

# 激光陀螺的角度随机游走

张 梅

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 研究了四频激光陀螺角度随机游走的组成,它避免了机械抖动陀螺通过锁区所产生的随机游走效应带来的问题。通过改变放电电流,测量各种激光光强下的陀螺脉冲的时序输出,计算出不同光强值所对应的随机游走系数,根据量子噪声的特点,分离得到随机游走的量子噪声和非量子噪声成分。实验结果表明,在目前四频激光陀螺已达到的水平和使用条件下,非量子噪声成分占主要地位。若能通过设计去除或削弱非量子噪声成分的组成因素,将使随机游走减小,陀螺的性能将得到提高。

**关键词** 测量;激光陀螺;漂移;随机游走;量子噪声

**中图分类号** U666.1;TN966.6;V241.5<sup>+</sup>58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0208004

## Angle Random Walk of Ring Laser Gyro

Zhang Mei

(School of Opt-Electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The composition of the angle random walk in the four-mode ring laser gyro (RLG) has been researched. It escapes the trouble from the type of random walk caused by crossing the dead band contained in the dithered RLG. By changing the current of the gyro, the time order pulse output of the gyro in different laser intensities is measured. Then the random walk coefficients of the corresponding laser intensities are calculated. According to the feature of the quantum noise, the random walk can be separated into two parts: the random walk due to spontaneously emitted photons and the random walk due to other causes. The experimental results show that the random walk due to other causes plays a more important role in the current status of technology. If the part of random walk could be eliminated or weakened, the value of the random walk would be reduced, and the performance of the gyro would be improved.

**Key words** measurement; ring laser gyro; drift; random walk; quantum noise

**OCIS codes** 140.3370; 140.3560; 270.3434; 270.2500

## 1 引 言

激光陀螺是捷联式惯导系统的理想器件,它的两个首要参量是零偏不稳定性和角度随机游走<sup>[1]</sup>。对于捷联式惯导系统,由于受到零偏不稳定性,即慢漂效应<sup>[2~5]</sup>的限制,使用时间一般不超过 2 h。从 20 世纪 80 年代末开始,出现了激光陀螺旋转惯导系统,它是目前精度最高的惯导系统,虽然出现时间不长,但已显示了强大的生命力,20 世纪 90 年代中期北约海军将它选作标准惯导系统<sup>[6]</sup>,2001 年下半

年至 2003 年 2 月,美国约有 150 条军舰装备了激光陀螺旋转惯导系统<sup>[7]</sup>,目前激光陀螺旋转惯导系统在国内也得到了广泛试用。通过旋转能够使捷联系统中最重要的慢漂效应大大减小,但对角度随机游走所产生的效应却丝毫不起作用,故旋转惯导系统的长时间精度最终由角度随机游走决定<sup>[8]</sup>。除了旋转惯导系统以外,高精度陀螺指北仪也采用了旋转方式,最终精度也决定于角度随机游走<sup>[9]</sup>。如何减少激光陀螺的角度随机游走已成为亟待解决的重要

收稿日期: 2010-05-20; 收到修改稿日期: 2010-09-01

基金项目: 总装重点项目(9140A09010807KG0191)资助课题。

作者简介: 张 梅(1979—),女,博士研究生,主要从事激光陀螺漂移方面的研究。E-mail: mayerzhang@126.com

导师简介: 高伯龙(1928—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事激光物理、激光陀螺等方面的研究。

E-mail: gaoxdga@sina.com

命题。下面把角度随机游走简称为随机游走。

## 2 随机游走

### 2.1 随机游走组成

国际通用的单轴激光陀螺的测试标准 IEEE Std 647TM-2006<sup>[10]</sup> (以下简称 Std 2006) 列出了随机游走两个众所周知的组成: 1) 由抖动过锁区时光信号相位的随机性变化所引起, 此为机抖陀螺特有; 2) 由自发辐射光子注入的随机相位噪声所引起, 该效应比第一项小。除了这两点以外, Std 2006 认为相关时间远小于采样时间的高频噪声也对随机游走有贡献, 这些噪声在激光陀螺速率输出上都具有白噪声的频谱特征, 大多能够通过设计去除。在此认为快漂引起随机游走, 与 Std 2006 相同。

通常用方差来衡量数据的误差, 根据文献[2~5, 10], 方差可用最小二乘法拟合为

$$\sigma^2(\tau) = a_0 + a_1/\tau + a_2/\tau^2 + a_3\tau + a_4\tau^2, \quad (1)$$

式中  $\sigma^2(\tau)$  可以是经典方差或者 Allan 方差,  $\tau$  是采样时间间隔,  $\sqrt{a_1}$  为随机游走系数, 其他系数在此不再提及。根据(1)式, 对实验测出的  $\sigma^2(\tau)$  进行拟合, 即可求得  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  系数。

按统计规律, 随机因素的总效应(平方)为各独立因素所引起的效应的平方项之和, 那么陀螺的随机游走总效应为

$$a_1 = a_{1d} + a_{1q} + a_{1e}, \quad (2)$$

式中  $a_1$  是根据(1)式拟合得到的,  $a_{1d}$  表示由抖动偏频过锁区引起的随机游走系数之平方,  $a_{1q}$  表示由量子噪声引起的随机游走系数之平方,  $a_{1e}$  表示由前面两项之外的因素所引起的随机游走系数之平方。

### 2.2 随机游走组成的分离

由于随机游走总效应为(2)式中三项之和, 要降低它的影响, 首先应区分出每一项的大小, 然后有针对性地分别减少。

目前使用得最多的是机抖陀螺, 由抖动偏频过锁区引起的随机游走系数为<sup>[11]</sup>

$$\sqrt{a_{1d}} = \frac{\Omega_L \sqrt{\omega}}{\sqrt{2\pi K |\varpi|}}, \quad (3)$$

当使用正弦抖动时, 有  $|\varpi| = \omega \Omega_D$ , (3)式可写成

$$\sqrt{a_{1d}} = \frac{\Omega_L}{\sqrt{2\pi K \Omega_D}}, \quad (3')$$

式中  $\Omega_L$  为陀螺的闭锁阈值,  $K$  为标度因数,  $\omega$  为偏频的角频率,  $\varpi$  为过锁区角加速度,  $\Omega_D$  为抖动速度的幅值。对于给定的激光陀螺,  $K$  不变,  $\Omega_L$  大致不变, 根

据(3)式, 减小  $\omega$  和加大  $\varpi$  为降低  $a_{1d}$  的方法。例如, 某机抖陀螺的随机游走系数为  $4.9 \times 10^{-4} / \sqrt{h}$ , 采用速率偏频过锁区的方法<sup>[12, 13]</sup>, 取足够大的  $|\varpi|$  并大大减小  $\omega$  后, 它的随机游走系数降为  $2.3 \times 10^{-4} / \sqrt{h}$ <sup>[9]</sup>。根据文献[12], 尽量减小  $\omega$  和加大  $|\varpi|$ , 最后可得  $a_{1d}$  趋于极限值 0 的结果, 此时, 随机游走系数与原机抖陀螺的随机游走系数之比为  $\sqrt{a_{1q} + a_{1e}} : \sqrt{a_1} = 3 : 7$ , 也即  $(a_{1q} + a_{1e}) : a_1 = 9 : 49$ 。由此看来,  $a_{1d}$  项很大, 且由于  $\Omega_L$  不大稳定,  $a_{1d}$  的测量精度不可能太高, 因此从机抖陀螺数据中分离出  $a_{1q}$  和  $a_{1e}$  项是困难的。四频激光陀螺不存在过锁区问题, 无  $a_{1d}$  项, 因此选它来进行研究。

很多文献研究了激光陀螺的量子噪声, 推导出了量子噪声所引起的随机游走公式<sup>[11, 14~16]</sup>。对于二频陀螺有

$$\sqrt{a_{1q}} = \frac{1}{2\pi K_2} \left( \frac{2\pi\nu}{Q\langle n \rangle} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $K_2$  为二频陀螺的标度因数,  $\nu$  为激光频率,  $Q$  为陀螺的品质因数,  $\langle n \rangle$  为腔内每个模式的平均光子数。 $\langle n \rangle$  与每个模式的功率  $P_0$  的关系为

$$P_0 = h\nu \langle n \rangle \frac{c}{L}, \quad (5)$$

式中  $h\nu$  为每个光子的能量,  $c$  为真空中光速,  $L$  为陀螺每圈的光程。将(5)式代入(4)式得

$$\sqrt{a_{1q}} = \frac{1}{2\pi K_2} \left( \frac{2\pi\nu \cdot h\nu \cdot c}{QP_0 L} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

对于四频陀螺, 由于混合了两个对模, 陀螺输出中的量子噪声效应比一个对模二频陀螺的大,  $a_{1q}$  应乘上因子 2, 故

$$\sqrt{a_{1q}} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi K_4} \left( \frac{2\pi\nu \cdot h\nu \cdot c}{QP_0 L} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中  $K_4$  为四频陀螺的标度因数。由  $2\pi\nu/Q = \Gamma c/L$  ( $\Gamma$  为陀螺每圈的损耗系数), (7)式可以表示为

$$\sqrt{a_{1q}} = \frac{\sqrt{2}c}{2\pi K_4 L} \left( \frac{h\nu\Gamma}{P_0} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

单位换算后变为

$$\sqrt{a_{1q}} = \frac{10800}{\pi} \frac{\sqrt{2}c}{2\pi K_4 L} \left( \frac{h\nu\Gamma}{P_0} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

实际上,  $P_0$  和  $\Gamma$  不易测准:  $P_0$  在粘合光棱镜以前较好测量, 但此时尚未稳频, 测量值与真实值有差别; 更难测准的是  $\Gamma$ , 因为光通过毛细管和光阑的损耗很难测准。所以根据(9)式算出来的  $a_{1q}$  只是个大致数值, 更可靠的数据需要从实验直接求得。对于给定的四频激光陀螺,  $a_{1q}$  与  $P_0$  成反比, 根据(2)和(9)式, 有

$$a_1 = b_0 + b_1/P, \quad (10)$$

式中  $b_0 = a_{1c}$ ,  $b_1/P = a_{1q}$ ,  $P = ATP_0$ ,  $P$  为接收放大后的信号强度,  $T$  为输出镜透射率,  $A$  为放大倍数。每次分实验固定一个  $P$  值, 测量陀螺的时序漂移, 根据(1)式拟合求得对应的  $a_1$  值, 然后根据(10)式对多组  $(P, a_1)$  用最小二乘法拟合, 即可求得  $b_0$  和  $b_1$ 。

### 3 实验结果分析与讨论

#### 3.1 实验数据

以 3 个空间四频激光陀螺<sup>[17]</sup> 和一个平面四频激光陀螺为例, 在其他测试条件不变的情况下, 通过改变放电电流  $I$ , 测量各种激光光强下的陀螺输出, 计算出不同光强值所对应的随机游走系数, 采用(10)式拟合, 得到系数  $b_0$  和  $b_1$ 。

对空间四频激光陀螺 1 进行了 3 组实验, 它们

表 1 陀螺 1 在不同信号强度  $P$  下的随机游走  $a_1$

Table 1 Random walk  $a_1$  in different signal intensities  $P$  of gyro 1

	$I / \text{mA}$	0.35	0.4	0.45	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Experiment 1	$P / \text{V}$	0.2189	/	/	0.3601	0.4426	/	0.5717	/	0.6808
	$a_1 / [10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$	31.5114	/	/	24.5193	22.4913	/	20.6525	/	19.9773
Experiment 2	$P / \text{V}$	/	0.382	/	/	0.620	/	0.795	/	0.930
	$a_1 / [10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$	/	27.3822	/	/	21.6113	/	20.2446	/	18.8018
Experiment 3	$P / \text{V}$	/	/	2.0876	2.3823	2.9688	3.4496	3.8629	4.2324	/
	$a_1 / [10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$	/	/	25.5197	24.5253	21.9221	20.9050	20.4602	19.9389	/

表 2 陀螺 1 三组实验的  $b_0$  与  $b_1/P$

Table 2 Three fitting results  $b_0$  and  $b_1/P$  of gyro 1

Experiment	$b_0 / [10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$	$(b_1/P) / [10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$								Error <sup>a)</sup> / $[10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}]$	
		0.35 mA	0.4 mA	0.45 mA	0.5 mA	0.6 mA	0.7 mA	0.8 mA	0.9 mA		1.0 mA
1	14.1329	17.2744	/	/	10.5009	8.5435	/	6.6143	/	5.5543	0.17398
2	13.0650	/	14.2697	/	/	8.7920	/	6.8567	/	5.8613	0.21355
3	14.1519	/	/	11.4642	10.0460	8.0614	6.9378	6.1955	5.6546	/	0.21040

a) Fitting error formula:  $\text{Error} = \sqrt{\sum_k [a_{1\text{fit}}(k) - a_{1\text{exp}}(k)]^2 / \sum_k 1}$

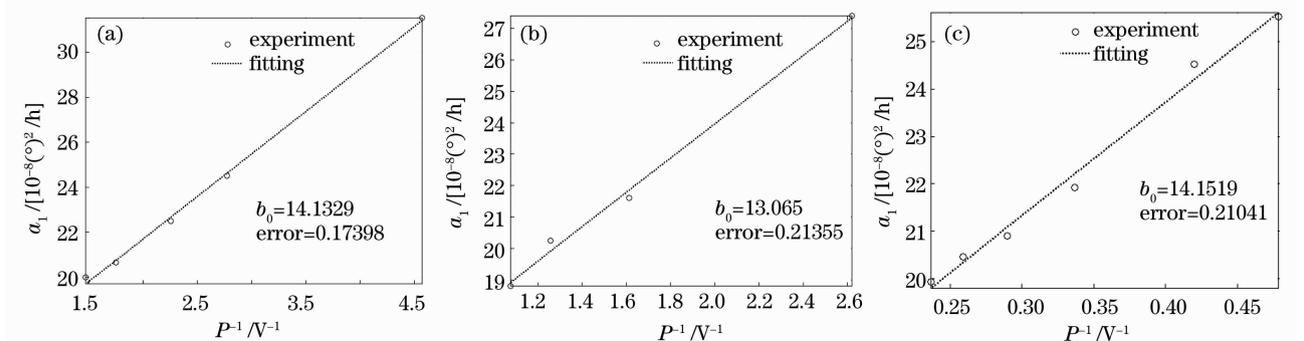


图 1 陀螺 1 的  $1/P-a_1$  图。(a) 实验一, (b) 实验二, (c) 实验三

Fig. 1  $1/P-a_1$  figure of gyro 1. (a) experiment 1, (b) experiment 2, (c) experiment 3

进行的时间分别为 2008 年 4 月, 2009 年 2 月和 2010 年 2 月, 每组实验由若干次分实验组成, 每次分实验固定一个信号强度  $P$ , 数据样本长度大于  $2^{15}$ , 原始采样时间  $\tau_0 = 1$  s, 根据(1)式拟合计算得到随机游走系数之平方  $a_1$ 。实验数据如表 1 所示, 每组实验有两行数据, 第一行为每次分实验电路检测到的信号强度  $P$ , 第二行为该次分实验得到的  $a_1$ 。应说明的是, 由于不同时间所用的电路有所不同, 其光强的放大倍数  $A$  不一样, 所以不同组的信号强度  $P$  不宜相互对比, 只有同组间的  $P$  才可以相互对比。采用(10)式, 对表 1 三组实验数据分别进行拟合, 得到系数  $b_0$  和  $b_1$ , 于是将随机游走分离出  $a_{1c}$  与  $a_{1q}$ , 如表 2 所示。将上述实验结果及拟合曲线绘成图 1, 横坐标为信号强度  $P$  的倒数  $(1/P)$ , 纵坐标为随机游走系数之平方  $a_1$ 。

对空间四频激光陀螺 2,3 及平面四频 110 陀螺 (陀螺 4)各进行了一组实验。每组实验由若干次分实验组成,每次分实验固定一个信号强度  $P$ ,数据样本长度大于  $2^{15}$ ,原始采样时间  $\tau_0 = 1$  s。实验数据

如表 3 所示。采用(10)式,对表 3 三组实验数据分别进行拟合,得到系数  $b_0$  和  $b_1$ ,于是将三个陀螺的随机游走分离出了  $a_{1e}$  与  $a_{1q}$ ,如表 4 所示。将上述三组实验的结果及拟合曲线绘成图 2。

表 3 陀螺 2,3,4 在不同信号强度  $P$  下的  $a_1$

Table 3 Random walk  $a_1$  in different signal intensities  $P$  of Gyro 2,3,4

$I$ / mA		0.45	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Gyro 2	$P$ / V	0.8889	0.9893	1.2325	1.4500	1.6881	1.8831	2.0771
	$a_1$ / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]	56.9648	52.2946	47.2079	45.9548	41.9904	40.4420	39.3480
Gyro 3	$P$ / V	0.18046	0.2151	0.26876	0.32674	/	0.43624	0.4862
	$a_1$ / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]	19.6417	18.6399	17.1636	16.6497	/	16.3766	15.6563
Gyro 4	$P$ / V	/	/	0.47	0.54	0.67	0.75	0.84
	$a_1$ / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]	/	/	173.1672	156.7905	132.9893	121.8948	115.8379

表 4 陀螺 2,3,4 的  $b_0$  与  $b_1/P$

Table 4 Fitting results  $b_0$  and  $b_1/P$  of gyro 2,3,4

	$b_0$ / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]	$(b_1/P)$ / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]						Error / [ $10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ]	
		0.45 mA	0.5 mA	0.6 mA	0.7 mA	0.8 mA	0.9 mA		1.0 mA
Gyro 2	26.6725	29.5100	26.5144	21.2834	18.0908	15.5386	13.9294	12.6285	0.70346
Gyro 3	13.4970	6.0157	5.0469	4.0392	3.3225	/	2.4885	2.2328	0.24219
Gyro 4	39.6668	/	/	113.6718	116.3440	93.7698	83.7677	74.1926	1.0107

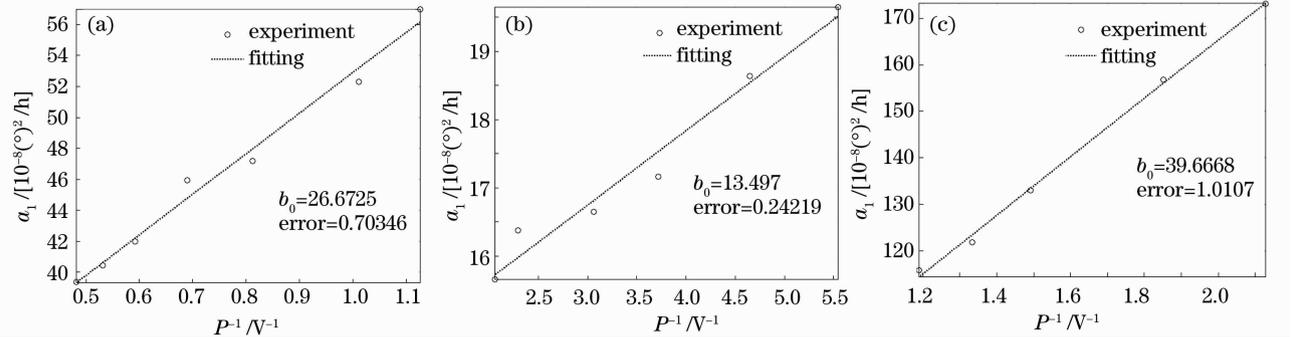


图 2 陀螺 2,3,4 的  $1/P$ - $a_1$  图。(a)陀螺 2, (b)陀螺 3, (c)陀螺 4

Fig. 2 Fitting  $1/P$ - $a_1$  figure of gyro 2,3,4. (a) gyro 2, (b) gyro 3, (c) gyro 4

### 3.2 实验结果分析

将表 2 中 3 组实验的  $b_0$  进行对比,可知 3 组实验得到的结果相当接近,3 组实验是不同时期、不同电路测量得到的,相互验证了实验结果的可信度。对于陀螺 1,随机游走中非量子噪声效应  $b_0$  约为  $(13\sim 14)\times 10^{-8}(\text{°})^2/\text{h}$ ,量子噪声效应  $b_1/P$  随着信号强度  $P$  的增加而减小,当信号强度  $P$  较小时(电流  $I \leq 0.4$  mA), $b_1/P$  比  $b_0$  稍大些,随着  $P$  的增大, $b_1/P$  渐渐减少,在电流  $I \geq 0.5$  mA 后  $b_0$  变为主要部分。当电流为 1.0 mA 时, $b_1/P$  仅为  $b_0$  的大约 40%。说明随机游走中非量子噪声成分一般占主要地位。上述结论对表 4 的陀螺 3 更为明显。

将表 4 中 3 组实验的  $b_0$  和  $b_1/P$  对比可知,平面 110 陀螺的  $b_0$  和  $b_1/P$  都大,空间陀螺中这两部分都小,这是由于陀螺结构和工艺改善的结果。尤

其  $b_1/P$  特别大,这主要是陀螺结构造成的,平面 110 陀螺的腔内多一个元件,损耗较大,光强较弱,相同电流下它的光强仅为空间陀螺 3 的 1/5,这就不难理解它的量子噪声效应会如此大,目前的旋转惯导系统不再使用平面 110 陀螺,此处仅将它用于对比和参考。陀螺越好,损耗越小,光强越强,其量子噪声效应越小,非量子噪声效应所占比例越显著,降低它显得更加重要。

从图 1,2 来看,激光陀螺随机游走的“ $1/P$ ”规律十分明显,拟合结果与实验数据比较吻合,说明(10)式是合理的,通过它能够分离出  $b_0$ 。实际上  $b_0$  和  $b_1$  应该是一个或多个变量的函数在多次实验中的平均值。实验成功分离出了随机游走中的量子噪声效应与非量子噪声效应,这是减少随机游走的首要步骤。

从表2来看,当电流  $I=0.6\text{ mA}$  时,陀螺1的  $a_{1q}$  值约为  $8.3 \times 10^{-8} (\text{°})^2/\text{h}$ 。根据(9)式,对陀螺1的  $a_{1q}$  值进行约略估算:  $K_4 = 1.38 \times 10^5 \text{ Hz}/(\text{rad}/\text{s})$ ,  $L = 26 \text{ cm}$ ,  $\Gamma = 0.001$ ,  $P_0 = 0.2 \text{ W}$ ,  $\nu = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ , 算得  $\sqrt{a_{1q}} = 2.5 \times 10^{-4} / \sqrt{\text{h}}$ , 即  $a_{1q} = 6.5 \times 10^{-8} (\text{°})^2/\text{h}$ 。将理论值与实验值对比,表明实验值与理论值在数量级上符合。

### 3.3 讨论

#### 3.3.1 $a_{1d}$ 项

速率偏频激光陀螺通过大大减少每秒过锁区的次数  $\omega/2\pi$  和取足够大的过锁区加速度  $\bar{\omega}$ , 达到了降低  $a_{1d}$  的目的。但在实际上,速率偏频激光陀螺有致命缺陷,由于定时采样困难,在国外已被淘汰。机抖陀螺减少  $a_{1d}$  的方法很明确:减少闭锁阈值  $\Omega_L$  和加大抖动速度的幅值  $\Omega_D$ 。  $\Omega_D$  要开方,故减少  $\Omega_L$  的效果更大。

#### 3.3.2 $a_{1q}$ 项

对于一定型号的机抖、四频激光陀螺,其标度因数  $K$  和每圈光程  $L$  固定不变,降低  $a_{1q}$  的办法为增加每个模式的功率  $P_0$  和降低每圈的损耗系数  $\Gamma$ 。由于增益管长度和陀螺工作电流的限制,增大  $P_0$  也主要依靠降低  $\Gamma$ 。因此,减小  $a_{1q}$  主要的方法为降低损耗  $\Gamma$ 。  $\Gamma$  由膜片的反射损耗和谐振腔内元件的透射损耗、过光阑和毛细管的损耗组成,依赖于光学加工、镀膜的工艺水平和腔体设计、调腔的技术水平。

#### 3.3.3 $a_{1e}$ 项

该项已经研究了数年时间,主要以文献中列举的光纤陀螺随机游走的5点来源及降低办法为参考<sup>[18]</sup>。这5点来源是:1)检测电路的散粒噪声(Johnson noise);2)光电探测器的散粒噪声(photon shot noise);3)光源的过量噪声(excess noise);4)热力学相位噪声;5)其他电子学噪声。

实际上,1),2)两点的效应可能已经和量子噪声效应一起被包含在(10)式的  $b_1/P$  中了[见(10)式的注释]。光纤陀螺减少这两点来源的办法主要是采用大功率光源。由于光纤陀螺是无源腔,使用外部光源,功率可达数百瓦,在这点上具有很大优势。激光陀螺本身就是光源,内部功率一般不到1W,输出功率不到  $100 \mu\text{W}$ ,二者差别很大,无法仿效光纤陀螺。除增大光源的功率外,尝试过其他办法来减少1),2),更换光电管和检测电路。光电管采用APD模块C5460代替PIN管S5971,结果似乎没有成效,但此工作并不完善:由于体积大,C5460无法与陀螺紧密粘连,暴露在空气中,也许会带来一定的

噪声,并且更换后的光电管C5460的噪声不一定比原来S5971的小,因此不能肯定采用好的噪声更小的光电管对陀螺的随机游走是否有效。通过反复多次更换检测电路,发现性能差的检测电路可以使随机游走系数增大很多,但想进一步减少随机游走却很困难,如果能提高电路水平,还具有改善的空间。除散粒噪声外,检测电路还包含了其他噪声,即可能还包含了5)的一部分,减少检测电路的噪声有可能减少随机游走。光纤陀螺采用了特别的降相对强度噪声的电路来削弱过量噪声。正在进行这方面的研究。光纤陀螺采用信号处理电子学方法降低热力学相位噪声。采用了多阶小波滤波、“智能滤波”、均匀权重滤波和多种非均匀权重滤波,几种方法均没有得到很好的效果。

激光陀螺与光纤陀螺是有区别的:光纤陀螺是干涉仪,光路是开环,通过电路才形成闭环;而激光陀螺的光路是闭环的。因此,光纤陀螺降随机游走所采取的办法对激光陀螺不一定适用,但是这项工作之前没有被研究过,在此只好借鉴于它。引起  $a_{1e}$  的原因比较复杂,至今仍不完全清楚,有待进一步研究。

## 4 结 论

研究了四频激光陀螺随机游走的组成,对随机游走  $a_1$  中的  $a_{1q}$  与  $a_{1e}$  进行了分离,实验结果比较可信。结果表明,在目前四频陀螺已达到的水平和使用条件下,随机游走中非量子噪声效应  $a_{1e}$  是主要的。 $a_{1e}$  包含哪些因素,它们能否用设计去掉,能去掉多少,课题组正在开展这方面的研究,有许多困难需要克服。若能通过设计去除或削弱这些因素,将使随机游走减小,激光陀螺性能得到提高,这对于最新型的旋转式激光陀螺惯导系统是很重要的。

目前文献中尚未报道过本文的实验与研究结果,即分离出  $a_{1q}$  与  $a_{1e}$  并得到  $a_{1e}$  起主要的作用。这可能是由于国外主要使用机抖陀螺,它占据了90%以上的市场,机抖陀螺有一个很大的  $a_{1d}$  项,课题组做了多次实验,都不够稳定,若用机抖陀螺,几乎无法完成本实验。

**致谢** 本文的工作是在导师高伯龙院士的直接指导和参与下完成的,在此深表感谢。

## 参 考 文 献

1 Defense Space Electronic Systems, Honeywell International

- Incorporated GG1320 AN Digital Laser Gyro [Z]. Printed in U. S. A., 2003
- 2 Gao Bolong, Wang Guangen. Mathematical treatment of gyro data[J]. *J. National University of Defense Technology*, 1979, (1): 91~106  
高伯龙, 王关根. 陀螺数据的数学处理[J]. 国防科学技术大学学报, 1979, (1): 91~106
  - 3 Zhang Mei, Zhang Wen. Research method on drift of ring laser gyro(I) [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2009, **17**(2): 210~213  
张梅, 张文. 激光陀螺漂移的研究方法(一)[J]. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(2): 210~213
  - 4 Zhang Mei, Zhang Wen. Research method on drift of ring laser gyro(II) [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2009, **17**(3): 350~355  
张梅, 张文. 激光陀螺漂移的研究方法(二)[J]. 中国惯性技术学报, 2009, **17**(3): 350~355
  - 5 B. L. Gao, M. Zhang, W. Zhang. New interpretation of laser gyro drifts[J]. *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.*, 2010, **53**(5): 1168~1175
  - 6 E. Levinson, J. ter Horst, M. Willcocks. The next generation marine inertial navigator is here now[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1994: 121~127
  - 7 Litton Marine Systemsc, AN/WSN-7B(V) Program Quarterly Review Meeting [Z]. 2003
  - 8 Yuan Baolun. Research on Rotating Inertial Navigation System with Four-Frequency Differential Laser Gyroscope [D]. Changsha: National University of Defency Technology, 2007  
袁保伦. 四频激光陀螺旋转式惯导系统研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007
  - 9 Huang Zongsheng. Research on Rotary North Finder Based on Ring Laser Gyro[D]. Changsha: National University of Defency Technology, 2007  
黄宗升. 旋转式激光陀螺寻北仪的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007
  - 10 IEEE Aerospace and Electronic Systems Society. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros [S]. IEEE Std 647<sup>TM</sup>-2006, 2006: 1~83
  - 11 S. W. Hammons, V. J. Ashby. Mechanically dithered RLG at the quantum limit [C]. IEEE Proceedings National Aerospace Electron Conference, USA, 1982: 388~392
  - 12 Zhan Dejun. Investigation on Characteristics of Rate Bias Ring Laser Gyro and Related Technologies[D]. Changsha: National University of Defency Technology, 2009. 110~112  
战德军. 速率偏频激光陀螺特性及相关技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009. 110~112
  - 13 Zhan Dejun, Qin Shiqiao, Wang Xingshu *et al.*. Precise measurement of rate biased laser gyro scale factor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1327~1331  
战德军, 秦石乔, 王省书等. 速率偏频激光陀螺标度因数高精度测量方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1327~1331
  - 14 T. A. Dorshner, H. A. Haus, M. Holz *et al.*. Laser gyro at quantum limit [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**: 1376~1379
  - 15 M. Faucheux, D. Fayoux, J. J. Roland. The ring laser gyro [J]. *J. Optics*, 1988, **19**(3): 101~115
  - 16 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti *et al.*. The ring lase gyro[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
  - 17 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyroscope 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
  - 18 G. Adams, M. Gokhale. Fiber optic gyro based precision navigation for submarines [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Denver, 2000, **4384**: 1~6