

文章编号: 0253-2239(2006)03-0409-6

## 激光陀螺克服高、低温冲击的技术研究

金世龙<sup>1</sup> 龙兴武<sup>1</sup> 王 飞<sup>1</sup> 赵洪常<sup>1</sup> 卢广锋<sup>2</sup> 张 文<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 国防科大光电工程系, 长沙 410073  
<sup>2</sup> 国防科大光电科学与工程学院研究生队, 长沙 410073)

**摘要:** 分析了激光陀螺在经历外部环境温度变化时光强和性能发生变化的原因,提出了利用新型腔长角度控制镜(光路程长控制镜)的角度控制元件作为驱动器件,应用类似小抖动稳频的原理对激光陀螺环形光路进行闭环控制,并通过对各光路控制单元采取分时控制的办法解决了光路稳定过程中的调制信号的冲突,使激光陀螺在环境变化时始终保持其光程长和光路相对位置的稳定从而保证其性能的稳定。实验结果表明,对原来在全使用温区(-40℃~+60℃)光强变化达30%甚至只要有光的,通过光路稳定措施可将光强稳定在±3%以内,对于有些在高低温时不能出光的,也可以达到可使用的光强稳定水平。较好地解决了许多激光陀螺难以克服的耐高、低温冲击问题。

**关键词:** 激光陀螺; 光路程长控制镜; 小抖动稳频; 闭环控制; 分时控制

中图分类号: V241.5<sup>+</sup>58 文献标识码: A

## Technology Research for Ring Laser Gyro to Overcome the Environmental Temperature Variation

Jin Shilong<sup>1</sup> Long Xingwu<sup>1</sup> Wang Fei<sup>1</sup> Zhao Hongchang<sup>1</sup>

Lu Guangfeng<sup>2</sup> Zhang Wen<sup>2</sup>

{<sup>1</sup> Department of Optics and Electronics Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073  
<sup>2</sup> Graduate Student College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073}

**Abstract:** By analyzing the light intensity of the ring laser gyro (RLG) and its performance changes with variations of the environmental temperature, a new method is put forward. The angle controllers of a novel cavity length and angle control mirror-light path and optical path length control mirror are used to realize the closed-loop control of the ring laser of RLG in a similar way to the dither frequency stabilization (hill climbing). The modulation signal conflict is settled by controlling all the functional units in time-sharing control means. The optical path length and the light path of the ring laser are stabilized when the environmental temperature changes. The experimental results show that in the whole range of -40℃~+60℃, in the condition that the original intensity fluctuation reaches 30% or the intensity is very feeble, the light intensity variation is modulated within ±3% with the controlling system, and even stabilized light intensity level is kept when the original intensity is zero under extremely high and low temperatures. The system resolves the environmental temperature influences on the RLG.

**Key words:** ring laser gyro; light path and optical path length control mirror; hill climbing; closed-loop control; time-sharing control

### 1 引 言

随着光电惯性技术的迅猛发展,激光陀螺因结构简单、体积小、重量轻、精度又高,且更适用于结构紧凑的捷联惯导系统等多方面的优越性,已大量成

功地运用于军事和民用等领域<sup>[1~3]</sup>。其中许多应用场合尤其是军事领域,环境十分恶劣,如因季节的更替、南北地域的差别以及地面与高空的温差等,都会发生环境温度的变化。这就要求激光陀螺必须能经

受这些考验,可以抵抗温度变化的影响。目前在激光陀螺制造的后期测试阶段,有很多常温下完全合格的陀螺,经受不了温度变化的冲击(高温或低温时性能不达标)而只能被淘汰,极大地影响了陀螺生产的成品率。在常温下性能本来更好的陀螺,但由于温度的变化使得性能变差,虽然在全温区都能达标,但已明显影响其潜能,降低了陀螺的档次。在激光陀螺的使用过程中(如在火箭、飞机上的使用)出现此类问题,即使是极个别的,但其后果也可能是非常严重的。因此,找到消除或减小温度变化对激光陀螺性能影响的办法,是非常必要的。

## 2 现 象

现以某种方形二频激光陀螺为例,来研究温度变化对陀螺性能的影响。许多常温下性能良好的陀螺在进行高、低温实验时会出现以下的某些现象。

1) 温度变高或变低时(主要是降温时),光强都减弱甚至无光。

2) 温度变高或变低时,光强增强。但当温度反方向变化时,光强减弱甚至无光。

3) 温度变高或变低时(主要是降温时),初期光强增强,但当温度继续变化时,光强减弱甚至无光。

4) 当光强减弱或没光时,试着从不同的方位偏心地推压槽片,陀螺会在其中某个方位上施压时出光或光强增大。

5) 温度变回原值时,陀螺也恢复常态。

6) 光强变化引起陀螺性能的变差。

## 3 分 析

激光陀螺在温度发生变化时,光强随之变小的原因只有两个,一是增益减小,二是损耗增大。其主要问题可能是:1)增益介质品质变差(如比例变化、杂气变多等)造成增益下降;2)放电电流减小造成总增益减弱;3)反射膜片的质量变坏使得损耗增加;4)谐振腔失调(由反射镜片所构成的闭环回路即激光光路偏离由光路孔所决定的理想环路)增益损耗差减小(衍射损耗增大以及光路偏离最佳增益区造成的增益下降)。

分析发现,在实验条件中,变化的只是温度,其它的条件并不变化(如放电电流等),从而排除问题2)的影响。且从现象3)、4)又可得出,增益介质以及反射膜片的品质也不存在大的问题。那么,最大的可能就是谐振腔失调造成增损比下降。

分析腔体的结构可发现谐振腔的失调来源于两个方面:一是环形腔块体在温度变化时自身发生变形。尽管腔体本身通常都是用温度膨胀系数极低的微晶玻璃加工而成,且腔体在设计上已保证有较大的机械强度。但由于该部分在陀螺中相对体积较大,这一微小的膨胀系数(尤其是当体内各部分膨胀系数不一致或温度不一致时)所导致的腔体变形将足以改变环腔的谐振路线;二是反射镜在温度变化时反射方向发生变化,造成闭合环形腔严重失调,损耗变大。其中主要应该是控制镜中的槽片(当然如果输出镜的输出棱镜胶结不当也会引起变化),引起变形的原因主要有:

1) 加工槽片环槽时残余的加工应力,温度变化时,发生应力变形。

2) 温度变化造成腔内压力的微小变化,若槽片加工时有误差,则压力的变化会引起槽片微小的变形。

3) 微晶玻璃、石英玻璃膨胀系数尽管都很小,但仍存在微小差别。温度发生变化时,石英玻璃(槽片)的变化将大一些,但在其光胶处受到膨胀系数更低的微晶玻璃(腔体)的限制,这将在槽片内引起较大的应力。而加工时的缺陷或应力的不对称都会引发镜片的变形。

4) 压电陶瓷与石英玻璃膨胀系数的差异,以及压电陶瓷自身膨胀系数的不均匀造成槽片的歪扭。

5) 粘接层的不均匀,以及粘接胶在温度变化时物理性质的变化造成槽片的歪扭。

6) 腔长控制镜在补偿因温度变化引起的腔长变化时,压电陶瓷施力中心偏离槽片中轴线或槽片自身的结构在加工时没能做到完全轴对称,即压电陶瓷和槽片的动态歪扭。

## 4 解 决 方 案

从以上的分析可以看出,造成激光陀螺光强变化的因素是很难完全避免的。事实上,激光陀螺内外环境的变化,尤其是温度的变化,从几何的角度看对谐振腔的影响无非是以下两个方面,一是尺寸大小的变化,二是形状的变化。第一种变化已得到人们的充分注意,因为这一变化(当然也包括折射率等其它因素的变化)势必造成激光频率的不稳定,而使激光陀螺的精度降低到没有任何使用价值,因此,任何一种实用化的激光陀螺都有以稳腔长(光程长)的方式来实现的稳频装置。然而,另一也很重要的环节没被很好的重视,这就是谐振腔体(基体及反射

镜)的变形所造成的激光陀螺振荡模的闭环回路的不稳定。因此,在对付像高低温等内外部环境对激光陀螺性能的影响时,除了对谐振腔长度进行稳定外,还必须对谐振环路即光路进行稳定。只有这样才能从根本上解决上述的问题。而唯一的办法就是想法修复腔体(主要是镜片)的变形。

槽片的歪扭改变的是反射面的方向,若能检测和控制,则只需直接修正即可。腔体是用温度膨胀系数极低的微晶玻璃加工而成且腔体在设计上已保证有较大的机械强度,当温度变化发生形变时,实际上光路孔的相对几何位置变化不会太大,变形主要是通过贴片面的角度变化,改变反射镜的方向而造成严重影响光路的后果。由此可见,对于反射镜以及腔体本身变形所导致的光路变化,都可以只通过对反射镜反射方向的控制就能达到基本恢复的目的。

#### 4.1 新型腔长角度控制镜

腔长角度调控镜(或称光路程长控制镜)是在传统腔长控制镜的基础上增加了一组角度控制元件(如图1),可在小角度范围(含盖激光陀螺腔体的加工精度)任意调控反射镜的反射方向,不仅可通过腔长控制单元来控制谐振腔的光程长,还可通过角度控制单元来控制光路的方位,通过扫描控制电路可实现自动调腔<sup>[4,5]</sup>。

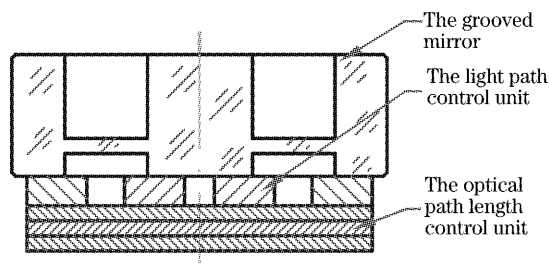


图1 光路程长控制镜示意图

Fig.1 Illustration of the light path and optical path length control mirror

#### 4.2 小抖动稳频原理

图2是激光增益曲线( $G-\nu$ )示意图,在激光陀螺的稳频中常采用将激光谐振频率稳定在增益最大的位置,这就是小抖动稳频方法<sup>[6]</sup>。其原理是在控制镜的程长控制元件上加一小振幅的正弦调制电压,使其程长在一小范围波动,激光腔的谐振频率就会相应地在一小范围内来回变化,激光光强也就随之变化。利用相干检测的方法提取控制量并施加于激光陀螺中的压电陶瓷(PZT)程长控制元件,使它的谐振频率稳定在增益最大处。图2(a)为稳频过程中光强调制曲线示意图<sup>[2]</sup>,其中 $\nu_0$ 是增益曲线中

心频率, $\nu_q$ 是某一实际频率,①是被调制后的实际频率的平均值 $\overline{\nu}_q \nu_0$ 时的输出功率曲线;②是 $|\delta\nu_{qdc}| > \delta\nu_q$ 时的输出功率波形( $\delta\nu_{qdc}$ 是偏离理想控制点的误差信息即 $\delta\nu_{qdc} = \nu_0 - \overline{\nu}_q$ , $\delta\nu_q$ 是频率调制的幅度)。如果 $\overline{\nu}_q = \nu_0$ (即 $\delta\nu_{qdc} = 0$ ),则相敏检波器输出信号为零。若 $\overline{\nu}_q \neq \nu_0$ ,如 $\delta\nu_{qdc} = \nu_0 - \nu_q > 0$ ,则相敏检波器输出正的电压信号,反之输出负的电压信号。此电压信号的幅度取决于 $\delta\nu_{qdc}$ 的大小,符号与 $\delta\nu_{qdc}$ 相同。

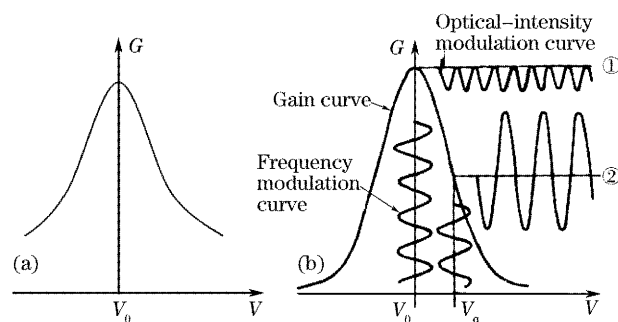


图2 (a)激光增益曲线示意图, (b)程长控制中光强调制曲线示意图

Fig.2 (a) Illustration of the gain curve of laser, (b) illustration of the optical-intensity modulation curve in the optical path length control process

#### 4.3 稳谐振环路

##### 4.3.1 原理

对于谐振光路的稳定,可以基于同样的原理,但此时利用的是光强相对于实际谐振光路偏离最佳谐振光路的关系曲线。图3是激光光强与光路(或反射镜角度)偏差示意图,纵坐标是激光光强 $I$ ,横坐标是实际谐振光路与最佳谐振光路的偏差值 $\Delta$ 。在最佳谐振光路位置,增益最大损耗最小,光强最大。当实际光路偏离最佳光路时,偏差值 $\Delta$ 增大,损耗(尤其是衍射损耗)逐渐增大,增益与损耗的差减小,光强逐渐下降。调腔结束时,腔长角度调控镜的法线方向被控

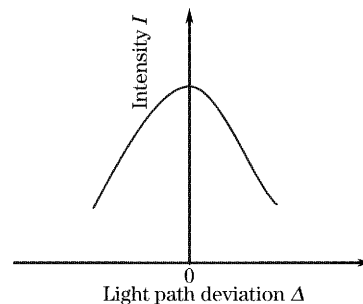


图3 激光光强-光路偏差曲线示意图

Fig.3 Illustration of the curve of laser intensity versus light path deviation

制在最理想方位,谐振腔损耗最小,振荡模强度最大。当腔长角度调控镜偏离最佳方位时,增益减小损耗增大(或增损差减小),光强将减弱。因此完全可以类似于小抖动稳频,在腔长角度调控镜的角度控制块上加以小幅度的交变控制信号,使其反射镜的法线方向在最佳方位角左右来回变化,由此造成的光强变化完全类似于小抖动稳频。这样我们就可使用同样的方法将谐振光路控制在光强最大处<sup>[7]</sup>。

4.3.2 分时控制

尽管在原理上可以实现稳定谐振光路,而且稳光路和稳频在形式上也非常相似,但在实际操作上,要同时对光路和频率进行稳定控制就不象单独进行稳频那样简单了。这是因为在稳频过程中检测的是光强,控制的是腔长,而腔长和腔长控制镜的关系是一一对应的,控制变量只有一个,实现起来较为容易。而在谐振光路控制中,由于控制光路的光路程长控制镜通常不只一个,且每个都有两个完全独立的控制方向(每个控制镜上都有环向及俯仰方向两个控制单元),而每一方向的变化都会影响光路位置,且每一变化都会引起光强的变化,另外稳频也是通过检测光强变化来实现的,即同一个变量(光强 I)有很多个因变量。如果同时对所有变量进行控制,则光强变化量与因变量的关系将不好确定。为了解决这一矛盾,本文提出对不同的因变量进行分时控制,并且为了保证稳定光路的控制操作中始终保持频率稳定,专门对稳频进行了单独控制处理,使稳频和稳谐振光路同时得以实现。

图 4 是采用分时控制系统对激光陀螺光路及其程长进行稳定控制的总框图,图中的 1、2、3、4 是四个反射镜,共同构成一个方形的谐振腔,其中 1、2 是两个光路程长控制镜;3、4 是输出镜,用于陀螺信号及控制信号的输出。5 是控制信号输出棱镜,6 是光强探测器,它将接收的信号分别传给放大器 7 和 8。7 是高频选频放大器,其中心频率与谐振腔光程长信号检测及控制单元 9 中的小抖动信号发生器的信号发生频率相对应;8 是低频选频放大器,其中心频率与光路偏差信号检测单元 10 中的小抖动信号发生器的发生频率相对应。谐振腔光程长信号检测及控制单元 9(即小抖动稳频电路部分,主要由小抖动信号发生器、相敏检波器、低通滤波器、控制器等构成<sup>[3]</sup>)输出叠加有小抖动调制信号的程长控制信号 Z,经放大器 13 放大后,驱动控制镜 1、2 的压电陶瓷(PZT)程长控制元件,调整谐振光路的程长。光路偏差信号检测单元 10(其基本功能和电路与稳频电

路相似,也主要由小抖动信号发生器、相敏检波器、低通滤波器等构成,但不包括控制器且小抖动信号频率比稳频电路的低一个数量级)输出小抖动信号 S 及光路偏差信号 A。11 是光路控制的分时处理单元,分别产生对控制镜 1、2 的光路(或称角度)控制元件的环向及俯仰控制单元的控制信号 X1、Y1、X2、Y2,这些信号各自经放大器 14、15、16、17 放大后,分别驱动相应的光路控制组件,调整激光陀螺的光路至最佳。12 是温度传感器,提供激光陀螺开机时的温度参量。

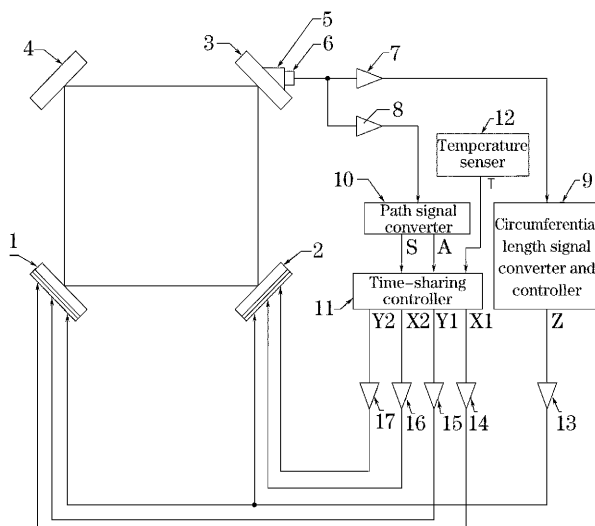


图 4 光路及路长控制框图

Fig. 4 Schematic diagram of the light path and optical path length control

图 5 是对各光路控制组件进行分时控制的电路框图。分时控制的电路即图 5 中的光路控制的分时处理单元 11 的电路。23 是电路总控制器,负责对

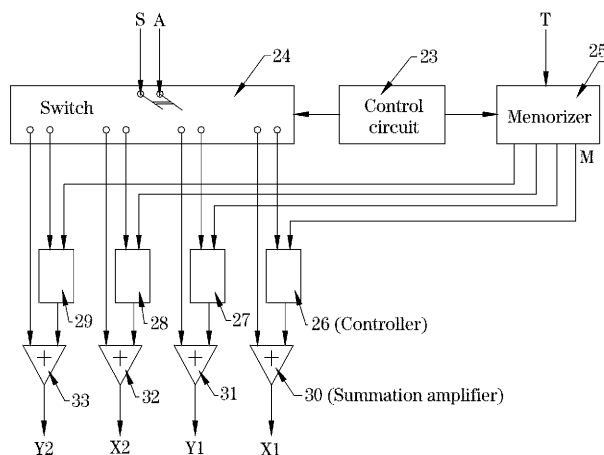


图 5 光路分时控制框图

Fig. 5 Schematic diagram of the time-sharing controll part for the light path

选通开关组 24 及存贮器 25 等的操作控制。选通开关组 24 内有四组双路选通开关,依次循环将光路偏差信号检测单元 10 的输出信号 S、A 分时传入四个不同通道。26、27、28、29 是四个控制器,当它的输入信道被选通开关组 24 接通时,则根据 10 中相干检测器发出的误差修正信号 A 产生或修正光路控制信号(直流分量),当信号 A 选通到其它控制器时,则保持现有的光路控制信号(直流分量)不变,直到下次被选通。30、31、32、33 是四个叠加放大器,将控制器发出的光路直流控制信号与 10 中的小抖动调制信号发生器发出的低频调制信号 S 叠加后,向控制镜 1、2 分别输出光路控制信号 X1、Y1、X2、Y2。在控制过程中,只有其中被双路选通开关组 24 选通的那一路有 S 信号,其它的只有直流控制信号,因此,任何时间都只有一路光路控制信号里带有小抖动信号,其余各路都维持原有的直流控制信号不变。25 是一存储器,它记录有各温度情况下各光路控制单元的最佳控制电压,陀螺开启时,控制电路 23 根据温度传感器 12 获得的温度信号 T,选取相应的一组控制电压给四个相应的控制器 26、27、28、29,其目的就是为了在开机时使激光陀螺光路迅速处于最佳光路附近,一旦陀螺进入自身闭环控制后,该功能就自动关闭,不再起作用。

## 5 实 验

能进行光路分时控制的唯一前提是在一个循环控制周期内,光路或者说镜面的相对方向不应有大的变化。实验中稳频采用 2000 Hz 的小抖动信号,为保证稳光路时稳频不受影响,光路调制频率要低一个数量级,另外还必须避开偏频抖动的影响(对于机抖陀螺,机械抖动对光强有调制作用),因此将光路调制频率选为 100 Hz,这在 1 s 的时间内能完成

对一个控制单元的调控,整个控制周期能控制在 4s 量级。而通常温度对激光陀螺的影响是一个相对慢变的过程,因此分时控制不会造成被控元件的失控。

实验中,对数个某种光路长为 28 cm 的方形激光陀螺(它具有两个控制镜)进行了对比测试,结果正如我们所预期的,效果非常明显且非常好。而且若只单独对其中的一个控制镜进行控制,或只用一组控制信号同时控制两个控制镜,就可获得非常好的结果。测试结果表明,正常陀螺在其使用的全温区范围内( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )光强稳定性可控制在  $\pm 3\%$  以内(原先只要在 30% 以内即认为光强基本合格),即使原光强变化很大的陀螺,也可将其光强控制在适用的范围内。

一个光路偏差较大的陀螺,在不加光路控制功能时,室温下光强只有 4V 左右(光强检测电路给出的反映输出光强大小的电压信号,正常情况下应在 7、8V 左右),而当温度上升到不到  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  或下降到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时便没有激光输出,可以说是一个光强随温度变化很厉害,是一个完全不能用的陀螺。但在加入光路控制后,情况发生了根本性变化。

图 6(a)所示为温度从室温(约  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右)下降至  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过程中光强及各控制单元控制电压的测试曲线。其中  $V_x$ 、 $V_y$  分别是加载在光路程长控制镜上角度控制单元的 X 和 Y 方向上的控制电压,  $V_z$  是加载在程长控制单元上的稳频电压,  $I$  是激光陀螺输出光强,光强曲线上的毛刺是由于稳频时跳模引起的。图 6(b)所示为温度从  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升至  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过程中光强及各控制单元控制电压的测试曲线。从中可以得到室温时光强为 8.43 V、低温时光强为 6.26 V、高温时光强为 8.50 V,低温相对室温光强变化 26%,高温相对室温光强变化 0.8%。由此可见,通过稳光路不仅使其在全温区都有激光

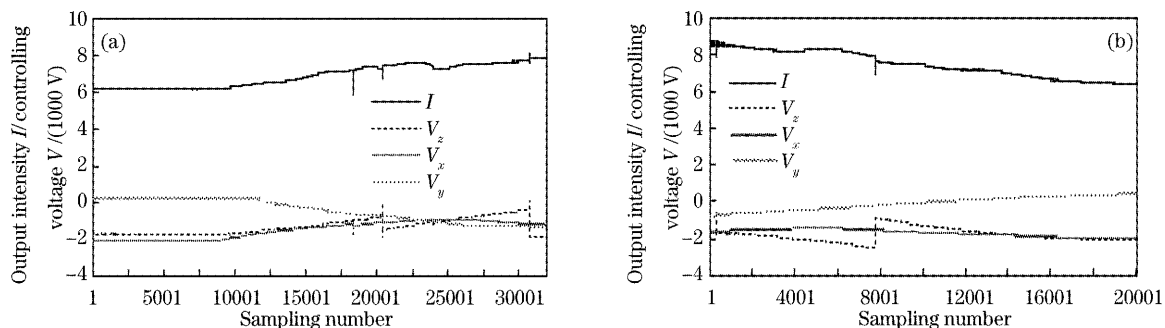


图 6 降温时(a),升温时(b)激光光强及控制电压变化曲线

Fig. 6 The changing of the output Laser intensity and the control voltage when the temperature goes down (a), temperature goes up (b)

输出,而且光强都能满足使用要求。

## 6 结 论

利用光路程长控制镜对调腔片的反射方向动态地进行控制,以补偿由于温度变化造成腔体或反射镜变形等所引起的谐振光路失准,使激光陀螺在全温区内始终保持低损耗。这一方法,不仅保证激光陀螺在全温区的优良性能,而且成品率大大提高,基本解决了许多陀螺难以克服的耐高、低温冲击问题。另外,由于借用了技术已很成熟的原有的小抖动稳频电路,使我们只需花费很小的代价就能高可靠性地实现预定的目的。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Buolong, Li Shutang. *Ring Laser Gyro* [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1984 (in Chinese)  
高伯龙,李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1984
- 2 Yang Peigeng, Gong Zhibing. *Optical and Electrical Inertial Techniques* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999 (in Chinese)  
杨培根,龚志兵. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 1999
- 3 Guo Xiuzhong. *Inertial Navigation System & Theory of Gyro* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996 (in Chinese)  
郭秀中. 惯导系统陀螺仪理论[M]. 北京:国防工业出版社, 1996
- 4 Jin Shilong, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Research of the cavity adjustment technology for orthogonal triaxial RLGs [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 525~529 (in Chinese)  
金世龙,龙兴武,张斌等. 空间直交三轴激光陀螺的调控技术[J]. 光学技术, 2005, **31**(4): 525~529
- 5 Jin Shilong. The Light Path and the Path Length Control Mirror of Ring Laser Gyro [P]. *Chinese Pat.* No. 200410046907. 8, 2004 (in Chinese)  
金世龙. 激光陀螺光路及程长控制镜 [P]. 中国专利 200410046907. 8, 2004
- 6 Xie Yuanping. *Investigation of Phase-Demodulation and Frequency Stabilization Techniques in Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes* [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2000 (in Chinese)  
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
- 7 Jin Shilong. The Light Path Controlling System of Ring Laser Gyro [P]. *Chinese Pat.* No. 200410046906. 3, 2004 (in Chinese)  
金世龙. 激光陀螺光路控制系统 [P]. 中国专利 200410046906. 3, 2004
- 8 Xie Yuanping, Song Zhangqi, Yao Qiong *et al.*. Influence of phase modulator non-linearities on measurement of workpoint and signal demodulation in open-loop fiber gyroscope [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 848~850 (in Chinese)  
谢元平,宋章启,姚琼等. 相位调制非线性对开环光纤陀螺工作点测量与信号解调的影响 [J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 848~850
- 9 Yuanhong Yang, Xeixu Zhang, Jing Ma *et al.*. Low cost, practical, all-digital open-loop fiber-optics gyroscope [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 567~569