

文章编号: 0253-2239(2010)11-3233-06

异面腔四频差动激光陀螺的小抖动稳频

汪之国 龙兴武 王 飞 罗 晖

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了解决光强差稳频系统易受光电元件参量影响的问题,设计了一套用于异面腔四频差动激光陀螺的小抖动稳频系统。采用高频放大和幅度检波电路检出四频差动激光陀螺顺时针(或逆时针)输出光束的拍频幅度,然后用模数转换器采集到数字信号处理器(DSP)内。四频差动激光陀螺正常工作时拍频幅度取极大值,因此可通过对腔长进行小抖动调制实现稳频。利用 DSP 设计了一套数字式稳频系统,1 s 取样的稳频精度为 2×10^{-9} ,更重要的是稳频点不受光电元件参量变化的影响。设计的小抖动稳频电路精度高、通用性好,对提高四频差动激光陀螺适应恶劣环境的能力有一定的价值。

关键词 激光器;稳频;四频差动激光陀螺;异面腔

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20103011.3233

Path Length Control for Nonplanar Four-Mode Differential Laser Gyro with Hill-Climbing Method

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei Luo Hui

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

Abstract In order to solve the problem that the frequency stabilization system with light intensity comparison is subject to the parameters of optoelectronic components, a frequency stabilization circuit with small dithering was designed for nonplanar four-mode differential laser gyro. The beat wave amplitude in clockwise (or anticlockwise) light of four-mode differential laser gyro was amplified and detected, and then sampled to a digital signal processor (DSP) via analog to digital converter. Small dithering method could be used to stabilize the frequency of four-mode differential laser gyro under the condition that the beat wave amplitude reaches maximum when the gyro operates steadily. A digital system for frequency stabilization was designed with the DSP. Precision of frequency stabilization was 2×10^{-9} for 1 s sampling. What's more important is that frequency stabilization point was immune to variations of parameters of optoelectronic components. The frequency stabilization circuit is precise and universal, so it is of some significance to improvement of capability over severe environment of four-mode differential laser gyro.

Key words lasers; frequency stabilization; four-mode differential laser gyro; nonplanar cavity

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]。为了能满足飞机导航等装备的要求,国产FMDLG的性能亟需进一步提高。除本体设计外,

电子学装置的改进是提高FMDLG性能的重要途径^[5~7],其中稳频系统(又称程长控制系统)是研究重点之一^[8~11]。FMDLG是He-Ne激光器的一种,因此He-Ne激光器的很多稳频方法如控制纵模拍频^[12]、控制模式功率^[13]都可稍作改变后用于FMDLG的稳频。国产FMDLG采用光强差稳

收稿日期: 2010-03-04; 收到修改稿日期: 2010-04-20

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

导师简介: 龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com(通信联系人)

频^[14], 尽管短期稳定度可达 10^{-9} , 但易受光电信号处理系统参量的不对称和漂移的影响, 导致长期稳定性较差。为了克服光强差稳频易受外部光电元件参量变化的缺点, 本文设计了小抖动稳频电路^[15-16], 短期稳频精度仅比光强差稳频稍差, 但光电元件参量的变化对零偏无影响, 实现了抗干扰的稳频目的。

2 光强差稳频概述

FMDLG 由左旋偏振(LCP)和右旋偏振(RCP)两个单陀螺构成, 每个单陀螺包含一对顺时针(CW)和逆时针(AW)运行的行波模, 如图 1 所示。图中横坐标以增益曲线中心为原点, 以 ν_d 表示四个模的平均频率。在 FMDLG 正常工作时, 要将左、右旋陀螺稳定在增益曲线对称的两侧。光强差稳频原理为^[14]: 当 $\nu_d < 0$ 时, 左旋陀螺的光强 $I_L = I_1 + I_2$ 小于右旋陀螺的光强 $I_R = I_3 + I_4$; 当 $\nu_d > 0$ 时, $I_L > I_R$; 当 $\nu_d = 0$ 时, $I_L = I_R$; 因此可用 $\Delta I = I_L - I_R$ 作为稳频控制系统的误差信号。需要说明的是这里忽略了增益曲线的稍许不对称和各个模式损耗的微小差异。

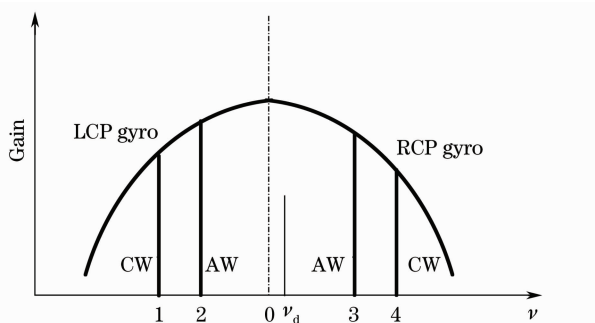


图 1 四频差动激光陀螺的增益曲线与腔模
Fig. 1 Gain curve and cavity modes of a four-mode differential laser gyro

图 2 是使用最少电子元件的光强差稳频原理图: 光电管输出的光电流用电阻转换成电压信号直接送入到差分放大器。差分放大后的光强差可表示为

$$\Delta I = K_{DA} \{ R_2 [K_{PD2} (K_{CP2} I_R + B_{CP2}) + B_{PD2}] - R_1 [K_{PD1} (K_{CP1} I_L + B_{CP1}) + B_{PD1}] \} + B_{DA}, \quad (1)$$

式中 K_{DA} 和 B_{DA} 分别为差分放大器的增益和偏置; $R_i (i=1, 2)$ 为取样电阻阻值; K_{PD} 和 B_{PD} 分别为光电二极管的转换系数和暗电流; K_{CP} 和 B_{CP} 分别为合光棱镜的转换系数和偏置; 用下标 1 和 2 区分左旋和右旋光信号转换支路; I_L 和 I_R 分别为 FMDLG 内部左旋和右旋光强。

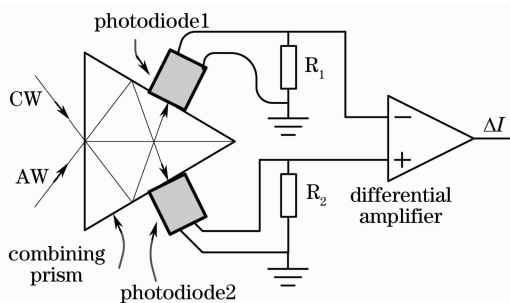


图 2 光强差稳频原理图

Fig. 2 Schematic diagram of frequency stabilization using light intensity comparison

由(1)式可知, 由于左、右旋光强支路的转换系数不同, 实际上 $\Delta I = 0$ 而使 $I_L = I_R$ 的可能性非常小, 因此光强差稳频的缺点在于: 合光棱镜、电子器件参量的变化会使 ν_d 发生变化, 进而导致零漂; 由于电子器件增益和偏置各不相同, 稳频电路通用性差。这两点归纳起来就是 FMDLG 的零偏与外部光电器件的参量有关, 影响 FMDLG 的精度。为了克服上述问题, 可根据 FMDLG 同向行波拍频幅度取极值的原理进行稳频。

3 小抖动稳频原理

图 1 中的增益曲线可近似用二次曲线表示:

$$G(\nu) = G_0 (1 - a\nu^2), \quad (2)$$

式中 $G(\nu)$ 表示频率为 ν 的谱线的增益, G_0 为峰值增益, a 为拟合系数。

由于 FMDLG 的左、右旋陀螺偏频远大于均匀加宽、且采用双同位素, 因此可忽略各模式之间的相互作用, 这时可用^[17]

$$I(\nu) = I_s \left[\frac{G(\nu)}{\gamma} - 1 \right], \quad (3)$$

来表示频率为 ν 的谱线的光强 $I(\nu)$, 其中 I_s 为饱和光强, γ 为单程损耗。

由(2)式和(3)式得

$$I(\nu) = I_s \left(\frac{G_0}{\gamma} - 1 - \frac{aG_0\nu^2}{\gamma} \right), \quad (4)$$

FMDLG 四个模式的频率可写为

$$\nu_1 = \nu_d - \nu_R/2 - \nu_F/2, \quad (5)$$

$$\nu_2 = \nu_d - \nu_R/2 + \nu_F/2, \quad (6)$$

$$\nu_3 = \nu_d + \nu_R/2 - \nu_F/2, \quad (7)$$

$$\nu_4 = \nu_d + \nu_R/2 + \nu_F/2, \quad (8)$$

式中 ν_R 为左、右旋陀螺之间的互易偏频, ν_F 为单陀螺的法拉第偏频。

将(5)~(8)式代入(4)式容易证明 $I(\nu_1) +$

$I(\nu_2) + I(\nu_3) + I(\nu_4), I(\nu_1) + I(\nu_4), I(\nu_2) + I(\nu_3), I(\nu_1)I(\nu_4), I(\nu_2)I(\nu_3)$ 和 $I(\nu_1)I(\nu_2)I(\nu_3)I(\nu_4)$ 都在 $\nu_d = 0$ 时取极大值, 因此可用小抖动稳频。由于直接从顺时针或逆时针光束中提取信号的光路最简单, 因此下面以采用顺时针光强信号为例分析利用 $I(\nu_1) + I(\nu_4)$ 和 $I(\nu_1)I(\nu_4)$ 稳频的特点。

小抖动稳频(又叫“爬山”法)原理为^[16]: 在 FMDLG 的腔平移镜上加一小幅度的正弦(或方波)调制电压, 使腔长发生调制, ν_d 也随之受到调制, 进一步引起光强 I 的调制。光强调制的情况与 ν_d 有关, 如图 3 所示, 其中 0 为光强极大值对应的频率。当 $\nu_d > 0$ 时, 光强调制与调制信号同相, 误差信号 e 为正; 当 $\nu_d < 0$ 时, 光强调制与调制信号反相, e 为负。误差信号的大小指出了激光频率与中心频率的偏离程度, 正负指出了激光频率位于中心频率的哪一边。

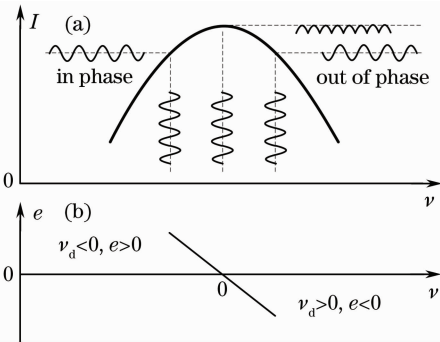


图 3 小抖动稳频原理图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency stabilization with hill climbing

4 实验结果

4.1 实验系统设计

实验系统如图 4 所示。A 路和 B 路光电管直接接收从反射镜透射的模 1 和 4 的总光场, 光强可分别表示为

$$I_{A,B}(\nu) = I_1 + I_4 + 2\sqrt{I_1 I_4} \cos(\omega_1 - \omega_4)t, \quad (9)$$

式中 ω_1 和 ω_4 分别为模 1 和 4 的振荡圆频率, I_1 和 I_4 分别为模 1 和 4 的光强, t 为时间。A 路光电管输出信号采用高频放大电路, 只放大(9)式中的交流信号, 而将直流信号滤除, 然后用幅度检波器检出 $I_A = 2\sqrt{I_1 I_4}$ 。B 路光电管输出信号采用低频放大电路, 只放大(9)式中的直流信号, 得到 $I_B = I_1 + I_4$ 。C 路是信号读出系统, 所有 4 个模式的混合光场经读出系统处理后, 得到左、右旋光强 I_L 和 I_R 以及零偏 $\Delta\nu_B$ 。用模数转换器(ADC)将 I_A, I_B, I_L 和 I_R 采集到

DSP, 然后经串口发送到计算机。DSP 通过数模转换器(DAC)输出控制电压, 经压电陶瓷(PZT)驱动器放大后驱动 FMDLG 腔平移镜上粘贴的 PZT 以调节腔长。

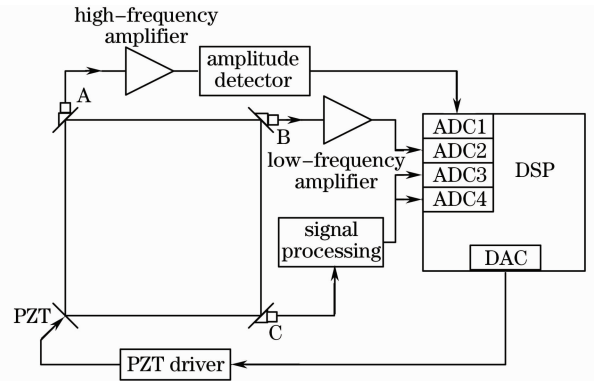


图 4 实验系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

各光强的扫模曲线如图 5 所示, 其中横轴为数模转换器输出的扫模电压。 I_L 和 I_R 近似相等时 I_A 出现一个极大值, 但 I_B 并非如理论分析的和 I_A 总是一同出现极大值, 这是由于增益带宽小于左、右旋陀螺偏频时会出现只有左旋或右旋陀螺的两个模位于增益带宽内的情况, 这时也出现一个极大值, 除了这种异常情况外, I_B 随模式位置的变化非常小, 即使能够稳频精度也较差。 I_A 随扫模电压变化非常迅速, 因此可较好地用于稳频。根据扫模曲线可确定 0.5451 V 扫模电压对应一个纵模间隔, 又由于该陀螺(腔长为 20.4 cm)一个纵模间隔为 1470.6 MHz, 从而得到扫模电压变化 1 V 对应 2697.8 MHz。

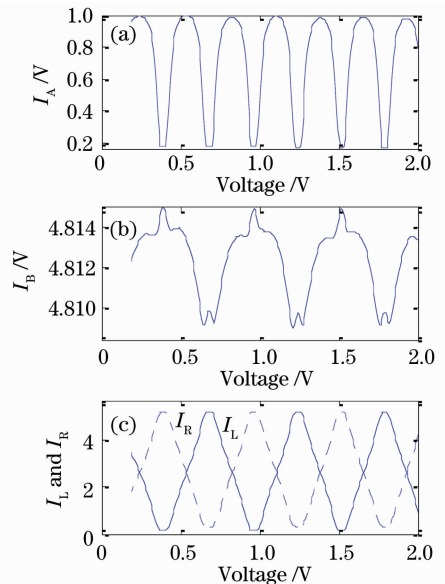


图 5 扫模曲线

Fig. 5 Scanning curves

在施加到 PZT 的扫模电压上叠加正弦波调制信号,然后用相敏检波检出光强 I_A 中被调制信号的幅度,如图 6 所示。图中 PSD 表示相敏检波幅度,相当于图 3 中的误差信号,单位为 DSP 中的 1。由于 FMDLG 采用 Ne 双同位素,合成增益曲线稍不对称,因此 PSD 为 0 与 I_A 取极大值对应的扫模电压稍有差异。通过线性拟合得到在 I_A 极大值附近 PSD 随电压的变化率为 9406.8 V^{-1} ,该值可用于计算下节的稳频精度。

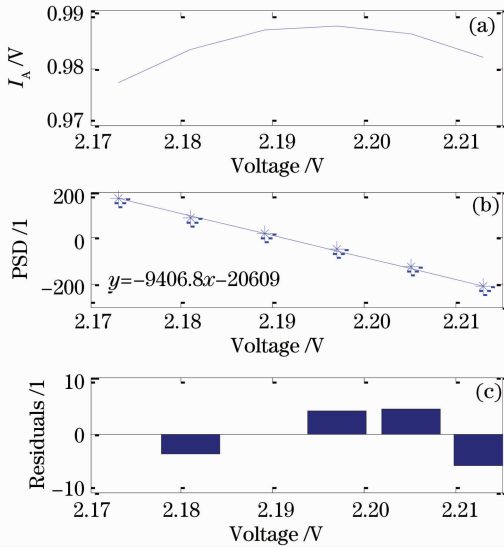


图 6 I_A 与相敏检波幅度 (PSD) 随扫描电压的变化

Fig. 6 I_A and PSD versus scanning voltage

4.2 稳频效果

在图 4 所介绍的实验系统上,根据小抖动稳频原理设计了数字化稳频系统。稳频算法在 DSP 内部由软件实现,如图 7 所示。正弦调制信号叠加在 PZT 驱动电压上,通过 PZT 驱动器调制腔长,从而引起 I_A 的调制。 I_A 经模数转换器采集到 DSP 内,与正弦调制信号相乘然后低通滤波得到误差信号 e 。 e 经过比例积分微分 (PID) 控制器后产生程长控制电压 V_{PLC} 调节目程长,直到系统稳定到 $e=0$ 的状态。

在异面腔 FMDLG 上对小抖动稳频电路进行了试验。用如下两个指标来评价稳频效果:1) 1 s 采样的稳频精度,2) 高频放大器放大倍数改变时稳频点和零偏是否发生变化。由于在环境温度不变且时间较短的条件下,左、右旋光光强差只由稳频点决定,因此可用光强差来监视稳频点。稳频时的误差信号如图 8 所示,根据 PSD 随稳频电压的变化率 9406.8 V^{-1} 以及 PZT 电压变化 1 V 对应 2697.8 MHz 可计算出稳频精度为 0.86 MHz (标准差),相对精度为 2×10^{-9} 。

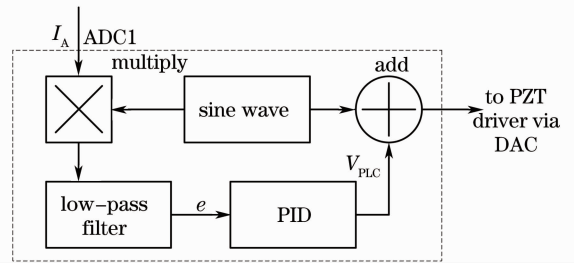


图 7 DSP 内的稳频系统框图

Fig. 7 Block diagram of frequency stabilization system in the DSP

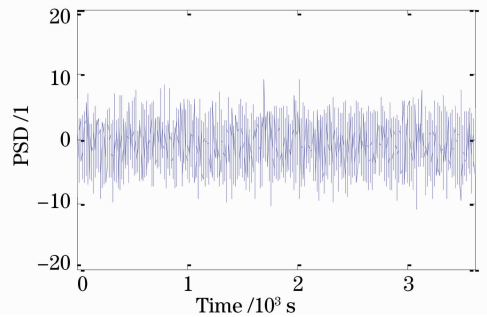


图 8 稳频时 PSD 随时间的变化

Fig. 8 PSD versus time at frequency stabilization

小抖动稳频信号的误差模型为光电信号转换过程增益和偏置的变化,由于低频偏置的相敏检波为 0,因此只需验证光电信号处理过程中增益的变化是否对稳频点有影响。通过在图 4 中高频放大器后面接一级可调衰减器来随机调整高频电路的放大倍数,同时记录下高频检波幅度 I_A 、稳频电压 V_{PLC} 、光强差 ΔI 和零偏,结果如表 1 所示。表中各数值都是 100 s 的平均值,整个实验过程约 10 min,并进行了充分预热,因此可认为改变量只有高频电路的放大倍数。尽管 I_A 变化达 8%,稳频电压、光强差和零偏只有噪声导致的随机变化,没有趋势变化,表明光电信号转换过程增益的变化不会导致稳频点的变化,充分体现了小抖动稳频的优势。

表 1 电路增益变化时的稳频效果

Table 1 Effects of frequency stabilization with electronic circuit gain variation

I_A / V	$V_{\text{PLC}} / \text{V}$	$\Delta I / \text{V}$	Bias / Hz
0.928	2.0155	0.254	11.6425
0.956	2.0151	0.259	11.6411
0.997	2.0152	0.257	11.6425
0.910	2.0154	0.257	11.6422
0.847	2.0153	0.263	11.6419

4.3 工作方式判别

FMDLG 有两种工作方式:1) 左旋陀螺位于增益曲线左侧,2) 左旋陀螺位于增益曲线右侧,分别称

为左旋工作方式和右旋工作方式。由于磁圆二向色性差损、Verdet 常量色散等原因,这两种工作方式下 FMDLG 的零偏不同^[2]。为了使 FMDLG 在实用中工作在确定的工作方式下,提出如下三种方案。

方案一:若 FMDLG 工作在左旋方式,则图 5 中 A 路的高频信号频率为 $\omega_4 - \omega_1 \approx 2\pi(\nu_R + \nu_F)$,反之 $\omega_4 - \omega_1 \approx 2\pi(\nu_R - \nu_F)$,这里 ν_R 和 ν_F 分别为互易偏频和非互易偏频。在图 5 所给系统上再增加高频频率测量电路,在稳频程序中增加工作方式判断支路,根据高频信号频率修正 PSD 的正负号即可唯一确定工作方式。

方案二:由图 5 所示扫模曲线可知: I_L 和 I_R 在左、右旋工作方式下的扫模曲线斜率相反,因此对小抖动调制的相位响应相反。图 9 给出了利用左旋光强的调制特性判别工作方式的原理,当腔长受到小抖动调制时,左旋工作方式下 I_L 中的调制分量与调制信号同相,而右旋方式下 I_L 中的调制分量与调制信号反相,利用该特征修正 PSD 的正负号可唯一确定工作方式。

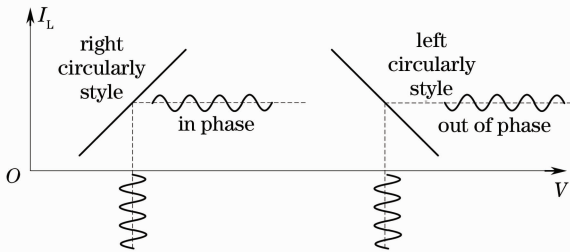


图 9 利用左旋光强判断工作方式

Fig. 9 Determination of operating styles with left circularly polarized light intensity

采用 I_L 的斜率判别工作方式的稳频程序框图

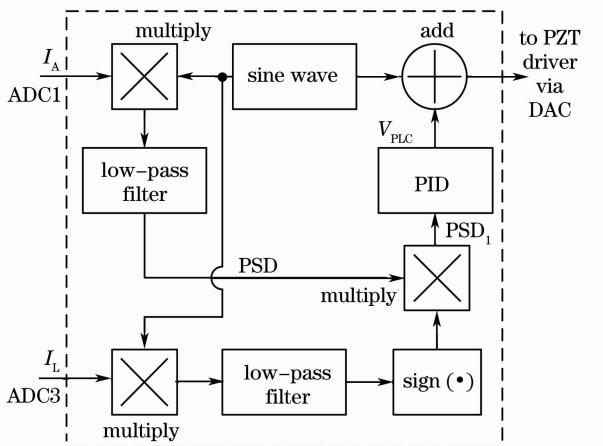


图 10 采用 I_L 的斜率判断工作方式的稳频程序框图

Fig. 10 Block diagram of frequency stabilization program using I_L for operating style determination

如图 10 所示,将 I_L 与正弦调制信号相乘然后低通滤波,其正负号与 I_L 扫模曲线斜率的正负号一致, $\text{sign}(\cdot)$ 的功能是提取符号。根据 $\text{sign}(\cdot)$ 输出的正负号对 PSD 修正后的数值用 PSD_1 表示,其扫模曲线如图 11 所示。若将 FMDLG 设定为左旋工作方式,则尽管 I_A 在右旋工作方式下也存在极大值,但根本无法形成稳定反馈,因此可唯一确定工作方式。

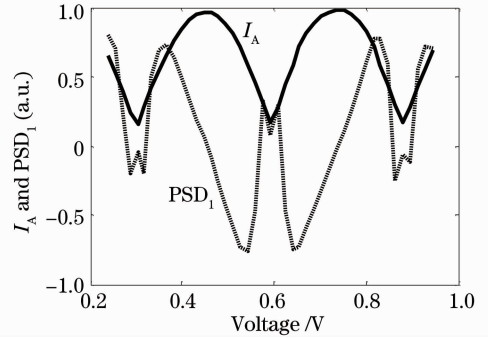


图 11 I_A 和 PSD_1 扫模曲线

Fig. 11 Scanning curves of I_A and PSD_1

方案三:光强差信号 $I_L - I_R$ 的正负号可确定工作方式,在开始稳频的初始 0.1 s 内使用光强差将失谐频率推到接近射频检波幅度最大值,然后改用小抖动稳频。

文献[18]认为 FMDLG 的小抖动稳频存在 4 个难点:1) 鉴频灵敏度低;2) 陀螺参量不当时工作点有偏移;3) 工作模式不易判别;4) 陀螺零漂受稳频精度影响大。在目前的工艺水平下,尤其是采用异面腔代替水晶片进行旋光后,左、右旋模式的损耗差别很小,所以问题 2)基本上已不存在。问题 3)的工作模式判别问题可采用上述三个方案中的任意一个来解决,也没有多大困难。采用色散平衡技术^[6]后, FMDLG 的零偏基本不随腔长变化而变,从而大大降低了稳频精度对零偏的影响,因此问题 4)也容易解决。实验结果表明小抖动稳频精度可达 2×10^{-9} ,鉴频灵敏度完全可满足要求。文献[18]之所以认为小抖动稳频的鉴频灵敏度低,是因为该文所用稳频信号相当于本文的 I_B ,由于 I_B 随模式位置变化很小,导致鉴频灵敏度低,所以不适合用于稳频。

5 结 论

根据拍频幅度取极大值的原理设计了一套小抖动稳频系统,1 s 采样时稳频精度为 2×10^{-9} ,尽管稳频精度比光强差稳频稍低,但光电探测组件安装方便,稳频点和零偏仅由 FMDLG 本身参量决定,较好地克服了光强差稳频系统易受外部电路参量影

响的缺点。同一个 FMDLG 使用批产的任何一个小抖动稳频电路确定的工作点相同,不受各电路参数不一致和变化的影响,提高了 FMDLG 的抗干扰能力,便于未来对整个陀螺仪进行模块化设计,在实际应用中如稳频电路出现故障可直接更换稳频电路而不用担心影响标定好的陀螺性能。

参 考 文 献

- Xu Guozhen. Handbook of Inertial Technology[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995
许国祯. 惯性技术手册[M]. 北京:中国 宇航出版社, 1995
- D. Loukianov, R. Rodloff, H. Sorg *et al.*. Optical Gyros and Their Application[R]. Rto Agard ograph 339, 1999: 4.1~4.26
- M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock™ laser gyro [C]. Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Keystone, CA, 1989: 235~241.
- Northrop grumman corporation, LN-100 G inertial navigation system with embedded <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln100g/index.html>, 2010. 7, 2
- 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
- Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyro-scope 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
- Wang Guochen, Yu Jie. Analysis of the circuit infection to laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2873~2877
王国臣, 俞 洁. 激光陀螺电路系统对其精度影响的实验分析 [J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2873~2877
- Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 54~57
姜亚南. 环形激光陀螺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 54~57
- 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
- Luo Hui, Guo Shaojun, Hu Shaomin *et al.*. Research and design on high precision frequency-stability measurement system of ring laser gyroscope[J]. *Chin. J. Inertial Technol.*, 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
- Tae W. Hahn. Cavity length control apparatus for a multioscillator[P]. US Patent, 4963026, 1990.10.26
- Wang Lixia, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi *et al.*. Laser frequency stabilization based on control of intermode beat note[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1198~1202
王丽霞, 蒋燕义, 毕志毅 等. 基于纵模拍频控制的激光稳频技术 [J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1198~1202
- Xiao Yan, Zhang Shulian, Han Yanmei *et al.*. Full-inner-cavity birefringence dual-frequency He-Ne laser with fixed frequency-difference by angle-block and frequency-stabilization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(6): 509~512
肖 岩, 张书练, 韩艳梅 等. 全内腔角块定频差双折射双频 He-Ne 激光器及其稳频研究[J]. 中国激光, 2001, **28**(6): 509~512
- Xu Guangming, Zhang Bin, Jiang Anguo *et al.*. Laser frequency stabilization for differential ring lasers[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(1): 49~53
许光明, 张 斌, 蒋安国 等. 四频差动激光陀螺中的激光稳频 [J]. 光电子·激光, 2000, **11**(1): 49~53
- Albert N. Zampello, Bradley J. Patch. Jr. Laser gyroscope detector and path length control system[P]. US Patent 4108553, 1978.08.22
- Xie Yuanping. Investigation of phase demodulation and frequency stabilization techniques in mechanically dithered ring laser gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000
谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2000
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Ti'rong *et al.*. Laser Principle (Fourth Edition) [M]. Beijing: Press of Defense Technology, 2000. 183~184
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘 等. 激光原理(第四版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 183~184
- Yang Jianqiang, Liao Dan. Preliminary study of dithering frequency stabilization for four-frequency differential laser gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2256~2260
杨建强, 廖 丹. 四频差动激光陀螺小抖动稳频初步研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2256~2260