

文章编号:1004-4213(2010)05-0781-4

激光陀螺锁区最小化控制技术*

刘元正,王京献,马仰华,兰佩锋

(中航工业西安飞行自动控制研究所,西安 710065)

摘要:通过分析激光陀螺锁区的形成原因,给出了锁区最小化控制的基本原理.由激光陀螺谐振腔相向传播光束的输出特性,说明了常规锁区控制方案存在的缺点.从激光陀螺基本方程推导出锁区误差判别信号,提出了基于拍频信号和腔长信号迭加大的高信噪比锁区控制方案,对交变偏频和常值偏频激光陀螺均适用.运用该项技术,实现了对某型激光陀螺的全温范围内的锁区最小化控制.

关键词:激光陀螺;锁区控制;背向散射;高信噪比

中图分类号:U666.12+3;TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0781

0 引言

激光陀螺作为新一代惯性传感器,是惯性导航系统、航姿系统的核心部件,在航空、航天等领域获得越来越广泛的应用^[1].当沿敏感轴有角速度输入时,激光陀螺环形谐振腔内相向传播光束的频率差与输入转速成正比.当输入转速低于某临界值时,相向传播光束的振荡频率相同,频率差值为零,不能敏感输入转速,该输入转速称为锁区.锁区是激光陀螺的主要误差源之一^[2].激光陀螺的发展历程与克服锁区的影响密切相关,锁区的大小直接制约着陀螺性能的提高,降低反射镜基片表面粗糙度、减少反射镜的背向散射可以减少陀螺锁区,但所需成本高昂.通过锁区控制技术,使得激光陀螺工作点锁区最小化,实现最优性能,是减少锁区的有效途径.

1 锁区的形成机理

锁区的产生源于激光陀螺谐振腔内部相向传播光束之间的能量耦合,引起能量耦合的原因与谐振腔损耗、增益介质损耗、前向和背向散射相关,本质为能量从一束光束散射到另一光束.普遍认为,光束在反射镜表面反射时的背向散射对能量耦合具有重要贡献,是导致锁区的主要原因^[2-3].

如图 1, A_1 、 A_2 为谐振腔内部相向传播光束的幅值,背向散射光束 W_1 、 W_2 与主光束 A_{10} 、 A_{20} 相位差分别为 β_1 、 β_2 .由于背向散射的影响,迭加后合成的相向行波 A_1 、 A_2 之间的相位差为

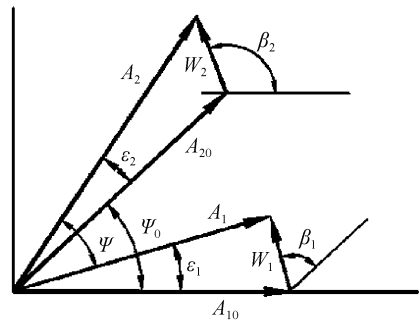


图 1 锁区矢量示意图

Fig. 1 Vector diagram for the description of lock-in

$$\psi = \psi_0 - \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (1)$$

相位修正量 ϵ_1 、 ϵ_2 由背向散射系数 $r_1 = W_1/A_{20}$, $r_2 = W_2/A_{10}$ 决定,式中

$$\epsilon_1 \approx r_1 \sin(\psi + \beta_1) \quad (2)$$

$$\epsilon_2 \approx -r_2 \sin(\psi - \beta_2) \quad (3)$$

由此得到相位差表达式

$$\psi = \psi_0 - E_0 \sin(\psi + \rho) \quad (4)$$

式(4)中

$$E_0 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2)}$$

$$\rho = \arctan \left(\frac{r_2 \sin \beta_2 - r_1 \sin \beta_1}{r_2 \cos \beta_2 + r_1 \cos \beta_1} \right)$$

光束在谐振腔传播一周时相位 ψ 的变化量为

$$\Delta\psi/\Delta t = \dot{\psi} = \Omega - (c/L)E_0 \sin(\psi + \rho) \quad (5)$$

式中 $\Delta t = L/c$, 得到锁区表达式

$$\Omega_L = E_0(c/L) \quad (6)$$

当 $r_1 = r_2$ 时,式(6)可简化为

$$\Omega_L = 2r(c/L) \cos[(\beta_1 + \beta_2)/2] \quad (7)$$

由式(7)可以看出,激光陀螺锁区的大小与背向散射系数、背向散射相位相关,为简单起见,图 1 只给出了两束背向散射光束间的耦合情况,实际情况为激光陀螺谐振腔内顺、逆时针传播光束在各个反

* 航空科学基金(06ZD18011)资助

Tel:029-88399814

Email:guangxb@facri.com

收稿日期:2009-10-28

修回日期:2009-12-24

射镜反射面上背向散射能量的矢量迭加,设定反射镜表面散射均匀,通过微调光束在反射镜表面的反射点,使得相位 β_1, β_2 的和接近 180° ,可以得到锁区最小值,这使得锁区最小化控制成为可能。

2 锁区最小化控制

激光陀螺装配成成品后,难以直接获取背向散射光强矢量信号,必须利用可表征背向散射光强的可探测信号作为锁区判别信号.国内外对激光陀螺的锁区特性、锁区特点进行了大量研究,提出了多谱勒频移、量子阱反射镜等克服锁区影响的方案,大多仅有理论意义,工程上难以精确实现,其中以激光陀螺谐振腔相向传播光束的交流分量作为反馈信号进行锁区控制是一种可行方案^[3-7]。

2.1 常规控制方案

谐振腔内相向传播的光束强度具有

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + A_{m1} \sin(\omega_b t + \theta_1) \\ I_2 = I_0 + A_{m2} \sin(\omega_b t + \theta_2) \end{cases} \quad (8)$$

ω_b 为拍频,即输入角速率大于锁区时的频率差; A_m 为背向散射耦合光强在频率 ω_b 上产生的幅值; I_0 为稳态光强。

谐振腔内顺、逆时针传播光束的交流光强可表示为

$$I_{cw} = \frac{2DI_0c}{L(\omega^2 + \omega_a^2)^{1/2}} \cos(\omega_b t + T_2 + P_D) + \frac{2HI_0c}{L(\omega^2 + \omega_g^2)^{1/2}} \sin(\omega_b t + T_1 + P_H) \quad (9)$$

$$I_{ccw} = \frac{2DI_0c}{L(\omega^2 + \omega_a^2)^{1/2}} \cos(\omega_b t + T_2 + P_D) - \frac{2HI_0c}{L(\omega^2 + \omega_g^2)^{1/2}} \sin(\omega_b t + T_1 + P_H) \quad (10)$$

式中, L 为腔长, D, H 为与散射损耗相关的常量, P_D, P_H 为与散射损耗相关的相位常值, c 为真空中的光速, T_1 为 ω 和 ω_g 的函数, T_2 为 ω 和 ω_a 的函数, $\omega = K\Omega, \omega_g = ac(\beta - \theta)/L(\beta + \theta), \omega_a = ac/L$ 。

由式(9)、(10)可以看出,激光陀螺谐振腔顺、逆时针传播光束的交流光强中包含背向散射信号,交流光强的幅值取决于背向散射的大小,可以表征锁区信号的大小。

当输入角速率 ω 为零时,交流光强幅值最大,对于交变偏频的激光陀螺,可以将陀螺锁区附近的交流光强信号作为锁区反馈控制信号,通过控制光束在反射镜表面的反射点,实现交流光强信号最小^[3]。

当 ω 较大,远离锁区时,交流光强幅值大幅衰减,对于常值偏频陀螺,交流光强信号与噪音比值较小,幅值 A_m 要比在锁区附近时小的多,难以准确检

测,用常规方案无法实现锁区控制。

2.2 高信噪比控制方案

要实现交变偏频、常值偏频激光陀螺均适用的锁区控制方案,必须寻求新的控制技术.激光陀螺基本输出方程为

$$\dot{I}_1/I_1 = \alpha - \beta I_1 - \theta I_2 - 2r_2 \sqrt{I_2/I_1} \cos(\psi + \epsilon_2) \quad (11)$$

$$\dot{I}_2/I_2 = \alpha - \beta I_2 - \theta I_1 - 2r_1 \sqrt{I_1/I_2} \cos(\psi - \epsilon_1) \quad (12)$$

$$\psi = \Omega + r_2 \sqrt{I_2/I_1} \sin(\psi + \epsilon_2) + r_1 \sqrt{I_1/I_2} \cdot \sin(\psi - \epsilon_1) \quad (13)$$

式中: I_1, I_2 为相向传播光束的光强; α 代表增益与损耗之差; β 代表自饱和效应; θ 代表互饱和效应。

由式(11)和式(12)得到

$$D = \dot{I}_1/I_1 + \dot{I}_2/I_2 = 2\alpha - (\theta + \beta)(I_1 + I_2) - 2r_2 \sqrt{I_2/I_1} \cos(\psi + \epsilon_2) - 2r_1 \sqrt{I_1/I_2} \cdot \cos(\psi - \epsilon_1) \quad (14)$$

假设 $I_1 \approx I_2$,耦合光强产生的调制远小于光强的稳态值,对式(14)进行拉普拉斯变换

$$D = 2 \left(\frac{\beta + \theta}{S + \alpha} - 1 \right) (R_2 \angle \epsilon_2 + R_1 \angle -\epsilon_1) \quad (15)$$

式中 $R_1 \angle -\epsilon_1, R_2 \angle \epsilon_2$ 分别表示 $r_2 \cos(\psi + \epsilon_2), r_1 \cos(\psi - \epsilon_1)$ 拉普拉斯变换的幅值和角度; S 为标准拉普拉斯变量。

对式(13)进行同样变换,得到

$$\dot{\psi} = \Omega + R_2 \angle \epsilon_2 - \frac{\pi}{2} + R_1 \angle -\epsilon_1 - \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

分析表明:参量 ψ 中包含背向散射相位复矢量误差项,减小该误差项的矢量和将有利于减少陀螺输出误差.式(15)中的 D 包含了两个相位复矢量和, D 的幅值与两个相位复矢量和直接相关,而相位复矢量和是式(16)中的误差项.因而表达式 D 可以用作锁区信号表征项。

在 $I_1 = I_2 = I$ 的情况下,式(14)、(15)经过低通滤波变换,得到锁区信号表征项 D 的显性表达式

$$D = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)/I = \left\{ \frac{\omega_b^2}{2I} [A_{m1}^2 + A_{m2}^2 + A_{m1}A_{m2} \cos(\theta_1 - \theta_2)] \right\}^{1/2} \quad (17)$$

由式(9)、(10)知,幅值 A_{m1}, A_{m2} 的大小取决于输入角速率 ω ,需提高幅值的 A_{m1}, A_{m2} 信噪比,消除角速率 ω 对锁区信号检测的影响。

激光陀螺输出的拍频信号

$$\begin{cases} I_S = K \sin(\omega_b t + \varphi) \\ I_C = K \cos(\omega_b t + \varphi) \end{cases} \quad (18)$$

对谐振腔相向传播光强 I_1, I_2 的交流分量和拍频输出信号 I_S, I_C 进行交叉乘积,并进行低通滤波,变换为

$$D_0 = [(I_1 I_S + I_1 I_C)^2 + (I_2 I_S + I_2 I_C)^2]^{1/2} = \frac{K}{2} [A_{m1}^2 + A_{m2}^2 + A_{m1}^2 \sin 2(\theta_1 - \varphi) + A_{m2}^2 \sin 2(\theta_2 - \varphi)]^{1/2} \quad (19)$$

可以看出, D_0 与 D 相似, 均为背向散射光强的函数, 因而 D_0 可直接用于锁区误差表征信号, D_0 通过三角函数变换产生, 具有较高的信噪比, 并且 D_0 与陀螺拍频频率无关, 对常值偏频、交变偏频激光陀螺均适用。

高信噪比锁区最小化控制原理框图如图 2, 激光陀螺谐振腔由腔体和反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 组成, 谐振腔内运行的顺、逆时针光束 I_{CW} 、 I_{CCW} 经反射

镜 M_3 输出放大为 I_1 、 I_2 ; 同时, I_{CW} 、 I_{CCW} 经反射镜 M_4 及其上安装的合光棱镜、光电接收器形成拍频信号, 并经锁相放大后输出 I_S 、 I_C ; I_1 分别与 I_S 、 I_C 做乘法运算并经低通滤波得到 I_{F1} 、 I_{F2} , I_2 分别与 I_S 、 I_C 做乘法运算并经低通滤波得到 I_{F3} 、 I_{F4} ; I_{F1} 与 I_{F3} 相加后平方得到 I_3 , I_{F2} 与 I_{F4} 相加后平方得到 I_4 ; I_3 、 I_4 取和值并开方得到锁区控制信号 D_0 , 经调制解调后作为反馈控制信号施加到腔长控制反射镜 M_1 、 M_2 上, M_1 、 M_2 的驱动电压相位相差 180° , 二者位移方向相反, 以便进行锁区控制的同时, 不影响腔长控制回路(图中未给出), 保持谐振腔腔长恒定。

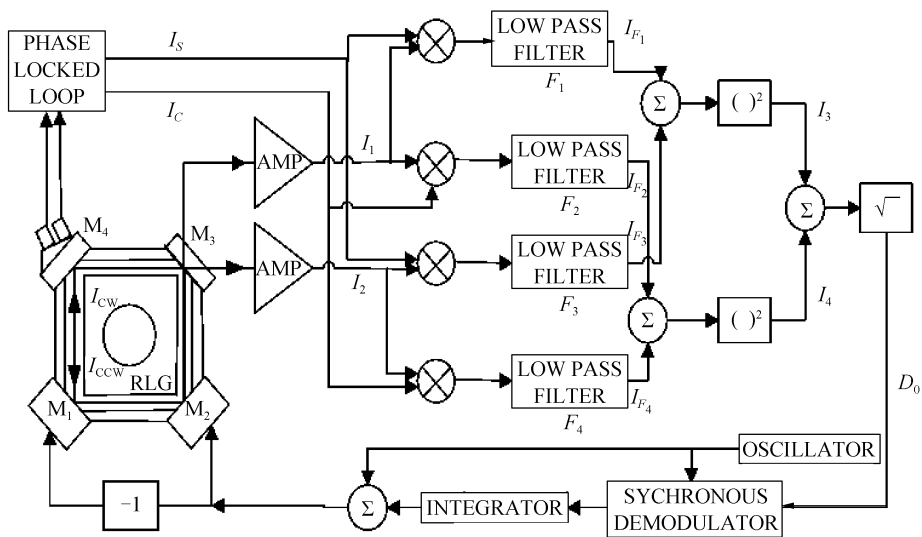


图 2 锁区最小化控制原理图
Fig. 2 Diagram for control of minimum lock-in

3 试验结果

对某型激光陀螺运用高信噪比锁区控制方案进行锁区最小化实时控制, 当腔长控制反射镜上压电陶瓷驱动电压从 $0 \sim 200$ V 单向递增, 扫描激光陀螺工作纵模时, 将锁区信号 D_0 转换成与背向散射信号相关的直流信号, 并经 A/D 转换送入数字处理器 DSP, 工作模扫描过程中同时采集腔长控制反射镜上压电陶瓷电压码和锁区信号码, 得到图 3 的锁

区信号扫描曲线, 其中锁区信号 A/D 测量码值的范围为 $0 \sim 32\ 767$, 对应的直流电压值为 $0 \sim 10$ V。

由图 3 可以看出, 工作纵模 P_1 、 P_3 、 P_5 为奇数模, 锁区信号的峰值较小, 作纵模 P_2 、 P_4 、 P_6 为偶数模, 锁区信号的峰值较大, 即锁区信号的大小与激光陀螺的工作模数之间存在周期性, 偶数模锁区信号大于奇数模锁区信号, 该结果与文献[8]的结论相一致, 表明高信噪比锁区控制技术可以准确获取背向散射光强信号。

采用高信噪比锁区控制后, 按 GJB2427-1995 激光陀螺仪测试方法的要求, 对某型激光陀螺在

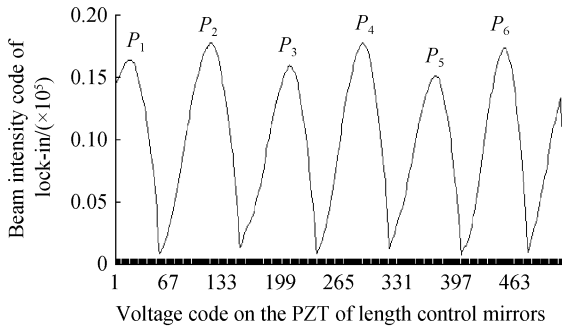


图 3 锁区扫模信号
Fig. 3 Lock-in signal from scanning laser gyro mode

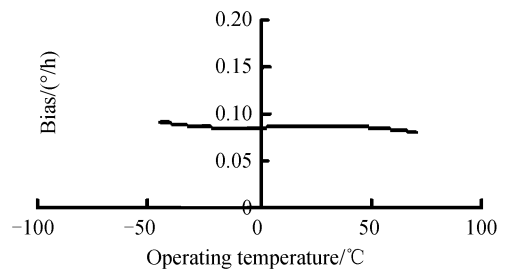


图 4 工作温度内零偏稳定性
Fig. 4 The bias stability in the operating temperature

-45~+70 °C全温工作范围内进行零偏重复性及稳定性测试,与采取锁区控制前相比,零偏重复性及稳定性可提高一倍,陀螺准确度达到 $0.01^{\circ}/\text{h}$,零偏重复性的试验曲线如图4.

4 结论

分析了激光陀螺锁区的成因,给出了锁区最小化控制的基本原理,通过调节光束在反射镜表面的反射位置,使得背向散射光强矢量和最小.由激光陀螺谐振腔相向传播光束的输出特性,说明了常规锁区控制方案仅在锁区附近锁区误差最大,远离锁区时,误差信号大幅衰减,难以探测.从激光陀螺方程推导出锁区误差判别信号,提出了基于拍频信号和腔长信号迭加大的高信噪比控制方案,运用该项技术,实现了对某型激光陀螺的全温范围内的锁区最小化控制,取得了较好的效果.高信噪比锁区控制方案克服了常规方案的缺点,对于交变偏频和常值偏频激光陀螺均适用,具有较好的应用前景.

参考文献

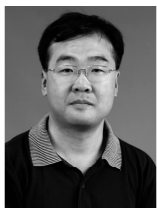
- [1] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4): 332-339.
- [2] XU Ya-jun, LIU Chang-hua, XU Zhi-yong. Dead band of laser gyro and rate bias control system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5): 37-39.
徐亚军, 刘长华, 徐智勇. 激光陀螺锁区及速率偏频控制系统 [J]. *光电工程*, 2003, **30**(5): 37-39.
- [3] GUO Chuang, WANG Jin-lin, Lü Hang-wei. Test system of frequency stabilization and lock stabilization control parameter for ring laser gyroscope [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(z1): 448-451.
郭创, 王金林, 吕航伟. 激光陀螺稳频稳锁区控制参量测试系统 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(z1): 448-451.
- [4] CHEN Lin-feng, YAN Ji-zhong, HAN Zong-hu, et al. Study on optimization of dither bias for ring laser gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1387-1390.
陈林峰, 严吉中, 韩宗虎, 等. 激光陀螺抖动偏频优化研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1387-1390.
- [5] YAO He-bao, HAN Zong-hu, CHEN Lin-feng, et al. Characteristics of the rate-valve value in the jittery deflection frequency laser gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1085-1087.
姚合宝, 韩宗虎, 陈林峰, 等. 抖动偏频激光陀螺速率阈值特性研究 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(9): 1085-1087.
- [6] HUTCHINGS T J, KANEGSBURG E, RUSCHE E W, et al. Apparatus and method for correcting ring laser gyroscope phase angle errors induced by lock-in: US, 5347359 [P]. 1994-09-13.
- [7] GUO Chuang, LI Jin-liang, WANG Jin-lin. Research on the parameter model of frequency stabilization and lock stabilization control system for ring laser gyro [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(z1): 153-156.
郭创, 李金梁, 王金林. 激光陀螺稳频稳锁区控制系统参量模型研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(z1): 153-156.
- [8] 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): 807-809.
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.

Lock-in Zone Controlling for Ring Laser Gyro

LIU Yuan-zheng, WANG Jing-xian, MA Yang-hua, LAN Pei-feng
(The Flight Automatic Control Research Institute of AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: The output characteristic of the traveling waves in the cavity is analyzed and it is found that the conventional lock-in control techniques have some disadvantages. The lock-in error discriminant signal is deduced from the equations for laser gyro. The high signal-to-noise ratio controlling means are implemented by the operation of beat frequency signal and cavity length signal. It is concluded that the approach is applicable to both constant biased and alternating biased laser gyro, and the the lock-in zone of laser gyro is precisely controlled in the operating temperature range.

Key words: Laser gyro; Lock-in control; Backscatter; High signal-to-noise ratio



LIU Yuan-zheng was born in 1975. He received the M. S. degree from Chinese Aeronautical Establishment. Now he is a researcher fellow and his research interests focus on ring laser gyroscope technology.