

文章编号:1004-4213(2011)11-1682-4

增损比对激光陀螺影响的研究

马仰华,雷建军,徐宏财,韩宗虎

(中航工业西安飞行自动控制研究所,西安 710065)

摘要:光强调谐曲线是激光陀螺工作模式选取和稳频的依据,而陀螺的增损比将直接决定光强调谐曲线的形式.为了提高陀螺准确度,本文对双同位素综合展宽情况下二频激光陀螺出光带宽与增损比之间的关系进行了分析计算,结果表明,激光陀螺的出光带宽与增损比之间存在单调递增的变化关系.数值仿真了不同增损比情况下陀螺的光强调谐曲线,结果表明,根据激光陀螺出光带宽与相邻纵横间隔相对大小的不同,其光强调谐曲线的形状可分三种,仿真与试验结果非常吻合.分析并试验验证了增损比选取不当对激光陀螺工程化应用可能产生的影响,给出了不同腔长情况下激光陀螺增损比合理选取的参考值,即应保证陀螺的出光带宽约等于其相邻纵横间隔.

关键词:光强调谐曲线;增损比;激光陀螺;综合展宽;出光带宽

中图分类号:U666.12+3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114011.1682

0 引言

作为新一代惯性传感器,基于 Sagnac 效应^[1-2]的激光陀螺是激光捷联惯性导航系统的核心部件,在航空、航天等领域获得越来越广泛的应用^[3].

闭锁、比例因子和零漂为激光陀螺的三大误差因素,而多模耦合零漂是由多模振荡通过增益介质的反常色散所导致的一种零漂误差^[4].因此,为提高激光陀螺准确度,在减小陀螺锁区^[5-7]的同时,还必须保证陀螺稳频工作在单模状态.

通常,采用小孔光阑选模法实现对高阶横模的抑制,从而保证陀螺工作在基横模状态^[8-9].对于工作基横模,不同纵模的损耗基本相同,因此实现单纵模状态运转的基本方法是控制出光带宽.激光陀螺工作模式选取和稳频的依据为其光强调谐曲线,而光强调谐曲线的形式取决于出光带宽和相邻纵模间隔之间的相对大小.激光陀螺的出光带宽由其增损比决定,通过控制增损比可获取合适的光强调谐曲线,从而保证陀螺稳频工作在单纵模状态.因此,激光陀螺中增损比的合理选取,对提高陀螺的工程化应用水平具有重要意义.

本文密切结合实际应用,对不同增损比情况下的光强调谐曲线及其对陀螺工程化应用的影响进行深入的理论分析、数值仿真和试验验证.给出了不同腔长情况下激光陀螺增损比合理选取的参考值,即应保证陀螺的出光带宽约等于其相邻纵横间隔.

1 增损比对光强调谐曲线的影响

1.1 出光带宽与增损比的关系

对于气体激光器,其工作物质的加宽类型主要是由碰撞引起的均匀加宽和多普勒非均匀加宽.均匀加宽的线型为洛仑兹线型,而非均匀加宽的线型为高斯线型.当均匀加宽宽度和非均匀加宽宽度可比拟时,增益线型应按综合加宽线型进行处理^[10-11].

在激光陀螺的实际应用中,为了避开峰值增益附近的剧烈模竞争和获取对称的增益曲线,通常采用一定比例的双同位素 Ne^{20} 、 Ne^{22} 的混合气体作为增益介质.

双同位素情况下,综合展宽的线型函数可表示为^[11]

$$G(\xi) = FG_0W_R(\xi, \eta) + \sqrt{1.1}(1-F) \cdot G_0W_R(\xi', \eta') \quad (1)$$

式中: F 为 Ne^{20} 所占的百分比; G_0 为单同位素 Ne^{20} 的峰值增益; $\xi = (\nu - \nu_0)/ku$, $\xi' = 1.1^{1/2}(\xi - \xi_0')$ 分别为 Ne^{20} 和 Ne^{22} 的频率参量,其中 $\xi_0' = (\nu_0' - \nu_0)/ku$; $ku = (2K_b T/m)^{1/2}/\lambda$ 为 Ne^{20} 非均匀展宽的半宽度, K_b 为波尔兹曼常量, T 为绝对温度, m 为 Ne^{20} 原子质量, λ 为波长; ν_0 、 ν_0' 分别为 Ne^{20} 和 Ne^{22} 增益曲线的中心频率,且有 $\nu_0' - \nu_0 = 875 \text{ MHz}$; $\eta = \gamma_0/ku$, $\eta' = 1.1^{1/2}\eta$ 分别为 Ne^{20} 和 Ne^{22} 均匀展宽与非均匀展宽之比; γ_0 为双同位素的均匀展宽,其经验公式为 $\gamma_0 = (57P + 10) \text{ MHz}$, 其中 P 为腔内总充气压

基金项目:航空基金(No. 2006ZD18011)资助

第一作者:马仰华(1980-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为环形激光陀螺技术. Email:mgyyy@eyou.com

收稿日期:2011-06-01;修回日期:2011-08-15

(Torr); $W_R(\xi, \eta)$ 的定义为

$$W_R(\xi, \eta) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\eta e^{-t^2}}{(\xi-t)^2 + \eta^2} dt \quad (2)$$

令 G_m 表示 $G(\xi)$ 的最大值, δ 表示总损耗, 定义增损比 k_0 为

$$k_0 = G_m / \delta \quad (3)$$

按照出光带宽 $\Delta\nu_{out}$ 的物理含义, 满足式 (4) 的频率范围即为激光器的出光带宽, 如图 1.

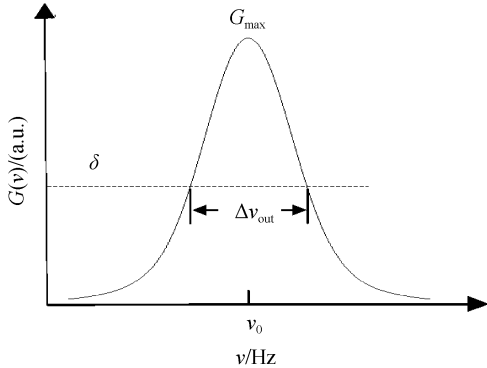


图 1 激光陀螺的出光带宽

Fig. 1 Output bandwidth of the ring laser gyro

$$G(\xi) - k_0 G_{max} \geq 0 \quad (4)$$

以 $F=0.53, T=300\text{ K}, P=4\text{ Torr}$ 为例, 对式 (4) 进行数值求解, 可得到相应情况下激光陀螺出光带宽 $\Delta\nu_{out}$ 与其增损比 k_0 的关系, 如图 2.

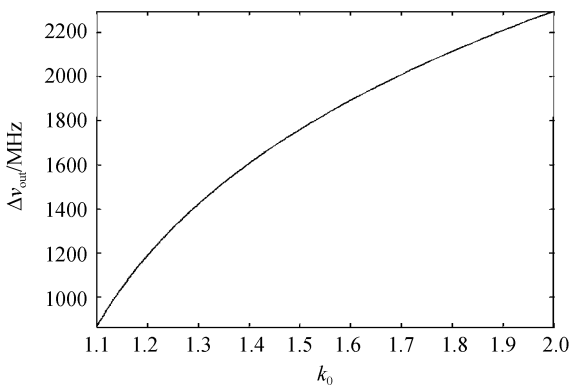


图 2 出光带宽与增损比的关系曲线

Fig. 2 Dependence of the output bandwidth on the gain-to-loss ratio

由图 2 可以看出, 激光陀螺的出光带宽与增损比之间存在单调递增的变化关系, 这正是通过增损比可以控制其出光带宽的依据所在.

1.2 数值仿真

激光陀螺的光强调谐曲线是指其光强 I 随谐振腔腔长 L 变化的曲线.

激光陀螺中, 以非均匀加宽为主, 在小信号运转状态下, 各纵模之间相互独立, 总输出功率应为各纵模输出功率之和^[11]. 为简便起见, 利用出光带宽内所有纵模的净增益之和来表征相应的总光强.

在上述讨论的基础上, 利用 Matlab 进行编程,

对不同增损比情况下激光陀螺的光强调谐曲线进行数值仿真. 仿真结果表明, 根据激光陀螺出光带宽 $\Delta\nu_{out}$ 与相邻纵模间隔 $\Delta\nu_q$ 相对大小的不同, 其光强调谐曲线的形式大致可分为图 3 所示的三种典型情况.

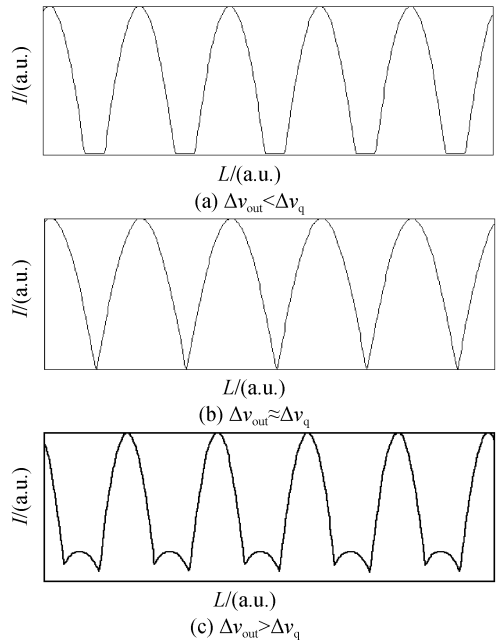


图 3 光强调谐曲线的仿真

Fig. 3 Simulation of the intensity tuning curves

1.3 试验验证

激光陀螺内的增益水平不仅与其谐振腔参量、充气参量有关, 而且与工作电流亦密切相关. 以某型激光陀螺为例, 在损耗一定的情况下, 通过改变其工作电流 i 来获取不同的增损比, 以实现出光带宽的调节. 在不同工作电流下, 对样本陀螺进行扫模试验^[12], 便可得到相应的光强调谐曲线.

试验装置示意如图 4. 激光陀螺谐振腔由腔体和反射镜 M_1, M_2, M_3, M_4 组成; M_1, M_2 为腔长控制镜, 与腔长调节元件 C_1, C_2 一起构成腔长调节单元, 在外置电压 U_{PZT} 驱动下, 可以实现腔长 L 的调节; M_3, M_4 为输出镜, M_4 输出的光信号由光电管

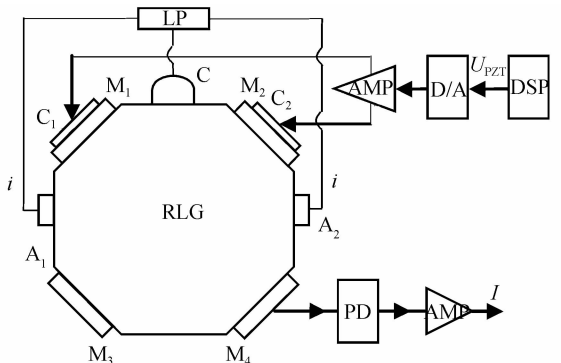


图 4 光强调谐曲线试验装置

Fig. 4 Experimental setup for the intensity tuning curves

PD 转化为光电流信号,经相应采样放大电路后,转化为陀螺的光强电信号 I ;利用激光电源 LP,可实现陀螺工作电流 i 的调节; A_1 、 A_2 为阳极,C 为阴极.

腔长 L 与 U_{PZT} 间存在如式(5)的关系

$$L = L_0 + \lambda_K \cdot U_{PZT} \quad (5)$$

式中, L_0 为激光器的初始腔长, λ_K 为激光器腔长调节单元的传递系数.

图 5 给出了几种典型形式的光强调谐曲线试验结果.可以看出,当 i 较小时(图 5(a)),激光器的出光带宽小于其相邻纵模间隔,从而导致扫模过程中将会出现无光区,这与图 3(a)相对应;当 i 较大时(图 5(c)),出光带宽将大于相邻纵模间隔,从而导致在扫模过程中的某些位置将会出现多纵模状态(如图 5(c)中的 B 点),这与图 3(c)相对应;当 i 取值在某特定值附近时,激光陀螺的出光带宽与其相邻纵模间隔大致相等,整个扫模过程中既不会出现无光区,也不会出现多纵模(图 5(b)).

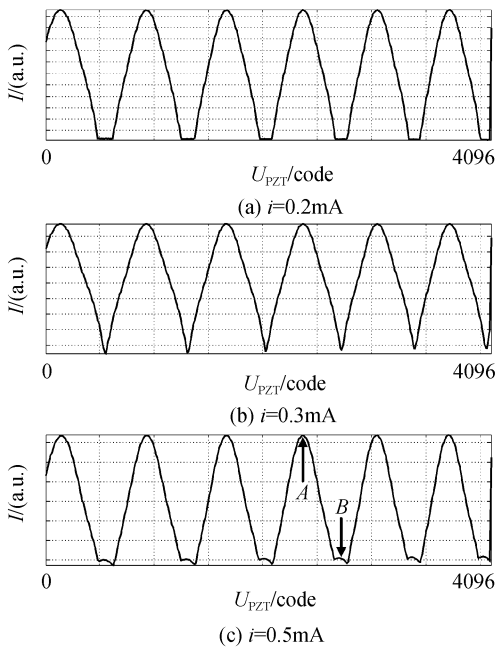


图 5 光强调谐曲线的试验验证
Fig. 5 Experimental demonstration of the intensity tuning curves

2 光强调谐曲线对陀螺性能的影响

在激光陀螺应用中,一般不允许无光区现象的出现.因此,图 5(a)的情形在激光陀螺中是不可取的.在图 5(c)的情形下,陀螺工作模式既有可能被选至大模状态(如 A 点),也有可能被选至小模状态(如 B 点).而一旦工作模式被选至 B 点,陀螺将以双纵模状态运转,这将对陀螺的性能产生不利的影响.

图 6 给出了某型号激光陀螺工作模式分别设置

为图 5(c)中 A 点和 B 点两种状态下陀螺性能的对比.

由图 6 可以看出,同工作在 A 点状态相比,陀螺工作在 B 点状态时,其性能将下降半个数量级.

由此可见,为提高陀螺的工程化应用水平,应合理控制增损比,以获取合适的光强调谐曲线,保证陀螺工作在单模状态.

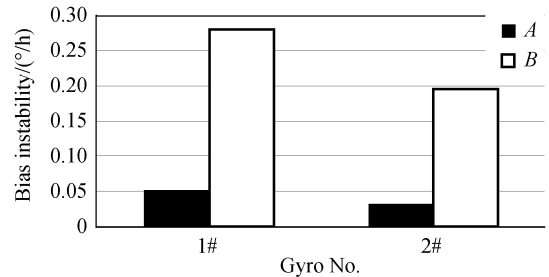


图 6 工作模式状态对激光陀螺性能的影响
Fig. 6 Influence of the operation state on the performance of RLG

3 增损比的合理选取

根据前文分析,为获取合适的光强调谐曲线,应合理控制和选取激光陀螺的增损比,使其出光带宽与相邻纵模间隔大致相当.腔长不同的激光陀螺,其相邻纵模间隔亦不同,从而对应着不同的增损比的理想取值.对于腔长为 L 的激光陀螺,其相邻纵模间隔 $\Delta\nu_q = c/L$,其中, c 表示光速.

基于上述讨论,结合图 2 中的计算结果,在图 7 中给出了激光陀螺增损比理想取值与腔长的关系曲线.

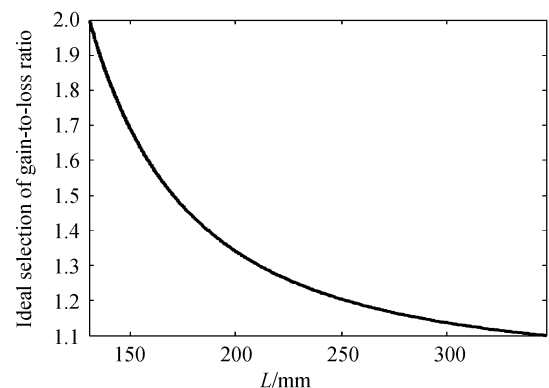


图 7 不同腔长下增损比的理想取值
Fig. 7 Ideal selection of the gain-to-loss ratio versus resonator length

4 结论

本文数值计算了双同位素综合展宽情况下激光陀螺出光带宽与增损比之间的关系,并且对出光带宽与相邻纵模间隔相对大小不同情况下的激光陀螺的光强调谐曲线进行了数值仿真,仿真与试验结果十分吻合.分析了增损比选取不当对激光陀螺的工

程化应用可能产生的影响,并得到了试验验证.给出了激光陀螺环形激光器增损比合理选取的依据,对激光陀螺设计具有重要的指导意义.

参考文献

- [1] POST E J. Sagnac effect[J]. *Review of Modern Physics*, 1967, **39**(2): 475-493.
- [2] CHOW W W, GEA-BANACLOCHE J, PEDROTTI L M, *et al.* The ring laser gyro[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, **57**(1): 61-104.
- [3] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4): 332-339.
- [4] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 72-106.
- [5] HAN Zong-hu, CHEN Lin-feng, CHEN Yong, *et al.* The study of laser gyro lock-in characteristic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 807-810.
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): 807-810.
- [6] LIU Yuan-zheng, WANG Jing-xian, MA Yang-hua, *et al.* Lock-in zone controll ing for ring laser gyro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 781-784.
刘元正, 王京献, 马仰华, 等. 激光陀螺锁区最小化控制技术[J]. 光子学报, 2010, **39**(5): 781-784.
- [7] HUANG Lin-lin, XIE Yuan-ping, ZHANG Bin. Optical dither in laser gyro and its influence on lock-in[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(6): 333-335.
黄林林, 谢元平, 张斌. 激光陀螺中的光学抖动及其对锁区的影响分析[J]. 应用光学, 2010, **31**(6): 333-335.
- [8] KOGELNIK H, LI T. Laser beams and resonator [C]. *IEEE*, 1966, **54**: 1312-1329.
- [9] HAN Zong-hu, FENG Pei-de. Influence analyses of resonator parameters on laser gyro performance[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2002, **10**(2): 32-38.
韩宗虎, 冯培德. 谐振腔参量对激光陀螺性能影响的分析[J]. 中国惯性技术学报, 2002, **10**(2): 32-38.
- [10] 卢亚雄, 余学才, 张晓霞. 激光物理[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 56-65.
- [11] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 147-173.
- [12] YANG Heng. Research on the frequency stabilization and method of mode sweep of ring laser gyro(RLG)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999: 32-49.
杨恒. 激光陀螺频率稳定性与扫模方法的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1999: 32-49.

Influence of Gain-to-loss Ratio on the Performance of Ring Laser Gyro

MA Yang-hua, LEI Jian-jun, XU Hong-cai, HAN Zong-hu

(The Flight Automatic Control Research Institute of AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: The intensity tuning profile is the base for mode selection and frequency stabilization in ring laser gyro (RLG), which is decided directly by the gain-to-loss ratio (GTLR). To improve the performance of the RLG, the dependence of the output bandwidth on the GTLR for two-mode RLG with the gain medium making of the mixture of Neon isotopes (Ne20 and Ne22) is numerically analyzed, with the consideration of comprehensive broadening (both homogeneous broadening and inhomogeneous broadening). It is shown that the output bandwidth increases monotonically with the GTLR of RLG. The intensity tuning profiles with different GTLRs of RLG are simulated and the results show that the intensity tuning profiles can be divided into three typical forms, according to the relative value of the output bandwidth to the adjacent longitudinal mode spacing, exhibiting great agreement with the experimental ones. The potential influence of improper GTLR selection on the application performance of RLG is analyzed and experimentally demonstrated. The ideal selection of GTLR for RLG is proposed, that is, the output bandwidth of the RLG should be approximately equal to its adjacent longitudinal mode spacing.

Key words: Intensity tuning profile; Gain-to-loss ratio; Ring laser gyro; Comprehensive broadening; Output bandwidth