

文章编号:1004-4213(2011)08-1172-5

基于相位凝固技术的激光反馈干涉术

刘惠兰^{1,2}, 张晓青^{1,3}, 曹文娟³, 王俊杰¹

(1 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

(2 微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

(3 北京信息科技大学 光电信息与通信工程学院, 北京 100192)

摘 要:针对激光反馈干涉术, 提出基于相位凝固技术的调制解调方法, 用以提高位移测量的分辨率, 并设计了利用相位调制器进行调制的位移测量系统. 利用调制器进行外腔相位调制, 采集调制相位相对固定的干涉光信号, 通过解调重构得到被测的位移信息. 进行了信号调制、采样、重构技术的研究以及误差分析, 并通过仿真验证了方法的可行性. 结果表明, 采用 5 点相位凝固采样技术, 测量准确度可以达到 $\lambda/20$. 此方法可提高激光反馈干涉术的测量分辨率, 实现信号实时采集处理, 可用于位移的实时测量.

关键词:相位凝固技术; 激光反馈干涉; 位移测量; 电光调制器

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1172

0 引言

由于激光反馈干涉系统具有结构简单、紧凑、易准直和造价低等优点, 近年来得到了国内外研究人员的广泛关注, 针对激光反馈干涉技术的理论与应用开展了深入的研究^[1-3]. 激光反馈干涉技术在测量和传感领域具有广泛的应用前景, 包括光学器件或光学系统的特性测试^[4]、距离及位移的测量^[5], 振动测量^[6]、速度测量^[7]、形貌测量^[8]等.

通常采用条纹计数法的激光反馈干涉技术只能达到二分之一光波长的测量分辨率, 本文主要针对激光反馈干涉技术中位移的测量, 提出一种基于相位凝固技术的信号调制解调方案, 进行了调制解调算法仿真, 讨论了影响测量准确度的主要因素和解决方法.

1 激光反馈的基本理论

激光反馈干涉技术, 又称自混合干涉技术, 是指在激光应用系统中, 激光器输出光被外部物体反射或散射后, 其中一部分光又被反馈回激光器的谐振腔, 与腔内光混合, 反馈光携带了外部物体的信息, 当外部反射物的相对距离发生变化时, 输出光功率会随着这种变化而发生变化. 输出信号与传统的双光束干涉信号类似, 可利用激光器后部集成的光电

探测器或外部的光电探测器监测输出功率的变化.

系统基本结构如图 1. 激光二极管 (Laser Diode, LD) 的输出光经准直透镜准直后照射到被测物体上, 被测物表面又将一部分光反馈回激光腔, 携带外部物体信息反馈回激光内腔的光与腔内光相混合, 发生自混合干涉, 从而改变激光器的输出频率和功率. 通过改变激光器的输出光功率, 利用 LD 后部的光电探测器 (Photodetector, PD) 进行光功率探测. 检测信号通过放大及信号处理得到测量结果.

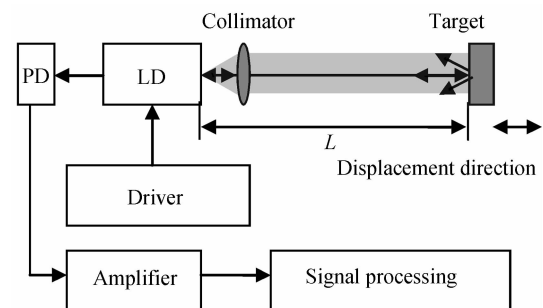


图 1 传统激光反馈干涉系统基本结构

Fig. 1 Schematic diagram of traditional laser feedback interferometer system

工作在光反馈状态下的激光器可用三镜腔模型描述. 激光器输出光功率被反馈光调制, 因此光反馈干涉光强为

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

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60908016) 资助

第一作者: 刘惠兰 (1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学传感及光电测试技术. Email: liuhuilan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2010-10-28; 修回日期: 2011-02-17

式中 μ 为与反馈强度有关的反馈系数, ν 为激光频率, L 为激光器出射面到达被测物表面的距离. 可见经光反馈调制后的光强与激光器到被测物间的光程呈一定的余弦曲线关系, 被测物体移动半个波长对应光功率变化一个周期, 对应一次条纹计数. 这就是激光反馈干涉技术进行位移测量的原理, 其检测准确度为 $\lambda/2$.

2 基于相位凝固技术的调制解调方法

2.1 基本原理

为提高激光反馈干涉术的测量分辨率, 可采用各种调制解调方法^[9-11]. 本文提出一种基于相位凝固技术的调制解调方法.

将式(1)中 $(4\pi \frac{\nu}{c} L)$ 看作为腔外总相位 Φ , 当在激光器与被测物体间加入集成光学相位调制器件, 可以将 Φ 分为两部分, $\Phi = \Phi_a + \Phi_b$, Φ_a 为经过相位调制器件附加产生的相位, Φ_b 为其他光程对应的相位, 也就是与被测反射面位置相关的相位.

利用相位调制器件产生高频率移相, 例如产生相位差为 π 的两个调制相位, $\Phi_{a_1} - \Phi_{a_2} = \pi$, 则对应被测反射面某一位置有两个光功率数据. 当被测物体移动时, 可得到对应不同调制相位的两组光功率变化曲线, 即图 2 中的信号 P_1 和信号 P_2 . 这两组曲

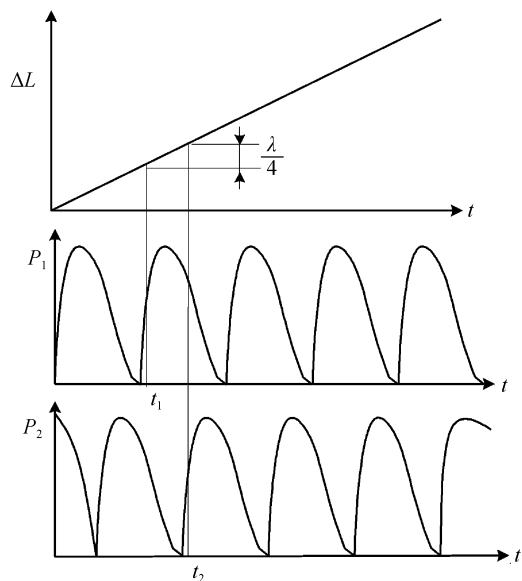


图 2 基于相位凝固技术调制解调原理. P_1 和 P_2 对应调制相位差为 π 的两组反馈干涉光功率信号. ΔL 为重构的位移

Fig. 2 Diagram of modulate and demodulate principle based on phase-freezing technology. P_1 and P_2 are two feedback interferometer optical power signals whose modulation phase difference is π . ΔL is the reconstructed displacement

线包含在探测器探测的信号中, 因此需要采用相位凝固同步采样技术将其分离. 所谓相位凝固技术, 即根据调制信号频率, 同步对探测器信号进行采样, 分别得到调制相位相对固定的多组光功率信号. 对照图 2, 即将 P_1 和 P_2 分别取出, 分别对应调制相位为 Φ_{a_1} 和 Φ_{a_2} .

寻找两组曲线的相同的光功率特征点, 对应时刻分别为 t_1 和 t_2 , 对应的腔外总相位相同

$$\Phi_{a_1} + \Phi_{b_1} = \Phi_{a_2} + \Phi_{b_2} \quad (2)$$

由 Φ_{a_1} 与 Φ_{a_2} 之间的固定关系, 可得

$$\Phi_{b_2} - \Phi_{b_1} = \pi \quad (3)$$

即

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

因此, 可得在 t_1 至 t_2 时刻内, 被测反射面位移为

$$\Delta L = \lambda/4 \quad (5)$$

通过解调重构可得到被测物体的位移信息.

基于相位凝固技术的激光反馈干涉系统结构见图 3. 在 LD 输出光路中加入相位调制器. 控制器控制调制器产生高频调制信号, 同时作为信号采样的参考信号. PD 探测到的干涉信号经放大、采样、整形以及解调重构, 输出被测物的位移信息.

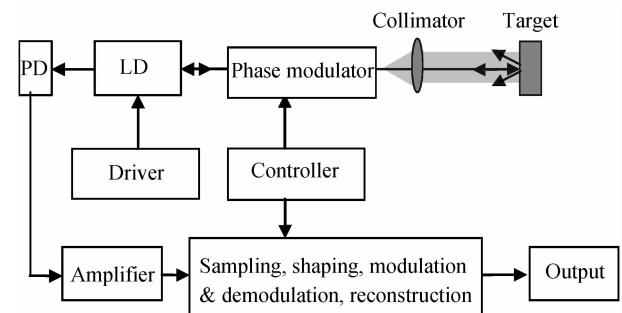


图 3 基于相位凝固技术的激光反馈干涉系统结构

Fig. 3 Scheme of laser feedback interferometer system based on phase-freezing technology

2.2 测量准确度的提高

如上例子所述, 移相间隔为 π 时, 测量分辨率为 $\lambda/4$. 若移相间隔进一步减小, 或者利用细化的脉冲计数方式或相位解调方式, 则测量分辨率和准确度会进一步提高, 同时提高了干涉仪的抗干扰能力.

若移相间隔 $2\pi/N$ ($N=2, 3, \dots$), 则此种技术的分辨率为 $\lambda/2N$. 因此, 若 $N=100$, 则此种技术的分辨率可达到 $\lambda/200$, 达到纳米级. 理论上说, N 可以无限大, 准确度可以无限高^[12].

2.3 采样技术

在激光器和目标物之间引入相位调制器, 用高频正弦信号调制相位调制器使其在光路中产生附加

相位. 不同的相位差会得到不同的曲线. 采样延迟时间可按照调制相位和调制电压的关系来选择. 调制电压和采样时间点及分辨率的关系如表 1.

表 1 调制电压, 采样时间点及分辨率的关系
Table 1 Relation among modulation voltage, sampling time and resolution

N	$\Delta\Phi$	Modulation voltage V	Sampling points t (f_m is modulation frequency)	Resolution
4	$\frac{\pi}{2}$	$0, \frac{1}{2}$	$0, \frac{1}{12f_m}$	$\frac{\lambda}{8}$
6	$\frac{\pi}{3}$	$0, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$	$0, \frac{27}{500f_m}, \frac{58}{500f_m}$	$\frac{\lambda}{12}$

假设目标物正弦运动, 以 2 kHz 的频率进行相位的正弦调制, 探测器得到的激光反馈干涉信号如图 4. 利用相位凝固采样技术, 两次采样得到相移分别为 0 和 $\pi/2$ 时的光功率信号如图 5.

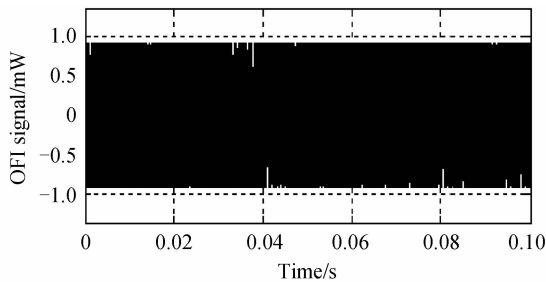
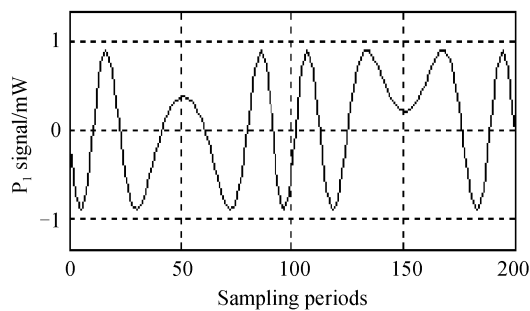
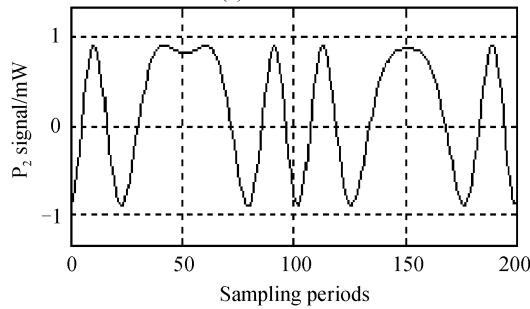


图 4 激光反馈干涉信号
Fig. 4 Signal of laser feedback interferometer



(a) Phaseshift is 0



(b) Phaseshift is $\pi/2$

图 5 两次采样得到的光功率信号 P_1 和 P_2
Fig. 5 Power signals obtained by two-point phase sampling

2.4 重构

先将采样得到的功率信号进行放大整形处理,

后采集过零点或接近零点的点作为特征点, 得到特征点后判断特征点所在曲线, 构建台阶函数, 根据台阶函数重构信号. 程序框图如图 6, 按照框图编程, 调试. 将得到的台阶函数与相应的分辨率相乘即得到对应的重构位移信号, 分辨率为 $\lambda/8$ 的重构信号如图 7.

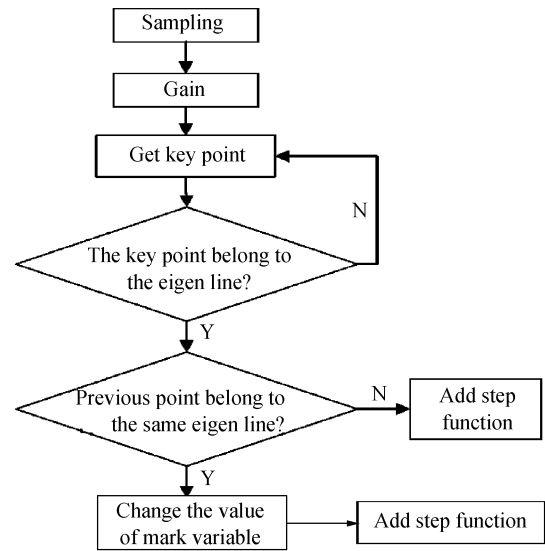


图 6 相位凝固技术重构位移的程序框图
Fig. 6 Program chart of displacement reconstruction based on phase-freezing technology

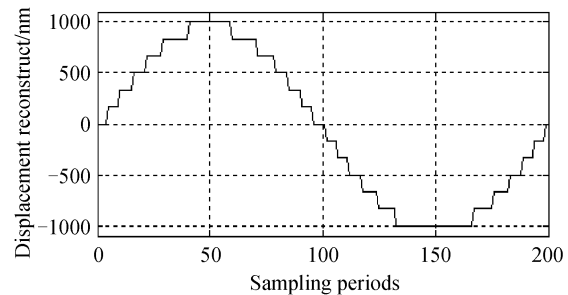


图 7 分辨率为 $\lambda/8$ 的重构位移信号
Fig. 7 Reconstructed displacement with resolution of $\lambda/8$

3 仿真验证

利用仿真验证所提出的调制解调、采样重构方法的正确性. 采用的主要参量有: 外腔振动频率 10 Hz; 外腔振幅 1 000 nm; 仿真周期数为 1; 调制频率 $f_m = 2$ kHz; 激光波长 $\lambda = 1\ 310$ nm; 无反馈光强 $I_0 = 30$ mW; 反馈系数 $\mu = 0.03$; 初始外腔长 20 cm; 光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s; 以 $N = 10$ 为例进行仿真, 移相间隔为 $\pi/5$, 采样信号如图 8. 重构位移信号和重构误差如图 9、10. 重构误差小于 $\lambda/20$.

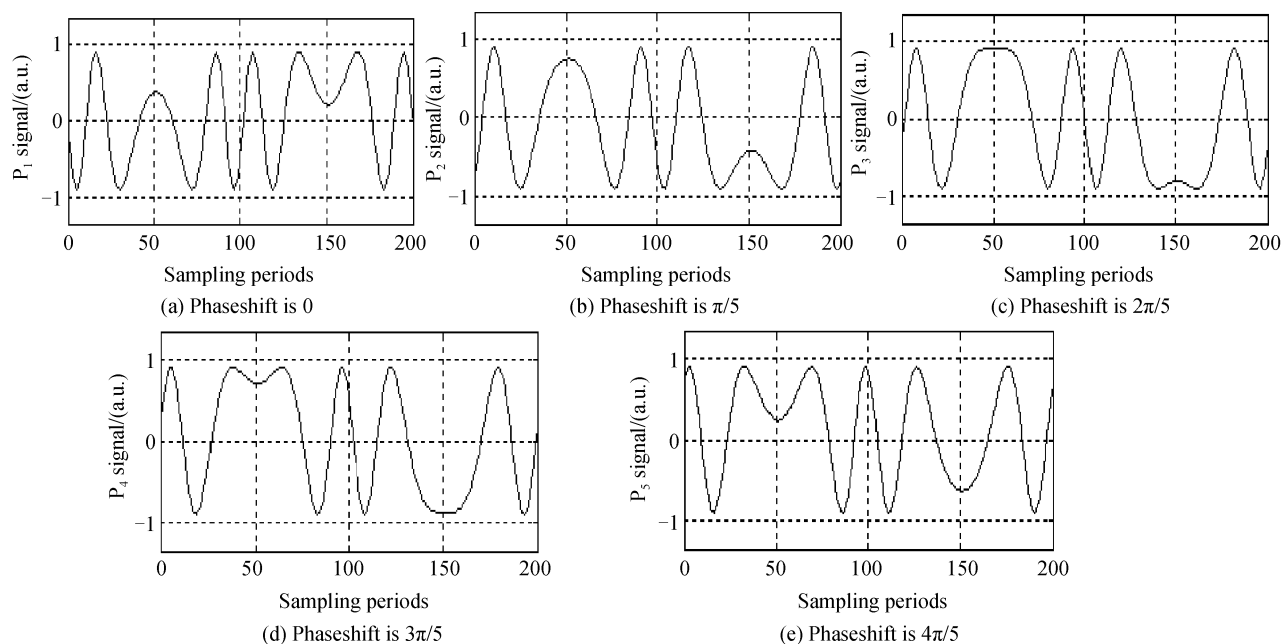


图 8 五次采样所得的功率信号

Fig. 8 Power signals obtained by five-point phase sampling

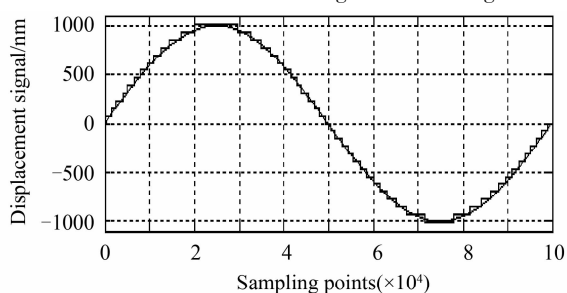


图 9 重构位移信号和目标物位移信号比较

Fig. 9 Reconstructed displacement compared with target displacement

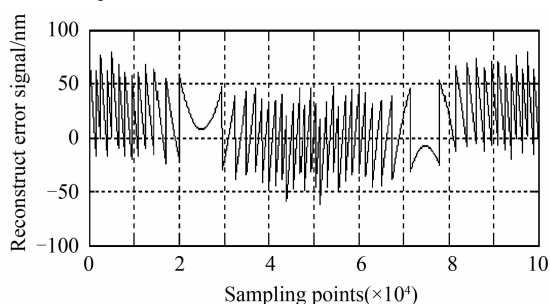


图 10 重构误差

Fig. 10 Reconstruction error

4 误差分析

本文采用相位凝固技术进行激光反馈干涉技术的调制解调,进行位移测量.测量误差主要由频率误差、采样时间误差、特征点选取误差、重构台阶误差等部分组成.为减小位移的测量误差,要注意:1)调制频率越大越好;2)目标物移动的频率不宜过大;3)调制频率要远大于目标物的移动频率;4)采样频率是调制频率的整数倍,采样频率尽量高.

5 结论

设计带有电光相位调制器的激光反馈干涉位移传感器,在半导体激光器和目标物之间可产生附加相位进行相位调制,提出基于相位凝固技术的调制解调方法,经仿真验证了方法的可行性,使得整个系统的测量准确度达到 $\lambda/20$.此方法为提高激光反馈干涉测量准确度提供一条有效途径,且可用于位移的实时测量.

参考文献

- [1] ZHANG Shu-lian. Laser feedback technique and development. *Laser and optoelectronics progress* [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 65-71,76.
张书练. 激光反馈技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(11): 65-71,76.
- [2] GIULIANI G, NORGIA M, DONATI S, *et al.* Laser diode self-mixing technique for sensing applications [J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2002, **4**: S283-S294.
- [3] LIU Hui-lan, WANG Yong, PAN Zai-you, *et al.* Optical feedback interferometry and its application in MEMS Sensing [C]. 2008 Proceedings of the ASME-2nd International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nanosystems, 2008: 147-151.
- [4] GONG Yuan, LI Bin-cheng, GAO Li-feng, *et al.* Optical feedback and pulsed cavity ring-down techniques for high-reflectivity measurement: a comparison study [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 397-402.
- [5] WANG Ming, NIE Shou-ping, LI Ming, *et al.* Self-mixing interferometer for micro displacement measurement [J]. *Acta Instrument*, 2004, **25**: 428-435.
王鸣, 聂守平, 李明, 等. 自混合干涉微位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**: 428-435.
- [6] HAO Hui, WANG Ming, GUO Dong-mei. Micro-vibration measurement using self-mixing interferometer based on temporal carrier phase shifting technique [C]. *SPIE*, 2009,

- 7160; 71600W.
- [7] HUANG Wei, GUI Hua-qiao, LU Liang, *et al.* Effect of angle of incidence on self-mixing laser Doppler velocimeter and optimization of the system[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**: 1662-1667.
- [8] BAMBINO M, OVRYN B. Measuring the surface topography at focal adhesions using laser feedback interferometry [C]. *SPIE*, 2006, **6090**: 6090F.
- [9] GUO D, WANG M, TAN S. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Opt Exp*, 2005, **13**(5): 1537-1543.
- [10] TOMASINI E P. Displacement measurement using phase-shifting optical feedback interferometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **11**: 277-786.
- [11] GUO Dong-mei, TAN Su-qing, WANG Ming. 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. 郭冬梅,谈苏庆,王鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量准确度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 845-850.
- [12] BOSCH T, SERVAGENT N, LESCURE M. Displacement measurement using phase-shifting optical feedback interferometry[C]. *SPIE*, 2000, **4072**: 60-69.

Optical Feedback Interferometry Based on Phase-freezing Technology

LIU Hui-lan^{1,2}, ZHANG Xiao-qing^{1,3}, CAO Wen-juan³, WANG Jun-jie¹

(1 School of Instrumentation Science And Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 Key Laboratory of Micro-nano Measurement-manipulation and Physics (Ministry of Education), Beijing 100191, China)

(3 School of Opto-electronics Information and Communication Engineering, Beijing Information and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: For optical feedback interferometry, a modulation and demodulation method based on phase-freezing technology was brought forward to increase the measurement resolution. And a displacement measurement system with phase modulator was designed. The phase of the outer cavity was modulated by the modulator, and interference signals that have fixed modulation phases were collected. Then displacement information of the target can be observed by demodulation and reconstruction. Signal modulation, sampling, reconstruction technology and error analysis were studied, and the feasibility of this method was verified by simulation. The results demonstrate that the accuracy can be up to $\lambda/20$ using five-point phase-freezing sampling. This method can enhance the accuracy of optical feedback interferometry, and process signals in real time. So it can be used in real time displacement measurement.

Key words: Optical feedback interferometry; Phase-freezing technology; Displacement measurement; Electro-optic modulator