

基于相位凝固技术的激光反馈干涉系统

刘惠兰^{1,2,3} 曹文娟⁴ 王 维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 惯性技术重点实验室, 北京 100191
⁴ 北京信息科技大学光电信息与通信工程学院, 北京 100192

摘要 基于相位凝固技术的激光反馈干涉术,为验证其可行性及测量分辨率,设计了微位移测量验证系统。在系统中利用相位调制器进行外腔相位调制,采用相位凝固技术进行采样及解调,重构出外部目标物的位移信息。建立了测量系统的模型,进行了基于相位凝固技术的调制解调算法仿真及位移测量验证实验。实验验证了仿真的正确性和系统的可行性,通过比较外部目标物的实际位移与系统重构位移结果,得出测量峰谷值相对误差小于 3%。研究表明,此测量方法能够准确地测量出外部目标物的位移信息,可有效提高系统测量分辨率,并可实现微位移的实时测量。

关键词 测量;激光反馈干涉;位移测量;相位凝固技术

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0312006

Laser Feedback Interference System Based on Phase-Freezing Technology

Liu Huilan^{1,2,3} Cao Wenjuan⁴ Wang Wei¹

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 Science and Technology on Inertial Laboratory, Beijing 100191, China

⁴ School of Opto-Electronics Information and Communication Engineering, Beijing Information and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract A laser feedback interferometry combined with phase-freezing technology is researched. To verify the technology and its measurement resolution, a micro-displacement measurement system is designed. In the system, phase modulator is added to modulate the external cavity phase and phase-freezing technology is used for sampling and demodulation to reconstruct the displacement information of the external target. Measurement system model is established. Modulation-demodulation algorithm simulation based on phase-freezing technology and the displacement measurement experiment are made. Comparing the actual displacement of the external target and the system reconstruction result, the accuracy of simulation and the feasibility of system are verified. The measurement peak-valley (PV) value relative error is less than 3%. It is drawn that the method can effectively improve the measurement resolution of system and achieve the real-time measurement of micro-displacement.

Key words measurement; laser feedback interferometry; displacement measurement; phase-freezing technology

OCIS codes 120.4820; 350.4600; 350.4800

收稿日期: 2012-10-17; 收到修改稿日期: 2012-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60908016)资助课题。

作者简介: 刘惠兰(1977—),女,博士,副教授,主要从事光学传感和微光机电系统等方面的研究。

E-mail: liuhuilan@buaa.edu.cn(中国光学学会会员号: S040421096M)

1 引 言

激光反馈干涉(LFI)技术是指激光器内部的光与外部反馈光发生自混合干涉,从而调制激光器的输出光功率和频率的一种技术手段。激光反馈干涉信号会携带外部目标物的特征与运动规律的信息。激光反馈干涉系统不但具有高灵敏度、高精度和非接触性的特点,还具有不需要参考光路、结构简单等优点,因此其在测量和传感领域具有广泛的应用前景。国内外研究人员针对激光反馈干涉技术的理论与应用开展了广泛的研究^[1~4],包括光学器件和光学系统的特征测试^[5]、位移测量^[6~9]、振动测量^[10]和速度测量^[11]等。

本文基于一种相位凝固技术的信号调制解调方案^[12],设计并实现了带有相位调制器的激光反馈干涉微位移测量系统。通过仿真和实验,验证了此项技术的可行性,并提高了系统的测量分辨率。

2 基于相位凝固技术的激光反馈干涉模型

激光反馈干涉系统普遍采用三镜腔模型。工作在光反馈状态下的激光器输出光强可表示为

$$I = I_0 [1 + m \cos(4\pi L / \lambda)], \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, L 为激光器出射面到达目标物表面的距离, m 为与反馈强度有关的反馈系数。可见经光反馈调制后的光强与激光器到目标物间的光程或相位呈一定的余弦曲线关系,目标物体每移动半个波长对应激光器输出光功率变化一个周期。

相位凝固技术的调制解调方法,是在激光器外部光路中加入相位调制器件,对外腔光程进行调制。外腔的总相位为两部分之和, $\Phi = \Phi_a + \Phi_b$, Φ_a 为相位调制器件附加产生的调制相位, 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。在采集激光器输出的反馈干涉信号时,只采集调制相位相对固定的光功率信号,采集多组这样的光功率信号,根据多组光功率信号的调制相位差可以得出目标物的相对移动距离。此方法原理可用图1表示。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,如信号 P_1 和信号 P_2 所示,其分别对应附加调制相位为 Φ_{a1} 和 Φ_{a2} ,附加移相间隔 $\Phi_{a1} - \Phi_{a2} = \pi/2$ 。 ΔL 为重构的位移分辨率。

寻找两组曲线中光功率相同的特征点,对应的激光谐振腔外的总相位相同,对应时刻分别为 t_1 和 t_2 ,即

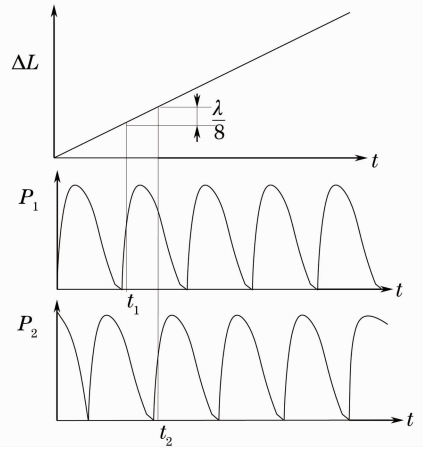


图1 基于相位凝固技术调制解调原理示意图
Fig.1 Schematic solidification technique based on phase modulation and demodulation

$$\Phi_{a1} + \Phi_{b1} = \Phi_{a2} + \Phi_{b2}. \quad (2)$$

由 Φ_{a1} 与 Φ_{a2} 之间的固定关系,可得

$$\Phi_{b2} - \Phi_{b1} = \pi/2, \quad (3)$$

即

$$\frac{4\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

因此,可得在 t_1 至 t_2 时刻内,被测反射面位移为

$$\Delta L = \lambda/8, \quad (5)$$

通过以上解调重构方法即可得到被测物体的位移信息。理论上,减小选取的附加调制相位间隔,可进一步减小重构分辨率,提高测量精度。

依据以上方案设计基于相位凝固技术的激光反馈干涉位移测量验证系统的基本结构,如图2所示。在激光器和目标物之间加入了相位调制器,通过一定频率的正弦信号调制相位调制器使其在光路中产生附加相位。信号发生器驱动微位移致动器,带动其上的反射镜发生沿光轴方向的振动,作为已知的位移信息。激光二极管(LD)的输出光经过相位调制器以及光纤准直器准直后照射到目标物体上,目标物表面又将一部分光反馈回激光腔。利用LD后部的光电探测器(PD)探测激光器的输出光功率信号。探测到的反馈干涉信号经过电流电压转换、放大及滤波后输入到计算机中,经相应的信号处理解调得到微位移的信号。

3 仿真分析

利用相位凝固采样技术,对干涉信号进行5次采样,采集附加移相间隔为 $\pi/5$ 的5种相位点,其对应的重构台阶分辨率为 $\lambda/20$ 。将采样得到的光功

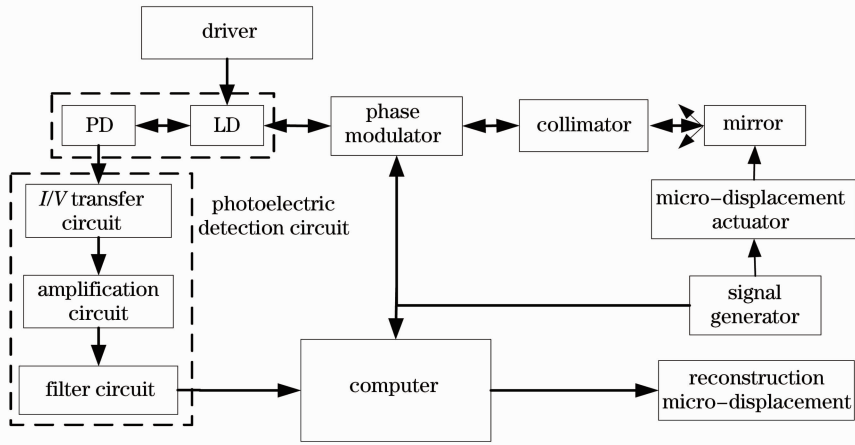


图 2 激光反馈干涉位移测量系统基本结构示意图

Fig. 2 Schematic of the laser feedback interferometer displacement measurement system

率信号数据导入计算机中进行整形处理,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,将台阶函数与相应的分辨率相乘即可得到反射镜的微位移信号。

建立系统模型后选取特定参数进行仿真,主要参数有:外腔振幅 $d_0 = 1000 \text{ nm}$, 调制频率 $f_m =$

5 kHz,激光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 。利用相位凝固技术对干涉信号进行采样及解调,得到解调重构位移信号如图 3 所示,阶梯曲线为重构得到的位移,平滑曲线为外部目标物的实际位移。由图可知,重构位移与外部目标物的实际位移的峰谷值完全一致,准确地测量出了目标物的位移信息。

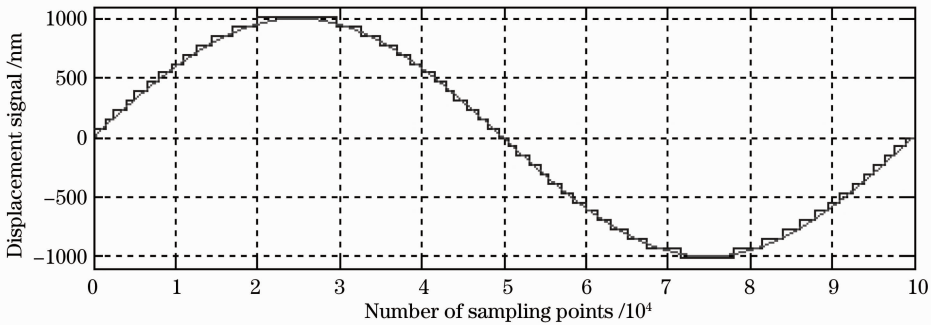


图 3 重构出的位移信号和目标物位移信号

Fig. 3 Reconstruction displacement and target displacement signal

4 实验验证

依照图 2 结构,搭建基于相位凝固技术的激光反馈干涉实验验证系统如图 4 所示,主要由光源、相位调制器、光纤准直器、反射镜、微位移致动器及光电检测电路等部分组成。激光器产生的激光经过相位调制器、光纤准直器后照射到反射镜上,一部分光反馈回激光器与腔内光发生自混合干涉。利用双通道信号发生器输出一路高频正弦信号,加载在相位调制器上,用来实现相位调制。另一路信号产生较低频的正弦信号,作为驱动信号控制压电陶瓷微致动器振动,从而带动反射镜移动。将采集到的干涉信号通过光电检测电路后导入计算机中,进行采样、解调等处理,重构出位移信息。系统采用带有尾纤

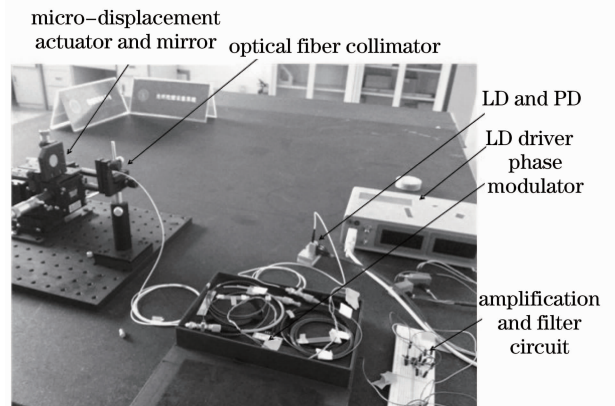


图 4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

的光源、相位调制器及光纤准直器,因此只需将光纤准直器与反射镜进行空间对准,其他器件间采用光纤熔接方式,光路连接简单,系统调整方便。

实验中,激光器的波长为 1550 nm,带宽为 800 kHz;驱动微位移致动器的正弦信号的频率为 64 Hz,信号电压幅度是通过换算使得带动微镜振动的振幅为 1550 nm;相位调制器的调制频率为 5 kHz;初始外腔长为 100 mm。由于温度变化、空气流的扰动、电子噪声以及相位调制器的高频噪声都会给激光反馈干涉信号带来干扰,因此,为了准确提取参数信息,对干涉信号准确采样,要先进行滤波处理,使输出信号满足系统要求。利用设计的有限冲激响应

(FIR)数字带通滤波器对激光反馈干涉实验得到的干涉信号进行滤波处理^[13]。经过滤波处理的干涉信号如图 5 所示,滤波后的信号较滤波前变得平滑,高频噪声和低频干扰得到有效滤除。

利用相位凝固采样技术,进行 5 次相移采样,解调后得到的重构位移信号及实际位移曲线如图 6 所示。

由于解调方法限制,解调后的位移曲线是由特征点组成的台阶折线。为了使重构曲线符合真实情况,采用多项式拟合法对得到的重构台阶函数进行曲线拟合,拟合后的重构位移和反射镜的实际位移曲线如图 7 所示,拟合后的峰谷值测量相对误差约为 2%。

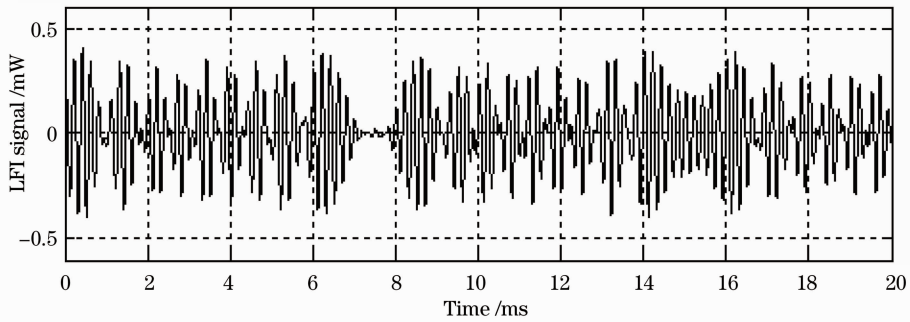


图 5 滤波处理后的激光反馈干涉信号

Fig. 5 Laser feedback interference signal after filtering

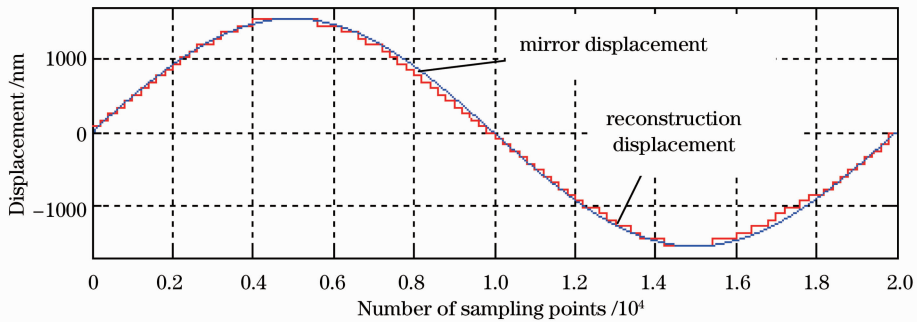


图 6 重构位移与反射镜实际位移

Fig. 6 Reconstruction displacement and the actual mirror displacement

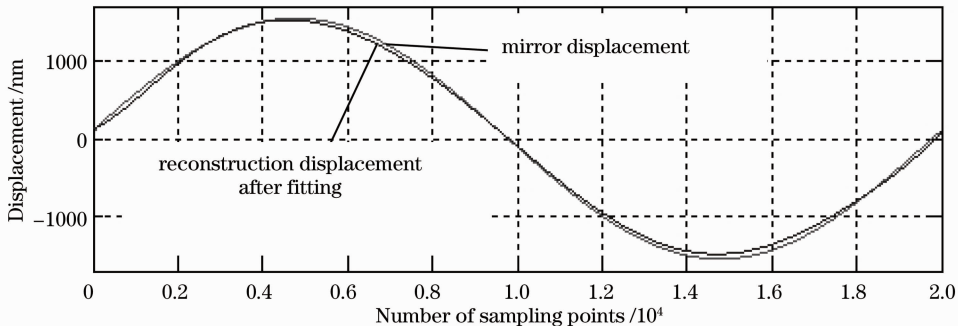


图 7 拟合后的重构位移与反射镜实际位移

Fig. 7 Reconstruction displacement after fitting and the actual mirror displacement

5 结 论

基于相位凝固技术的信号调制解调方案,设计了激光反馈干涉位移测量系统,并对其进行了仿真和实验验证。根据相位凝固技术重构算法对滤波后的干涉信号解调重构,实验所得结果与仿真分析所得结果相同,验证了所提出的基于相位凝固的激光反馈技术的可行性。重构位移与实际目标物位移峰峰值的相对误差小于3%。造成误差的主要因素有相位调制器的相移精度、采样精度、电路以及信号处理过程中的误差因素等,对这些误差影响的分析正在进行中。

参 考 文 献

- Zhang Shulian. Laser feedback technique and development [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 65~71
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
- Guo Dongmei, Tan Suqing, 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精度分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 845~850
- Thierry Bosch, Noel Servagent, Marc Lescure. Displacement measurement using phase-shifting optical feedback interferometry [C]. *SPIE*, 2000, **4072**: 60~69
- Hu Xianfeng. Observation and analysis on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 433~439
胡险峰. 多纵模激光二极管自混合干涉的观察和分析[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 433~439
- 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
- Wang Ming, Nie Shouping, Li Ming *et al.*. Self-mixing interferometer for micro displacement measurement [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25**(4): 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**(4): 428~435
- Xavier Raoul, Thierry Bosch, Noel Servagent. Double laser diode speed sensor for contactless measures of moving targets [C]. *SPIE*, 2002, **4827**: 363~373
- Xia Wei, Hao Hui, Wang Feng *et al.*. Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1208003
夏 巍, 郝 辉, 王 峰 等. 相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试[J]. 中国激光, 2011, **38**(12): 1208003
- Zhang Zhaoyun, Gao Yang, Zhao Xinghai *et al.*. FFT phase detection method for self-mixing laser diode micro-displacement measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 071201
张照云, 高 杨, 赵兴海 等. 激光自混合微位移测量的FFT相位提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(7): 071201
- Hao Hui, Wang Ming, Guo Dongmei. Micro-vibration measurement using self-mixing interferometer based on temporal carrier phase shifting technique [C]. *SPIE*, 2009, **7160**: 71600W
- Huang Wei, Gui Huaqiao, Lu Liang *et al.*. Effect of angle of incidence on self-mixing laser Doppler velocimeter and optimization of the system [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1662~1667
- Liu Huilan, Zhang Xiaoqing, Cao Wenjuan. Optical feedback interferometry based on phase-freezing technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1172~1176
刘惠兰, 张晓青, 曹文娟. 基于相位凝固技术的激光反馈干涉术[J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1172~1176
- Cao Wenjuan, Zhang Xiaoqing, Liu Huilan. Signal processing of micro displacement measurement based on laser feedback interference system [C]. *Signal Processing, Communications and Computing*, 2011. 1~5

栏目编辑: 何卓铭