度。结果表明, 在固定移相间隔为 $\pi/5$ 、激光器波长为 1550nm 的情况下, 测量分辨率优于 $\lambda/20$ (77.5nm), 实际测量的绝对误差最大值为 47.98nm, 峰峰值误差平均值小于 1nm。相位凝固技术调制解调干涉信号为微位移的方向辨识和高精度测量提供了新的解决方案。

关键词: 激光技术; 激光反馈干涉; 相位凝固技术; 调制解调; 重构; 微位移测量

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.016

Error analysis of interference signal modulation and demodulation in phase freezing technique

ZHANG Xiaoqing^{1,2}, JIA Yudong^{1,2}, CAO Wenjuan²

(1. Department of Measurement and Control Technology and Instrumentation, School of Instrumentation Science & Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology of Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to reduce measurement errors with a laser feedback interference system measuring micro displacements of moving objects based on phase freezing technique, system errors induced by intervals of phase shift and vibrating amplitudes of reflecting surface were analyzed theoretically by means of MATLAB numerical simulation, interpolation and curve fit. In system experiments, interference signals produced by moving objects were collected and sampled by phase freezing principle so as to obtain multiple curves of optical power. Feature points were marked on the optical power curves to judge moving direction and reconstruct micro-displacement curves. Polynomial fitting based on the reconstructed micro displacement curves improved system measurement precision. Experimental results show that measurement resolution is superior to $\lambda/20$ (77.5nm) when fixed interval of phase shift is $\pi/5$ and wavelength of laser is 1550nm. The maximum absolute error of actual measurement of micro-displacements is 47.98nm and the average value of peak-peak errors is less than 1nm. Phase freezing technique provides a new solution for laser feedback interferometer system to identify directions and realize high precision measurement of micro-displacements.

Key words: laser technique; laser feedback interference; phase freezing technique; modulation and demodulation; reconstruction; micro-displacement measurement

基金项目: 北京市教委科技计划面上资助项目 (KM201411232005); 现代测控技术教育部重点实验室资助项目 (5231423201); 北京市青年拔尖人才培养计划资助项目 (CIT&TCD201404122)

作者简介: 张晓青 (1967-), 女, 副教授, 现主要从事光纤传感技术及先进信号处理的研究。

E-mail: zxqbim@163.com

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-11

引言

激光反馈干涉是近年来兴起的一项精密测量技术, 主要由一支内封装光电探测器的激光器和一个外部反射物构成简单的测量光路, 适用于运动物体参量的测量, 例如速度^[1]、振动^[2]以及位移^[3-14]等, 其中关于微位移测量系统的报道居多。

在激光反馈干涉测量微位移的系统中, 测量分辨

率和方向辨识是限制其发展的重要瓶颈。目前,提高测量精度采用的方法主要有:干涉条纹细分法^[5-6];快速傅里叶变换方法解调干涉信号^[7-8];采用外腔相位调制与傅里叶分析的方法^[9-10]。在方向辨识方面,适度光反馈水平下的激光反馈干涉信号是非对称类锯齿波,倾斜方向敏感于外部反射物体的运动方向,为位移的方向辨识提供了新的途径^[11]。

本文中基于相位凝固技术对干涉信号进行调制解调^[12-13],在提高位移测量分辨率的同时对外部物体的运动方向进行辨识,并分别对移相间隔、外腔反射面振动幅度^[14]、重构拟合方法对微位移测量精度的影响进行了分析和处理,减小了系统测量误差。

1 测量系统及原理

相位凝固激光反馈干涉系统主要包括:集成光电二极管(photo diode, PD)的二极管激光器(laser diode, LD)及其驱动电路、电光相位调制器、准直透镜、外部反射物体、干涉信号调理电路、信号解调模块、微位移信号重构模块等,总体结构如图1所示。采用信号发生器在LD腔外的电光相位调制器上加载高频正弦信号,对激光进行两路相位调制,形成固定相位差,该两路相位差信号再次被外部物体微运动反射面调制,一部分光返回激光腔内与腔内光相互作用,形成干涉信号输出,探测器PD探测到的干涉信号经信号调理电路后导入到计算机中,编制计算机程序对干涉信号相同相位的点进行同步采样,可以分别得到多组具有固定调制相位的光功率信号,再由重构算法得到外部物体微位移曲线,实现微位移测量。

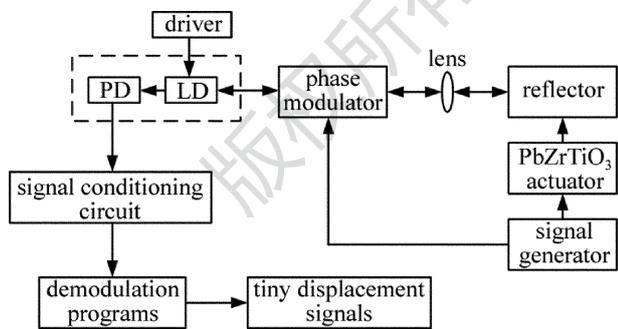


Fig. 1 Configuration of laser feedback interferometer system based on phase freezing technique

干涉信号相位凝固解调的处理过程包括以下步骤:探测干涉信号→去噪→相位凝固采样→光功率信号整形→采集过零特征点→判向→构建台阶函数→重建微位移曲线。

设适度光反馈水平下光电探测器接收到的干涉光强^[12-13]为:

$$I = I_0 \left[1 + \mu \cos \left(4\pi \frac{\nu}{c} L \right) \right] \quad (1)$$

式中, μ 为反馈强度系数, ν 为激光频率, L 为激光器出射面到达被测物表面的距离, I_0 为激光器的出射光强, c 为光速。设激光腔外总相位为 Φ ,则:

$$\Phi = 4\pi\nu L/c \quad (2)$$

另设 Φ_m 为激光经过相位调制器产生的附加相位, Φ_r 为外腔反射面运动光程差 ΔL 对应的相位,则有:

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_r \quad (3)$$

对于 Φ_m ,可利用相位调制器产生两路相位差为 $\pi/2$ 的调制相位,即:

$$\Phi_{m,1} - \Phi_{m,2} = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

那么,在干涉信号中会有两个光功率数据点与外腔反射面某一位置相对应。随着外部反射面的位置改变,探测器可得到一个包含两组光功率信号的干涉信号。采用相位凝固技术同步采样将两组光功率信号 P_1 和 P_2 分离,其中, P_1 对应调制相位 $\Phi_{m,1}$, P_2 对应调制相位 $\Phi_{m,2}$ 。在 P_1 和 P_2 中寻找两个相同的光功率点,分别对应时刻 t_1 和 t_2 ,它们的腔外总相位应该相同,即:

$$\Phi_{m,1} + \Phi_{r,1} = \Phi_{m,2} + \Phi_{r,2} \quad (5)$$

将(4)式带入,可得:

$$\Phi_{r,2} - \Phi_{r,1} = \pi/2 \quad (6)$$

根据前面 Φ_r 的定义可知:

$$(4\pi/\lambda)\Delta L = \pi/2 \quad (7)$$

因此,在 $[t_1, t_2]$ 时间内被测反射面光程差(位移)为:

$$\Delta L = \lambda/8 \quad (8)$$

实际上,此 ΔL 即为移相间隔为 $\pi/2$ 时重构位移的分辨率 R 。利用相位凝固技术,若移相间隔进一步减小,则测量分辨率会进一步提高,所得重构误差会进一步减小。

2 测量误差分析

2.1 移相间隔误差分析

若 $\Phi_{m,1} - \Phi_{m,2} = \pi/2$,可重构得到分辨率为 $\lambda/8$ 的被测物体位移,依次类推,若 $\Phi_{m,1} - \Phi_{m,2} = \pi/5$,可重构得到分辨率为 $\lambda/20$ 的被测物体位移。移相间隔、调制电压、采样时间点及分辨率的关系如表1所示,其中, V_π 是调制器半波电压, f_m 是调制频率, f_s 是采样频率。

根据表1中移相间隔与采样点的关系,对被测物位移进行重构,得到的是台阶位移曲线,与被测物实际位移曲线相比,台阶位移曲线存在明显的测量误差。随着分辨率的提高,台阶位移曲线与实际位移曲线的误差减小,如图2所示。

由图2和表2可以得出结论:移相间隔越小,则采

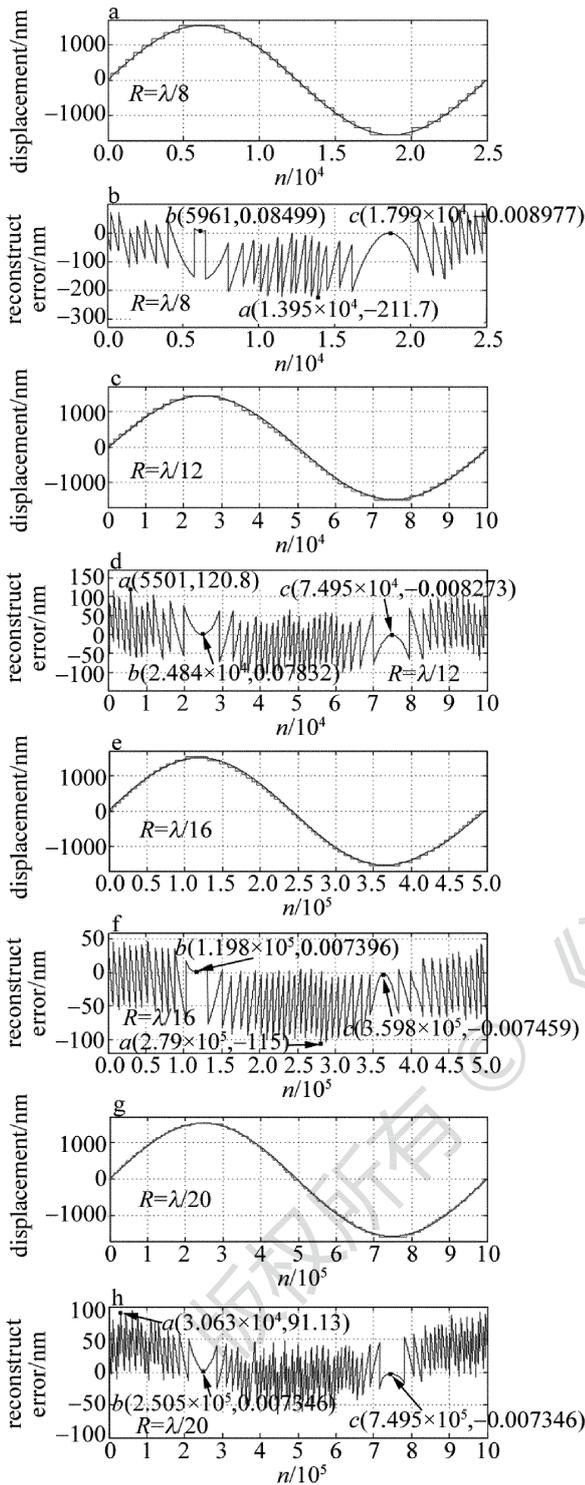


Fig. 2 Reconstruction step displacements and error curves of different resolutions

设重构微位移信号为 y_1 (见图 2 中的台阶曲线), 被测物的实际位移信号为 y_2 (见图 2 中的平滑曲线), 则重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差为 $e = |y_1 - y_2|$, 绝对误差最大值为 e_{max} (见图 2 中的 a 点); 重构位移与被测物实际位移之间的峰峰值误差为 $e_{p,1} = |y_{max,1} - y_{max,2}|$ (见图 2 中的 b 点), $e_{p,2} = |y_{min,1} - y_{min,2}|$ (见图 2 中的 c 点), 则峰峰值误差的平

Table 1 Relations among intervals of phase shifts $\Delta\Phi$, resolutions R , modulating voltages V and sampling numbers n

$\Delta\Phi/\text{rad}$	R/nm	V/V	n
$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\lambda}{8}$	$0, \frac{1}{2}V_\pi$	$0, \frac{f_s}{12f_m}$
$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\lambda}{12}$	$0, \frac{1}{3}V_\pi, \frac{2}{3}V_\pi$	$0, \frac{27f_s}{500f_m}, \frac{58f_s}{500f_m}$
$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\lambda}{16}$	$0, \frac{1}{4}V_\pi, \frac{2}{4}V_\pi, \frac{3}{4}V_\pi$	$0, \frac{f_s}{25f_m}, \frac{f_s}{12f_m}, \frac{27f_s}{200f_m}$
$\frac{\pi}{5}$	$\frac{\lambda}{20}$	$0, \frac{1}{5}V_\pi, \frac{2}{5}V_\pi, \frac{3}{5}V_\pi, \frac{4}{5}V_\pi$	$0, \frac{16f_s}{500f_m}, \frac{33f_s}{500f_m}, \frac{51f_s}{500f_m}, \frac{74f_s}{500f_m}$

均值为 $e_p = (e_{p,1} + e_{p,2})/2$, 不同分辨率情况下的测量误差如表 2 所示。

Table 2 Measurement errors of different resolutions

$\Delta\Phi$	R/nm	e_{max}/nm	$e_{p,1}/\text{nm}$	$e_{p,2}/\text{nm}$	e_p/nm
$\pi/2$	$\lambda/8$	211.70	0.0850	0.0090	0.0470
$\pi/3$	$\lambda/12$	120.80	0.0783	0.0083	0.0433
$\pi/4$	$\lambda/16$	115.00	0.0074	0.0076	0.0075
$\pi/5$	$\lambda/20$	91.13	0.0074	0.0074	0.0074

样次数越多, 得到的重构目标物体微位移的分辨率就越小, 相应地重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差、峰峰值误差也就越小。

2.2 外腔反射面振动幅度的选择误差分析

外腔反射面振动幅度的不同使重构位移的误差大小有所不同。在分辨率为 $\lambda/16$ 的情况下, 设外腔反射面振动幅度为 d_0 , 不同外腔反射面振动幅度所得的重构位移和误差曲线如图 3 所示, 其中, 台阶曲线为重构位移, 平滑曲线为实际位移, a 点绝对误差最大值为 e_{max} , b 点峰峰值误差为 $e_{p,1}$, c 点峰峰值误差为 $e_{p,2}$, 则峰峰值误差的平均值为 $e_p = (e_{p,1} + e_{p,2})/2$ 。

不同振动幅度情况下所得的误差如表 3 所示。由表 3 可知, 外腔反射面振动幅度越大, 得到的重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差最大值越大, 二者之间的峰峰值误差越大。这主要是因为调制干涉信号的过程当中外腔长度在变化, 也就是说外腔反射面振动幅度越大, 在同样的采样时间内, 外腔长度变化的就越多, 导致误差越大。为方便观察输出信号条纹, 本实验中选择外腔反射面振动幅度为 1550nm。

Table 3 Measurement errors of different vibrating amplitudes

d_0/nm	e_{max}/nm	$e_{p,1}/\text{nm}$	$e_{p,2}/\text{nm}$	e_p/nm
500	75.41	2.5000	5.0000	3.7500
1000	78.48	7.5000	7.5000	7.5000
1550	106.30	0.2681	0.0652	0.1667
2000	121.80	15.0100	15.0900	15.0500

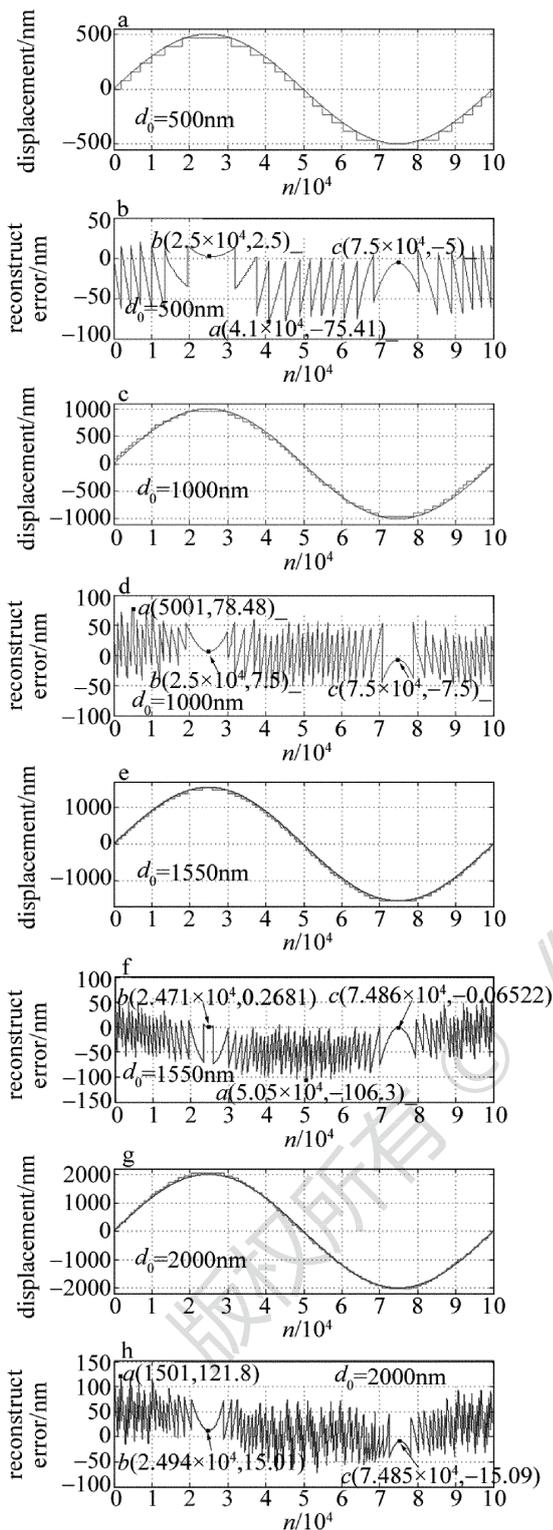


Fig. 3 Reconstruction step displacements and error curves of different vibrating amplitudes

2.3 拟合方法误差分析

重构位移信号为台阶曲线,它与外腔反射面实际位移之间有一定的误差,当选定外腔反射面的振动频率为 $f_0 = 10\text{Hz}$,外腔反射面的振动幅度为 $d_0 = 1550\text{nm}$ 时,对干涉信号 5 次采样,并得到重构位移与被测物实际位移之间的误差曲线,如图 2h 所示,重构位移与被

测物实际位移之间绝对误差最大值为 91.13nm ,两个峰峰值误差均为 0.0074nm 。为了减小重构位移与被测物实际位移之间的误差,可采用拟合的方法对重构位移进行处理。

2.3.1 1 阶线性插值拟合误差分析 为了进一步减小位移测量误差,选取台阶函数的折点作为特征点,使用 MATLAB 中的 interp 函数进行 1 阶线性插值,得到重构位移曲线 2,如图 4 所示。曲线 2 与图 4 中的被测物实际位移曲线 1 很接近,二者的误差曲线如图 5 中的曲线 2 所示,未进行 1 阶线性插值所得的误差曲线即为图 5 中的折线曲线 1。可以看出,1 阶线性插值后的误差曲线有了一定程度的减小。

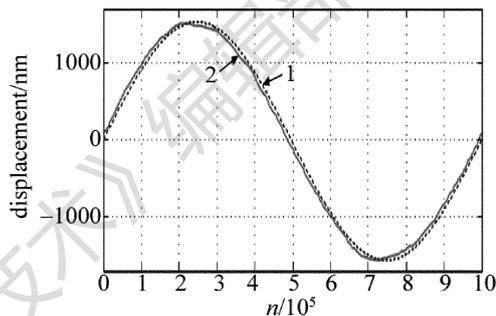


Fig. 4 Actual displacement curve and reconstruction displacement curve based on the first-order linear interpolation

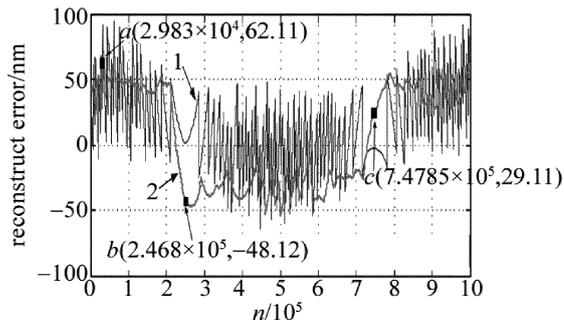


Fig. 5 Error curves before and after the first-order linear interpolation

由图 5 可知,经 1 维线性插值拟合后的重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差最大值为 62.11nm (见图 5 中 a 点),b 点峰峰值误差 $e_{p,1} = 48.12\text{nm}$,c 点峰峰值误差 $e_{p,2} = 29.11\text{nm}$,峰峰值误差平均值 $e_p = 38.615\text{nm}$ 。拟合后绝对误差最大值较未拟合情况变小,因此,1 维线性插值拟合方法可以有效地减小重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差;但因为选择重构位移曲线的折点作为拟合时的特征点,使得二者之间的峰峰值误差明显增加。

2.3.2 多项式拟合误差分析 为了进一步减小信号解调及重构所得的台阶曲线与被测物实际位移曲线之间的误差,对台阶曲线进行多项式拟合逼近,得到多项式重构位移曲线 2(即图 6 中的实线曲线 2)。可以看出,曲线 2 与被测物实际位移曲线 1(即图 6 中的虚线

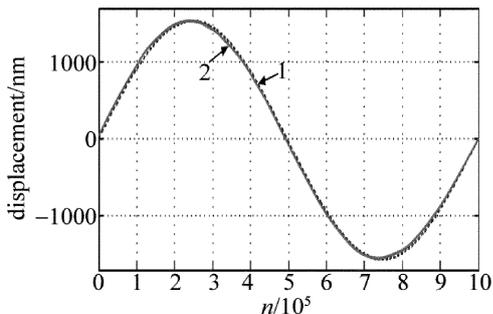


Fig. 6 Reconstruction displacement after polynomial fit and actual displacements

曲线 1) 重合度较好, 二者的误差曲线如图 7 的光滑曲线 2 所示, 相比未进行多项式拟合所得的误差曲线 1 (即图 7 中的折线误差曲线 1), 误差明显减小了。

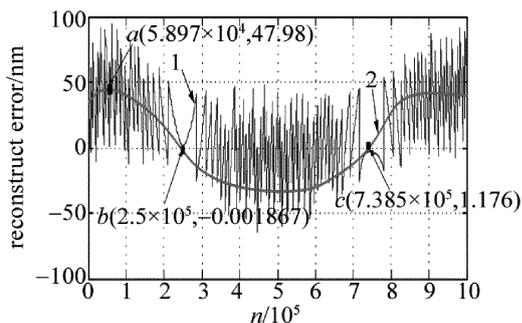


Fig. 7 Error curves before and after polynomial fit

由图 7 所示可知, 多项式拟合后的重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差最大值为 47.98nm (见图 7 中 a 点), b 点峰峰值误差 $e_{p,1} = 0.0019\text{nm}$, c 点峰峰值误差 $e_{p,2} = 1.1760\text{nm}$, 峰峰值误差平均值 $e_p = 0.5889\text{nm}$ 。多项式拟合后绝对误差最大值较未拟合和 1 维线性插值拟合情况都变小, 峰峰值误差也都减小了, 因此, 采用多项式拟合方法可以有效地减小重构位移与被测物实际位移之间的绝对误差。

3 结论

分析了激光反馈干涉系统采用相位凝固技术测量微位移的主要误差来源, 包括移相间隔、外腔反射面振动幅度以及重构位移的拟合方法等。分析得出: 减小移相间隔并增加采样次数使重构位移分辨率减小; 适当减小外腔反射面振动幅度使测量的绝对误差和峰峰值误差减小; 采用多项式拟合重构位移曲线较未拟合或 1 维线性插值拟合进一步减小了测量误差。系统实验表明了相位凝固技术在激光反馈干涉测量中能够实

现准确判向, 设置移相间隔灵活简便, 配合多项式拟合重构位移曲线, 有效提高了系统的测量精度。

参 考 文 献

- [1] ZHAO S J, ZHANG P, ZHANG Y Q, *et al.* Velocity measurement techniques based on laser feedback effect [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 160-165 (in Chinese).
- [2] LIU S G, LIU Q, LI Z R. Tiny vibration measurement based on all-fiber self-mixing interference [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 29-32 (in Chinese).
- [3] SIMONA O, MAURIZIO D, FRANCESCO D L, *et al.* Laser self-mixing interferometry for mechatronics applications [J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3527-3548.
- [4] JI J Y, YE H Y, YU Y G. Based on the optical feedback self-mixing interference displacement measurement algorithm design and filtering [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1): 89-92 (in Chinese).
- [5] LI Z Y, YU Y G, YE H Y. Measuring tiny displacement based on moderate optical feedback self-mixing interferometry [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 499-502 (in Chinese).
- [6] ZHANG G N, YE H Y, XUE Q, *et al.* Displacement measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 66-70 (in Chinese).
- [7] WANG M, NIE S P, LI M, *et al.* Self-mixing interferometer for micro displacement measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 428-435 (in Chinese).
- [8] ZHANG Z Y, GAO Y, ZHAO X H, *et al.* FFT phase detection method for self-mixing laser diode micro-displacement measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 071201 (in Chinese).
- [9] GUO D M, TAN S Q, WANG M. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 845-850 (in Chinese).
- [10] XIA W, HAO H, WANG F, *et al.* Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1208003 (in Chinese).
- [11] SHI B H, ZHAO J L, LI Z R. Numerical simulation and experimental study of displacement measurement based on self-mixing interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1415-1420 (in Chinese).
- [12] LIU H L, ZHANG X Q, CAO W J. Optical feedback interferometry based on phase-freezing technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1172-1176 (in Chinese).
- [13] LIU H L, CAO W J, WANG W. Laser feedback interference system based on phase-freezing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312006 (in Chinese).
- [14] YU Y G, YAN Y X. Emulation analysis of the relationship between measuring parameters and optical feedback self-mixing signal [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(5): 33-36 (in Chinese).