

文章编号: 0258-7025(2010)03-0713-05

# 四频差动激光陀螺磁灵敏度特性的实验研究

汪之国 龙兴武 王 飞 黄 云

(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** 为了减小四频差动激光陀螺(DILAG)的磁灵敏度,提出了一种工作点控制方法,并比较了同一陀螺分别采用传统光强差稳频和新设计的工作点控制方法时磁灵敏度的差异。对两个异面腔四频差动激光陀螺进行的实验研究表明,在 $0\sim 0.06$  mT的磁感应强度范围内,采用传统光强差稳频时,两个陀螺的磁灵敏度分别为 $62.7$ 和 $111.3(^{\circ})/(\text{h}\cdot\text{mT})$ 。改用工作点控制电路后,两个陀螺的磁灵敏度分别改善到 $0.9$ 和 $1.6(^{\circ})/(\text{h}\cdot\text{mT})$ 。表明电子控制装置对陀螺的磁灵敏度有重要影响。四频差动激光陀螺残余磁灵敏度可能来自于横磁场导致的非互易性,详细物理机理尚需进一步研究。

**关键词** 测量;四频差动激光陀螺;磁灵敏度;工作点;零偏

**中图分类号** V241.5<sup>+</sup>58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0713

## Experimental Investigations on Magnetic Sensitivity in Four-Frequency Differential Laser Gyros

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei Huang Yun

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

**Abstract** To reduce magnetic sensitivity of four-frequency differential laser gyro (DILAG), an operating point control method is proposed. Moreover, the magnetic sensitivities of the same gyro with conventional frequency stabilization using light intensity comparison and with the new operating point control method are compared. In the range of  $0\sim 0.06$  mT, the magnetic sensitivities of two experimental gyros are  $62.7$  and  $111.3(^{\circ})/(\text{h}\cdot\text{mT})$ , respectively, when the gyros are controlled with conventional frequency stabilization method. However, the magnetic sensitivities are improved to  $0.9$  and  $1.6(^{\circ})/(\text{h}\cdot\text{mT})$  respectively, when they are controlled with a new operating point control method. The results indicate that electronic control means are of significance to the magnetic sensitivity. The residual magnetic sensitivity maybe arises from nonreciprocal effects induced by transverse magnetic field, which is going to be investigated in future work.

**Key words** measurement; four-frequency differential laser gyro; magnetic sensitivity; operating point; bias

## 1 引 言

四频差动激光陀螺(DILAG)没有机械活动部件、不过锁区,与机械抖动陀螺相比,它具有比例因子误差小,不会产生圆锥误差和划桨误差等优点<sup>[1]</sup>。美国 Northrop Grumman 公司所产的 DILAG(称为 Zero-lock™ Laser Gyro)广泛应用于西方现役装备<sup>[2]</sup>。目前我国的 DILAG 水平与国外先进水平相比尚有不小差距,但新研制的异面腔 DILAG 已取

得较大进展,发现了原来没有注意到的一些问题<sup>[3~5]</sup>。DILAG 磁灵敏度较大,所给数值约在数  $100(^{\circ})/(\text{h}\cdot\text{mT})$ <sup>[6~8]</sup>。文献[5]对 DILAG 零偏的磁灵敏度进行了系统的研究,发现 DILAG 磁灵敏度主要来自于传统光强差稳频方式的缺陷,采用工作点控制技术可以降低 DILAG 的磁灵敏度。本文针对两个异面腔 DILAG,分别采用传统光强差稳频方式和新设计的工作点控制装置进行了实验。

收稿日期:2009-04-07;收到修改稿日期:2009-05-15

作者简介:汪之国(1982—),男,博士研究生,主要从事四频差动激光陀螺方面的研究。E-mail: maxborn@163.com

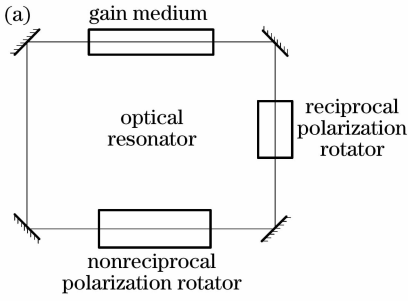
导师简介:龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子学等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com(通信联系人)

## 2 四频差动激光陀螺磁灵敏度与工作点控制

### 2.1 原理

DILAG 的结构和工作模式频谱分布如图 1 所示<sup>[9~11]</sup>。DILAG 由环形谐振腔、增益介质、互易旋光器和非互易旋光器构成。互易旋光器使左旋偏振(LCP)模式和右旋偏振(RCP)模式产生频率分裂



$\nu_R$ , 非互易旋光器使同偏振模式产生频率分裂  $\nu_F$ , 结果腔内有 4 个圆偏振行波模运行。当外界角速度输入为  $\nu_{in}$  时, 顺时针(CW)模式向低频位移  $K_S \nu_{in}/2$ ,  $K_S$  为 DILAG 的几何比例因子, 逆时针(CCW)模式向高频位移  $K_S \nu_{in}/2$ 。分别测量左旋对模和右旋对模的拍频, 然后进行差动即得正比于输入角速度的输出

$$\nu_{out} = 2K_S \nu_{in}. \quad (1)$$

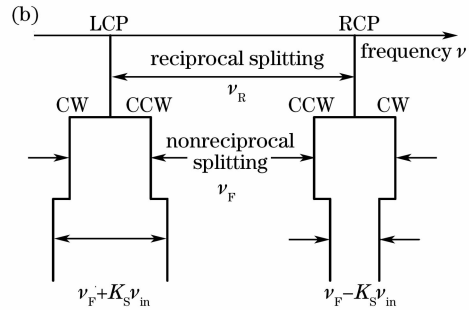


图 1 DILAG 原理图(a)及其频谱(b)

Fig. 1 Schematic (a) and frequency spectrum (b) of DILAG

### 2.2 磁灵敏度的物理机理

(1)式是 DILAG 的理想传递函数, 实际上由于增益介质的色散作用, DILAG 的输出拍频含有与增益、工作点、损耗等有关的零漂项。在纵向磁场作用下 DILAG 输出频差可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\nu_{out} = 2(1 + \bar{A})K_S \nu_{in} + (A_L - A_R)\nu_F + (A_L - A_R)\nu_Z - \nu_L - \nu_{dl}, \quad (2)$$

式中  $A_L, A_R$  分别为左、右旋陀螺的相对比例因子修正项,  $\bar{A} = (A_L + A_R)/2$ ,  $\nu_Z$  为纵向塞曼分裂频率,  $\nu_L$  为朗缪尔零漂项,  $\nu_{dl}$  为差损零漂项<sup>[6]</sup>。

由(2)式可知, 纵向磁场通过左、右旋陀螺相对比例因子修正不等导致零漂  $\Delta\nu_B$

$$\Delta\nu_B = (A_L - A_R)\nu_Z, \quad (3)$$

由(3)式可知, 消除 DILAG 磁灵敏度的方法是使  $A_L - A_R = 0$ 。

$A_L$  和  $A_R$  都是工作点(DILAG 的 4 个模平均频率与增益曲线峰值频率之差)的函数, DILAG 通常采用光强差稳频方式稳定  $A_L$  和  $A_R$  以避免工作点变动。但传统的光强差稳频以表观光强差为稳频依据, 所选工作点带有很大随机性, 使  $A_L - A_R = 0$  的可能性很小, 导致磁灵敏度较大<sup>[5]</sup>。

### 2.3 工作点控制原理

工作点控制的核心是时刻使  $A_L - A_R = 0$  以消除磁灵敏度。磁场导致的零漂为

$$\Delta\nu_B = K_B \Delta A \cdot B, \quad (4)$$

式中  $K_B$  为常量<sup>[5]</sup>,  $\Delta A = A_L - A_R$ ,  $B$  为纵向磁感应

强度。

若给 DILAG 施加纵向交流磁场

$$B = B_m \cos(2\pi f_m t), \quad (5)$$

式中  $B_m$  和  $f_m$  分别为交流磁场的幅度和频率,  $t$  为时间, DILAG 差频中将会出现  $K_B \Delta A \cdot B_m \cos(2\pi f_m t)$ , 只要  $f_m$  足够大, 就不会影响 DILAG 的感测信号, 本文取  $f_m = 500$  Hz。然后采取相敏检波技术, 将  $K_B \Delta A \cdot B_m$  提取出来用于调节工作点直至  $\Delta A = 0$ , 即本文所说的工作点控制原理。与光强差稳频相比, 工作点控制以  $\Delta A$  是否为 0 为依据, 因此消除了纵向磁场导致的零漂。

## 3 磁灵敏度测试

### 3.1 测试方法

为了保证磁灵敏度测试精度, 首先将 DILAG 预热 2 h, 零偏值为平均每次 100 s, 并采用高精度计数电路消除量化误差<sup>[12]</sup>。磁场发生器为一亥姆霍兹线圈, 通过调节流过线圈的电流大小来改变磁感应强度, 磁感应强度与线圈电流的比例系数为 0.0006 mT/mA。图 2 给出了实验所用参考坐标系。通过 DILAG 的磁感应强度变化范围约为 0 ~ 0.06 mT, 之所以未取太强的磁场是因为实际上激光陀螺仪都会进行磁屏蔽, 激光陀螺所受的磁感应强度变化不会太大。分别测试磁场沿  $x, y$  和  $z$  轴 3 个方向上的磁灵敏度, 每次将亥姆霍兹线圈电流以步长 25 mA 从 0 mA 调节到 100 mA, 在每个电流下

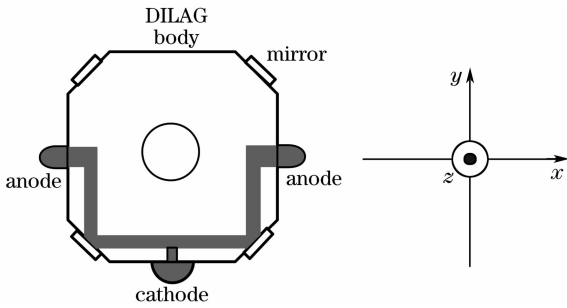


图2 DILAG及磁灵敏度测试参考坐标系示意图  
Fig. 2 DILAG and coordinate for measurement of magnetic sensitivity

测一个零偏值,采用线性拟合求出磁灵敏度。

### 3.2 测试结果

1号DILAG的测试结果如图3,4所示。图3(a)~(c)是采用传统光强差稳频方式时磁场方向分别沿 $x, y$ 和 $z$ 轴时的零偏(已扣除常值零偏)随磁感应强度的变化曲线。图4(a)~(c)是采用工作点控制时磁场方向分别沿 $x, y$ 和 $z$ 轴时的零偏随磁感应强度的变化曲线。线性拟合得到磁场沿 $x, y$ 和 $z$ 轴时的磁灵敏度,如表1所示。

对另一个异面腔DILAG 2的磁灵敏度所测结果如图5,6和表2所示。

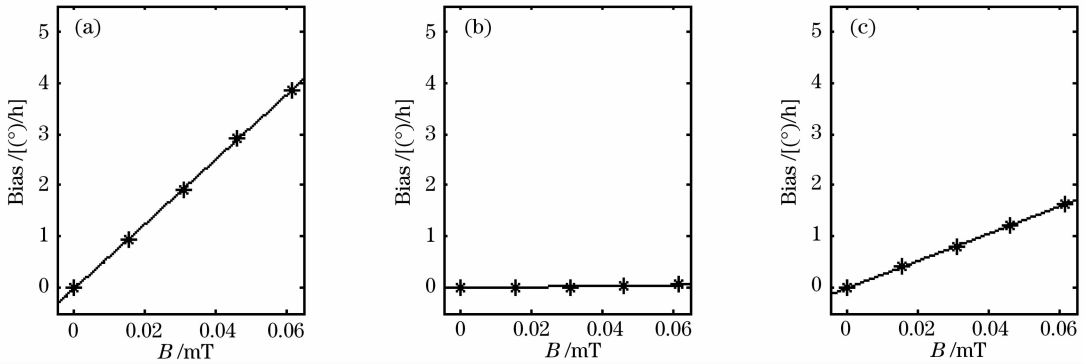


图3 采用光强差稳频时DILAG 1零偏随磁感应强度的变化曲线

(a) 磁场沿 $x$ 方向;(b) 磁场沿 $y$ 方向;(c) 磁场沿 $z$ 方向

Fig. 3 Bias of DILAG 1 versus magnetic induction with frequency stabilization by using light intensity comparison

(a) magnetic field in  $x$  direction; (b) magnetic field in  $y$  direction; (c) magnetic field in  $z$  direction

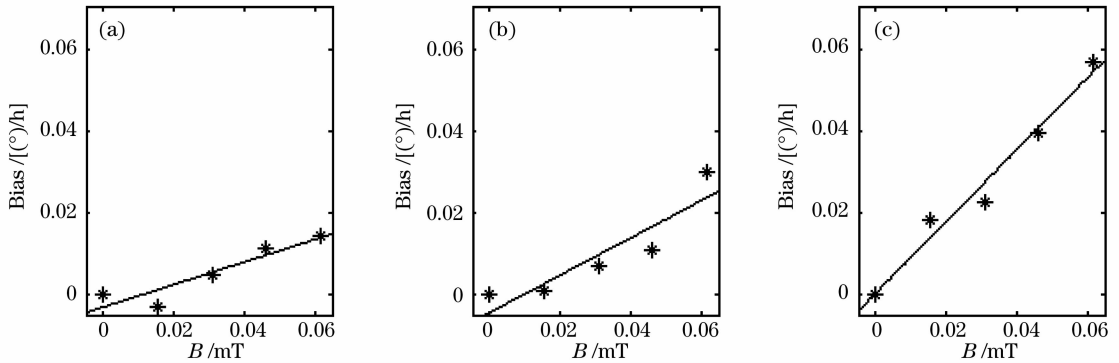


图4 采用工作点控制时DILAG 1零偏随磁感应强度的变化曲线

(a) 磁场沿 $x$ 方向;(b) 磁场沿 $y$ 方向;(c) 磁场沿 $z$ 方向

Fig. 4 Bias of DILAG 1 versus magnetic induction with operating point control

(a) magnetic field in  $x$  direction; (b) magnetic field in  $y$  direction; (c) magnetic field in  $z$  direction

表1 DILAG 1磁灵敏度测试结果

Table 1 Test results of magnetic sensitivity for DILAG 1

Magnetic field direction	$x$	$y$	$z$
Magnetic sensitivity with conventional frequency stabilization method / [°)/(h · mT)]	62.73	0.90	26.38
Relative error / %	0.2	7.8	0.2
Magnetic sensitivity with operating point control method / [°)/(h · mT)]	0.27	0.45	0.87
Relative error / %	18.5	22.2	8.1

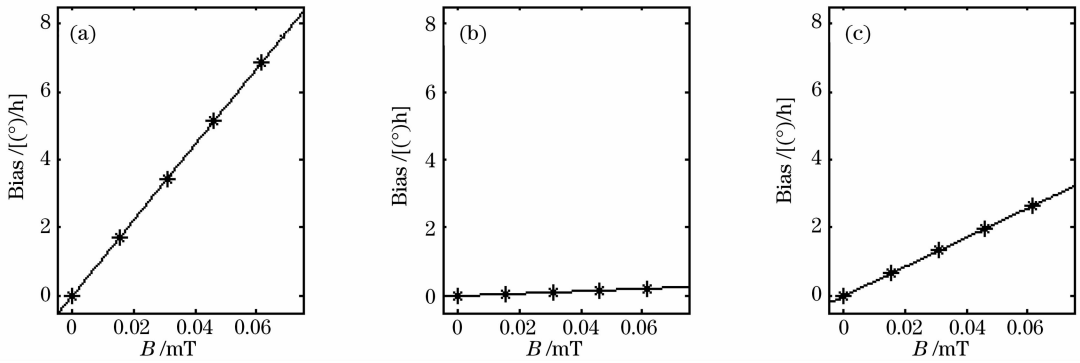


图 5 采用光强差稳频时 DILAG 2 零偏随磁感应强度的变化曲线

(a) 磁场沿  $x$  方向; (b) 磁场沿  $y$  方向; (c) 磁场沿  $z$  方向

Fig. 5 Bias of DILAG 2 versus magnetic induction with frequency stabilization by using light intensity comparison

(a) magnetic field in  $x$  direction; (b) magnetic field in  $y$  direction; (c) magnetic field in  $z$  direction

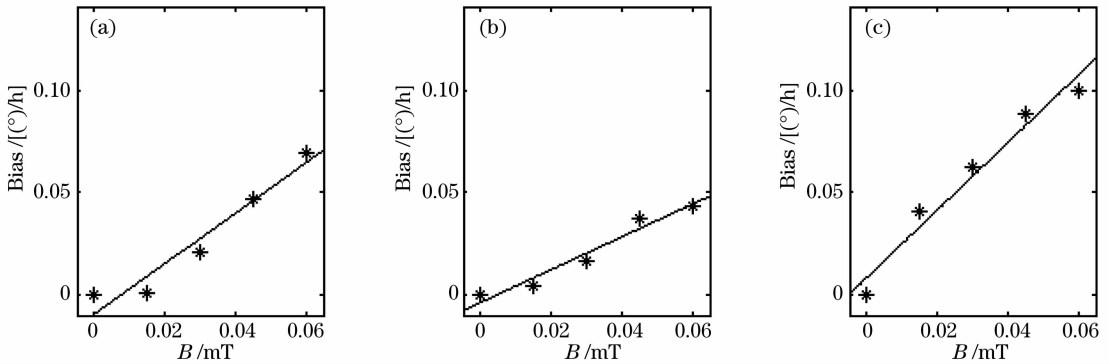


图 6 采用工作点控制时 DILAG 2 零偏随磁感应强度的变化曲线

(a) 磁场沿  $x$  方向; (b) 磁场沿  $y$  方向; (c) 磁场沿  $z$  方向

Fig. 6 Bias of DILAG 2 versus magnetic induction with operating point control

(a) magnetic field in  $x$  direction; (b) magnetic field in  $y$  direction; (c) magnetic field in  $z$  direction

表 2 DILAG 2 磁灵敏度测试结果

Table 2 Test results of magnetic sensitivity for DILAG 2

Magnetic field direction	$x$	$y$	$z$
Magnetic sensitivity with conventional frequency stabilization method / [°]/(h · mT)]	111.25	3.54	43.06
Relative error / %	0.2	3.1	0.3
Magnetic sensitivity with operating point control method / [°]/(h · mT)]	1.23	0.80	1.64
Relative error / %	12.2	10.0	9.8

### 3.3 实验结果分析

由实验结果可以得到:

1) 采用光强差稳频时磁灵敏度最大的方向为  $x$  轴方向,磁灵敏度最小的方向为  $y$  轴方向。该现象可以用纵向塞曼效应来解释<sup>[5]</sup>:沿光束传播方向的纵向磁场对 DILAG 磁灵敏度的影响最大;增益管在  $x$  轴的投影最大,因此磁灵敏度也最大;磁场沿  $y$  轴时,两部分增益管中光束传播方向相反,磁场的影响被抵消,磁灵敏度最小;异面腔 DILAG 的光路不在一个平面内,增益管沿  $z$  轴具有不小的分量,磁灵敏度居中。

2) 采用工作点控制时磁灵敏度降低了约 2 个数量级, $z$  轴方向磁灵敏度最大, $x$  和  $y$  轴方向的磁灵敏度相差不多。可以认为横向磁场对 DILAG 的磁灵敏度起主要作用。由图 1 可知,当磁场方向沿  $x$  或  $y$  轴时,横磁场作用的增益区长度基本是相同的,而当磁场方向沿  $z$  轴时,横磁场在增益区上的作用长度是  $x$  和  $y$  方向的增益区长度之和,因此  $x$  和  $y$  轴的磁灵敏度基本相同,而  $z$  轴的磁灵敏度约为前两者之和。实验结果也表明  $x$  和  $y$  轴磁灵敏度基本相同, $z$  轴的磁灵敏度约为前两者之和。但异面腔 DILAG 的非平面结构导致磁场的  $x$ ,  $y$  和  $z$  方

向不可能与 DILAG 的光路方向平行, 导致  $z$  轴的磁灵敏度与  $x$  和  $y$  轴的磁灵敏度之和稍有差别。

3) 从数据拟合曲线看, DILAG 1 的实验误差比 DILAG 2 的误差要小, 这是因为 DILAG 1 零偏较为稳定, 随机噪声小。总体来看, 两个陀螺实验结果的误差都较小, 实验结果是可信的。导致实验误差的主要因素有: 测试过程中室温会有所变化, 随机游走导致的角度噪声也有一些影响, 在磁灵敏度较小时相对误差的影响较为明显。

横磁场对零偏的影响机理可能是当腔内行波具有椭圆度<sup>[13,14]</sup>时横磁场导致的非互易性<sup>[15]</sup>。目前尚未发现横磁场导致 DILAG 零漂的物理机理的研究报道, 可能因在纵向磁场的影响占主要地位的情况下, 横磁场的影响可忽略, 因此没有引起注意。

## 4 结 论

比较了采用传统光强差稳频和新型工作点控制技术时的 DILAG 的磁灵敏度差异, 发现使用圆偏振光的激光陀螺磁灵敏度未必大, 电子学装置的设计是决定其磁灵敏度的关键因素。对同一个 DILAG, 与采用光强差稳频相比, 采用工作点控制技术使 DILAG 的磁灵敏度降低近 2 个数量级, 说明光强差稳频方式具有较大的缺点。两个 DILAG 的磁灵敏度分别优于  $0.9$  和  $1.6(^{\circ})/(\text{h} \cdot \text{mT})$ , 只要采用磁屏蔽盒进行 100 倍的屏蔽, 就分别优于  $0.01$  和  $0.02(^{\circ})/(\text{h} \cdot \text{mT})$ 。理论上通过工作点控制技术可以消除纵向磁场导致的磁灵敏度, 但横向磁场还会导致一些残余磁灵敏度, 机理有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock™ laser gyro [C]. *Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference*, Keystone, CO, 1989. 235~241
- 2 LN-100LG launch and reentry GPS inertial navigation system. <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln100g/index.html>
- 3 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
- 4 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

- 5 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Magnetic sensitivity and optimal operating point of four-frequency differential laser gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11):3202~3206  
汪之国, 龙兴武, 王飞等. 四频差动激光陀螺的磁敏感性与最佳工作点 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(11):3202~3206
- 6 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 187~189  
姜亚南. 环形激光陀螺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 187~189
- 7 Zhao Zhengxin. Research on the influence of environmental magnetic field on the precision of differential ring laser gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006  
赵政鑫. 环境磁场对四频差动激光陀螺精度影响的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006
- 8 Chen Linfeng, Han Zonghu, Chen Yong *et al.*. Study on characteristic of ring laser gyroscope sensitive to magnetic fields [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):974~976  
陈林峰, 韩宗虎, 陈勇等. 激光陀螺磁灵敏度特性研究 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(7):974~976
- 9 C. H. Volk, S. C. Gillespie, J. G. Mark *et al.*. Multioscillator Ring Laser Gyroscopes and Their Applications [A]. D. Loukianov, R. Rodloff, H. Sorg *et al.*. *Optical Gyros and Their Application* [C]. RTO AGARDograph 339, 1999. 4.1~4.26
- 10 Hermann Statz, Terry A. Dorschner, Michael Holtz *et al.*. The Multioscillator Ring Laser Gyroscope [M]. Amsterdam: North Holland Press, 1985. 229~332
- 11 Weng W. Chow, Jarel B. Hambenne, Thomas J. Hutchings *et al.*. Multioscillator laser gyros [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(9):918~936
- 12 Wang Zhiguo, Wang Fei, Hu Shaomin. High resolution countering circuit for differential laser gyros based on FPGA [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1):30~31  
汪之国, 王飞, 胡绍民. 基于 FPGA 的四频激光陀螺高分辨率计数电路 [J]. *激光杂志*, 2009, **30**(1):30~31
- 13 Yang Zaifu, Yuan Xiaodong, Zhang Bin *et al.*. The loss difference in differential laser gyro [J]. *Chinese 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
- 14 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
- 15 T. V. Zhavoronkova, I. I. Savel'ev, A. M. Khromykh. Theory of nonreciprocal effects in a ring laser subjected to a transverse magnetic field [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1983, **13**(12):1550~1555