

激光陀螺锁区特性的研究

韩宗虎 陈林峰 陈 勇 吉翠萍

(西北工业大学, 西安 710072)

摘 要 从理论和试验两个方面,研究了四边行腔环形激光陀螺的锁区特性. 利用环形腔中背向散射光束具有相干性,导出了环形谐振腔综合背向散射与反射镜、反射镜之间的相对位置的关系. 在有两个位移反射镜的四边行谐振腔中,理论上得到了综合背向散射系数与谐振腔腔长具有双波长周期. 利用综合背向光强实验及锁区与陀螺工作模数实验分别验证了理论的正确性. 试验证实散射光的强度与谐振腔的工作模数存在双模周期性,综合背向散射系数大,陀螺锁区大,反之亦然.

关键词 激光陀螺;锁区;背向散射

中图分类号 U666.12+3 **文献标识码** A

0 引言

在激光陀螺研制过程中,提高陀螺准确度的主要障碍是闭锁效应^[1]. 减少陀螺闭锁阈值,研制有效的偏频技术的过程构成了激光陀螺技术的研究历史^[2,3]. 要使激光陀螺达到实用程度,必须降低闭锁阈值,而闭锁是由反射镜的背向散射相互耦合产生的. 因此,提高反射镜性能,研制和加工高质量的反射镜,是这一领域的主要任务之一. 反射镜的水平提高,使激光陀螺的锁区由早期的1000~10000°/h,降低到了最低 100°/h 以下^[4]. 这些进步的取得都是以加工成本提高为代价的. 任何使陀螺锁区减小的技术和手段,包括不同的锁区减小技术,都是激光陀螺研制技术的进步^[4].

本文从另一个方面,研究在反射镜水平一定的情况下,利用陀螺工作纵模模数的改变,使陀螺锁区减小的可能性. 首先给出理论依据,并从两个方面进行了实验验证. 试验结果验证了所提出的理论.

1 激光陀螺的锁区理论

根据激光陀螺基本理论,陀螺拍频频率 $\dot{\Phi}$ 为^[4]

$$\dot{\Phi} = a - \frac{c}{L} \left[r_1 \cdot \sqrt{\frac{I_1}{I_2}} \sin(\Phi - \epsilon) + r_2 \cdot \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \sin(\Phi + \epsilon) \right] \quad (1)$$

式中: a 为陀螺与转速相关拍频; I_1, I_2 为顺、逆行波的光强; L 为谐振腔的光学长度、光程; c 为光速; r_1, r_2 为背向散射系数; ϵ 为散射光散射相位.

激光陀螺利用的 He-Ne 激光增益介质具有各同性以及顺逆光束频率差在 MHz 量级,在一级

近似情况下,可以认为光强相等,式(1)可以简化为

$$\dot{\Phi} = a - \frac{c}{L} [r_1 \cdot \sin(\Phi - \epsilon) + r_2 \cdot \sin(\Phi + \epsilon)] \quad (2)$$

从式(2)可以看出,背向散射系数是引起闭锁的主要因素. 减小背向散射系数或控制其他参量达到减小背向散射系数作用效果,这对陀螺锁区的减小非常有利.

在 $r_1 = r_2 = r$ 的情况下,锁区与相位差 ϵ 的关系

$$\dot{\Phi} = a - \frac{cr}{L} [\sin(\Phi - \epsilon) + \sin(\Phi + \epsilon)] \quad (3)$$

在 $\epsilon = 0$ 时

$$\dot{\Phi} = a - \frac{2cr}{L} \sin \Phi \quad (4)$$

在式(4)中, r 的意义和理解是研究的关键. 一般理解成为每个反射镜的背向散射系数之和或者在谐振腔中的平均值^[3]. 本文认为,应该从光束背向散射对另一束光的影响考虑,该系数应该具有矢量和的概念. 这样,在各个反射镜的背向散射系数一定的条件下,在环形谐振腔中,一束光向另一束光的散射,将不但与各反射镜的散射系数相关,而且与各反射镜之间的位置相关.

设没有背向散射时,环形谐振腔中振荡顺、逆光束的电场为

$$E_{10} = E_{10}^0 e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)}$$

$$E_{20} = E_{20}^0 e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)}$$

存在背向散射时,环形谐振腔中振荡顺、逆光束的电场可以写成

$$E_1 = E_{10}^0 e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} + r_1 E_{20}^0 e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)} \quad (5a)$$

$$E_2 = E_{20}^0 e^{j(\omega_2 t + \varphi_2)} + r_2 E_{10}^0 e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} \quad (5b)$$

式中, r_1 和 r_2 分别是逆、逆时针光散射相互背向散射系数,是所有参与背向散射反射镜综合产生的结果,称为综合背向散射系数.

在考虑到背向散射较小的激光陀螺中,可以略

去 r^2 项, 光强为

$$I_1 = I_{10} + r_1 \sqrt{I_{10} I_{20}} \cos [(\omega_2 - \omega_1)t + \epsilon] \quad (6a)$$

$$I_2 = I_{20} + r_2 \sqrt{I_{10} I_{20}} \cos [(\omega_2 - \omega_1)t - \epsilon] \quad (6b)$$

从式(6)可以看出, 当 $\omega_2 - \omega_1 \neq 0$ 时, 得到的顺、逆光强受到该差频的调制, 调制的大小与背向散射系数成正比. 本文认为该背向散射是由所有反射镜综和产生的, 而这个综和散射系数与各反射镜背向散射系数的关系是本文关心的问题.

2 综合背向散射与各反射镜背向散射、反射镜相对位置及谐振腔腔长的关系

为分析问题方便, 设环行激光陀螺腔形是四边形的, 并且假定背向散射主要发生在四面反射镜上. 如图 1, M_1, M_2 为位移反射镜.

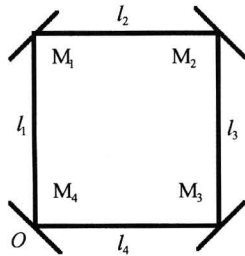


图 1 四镜谐振腔
Fig. 1 Four-mirror resonator

实际环行激光陀螺的综合背向散射系数, 可能存在方向非互易特性, 为了方便只考虑互易情况, 即 $r_1 = r_2 = r$.

设沿环行谐振腔顺时针转播光束的电场为 E_1 , 起点 O 取在 M_4 点. M_1 反射镜背向散射系数 r_{M_1} , 顺时针光在 M_1 反射镜上散射前的电场为

$$E_{1M_1} = E_{10} e^{j(\omega t - kl_1)} \quad (7)$$

而散射后在 M_1 反射镜上的电场为

$$E_{M_1} = r_{M_1} E_{1M_1} \quad (8a)$$

其背向散射到达 O 点的光强度为

$$E_{M_1} = r_{M_1} E_{1M_1} e^{-jkl_1} = r_{M_1} E_{10} e^{-j2kl_1} \quad (8b)$$

同理可得, 对 M_2, M_3, M_4 背向散射 O 点的光强度为

$$E_{M_2} = r_{M_2} E_{10} e^{j[\omega t - 2k(l_1 + l_2)]} \quad (9)$$

$$E_{M_3} = r_{M_3} E_{10} e^{j[\omega t - 2k(l_1 + l_2 + l_3)]} \quad (10)$$

$$E_{M_4} = r_{M_4} E_{10} e^{j[\omega t - 2k(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)]} \quad (11)$$

考虑到所有反射镜散射光具有相干性, 可以得到各反射镜散射系数与综合散射系数的关系

$$r = r_{M_1} e^{-j2kl_1} + r_{M_2} e^{-j2k(l_1 + l_2)} + r_{M_3} e^{-j2k(l_1 + l_2 + l_3)} + r_{M_4} e^{-j2kl_4} \quad (12)$$

激光陀螺工作要求稳频, 即在陀螺工作过程中, 环行谐振腔的总腔长必须保持不变. 必须满足 $l =$

$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 = q\lambda$ (q 为谐振腔纵模数).

在改变陀螺工作纵模模数时, 对应反射镜之间的位置都要发生变化. 在利用两个位移反射镜的条件下, 几何上可以保证每边的长度变化相等, 可以方便证明

$$r(q) = r(q+2) \quad (13a)$$

$$r(q) \neq r(q+1) \quad (13b)$$

式(13a)和式(13b)从理论上证明了可以通过改变环行谐振腔中激光振荡模数, 达到改变综合散射系数的目的, 从而达到在相同反射镜条件下, 对陀螺锁区降低的目的.

3 试验验证

本文设计了两种试验方法. 第一种是通过测量背向散射光的强度, 证明综合散射的大小与谐振腔工作模数相关; 第二种是试验验证综合散射系数与锁区大小及模数的相关性.

3.1 背向散射综合系数与谐振腔模数的关系验证试验

利用带有两个压电驱动位移反射镜组成的四边形环行激光陀螺谐振腔. 保证环行激光陀螺谐振腔正常工作, 输出正反两束激光稳定.

输出激光中含有关心的综合散射信息, 根据式(6), 测量与散射系数相关的交流成分. 为此, 利用光电探测器检测其中一束行波的光强, 并将探测的光电信号通过一个中心频率为 $(\omega_1 - \omega_2)$ 带通滤波器, 经放大、整流后, 得到与综合背向散射系数相关的背向散射光强电压 I_s 信号.

为了说明谐振腔工作纵模, 对经过光电探测器的直流光强 I_1 即谐振腔激光光强也同时进行测量, 该直流光强随谐振腔腔长的变化 Δl 就是激光工作的纵模的变化. 利用计算机控制加在压电反射镜上的电压, 改变谐振腔的长度. 利用计算机同时对直流光强信号和综合散射光强信号进行测量, 就可以得到陀螺工作纵模与综合散射光强的关系. 测量结果如图 2, 图 3. 从试验曲线中可以明显看出式(13)的正确性.

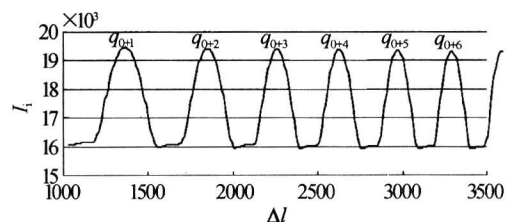


图 2 谐振腔腔长与谐振腔纵模及光强关系
Fig. 2 The relationship between cavity length and modes

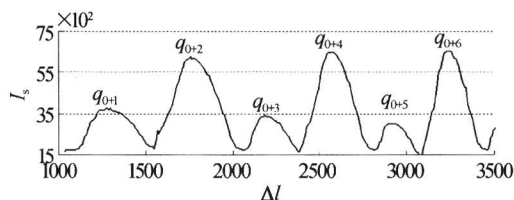


图3 谐振腔腔长与谐振腔纵模与背向散射光强的关系
Fig. 3 The relationship between back-scatter and modes

3.2 综合散射系数与陀螺锁区及模数对应关系试验验证

实验验证了综合散射系数与谐振腔激光工作模数之间的关系,那么,综合散射系数大小是否与陀螺锁区之间存在对应关系,即锁区的大小是否也存在与谐振腔激光工作模数相对应的关系,综合散射系数大,锁区也大,反之以然。

为了验证不同模锁区变化关系,将陀螺固定在速率转台上,转台速率稳定性和速率准确度均在 5×10^{-4} 量级。引燃被测陀螺,利用稳压电源,调节加在 PZT 压电驱动器上的电压,使陀螺工作在被测模上。转动速率转台,分别检测转台正、负转动时陀螺的出、入锁区时刻对应的速率转台速率值,并做记录,保证检测陀螺敏感轴与转台速率轴相同,转台速

表 1 锁区测量结果

序号	模类型	综合散射系数大小	模数	平均入锁 $^{\circ}/s$	平均出锁 $^{\circ}/s_0$
1	单	小	4	0.212	0.243
	双	大	4	0.534	0.556
2	单	小	5	0.116	0.126
	双	大	4	0.321	0.337
3	单	小	4	0.163	0.172
	双	大	4	0.419	0.451
4	单	小	4	0.125	0.162
	双	大	5	0.540	0.586
5	单	小	4	0.300	0.325
	双	大	4	0.818	0.918
6	单	小	4	0.278	0.350
	双	大	3	0.404	0.471

率与陀螺速率相同。

4 结论

本文从背向散射光束具有相干性,所有反射镜背向散射光的耦合,形成背向散射光强分布,导出了环行谐振腔综合背向散射与反射镜、反射镜之间的相对位置的关系。综合背向散射系数不但与各个反射镜的各自背向散射相关,而且与各个反射镜之间的相对位置相关,这使得在反射镜背向散射系数相同的情况下,通过调节他们之间的相对位置,达到对综合背向散射系数的调节成为可能。本文还从理论上证了综合背向散射系数,在利用两个位移反射镜的四边形谐振腔中,与谐振腔腔长的变化具有 4π 周期,即与谐振腔腔长具有 2λ 周期。

利用综合背向光强与谐振腔关系的试验,证实了理论分析结果的正确性。散射光的强度与谐振腔的工作模数存在双模周期性,并且存在偶数模散射总是大于奇数模特性。利用锁区与陀螺工作模数的试验,进一步验证理论的正确性,并且证实了综合背向散射系数大,则陀螺锁区大,反之亦然。

研究表明在反射镜性能相同条件下,通过调节谐振腔工作模数可以降低激光陀螺锁区。这对于提高激光陀螺的准确度具有参考意义。

参考文献

- 1 Heer C V. History of Laer Gyro. *SPIE*, 1984, **487**: 1~12
- 2 Aronowizy F. The laser gyro. *Laser Application*, 1971, **1**: 134~199
- 3 姚合宝,韩宗虎,陈林峰,等. 抖动激光陀螺速率阈值特性研究. *光子学报*, 2001, **30**(9): 1085~1087
Yao H B, Han Z H, Chen L F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1085~1087
- 4 姜亚南. 环行激光陀螺. 北京:清华大学出版社, 1995. 108~128
Jiang Y N. Ring Laser Gyro. Beijing: Press of Tsing Hua University, 1995. 108~128

The Study of Laser Gyro Lock-in Characteristic

Han Zonghu, Chen Linfeng, Chen Yong, Ji Cuiping

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2005-04-12

Abstract Lock-in characteristic of four-mirror ring laser gyro was studied both by theory and experiments. The relationship between cavity overall back-scatter with the back-scatter of the mirrors and distance between mirrors was given. The cavity overall back-scatter was of two wave length period in cavity length. The results of two experiments are validated this relationship.

Keywords Laser gyro; Lock-in; Back-scatter



Han Zonghu was born in Shaanxi Province in 1961. He received B. S. degree in Department of Physics, Northwest University and M. S. degree in Department of Precision Instrument, Tsinghua University. Now he is a professor in FACRI (Flight Automatic Control Research Institute) and is pursuing Ph. D degree in Northwest Polytechnic University. His research interests include laser physics, laser application, especially laser gyro, inertial navigation sensor and technology.