

# 无源谐振腔激光陀螺的背散射

肖贵退

(国防科技大学 208 研究室, 长沙 410073)

**提要** 从理论上证明了在闭环无源谐振腔激光陀螺中, 谐振腔的腔镜背散射不但会引起闭锁效应, 而且会引起模牵引效应。探讨了消除闭锁效应的根本方法。

**关键词** 背散射, 闭锁效应, 模牵引效应

## 1 引言

无源谐振腔激光陀螺是由外部光源沿顺时针和反时针方向向环形腔注入激光束, 通过测量顺时针和反时针谐振频率的频差来工作的。由于无源腔内没有增益介质, 因而不存在与增益介质有关的效应, 如郎缪尔流动效应、磁场敏感效应等。而且人们普遍认为无源谐振腔陀螺不存在有源谐振腔陀螺的闭锁效应<sup>[1]</sup>和模牵引效应<sup>[2]</sup>。

1984 年 M. Hereld 等人<sup>[3]</sup>尽管从理论上指出无源谐振腔激光陀螺中的背散射会导致闭锁效应这一后经实验证实<sup>[4]</sup>的现象, 但他们简单地把无源谐振腔激光陀螺中强迫顺时针和反时针光以谐振腔的本征频率振荡的外部电子系统的作用等同于有源谐振腔激光陀螺中的增益介质的作用, 把无源腔中由背散射产生的模耦合等同于有源腔中由增益介质产生的模耦合, 从而把从有源腔中得出的闭锁效应的结论应用于无源腔中, 从根本上并没有解决无源腔中的背散射是否会引引起闭锁效应的问题。

本文将根据无源腔闭环系统, 从理论上严格地推导出无源谐振腔激光陀螺中的腔镜背散射不但会引起闭锁效应, 而且会导致顺时针和反时针的模牵引效应<sup>[5]</sup>。另外, 还将从理论上分析解决闭锁效应的根本办法。

## 2 理论分析

无源谐振腔陀螺的工作原理如图 1 所示, 激光器的输出经分光后沿顺时针和反时针两相反方向注入环形谐振腔。在进入谐振腔之前每束光分别经过频移器(FS's)移频和位相调制器(PM's)调相, 光探测器(PD's)接收的谐振腔的透射光信号被解调后, 分别得到一衡量激光频率和谐振腔本征频率之差的误差信号, 此误差信号被用来控制 FS's, 校正输入激光频率。

当顺时针和反时针光束之间没有模耦合时, 根据 Sagnac 效应, 顺时针和反时针的谐振频率为:

$$\Omega_{\pm} = \Omega_0 \pm a/2 \quad (1)$$

式中  $\Omega_0$  为谐振腔静止时的谐振频率 (rad/s)。  $a$  为谐振腔以角速度  $\Omega_i$  (rad/s) 转动时, 顺时针和反时针的谐振频率差为:

$$a = \frac{8\pi A}{\lambda L} \Omega_i \quad (2)$$

式中  $L$  是谐振腔的周长,  $A$  是谐振腔所包围的面积,  $\lambda$  是光波长。

在无源谐振腔中尽管不存在有源介质引起的顺时针和反时针的模耦合, 却存在着由腔镜背散射引起的模耦合, 探测器接收的光信号不单是一个方向的透射光信号, 而是两个方向透射光信号的干涉。设顺时针和反时针的透射光强分别为  $I_+$  和  $I_-$ , 背反射系数分别为  $r_+$  和  $r_-$ , 则两探测器上的光信号分别为:

$$I_1 = I_+ + |r_-|^2 I_- + 2|r_-| \sqrt{I_+ I_-} \cos[\Phi_+(t)] \quad (3)$$

$$I_2 = I_- + |r_+|^2 I_+ + 2|r_+| \sqrt{I_+ I_-} \cos[\Phi_-(t)] \quad (4)$$

式中  $\Phi_{\pm}(t)$  为一方向的光与另一方向的背散射光之间的相位差。令两反射系数  $r_+$  和  $r_-$  的位相角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 则

$$\left. \begin{aligned} \Phi_+(t) &= -\Psi'(t) + \theta_2 \\ \Phi_-(t) &= \Psi'(t) + \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中  $\Psi'(t)$  为顺时针和反时针光的位相差。

当  $I_1$  信号被接收解调由电子反馈系统 (SERVO#1) 完全反馈并控制 FS#1 校正顺时针的激光频率,  $I_2$  信号被接收解调由电子反馈系统 (SERVO#2) 完全反馈并控制 FS#2 校正反时针的激光频率时, 假设顺时针和反时针具有相同的光强  $I$  和背散射系数  $|r|$ , 并忽略掉(3)和(4)式中的  $|r|^2$  项时, 顺时针和反时针的谐振频率分别为

$$\Omega_+(t) = \Omega_0 + \frac{a}{2} + \alpha \cos[\Phi_+(t)] \quad (6)$$

$$\Omega_-(t) = \Omega_0 - \frac{a}{2} + \alpha \cos[\Phi_-(t)] \quad (7)$$

式中  $\alpha$  为正比于反射系数  $|r|$  的频率系数 (rad/s), 令

$$\int_{-\infty}^t [\Omega_+(t') - \Omega_-(t')] dt' = \Psi'(t) + \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} = \Psi(t) \quad (8)$$

把(6)式与(7)式相减, 并可得谐振频率差

$$\dot{\Psi}(t) = a + \alpha \sin\left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) \cdot \sin[\Psi(t)] \quad (9)$$

令上式中  $\alpha \sin[(\theta_1 + \theta_2)/2] = b$ , 则(9)式等效于有源腔的闭锁等式<sup>[1]</sup>

$$\dot{\Psi}(t) = a + b \sin[\Psi(t)] \quad (10)$$

当  $|a| < |b|$  时, 无源谐振腔陀螺发生拍频锁定。锁区的大小除与背反射系数有关外, 还与电子反馈系统中滤波器的时间常数有关。无源腔与有源腔陀螺发生拍频锁定的原因是相同的, 即强

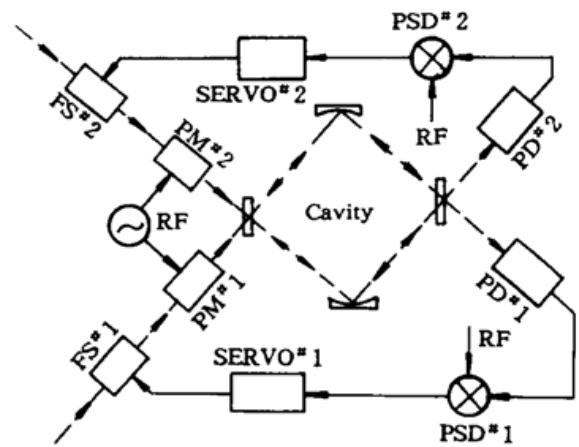


Fig. 1 Schematic sketch illustrating the principle for a passive ring resonator gyroscope

迫顺时针和反时针光在谐振腔的本征频率处振荡。只不过它们的方式不同罢了,有源腔是通过谐振腔内的增益介质,而无源腔是通过电子反馈系统,无源腔的闭锁与有源腔的闭锁还存在另一区别:有源腔陀螺的锁区在很大程度上取决于有源介质的物理性质,而无源腔陀螺的锁区在一定程度上可人为控制。

当顺时针和反时针回路的光接收系统或电子反馈系统中存在噪声,且不能相互抵消时,则(6)、(7)、(9)式分别变为

$$\Omega_+(t) = \Omega_0 + \frac{a}{2} + a\cos[\Phi_+(t)] + n_+(t) \quad (11)$$

$$\Omega_-(t) = \Omega_0 - \frac{a}{2} + a\cos[\Phi_-(t)] + n_-(t) \quad (12)$$

$$\Psi(t) = a + b\sin[\Psi(t)] + \zeta(t) \quad (13)$$

上式中的  $n_+(t)$  和  $n_-(t)$  分别为顺时针和反时针回路的频率噪声 (rad/s),  $\zeta(t) = \int_{-\infty}^t [n_+(t') - n_-(t')] dt'$ 。(13) 式在有源腔系统已被广泛研究过<sup>[6,7]</sup>。噪声的存在使无源腔陀螺中的激光频率不能精确地跟踪谐振腔的谐振频率,淹没了闭锁现象。

当背散射系数的平方项  $|r|^2$  不可忽略时,式(6)和(7)变为

$$\Omega_+(t) = \Omega_0 + \frac{a}{2} - \frac{\Delta a}{2} + a\cos[\Phi_+(t)] \quad (14)$$

$$\Omega_-(t) = \Omega_0 - \frac{a}{2} + \frac{\Delta a}{2} + a\cos[\Phi_-(t)] \quad (15)$$

式中  $\pm \Delta a/2$  为由背散射引起的谐振频率偏移值,满足  $0 < \Delta a/2 < 1$ 。上两式表明,背散射光的作用使顺时针和反时针的有效谐振频率向相互方向移动,正如有源腔陀螺的非饱和反常色散效应引起的模牵引效应一样。(14)式与(15)式相减得

$$\Psi(t) = a - \Delta a + b\sin\Psi(t) \quad (16)$$

从式中可看出,模牵引效应使锁区范围扩大。在锁区范围内,模牵引效应被淹没在闭锁效应里;在锁区范围外,模牵引效应使比例因子发生变化,正如有源腔陀螺的模牵引效应使比例因子产生一修正值一样。

通过前面的分析可知,模牵引效应是由背散射光的自相干项引起的,通过外加调制的方法消除是不可能的;而闭锁效应是一方向的光与另一方向的背散射光的互相干项引起的,所以可通过外加调制的方法消除。

### 3 闭锁效应的消除

以上的理论分析为消除闭锁效应提供了理论依据,即为了消除闭锁效应,就必须消除由一方向的光与另一方向的背散射光的互相干项产生的不可逆拍频振荡信号。在有源腔陀螺中采用的对谐振腔加机械抖动的办法在无源腔陀螺中同样适用,但由于无源腔陀螺的反馈回路能够人为控制,所以可采用非机械的方法。最常用的方法<sup>[8]</sup>是在反时针(或顺时针)光束进入环形腔以前用一电光位相调制器(E/O)对它进行位相调制,如图2所示。图2为实际采用的无源腔陀螺结构,声光晶体(A/O's)和压控振荡器(VCO's)实现对顺时针和反时针激光频率的频移,压电陶瓷(PZT)实现对腔长的调制和控制。设E/O的位相调制幅度为 $\Phi_0$ ,调制频率为 $f_j$ ,则反时针光束的位相部分变为

$$\exp\{i[2\pi\nu_-t + \Phi_0\sin(2\pi f_j t + \Phi)]\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\Phi_0)\exp\{i[2\pi(\nu_- + mf_j)t + \Phi]\} \quad (m \text{ 为整数}) \quad (17)$$

式中  $\Phi$  为位相常量,  $\nu_-$  为反时针激光频率。当  $\Phi_0$  足够大时,  $J_0(\Phi_0) = 0$ , 在频率  $\nu_-$  处的能量转移到  $mf_j$  调制边带上。不可逆拍频振荡信号(如图 3 的左边所示)<sup>[4]</sup> 将被移动  $mf_j$ , 当  $f_j$  远远大于电子反馈系统的滤波器带宽时, 振荡信号将最终被滤掉, 如图 3 的右边所示。

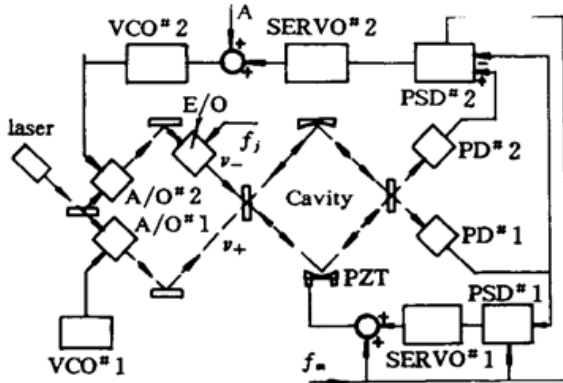


Fig. 2 Schematic diagram for a passive ring resonator gyroscope configuration

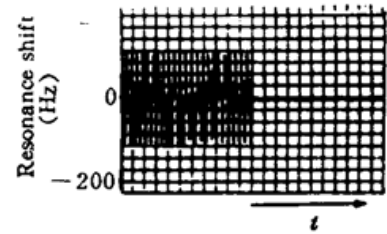


Fig. 3 Oscillatory nonreciprocal resonance shift (left) caused by backscattering is completely eliminated with phase modulation (right)

另外, 也可用频率调制的方法消除不可逆拍频振荡信号<sup>[4]</sup>, 即在电子反馈回路的压控振荡器的控制信号中加一频率调制信号  $\nu_- \cos(2\pi f_j t)$  (如图 2 中 A 点所示), 使之控制声光晶体, 对激光频率进行频率调制, 则反时针光束的位相部分变为

$$\exp\left\{i\left[2\pi\nu_-t + \frac{\nu_- \sin(2\pi f_j t)}{f_j} + \Phi\right]\right\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\nu_-/f_j)\exp\{i[2\pi(\nu_- + mf_j)t + \Phi]\}, \quad (m \text{ 为整数}) \quad (18)$$

当  $\nu_-/f_j$  足够大时,  $J_0(\nu_-/f_j) = 0$ 。同样地要在反馈系统中加适当的滤波器就可将不可逆拍频振荡信号完全滤掉。

## 4 结 论

通过理论推导证明, 无源谐振腔激光陀螺的腔镜背散射不但会引起闭锁效应, 而且会引起模牵引效应。更确切地说, 由一方向的光与另一方向的背散射光的互相干项产生的不可逆拍频振荡信号导致了闭锁效应; 背散射光的自相干项导致了模牵引效应。通过外加位相调制或频率调制的方法使拍频振荡信号被频移到电子反馈系统的滤波器带宽之外, 从而可消除闭锁效应。

## 参 考 文 献

- 1 L. N. Menegozzi, Jr., W. E. Lamb. *Phys. Rev.*, 1973, A8: 2103
- 2 F. Aronowitz. *Laser Applications*, edited by Monte Ross, Academic, New York, 1971. 134~200
- 3 M. Hereld, D. Z. Anderson. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1984, 487: 33
- 4 F. Zarinetchi, S. Ezekiel. *Opt. Lett.*, 1986, 11: 402
- 5 A. H. Rosenthal. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, 52: 1143
- 6 J. D. Cresser, W. H. Louisell, P. Meystre et al.. *Phys. Rev.*, 1982, A25: 2214
- 7 J. D. Cresser, D. Hammonds, W. H. Louisell et al.. *Phys. Rev.*, 1982, A25: 2226

8 G. A. Sanders, M. G. Prentiss, S. Ezekiel. *Opt. Lett.*, 1981, 11: 569

## Backscattering within a Passive Resonator Laser Gyroscope

Xiao Guixia

(208 Research Laboratory, Scientific and Technical University of Defense, Changsha 410073)

**Abstract** That in a closed-loop passive ring resonator laser gyroscope, the backscattering from cavity mirrors within the resonator, not only can cause lock-in effect, but also can cause mode-pulling effect, is demonstrated in theory. Essential measures for the elimination of the lock-in effect are discussed.

**Key words** backscattering, lock-in effect, mode-pulling effect

---

## 新型高功率 TEM<sub>00</sub> 模氦-氖激光器

根据李先枢教授提出的共振腔理论设计、由广州激光技术应用研究所和中山大学合作研制的新型封离式氦-氖激光器(输出波长为 632.8 nm),输出性能提高到一个新高度。腔长 630 mm 的器件,基横模输出功率最高达 24 mW,80%的器件输出功率超过 15.0 mW,50%的器件输出功率达到 18.0 mW 以上,超过了美国现有的水平。激光功率稳定,半小时内起伏小于 5%。激光束发散角很小,远场发散角仅为 0.45 mrad,比国内外现有的器件输出光束发散角都小。还有一个重要性质是,频谱高度稳定,在没有任何电子学伺服和稳频手段的情况下,在半小时内中心波长频率漂移小于  $3 \times 10^7$  Hz。

大功率、基横模氦-氖激光器在科学研究、测量、全息照相、干涉等方面都有重要应用。中山大学物理学系利用他们研制的这种新型氦-氖激光器拍摄西安出土兵马俑——铜车(复制品)的全息照片,再现图像非常清晰、明亮,重复性也相当好。

(苏笑珍)