

文章编号: 1001-3806(2008)05-0499-03

基于适度光反馈自混合干涉技术的微位移测量

李振有, 禹延光*, 叶会英

(郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052)

摘要: 光反馈自混合干涉技术是一种新出现的有别于传统双光束干涉的一类新的测试技术。为了在适度光反馈下进行位移的精密测量, 提出了一种基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量方法。采用条纹计数法实现大范围位移粗测, 具有半波长位移分辨率; 然后基于适度光反馈下小数条纹的特点, 给出了小于半波长位移测量的方法, 从而提高位移测量的分辨率。用绝对精度达 3 μm 的商用压电陶瓷驱动器比对实验, 结果验证了这种三角波调制外反射体在普通实验室环境噪声中可以达到纳米级的位移测量精度。实验数据处理结果表明, 对于 3 μm 以下的位移, 该算法位移测量相对误差约为 1.20%。

关键词: 测量与计量; 位移测量; 光反馈自混合干涉; 小数干涉条纹

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

Measuring tiny displacement based on moderate optical feedback self mixing interferometry

LI Zhen-you, YU Yan-guang, YE Hui-ying

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

Abstract Optical feedback self mixing interferometry is an emerging sensing and measurement technique which is quite different with traditional double-beam interferometry. To perform precision displacement measurement under the condition of moderate optical feedback, a displacement measurement method was proposed based on moderate optical feedback self mixing interference. Firstly, rough measurement of displacement was carried out by counting the fringe numbers with the resolution of half wavelength. Then based on the study of fractional fringe structure details, a measurement means for displacement within half wavelength was derived. Calibration results with a commercial piezoelectric ceramics which translates in the order of 3 μm show that a displacement accuracy of nanometers scale is achieved in the common laboratorial environment. The results indicate the relative standard deviation of $b\Delta L$ is 1.20% within the displacement less than 3 μm .

Key words measurement and metrology; displacement measurement; optical feedback self mixing interferometry; fractional fringe

引 言

光反馈自混合干涉 (optical feedback self mixing interferometry, OFSM I) 是指激光器输出光被外部反射体反射或散射后, 其中一部分光又反馈回激光器谐振腔, 反馈光与腔内光相混合, 从而调制激光器输出光。适度光反馈下, 激光输出信号为类锯齿波形, 这类信号统称为 OFSM I 信号。由于 OFSM I 信号携带了外部反射 (散射) 体和激光器自身参量的信息, 可用于位移、距离、形貌及激光器自身参量等的测量^[1-10]。

OFSM I 技术用于位移测量最直接最简单的方法就是条纹计数法。条纹计数法^[10]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。使半导体激光器工作于适度光反馈水平, 此时其自混合干涉条纹为类锯齿波形状。理论和实验研究已经表明, 类锯齿条纹的形状由反馈水平及激光器线宽展宽因数决定^[7], 这一结论为高精度条纹分析提供了研究基础。

作者将在条纹计数法的基础上, 利用条纹法的大量程特点, 结合小数条纹分析, 找出条纹特征与被测对象运动位移的变化规律, 通过这些规律特点来精确确定被测对象的位移量, 以实现高精度大量程测量。文中对这一测量理论进行了实验验证。

1 基础理论

1.1 理论模型

OFSM I 的理论研究, 已经给出了如下的测量模

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60574098)

作者简介: 李振有 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型传感理论与技术。

* 通讯联系人。E-mail: yanguangyu@zzu.edu.cn

收稿日期: 2007-07-30 收到修改稿日期: 2007-09-07

型^[5-10]:

$$\phi_f(\tau) = \phi_0(\tau) - C \sin[\phi_f(\tau) + k] \quad (1)$$

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

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

式中, $k = \arctan \alpha$, α 为半导体激光器线宽展宽因数, $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$, $\phi_f(\tau) = \omega_f \tau$, $\omega_f \tau$ 和 $\omega_0 \tau$ 分别为有、无反馈时激光的角频率, $\tau = 2L/c$, L 为外腔长度, c 为光速, C 为光反馈水平因子, $P(\phi_f(\tau))$ 和 P_0 分别为有、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 $m \approx 10^{-3}$); $G(\phi_f(\tau))$ 是干涉函数核, 它体现了外腔光相对对激光输出功率的影响。

通过改变外腔长度 L , 可以得到 $P(\phi_f(\tau))$ 和 τ 之间的关系曲线, 当 C 和 α 已知时, 根据 OFSM I 信号即 $P(\phi_f(\tau))$, 提取相位信号 $\phi_0(\tau)$, 并由 $\tau = 2L/c$ 实现 L 的测量, 即外腔位移的测量。

1.2 OFSM I 信号的理论波形

假定外腔(外部物体)做简谐振动, 运动规律为:

$$L = \begin{cases} L_0 + \Delta L t [0, b] \\ L_0 - \Delta L (t - 2b), [b, 3b] \\ L_0 + \Delta L (t - 4b), [3b, 4b] \end{cases} \quad (4)$$

由 $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau = \omega_0 \times 2L/c = 4\pi L/\lambda_0$ 得:

$$\phi_0(\tau) = \begin{cases} A_0 + \Delta A t [0, b] \\ A_0 - \Delta A (t - 2b), [b, 3b] \\ A_0 + \Delta A (t - 4b), [3b, 4b] \end{cases} \quad (5)$$

式中, $A_0 = 4\pi L_0/\lambda_0$ 为外腔初始相位, $\Delta A = 4\pi \Delta L/\lambda_0$ 为外腔相位变化率, L_0 为激光输出镜和外部物体之间的初始距离, ΔL 为外腔简谐振动的幅值变化率, b 为常数, t 为时间变量。当 $\alpha = 6$, $C = 1$, $A_0 = 5\pi$, $\Delta A = 0.22\pi$, $b = 12\pi$ 时, 由 (1) 式、(2) 式得 OFSM I 信号如图 1 所示。

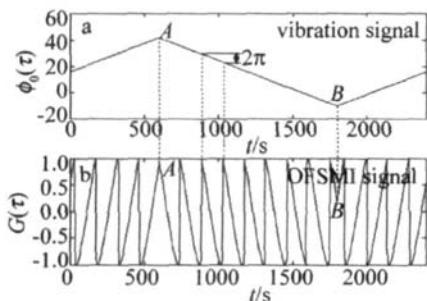


Fig 1 Vibration signal of the external cavity and its OFSM I signal

图 1 中 A, B 为外腔振动方向和 OFSM I 信号波形倾斜方向发生改变所对应的时刻, 称之为波形转折点。当 $\phi_0(\tau)$ 有 2π 相位的变化(即外腔移动半个光波波长 $\lambda_0/2$), 则 $G(\tau)$ 产生一个周期波动的信号, 称为一个整数条纹; $\phi_0(\tau)$ 小于 2π 相位的变化, 产生的 $G(\tau)$ 变化量即为小数条纹。

2 测量方法

2.1 OFSM I 随转折点的变化关系

在图 1 中, A 或 B 为 OFSM I 信号转折点, $G(t_a)$ 或 $G(t_b)$ 表示此时刻 OFSM I 信号值。利用 OFSM I 理论模型, 分析 $G(t_a) \rightarrow A_d$ 的关系。相应于转折点 A 或 B , 由 (5) 式得:

$$\phi_0(\tau) = A_0 \pm b\Delta A = A_0 \pm (A_i/2 + A_d) \quad (6)$$

式中, $A_i = 2N\pi$, $0 < A_d < 2\pi$, N 为转折点之间整数条纹的个数。为测量方便, 进行系统预调整, 满足 $A_0 = 2k\pi$, 则 OFSM I 信号波形就只由参量 α, C, A_i, A_d 来决定。

考虑小数条纹时, $\phi_0(\tau) < 2\pi$, 则 (6) 式简化为:

$$\phi_0(t_a) = \pm A_d \quad (7)$$

利用 (1) 式、(2) 式和 (7) 式, 可以得到 $G(t_a)$ 随 A_d 的变化规律如图 2 所示。

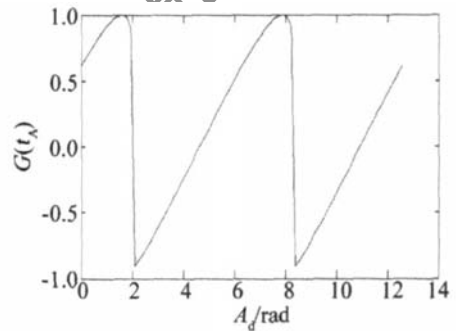


Fig 2 The curve of $G(t_a)$ versus A_d

适度光反馈下, $G(t_a)$ 为类锯齿波, 近似看作直线上升段和下降段。选取合适的参量, 可增加上升段而减小下降段, 找出 $G(t_a)$ 与 A_d 的近似线性表达式, 即小数条纹的测量表达式。

2.2 锯齿段的最小二乘线性拟合

利用 (1) 式、(2) 式和 (9) 式, 假定 $\alpha = 5$, $C = 1$, $b = 12\pi$, 建立观测数据组 $(A_{di}, G(t_{di}))$, 令线性拟合式为: $F(A_d) = a_1 + a_2 A_d$, 由最小二乘拟合法来确定系数 a_1 和 a_2 如下:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 A_{d1} - G_1(A) = \delta_1 \\ a_1 + a_2 A_{d2} - G_2(A) = \delta_2 \\ a_1 + a_2 A_{d3} - G_3(A) = \delta_3 \\ \dots \\ a_1 + a_2 \times A_{dn} - G_n(A) = \delta_n \end{cases} \quad (8)$$

当 $\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2 = \Delta_{min}$, 则 $\frac{\partial}{\partial a_l} [\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2] = 0$, 即 $\sum_{i=1}^n \delta_i \frac{\partial \delta_i}{\partial a_l} = 0$ ($l = 1, 2$), 于是位移小数条纹的测量表达式为:

$$F(A_d) = -1.06 + 0.42A_d \quad (9)$$

当由实验的 OFSM I 信号测得 $G(t_a)$ 和 $G(t_b)$ 时, 把它们分别代替 $F(A_d)$, 由 (8) 式可计算出相应的小数位

移, 分别记做 A_d 和 B_d 。结合传统的条纹记数法, 获得 A_i , 则所测量的振动幅值为:

$$b\Delta L = (A_i + A_d + A_B) \lambda_0 / 8\pi \quad (10)$$

2.3 测量方法总结

(1) 对于一个 OFSM I 实验信号, 首先利用参考文献 [9] 可测得 C , α 的估计值。

(2) 由 OFSM I 理论模型 (1) 式, (2) 式和 (7) 式, 及第 (1) 步所获得的 α , C 的值, 建立观测数据组 $(A_{di}, G(t_i))$, 利用最小二乘法获得测量式 $F(A_d)$ 。

(3) 对 OFSM I 信号的实验数据进行微分处理, 获得脉冲信号, 经过正 (负) 脉冲记数获得整数条纹数目 N , 以确定 $A_i = 2N\pi$ 。

(4) 测量波形转折点 A 和 B 处的信号幅值, 即为 $F(A_d)$, 由 (8) 式确定 A_d 和 B_d 。

(5) 计算振动位移 $b\Delta L = (A_i + A_d + A_B) \lambda_0 / 8\pi$ 。

3 实验

图 3 为用于实验分析激光自混合干涉式位移测量的系统结构。实验中半导体激光管为 HL7851G, 输出

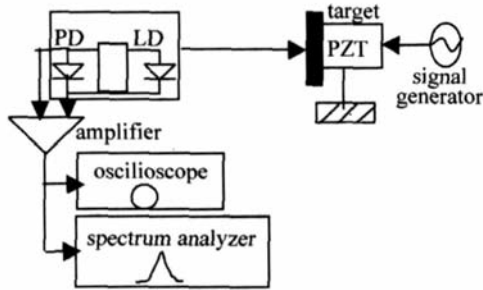


Fig 3 Experimental setup for measuring displacement with laser self-mixing interference

波长为 780nm, 阈值电流 $I_{th} = 45\text{mA}$, 输出功率小于 10mW, 外反射体由压电陶瓷 (piezoelectric ceramics PZT) (AE0505D16) 驱动, PZT 位移因子为 $0.116\mu\text{m}/\text{V}$, 反射体实际振动的最大位移计算公式为 $(U_{pp} \times 0.116) / 2$ 其中 U_{pp} 为驱动信号三角波的峰峰值, 直接由示波器读出, 由 PZT 参量计算出其最大位移为 $17.4\mu\text{m}$, 信号发生器输出的三角波经一个高电压放大器 (MDT694) 放大 15 倍后加到压电陶瓷上。探测器 (power detector PD) 探测到的自混合信号经处理电路 A (实验室自行设计) 处理后进入示波器 (agilent 54830B infinity)。光谱分析仪 (AQ6317C) 分析半导体激光器的中心波长。

由实验得到的一组振动信号和其相应的 OFSM I 信号见图 4。 $U_i(V)$ 表示驱动信号的电压, $G_i(n)$ 表示外强光相位对激光输出功率的调制。 $t(n)$ 表示离散化的采样点数。实验处理数据如表 1 所示。

减少 PZT 的时间滞后现象及环境和噪声的影响,

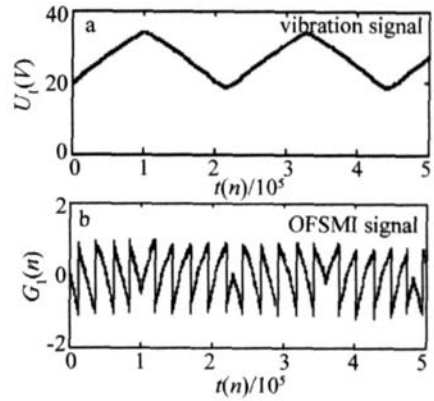


Fig 4 Vibration signals of the external cavity and their OFSM I signals

Table 1 Measuring results of the displacement

OFSM I signal	measure result of		$(\delta_{b\Delta L} / b\Delta L) \%$
	PZT (AE0505D16)	measure result of the author /nm	
	/nm		
signal 1	746.46	755.87	1.26
signal 2	776.62	767.30	1.20
signal 3	878.12	887.90	1.12
signal 4	905.96	895.99	1.10
signal 5	922.78	932.28	1.03
signal 6	952.94	972.67	1.01
signal 7	1186.24	1173.90	1.04
signal 8	1295.42	1280.52	1.15
signal 9	1368.56	1381.15	0.92
signal 10	1473.25	1459.10	0.96
signal 11	1624.12	1607.72	1.01
signal 12	1892.43	1911.73	1.02
signal 13	2054.38	2033.83	1.00
signal 14	2265.52	2241.96	1.04
signal 15	2462.26	2486.39	0.98
signal 16	2678.96	2705.75	1.10

可进一步提高实验测量精度。由表 1 知, 本文中的方法测量结果同实验处理结果吻合较好; 对于 $3\mu\text{m}$ 以下的振动, 测量相对误差在 1.20% 左右。

4 结论

基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量, 提出了利用条纹计数法精确测量外腔振动位移的方法。由半导体激光器在适度光反馈水平下的双稳态而获得锯齿波形的 OFSM I 信号, 该信号的微分脉冲经计数测量可实现位移的粗测。然后小数条纹分析给出了小数位移的精测表达式。实验结果表明, 所提出的方法可实现大量程高分辨力位移测量, 尤其对 $3\mu\text{m}$ 以下的位移, 本文中的算法位移测量相对误差约为 1.20%。这对进

(下转第 516 页)

红磷烟幕为例, 1.06 μm , 3.39 μm , 10.6 μm 的激光对红磷烟幕的消光系数分别为 $k(v, n) = 1.93, 0.34, 0.47^{[10]}$, 计算中烟幕浓度取 $C = 1\text{g}/\text{m}^2$ 。

可见, 在这种情况下, 烟幕对 1.06 μm 波长的激光衰减很快, 如果透过率要求为 10% 时, 对于实际作战中只分别需 0.6m, 3.5m, 2.5m 的烟幕厚度即可, 实际上, 在考虑大气对激光的消光作用时, 实际所需的烟幕厚度会更小。

3 结 论

用 Vander Hulst 近似方法数值研究了烟幕对激光的吸收、散射和衰减特性, 数值研究结果表明: (1) 在不同的烟幕复折射率情况下, 烟幕的散射因子都随烟幕粒径的增大, 先迅速增大后缓慢振荡并逐渐趋于稳定值 1, 前一阶段可认为形成的是粒子散射, 即米氏散射, 当烟幕粒径大小和入射激光波长相当时, 散射作用最强; (2) 无论在改变表征烟幕散射部分 n_r 还是改变表征烟幕吸收部分 n_i 情况下, 烟幕衰减因子都会随着烟幕微粒粒径的增大而振荡衰减变化, 最后趋于稳定值 2, 这是吸收因子和散射因子共同作用的结果, 而且当烟幕微粒粒径与激光入射光波长相近时, 烟幕衰减因子振幅最大, 即衰减因子达到最大, 此阶段可认为散射因子居主导地位。因此, 在这种情况下, 烟幕微粒粒径大小应与入射激光波长大小相当, 以最大程度散射入射激光能量; (3) 针对不同的激光波长, 存在一个最佳的烟幕微粒参量, 使对激光的干扰效果达到最佳, 但最佳烟幕微粒参量难以用一个简单原则来判断, 必须根据实际需要中所采用的具体烟幕材料, 合理的通过建立数学模型并进行正确计算而得出。

(上接第 501 页)

进一步完善光反馈自混合干涉技术的位移测量有重要意义。

参 考 文 献

- [1] WANG W M, GRATTA K T V, BOVLE W J Q, *et al*. Active optical feedback in a dual-diode laser configuration applied to displacement measurements with a wide dynamic range [J]. *Appl Opt* 1994, 33 (10): 1795-1801.
- [2] YU Y G, GUIDO G, SILVANO D. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2004, 16 (4): 990-992.
- [3] LORENZO S, YU Y G, GUIDO G, *et al*. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2004, 53(1): 223-232.
- [4] 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*

参 考 文 献

- [1] LIM, FAN D Q, YIN Ch Y. Study on corresponding relation of laser and infrared transmittivity for smoke screen [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* 2006, 25(2): 127-130 (in Chinese).
- [2] HU J, YANG Z K, YANG D Q. Smoke particles' recognition and Monte Carlo simulation of laser scattering characters [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2002, 29(10): 950-954 (in Chinese).
- [3] QIU J, MEI J T. Interference of the smoke screen confronting infrared guided weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2006, 35(2): 212-215 (in Chinese).
- [4] GE Q Sh, ZHANG L J, GE Q L. Mechanism study of smoke concealment in interfering air-raid of laser-guided weapon [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2005, 6(2): 149-152 (in Chinese).
- [5] SONG D M, LIU Sh M, WANG N Y, *et al*. Study on the effect of materials granularity on infrared extinction capability of smoke screen [J]. *Infrared & Pyrotechnics* 2005, 2: 6-9 (in Chinese).
- [6] LIU G R, HUANG Sh X, HU F, *et al*. IR extinction effect of red phosphorus smoke screen [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry* 2005, 22(7): 709-714 (in Chinese).
- [7] WANG X Y, PAN G P. Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to 10.6 μm laser emission [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2005, 34(6): 636-640 (in Chinese).
- [8] WANG X Y, PAN G P. Study of the extinction ability of several kinds of smoke screen to CO₂ laser emission [J]. *Laser & Infrared* 2006, 36(2): 144-146 (in Chinese).
- [9] ZHONG Zh N. Numerical simulation of the extinction of smoke screen [J]. *Electro-Optics & Passive Measurements* 1999, 1: 14-19 (in Chinese).
- [10] YAO L J, GAO J L, XIAO K T, *et al*. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2004: 38-40, 51-56 (in Chinese).
- [11] LI Sh X. Electro-optical countermeasure technology [M]. Changsha National Defence Industry Press, 2000: 153-156 (in Chinese).
- [12] GAO J M, LING Y Sh, SHI J M, *et al*. Quantitative analyzed and investigated of extinction parameter with the smoke screen interfering [J]. *Electro-Optics & Passive Measurements* 1997, 3: 1-6 (in Chinese).
- [13] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al*. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2004: 38-40, 51-56 (in Chinese).
- [5] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al*. Interference of two beams in a He-Ne laser with optical feedback [J]. *Laser Technology* 2003, 27(5): 470-472 (in Chinese).
- [6] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Steady solution to the self-mixing interference system for measuring displacement [J]. *Acta Optica of Sinica* 2003, 23(1): 80-84 (in Chinese).
- [7] DING Y Ch, ZHANG Sh L, LI Y, *et al*. Experimental study on the self-mixing interference with orthogonal polarized He-Ne light [J]. *Laser Technology* 2004, 28(1): 33-35 (in Chinese).
- [8] YU Y G, CHENG M, QIANG X F. Self-mixing interference effects in a multimode laser diode [J]. *Acta Optica of Sinica* 2001, 21(9): 1093-1098 (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] OZDEMIR S K, SHINOHARA S, ITO S, *et al*. Compact optical instrument for surface classification using self-mixing interference in a laser diode [J]. *Opt Engng* 2001, 40(1): 38-43.