

文章编号: 0253-2239(2009)11-3202-05

四频差动激光陀螺的磁敏感性与最佳工作点

汪之国 龙兴武 王飞 袁杰

(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)的磁敏感性,研究了工作点对磁敏感性的影响。根据理论分析,磁敏感性主要来自于左、右旋陀螺相对比例因子修正的不对称,它与工作点有关,在最佳工作点下为零。通过在 DILAG 增益管上缠绕线圈产生轴向磁场,调节附着于腔平移镜上的压电换能器的驱动电压改变工作点,得到磁灵敏度随工作点的变化规律。结果表明,DILAG 在最佳工作点下对外界磁场不敏感,且在每个工作区存在唯一的最佳工作点。DILAG 工作在最佳工作点可以使外界干扰在差动中消除,因而有利于提高其性能。为了保证 DILAG 工作在最佳工作点,必须改变传统的光强差稳频方式。

关键词 测量;四频差动激光陀螺;磁敏感性;工作点;零漂

中图分类号 V241.5+58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3202

Magnetic Sensitivity and Optimal Operating Point of Four-Frequency Differential Laser Gyroscope

Wang Zhiguo Long Xingwu Wang Fei Yuan Jie

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

Abstract In order to reduce magnetic sensitivity of four-frequency differential laser gyro (DILAG), effect of operating point on magnetic sensitivity was investigated. According to theoretical analysis, magnetic sensitivity arises mainly from unequal relative scale factor corrections of left and right circularly polarized gyros. The DILAG, however, is insensitive to magnetic field when operating at the optimal point. Axial magnetic field was produced by winding coil around gain tube, and operating point was changed by adjusting voltage of piezoelectric transducer affixed to cavity mirror in our experiment. As a result, the curve of magnetic sensitivity versus operating point was obtained. The results showed that DILAG was insensitive to magnetic field at the optimal operating point, which uniquely existed within operating area. Environmental disturbance would be reduced when DILAG was operating at the optimal point. This helped to improve DILAG performance. The conventional frequency stabilization method using light intensity comparison should be changed so as to make sure DILAG operating at the optimal point.

Key words measurement; four-frequency differential laser gyro; magnetic sensitivity; operating point; zero drift

1 引言

激光陀螺^[1~14]与传统机械陀螺相比有许多突出的优点,如耐冲击、动态范围大等,在国内外已经得到广泛应用。在克服激光陀螺闭锁问题上,机械抖动和四频差动是最成功的两种方案。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,比例因子误差更小,不会产生圆锥误差和划桨误差^[1]。美国 Northrop Grumman 公司所产的 DILAG (Zero-lock™ Laser Gyro) 广泛应用于西方现役装备,如 F-22 战斗机、C-130 运输机等^[12]。目前我国的 DILAG 水平与国外尚有不小差距,为了提高温度稳定性,研制了异面腔 DILAG^[14]。

收稿日期: 2008-12-18; 收到修改稿日期: 2009-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(60608002)资助课题。

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,博士,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(通信联系人)

磁敏感性是激光陀螺仪的一项重要指标,使用圆偏振光的 DILAG 对外界磁场更为敏感,地磁场就可以导致数十度每小时的零漂^[6]。为了降低磁场的影响,通常要对 DILAG 进行多层严格的磁屏蔽,这就增加了系统的体积、重量和成本,屏蔽效果也未必理想。

DILAG 的磁敏感性来自于左、右旋陀螺相对比例因子修正的不等,通过选择工作点降低 DILAG 的磁敏感性是一种较为理想的方法。文献[9]对 DILAG 的工作点进行了初步研究,提出了一种寻找最佳工作点使左、右旋陀螺比例因子修正相等的方法,但是该方法的精度不太理想。C. H. Volk 等^[2]提到了选择最佳工作点降低磁敏感性的方法,但是没有发现较为系统的研究报告。本文利用 DILAG 的拍频公式,研究了 DILAG 磁敏感性的物理机制。据此建立了一套磁敏感性研究装置,通过人为控制工作点和磁场的变化,得到了磁敏感性随工作点的变化规律。结果表明选择最佳工作点可以消除 DILAG 的磁敏感性,且最佳工作点是唯一的。最佳工作点使左、右旋陀螺具有相等的相对比例因子修正,使外界干扰在差动中消除,因而可以提高 DILAG 的精度和抗磁干扰能力。

2 理论分析

2.1 DILAG 的工作原理

图 1 是 DILAG 的结构示意图,它由 4 个反射镜组成环形腔,腔内置有增益介质(gain medium)、互易旋光器(reciprocal polarization rotator)和非互易旋光器(nonreciprocal polarization rotator)。DILAG 的本征偏振模是圆偏振模,互易旋光器消除了左旋本征模和右旋本征模的简并,产生互易频率分裂;非互易旋光器使同偏振的相向行波产生频率分裂远离锁区,DILAG 的 4 个模式在增益曲线上的分布如图 2 所示^[2, 3]。

当输入角速率为 ν_{in} 时,左、右旋对模的拍频分别为

$$\nu_{LCP} = \nu_F + S\nu_{in}, \quad (1)$$

$$\nu_{RCP} = \nu_F - S\nu_{in}, \quad (2)$$

式中 ν_F 为非互易偏频, S 为 DILAG 的几何比例因子。将左旋对模和右旋对模的拍频差动即得 DILAG 的输出

$$\nu_{out} = \nu_{LCP} - \nu_{RCP} = 2S\nu_{in}, \quad (3)$$

于是非互易偏频在输出信号中被差动掉,得到的灵敏度是单陀螺的 2 倍。

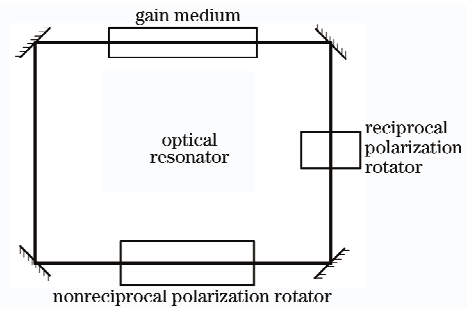


图 1 DILAG 的原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of DILAG

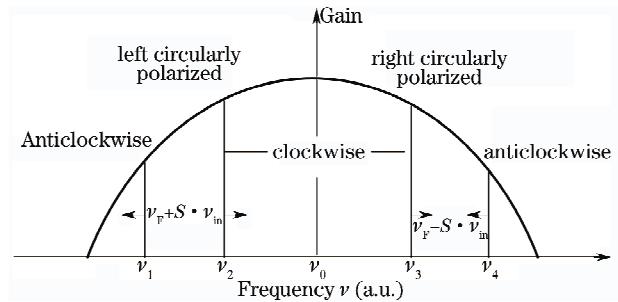


图 2 DILAG 的模式分布

Fig. 2 Modes spectrum of DILAG

由于 DILAG 的 4 个模式的频率间隔基本恒定,本文工作点是指 DILAG 的 4 个模式振荡频率的平均值。在图 2 中,只要 DILAG 的 4 个模式的增益大于损耗就可以输出测量信息,工作点位于工作区内。由行波激光器的振荡条件可知,工作点将随腔长变化在增益曲线的频率轴上滑动。工作点在工作区内不同位置时 DILAG 的性能是不同的,这主要是因为增益介质的色散效应导致左、右旋陀螺的相对比例因子修正随工作点变化,在工作区内使 DILAG 性能最好的工作点称为最佳工作点。

2.2 磁敏感性的物理机制

在 DILAG 中工作的是圆偏振光,当磁场纵向通过增益管时,由于塞曼(Zeeman)效应导致激光增益介质的能级产生分裂^[6, 15]。偏振旋转方向和磁场方向相同的光为正旋光,反之为负旋光。正旋光的增益曲线向高频方向移动,负旋光的增益曲线向低频方向移动。记没有磁场时增益曲线的中心频率为 ν_0 ,则在纵向磁场作用下正、负旋光增益曲线的中心频率分别为

$$\nu_P = \nu_0 + \nu_Z/2,$$

$$\nu_N = \nu_0 - \nu_Z/2,$$

式中 $\nu_Z = K_Z H$ 为纵向 Zeeman 效应导致的增益曲线频率分裂量, $K_Z = 3.64 \times 10^{10} \text{ Hz/T}^{[15]}$, H 为纵向磁场强度。

(3)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、损耗等有关的项。在纵向磁场作用下 DILAG 输出拍频可以表示为^[6]

$$\nu_{\text{DLG}} = 2(1 + \bar{A})S\nu_{\text{in}} + (A_L - A_R)\nu_F + (A_L - A_R)\nu_Z - 4KV\bar{A} - 2\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)(\gamma_2 - \gamma_1), \quad (4)$$

式中 A_L, A_R 分别为左、右旋陀螺的相对比例因子修正项, $\bar{A} = (A_L + A_R)/2$, $4KV\bar{A}$ 项为朗缪尔 (Langmuir) 零漂项, $2\left(\frac{\rho - \tau}{\beta - \theta}\right)(\gamma_2 - \gamma_1)$ 为差损零漂项。

由(4)式可知, 由于左、右旋陀螺相对比例因子修正不等, 非互易偏频和纵向磁场都导致零漂, 其中纵向磁场导致的零漂(磁致零偏)为

$$\nu_{\text{bias}} = K_Z(A_L - A_R)H. \quad (5)$$

磁场也会通过增益介质和磁光玻璃的法拉第效应使非互易分裂频率 ν_F 变化, 但该变化量远小于 Zeeman 分裂量 ν_Z , 例如 DILAG 的法拉第室中 0.1 T 的永磁环产生的非互易偏频不到 1 MHz, 而 0.1 T 磁场导致的 Zeeman 分裂将有 3640 MHz。所以 DILAG 相对比例因子修正不等是磁敏感性的主要根源, 磁灵敏度 $\alpha = K_Z(A_L - A_R)$ 。

2.3 磁敏感性与工作点的关系

四频差动的本质是使两个陀螺共用同一个谐振腔, 利用这两个陀螺参量的一致性, 通过差动将外界干扰消除, 因而两个陀螺的对称性决定了 DILAG 的精度。相对比例因子修正是表征其对称性的一个参量, 使 $A_L = A_R$ 不仅可以消除磁敏感性, 也有助于

减小其他干扰通过相对比例因子修正不对称导致的零漂。

由于 K_Z 为常量, 所以磁敏感性只与 $A_L - A_R$ 有关, 而 $A_L - A_R$ 是诸多因素比如工作点、增损比、温度等的多元函数。由于增益曲线的不对称、稳频原理的限制, 一般 $A_L \neq A_R$, 但是可以通过改变工作点来使 $A_L = A_R$, 下面分析磁敏感性与工作点的关系。

2.3.1 不同工作点下零偏随磁场的变化曲线

将(4)式表示为

$$\nu_{\text{DLG}} = K_Z(A_L - A_R)H + \nu_{\text{other}}, \quad (6)$$

式中 ν_{other} 为除了磁致零偏之外的零偏。当 DILAG 保持静止时, ν_{other} 可以看成常量。所以在固定的工作点下, 磁致零偏随磁场线性变化, 斜率为 $K_Z(A_L - A_R)$ 。通过改变工作点可以做出簇零偏随磁场的变化曲线, 当 $A_L - A_R = 0$ 时该曲线的斜率为 0, 即对磁场不敏感。

2.3.2 磁敏感性扫描曲线

由(5)式可知, 如果给增益管施加一轴向交流调制磁场 $H_{\text{AC}} = H_m \cos(2\pi f_m t)$, 则磁致零漂为

$$\nu_{\text{bias}} = K_Z(A_L - A_R)(H_{\text{DC}} + H_{\text{AC}}), \quad (7)$$

式中 H_{DC} 表示环境的直流磁场。

其中的交流调制项为

$$\nu_{\text{Bm}} = K_Z H_m (A_L - A_R) \cos(2\pi f_m t), \quad (8)$$

即在 DILAG 输出信号中出现与调制磁场同频率的交流信号。

利用相敏检波原理, 用一个与交流磁场同频率的参考信号 $\nu_R = K_R \cos(2\pi f_m t + \varphi)$ 与 DILAG 的输出 ν_{DLG} 相乘得到

$$\nu_R \nu_{\text{DLG}} = K_R \cos(2\pi f_m t + \varphi) K_Z H_m (A_L - A_R) \cos(2\pi f_m t) + K_R \nu_{\text{other}} \cos(2\pi f_m t + \varphi) = \frac{1}{2} K_R K_Z H_m (A_L - A_R) \cos\varphi + \frac{1}{2} K_R K_Z H_m (A_L - A_R) \cos(4\pi f_m t + \varphi) + K_R \nu_{\text{other}} \cos(2\pi f_m t + \varphi), \quad (9)$$

将(9)式所表示的信号进行低通滤波滤除交流成分, 只剩下直流成分 $\frac{1}{2} K_R K_Z H_m (A_L - A_R) \cos\varphi$, 该直流量与 $A_L - A_R$ 成正比, 所以可以作为判断 $A_L - A_R$ 大小的判据。

3 实验装置与结果

3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。所用 DILAG 是新研制的异面腔四频差动激光陀螺^[4], DILAG 的输出拍频

由信号处理电路 (Signal processing) 和测试电路 (test circuit) 得到, 通过串口输入到计算机。通过在增益管上缠绕线圈产生轴向磁场, 推拉附着于腔平移镜上的压电换能器 (PZT) 改变工作点。计算机通过 National Instruments 公司的 PCI6221 多功能数据采集卡的模拟输入 (AI) 通道 AI0 和 AI1 分别采集 DILAG 的左旋和右旋光强信号, 通过采集卡所带双通道数模转换器 (D/A converter) 输出两路控制模拟电压, 模拟输出 (AO) 通道 AO0 输入到 PZT 驱动器用来控制工作点, AO1 通道输入到电

压/电流变换器(V/I converter)控制磁场,控制算法由软件编程实现。实验所用 PZT 驱动器是一个 40 倍的直流高压放大电路,电压/电流变换器是一个 30 mA/V 的线性电压/电流转换电路。

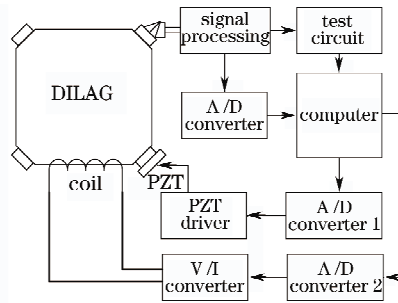


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.2 实验结果

3.2.1 不同工作点下零偏随磁场的变化曲线

在工作点 1(OP1)下,使 AO1 输出 0~4 V 的随时间线性增大的模拟电压,同时对 DILAG 的输出零偏进行采样,采样时间为 1 s,得到一条零偏-扫描电流曲线,然后用同样的方法得到在工作点 2 和 3 下的零偏-扫描电流曲线。结果如图 4 所示。

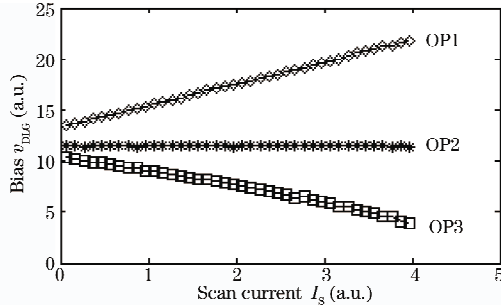


图 4 不同工作点下零偏随磁场的变化曲线

Fig. 4 DILAG bias versus magnetic field for different operating point

由图 4 可知,在固定的工作点下零偏随磁场线性变化,不同的工作点具有不同的斜率,即不同的磁敏感性,这与理论分析一致。在工作点 2 下,零偏不随轴向磁场变化,所以工作点 2 是最佳工作点。

3.2.2 DILAG 磁敏感性扫描实验结果

通过数据采集卡的 AO1 通道输出峰值为 2 V。频率为 50 Hz 的交流信号,经过电压/电流转换进入线圈产生交流磁场,使用我们研制的高精度高速采样电路^[13],以 2500 Hz 的频率对 DILAG 的零偏进行采样。然后利用数字相敏检波技术,得到与磁灵敏度成正比的检波信号。同时通过 AO0 通道输出 0~4.2 V 的线性驱动电压进行扫描,由 AI0 和 AI1 通道采集 DILAG 的左旋光强 I_{LCP} 和右旋光强 I_{RCP} ,

于是同时得到光强和磁灵敏度扫描曲线。实验结果如图 5~8 所示。

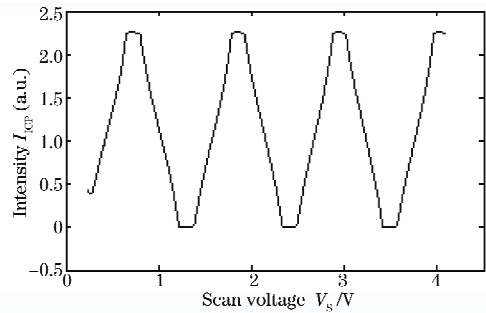


图 5 左旋光强扫描曲线

Fig. 5 Scanning curve of LCP light intensity

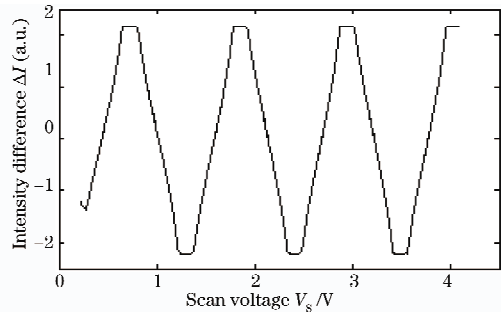


图 6 光强差扫描曲线

Fig. 6 Scanning curve of intensity difference

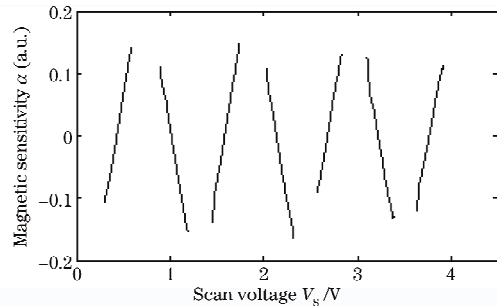


图 7 磁灵敏度扫描曲线

Fig. 7 Scanning curve of magnetic sensitivity

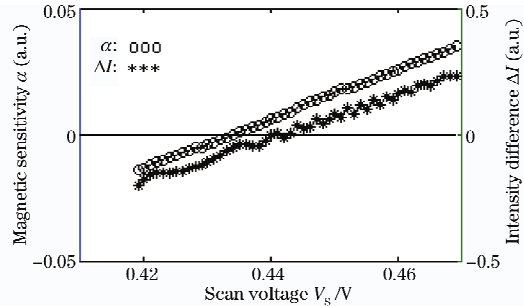


图 8 磁敏感性与光强差扫描曲线对比图

Fig. 8 Comparison of magnetic sensitivity and light intensity difference scanning curve

图 5 是左旋光强 I_{LCP} 的扫描曲线,图 6 是光强差 $\Delta I = I_{LCP} - I_{RCP}$ 的扫描曲线,图 7 是磁灵敏度扫

描曲线,图中断续部分来自于左旋模式或者右旋模式增益太小而不能起振的区域,图 8 是将一个工作区内的磁灵敏度扫描曲线和光强差扫描曲线做在一幅图中的对比图。

由图 5、图 6 和图 7 的比较可知,在每个工作区内,都有一个磁灵敏度为 0 的最佳工作点,表明了 DILAG 正常工作时最佳工作点的存在性和唯一性。由图 8 可知光强差为 0 的工作点和最佳工作点一般是不一致的,这就是传统光强差稳频的重大缺点。当扫描曲线经过最佳工作点时,磁灵敏度符号取反,因而磁灵敏度可以作为稳定工作点的误差信号。有关这方面的进一步讨论以及如何应用,也就是异面腔 DILAG 的稳频技术以及最佳工作点的控制问题等。

4 结 论

DILAG 的磁敏感性主要来自于左、右旋陀螺比例因子的不对称,它与工作点有关。在最佳工作点下,左、右旋陀螺比例因子相等,不但 DILAG 对磁场不敏感,同时其它一些外界干扰也能够很好地消除。实验表明最佳工作点存在且是唯一的,这为最佳工作点的选择提供了根本依据。传统的光强差稳频无法保证 DILAG 工作在最佳工作点下,所以必须要使用新的稳频技术。与磁屏蔽相比,通过控制工作点来降低 DILAG 的磁敏感性,可以减小系统体积、节省成本,而且还可以减小其它一些干扰,对研制高精度 DILAG 具有较大意义。

参 考 文 献

- M. Fernandez, B. Ebner, N. Dahlen. Zero-lock™ laser gyro [C]. *Guidance and control 1989; Proceedings of the Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference*, Keystone, CO, 1989; 235~241
- 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
- W. W. Chow, J. B. Hambenne, T. J. Hutchings *et al.*. multioscillator laser gyros [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**(9): 918~936
- 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
- H. Stutz, T. A. Dorschner, M. Holtz *et al.*. *The Multioscillator Ring Laser Gyroscope* [M]. M. L. Stutz, M. Bass. Laser handbook, vol. 4, North Holland Press, 1985. 229~332
- 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
- Jin Shilong, Li Xiaohong, Huang Yun *et al.*. A new grooved mirror of the ring laser gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 259~263
- 金世龙,李小红,黄 云等. 激光陀螺新型槽片 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 259~263
- Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 409~414
- 金世龙,龙兴武,王 飞等. 激光陀螺克服高、低温冲击的技术研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 409~414
- 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
- Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro [J]. *Chinese 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
- 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]. *Chinese 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**(4): 481~484
- <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln100lg/index.html>
- 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
- Jin Shilong, Long Xingwu, Li Xiaohong *et al.*. Research on new type control mirror of light path and optical path length for ring laser gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 562~566
- 金世龙,龙兴武,李晓红等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 562~566
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Yirong *et al.*. *Laser Principle (Fourth Edition)* [M]. Beijing: Press of Defense Technology, 2000. 217
- 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. 217