

文章编号: 0258-7025(2009)05-1166-05

采用四象限探测器检测干涉条纹正交信号的新方法

黄强辉 曹益平

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 将四象限探测器应用于激光干涉的测量领域, 提出一种检测激光干涉条纹正交信号的新方法。利用四象限探测器的探测区域象限化特征, 以及干涉条纹在探测单元内的矢量叠加原理, 实现了干涉条纹的正交信号检测。实验表明, 通过改变四象限探测器的旋转角度, 可以简便地检测到条纹的正交信号。当检测不同周期的干涉条纹时只需旋转四象限探测器至适当角度, 就可检测到相应周期干涉条纹的正交信号, 并且采用了差分技术处理信号, 从而有效地抑制了外界环境产生的噪声。与传统检测方法相比具有易于操作、抗干扰能力强等优点。

关键词 激光技术; 正交信号; 激光干涉; 四象限探测器; 差分技术

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1166

New Method for Detecting Orthogonal Signals of Laser Interference Fringes Using Four-Quadrant Detector

Huang Qianghui Cao Yiping

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

Abstract A new method for detecting orthogonal signals of laser interference fringes based on four-quadrant detector is presented. Using the quadrant characteristic of four-quadrant detector and the vector superposition principle of the cosinusoidal interference fringe distribution within the detected region, the orthogonal signals for fringes has been detected successfully. The experimental results show that the orthogonal signals of fringes can be detected expediently by rotating the four-quadrant detector around its center. When the other interference fringes with different period is detected, the orthogonal signals of fringes can also be obtained easily only by rotating the four-quadrant detector to another orientation. In order to restrain noise effectively, a difference technique has been adopted in signal processing. Compared to the traditional detection method, this method is easy to operate and has strong anti-jamming ability.

Key words laser technique; orthogonal signals; laser interference; four-quadrant detector; difference technique

1 引 言

激光干涉技术种类较多, 如单频激光干涉^[1]、激光外差干涉^[2,3]、法布里-珀罗干涉^[4]、激光多波长干涉^[5]和激光偏振干涉^[6]等, 这些技术在各个领域得到广泛应用。在长度计量中主要采用单频激光干涉和双频激光干涉^[7,8]。双频激光干涉是一种激光外差干涉, 具有测量精度高、抗干扰能力强等优点, 广泛应用于各种超精密测量、检测和加工设备中, 如

金刚石车床、光刻机等。然而, 随着工业生产对测量速度和测量精度等要求的提高, 双频激光干涉仪因较大的光学非线性误差^[9,10]和副载波频率的变化范围有限, 难以实现在更高运动速度下高精度的测量。单频激光干涉测量没有运动速度的限制, 同时随着新型电子器件及新技术的引入, 其易受环境干扰等问题正逐步得到解决^[11,12], 因此, 单频激光干涉技术备受人们关注。在单频激光干涉测长技术中, 干

收稿日期: 2008-06-16; 收到修改稿日期: 2008-09-03

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333), 四川省科技攻关项目(2006Z01-028)和四川省学术和技术带头人培养基金资助课题。

作者简介: 黄强辉(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: qianghui15@163.com

导师简介: 曹益平(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维传感研究。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net (通信联系人)

涉条纹的判向是通过检测两个相位差为 90° 的正交信号来实现的,传统的方法是通过在干涉条纹移动方向上放置两个相距一定间隔的探测器来获取条纹的正交信号。由于这两个探测器的间隔与条纹的周期有关,当条纹的周期发生改变时,它们的间隔必须作适当的调整,从而使这种方法在实际应用中缺乏一定的普适性。本文提出新的检测条纹正交信号方法,采用四象限探测器^[13,14]作为探测元件,运用差分技术处理像限探测单元的电流信号,只需旋转四象限探测器角度便可获取条纹的正交信号,且可适用不同周期的干涉条纹正交信号的检测。

2 四象限探测器检测正交信号的基本原理

传统检测正交信号的方法如图 1(a)所示,当激光入射到半透半反平面镜 B 上时,激光束将分别入射到 M1 与 M2 两平面反射镜,当 M1 倾斜时,经 M1 与 M2 反射的光束在观测区域相遇后产生干涉条纹,干涉条纹的光强为

$$I(x, y) = 2A^2 \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi(x, y)$ 为相位差, A 为干涉条纹的振幅,经验证 A 的取值对检测结果没影响,归一化(1)式得

$$I(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos[\Delta\varphi(x, y)]. \quad (2)$$

M1 固定, M2 沿光束方向以速度 V 移动,条纹的空间周期为 T ,则在 t 时刻时干涉条纹的光强为

$$I_t(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \frac{V}{T}t + \Delta\varphi(x, y)\right]. \quad (3)$$

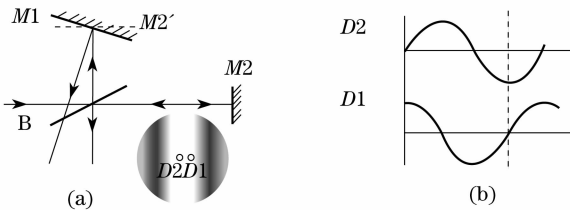


图 1 传统检测正交信号的方法

Fig. 1 Traditional method of detecting orthogonal signal
D1 和 D2 为条纹移动方向上放置的两光电探测器,仔细调节 D1 和 D2 的间隔为 T 的四分之一,便可获得相位差为 90° 的两个输出信号,如图 1(b)所示。

由分析可知,传统的方法具有检测原理直观、测量精确度高等优点。但它易受外界的噪声干扰,且两个探测器的间隔与信号的周期有关。当信号周期改变时,探测器的间隔也必须改变,从而使该方法在实际应用中受到一定的限制。

四象限探测器是由四个光电二极管组成的阵列,如图 2(a)所示,探测区域被正交分割线分为 A, B, C, D 四个象限。图 2(b)是探测区域干涉条纹示意图。以探测器的中心为原点,干涉条纹方向为 Y 轴方向,条纹平移方向为 X 轴方向,建立直角坐标系,探测器绕其中心旋转角度 α ,变化区间为 $[0^\circ, 90^\circ]$,如图 3 所示。对应象限经前置放大后获取总的电信号分别是 I_A, I_B, I_C, I_D ,则有

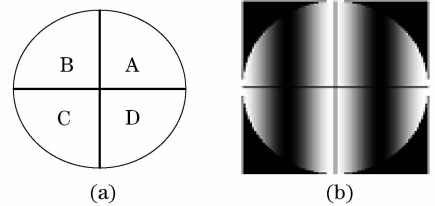


图 2 四象限探测器示意图

Fig. 2 Schematic of four-quadrant detector

$$\left\{ \begin{aligned} I_A &= K_1 K_2 \iint_{S_{\alpha 1 a 2}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \frac{V}{T}t + \Delta\varphi(x, y)\right] \right\} dS \\ I_B &= K_1 K_2 \iint_{S_{\beta 1 b 2}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \frac{V}{T}t + \Delta\varphi(x, y)\right] \right\} dS \\ I_C &= K_1 K_2 \iint_{S_{\gamma 1 c 2}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \frac{V}{T}t + \Delta\varphi(x, y)\right] \right\} dS \\ I_D &= K_1 K_2 \iint_{S_{\delta 1 d 2}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi \frac{V}{T}t + \Delta\varphi(x, y)\right] \right\} dS \end{aligned} \right. , \quad (4)$$

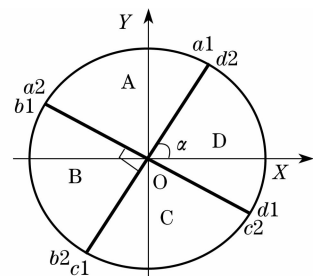


图 3 直角坐标系下的探测器

Fig. 3 Detector in coordinate system

式中 K_1 为四象限探测器的光电转换系数, K_2 为前置放大器的放大率,由(4)式分析可知,当 α 变化时,

I_A, I_B, I_C, I_D 也随之变化。当探测器直径 $D = 6$ mm, $T = 3$ mm 即 $D/T = 2$, 探测器旋转角度为 α 时, 条纹移动一周探测到 5 组信号: I_T, I_A, I_B, I_C, I_D , 其中 I_T 为探测区域内的总信号。分析可知, 当 α 取某些特定角度时, 可使两个信号振幅相近, 但两者的相位差不等于 90° ; 或使它们的相位差等于 90° , 但其振幅相差较远。例如, 当 $\alpha = 79.16^\circ$ 时, 得到的信号曲线如图 4 所示, 其中 I_0 为 I_T 的振幅。显然这 5 条曲线的周期是一致的, 虽然 I_A 与 I_C, I_B 与 I_D 的振幅相近但相位差不为 90° , 不满足正交的条件; 而此时 I_A 与 I_B, I_C 与 I_D 的相位差都为 90° , 满足正交信号的条件, 然而 I_A 与 I_B, I_C 与 I_D 的振幅相差很大。振幅不一致带来许多不利的影响, 如: 在信号放大处理过程中, 由于两个信号大小不一致要求放大器的增益系数不一致, 这不仅增加了电路的复杂性, 甚至会影响测量的精确度。此外, 由于 I_A, I_B, I_C, I_D 易受外界噪声的影响, 致使本方法的实用性不强。进一步分析, 根据信号在振幅和相位上的特点, 将 I_A 与 I_B, I_C 与 I_D 进行差分, 即

$$I_{AB} = I_A - I_B, \quad (5)$$

$$I_{CD} = I_C - I_D, \quad (6)$$

将 $\alpha = 79.16^\circ$ 情况下所得的信号按 (5), (6) 式进行差

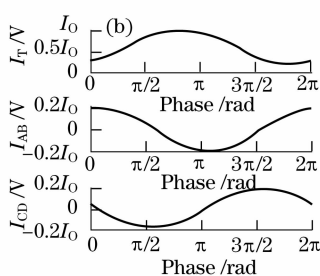
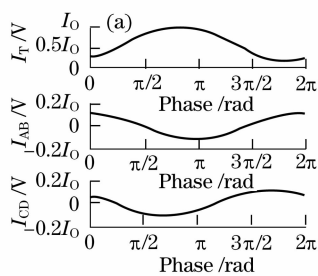


图 5 在不同旋转角度下的 I_{AB} 与 I_{CD} 曲线。(a) $\alpha = 79.16^\circ$; (b) $\alpha = 44.37^\circ$

Fig. 5 Curves of I_{AB} and I_{CD} at different rotary angles

3 实验与结果分析

为验证上述理论的可行性与实用性, 并查找检测到正交信号的角度 α , 进行实验验证。实验中选定四象限探测器的直径 $D = 6$ mm, 实验步骤如下: 1) 选定干涉条纹周期 T , α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化。2) 条纹相对探测器移动, 从而检测到差分信号 I_{AB} 与 I_{CD} 。3) 验证 I_{AB} 与 I_{CD} 的正交性, 如果满足正交条件, 角度 α 为所求, 否则改变旋转角度 α , 重复步骤 2), 直至查找到满足正交条件的角度。4) 采用示波器显示 I_{AB} 与 I_{CD} 的信号波形, 即可直观判断这两组信号是否正交。实验结果如图 6 所示。

分得到图 5(a) 的曲线。在图 5(a) 中, I_{AB} 与 I_{CD} 振幅很相近但二者的相位差不为 90° 。在其他条件不变的情况下, 当 $\alpha = 44.37^\circ$ 时, 发现 I_{AB} 与 I_{CD} 振幅相近且相位差为 90° , 如图 5(b) 所示。这样不仅解决了振幅相差过大的问题, 而且有效抑制了背景光的影响和四象限探测器共模噪声的影响, 增强了抗干扰的能力, 使本方法更具实用性。

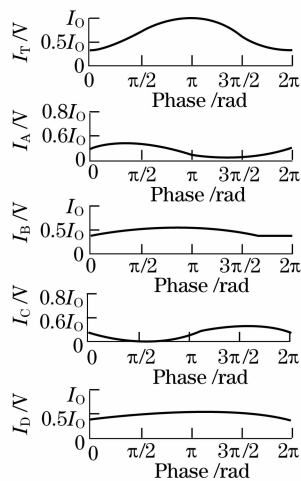


图 4 信号曲线

Fig. 4 Signals' curves

图 6(a) 是当 $D/T = 2$ 时探测器所需检测的干涉条纹图, 旋转探测器当 $\alpha = 44.10^\circ$ 时示波器所获取的信号波形图如图 6(b) 所示。分析可知: 图 6(b) 中的两组信号是一对正交信号, 而且它们的振幅基本一致, 表明旋转探测器的角度确实可检测到激光干涉条纹正交信号。

为了验证该方法可检测探测区域内不同周期干涉条纹的正交信号, 进行了如下的实验。改变激光干涉条纹间距, 使 $D/T = 3$, 此时干涉条纹如图 7(a) 所示, 在不改变探测系统其他参数的情况下, 仅旋转探测器, 发现当 $\alpha = 46.25^\circ$ 时, 仍可获得如图 7(b) 所

示的激光干涉条纹正交信号。表明不管干涉条纹的周期宽细如何,只要适当旋转四象限探测器的角度,

均可检测到该条纹周期下的正交信号,而无需改变测量系统的其他参数。

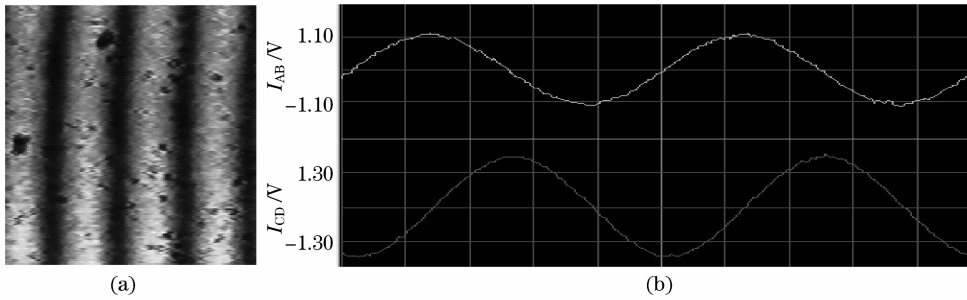


图 6 当 $D/T=2$, $\alpha=44.10^\circ$ 时的干涉条纹(a)及其信号曲线(b)

Fig. 6 Interference fringes (a) and their signals' curves (b) when $D/T=2$, $\alpha=44.10^\circ$

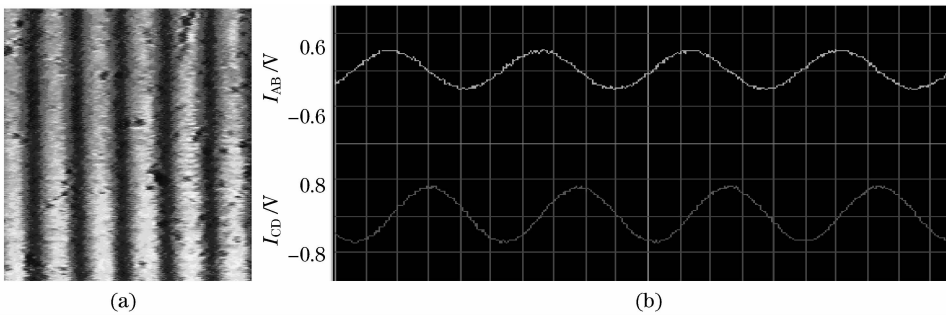


图 7 当 $D/T=3$, $\alpha=46.25^\circ$ 时的干涉条纹图(a)及其信号曲线(b)

Fig. 7 Interference fringes (a) and their signals' curves (b) when $D/T=3$, $\alpha=46.25^\circ$

对图 6,7 两种状态下的干涉条纹进行理论仿真,可得当 $D/T=2$ 和 3 时,获取正交信号的旋转角度分别为 $\alpha=44.37^\circ$ 和 $\alpha=45.88^\circ$,对比分析可知,实验结果与数值仿真结果是基本一致的,但确实存在一定的差异,分别为 -0.37° 和 0.27° ,主要原因是实验中的激光干涉条纹存在散斑噪声,而数值仿真没有考虑该因素的影响;另外探测实验系统的探测电路本身不可避免地存在电学噪声,在一定程度上会引入误差。

4 结 论

通过推导、实验和分析,可以看出本文提出的基于四象限探测器检测激光干涉条纹的正交信号的方法是可行的,与传统检测正交信号的方法相比具有操作简便、能够检测不同周期的正交信号等优点,特别是采用了差分技术,在保证正交信号振幅一致性的同时,有效抑制了背景光影响和四象限探测器共模噪声的影响,大大提高了探测系统的抗干扰能力。当四象限探测器为 PIN 光电管时,可在高速运动中响应高抗干扰的干涉条纹正交信号,以适应现代精密干涉测量技术的要求。

参 考 文 献

- 1 František Petrů, Ondřej Číp. Problems regarding linearity of data of a laser interferometer with a single-frequency laser [J]. *Precision Engineering*, 1999, **23**:39~50
- 2 Zuzana, Bartáková, Rudolf Bálek. Use of the application of heterodyne laser interferometer in power ultrasonics [J]. *Ultrasonics*, 2006, **44**:567~570
- 3 Kou Ge. Study of photoelasticity of optical material by using laser heterodyne interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 68~70
寇 戈. 采用激光外差干涉仪测量光学光弹特性的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):68~70
- 4 K. Grove-Rasmussen, H. I. Jørgensen, P. E. Lindelof. Fabry-Perot interference, Kondo effect and Coulomb blockade in carbon nanotubes [J]. *Physica E*, 2007, **40**(1):92~98
- 5 Deng Luogen. Absolute distance interferometry using multiwavelength lasers: theories and progress review [J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(2):65~72
邓罗根. 多波长激光绝对距离干涉计量术的原理与发展 [J]. *激光技术*, 1997, **21**(2):65~72
- 6 Zhou Yan, Deng Zhongchao, Fu Huiwen *et al.*. Measuring plasma poloidal magnetic field by using HCN interferometer/polarimeter [J]. *Chinese J. Laser*, 2001, **A28**(9):809~812
周 艳, 邓中朝, 傅荟文等. HCN 激光偏振干涉测量等离子体极向磁场 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(9):809~812
- 7 Zhang Zhiping, Cheng Zhaogu, Qin Zhaoyu *et al.*. Influence of acceleration on the error of laser dual-frequency interferometer [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(5):694~698
张志平, 程兆谷, 覃兆宇等. 加速度对激光双频干涉仪测量误差的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):694~698
- 8 Zeng Lijiang, Ichiro Fujima, Akiko Hirai *et al.*. A two-color

- heterodyne interferometer for measuring the refractive index of air using an optical diffraction grating [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**:243~247
- 9 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1027~1030
陈洪芳, 丁雪梅, 钟 志 等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1027~1030
- 10 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J. Laser*, 2006, **33**(11):1562~1566
陈洪芳, 丁雪梅, 钟 志. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1562~1566
- 11 Qi Yongyue, Zhao Meirong, Lin Yuchi. Methods of improving accuracy of laser interferometry system [J]. *J. Tianjin University*, 2006, **39**(8):989~993
齐永岳, 赵美蓉, 林玉池. 提高激光干涉测量系统精度的方法与途径 [J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(8):989~993
- 12 Han Xudong, Ai Hua, Long Kehui. Study on a novel single frequency laser interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5):49~51
韩旭东, 艾 华, 龙科慧. 一种新型单频激光干涉系统的研究 [J]. *光电工程*, 2002, **29**(5):49~51
- 13 C. Mattsson, K. Bertilsson, G. Thungstrom *et al.*. Manufacturing and characterization of a modified four-quadrant position sensitive detector for out-door applications [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 2004, **531**:134~139
- 14 K. Bertilsson, E. Dubaric, G. Thungstrom *et al.*. Simulation of a low atmospheric-noise modified four-quadrant position sensitive detector [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A.*, 2001, **466**:183~187