

一种新的激光陀螺抖动加噪效果评估方法

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 激光陀螺是一种角运动传感器件, 为了避免激光陀螺的闭锁现象, 可以采取正弦抖动偏频。为了减小机抖陀螺过锁区时的误差累积, 往往会在抖动信号中注入噪声。然而如何选择一种合适的噪声形式目前还没有明确的依据, 往往要经过长时间的测试才能得到一种较好的噪声形式。根据加噪的基本原理, 提出了一种新的激光陀螺抖动加噪评估方法, 这种方法能够在短时间之内快速评价加噪的效果。实际测试验证, 新方法在衡量加噪效果上确实是行之有效的。

关键词 传感器; 激光陀螺; 随机游走; 随机抖动; 自相关

中图分类号 TN212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202006

A New Noise Injection Effectiveness Evaluation Method for 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 Laser gyro is an angle sensitive device. In order to overcome the lock-in phenomenon, a sine wave mechanical dither bias is introduced. In order to eliminate the error accumulation in the lock-in traverse moment, random noise is often injected into the dither driving signal. Until now, there is no good rule to select a suitable noise form, and long performance measurement must be carried out to evaluate the effect of noise injection. A new method is proposed, which can evaluate the effectiveness of noise injection in very short time. Results of experiments show that this method is very effective and can be used to select a good noise type.

Key words sensors; laser gyro; random walk; random dither; autocorrelation

OCIS codes 140.3370; 140.3430; 230.5160

1 引言

激光陀螺是一种高性能角运动传感器件, 具有精度高、抗冲击以及体积小等优点。国外在激光陀螺的工程研制和理论研究始于 20 世纪 60 年代, 目前已在军民航空、航海等领域取得较为普遍的应用^[1~3]。国内激光陀螺的研究起步也比较早^[4,5], 但其进展较为缓慢, 直到 21 世纪初才取得了较高的精度^[6,7]。与美国相比目前国内激光陀螺的应用普及率还不高, 但发展势头迅猛, 预计在不久激光陀螺的应用在国内将迎来一个全盛时期。

相对于其他偏频方式, 机械抖动偏频是一种较好的偏频方式^[8~10], 它采用了高频小幅度抖动, 能

够消除偏频量的累积误差; 由于正逆行光之间的频差不大, 消除了增益色散及其不稳定性带来的误差。对于二频机抖陀螺而言, 存在问题的地方是每个抖动周期之内需要两次经过锁区, 尽管每次过锁区的时间非常短, 但仍然会存在一定的信息丢失^[11]。在信息丢失严重时, 会使机抖陀螺产生二次闭锁现象^[12]。为了尽量消除过锁区时的不利影响, 一个较为巧妙的办法是向抖动信号中注入噪声, 使得每个抖动周期的抖动幅度随机化^[13], 这样一来, 尽管过锁区时仍然有信息丢失, 但是这种信息丢失却被完全随机化了。

如何选取合适的噪声注入是一个必须要考虑的

收稿日期: 2011-09-13; **收到修改稿日期**: 2011-11-14

基金项目: 2010 教育部“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前沿问题方面的研究。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

问题。当抖幅噪声过小时,它不能将过锁误差充分的随机化;抖动噪声过大时,又容易产生负面效应。为了验证加噪的效果,现有的做法是分别注入不同的噪声,然后测试陀螺的性能。而测试激光陀螺的性能要花费大量的时间,往往要经过很长时间的测试才能选择出较为合适的噪声形式。本文从加噪的根本原理出发,另辟蹊径,提出了一种新的加噪效果评估方法,能够在瞬间检测抖动加噪的效果。

2 激光陀螺的锁区方程及抖动偏频

简化的激光陀螺锁区方程为^[14]

$$\dot{\psi} = \omega_i + \omega_L \sin \psi, \quad (1)$$

式中 ψ 为正逆行光之间的相位差, ω_i 为激光陀螺沿输入轴方向的角速率, ω_L 为激光陀螺的锁区。

为了克服锁区的影响,二频机抖陀螺人为地引入了一交变的正弦偏频。设抖动速率的峰值为 D , 抖动的频率为 ω_d , 此时的锁区方程变为

$$\dot{\psi} = \omega_i + \omega_L \sin \psi + D \sin \omega_d t. \quad (2)$$

当引入正弦偏频后,激光陀螺的大部分工作时间位于远离锁区的位置,锁区的影响大大降低。在正弦抖动的情况下,激光陀螺的输出角误差为

$$E = \int \omega_L \sin \psi dt. \quad (3)$$

大量的研究文献表明,激光陀螺的误差主要集中在过锁的瞬间。当正向过锁区时,过锁瞬间的误差可以近似表达为^[10]

$$\Delta E = \omega_L \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\psi}}} \sin\left(\psi_0 + \frac{\pi}{4}\right), \quad (4)$$

式中 ψ_0 为速率翻转时的相位, $\dot{\psi}$ 为过锁瞬间的相位加速度。对于机抖偏频而言,每次过锁时的加速度 $\dot{\psi}$ 变化不大,可以近似看作常数;而 ω_L 亦为常数,可见过锁区时的误差只与过锁区时的相位 ψ_0 有关。如果 ψ_0 被随机化,则过锁区误差就被随机化,这就是抖动加噪的根本原理。抖动加噪使得二频机抖陀螺的精度达到实际可用的精度,在激光陀螺的发展史上具有重要的意义。

激光陀螺的抖幅控制和噪声注入的物理实现方法如图 1 所示^[6]。图中抖动反馈信号是从压电陶瓷或磁电拾振线圈获取的。测量抖动反馈信号的有效值,即可以测量实际抖动的幅度。边沿检测的目的是使抖幅控制和噪声注入每个周期进行一次。噪声实际上是一个有一定长度的伪随机序列,预先存储在处理核心的只读存储器(ROM)中,每个控制周期取一个值加入到抖幅控制中。

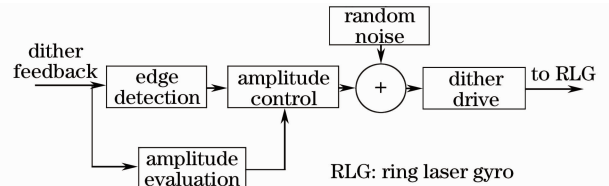


图 1 抖动驱动的幅度控制和噪声注入
Fig. 1 Amplitude control and noise injection of dither drive

如何才能评估加噪的效果、采用何种频率分布、何种幅度的噪声能够取得满意的效果? 目前为止这些问题还没有较好的解决方法。由于二频机抖陀螺的抖动可以近似看作是一个二阶谐振环节,即一个 Q 值很高的带通滤波器,即使抖动驱动信号的噪声很大,而实际响应的噪声还是很小的,因此加噪的效果难以有效评估。目前普遍的做法是注入不同的噪声,然后长时间反复试验,找到一组较好的噪声形式,这种方法费时费力,却未必能找到最佳的噪声形式。

3 新的加噪效果评估方法

在(4)式中,如果能够得知每次过锁区时的 ψ_0 , 然后验证其统计规律,即可评估加噪的效果。过锁区时的相位值并不能直接获取,但可以通过输出信号间接获取。为了获得激光陀螺的输出信号,激光陀螺的和光结构往往具有两个光电探测装置,这两个探测装置的拍频相位差正好为 $\pi/4$, 即两路信号彼此正交,这样不仅可以探测转速的大小,同时也可以探测转动的方向。这两路正交的拍频信号恰恰可以用来通过反算而获取过锁区时的相位,采集过锁瞬间相位的方法如图 2 所示。

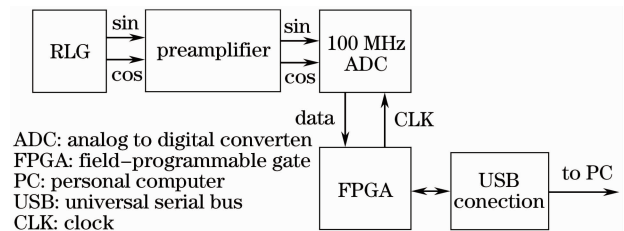


图 2 新的噪声注入评估方法的结构框图
Fig. 2 Schematic of new noise injection effectiveness evaluation method

在图 2 中激光陀螺的伺服电路包括高压、抖动和稳频控制等没有包含在内。放置在激光陀螺的和光棱镜上的光电探测器用来获得两路与光强成正比的电流信号,它们的相位是彼此正交的。前置放大器的作用是将电流信号转换为电压信号,并将信号调整到合适的幅度。前置放大器输出的两路信号可

以表征为

$$\begin{cases} A = V \sin \psi \\ B = V \cos \psi \end{cases}, \quad (5)$$

式中 V 为信号的幅度, 它的值和增益有关。两路信号通过 100 MHz 的高速数模转换器件 (ADC), 将数字信号转换为模拟信号。然后经由低压差分信号 (LVDS) 接口将采集值传送到现场可编程门阵列 (FPGA)。

FPGA 是运算核心, 它从高速 ADC 数据流中得到过锁区时的信息。判断信号何时过锁区是问题的关键, 找到合适的过锁判据至关重要。假设某次过锁区时的相位为 ψ_0 , 在过锁区的附近, 相位加速度 $\ddot{\psi}$ 可以看作是近似不变的, 这时拍频信号的相位 ψ 可以表达为

$$\psi = \psi_0 - \frac{1}{2} \ddot{\psi} t^2. \quad (6)$$

过锁时的时间点正好对应 $t=0$ 。将 (6) 式代入 (5) 式, 并对 (5) 式求导可以得到

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -V \cos\left(\psi_0 - \frac{1}{2} \ddot{\psi} t^2\right) \ddot{\psi} t \\ \frac{dB}{dt} = V \sin\left(\psi_0 - \frac{1}{2} \ddot{\psi} t^2\right) \ddot{\psi} t \end{cases}. \quad (7)$$

当 $t=0$ 时, 得到

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = 0 \\ \frac{dB}{dt} = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

而在其他时刻由于两路信号的正交性, A, B 的导数不可能同时为 0。如果 FPGA 探测到两个信号的导数同时为零, 则认为此时为过锁区点。将每次过锁区时的信号值 A_0, B_0 先缓存至内部的 (RAM)。当数据缓冲达到一定长度时, 上位机 (PC) 通过 USB 接口读取这些数据, 并进行分析。

过锁区时的相位满足:

$$\begin{cases} \psi_0 = 2n\pi + \psi' \\ (n = \dots -1, 0, 1, \dots, -\pi < \psi' \leq \pi) \\ V \sin \psi' = A_0 \\ V \cos \psi' = B_0 \end{cases}. \quad (9)$$

由于 ψ 的周期性, n 的值并不需要知道, 只要得出 ψ' 的值即可。从 (9) 式可以得到

$$\tan \psi' = \frac{A_0}{B_0}. \quad (10)$$

然后利用 A_0, B_0 的符号即可得出 ψ' 在区间 $(-\pi, \pi]$ 的值。每次过锁区时的相位值将组成一个序列 ψ'_n , 检验 ψ'_n 的随机性就可以检验加噪的效果。

根据统计信号处理的相关理论, 检验随机信号的随机性可以采用信号的自相关函数。 ψ'_n 的自相关函数为

$$R(j) = E[\psi'_n \psi'_{n+j}], \quad (11)$$

如果 ψ'_n 是完全随机化的, 那么它的自相关函数为 δ 函数^[15], 即

$$R(j) = \begin{cases} \frac{\pi^2}{3} \approx 3.29, & j = 0 \\ 0, & j \neq 0 \end{cases}. \quad (12)$$

检验 ψ'_n 的随机性可以观察两个方面: 1) 直接观察 ψ'_n 的时域分布是否随机化; 2) $R(j)$ 的分布是否接近 δ 函数。 ψ'_n 的随机性越好则加噪的效果越好。

4 实验分析

每次测试连续获取 1024 个正向过锁区时的相位, 并检验这些值的统计特性来检验加噪的效果。为了进行实验对比, 首先给出纯正弦抖动即不加噪时的实验结果如图 3 所示。图 3(a) 为相位值的时域分布。在图 3(a) 中明显地看到过锁区时的相位值在不断地趋势性增长, 这种趋势性增长即是地球自转的垂直方向投影。实验用的陀螺精度是比较高的, 所以过锁相位增长是不断增长变换的; 如果陀螺的精度较低, 则过锁相位很有可能锁定在一个恒定的相位值, 即激光陀螺进入了动态闭锁。图 3(b) 为相位的自相关函数, 由于没有噪声注入, 其自相关函数也具有一定的周期性。这样一来过锁区时的误差会累积下去, 此时测量陀螺的性能不会得到较好的结果。图 4 为噪声幅度较小时的相位值与相位的自相关函数。在图 4(a) 中由于有了噪声的注入, 相位值有了一定的随机化, 但随机化程度不是很理想, 这

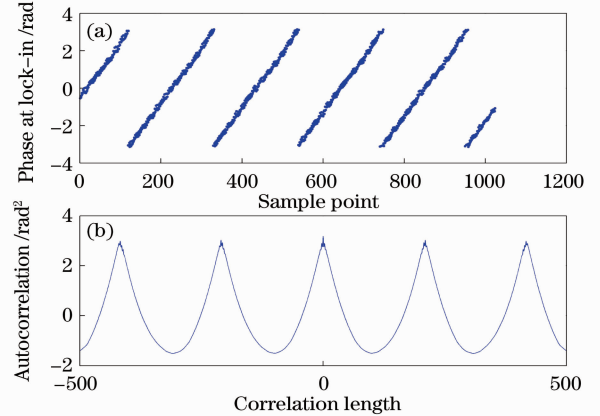


图 3 未加入噪声时的过锁相位 (a) 和自相关函数 (b)
Fig. 3 (a) Phases at lock-in traverse and (b) their autocorrelation without noise injection

一点从自相关函数即图 4(b)可以看到,与图 3(b)相比其分布向中心集中,接近 δ 函数,但其随机性仍然不是很好。图 5 中采用了一种较为合适的噪声注入,从相位的时域分布图 5(a)和自相关函数图 5(b)可以看到,此时的噪声注入效果是非常好的,时域分布近似为白噪声,而自相关函数与理想的 δ 函数极为接近。若过锁相位的随机化程度达到了图 5 的水平,过锁区时的误差将会被完全随机化,加噪的目的就达到了。这种方法方便直观,测试加噪的效果几乎在瞬间完成,不需要以前长时间的性能测试。

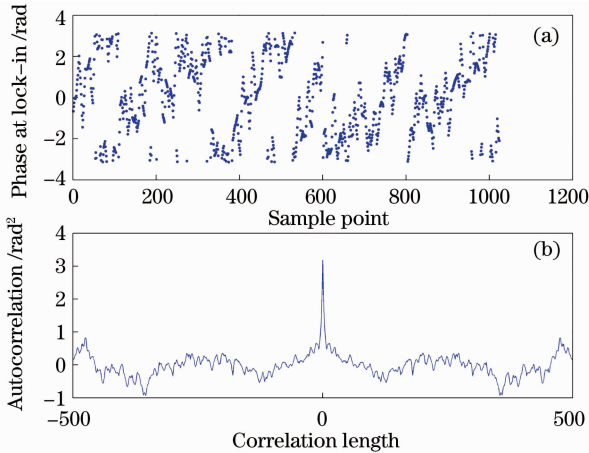


图 4 噪声幅度过小时的过锁相位(a)和自相关函数(b)
Fig. 4 (a) Phases at lock-in traverse and (b) their autocorrelation with small noise injection

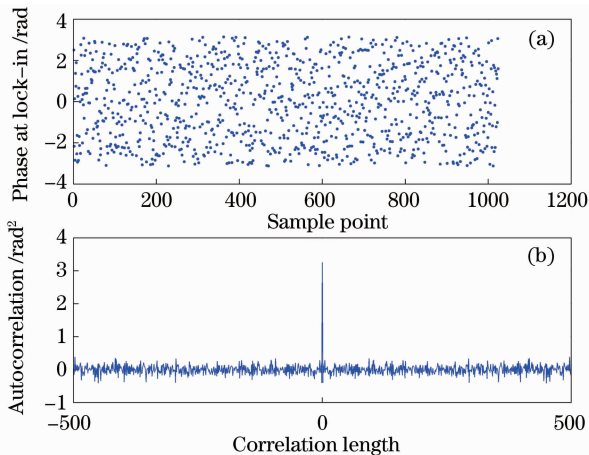


图 5 噪声合适时的过锁相位(a)和自相关函数(b)
Fig. 5 (a) Phases at lock-in traverse and (b) their autocorrelation with suitable noise injection

5 结 论

抖动加噪的目的是为了消除过锁时的误差累积,衡量加噪的效果尤为重要。本文实现了过锁相位的采集,而过锁时的相位恰能反映过锁时的信

息丢失。评价过锁时相位的随机化程度就能衡量过锁时丢失信息的随机化程度。为抖动加噪效果的评估提供了一种直观、快捷省时的评估方法,对比实验表明该方法是行之有效的。

参 考 文 献

- 1 E. J. Post. Sagnac effect [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1967, **39**(2): 475~493
- 2 F. Aronowitz. Theory of a traveling-wave optical maser [J]. *Phys. Rev.*, 1965, **139**(3): 635~646
- 3 F. Aronowitz. Lock-in and intensity-phase interaction [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(1): 130~141
- 4 Gao Bolong. Approximate solution of ring laser gyro [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1979, (s1): 1~36
高伯龙. 激光陀螺的近似解析解 [J]. *国防科技大学学报*, 1979, (s1): 1~36
- 5 Gao Bolong. Theoretical analysis of dither bias lock-in crossing [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1979, (1): 47~64
高伯龙. 抖动偏频过锁区的理论分析 [J]. *国防科技大学学报*, 1979, (1): 47~64
- 6 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: 国防科技大学, 2000
- 7 Xie Yuanping. Investigation of phase-demodulation and frequency stabilization techniques in mechanically dithered ring laser gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000
谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2000
- 8 J. E. Killpatrick. Laser Angular Rate Sensor; US Patent, 3373650 [P]. 1965
- 9 Fan Zhenfang, Luo Hui, Lu Guangfeng *et al.*. Precise measurement of dither offset in mechanical dithered ring laser gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808004
樊振方, 罗 晖, 卢广锋 等. 二频机抖激光陀螺抖动偏频量的精确测定 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808004
- 10 Fan Zhenfang, Luo Hui, Lu Guangfeng *et al.*. Theoretical research on lock-in error compensation for mechanical dithered ring laser gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112006
樊振方, 罗 晖, 卢广锋 等. 机抖激光陀螺锁区补偿的理论研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112006
- 11 Fan Zhenfang, Luo Hui, Hu Shaomin *et al.*. Research on lock-in correction for mechanical dithered ring laser gyro [J]. *Opt. Engng.*, 2011, **50**(3): 034403
- 12 W. W. Chow. The ring laser gyro [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
- 13 J. E. Killpatrick. Random bias for laser angular rate sensor; US Patent, 3467472 [P]. 1969
- 14 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): 0409001
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): 0409001
- 15 He Zishu. *Modern Digital Signal Processing and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009
何子述. *现代数字信号处理及其应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009