

四频差动激光陀螺自适应程长控制技术

汪之国 龙兴武 王 飞 刘小虎

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了减小四频差动激光陀螺(FMDLG)对外界干扰的敏感性,设计了自适应程长控制系统使之工作于最佳工作点。对 FMDLG 的程长进行小抖动正弦调制,利用相敏检波技术从光强中提取调制信号的基波和二次谐波幅度。上述两个信号和光强一起用来实现自适应程长控制,它包括自动增益控制、自动调制幅度控制和程长控制 3 个环路。实验表明,自适应控制可有效消除光学和电子元件参量以及光强变化对控制系统的影响,而且可使 FMDLG 稳定地工作在最佳工作点上,从而降低其磁灵敏度。

关键词 激光器;程长控制;四频差动激光陀螺;最佳工作点

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902010

Adaptive Path Length Control Technique for Four-Mode Differential Laser Gyro

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei Liu Xiaohu

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to reduce the sensitivity to external disturbance of four-mode differential laser gyro (FMDLG), an adaptive path length control system is designed to make the FMDLG run at optimal operating point. Path length of the FMDLG is modulated with small amplitude sine wave. The amplitudes of 1st and 2nd harmonic signals in light intensity are extracted with phase sense detector technique. The above two signals along with light intensity are used to realize adaptive path length control, which consist of automatic gain control, automatic modulation control and path length control. Experimental results show that adaptive path length control reduces the influence of variations of optical and electronic components parameters as well as light intensity on control system. It is important that it can make the FMDLG run at optimal operating point steadily. The adaptive path length control helps to reduce FMDLG's sensitivity to magnetic field.

Key words lasers; path length control; four-mode differential laser gyro; optimal operating point

OCIS codes 140.3370; 140.3560; 120.4640

1 引言

与机械抖动激光陀螺相比,四频差动激光陀螺(FMDLG)具有比例因子误差小,不产生机械噪声和干扰等优点,在航空、航天等领域具有广泛应用^[1~4]。为进一步提高 FMDLG 的性能,除改进本体设计外,电子学装置的改进也是一个重要途径^[5,6],其中程长控制(PLC)是研究重点之一^[7~9]。文献^[10]的研究表明,FMDLG 存在一个对磁场等外界干扰最不敏感的最佳工作点,但一般的稳频系统并不能将它控制在最佳工作点上,如小抖动稳频

只能使 FMDLG 工作于光强最大的工作点上^[11]。此外,PLC 系统一般采用比例积分微分(PID)控制器,在陀螺仪出厂时将比例 P 、积分 I 、微分 D 三个参量整定为最佳状态,兼顾响应速度、稳态误差和稳定性。然而在实际应用中,温度或陀螺工作时间的增加都会导致光强、压电陶瓷(PZT)微位移器灵敏度等参量发生变化,进而影响 PLC 系统的性能。为了解决上述两个问题,本文对 FMDLG 的程长进行小抖动调制,采用相敏检波技术提取它输出光强中的基波和二次谐波幅度,设计了自适应 PLC 系统。

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-06-13

作者简介: 汪之国(1982—),男,博士,讲师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: maxborn@163.com

该系统可使 FMDLG 工作于峰值光强附近任意工作点上,而且基本不受外界干扰和光学、电子元件参量变化的影响,因而有助于提高 FMDLG 的性能。

2 原 理

FMDLG 输出光强 I_A 的扫模曲线可近似用二次曲线表示为^[11]

$$I_A = I_{A0} [1 - a_2 (f - f_0)^2], \quad (1)$$

式中 I_{A0} 为 I_A 的极大值, a_2 为拟合系数, f 为 FMDLG 中 4 个模式的平均频率, f_0 为 I_A 极大时 4 个模式的平均频率,不妨将 f 称为工作点,通过改变程长可改变工作点。

FMDLG 至少有一面反射镜粘 PZT, PLC 系统根据输出光强产生控制电压驱动 PZT,从而使 FMDLG 工作在合适的工作点上。将 PLC 系统抽象为图 1 所示的框图。

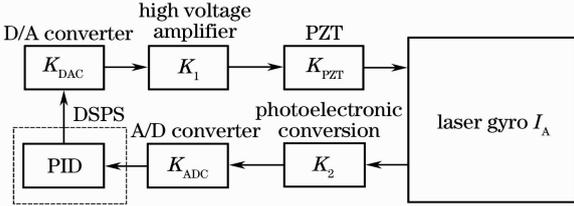


图 1 程长控制模型

Fig. 1 Path length control model

在图 1 中,数模(D/A)转换、高压放大器(即 PZT 驱动器)、PZT 灵敏度(单位 PZT 电压导致的

工作点变化)、光电转换与放大、模数(A/D)转换都用相应的比例系数 K 表示,而用(1)式表示 FMDLG 输出光强 I_A 与工作点的函数关系,则数字信号处理系统(DSPS)采集到的 I_A 信号表示为

$$y = K_{ADC} K_2 I_{A0} [1 - a_2 (K_{PZT} K_{DAC} K_1 V - K_{PZT} K_{DAC} K_1 V_0)^2], \quad (2)$$

式中 V 为 DSPS 输出的电压码, V_0 为 I_A 极大值对应的电压码。

在 PZT 上施加正弦小抖动调制电压,(2)式中的 $K_1 V$ 应表示为 $K_1 V + V_m \cos \omega t$, 这里调制电压 V_m 并未乘以 K_1 是因为实际上 V_m 未经过高压放大而直接耦合到 PZT 上。

采用变量代换,将(2)式简化为

$$y = I_0 [1 - a(x + x_m \cos \omega t)^2], \quad (3)$$

式中 $I_0 = K_{ADC} K_2 I_{A0}$, $a = a_2 (K_{PZT} K_{DAC})^2$, $x = K_1 (V - V_0)$, $x_m = V_m$ 。由于电路元件参量、光强等已体现在 I_0 和 a 之中,因此 x 值与工作点一一对应。

对(3)式进行分解,其中的直流项为 $y_0 = I_0 (1 - ax^2 - \frac{1}{2} ax_m^2)$, 调制频率基波为 $y_1 = -2aI_0 x x_m \cos(\omega t + \varphi)$, 调制频率二次谐波为 $y_2 = -\frac{1}{2} aI_0 x_m^2 \cos(2\omega t + 2\varphi)$ 。

采用相敏检波技术,分别以 $\cos \omega t$ 、 $\sin \omega t$ 为参考信号提取 y_1 的幅度,以 $\cos 2\omega t$ 和 $\sin 2\omega t$ 为参考信号提取 y_2 的幅度,数学形式为

$$z_1 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} \int_0^\tau y_1 \cos \omega t dt\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau} \int_0^\tau y_1 \sin \omega t dt\right)^2} = aI_0 |x| x_m, \quad (4)$$

$$z_2 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} \int_0^\tau y_2 \cos 2\omega t dt\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau} \int_0^\tau y_2 \sin 2\omega t dt\right)^2} = \frac{1}{4} aI_0 x_m^2. \quad (5)$$

根据 $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau y_1 \cos \omega t dt = -aI_0 x x_m \cos \varphi$ 的正负可给

z_1 加上符号,从而得到 $z_1 = aI_0 x x_m$ 。

然后进行简单的数学运算并注意调制量 x_m 非常小可得 3 个变量

$$z_3 = \frac{z_1^2}{4z_2} = aI_0 x^2, \quad (6)$$

$$z_4 = y_0 + z_3 = I_0 - \frac{1}{2} aI_0 x_m^2 \approx I_0, \quad (7)$$

$$z_5 = \frac{z_1 x_m}{4z_2} = x. \quad (8)$$

PLC 系统以 z_1 作为 PLC 的误差信号,光强的变化体现在 I_0 上, PZT 灵敏度的变化体现在 a 上,而 x 与它们无关,因此只要使 $aI_0 x_m$ 不变就不会改变误差信号随工作点的灵敏度。采用自动增益控制(AGC)环路来保持 I_0 不变, AGC 实现方法有多种,下面的实验通过软件算法实现。采用自动调幅控制(AMC)环路对 x_m 进行实时控制,与 AGC 一起来使 $aI_0 x_m$ 保持恒定。通过设计 AGC 和 AMC 两个环路,可使整定好的 PID 参量不受光强或 PZT 灵敏度变化的影响。

3 实验结果

3.1 实验系统设计

利用计算机和 PCI6221 数据采集卡对自适应 PLC 进行了原理验证,在 Labview 环境下设计了控制程序,如图 2 所示。PCI6221 数据采集卡的模拟输入通道采集 I_A ,通过模拟输出通道输出 PZT 驱

动电压用以扫模或控制程长,同时将调制电压叠加在扫模电压或 PLC 电压上。程序按(4)~(8)式设计, k_g 用来控制 I_A 的增益以使 I_0 不变, x_m 乘以余弦信号发生器用来调制腔长, z_1 用来控制程长, G_{ref} 是 AGC 环路的设定值, M_{ref} 是 AMC 环路的设定值,AVE 表示获取平均值。

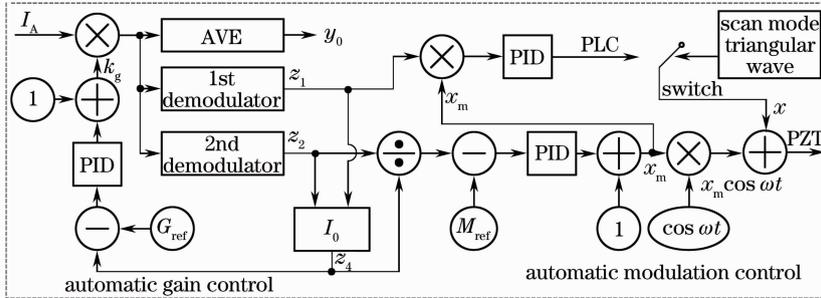


图 2 自适应程长控制框图

Fig. 2 Block diagram of adaptive PLC

首先将图 2 中的开关切换到三角波扫描电压上,得到 I_A 极大值附近的扫模结果如图 3 所示。在 I_A 的极大值附近, z_2 和 z_4 基本不随扫模电压(工作点)而变,表明用(1)式对极值附近 I_A 随工作点的变化关系进行近似是可行的。

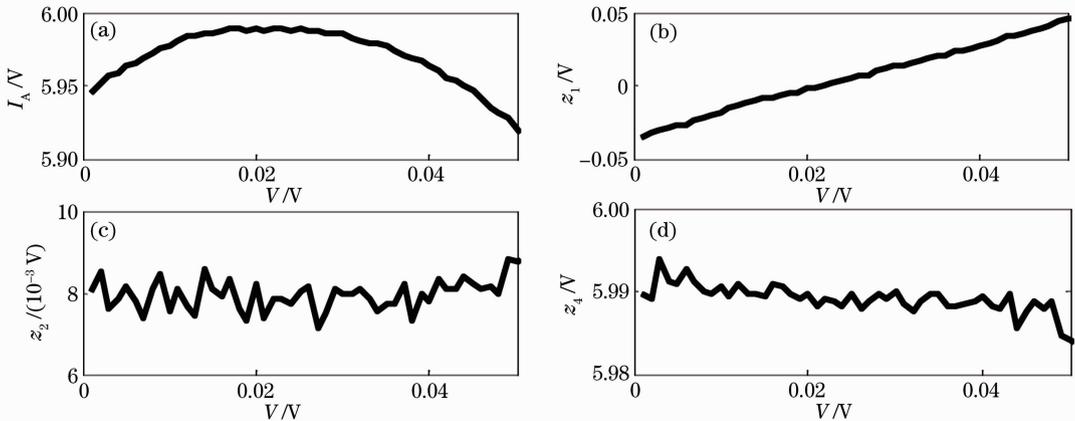


图 3 自适应程长控制扫模信号

Fig. 3 Mode scanning signal of adaptive PLC

设计了以下两个实验来考察自适应 PLC 系统在外界条件发生变化时的有效性和稳定性。

1) 光强变化:在采集卡的模拟输入之前加入一级比例放大电路,用可调电阻改变放大倍数,来模拟电路增益或光强变化使 I_0 发生变化的情况。首先使自适应 PLC 系统工作,然后随机改变可调电阻大小,同时监控 I_A 原始信号的平均值 y_0 (不同于图 2 中的 y_0)、 k_g 和 z_4 ,结果如图 4 所示。 I_A 在 5.6~6.8 V 范围内变化时,AGC 环路使 k_g 随之变化,从而维持 z_4 不变。图中 z_4 出现的毛刺来自于电路增益突然的变化,但很快 AGC 控制环路就将 z_4 修正到 6 V 的设定值,这也从另一个方面体现了 AGC

环路控制的稳定性。FMDLG 正常工作时光强不存在发生跳变的可能,因此在实际应用中不会出现大的毛刺。

2) PZT 灵敏度变化:该 FMDLG 采用两片 PZT,同时使用时 x_m 为 3.0 V,仅使用一片时, x_m 为 5.7 V,表明 AMC 环路可有效消除 PZT 灵敏度变化的影响,之所以 x_m 不是原来的 2 倍是因为 PZT 灵敏度存在个体差异以及 AMC 控制存在一定的稳态余差。

以上两个实验表明,自适应 PLC 系统在整个环路的前端输入或后端输出发生变化时,仍能保持整个系统的正常工作。

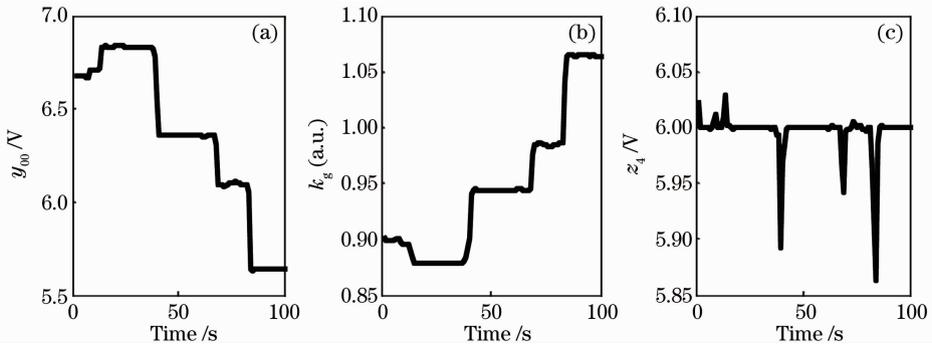


图 4 自适应程长控制对电路增益的修正作用

Fig. 4 Correction functions of adaptive PLC to circuit gain

3.2 带偏置的 PLC 系统设计

在图 2 的基础上增加偏置控制,就构成了带偏置的 PLC 系统。引入偏置主要是为了实现工作点人为可控,即 FMDLG 不一定工作于使 I_A 极大的工作点,而是会根据实际需要调整至最佳工作点 x_{off} 处。

由(3)式可知

$$y = I_0(1 - ax^2). \quad (9)$$

当需要将 y 控制在 $x = x_{off}$ 处时,对 PLC 环路应该有

$$aI_0(x - x_{off})x_m = 0, \quad (10)$$

即只需对图 2 中的自适应 PLC 所用的误差信号进行修正即可实现偏置,系统框图如图 5 所示。

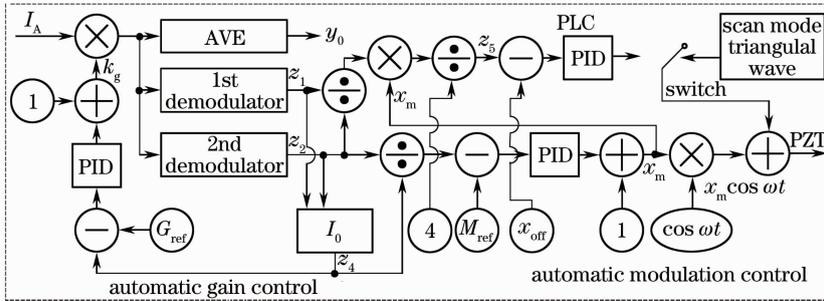


图 5 带偏置的程长控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of PLC with offset

最佳工作点 x_{off} 通常在陀螺仪出厂前标定好,由(8)式可知, $x = z_5$ 仅与 PZT 驱动电路放大倍数有关,且与工作点一一对应,因此用 x 标定最佳工作点具有足够的可靠性。其扫模曲线如图 6 所示,采用最小二乘线性拟合求得斜率为 66.6,与 PZT

驱动电路的高压放大倍数基本一致(由于 PZT 对不同频率电压信号的响应不同,以及交流耦合损失等原因,比实际放大倍数略大),只要 PZT 驱动电路的放大倍数不变,该斜率就不变。在实际应用中选用精密电阻可保证 x 的稳定性在 0.1% 以内,从而实现偏置点的可靠控制,使 FMDLG 工作于最佳工作点上。

设计带偏置的 PLC 系统的主要目的是使 FMDLG 可靠地工作在磁敏感性最小的工作点上,为了验证系统性能,改变 PLC 系统的偏置,并在放电管方向施加磁场,分别测量不同偏置对应的磁灵敏度(MS)。FMDLG 未采取任何磁屏蔽措施,所得结果如图 7 所示。可以看到,偏置对磁敏感性影响很大。当 x 为 0 时,即为普通小抖动稳频所确定的工作点,磁灵敏度高达 40.3 Hz/mT;随着 x 向负轴方向改变,磁灵敏度逐渐减小,当到达 -0.25 V 时,磁灵敏度只有 1.2 Hz/mT;当到达 -0.27 V 时,磁灵敏度接近为 0;但继续向负轴改变,磁灵敏度又逐渐增大,因为这时已过了最佳工作点。

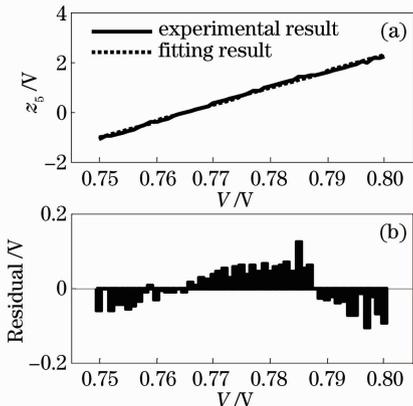


图 6 z_5 的扫模曲线

Fig. 6 Scanning mode curves of z_5

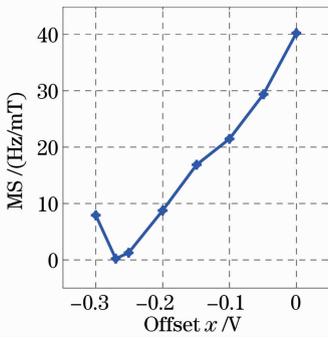


图7 磁灵敏度随 PLC 系统偏置的变化

Fig. 7 Magnetic sensitivity as a function of PLC offset

在实际应用中,将该 FMDLG 的偏置设为 -0.27 V,室温静态测试结果如图 8 所示,可见该系统能够长时间稳定工作。

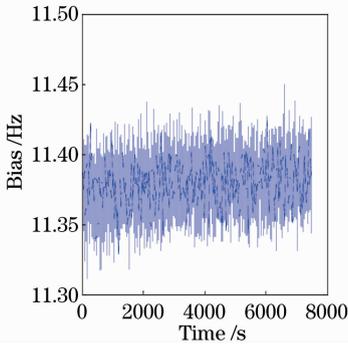


图8 零偏随时间变化曲线

Fig. 8 Relationship between bias and time

4 结 论

采用正弦小抖动信号调制 FMDLG 的程长,对光强中调制信号的基波和二次谐波进行解调,据此设计了 AGC 和 AMC 环路,与 PLC 环路一起组成自适应程长控制系统。实验结果表明,光强变化 20% 或 PZT 灵敏度变化 1 倍时,AGC 和 AMC 环路能对变化量进行补偿,因此自适应 PLC 系统能保证 FMDLG 稳定工作于设定的工作点上。FMDLG 的磁灵敏度随工作点偏置变化很大,通过使它稳定在磁灵敏度最小的工作点上,可大大增强 FMDLG 对外界磁场干扰的抵抗力。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Overview of four-mode differential laser gyros[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 040005
汪之国,龙兴武,王飞. 四频差动激光陀螺综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 040005
- 2 C. H. Volk, S. C. Gillespie, J. G. Mark *et al.*. Multioscillator ring laser gyroscopes and their applications[C]. RTO AGARDO-graph 339, 1999
- 3 M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock-laser gyro[C]. Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 1989. 235~241
- 4 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Research on Langmuir flow patterns in laser gyros[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502015
汪之国,龙兴武,王飞. 激光陀螺中朗缪尔流形的研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502015
- 5 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Choice of operating point for the four-mode differential laser gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 301~304
汪之国,龙兴武,王飞等. 四频差动激光陀螺工作点的选择[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 301~304
- 6 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyroscope with non-planar resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2892~2897
汪之国,龙兴武,王飞. 异面腔四频差动激光陀螺的色散平衡[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2892~2897
- 7 Yuan Jie, Huang Yun, Han Shengjie *et al.*. The null shift of the differential laser gyro caused by the asymmetry of the left and right gyro's SFC[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 22~24
袁杰,黄云,韩生节等. 四频差动激光陀螺由于稳频精度局限等引入的零漂[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 22~24
- 8 Luo Hui, Guo Shaojun, Hu Shaomin *et al.*. Research and design on high precision frequency-stability measurement system of ring laser gyroscope[J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2005, **13**(6): 86~89
罗晖,郭少军,胡绍民等. 激光陀螺仪频率稳定度高精度测量系统的研制[J]. *中国惯性技术学报*, 2005, **13**(6): 86~89
- 9 T. W. Hahn. Cavity Length Control Apparatus for a Multioscillator[P]. US Patent, 4963026, 1990-10-26
- 10 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Zero drift sensitivity in four-frequency differential laser gyros[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1758~1762
汪之国,龙兴武,王飞. 四频差动激光陀螺的零漂敏感性[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(9): 1758~1762
- 11 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Path length control for nonplanar four-mode differential laser gyro with hill-climbing method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3233~3238
汪之国,龙兴武,王飞等. 异面腔四频差动激光陀螺的小抖动稳频[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3233~3238

栏目编辑:何卓铭