

文章编号 1004-924X(2011)05-1061-07

异面腔四频陀螺中的模牵引效应及补偿技术

汪之国, 龙兴武, 王 飞

(国防科技大学 光电科学与工程学院 光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了提高异面腔四频差动激光陀螺(NFMDLG)的精度, 提出了一种利用互易偏频的零偏补偿技术。根据气体激光器经典理论, 推导了 NFMDLG 的互易偏频和零偏的表达式。分析了 NFMDLG 中的左旋陀螺分别位于增益曲线左、右侧时其输出零偏的特点, 指出磁圆二向色性差损导致的零偏在这两种情况下大小相同符号相反。搭建了一套可同时测量互易偏频和零偏的实验系统, 通过改变 NFMDLG 的放电电流和腔体温度验证了理论分析。在此基础上提出利用互易偏频补偿温度和电流变化导致零偏的方案。实验结果表明, 温度变化 50 °C 时, 采用该补偿方法后零偏在 ±0.01 Hz 内波动; 放电电流变化 0.2 mA 时, 补偿后的零偏降低了 4/5。因此互易偏频可有效补偿模牵引效应导致的零偏误差。

关键词: 四频差动激光陀螺; 模牵引效应; 放电电流; 零偏补偿

中图分类号: V241.5; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1061

Mode pulling effect and compensation for nonplanar four mode differential laser gyros

WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu, WANG Fei

(*Department of Opto-electronic Engineering, College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

* *Corresponding author, E-mail: maxborn@163.com*

Abstract: In order to improve the precision of Nonplanar Four Mode Differential Laser Gyros (NFMDLG), a compensation method by using reciprocal biasing is proposed. Expressions of reciprocal biasing and bias of the NFMDLG are derived according to the classic theory of a gas laser. The bias characteristics of the left circularly polarized gyro in the NFMDLG on the left and right sides of a gain curve are analyzed for two cases, respectively. Then, it points out that the bias caused by a magnetic circular dichroism loss is identical in number while reverse in sign for the two cases. An experimental system is established to measure the reciprocal biasing and bias synchronously, which verifies the theoretical analysis by varying the discharge current and temperature. Finally, a method is proposed to compensate the bias error of NFMDLG with reciprocal biasing. Experiments show that the bias drift resulted from temperature variation in the range of 10–60 °C is less than 0.01 Hz, and that resulted from 0.2 mA current variation is reduced by four-fifths after compensation. In conclusion, the reciprocal biasing can compensate effectively the bias caused by the mode pulling effect.

收稿日期: 2010-04-16; 修订日期: 2010-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60608002)

Key words: Four Frequency Differential Laser Gyro (FMDLG); mode pulling effect; discharge current; bias compensation

1 引言

陀螺是构成惯性系统的基础核心器件, 用来测量运载体的姿态角和角速度, 在很大程度上决定了惯性系统的性能, 历来是惯性技术的研究重点之一^[1-2]。与传统的机电陀螺相比, 激光陀螺具有比例因子误差小、动态范围宽、启动迅速等优点, 被誉为捷联式惯导系统的理想元件。然而, 激光谐振腔内相向行波间的能量耦合使激光陀螺存在闭锁问题, 导致它不能敏感小的转动。机械抖动激光陀螺采用机械抖动克服闭锁, 已广泛应用于航空、航海、陆地导航等领域。但机械抖动导致的若干问题如机械噪声、圆锥误差、划桨误差等限制了它的应用范围^[3-4], 因此, 很多研究机构试图研制一种不含机械活动部件的激光陀螺, 如塞曼陀螺、四频差动激光陀螺 (Four Mode Differential Laser Gyro, FMDLG)^[4-5]。国内外多年的研究实践表明, 只有 FMDLG 能够在各项性能指标上优于或相当于同等尺寸的机械抖动激光陀螺。目前, 只有 Litton 公司 (现并入 Northrop Grumman 公司) 能够生产高精度的 FMDLG, 注册商标为零闭锁激光陀螺 (Zero-lock[®] laser gyro), 已经应用在 F-22 战斗机等多种型号装备上^[6]。国内研制的平面腔 FMDLG 虽然已经得到了一定的应用, 但在精度上还远落后于机械抖动激光陀螺, 无法满足众多高端应用的要求, 在低端应用上又面临高性价比陀螺的竞争。

平面腔 FMDLG 中水晶片的双折射、应力效应等因素导致了较大的温度敏感性, 为了解决该问题, 本课题组研制了异面腔四频差动激光陀螺 (Nonplanar FMDLG, 简称 NFMDLG)。消除了水晶片之后, NFMDLG 的性能得到了一定程度的改善, 但模牵引效应导致的零偏及其随温度的变化仍是影响 NFMDLG 性能的一大难题。利用数学模型补偿零漂是提高激光陀螺性能的有效方法, 可供选择的自变量有温度、和频等参量^[7-9], 而 NFMDLG 自身的特点还提供了另一种补偿参量——互易偏频。本文研究了模牵引效应对 NFMDLG 的零偏和互易偏频的影响, 通过实验证明模

牵引对零偏和对互易偏频的影响是一致的, 进而提出了采用互易偏频的零偏补偿方法, 取得了一定效果。

2 理论分析

2.1 NFMDLG 的工作原理

NFMDLG 的基本结构和空腔模式频谱如图 1 所示。四面反射镜构成偏振各向同性的环形谐振腔, 其空腔频谱为四重简并, 每个纵模既可沿顺时针 (Clockwise, CW) 方向运行也可沿逆时针 (Anticlockwise, AW) 方向运行; 偏振态既可为左旋偏振 (Left Circularly Polarized, LCP) 也可为右旋偏振 (Right Circularly Polarized, RCP)。在腔内插入互易旋光器 (用异面腔实现) 后, 每阶纵模的左、右旋偏振模产生频率分裂, 称为互易偏频 ν_R 。再插入非互易旋光器 (用法拉第室实现) 后, 每阶纵模同偏振但运行方向不同的模之间产生频率分裂, 称为非互易偏频 ν_F 。在环形谐振腔内充入 He, Ne²⁰ 和 Ne²² 混合气体作为增益介质, 由于左、右旋偏振模之间的偏频减弱了模竞争, 4 个模可同时起振。

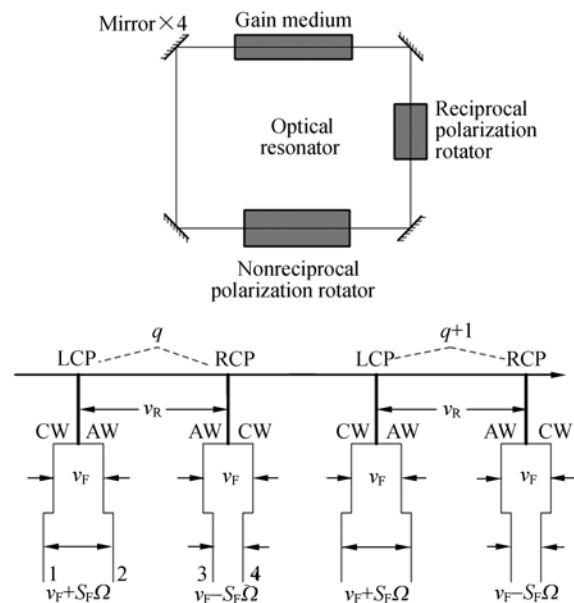


图 1 NFMDLG 原理

Fig. 1 Elements of NFMDLG

当外界角速度输入为 Ω 时,由于 Sagnac 效应,顺时针模式向低频位移 $S_F \Omega/2$,逆时针模式向高频位移 $S_F \Omega/2$,这里 S_F 表示环形腔的几何比例因子。左旋陀螺的拍频为:

$$\Delta \nu_L = \nu_F + S_F \Omega, \quad (1)$$

右旋陀螺的拍频为

$$\Delta \nu_R = \nu_F - S_F \Omega, \quad (2)$$

NFMDLG 的差频为

$$\Delta \nu_{DF} = 2 S_F \Omega, \quad (3)$$

通过差动可消除 ν_F ,因此 NFMDLG 不受 ν_F 变化的影响,而且转动灵敏度还提高了 1 倍。

2.2 模牵引效应对互易偏频的影响

图 1 中顺时针行波模的拍频为

$$\Delta \nu_C = \nu_R + \nu_F, \quad (4)$$

逆时针行波模的拍频为

$$\Delta \nu_A = \nu_R - \nu_F. \quad (5)$$

在 NFMDLG 中, ν_F 可以精确测量。首先,测量顺时针行波模的拍频,然后采用 ν_F 修正之后可得到精确的 ν_R ,因此下面就不再考虑 ν_F 对顺时针行波模拍频的影响。对常用的 90° 互易旋光有:

$$\nu_R = \frac{c}{2nL}, \quad (6)$$

式中: c 为真空光速, n 为环形腔的等效折射率, L 为环形腔的腔长。

模牵引效应的表达式为^[10]

$$\nu' - \nu = -\sigma(\nu' - \nu_0), \quad (7)$$

式中: ν 为空腔频率, ν' 为考虑模牵引后的激光振荡频率, σ 为频率牵引系数, ν_0 为增益曲线中心频率。

不妨设第 q 阶纵模分裂出的 4 个模位于增益带宽之内,且 LCP 模和 RCP 模分别位于增益曲线对称两侧,称 NFMDLG 工作于这种方式下为左旋方式。考虑模牵引效应后,模 1 和 4 的拍频为:

$$\Delta \nu = \nu_1' - \nu_4' = \nu_R - \sigma(\nu_1' - \nu_4'), \quad (8)$$

由于 σ 远小于 1,由式(8)得:

$$\Delta \nu = \frac{1}{(1+\sigma)} \nu_R \approx \nu_R (1-\sigma). \quad (9)$$

在 NFMDLG 正常工作时,程长控制电路维持纵模频率为 $qc/(nL) = \nu_0$,因此 ν_R 可看作常量。由于 ν_R 达数百 MHz,而 $\Delta \nu$ 的测量精度至少为 1 Hz,因此根据式(9)能够以较高的精度研究 σ 。

根据文献[10], σ 可近似为:

$$\sigma = \frac{\ln 2}{\pi^{3/2} nL \Delta \nu_0} \gamma \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}}, \quad (10)$$

式中: $\Delta \nu_0$ 为多普勒加宽, γ 为激光模单程损耗, I 为光强, I_s 为饱和光强。

将式(10)表示为:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\gamma}{\sqrt{T}} \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}}, \quad (11)$$

式中: σ_0 为式(10)中与光强、损耗和温度无关的部分; T 为绝对温度;这里利用了 $\Delta \nu_0$ 与 \sqrt{T} 的正比关系。

2.3 模牵引效应对零偏的影响

由图 1 可将 NFMDLG 4 个模的空腔频率分别表示为:

$$\begin{cases} \nu_1 = \nu_0 + \nu_d - \nu_R/2 - \nu_F/2 \\ \nu_2 = \nu_0 + \nu_d - \nu_R/2 + \nu_F/2 \\ \nu_3 = \nu_0 + \nu_d + \nu_R/2 - \nu_F/2 \\ \nu_4 = \nu_0 + \nu_d + \nu_R/2 + \nu_F/2 \end{cases},$$

其中: $\nu_d = \nu_q - \nu_0$,表示 4 个行波模的平均频率与增益曲线中心频率的偏离程度。

4 个模式的损耗可分别表示为:

$$\begin{cases} \gamma_1 = \gamma_0 + \gamma_{DPL} + \gamma_{DDL} + \gamma_{MCDL} \\ \gamma_2 = \gamma_0 + \gamma_{DPL} - \gamma_{DDL} - \gamma_{MCDL} \\ \gamma_3 = \gamma_0 - \gamma_{DPL} - \gamma_{DDL} + \gamma_{MCDL} \\ \gamma_4 = \gamma_0 - \gamma_{DPL} + \gamma_{DDL} - \gamma_{MCDL} \end{cases},$$

其中: γ_{DPL} , γ_{DDL} 和 γ_{MCDL} 分别为偏振差损、方向差损和磁圆二向色性差损^[4]。由于模牵引效应不能在差频中抵消,导致 NFMDLG 出现与差损有关的零偏。将 4 个模式的频率和损耗代入式(7),利用左旋陀螺拍频减去右旋陀螺拍频可求出差损对零偏的贡献为:

$$\Delta \nu_0 = -4 \sigma_0 \frac{\gamma}{\sqrt{T}} \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}} \left[\gamma_{MCDL} \frac{\nu_R}{2} + \gamma_{DPL} \frac{\nu_F}{2} + \gamma_{DDL} \nu_d \right],$$

如果再考虑到纵向磁场导致的增益曲线的塞曼分裂,上式应表示为^[4]

$$\Delta \nu_0 = -4 \sigma_0 \frac{\gamma}{\sqrt{T}} \sqrt{1 + \frac{I}{I_s}} \cdot \left[\gamma_{MCDL} \frac{\nu_R}{2} + \gamma_{DPL} \left(\frac{\nu_F}{2} + \frac{\nu_Z}{2} \right) + \gamma_{DDL} \nu_d \right], \quad (12)$$

式中: ν_Z 为正、负旋增益曲线的塞曼分裂频率,推导时假定 4 个模的光强相同。由于 NFMDLG 工作时左、右旋模式几乎对称分布在增益曲线两边,而差损很小,该条件可以得到较好的满足。

采用色散平衡技术^[11],即外加磁场使 $\nu_F + \nu_Z = 0$,再考虑到 NFDLG 正常工作时 ν_0 近似为 0,这时 $\Delta\nu_0$ 可化为

$$\Delta\nu_0 = -2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}, \quad (13)$$

再将 NFMDLG 中与差损无关的零偏项^[12]加上得到 NFMDLG 的总零偏为:

$$\Delta\nu_{LCP} = (S_{FCL} - S_{FCR})(\nu_F - \nu_Z) - 2k\nu S_{FC} - 2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}, \quad (14)$$

式中: S_{FC} 为相对比例因子修正, S_{FCL} 和 S_{FCR} 分别为左、右旋陀螺的比例因子修正, $2k\nu S_{FC}$ 是朗缪尔流零偏项。

当图 1 中的第 q 阶模的 RCP 对模和 $q+1$ 阶纵模的 LCP 对模落在增益带宽之内,即 NFMDLG 工作在右旋方式时,总零偏可表示为:

$$\Delta\nu_{RCP} = (S_{FCL} - S_{FCR})(\nu_Z - \nu_F) - 2k\nu S_{FC} + 2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}. \quad (15)$$

将 $\nu_F + \nu_Z = 0$ 的条件代入,这时式(14)和(15)化为:

$$\Delta\nu_{LCP} = -2k\nu S_{FC} - 2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}, \quad (16)$$

$$\Delta\nu_{RCP} = -2k\nu S_{FC} + 2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}, \quad (17)$$

由式(16)和(17)表明 LCP 模位于增益曲线左边时和位于增益曲线右边时 NFMDLG 的零偏不同,产生差别的主要原因是 γ_{MCDL} 导致的零偏。

定义平均零偏为:

$$\Delta\nu_{AVE} = \frac{\Delta\nu_{LCP} + \Delta\nu_{RCP}}{2} = -2k\nu S_{FC}, \quad (18)$$

定义平均零偏差为:

$$\Delta\nu_{DAVE} = \frac{\Delta\nu_{RCP} - \Delta\nu_{LCP}}{2} = 2\nu_R\sigma\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma}, \quad (19)$$

由式(9)和(19)可知 $\Delta\nu$ 和平均零偏差 $\Delta\nu_{DAVE}$ 都与 σ 成线性关系。

2.4 Verdet 常量色散引入的零偏与扣除方法

NFMDLG 采用法拉第效应产生非互易偏频,由于 Verdet 常量的色散以及左、右旋陀螺谐振频率的不同,左、右旋陀螺的偏频量稍有不同,在差频中不能完全抵消而导致零偏。

对于 NFMDLG 偏频的候选玻璃如石英玻璃和稀土玻璃,其 Verdet 常量在 633 nm 波长处

近似满足下式^[13],

$$V = \frac{K}{\lambda^2}, \quad (20)$$

式中: K 为与法拉第玻璃材料有关的比例系数, λ 为波长。

法拉第偏频为:

$$\nu_F = \frac{c}{\pi L} V B l, \quad (21)$$

式中: B 为磁感应强度, l 为法拉第腔片长度。

由式(5)、(6)式得左、右陀螺的法拉第偏频差为

$$\Delta\nu_F = \frac{\lambda}{L} \nu_F. \quad (22)$$

由于 Verdet 常量的色散与增益介质无关,因此 $\Delta\nu_F$ 和增益介质无关。实验用 NFMDLG 的 ν_F 为 628 kHz, $\Delta\nu_F$ 的数值约为 2.1 Hz。根据式(20)可知,位于增益曲线高频一侧的陀螺偏频量稍大,测试电路得到的差频如果是高频陀螺减去低频陀螺的拍频,则 $\Delta\nu_F$ 为正;否则为负。下面给出实际的判别方法。

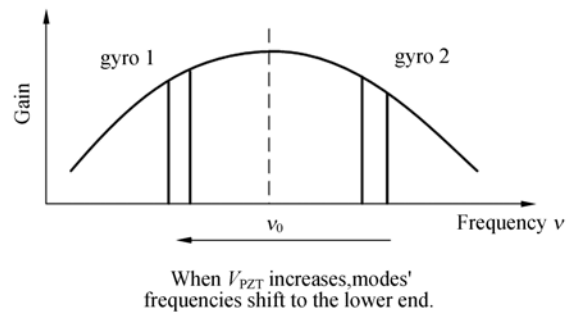


图 2 PZT 电压和模式位置

Fig. 2 PZT voltage and modes' position

(1)根据腔平移镜所用 PZT 的性质可知腔长与 PZT 电压的关系,对本文所用 NFMDLG, PZT 电压增加腔长增加,这时模式在频率轴上向低频方向移动,如图 2 所示。

(2)测试电路可提供陀螺 1 和陀螺 2 的光强与频差,而 NFMDLG 正常工作时只有 4 个模位于增益曲线的出光带宽内,因此在 V_{PZT} 增大时,如果陀螺 1 光强逐渐增大,则表明陀螺 1 位于增益曲线高频侧,反之陀螺 2 位于增益曲线高频侧。

3 实验与结果

3.1 实验系统设计

实验设计如图 4 所示。棱镜组件和读出系统提供 ν_f , 程长控制电路通过控制腔平移镜上安装的压电陶瓷(PZT)以稳定程长,从而使左、右旋陀螺分别稳定地工作在增益曲线基本对称的两侧。光电二极管 1 和 2 接收的光信号经高频放大后送入到 EIP25 微波频率计,通过比较两者拍频的大小确定是靠增益中心的一对模还是另一对模,然后用修正微波频率计所测频率得到 $\Delta\nu$ 。光电二极管 3 接收的光信号经低频放大后用万用表测量光强电压。NFMDLG 放在温度试验箱内,电路放在温度试验箱外。

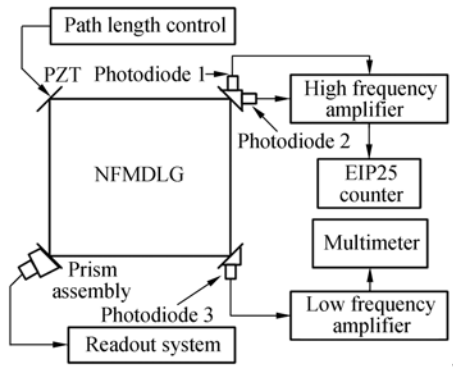


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.2 改变放电电流的实验

在 40 °C 的恒温下,将放电电流从 0.5 mA 改变到 0.7 mA,在每个电流下测试左、右旋工作方式的零偏、直流光强和 $\Delta\nu$ 。每个数值都取 100 s 的平均值以减小噪声的影响。实验结果见表 1。表中平均零偏差已按式(22)扣除 $\Delta\nu_f$ 的影响,平

表 1 变电流时实验结果

Tab.1 Experimental results for discharge current variation

Current /mA	Light intensity/ $\sqrt{\text{V}}$	Average bias/difference/Hz	Average bias/Hz	$\Delta\nu$ /Hz
0.5	0.244 4	7.948 5	4.963 2	730 304 255
0.6	0.288 4	8.194 5	4.957 5	730 303 081
0.7	0.334 0	8.417 3	4.962 6	730 301 988

均零偏含有地球自转分量的影响,由于它可看做一个常量,因此本文没有特意剔除,对表 2 中数据也做相同处理。

3.3 改变温度的实验

将放电电流设定为 0.6 mA,利用温度试验箱将环境温度从 10 °C 改变到 60 °C,在每个温度点下测试左、右旋工作方式的零偏和。每个数值都取 100 s 的平均值。实验结果见表 2。

表 2 变温时实验结果

Tab.2 Experimental result for temperature variation

Temperature /°C	Average bias difference/Hz	Average bias/Hz	Reciprocal splitting/Hz
10	8.705 5	5.006 8	730 301 041
20	8.535 3	4.990 7	730 301 633
30	8.369 7	4.967 8	730 302 302
40	8.194 5	4.957 5	730 303 081
50	8.027 1	4.951 1	730 303 793
60	7.884 1	4.949 9	730 304 384

根据表 1 和表 2 的数据可得:

(1) $\Delta\nu_{AVE}$ 几乎不随放电电流而变,随温度的变化也很小,而 $\Delta\nu_{DAVE}$ 随电流增加而增大,随温度增加而减小,与式(7)中 σ 随放电电流和温度的变化规律一致。根据式(9) $\Delta\nu$ 随电流和温度的变化规律与 $\Delta\nu_{DAVE}$ 的变化规律方向相反。

(2) 由于 $\Delta\nu_{DAVE}$ 和 $\Delta\nu$ 都与 σ 是线性关系,而且除 σ 外,其它部分与温度和电流无关,因此很容易推出电流变化时 $\Delta\nu_{DAVE}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化率应等于温度变化时 $\Delta\nu_{DIFF}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化率。

电流变化时 $\Delta\nu_{DAVE}$ 随 $\Delta\nu$ 的一次拟合曲线为 $\Delta\nu_{DIFF} = -2.06 \times 10^{-4} \Delta\nu + 150\ 837$,残差范数为 0.002,温度变化时半零偏差随互易偏频的一次拟合曲线为 $\Delta\nu_{DIFF} = -2.57 \times 10^{-4} \Delta\nu + 187\ 864$,残差范数为 0.038。可以看到两条拟合曲线非常接近,但电流变化时的拟合曲线残差更小,这是由于电流变化时陀螺体仍处于恒温,而温度变化时其它参量如腔损会发生变化。

根据拟合曲线的比例系数以及式(9)和(19)可知:

$$\frac{\gamma_{MCDL}}{\gamma} = \frac{1}{2} \times 2.06 \times 10^{-4} \approx 10^{-4}.$$

因此,利用互易偏频的辅助信息不仅可证明 γ_{MCDL} 的存在,还可求出其大小。

(3) 由于互易偏频和零偏都与 σ 相关,用互易偏频既可补偿温度变化导致的零偏变化也可补偿放电电流变化导致的零偏变化。NFMDLG 在实际应用时,只能选择左、右旋方式之一,不妨选择左旋方式,这时的零偏是平均零偏和平均零偏差之和。利用变温时所测数据建立二次多项式补偿模型,如图 4 所示。为了显示出横坐标细节,图中横坐标都减去了一个常量 730 300 000 Hz 补偿残差 < 0.01 Hz。

用图 4 所建立的多项式模型补偿电流变化导致的零偏变化,补偿残差如图 5 所示。补偿后零偏最大值与最小值之差从 0.47 Hz 减小到 0.09 Hz。实际上,现在激光陀螺高压稳流电源的电流稳定度达 10^{-4} ,根本不会出现 0.1 mA 量级的变化。但随着陀螺工作时间的增加,同样放电电流下的实际增益可能会缓慢降低,表现在 σ 中 I 的变化,而利用互易偏频和零偏与的固定关系进行

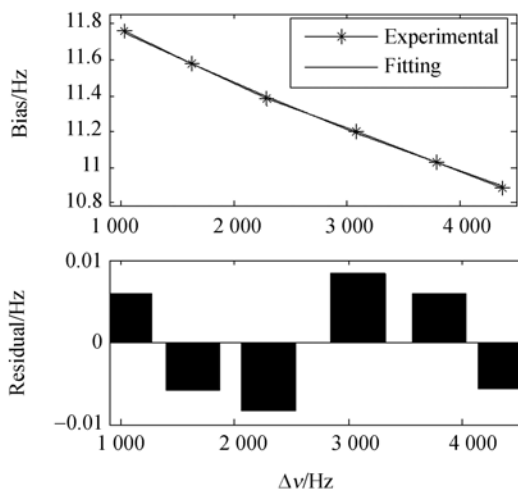


图 4 2 次多项式温度补偿结果

Fig. 4 Temperature compensation result with 2 power polynomial

参考文献:

- [1] 金靖, 张忠钢, 王峥, 等. 基于 RBF 神经网络的数字闭环光纤陀螺温度误差补偿[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 235-240.
JIN J, ZHANG Z G, WANG Z, et al.. Temperature error compensation for digital closed-loop fiber optic gyroscope based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 235-240. (in

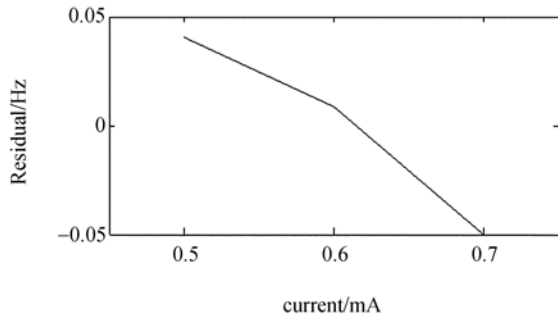


图 5 对电流变化补偿结果

Fig. 5 Compensation result for current variation

补偿就体现出了一定的优势。

误差分析:做一个保守估计,设程长控制的误差导致稳频误差为 10 MHz, τ_R 的变化要小 2q 倍,为 10 Hz 的数量级,而温度和电流变化时 σ 的变化远大于 10 Hz,因此式(9)中的变化主要来自 σ 的变化。

5 结 论

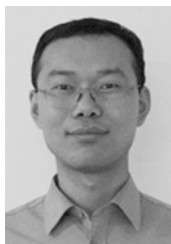
根据激光色散的经典理论,分析了模牵引效应对互易偏频和零偏的影响。证明 NFMDLG 的零偏随电流和温度变化的最主要原因是存在磁圆二向色性差损 γ_{MCDL} ,并提出了一种精确测量 γ_{MCDL} 的方法。实测结果表明,对本文实验所用的 NFMDLG, γ_{MCDL} 约为腔损的万分之一。在 γ_{MCDL} 难以消除的情况下,提出利用互易偏频补偿零偏的方法。对本实验室所产 NFMDLG,采用多项式模型对温度变化导致的零偏补偿后残差小于 0.01 Hz,电流变化导致的零偏经补偿后降低了 4/5,表明利用互易偏频可有效补偿模牵引效应随温度和电流变化而导致的零偏。

Chinese)

- [2] 吕少麟,谢玲,陈家斌. 晃动基座下激光陀螺捷联导航系统初始对准的预滤波[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2520-2527.
LV S L, XIE L, CHEN J B. Prefiltering for initial alignment of ring laser gyroscope SINS on rocking base [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2520-2527. (in Chinese)
[3] 于旭东,龙兴武,汤建勋. 机械抖动激光陀螺的随机

- 振动响应分析[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1760-1766.
- YU X D, LONG X W, TANG J X. Random vibration analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1760-1766. (in Chinese)
- [4] LOUKIANOV D, RODLOFF R, SORG H, *et al.*. Optical Gyros and Their Application [R]. RTO AGAR *Dograph* 339, 1999; 4. 1-4. 26.
- [5] 金世龙, 李晓红, 杨开勇, 等. 四频差动激光陀螺法拉第旋光片的加工[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 22-25.
- JIN SH L, LI X H, YANG K Y, *et al.*. Arts of Faraday effect element of the four mode RLG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 22-25. (in Chinese)
- [6] <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/ln100g/index.html> [EB/OL].
- [7] 张鹏飞. 二频机抖激光陀螺捷联惯导系统及其实时温度补偿方法的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- ZHANG P F. *Research on strapdown inertial navigation system with mechanically dithered ring laser gyroscope and its real-time temperature compensating approach* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [8] 葛文涛, 陈明刚, 林玉荣, 等. 三轴激光陀螺温度误差动态建模及补偿技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1509-1514.
- GE W T, CHEN M G, LIN Y R, *et al.*. Dynamic modeling and compensation for thermal error of three-axis ring laser gyro [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1509-1514. (in Chinese)
- [9] 吴国勇, 顾启泰. 四频激光陀螺和频与温度关系的研究[J]. 光学技术, 2002, 28(6): 508-512.
- WU G Y, GU Q T. Research on the relation of frequency sum to temperature in the four frequency RLG [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(6): 508-512. (in Chinese)
- [10] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 4版. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- ZHOU B K, GAO Y ZH, CHEN T R, *et al.*. *Laser Principle* [M]. forth ed. Beijing: Press of Defense Technology, 2000: 184-185. (in Chinese)
- [11] 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.
- WANG ZH G, LONG X W, WANG F. Dispersion equalization of four-frequency differential laser gyroscope with non-planar resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2892-2897. (in Chinese)
- [12] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985, 94-107.
- JIANG Y N. *Ring Laser Gyro* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985: 94-107. (in Chinese)
- [13] GAN F X, XU L. *Photonic Glasses* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2006: 17.

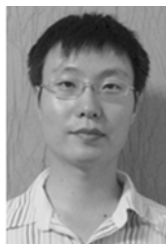
作者简介:



汪之国(1982—),男,山东临清人,博士研究生,2003年于吉林大学获得学士学位,主要从事激光与光电子学方面的研究。E-mail: maxborn@163.com



龙兴武(1958—),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师,1984年于华中科技大学获硕士学位,1993年于国防技术大学获博士学位,主要从事激光与光电子学方面的研究。E-mail: xwlong110@sina.com



王飞(1979—),男,陕西宝鸡人,讲师,博士研究生,2000年、2003年于国防科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事激光与光电子学方面的研究。E-mail: arthurwang@163.com