

文章编号: 1001-3806(2009)04-0359-03

## 基于相位解卷的位移测量系统

金岩华, 叶会英\*, 孙瑶  
(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

**摘要:** 为了实现适度光反馈机制下对微位移进行测量的目的, 采用了相位解卷的位移测量方法。该方法是在对系统参量  $C$  和  $\alpha$  进行提前分离测量的基础上, 通过寻找自混合干涉信号的特殊点, 即峰值点、谷值点及转折点, 恢复了含光反馈时的外腔相位, 对外腔相位进行进一步的处理得到了外部运动物体的位移信息。仿真分析及实验结果验证了该测量方法的可行性。结果表明, 对于十几微米的振动, 该系统的测量误差仅为  $\pm 30\text{nm}$ 。这一结果对高精度微位移及微振动的测量是有帮助的。

**关键词:** 测量与计量; 干涉; 位移测量; 相位解卷; 特殊点

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.007

## Displacement measurement system based on phase unwrapping

JIN Yan-hua, YE Hui-ying, SUN Yao

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In order to measure the displacement under the condition of moderate optical feedback self-mixing interference, a displacement measurement method based on phase unwrapping was introduced. Firstly, the system parameters  $C$  and  $\alpha$  were measured respectively. Secondly, the external cavity phase with optical feedback was recovered after finding the special points of self-mixing interference signal, namely the peak, valley and transition points. Finally, the displacement information of the external moving object was obtained after processing the external cavity phase. Simulation and experimental results proved its feasibility. Experiment results show that the error of the system is  $\pm 30\text{nm}$  within the oscillating displacement up to  $10\mu\text{m}$ . This method is helpful for high precision measurement of micro displacement and vibration.

**Key words:** measurement and metrology; interference; displacement measurement; phase unwrapping; special point

### 引言

激光自混合干涉是指激光器输出的光束被外部反射体反射或散射后, 其中的一部分光被反射回激光器的谐振腔, 并同谐振腔内的光波发生相干混合, 从而改变了激光器的输出特性。由于反馈光携带反射体信息, 所以通过分析这种干涉波形, 就可以得到发射物诸如位置、位移、形貌以及运动速度等方面的信息。

目前, 光反馈自混合干涉 (optical feedback self-mixing interference, OFSMI) 技术应用于位移测量方面主要有条纹计数法<sup>[1-4]</sup>、相位测量法<sup>[5-6]</sup>、拍频测量法<sup>[7-8]</sup>等。条纹计数法量程大, 信号处理简单, 易于实现, 但分辨率限于半个光波波长; 相位测量法可以实现很高的测量分辨率, 但测量范围仅限于一个波长范围

内, 相位法的改进措施有合成波长法等, 但量程不能很大地改善; 拍频测量法利用回馈引起激光器频率变化的现象对位移进行测量, 系统的分辨率为  $5\text{nm}$ , 但测量范围不超过半个光波波长<sup>[4]</sup>。

### 1 理论基础

光反馈自混合干涉的数学模型<sup>[5-7]</sup>:

$$\phi_i(\tau) = \phi_0(\tau) - C \cdot \sin[\phi_i(\tau) + \arctan\alpha] \quad (1)$$

$$P(\phi_i(\tau)) = P_0[1 + mG(\phi_i(\tau))] \quad (2)$$

$$G(\phi_i(\tau)) = \cos[\phi_i(\tau)] \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  是半导体激光器线宽展宽因数;  $\phi_0(\tau) = \omega_0\tau$ ,  $\phi_i(\tau) = \omega_i\tau$ ,  $\omega_i(\tau)$ ,  $\omega_0(\tau)$  分别是有、无反馈时激光的角频率;  $\tau = 2L/c$ ,  $L$  是外腔长度,  $c$  是光速,  $C$  是光反馈水平因子;  $P(\phi_i(\tau))$  和  $P_0$  分别是有外腔和无外腔时半导体激光器的输出功率,  $m$  为调制系数 (典型值为  $m \approx 10^{-3}$ );  $G(\phi_i(\tau))$  是干涉函数, 它体现了外腔光相位对激光输出功率的影响。

由非线性方程(1)式得:

$$\phi_0(\tau) = \phi_i(\tau) + C \cdot \sin[\phi_i(\tau) + \arctan\alpha] =$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60871031)

作者简介: 金岩华(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光测量。

\* 通讯联系人。E-mail: iehyye@zzu.edu.cn

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2008-08-21

$$W[\phi_f(\tau); C, \alpha] \quad (4)$$

$$\phi_0(\tau) = 2\pi f_0 \tau(t) = 2\pi L(t) / (\lambda_0 / 2) \quad (5)$$

式中,  $t$  为时间变量,  $f_0$  为外腔的振动频率,  $\lambda_0$  为光波长。由(5)式可知,  $\phi_0(\tau)$  中包含有外部运动物体的位移信息, 由(4)式可知, 只要  $\phi_f(\tau)$ ,  $C, \alpha$  已知, 就可以通过(4)式计算出外部运动物体的位移信息。

## 2 信号处理方法

本文中的信号处理方法包含相位解卷即对  $\omega_f(\tau)$  的求解和对参量  $C$  和  $\alpha$  的测量两大部分, 如图1所示。

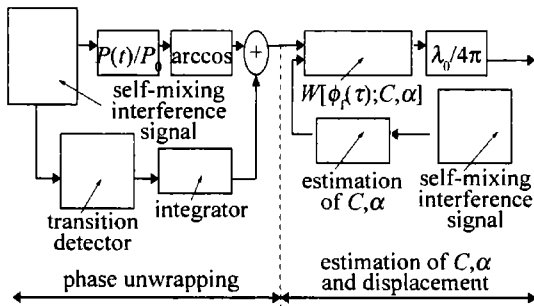


Fig. 1 Signal processing principle

### 2.1 相位解卷

半导体激光器的输出功率为  $P(\phi_f(\tau)) = P_0[1 + mG(\phi_f(\tau))]$ , 对  $P(\phi_f(\tau))$  归一化处理可得干涉函数  $G(\phi_f(\tau))$ 。以正弦波调制为例, 给出了  $C = 3, \alpha = 4$  时  $G(\phi_f(\tau))$ ,  $\phi_0(\tau)$  和  $\phi_f(\tau)$  的波形。如图2所示。

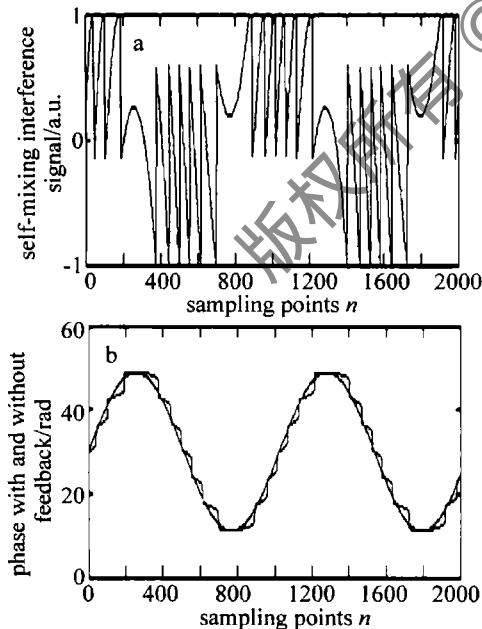


Fig. 2 a—self-mixing interference signal for  $C = 3$  and  $\alpha = 4$  b—phase and with  $\phi_0(\tau)$  and  $\phi_f(\tau)$  without feedback

从图2b可知, 含光反馈时的相位  $\phi_f(\tau)$  存在许多不连续点, 相邻两个不连续点之间的相位差  $\Delta\phi_f(\tau) = 2\pi C / (C + 1)$ , 当  $C$  较大时,  $\Delta\phi_f(\tau)$  接近于但小于  $2\pi$ 。

因此对  $\phi_f(\tau)$  的解卷包含在不连续点处加上或减去  $2\pi$ 。由于在两个相邻的谷值点的时间内, 自混合干涉信号产生了一个干涉条纹, 对应了  $\phi_f(\tau)$  变化  $2\pi$ , 而每经过一个转折点相位的增减性发生一次改变。进一步分析发现, 两谷值点时间内相位是单调递增或递减的, 但是对  $G(\phi_f(\tau))$  求反余弦  $\arccos[G(\phi_f(\tau))]$  时两谷值点时间内相位并不是单调变化的, 而是在峰值点处发生一次改变, 因此需要找出峰值点的位置, 每经过一个峰值点,  $\arccos[G(\phi_f(\tau))]$  的符号发生一次改变。

根据该方法中分析得到的相位解卷的基本原理, 找到特殊点即峰值点、谷值点及转折点位置后, 就可以实现相位解卷, 相位解卷遵循以下法则:

$$\phi_f(\tau) = (-1)^{M_1} \arccos[G(t)] + M_2 \cdot 2\pi \quad (6)$$

每经过一个峰值点,  $M_1$  的值加1; 每经过一个谷值点,  $M_1$  的值加1,  $M_2$  的值加1或减1; 每经过一个转折点, 相位的增减性发生一次改变。

### 2.2 参量 C 和 $\alpha$ 的测量

由光反馈自混合干涉的数学模型可得到  $G(\phi_0(\tau))$  与  $\phi_0(\tau)$  的关系波形, 如图3a所示。  $\phi_1$  和  $\phi_4$  为光反馈

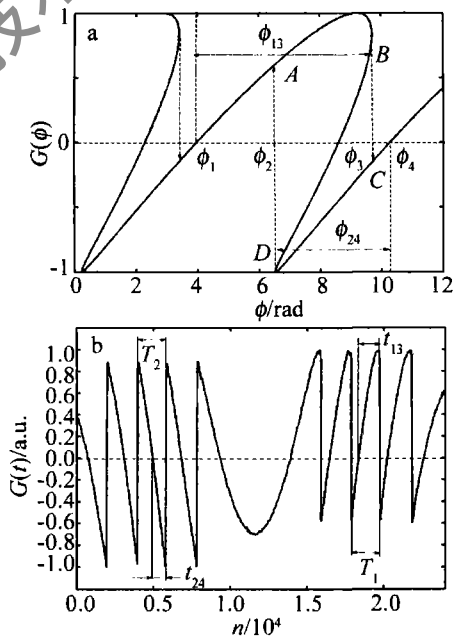


Fig. 3 a—relation between  $G(\phi_0(\tau))$  and  $\phi_0(\tau)$  b—self-mixing interference signal

自混合干涉信号过零点相位,  $\phi_2$  和  $\phi_3$  为光反馈自混合干涉信号的无限跳变点相位。2004年, YU 等人提出通过求解方程(7)式和(8)式实现参量  $C$  和  $\alpha$  的测量<sup>[9-11]</sup>。相位差  $\phi_{13}$  和  $\phi_{24}$  与特征点间的时间间隔的关系为:  $\phi_{13} = (t_{13}/T_1) \times 2\pi$ ,  $\phi_{24} = (t_{24}/T_2) \times 2\pi$ 。其中  $t_{13}, T_1, t_{24}$  和  $T_2$  为实验采集的自混合干涉信号对某一干涉条纹所对应的时间间隔。可通过寻找自混合干涉信号的特殊点求出, 如图3b所示。

$$\phi_{13} = \sqrt{C^2 - 1} + \frac{C}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) - \arctan\alpha + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$\phi_{24} = \sqrt{C^2 - 1} - \frac{C}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) + \arctan\alpha - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

### 3 仿真与实验测试

#### 3.1 仿真

为了验证本文中提出的算法的有效性,进行了大量的仿真。当参量取值: $\alpha = 4, C = 3, A_0 = 30, A = 19, f = 195\text{Hz}, \lambda_0 = 785\text{nm}$ ,由 OFSMI 理论模型(1)式、(3)

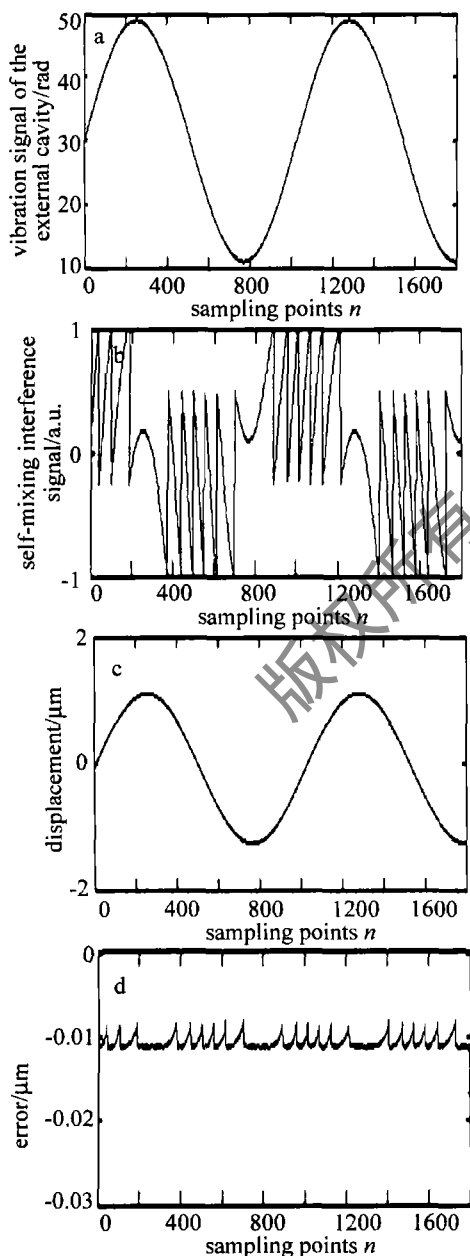


Fig. 4 Simulation signal for  $C = 3$  and  $\alpha = 4$

式仿真得到 OFSMI 信号  $G(\phi_f(\tau))$  及外腔振动规律,然后运用本文中提出的信号处理算法,分别对含光反馈时的相位进行解卷和对参量  $C$  和  $\alpha$  进行了测量,最后将所得结果带入(6)式,恢复了外部运动物体的位移信息,如图 4 所示。

#### 3.2 实验测试

实验系统组成见图 5。实验中,外腔(被测物)为压

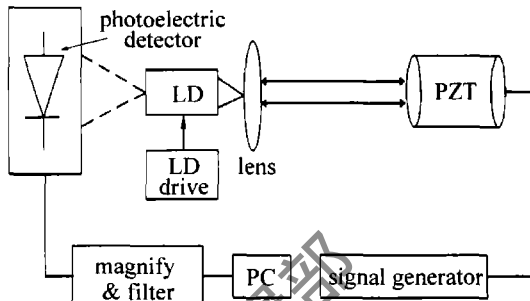


Fig. 5 Experimental setup of self-mixing interference

电陶瓷 (piezoelectric ceramic, PZT),其驱动信号为正弦波,频率选取  $10\text{Hz} \sim 80\text{Hz}$ ,驱动电压在  $0\text{V} \sim 150\text{V}$  可调, PZT 驱动电压与其振动幅度之间关系为  $0.116\mu\text{m}/\text{V}$ ,故根据驱动电压大小可以计算出外腔振动规律,然后利用本文中提出的位移测量算法对位移进行测量,并将测量结果与外腔振动规律对比,得出实验误差。

测试结果如图 6 所示,测试最大误差为  $\pm 30\text{nm}$ ,仅为激光光波波长的  $1/20$ ,测试误差最大处为含光反馈时外腔相位的不连续点处,即本文中提取的特殊点的位置。

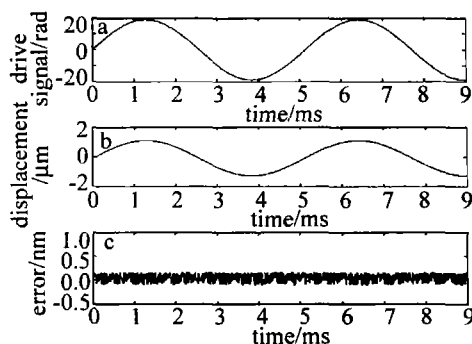


Fig. 6 a—drive signal b—displacement c—error

### 4 结论

光反馈自混合干涉技术是一种新型的光电传感测量技术。作者在适度光反馈机制下半导体激光器位移测量的基本原理上,建立了一个基于相位解卷的位移测量算法,并通过仿真和实验验证了算法的精确性和可行性。结果表明,作者所设计的测量算法不仅测量精度高且测量快捷方便。此外,该测量算法的实现有望用于工业以及实验室高精度微位移以及微振动的测量。

(下转第 365 页)

合适的激光工艺参量应为激光能量密度较低的高功率快速扫描工艺。

### 3 结论

(1) 在两套激光工艺参量下,激光熔凝层的相组成均为 $\alpha$ -Mg和 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>,熔凝层中的 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相含量均较原始镁合金有所增加。其中低功率慢速扫描熔凝层中 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>所占比例高于高功率快速扫描熔凝层。

(2) 两种工艺处理的熔凝层枝晶均较原始镁合金细化,而且高功率快速扫描下,熔凝层枝晶细化程度较大。

(3) 高功率快速扫描下熔凝层的硬度较大,最大值可达156HK,是低功率慢速扫描下熔凝层硬度的1.5倍,比原始镁合金提高约80HK,其耐磨性比低功率慢速扫描提高约3倍,比原始镁合金提高约7倍。熔凝层的耐蚀性也在高功率快速扫描下取得较大改善。

(4) 对镁合金的激光熔凝处理,当采用较低能量密度的高功率快速扫描工艺可使其表面性能获得最佳改善效果。

#### 参考文献

- [1] LIU Z L, DING W J, YUAN G Y, *et al.* Survey of the Mg-Al based elevated temperature magnesium casting alloys [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, 25(11): 1-4 (in Chinese).
- [2] FRACASSI F, D'AGOSTNO R, PALUMBO F, *et al.* Application of plasma deposited organosilicon thin films for the corrosion protection of metals [J]. *Surface and Coating Technology*, 2003, 174/175: 107-111.
- [3] PET Y T, de HOSSON J T M. Functionally graded materials produced by laser cladding [J]. *Acta Materialia*, 2003, 48: 2617-2624.
- [4] XU X Zh, LIU Q, CHENG J. Application of magnesium alloy in industry and national defence [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2002, 23(3): 190-192 (in Chinese).
- [5] KOJIMA P. Project of platform science and technology for advanced magnesium alloys [J]. *Materials Transactions*, 2001, 42(7): 1154-1159.
- [6] APELFELD A V, BESPALOVA O V, BORISOV A M, *et al.* Application of the particle backscattering methods for the study of new oxide protective coatings at the surface of Al and Mg alloys [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2000, B161/163: 553-557.
- [7] SHIGEMATSU I, NAKAMURA M, SIATOU N, *et al.* Surface treatment of AZ91D magnesium alloy by aluminum diffusion coating [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(6): 473-475.
- [8] ZHAO Y Zh, LU J P, SHI R W. Study on the property of laser remelting high-carbon-high-alloy steel [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 205-207 (in Chinese).
- [9] TIAN Y Sh, CHEN Ch Zh, WANG D Y, *et al.* Analysis of the growth mechanism of TiC crystal and the mechanical properties of the laser alloyed layer on the surface of pure titanium [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 113-115 (in Chinese).
- [10] WANG D Ch. Research of laser surface strengthening technique for HT300 camshaft of motorcycle [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(6): 474-477 (in Chinese).
- [11] ZHOU Y. *Materials analysis method* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 49-51 (in Chinese).
- [12] DUBE D, FRSET M, COUTURE A, *et al.* Characterization and reformance of laser melted AZ91D and AM60B [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, A299(1/2): 38-45.
- [13] ZUM-GAH K H. Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals [J]. *Wear*, 1981, 74(2): 353-373.
- [14] CHEN Zh H. *Wrought magnesium alloy* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 120-121 (in Chinese).
- [15] KOUTSOMICHALIS A, SAETTAS L, BADEKAS H. Laser treatment of magnesium [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, 29(24): 6543-6547.

(上接第361页)

#### 参考文献

- [1] SABINA M, SILVANO D. Reconstruction of displacement waveforms with a single-channel laser-diode feedback interferometer [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(4): 527-531.
- [2] SCALISE L, YU Y G, GUIDO G. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(1): 223-232.
- [3] YU Y G, QIANG X F. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect [J]. *Acta Optica of Sinica*, 1999, 19(9): 1269-1273 (in Chinese).
- [4] YU Y G, YAO J Q, YE H Y. A self-mixing interference structures including the pre-feedback used for measuring displacement [J]. *Acta Optica of Sinica*, 2002, 22(3): 308-312 (in Chinese).
- [5] WANG M. Fourier transform method for self-mixing interferometer signal analysis [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(6): 409-416.
- [6] WEI L, XI J T, YU Y G, *et al.* Phase unwrapping of self-mixing signals observed in optical feedback interferometry for displacement measurement [C]//International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications. Yonago, Japan: IEEE, 2006: 780-783.
- [7] NORIHIKO T. Active heterodyne interferometric displacement measurement using optical feedback effects of laser diode [J]. *Opt Engng*, 1996, 35(3): 802-807.
- [8] YOSHINO T, NARA M, MNATZAKANIAN S. Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(5): 892-897.
- [9] YU Y G, GUIDO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback selfmixing effect [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 990-992.
- [10] XI J T, YU Y G, CHCHARO J F, *et al.* Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. *IEEE J Q E*, 2005, 41(8): 1058-1064.
- [11] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, *et al.* The estimation of the parameters in the model of the self-mixing effect in semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 519-521 (in Chinese).