

机抖激光陀螺锁区补偿的理论研究

樊振方 罗 晖 卢广锋 胡绍民

(国防科学技术大学光电学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 二频机抖陀螺具有较高的精度,但在每个抖动周期需要两次通过锁区,会丢失部分信息,从而带来了过锁误差。噪声注入只能将误差随机化,并不能从根本上消除误差。根据锁区方程阐述了锁区对机抖陀螺精度的影响。对二频机抖陀螺的锁区补偿方案进行了理论研究。采用零速率点恒加速近似得到了过锁误差的信号表征方法。数值分析表明该锁区补偿方法在各种外界输入转速下都是有效的。

关键词 测量;信号处理;激光陀螺;过锁误差补偿

中图分类号 TN212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112006

Theoretical Research on Lock-in Error Compensation for Mechanical Dithered Ring Laser Gyro

Fan Zhenfang Luo Hui Lu Guangfeng Hu Shaomin

(College of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The mechanical dither ring laser gyro (MDRLG) can achieve high accuracy. But the MDRLG must go across lock-in region twice every dither cycle, thus the information loss is inevitable. Random noise injection in the dither amplitude can only cancel the accumulation of lock-in error, but not the error itself. According to the lock-in equation, the side effect of lock-in phenomenon is interpreted in detail. Theoretical research on lock-in error compensation for MDRLG is carried out. Taking the constant acceleration approximation in lock-in region, the lock-in error representation is obtained. Numerical simulation results show that even in different input angle rates, the compensation is also very effective.

Key words measurement; signal processing; laser gyro; lock-in error compensation

OCIS codes 120.4640; 140.3560; 060.2800

1 引 言

激光陀螺是惯性导航等应用中的基础元件。当基本工艺成熟后,激光陀螺正在朝高精度方向发展^[1~3]。在激光陀螺中,由于背向散射和非均匀损耗的存在,当输入转速低于某一阈值时,陀螺中的正逆行光束会产生同步现象,即闭锁现象^[4~9]。低于这一阈值的工作区域称为锁区。为了消除锁区的影响,必须采取偏频措施才能使激光陀螺有较好的工作性能^[10,11]。二频机械抖动激光陀螺具有温度性能好、零位重复性好等许多优点,是精度较高的偏频方案之一,是目前应用最为广泛的激光陀螺^[12]。它

去除了腔内元件,依靠外界小振幅高频率的抖动来提供偏置^[13],但是缺点是陀螺在每个抖动周期需要两次通过锁区,会丢失部分信息,从而带来了过锁误差,这是二频机抖陀螺在高精度应用中所面临的最大问题。

研究表明在二频机抖陀螺中,采用纯正弦偏频时会产生动态闭锁,即当引入纯正弦偏频时在零转速附近输出拍频信号仍然可能为零^[14]。动态锁区在指北仪等应用中是一个较为严重的问题。为了消除动态锁区较好的办法是向正弦抖动信号中注入随机噪声与阶梯噪声^[15]。但是这是一种消极的技术

收稿日期: 2011-05-16; **收到修改稿日期**: 2011-06-13

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介: 樊振方(1984—),男,博士研究生,主要从事高精度激光陀螺信号处理方面的研究。E-mail: nudtfzj@126.com

导师简介: 罗 晖(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事激光陀螺及其应用等方面的研究。

E-mail: luohui.luo@163.com

方案,虽然注入噪声后误差不再以累积的方式增长,却在角速率上引入了白噪声,表现在角度上是一种低频的不确定性游走^[16]。当噪声注入不能完全随机化时,还会引入其他误差因素。

根据拍频方程,二频机抖陀螺的过锁误差主要集中在过锁区瞬间,如果采用较为合理的近似,二频机抖陀螺的过锁误差是可以测量、可以表示的,并且可以得到有效补偿。相对于噪声注入,这种补偿是根本,彻底的误差消除途径。文献[17]指出,如果认为过锁区时的加速度是不变的,采用菲涅耳积分可以得到过锁误差的表达式。文献[18]对消除闭锁误差的方法做了初步探索。文献[19]提出了一种利用波形面积来计算过锁误差的方法,但在实际应用中为了得到拍频信号,往往采用交流耦合方式得到信号波形,过锁区的信号畸变严重,采用该方法将不能评估过锁误差。国内外已经对锁区补偿有了初步的研究,但这些研究未对锁区补偿的有效性和可行性作深入的研究,模型过于理想化。本文结合激光陀螺的锁区方程,从理论上研究二频机抖陀螺的锁区补偿,对锁区补偿的精度和误差做定量计算,不仅解决了零速率点附近的锁区补偿问题,而且得到了在转速较大时的补偿方法。

2 基本理论

单对模激光陀螺的拍频方程为^[20]

$$\dot{\psi} = K(\Omega_{in} + \Omega_L \cos \psi), \quad (1)$$

式中 ψ 为激光陀螺输出正、逆行光的相位差,其单位是 rad; Ω_{in} 为外界输入角速度,其单位为 rad/s; K 为标度系数,其表达式为^[20]

$$K = (1 + S_{FC}) \frac{8\pi S}{\lambda \langle L \rangle}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长; S 为环路面积; $\langle L \rangle$ 为环路周长; S_{FC} 为比例因子修正项,它是由增益介质的作用引起的。标度系数是一个没有单位的量,它只起增益的作用,例如在某型陀螺中其值为 694000,可见激光陀螺能够将微弱转动信号放大,具有较高的灵敏度。

当外界转速低于 Ω_L 时,顺时针方向运行的光和逆时针方向运行的光会产生同步,即二者之间不再有频率差,外界转速得不到有效感知。为此要采取偏频措施。机械抖动是目前精度最高的偏频方式之一,当加入抖动偏频后(1)式变为^[17]

$$\dot{\psi} = K(\Omega_{in} + \Omega_L \cos \psi + \Omega_d \cos \omega_d t), \quad (3)$$

式中 Ω_d 为抖动的峰值速率,其值可以达到 200 °/s; ω_d 为抖动频率,其值一般在 200~2000 Hz 之间。

Chow^[21] 经过较为巧妙的推导,得出在正弦偏频下陀螺的输出具有和下式相同的误差:

$$\dot{\psi} = K \left[\Omega_{in} + \Omega_L J_0 \left(\frac{K\Omega_d}{\omega_d} \right) \cos \psi \right], \quad (4)$$

式中 J_0 表示零阶贝塞尔函数。可见引入正弦偏频后,原来的锁区 Ω_L 变成了 $\Omega_L J_0 \left(\frac{K\Omega_d}{\omega_d} \right)$, 当 $\frac{K\Omega_d}{\omega_d}$ 取较大的值时, $J_0 \left(\frac{K\Omega_d}{\omega_d} \right) \ll 1$, 从而使锁区得到大大压缩。常常把 $\Omega_L J_0 \left(\frac{K\Omega_d}{\omega_d} \right)$ 项称为动态锁区。虽然锁区已经减小很多,但是动态锁区的存在仍会限制激光陀螺的测量精度^[22]。动态锁区实质上是由于过锁区时相位误差的累积造成的。

如果认为激光陀螺过锁区时的加速度是不变的,则可认为过锁区时的相位的曲线为抛物线^[23,24]。文献[20]得到了过锁误差的表达式。正向过锁区时的误差为

$$\Delta E^+ = \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^+}} \cos \left(\psi_{0+} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (5)$$

式中 ψ_{0+} 为正向过锁区回头点的相位, $\dot{\psi}^+$ 为正向过锁区时的相位加速度。负向过锁区时的误差为

$$\Delta E^- = \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^-}} \cos \left(\psi_{0-} - \frac{\pi}{4} \right), \quad (6)$$

式中 ψ_{0-} 为负向过锁区回头点的相位, $\dot{\psi}^-$ 为负向过锁区时的相位加速度。

为了消除动态闭锁误差,可以向抖动驱动信号中注入随机噪声,使过锁区时的相位随机化^[15], 这时过锁区时的误差将不再以累积的方式增长。假设过锁区时的误差被完全随机化,则过锁区时误差的方差为^[16]

$$\sigma^2(\Delta E) = \frac{\pi \Omega_L^2}{\dot{\psi}}, \quad (7)$$

单位时间之内的方差为

$$D(\Delta E) = \frac{2f_d \pi \Omega_L^2}{\dot{\psi}}, \quad (8)$$

式中

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi}. \quad (9)$$

可得随机游走系数为

$$C_{RW} = \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi f_d}{\dot{\psi}}}. \quad (10)$$

设抖动的幅度为 A , 单位为 rad, 则

$$\dot{\psi} = KA(2\pi f_d)^2. \quad (11)$$

(10)式可变为

$$C_{RW} = \Omega_L \sqrt{\frac{1}{2\pi K A f_d}}, \quad (12)$$

若取抖动的幅度为 125 个脉冲, 抖动频率为 400 Hz 可以得到

$$C_{RW} = \Omega_L \times 1.19 \times 10^{-5} \sqrt{h}. \quad (13)$$

假设激光陀螺的锁区为 $100^\circ/h$, 则其随机游走为 $(1.2 \times 10^{-3})^\circ/\sqrt{h}$. 可见通过噪声注入并不能根本消除过锁时产生的误差, 只不过将它随机化了. 只有通过锁区补偿才能从根本上消除随机游走, 进一步提高二频机抖陀螺的精度.

3 激光陀螺的锁区补偿方法

从(5),(6)式可以看到过锁区时的误差和过锁相位的加速度有关, 因此得到过锁区时的相位加速度很有必要. 忽略锁区项, 则(3)式可以表达为

$$\dot{\psi} = K(\Omega_{in} + \Omega_d \cos \omega_d t). \quad (14)$$

当 Ω_{in} 为常值时, 对(14)式求导可得

$$\ddot{\psi} = -K\Omega_d \omega_d \sin \omega_d t, \quad (15)$$

当 $\dot{\psi} = 0$ 时, 由(14)式可得

$$\Omega_{in} + \Omega_d \cos \omega_d t = 0, \quad (16)$$

解得

$$\ddot{\psi} = K\omega_d \sqrt{\Omega_d^2 - \Omega_{in}^2}. \quad (17)$$

可见过锁区时的误差不仅与过锁相位有关, 而且与过锁区时的外界输入转速有关. 需要注意的是得到(5),(6)式的前提条件是过锁区时角加速度为恒定值, 在零速率输入时这一条件是满足的; 在非零速率时, 由于锁区穿越时间非常短, 过锁区时的加速度也可以认为是恒定的, 这一点将在数值计算中说明.

如果能够得到(5),(6)式的准确值, 便能够对锁区进行补偿. 实际上激光陀螺的实际相位值是很难得到的. 通过激光陀螺的读出机构能够得到两路正交的拍频信号, 设其中一路拍频信号的相位是 ψ_H , 则另一路拍频信号的相位是 $\psi_H + \pi/2$, 如果一路测量的是 $\sin \psi_H$, 则另一路测量的是 $\cos \psi_H$. ψ_H 与拍频方程中的 ψ 正好相差一个常数 ϵ , 即

$$\psi = \psi_H + \epsilon. \quad (18)$$

将(18)式代入(5)式得

$$\begin{aligned} \Delta E^+ = & \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^+}} \cos\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \cos \psi_{H0+} - \\ & \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^+}} \sin\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \sin \psi_{H0+}. \end{aligned} \quad (19)$$

将(18)式代入(6)式得

$$\begin{aligned} \Delta E^- = & \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^-}} \cos\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \sin \psi_{H0-} + \\ & \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}^-}} \sin\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \cos \psi_{H0-}. \end{aligned} \quad (20)$$

在转速恒定不变的情况下,

$$\dot{\psi}^+ = \dot{\psi}^- = \dot{\psi}. \quad (21)$$

令

$$\begin{cases} a = \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}}} \cos\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \\ b = \Omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}}} \sin\left(\epsilon + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}, \quad (24)$$

则 a, b 在静态短时间之内可以看作常数. 在一个抖动周期之内可以得到总误差信号为

$$\begin{aligned} \Delta E = & a(\cos \psi_{H0+} + \sin \psi_{H0-}) + \\ & b(-\sin \psi_{H0+} + \cos \psi_{H0-}). \end{aligned} \quad (23)$$

令

$$\begin{cases} P_1 = \cos \psi_{H0+} + \sin \psi_{H0-} \\ P_2 = -\sin \psi_{H0+} + \cos \psi_{H0-} \end{cases}, \quad (24)$$

那么(23)式可以简化为

$$\Delta E = aP_1 + bP_2. \quad (25)$$

(25)式即是实际可用的锁区补偿方法. 从陀螺的输出中实时减去得到的过锁误差信号, 即可实现锁区丢失信息的补偿.

4 锁区补偿的数值计算

数值计算的目的是验证锁区恒加速近似的可行性并对锁区补偿的效果进行仿真. 仿真中取 $\Omega_L = 100^\circ/h$, 抖动的频率为 400 Hz, 抖动的幅度为 125 个脉冲. 为了使误差随机化, 抖动信号中已注入噪声. 通过对(3)式中的误差项 $\Omega_L \cos \psi$ 进行积分可以得到实际的误差信号, 即

$$\Delta E_{\text{real}} = \int \Omega_L \cos \psi dt. \quad (26)$$

实际的误差信号将用来与补偿得到的误差信号对比, 验证锁区补偿的有效性.

4.1 恒加速近似的可行性

(5),(6)式是在假设过锁区时的相位加速度为恒定值的条件下得到的. 为了验证这种假设的可行性, 同时画出相位加速度和误差累积量的曲线, 如图 1 所示. 图 1(a) 的输入角速率为 $15^\circ/h$, 等效于地球的转动, 是一个较小的值; 图 1(b) 的输入角速率为 $20^\circ/s$, 是一个较大的值.

从图 1 可以看出,误差累积的阶跃时间非常短暂.为了进一步观察过锁区时的加速度变化,将图 1 的局部放大,得到图 2.过锁区时误差累积主要集中在过锁区的瞬间,因此只观察过锁前后第二个峰值之间的加速度变化.定义加速度的变化范围为

$$\eta = \frac{\ddot{\psi}_{\max} - \ddot{\psi}_{\min}}{\ddot{\psi}_{\max} + \ddot{\psi}_{\min}}. \quad (27)$$

当 $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$ 时,在图 2(a)中可以得到

$$\eta = \frac{4.963 \times 10^9 - 4.932 \times 10^9}{4.963 \times 10^9 + 4.932 \times 10^9} = 0.3\%. \quad (28)$$

当 $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$ 时,在图 2(b)中可以得到

$$\eta = \frac{4.96 \times 10^9 - 4.82 \times 10^9}{4.96 \times 10^9 + 4.82 \times 10^9} = 1.4\%. \quad (29)$$

从上述结果可以看出,即使在较大的转速下恒加速近似地是有效的.

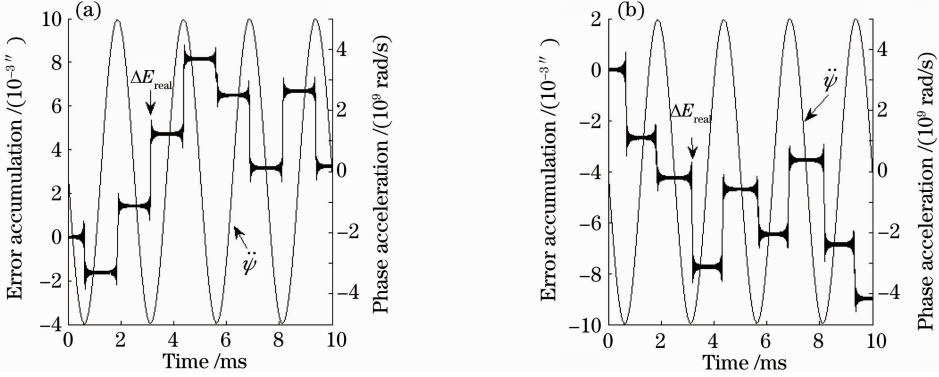


图 1 误差累积和相位加速。(a) $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$; (b) $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$

Fig. 1 Error accumulation and phase acceleration. (a) $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$; (b) $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$

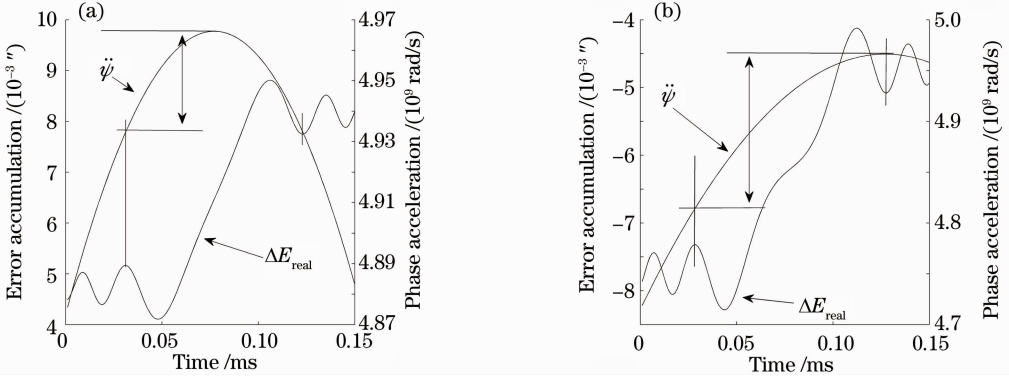


图 2 图 1 的局部放大。(a) $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$; (b) $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$

Fig. 2 Partial amplification of Fig. 1. (a) $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$; (b) $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$

4.2 锁区补偿效果

在(22)式中取偏移角 ϵ 的值为 0,在 $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$ 和 $\Omega_{in} = 20^\circ/\text{s}$ 两种情况下验证锁区补偿的有效性.在式中对每个抖动周期的 aP_1 值进行累计得到 a_1 ,对 bP_2 进行累计得到 a_2 . a_1 与 a_2 的和为补偿量的累计值,用于补偿过锁区时产生的角度误差.

图 3 为 $\Omega_{in} = 15^\circ/\text{h}$ 时的仿真计算结果,仿真时间为 10 ms.图 3(a)为实际的过锁误差累计值,即 ΔE_{real} ;图 3(b),(c)分别为补偿量 aP_1 与 bP_2 的累计值,即 a_1 与 a_2 ;图 3(d)为 a_1 与 a_2 的加和,即过锁误差的补偿量 ΔE 的累计值.比较图 3(a)与(d),可以看到图 3(d)除了没有过锁时的大幅度波动之外,二者在趋势上是吻合的.图 4 与图 3 类似,为 $\Omega_{in} =$

20 $^\circ/\text{s}$ 时的仿真计算结果.

将图 3(a)与(d)相减可以得到补偿后的误差曲线,如图 5(a)所示.可以看到在图 5(a)中过锁时产生的误差被完全补偿,只残留一些过锁区时的波动.将图 4(a)与(d)相减得到补偿后的误差曲线,如图 5(b)所示.可以看到即使在外界输入角速度比较大时,过锁误差也可以被很好地补偿.

为了进一步验证锁区补偿的效果,将时间延长为 5 s,结果如图 6 和图 7 所示,输入速率分别为 $15^\circ/\text{h}$ 和 $20^\circ/\text{s}$.图 6(a)与图 7(a)为实际的过锁区误差累积,可以看到随机的过锁误差会使得陀螺的输出角度值产生低频的不确定性游走.图 6(b)与图 7(b)为经过误差补偿后的残余误差,可见经过补

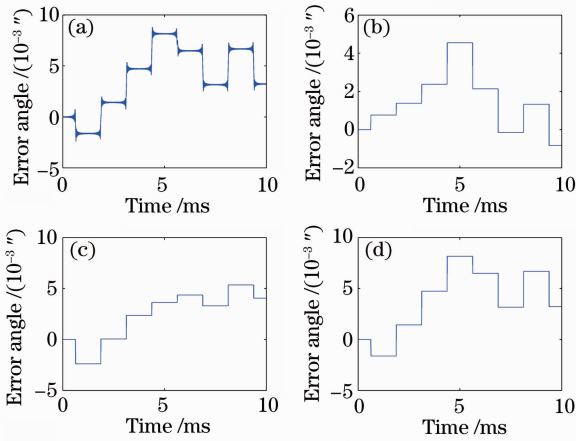


图3 过锁误差累积量($\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$)。(a)真实的误差累积量;(b)误差累积量1;(c)误差累积量2;(d)误差累积量1与误差累积量2之和

Fig. 3 Lock-in error accumulations ($\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$). (a) Real error a_{real} ; (b) error a_1 ; (c) error a_2 ; (d) error $a_1 + a_2$

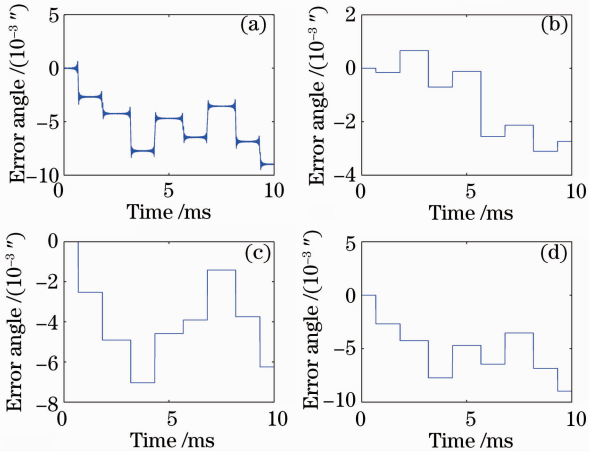


图4 过锁误差累积量($\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$)。(a)真实的误差累积量;(b)误差累积量1;(c)误差累积量2;(d)误差累积量1与误差累积量2之和

Fig. 4 Lock-in error accumulations ($\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$). (a) Real lock-in error a_{real} ; (b) error a_1 ; (c) error a_2 ; (d) error $a_1 + a_2$

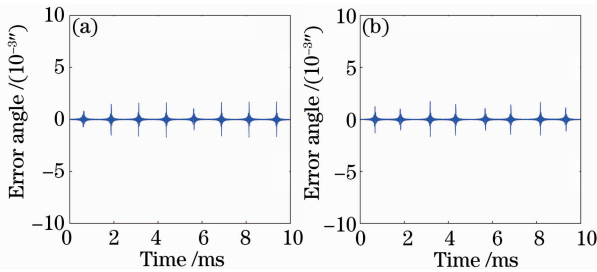


图5 锁区补偿之后的误差累积量。(a) $\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$;
(b) $\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$

Fig. 5 Lock-in error after compensation. (a) $\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$; (b) $\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$

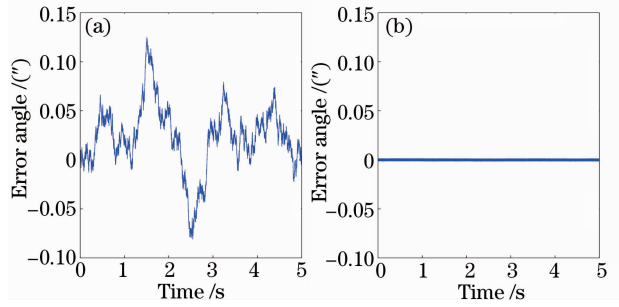


图6 $\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$ 时的长时间锁区补偿效果。(a)实际的过锁误差累积量;(b)补偿后的过锁误差累积量

Fig. 6 Effect of lock-in error compensation in long run when $\Omega_m = 15^\circ/\text{h}$. (a) Real lock-in error accumulations; (b) error accumulations after compensation

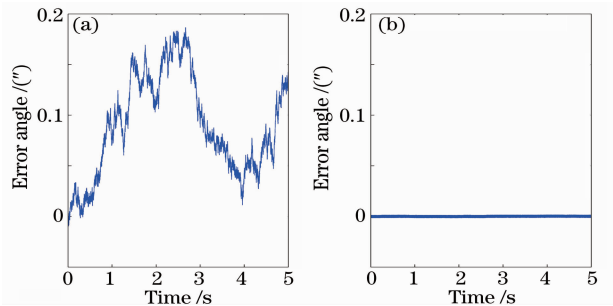


图7 $\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$ 时的长时间锁区补偿效果。(a)实际的过锁误差累积量;(b)补偿后的过锁误差累积量

Fig. 7 Effect of lock-in error compensation in long run when $\Omega_m = 20^\circ/\text{s}$. (a) Real lock-in error accumulations; (b) error accumulations after compensation

偿后随机游走已经不复存在,补偿的效果非常明显。

5 结 论

过锁误差是影响二频机抖陀螺精度的重要因素,若过锁误差能够得到补偿,便可进一步提高激光陀螺的精度。从理论上指出了过锁误差主要集中在过锁区的瞬间,过锁误差呈现短暂阶跃特性。详细阐述了在非零转速下的过锁误差补偿方法。数值计算表明该方法能够在各种输入转速下有效消除过锁区时的阶跃误差,能够从根本上减小激光陀螺中由随机抖动引起的随机游走。

参 考 文 献

- 1 Wang Guochen. Analysis of performance of four-mode laser gyro's null shift in different modes under high-low temperature process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2295~2298
王国臣. 四频激光陀螺不同工作模式下零漂的高低温性能分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2295~2298
- 2 Zhan Dejun, Qin Shiqiao, Wang Xingshu *et al.*. Harmonic measurement for laser gyro lock-in [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 960~964
战德军, 秦石乔, 王省书 等. 激光陀螺锁区的谐波测量方法 [J].

- 光学学报, 2009, **29**(4): 960~964
- 3 Fan Zhenfang, Luo Hui, Hu Shaomin. Self phase lock dither stripping technique in mechanical dithered ring laser gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 214~218
樊振方, 罗 晖, 胡绍民. 二频机抖陀螺的自锁相抖动剥除[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 214~218
- 4 R. J. C. Spreeuw, R. Centeno Neelen, N. J. van Druuten *et al.*. Mode coupling in a He-Ne ring laser with backscattering [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(7): 4315~4324
- 5 F. Aronowitz. Mode coupling due to backscattering in a He-Ne traveling-wave ring laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9**(1): 55~58
- 6 F. Aronowitz. Loss lock-in in the ring laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(6): 2453~2456
- 7 L. N. Mengozzi, W. E. Lamb. Theory of a ring laser [J]. *Phys. Rev.*, 1973, **8**(4): 2103~2125
- 8 R. Adler. A study of locking phenomena in oscillators [J]. *Proc. IEEE*, 1973, **61**(10): 1380~1385
- 9 R. Rodloff. A laser gyro with optimized resonator geometry [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **23**(4): 438~445
- 10 J. J. Krebs, W. G. Maisch, G. A. Prinz *et al.*. Applications of magneto-optics in ring laser gyroscopes [J]. *IEEE Trans. Magn.*, 1980, **16**(5): 1179~1184
- 11 R. A. Patterson, B. Ljung, D. A. Smith. Reduction of beam coupling in a ring laser gyro by Doppler shifting of scattered light [C]. *SPIE*, 1984, **487**: 78~84
- 12 Zhao Xueya, Xia Yuanqin, Chen Deying. Frequency-biasing technique of laser gyro [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(8): 50~53
赵雪亚, 夏元钦, 陈德应. 激光陀螺的偏频技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 50~53
- 13 J. E. Killpatrick. Laser Angular Rate Sensor [P]. US Patent, 3373650, 1965. 4
- 14 M. Faucheux, D. Fayoux, J. J. Roland. The ring laser gyro [J]. *J. Opt.*, 1988, **19**(3): 101~115
- 15 J. E. Killpatrick. Random Bias for Laser Angular Rate Sensor [P]. US Patent, 3467472, 1969. 9
- 16 Du Jianbang. Analysis of the error of a mechanically dithered laser gyro at the zero rate crossing [J]. *J. Astronautics*, 2000, **21**(3): 58~63
杜建邦. 抖动式激光陀螺零速率点误差分析 [J]. *宇航学报*, 2000, **21**(3): 58~63
- 17 NATO. Optical Gyros and their Application [R]. 1999, 3-1~3-45
- 18 Gao Yukai, Deng Zhenglou. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro [J]. *China J. Lasers*, 2007, **34**(3): 354~358
高玉凯, 邓正隆. 消除机械抖动激光陀螺闭锁误差的方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 354~358
- 19 S. W. Song, J. C. Lee, S. K. Hong *et al.*. New random walk reduction algorithm in ring laser gyroscopes [J]. *J. Optics*, 2010, **12**(11): 115501
- 20 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985
- 21 W. W. Chow. The ring laser gyro [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
- 22 Tang Jianxun. Research and Design for Dither Bias System of Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000
汤建勋. 机械抖动激光陀螺抖动偏频系统的研究与设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000
- 23 Gao Bolong. Theoretical analysis of dither bias lock-in crossing [J]. *Journal of NUDT*, 1979, (1): 47~64
高伯龙. 抖动偏频过锁区的理论分析[J]. *国防科学技术大学学报*, 1979, (1): 47~64
- 24 H. F. Elbert. Apparatus and Method for the Elimination of Angular Vibration Induced Errors in Ring Laser Gyroscopes [P]. US Patent, 4248534, 1981. 2

栏目编辑: 宋梅梅