

文章编号: 0253-2239(2008)02-0301-04

# 四频差动激光陀螺工作点的选择

汪之国 龙兴武 王 飞 谭中奇 许光明

(国防科技大学 光电科学与工程学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 当四频差动激光陀螺工作于增益曲线上左、右旋陀螺比例因子相等位置时, 误差因素在拍频的差动中得到较好的抵消, 因而具有较优的性能。为了从实验上寻找该最佳工作点, 对四频差动激光陀螺拍频表达式进行了分析, 发现静态下和频的电压扫描曲线呈抛物线变化, 而且当左、右旋陀螺比例因子相等时, 和频的电压扫描曲线处于转折点。设计了实验通过和频电压扫描曲线得到了理论最佳工作点, 在不同工作点下对陀螺进行测试, 根据其零偏稳定性随工作点的变化趋势, 得到了实测最佳工作点。对某型 5 个陀螺的多次实验表明, 由和频电压扫描曲线得到的理论最佳工作点与实测最佳工作点基本一致, 最大误差 2 Hz。该方法可作为四频陀螺选择最佳工作点的参考方法。

**关键词** 激光技术; 四频差动激光陀螺; 拍频; 最佳工作点; 失谐频率; 零偏稳定性

**中图分类号** V241.5<sup>+</sup>58 **文献标识码** A

## Choice of Operating Point for the Four-Mode Differential Laser Gyros

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei Tan Zhongqi Xu Guangming

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

**Abstract** The four-mode differential laser gyros (FMDLGs) would have better performance when operating at the point with equal scale factors for left circularly polarized (LCP) and right circularly polarized (RCP) gyros. In order to find the optimal operating point, expressions for FMDLG beat frequency are analyzed. Theoretical study shows that the sum frequency as a function of piezoelectric transducer (PZT) scanning voltage is quadratic and the scale factors of the LCP and RCP gyros are equal when the quadratic function is at its turning point. Therefore, theoretical optimal operating point can be obtained by recording beat frequency of the FMDLG while scanning the PZT voltage. And actual optimal operating point can be obtained by testing the FMDLG at different operating point. Experimental results give an approximate coincidence of theoretical and actual optimal operating point with maximum error of 2 Hz, which shows a reference method to choose optimal operating point for FMDLGs.

**Key words** laser technology; four-mode differential laser gyro; beat frequency; optimal operating point; detuning, bias stability

## 1 引 言

二频机械抖动激光陀螺研究比较成熟, 精度也比较高<sup>[1,2]</sup>, 而四频差动激光陀螺(四频陀螺)原理更先进。但由于使用了腔内元件, 结构复杂且对工艺要求苛刻, 其精度的提高受到了限制<sup>[3]</sup>。人们对四频陀螺进行了大量理论和实验研究<sup>[3~11]</sup>寻找提高其性能的

方法, 其中工作点是影响陀螺性能的重要原因之一<sup>[9]</sup>。四频陀螺的工作点, 就是四频陀螺中激光模式在增益曲线上的相对位置, 四个模式的平均频率与  $\text{Ne}^{20}$ 、 $\text{Ne}^{22}$  双同位素发光频率中点(Midpoint)之差称为失谐频率(Detuning)<sup>[10]</sup>。在其他条件不变的情况下, 四频陀螺的不同工作点对应不同的静态零偏<sup>[10]</sup>,

收稿日期: 2007-04-27; 收到修改稿日期: 2007-09-17

**作者简介:** 汪之国(1982—), 男, 山东临清人, 博士研究生, 主要从事四频差动激光陀螺和光电检测技术等方面的研究。  
E-mail: maxborn@163.com

**导师简介:** 龙兴武(1958), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术、光学元件加工工艺学、薄膜光学及技术、新型激光器技术、激光在惯性制导技术中的应用等方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com

所以也可用静态零偏来代表陀螺的工作点。

通过对四频陀螺拍频公式的理论分析,发现和频电压扫描曲线的转折点为理论最佳工作点;简单介绍了四频陀螺的光强差稳频,分析了实际工作点与最佳工作点不一致的原因。实验中根据和频电压扫描曲线得到了理论最佳工作点,根据零偏稳定性随工作点的变化曲线得到了实测最佳工作点。实验结果表明,两种方法得到的最佳工作点基本一致,为四频陀螺工作点的选择提供了一个参考。

## 2 理论分析

### 2.1 拍频公式

四频陀螺四个模式在增益曲线上的分布如图1所示<sup>[3,10]</sup>,根据目前四频陀螺的工艺水平,分析其和频、差频随失谐频率 $\nu_d$ 的变化关系,忽略了差损和朗缪尔效应的影响。

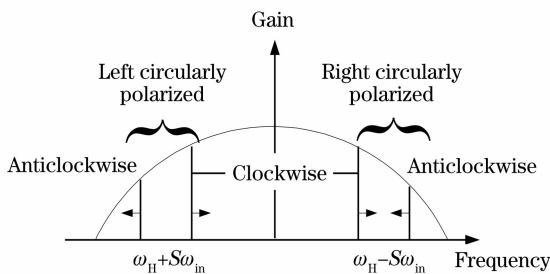


图1 四频陀螺的频谱

Fig. 1 Frequency spectrum of a four-mode differential laser gyro

当输入角速度为 $\omega_{in}$ 时,左、右旋陀螺的拍频分

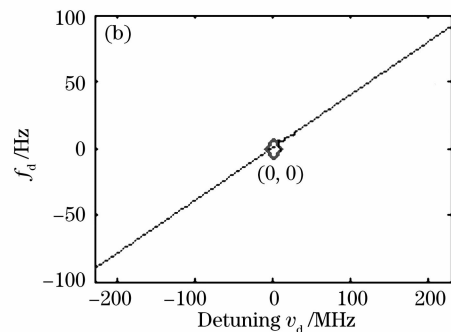
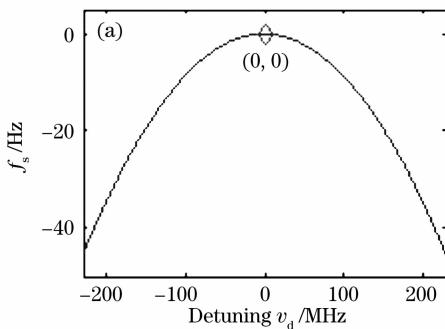


图2 (a)  $f_s(\nu_d) \sim \nu_d$ , (b)  $f_d(\nu_d) \sim \nu_d$  函数曲线

Fig. 2  $f_s(\nu_d)$  (a) and  $f_d(\nu_d)$  (b) versus detuning frequency

### 2.2 实际工作点偏离最佳工作点的原因

四频陀螺采用光强差稳频来使左、右旋陀螺工作于增益曲线的对称位置,原理如图3所示。分离后的左、右旋陀螺光信号被光电管(PD)接收,经过低噪声放大电路(LNA)放大到适当的幅度,然后在

别为

$$\omega_L = (1 + A^L)(\omega_H + S \cdot \omega_{in}), \quad (1)$$

$$\omega_R = (1 + A^R)(\omega_H - S \cdot \omega_{in}), \quad (2)$$

式中 $\omega_H$ 为法拉第磁偏频, $S$ 为几何比例因子, $A^L$ 、 $A^R$ 分别为左、右旋陀螺的比例因子修正项,它们是 $\nu_d$ 的函数。

由(1)式、(2)式可得和频与差频的表达式

$$\omega_{sum} = 2(1 + \bar{A})\omega_H + (A^L - A^R)S \cdot \omega_{in}, \quad (3)$$

$$\omega_{diff} = 2(1 + \bar{A})S \cdot \omega_{in} + (A^L - A^R)\omega_H, \quad (4)$$

式中 $\bar{A} = (A^L + A^R)/2$ 。只考虑 $\nu_d$ 的变化时,由于 $\omega_H \gg \omega_{in}$ ,所以 $\omega_{sum} = \omega_{sum}(\nu_d)$ 和 $\omega_{diff} = \omega_{diff}(\nu_d)$ 的变化曲线分别与 $f_s(\nu_d) = 2\bar{A} \cdot \omega_H$ 和 $f_d(\nu_d) = (A^L - A^R) \cdot \omega_H$ 具有相同的变化趋势。

取如下参量:波长 $0.63 \mu\text{m}$ ,增损比 $1.03$ ,气压 $400 \text{ Pa}$ ,出光带宽 $470 \text{ MHz}$ ,双同位素分裂 $880 \text{ MHz}$ ,最大单程增益 $0.02$ ,腔长 $30 \text{ cm}$ ,法拉第偏频 $\omega_H = 430 \text{ kHz}$ ,利用文献[9]所给公式近似计算得到的 $f_s(\nu_d) \sim \nu_d$ 和 $f_d(\nu_d) \sim \nu_d$ 变化曲线如图2,其中 $f_s(\nu_d) \sim \nu_d$ 沿 $y$ 轴做了平移,但并不影响分析。

由图2计算结果可知, $f_s(\nu_d) \sim \nu_d$ 近似为抛物线, $f_d(\nu_d) \sim \nu_d$ 为直线。而且当 $\nu_d = 0$ 时 $f_s(\nu_d) \sim \nu_d$ 处于转折点, $f_d(\nu_d) = 0$ ,即左、右旋陀螺的比例因子修正相等。

由上述分析知, $\omega_{sum} \sim \nu_d$ 处于转折点时左、右旋陀螺具有相等的比例因子修正项。这是寻找最佳工作点的理论依据,而且 $\omega_{sum} \sim \nu_d$ 可以通过给陀螺的压电换能器(PZT)施加线性扫描电压得到。

差分放大电路(Differential amplifier)处进行比较,其差值就是误差信号。误差信号经过积分电路积分后送入压电陶瓷驱动器以控制陀螺腔长,最后维持误差信号为零<sup>[3]</sup>。

虽然光强差稳频能够达到较高的稳频精度,但

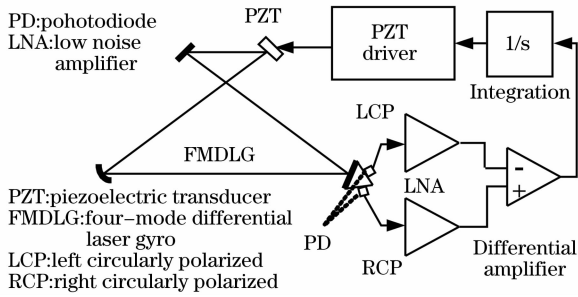


图 3 光强差稳频原理图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency stabilization by intensity comparison

由于稳频系统的限制,它只能保证在差分电路处左、右旋陀螺光强信号表观相等。如果左、右旋模式差分损耗较大,比如谐振腔的 S-P 各向异性<sup>[5,6]</sup>及行波不过水晶片光轴<sup>[5]</sup>引起的左、右旋光差分损耗,或者接收左、右旋陀螺信号的光电管对称性不好<sup>[7]</sup>导致两路光信号增益不同,结果表观上差分电路处左、右旋陀螺的光强相等,但实际上左、右旋陀螺并不处于增益曲线对称的位置。这时左、右旋陀螺比例因子不等,外界干扰不能在左、右旋陀螺信号的差动中抵消,因而性能较差。

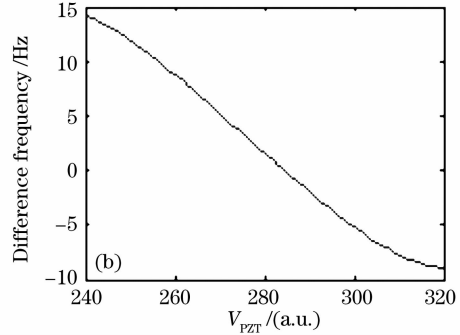
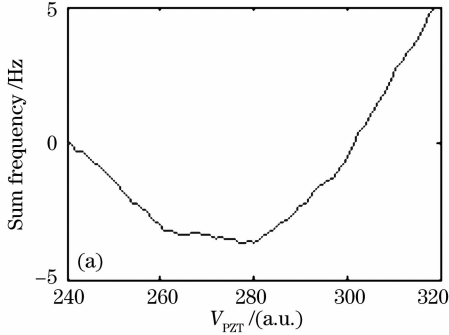


图 4 和频(a),差频(b)电压扫描曲线

Fig. 4 Sum frequency (a), difference frequency (b) versus  $V_{PZT}$ 

分别选择不同的工作点对该陀螺进行测试,共得到 5 组测试数据,结果见图 5。图中曲线在 y 轴

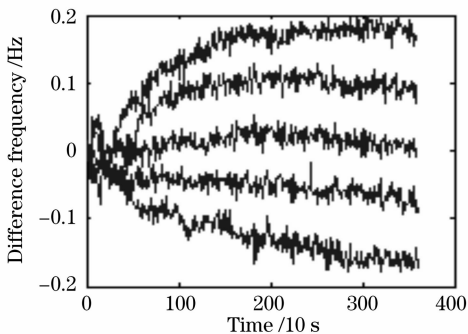


图 5 不同工作点下的测试结果

Fig. 5 Test results at different operating point

### 3 实验结果与分析

将陀螺固定在实验台上,保持外界环境(磁场、温度等)不变,在四频陀螺的 PZT 上施加一线性扫描电压  $V_{PZT}$ ,同时用计数电路记录和频与差频,得到它们的电压扫描曲线,其中  $\omega_{sum} \sim V_{PZT}$  扫描曲线的转折点所对应的差频即为理论最佳工作点,扫描过程不到 1 min。然后在陀螺的不同工作点下进行测试,测试时间为 1 h,根据多次测试结果得到实测最佳工作点。

实验得到的和频与差频的电压扫描曲线如图 4。和频电压扫描曲线近似为抛物线,差频电压扫描曲线近似为直线,证实了前面的理论分析。但变化趋势与图 2 理论计算结果相反,原因是实际陀螺的频谱分布与图 1 所示频谱分布未必一致。左陀螺可以工作在增益曲线的左边也可能在增益曲线的右边,所以通过和频电压扫描曲线法可得两个最佳工作点,究竟陀螺工作在哪个点上由实测结果确定,但陀螺在使用同样的稳频电路时,可以预测应该取哪个工作点。由图 4 求得该陀螺的最佳工作点为 1.6 Hz。

上进行了平移以便于比较零漂变化趋势。可见零漂受工作点影响很大。当陀螺工作于最佳工作点即左、右旋陀螺比例因子相等时,误差因素得到了较好的抵消,漂移较小。根据测试数据得到该陀螺的实际最佳工作点为 2 Hz。

对某型 5 个陀螺进行的多次实验表明该方法具有较高的可靠性,最大误差为 2 Hz。但是,实测最佳工作点只能靠有限次测试结果获得,而且测试环境的变化,以及理论分析的近似性,都会给实验结果带来误差。这是该方法的不足之处。

### 4 结 论

当四频陀螺工作于最佳工作点时,误差因素得到

了较好的抵消,因而零漂较小。通过对四频陀螺拍频表达式的理论分析可知和频的电压扫描曲线为抛物线,而且其顶点对应最佳工作点,据此提出了和频电压扫描法来寻找四频陀螺最佳工作点。对某型陀螺的多次实验表明,根据和频电压扫描法得到的最佳工作点与实测最佳工作点基本一致,最大误差 2 Hz。为陀螺成品快速选择工作点提供了一个参考方法,也有助于对四频陀螺误差机理做进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 354~358  
高玉凯,邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 354~358
- 2 Gao Yukai, Lin Yurong, Deng Zhenglong. A method for improving the performance of ring laser gyro by injecting the multi-cycles step noise with white noise[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 481~484  
高玉凯,林玉荣,邓正隆. 改善激光陀螺输出特性的随机噪声注入方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 481~484
- 3 Gao Bolong, Li Shutang. *Ring Laser Gyro* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 73~85  
高伯龙,李树棠. *激光陀螺*[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 73~85
- 4 Gao Bolong. Some optical properties of quartz crystal (I)[J]. *J. National University of Defense Technology*, 1982, (1): 59~71  
高伯龙. 水晶片的几个光学性能(一)[J]. *国防科技大学学报*, 1982, (1): 59~71
- 5 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The loss difference in differential laser gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(1): 39~42  
杨在富,袁晓东,张斌等. 四频差动激光陀螺中差分损耗的探讨[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1): 39~42
- 6 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The S-P anisotropy effects in differential laser gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1255~1260  
杨在富,袁晓东,张斌等. 四频差动激光陀螺中的 S-P 各向异性效应[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1255~1260
- 7 Wu Guoyong, Gu Qitai. Thermal bias mechanism of four mode multi-oscillation ring laser gyro [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2002, **10**(4): 44~48  
吴国勇,顾启泰. 四频差动激光陀螺热致零漂机理研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2002, **10**(4): 44~48
- 8 Wu Guoyong, Gu Qitai. Temperature's effect on four frequency RLG bias[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(3): 198~200  
吴国勇,顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. *光学技术*, 2002, **28**(3): 198~200
- 9 Jiang Yan'an. *Ring Laser Gyro* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 90~189  
姜亚南. *环形激光陀螺*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 90~189
- 10 Weng W. Chow, Jarel B. Hambenne, Thomas J. Hutchings *et al.*. Multioscillator laser gyros[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **16**(9): 918~936
- 11 Wang Xingshu, Huang Zongsheng, Zhou Pu *et al.*. Comparative study on digital filtering on the random drift of laser gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1547~1551  
王省书,黄宗升,周朴等. 激光陀螺随机漂移的数字滤波方法比较[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1547~1551