

## 激光陀螺跳模规律研究

许光明,王 飞,谢元平

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 激光陀螺长期工作或环境温度变化较大时有可能发生跳模现象,跳模会对陀螺的性能带来较大的影响。通过对激光陀螺相邻模的背向散射特性的分析,发现背向散射光强呈现周期性,且与工作模式之间存在严格的对应关系,由此得出激光陀螺跳模规律,即跳在相同的模式上陀螺性能前后没有明显变化,而跳在相邻模式上会引起陀螺锁区变大、零偏发生跳变,给性能带来较大影响。针对跳模规律提出了合理的跳模控制建议,并通过实验验证了上述结论。

**关键词:** 激光陀螺; 工作模式; 跳模; 零偏; 背向散射

中图分类号: V241.5+58 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0502-04

## Study on mode hopping in ring laser gyro

Xu Guangming, Wang Fei, Xie Yuanping

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

**Abstract:** Laser gyroscope working mode is likely to hop when it works for a long time or the ambient temperature changes greatly. To change the mode of the laser gyro will bring a great impact on its performance. Based on the analysis to the backscattering properties in the adjacent model of laser gyro, the backscattering intensity is periodic, and there is a strict correspondence between the working mode and backscattering intensity. The laser gyro mode hopping pattern is that if the model of laser gyro jumps in the same model gyro performance before and after does not change significantly, while it jumps in the adjacent model gyro's lock-in will arise and bias will jump, and gyro performance is affected greatly. According to the mode hopping law the reasonable suggestion was put forward, the above conclusions were proved by the experiment.

**Key words:** laser gyroscope; working mode; mode hopping; bias; backscattering

## 0 引言

激光陀螺是一种基于 Sagnac 效应的惯性导航元件<sup>[1-2]</sup>,具有精度高、可靠性好、耐环境性能好、体积小、成本低等特点,是捷联惯导系统的理想元件,目前已在航空、航海、航天等诸多领域得到十分广泛且重要的应用。跳模是激光陀螺应用过程中可能出现的一种状态<sup>[3]</sup>,会对陀螺的精度带来一定的影响,在实际应用中应尽量避免跳模的发生,但在某些场合,比如陀螺长时间工作、环境温度变化过大等都可能引起陀螺跳模。

文中分析了激光陀螺跳模产生的原因,并从理论上解释了激光陀螺跳模对性能带来的影响。通过对背向散射产生的原因分析以及与陀螺工作模式的对应关系,得出了跳模后陀螺的工作模式会出现两种情形:一种是与跳模前的模式一致,不会给陀螺的性能带来明显的影响;另一种是与跳模前的模式差异较大,可能给陀螺性能带来较大的影响。这两种模式有明显的规律性,有利于对跳模加以控制,使陀螺始终跳在相同的模式上,减小跳模对陀螺性能的影响。

## 1 激光陀螺的工作模式与背向散射的关系

### 1.1 工作模式

当谐振腔腔长固定时,在谐振腔内只有频率满足  $\nu=qc/\langle L \rangle$  的光能够形成稳定振荡,不同的  $q$  值对应不同的谐振频率,即不同的纵模,相邻的模间隔为  $C/\langle L \rangle$ 。如图 1 所示。如果谐振腔内存在多个模式同时振荡,会对激光陀螺产生严重干扰,因此必须保证腔内只存在单模振荡<sup>[1]</sup>。

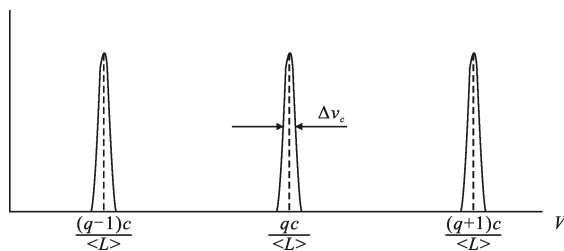


图 1 能形成稳定振荡的纵模

Fig.1 Stable oscillation of longitudinal mode

### 1.2 相邻模的背向散射特性

激光陀螺精确度的提高主要受到闭锁效应的限

制<sup>[4]</sup>。激光陀螺闭锁现象来源于陀螺环路的非均匀性,主要是反射镜背向散射(通常称为 Single Beam Signal, SBS)引起的耦合效应产生的。在激光陀螺谐振腔内一个方向运行的激光会通过非均匀散射耦合到与它传播方向相反的激光中并与之干涉,谐振腔中每一个散射点都可以看作一个背向散射光源,它们会耦合成一个复合的背向散射光束<sup>[5]</sup>。由于反射点的位置变化都可能影响到散射光束的幅度和相位,耦合的背向散射是随着谐振腔的物理状态变化而改变的,这就可能造成相邻模的零偏出现差异。

$R$  表示谐振腔综合背向散射耦合系数,  $r_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 表示谐振腔 4 个反射镜中第  $i$  个反射镜的背向散射系数,  $l_i$  为谐振腔各边的长度。根据耦合理论<sup>[6]</sup>:

$$R = r_1 e^{i(2kl_1 - \varphi_1)} + r_2 e^{i(2k(l_1 + l_2) - \varphi_2)} + r_3 e^{i(2k(l_1 + l_2 + l_3) - \varphi_3)} + r_4 e^{i(2k(l_1 + l_2 + l_3 + l_4) - \varphi_4)} \quad (1)$$

$\varphi_i$  为背向散射相位角。谐振腔综合背向散射系数是各个镜片的背向散射系数、光程和相位的函数。

谐振腔中传播的顺、逆两束光光强中因为有背向散射的存在不仅含直流成分,而且含少量的交流信号,其交流量大小与背向散射大小成正比。

激光陀螺背向散射信号可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$i = I_0 \Omega_L / (\Omega_2 + \Omega_g^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$\Omega_L = 2rc/L \quad (3)$$

$$\Omega_g = (c/L)\alpha(\beta - \theta)/(\beta + \theta) \quad (4)$$

式中:  $i$  为单光束交流信号,即背向散射的大小;  $I_0$  为单光束直流信号;  $\Omega_L$  为激光陀螺的闭锁阈值;  $\Omega$  为陀螺输入角速度;  $\Omega_g$  为谐振腔净增益;  $r$  为背向散射系数;  $c$  为光速;  $L$  为腔长;  $\alpha$  为单程增益系数;  $\beta$  为自饱和系数;  $\theta$  为互饱和系数。

由公式(2)~(4)可知,如果腔长  $L$  发生变化,背向散射光强  $i$  会随之变化。为了研究背向散射与陀螺工作模式之间的关系,利用陀螺稳频控制系统的腔平移镜进行扫描,同时测量陀螺的直流光强  $I_0$  和背向散射光强的有效值  $i$ ,发现陀螺光强和背向散射光强都对光程(腔长)变化呈现出周期性,其对应关系如图 2 所示。图中,横轴为加在腔平移镜压电陶瓷上的电压,代表谐振腔总腔长的变化。

陀螺光强扫描图像中的每一个峰值点代表一个工作模式,从图 2 中可以看出,陀螺工作模式的变化周期是背向散射光强变化周期的两倍,在陀螺奇数

模上对应的是背向散射光强的谷值点,而偶数模上对应的是背向散射光强的峰值点,这说明陀螺在相邻模上的状态不一样。陀螺工作在奇数模上处于最佳状态,相应的背向散射、闭锁阈值较小<sup>[4]</sup>,此时陀螺的性能最优;陀螺工作在偶数模上时相应的背向散射、闭锁阈值较大,此时陀螺的性能相对要差,具体模式之间的性能差异与谐振腔背向散射的整体水平有关。下面把背向散射谷值点对应的工作模式称为奇数模,峰值点对应的模式称为偶数模。

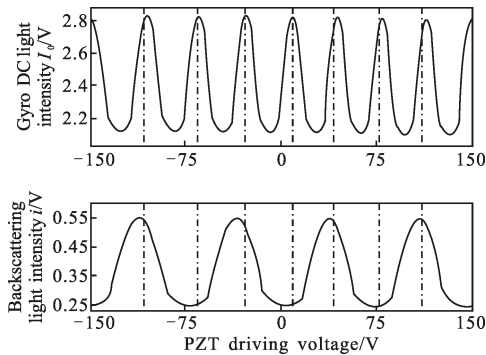


图 2 陀螺光强与背向散射光强的周期关系对比

Fig.2 Comparison between the cycle of the intensity of gyro and backscattering

## 2 跳模现象的产生及对陀螺性能的影响

### 2.1 跳模现象和规律

由陀螺光强  $I_0$  的扫模曲线(图 2)可以看出,在设置的稳频控制电压扫描范围内一共存在 8 个模。陀螺起始工作时应选取背向散射光强较小的奇数模中的某一个工作点,确保陀螺工作在最佳状态<sup>[8]</sup>。工作中,由于陀螺腔体的自升温和环境温度的变化会引起腔长发生改变,稳频系统驱动腔平移镜保持腔长不变。在陀螺工作时间较长或温度变化较大时会造成稳频控制电压超出了稳频系统的调节范围,稳频系统就会归零,重新开始稳频,这个过程称为跳模。

发生跳模时,稳频控制电压从最大值或最小值跳变到某个中间值,陀螺腔长短时间内发生剧烈变化。如果不加以精细的控制,由于各种干扰因素的影响,跳模后陀螺的工作模式是随机的,可能跳在相同模式(奇数模式)上,也可能跳在相邻模式(偶数模式)上。如果跳模引起陀螺工作模式发生变化,由奇数模跳到了偶数模,由于两种模式下的背向散射光强不同,陀螺的锁区也就有差异,因此跳模可能对陀螺的

性能产生较大的影响。

### 2.2 实验验证

为了研究激光陀螺跳模对性能的影响,设计了一些实验来对比陀螺跳模前后的背向散射光强和性能。图 3 为某型激光陀螺跳模前后背向散射光强和陀螺零偏的对比测试结果。

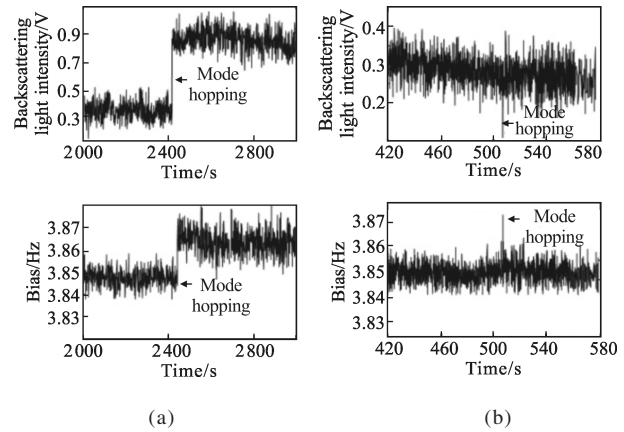


图 3 激光陀螺跳模时背向散射和零偏变化

Fig.3 Backscattering intensity and bias offset changes after working mode hopping

图 3(a)中陀螺背向散射光强值在跳模前后发生了跳变,据此可推出其工作模式发生了奇、偶模式的变化,陀螺的锁区明显变大,而且零偏也跟着发生跳变,对陀螺的性能影响较大。而图 3(b)在跳模前后陀螺背向散射光强值没有变化,因此跳模后陀螺工作在相同模式上,跳模对陀螺的零偏没有带来明显影响,陀螺的锁区和性能基本没有受到影响。

不同样本激光陀螺的实验均表明跳模规律是相同的。性能较好的激光陀螺的背向散射光强也较小,在跳模引起工作模式奇偶变化时对陀螺零偏的影响偏小些<sup>[9]</sup>。

针对陀螺跳模时可能会对陀螺的性能带来较大的影响,要求对跳模加以更加精确的控制,以确保陀螺始终工作在背向散射较小的模式上,即奇数模式上。

## 3 结论

激光陀螺的工作模式与背向散射光强之间存在对应关系,相邻模式对应的背向散射光强差异较大,导致陀螺工作在不同模式上性能存在差异,因此陀螺起始工作时应该选择背向散射较小的奇数模式。跳模可能引起陀螺工作模式发生改变,通过对激光

陀螺相邻模的背向散射特性的分析和跳模前后陀螺性能和背向散射的对比测试,得出激光陀螺跳模规律,即跳在相同的模式上陀螺性能前后没有明显变化,而跳在相邻模式上陀螺零偏会发生跳变,锁区会明显变大,给性能带来较大影响。实际应用中应对跳模加以控制,使陀螺始终工作在相同的模式上,将跳模对陀螺性能的影响降到最低。

#### 参考文献:

- [1] Gao Bolong, Li Shutang. The Ring Laser Gyro[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1984: 52-54. (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: 52-54.
- [2] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. *Rev Mod Phys*, 1985, 57(1): 61-104.
- [3] Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Press of TsingHua University, 1995. (in Chinese)  
姜亚南. 环形激光器[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [4] Han Zonghu, Chen Linfeng, Chen Yong, et al. The study of laser gyro lock-in characteristic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 807-809. (in Chinese)  
韩宗虎, 陈林峰, 陈勇, 等. 激光陀螺锁区特性的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 807-809.
- [5] Fred Aronowitz, Lim Wah L. Positive scale factor correction in the laser gyro [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, 13(5): 338-343.
- [6] Zhang Yi. Research on bias difference of the intermodes in ring laser gyro [D]. Xi'an: XiDian University, 2011: 35-37. (in Chinese)  
张毅. 激光陀螺相邻模零偏特性的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 35-37.
- [7] Mavern Alan R. Ring Resonator gyroscope with reduced backscatter effect: US, 5448353 [P]. 1995.
- [8] Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei, et al. Mode-loss induced bias in four-frequency differential laser gyroscopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 315-321. (in Chinese)  
汪之国, 龙兴武, 王飞, 等. 四频差动激光陀螺的零漂敏感性[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 315-321.
- [9] Chen Meixiong, Yuan Jie, Long Xingwu. Backscattering coupling effect in square ring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(S1): s100522-1-s100522-4. (in Chinese)  
陈梅雄, 袁杰, 龙兴武. 方形谐振腔背向散射耦合效应的初步研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(S1): s100522-1-s100522-4.