

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0163- 04

机械抖动激光陀螺小时延信号处理方法的研究*

张庆华, 胡绍民, 龙兴武

(国防科技大学 光电学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 去除抖动信号是机械抖动激光陀螺信号处理电路的重要工作, 针对目前现有的机械抖动激光陀螺解调方法存在的缺陷, 本文提出了抖动剔除和 FIR 滤波器相结合的一种解调方法, 以满足机抖激光陀螺在快速跟踪中的应用要求。实验结果表明, 抖动剔除后, 陀螺计数脉冲中的抖动信号衰减了近 75dB, 可以直接用于精度要求不高实时输出角速率的场合。抖动剔除后用低阶的 FIR 低通滤波器滤除剩余的抖动偏频量和高频噪声, 在保证小时延的基础上提高了精度。

关键词: 激光陀螺; 快速跟踪; 抖动剔除; FIR 滤波器

中图分类号: TN249; V241. 5 文献标识码: A

Research on Small Delay Signal Processor Method of Mechanical Dithered Ring Laser Gyro

ZHANG Qing-hua, HU Shao-min, LONG Xing-wu

(College of Optoelectrics, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Dither signal removal is the important work of mechanical dithered ring laser gyro (MDRLG) signal processor. In view of the limitation of present dither signal removal method in fast tracking use, a new method combining dither stripper with FIR filter is proposed in this paper. Results show that the dither signal in gyro count can be attenuated about 75dB after dither stripper, which can be used in the situation that real time angular rate output is needed. The residual dither signal and high frequency noise can be removed by FIR low pass filter, then the performance is improved under the condition of short time delay.

Key words: Ring Laser Gyro (RLG); fast tracking; dither stripper; FIR filter

激光陀螺存在闭锁效应, 当输入角速率较小时, 陀螺频差消失。为了消除闭锁效应的影响, 首先是设法压缩锁区, 其次是人为地引入一个恒定或交变的等效输入转速, 使激光陀螺工作点全部或大部分时间从锁区中偏置出来, 从而减小闭锁误差, 即所谓对陀螺进行偏频^[1]。其中机械抖动偏频是目前使用最广泛的一种偏频方式, 它利用交变的机械抖动使陀螺大部分时间从锁区中偏置出来。但是, 偏频后激光陀螺读出信号中不仅包含了外界惯性输入角速率信息, 还包含了抖动信号的角速率信息, 因此必须对机械抖动激光陀螺(MDRLG)输出信号进行抖动解调, 以消除抖动角速率信号的影响。目前普遍使用的整周期采样和高速采样低通滤波的去抖方法均存在着缺陷: 由于捷联惯导系统(LINS)中三个激光陀螺受各自抖动频率限制, 使得整周期采样法读出频带不足且读出信号不同步^[2]; 高速采样低通滤波^[8-9]的去抖方法采用了线性相位 FIR 滤波器, 这不可避免地使所有频率成分都产生了一定时间的延迟。为了满足 MDRLG 在快速跟踪场合的应用需要, 本文提出了抖动剔除^[3-6]和低阶 FIR 滤波器串联的去抖方法, 通过抖动剔除可以有效除去陀螺信号中的抖动成分, 剩余的高频噪声再通过低阶的 FIR 滤波器除去, 满足陀螺精度的同时降低了时延, 拓展了 MDRLG 的应用范围。

1 理论分析

根据 Sagnac 效应^[1], 激光陀螺环形腔内正、反向行波间的频率差为

$$\Delta\nu = S\Omega \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009- 11- 02

作者简介: 张庆华(1979-), 女, 博士生。

S 为激光陀螺的比例因子, Ω 为输入角速度, 对于 MDRLG, 输入角速度包括载体转动和抖动偏频引起的角速度, 即 $\Omega = \Omega_b + \Omega_d \cos \omega_d t$, Ω_d 为抖动驱动信号幅度, ω_d 为抖动角频率。考虑到激光陀螺的误差效应, 从 t 到 $t + \Delta T$ 时间内, 高频采样脉冲数可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta N &= S \int_t^{t+\Delta T} \Omega_b dt + \frac{2S\Omega_d}{\omega_d} \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) \sin\left(\omega_d t + \frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) + \varepsilon(t) \\ &= \int_t^{t+\Delta T} \Omega_b dt + B \sin(\omega_d t + \varphi) + \varepsilon(t) = \Delta N_{base} + \Delta N_{dither} + \varepsilon(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta N_{dither} = B \sin(\omega_d t + \varphi) = \frac{2S\Omega_d}{\omega_d} \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) \sin\left(\omega_d t + \frac{\omega_d \Delta T}{2}\right)$ 为抖动偏频信号引起的脉冲数, $\Delta N_{base} = K \int_t^{t+\Delta T} \Omega_r dt$, 为载体转动引起的脉冲数; $\varepsilon(t)$ 为量化噪声和随机误差等引起的脉冲数。

经传感器反馈并经放大电路调制得到的抖动信号可以表示为

$$a_1 = M \Omega_d \cos(\omega_d t + \phi_1) \quad (3)$$

其中, M 是由抖动机构灵敏度和放大电路调制引起幅度增益, ϕ_1 为反馈信号相对于驱动信号的相移, 则抖动反馈信号在 t 到 $t + \Delta T$ 时间内增量可以表示为

$$\Delta a_1 = \int_t^{t+\Delta T} M \Omega_d \cos(\omega_d t + \phi_1) dt = A \sin(\omega_d t + \phi) \quad (4)$$

式中, $A = \frac{2M\Omega_d}{\omega_d} \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right)$ 为抖动反馈信号增量的幅度, $\phi = \phi_1 + \frac{\omega_d \Delta T}{2}$ 为其相位, 则 ΔN_{dither} 可以展开为 Δa_1 的函数:

$$\begin{aligned} \Delta N_{dither} &= B \sin(\omega_d t + \varphi) = B [\sin(\omega_d t + \phi) \cos(\varphi - \phi) + \cos(\omega_d t + \phi) \sin(\varphi - \phi)] \\ &= \frac{B}{A} \cos(\varphi - \phi) A \sin(\omega_d t + \phi) + \frac{B}{A} \sin(\varphi - \phi) A \cos(\omega_d t + \phi) \\ &= k_1 \Delta a_1 + k_2 \Delta a_2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\Delta a_2 = A \cos(\omega_d t + \phi)$ 是与 Δa_1 正交的信号, $k_1 = \frac{B}{A} \cos(\varphi - \phi)$, $k_2 = \frac{B}{A} \sin(\varphi - \phi)$ 是与 ΔN_{dither} 和 Δa_1 的幅度比和相位差相关的两个变量。由于 Δa_1 与 Δa_2 是互为正交的正余弦函数, 则 a_1 与 a_2 也是互为正交的正余弦函数。由(4)式则有 $a_2 = M \Omega_d \sin(\omega_d t + \phi_1)$, 陀螺采样时间间隔为 ΔT , ΔT 一般较小, 则 a_1 与 a_2 在 t_{n-1} 到 t_n 采样时间间隔内的增量可分别近似表示为

$$\begin{aligned} \Delta a_1(n) &\approx M \Omega_d \cos(\omega_d t_n + \phi_1) - M \Omega_d \cos(\omega_d t_{n-1} + \phi_1) \\ &= M \Omega_d \{ \cos(\omega_d n \Delta T + \phi_1) - \cos[\omega_d (n-1) \Delta T + \phi_1] \} \\ &= -2M \Omega_d \sin\left(\frac{2n-1}{2} \omega_d \Delta T + \phi_1\right) \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

同理可求出

$$\Delta a_2(n) \approx 2M \Omega_d \cos\left(\frac{2n-1}{2} \omega_d \Delta T + \phi_1\right) \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) \quad (7)$$

$$\Delta a_1(n-1) \approx -2M \Omega_d \sin\left(\frac{2n-3}{2} \omega_d \Delta T + \phi_1\right) \sin\left(\frac{\omega_d \Delta T}{2}\right) \quad (8)$$

由(7)~(9)式, 则有

$$\Delta a_2(n) = c_1 \Delta a_1(n) + c_2 \Delta a_1(n-1) \quad (9)$$

其中 $c_1 = -\frac{\cos(\omega_d \Delta T)}{\sin(\omega_d \Delta T)}$, $c_2 = \frac{1}{\sin(\omega_d \Delta T)}$, 则(5)式又可表示为

$$\begin{aligned} \Delta N_{dither}(n) &= k_1 \Delta a_1(n) + k_2 \Delta a_2(n) = k_1 \Delta a_1(n) + k_2 [c_1 \Delta a_1(n) + c_2 \Delta a_1(n-1)] \\ &= w_1 \Delta a_1(n) + w_2 \Delta a_1(n-1) \end{aligned} \quad (10)$$

因此只要求出 w_1 和 w_2 并得到抖动反馈信号, 就可以计算出当前时刻陀螺计数脉冲中的抖动偏频量, 再通过相减的方法将其从陀螺输出脉冲中扣除。由于温度变化、老化等因素引起 w_1 和 w_2 发生缓慢变化, 可以基于采集的一段时间内的原始数据 ΔN 和 Δa_1 用最小二乘法实现 w_1 和 w_2 的实时更新。

2 系统设计及实验结果分析

抖动剔除需要采集抖动反馈信号, 由 A/D 转换器实现。陀螺光电对管输出的两路正弦信号经低噪声前置放大和整形电路后得到两路方波信号, 送入可编程逻辑芯片 CPLD 实现鉴相和可逆计数。由 DSP 实现计数脉冲信号和 A/D 转换值的同步采集, 并实现抖动剔除和后续 FIR 滤波, 将处理后的数据传至上位机以便于后续分析, 系统结构框图如图 1 所示。

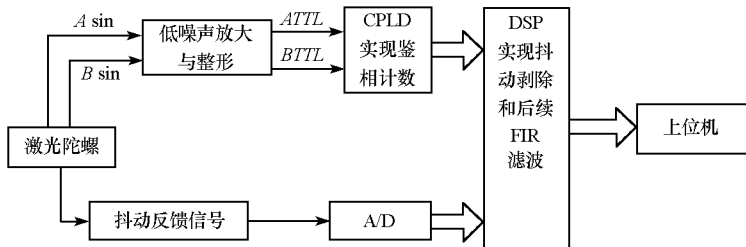


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Structure of the system

为了检验系统的性能, 对某一当量为 $0.8425''$ /脉冲的激光陀螺进行了测试, 采样率为 4kHz 。

图 2 为静态条件下采样间隔内陀螺输出脉冲数的增量及其功率谱, 图 3 为抖动剔除后剩余脉冲数增量及其功率谱, 可以明显看出经抖动剔除后陀螺计数脉冲中的抖动成分已由原来的 45dB 衰减到近 -30dB , 约衰减了 75dB 。

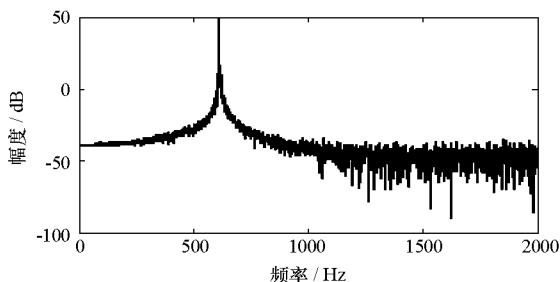
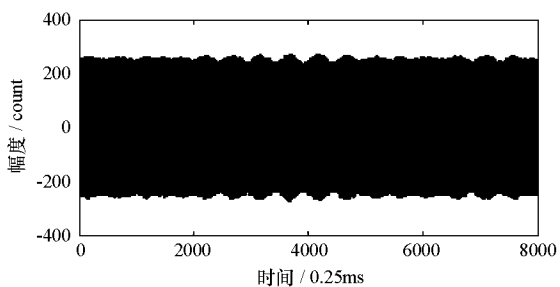


图 2 陀螺原始脉冲及功率谱

Fig. 2 The regional output and the magnitude/frequency of RLG

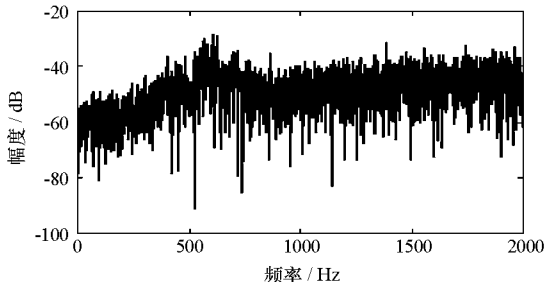
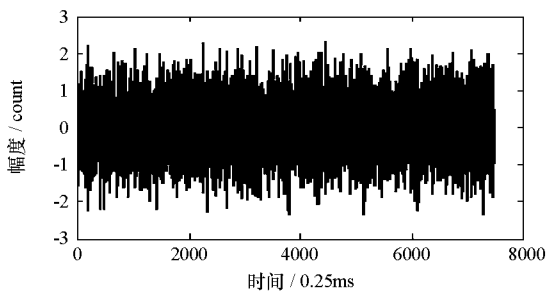


图 3 剔除后剩余脉冲数及其功率谱

Fig. 3 The residual count and the magnitude/frequency of RLG after jitter stripper

抖动剔除后可以用于实时输出角速率的场合, 为了验证抖动剔除方法在角速率测试场合的有效性, 将 MDRLG 和四频差动激光陀螺放在同一转台上进行了对比测试实验。转台从静止加速到 $200(^{\circ})/\text{s}$ 后匀速运动一段时间, 再反向以 $200(^{\circ})/\text{s}$ 匀速转动。四频陀螺计数电路采用了细分技术, 两种测试都是累加 1ms 输出一次数据。转台角速率的测试结果及二者的差值如图 4 所示, 可以看出二者结果的一致性。二者差值的波动主要是由于机抖陀螺采用抖动剔除方法不能消除抖动以外的高频噪声, 剩余脉冲数波动还较大, 可以根据应用要求, 对剔除后的数据进行 FIR 低通滤波, 对高频噪声进行抑制, 来提高测试精度。一般采用低阶的 FIR 滤波器实现 MDRLG 解调来提高系统的响应速度。设计了 17 阶的 FIR 低通滤波器, 时延为 2ms , 用该滤波器对陀螺原始输出脉冲进行滤波得到的结果如图 5 所示, 对剔除后的剩余脉冲数用该滤波器进行滤波得到的结果如图 6 所示, 可以看出与仅用 17 阶 FIR 滤波器相比脉冲起伏缩

小了4倍,达到了在快速跟踪场合提高精度的目的。

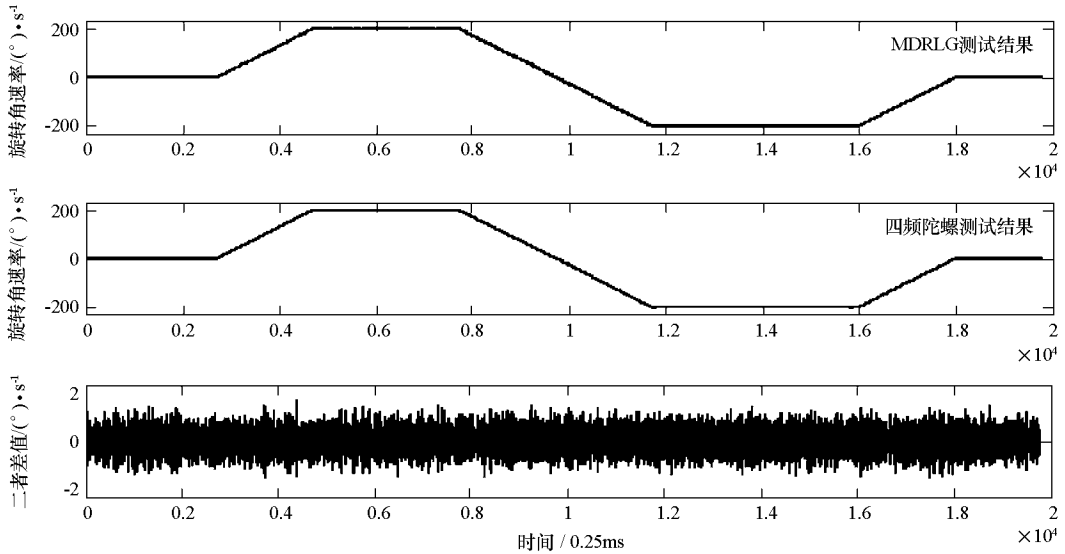


图4 角速率测试
Fig.4 Experiment of angular rate test

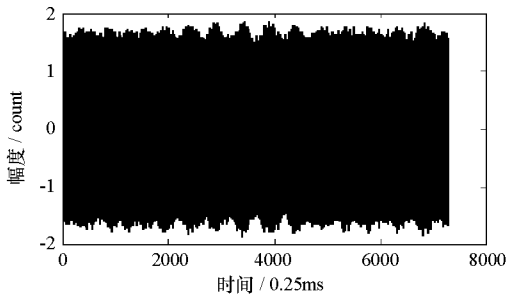


图5 对陀螺原始输出进行17- FIR滤波
Fig.5 Residual count of RLG filtered by 17- order FIR

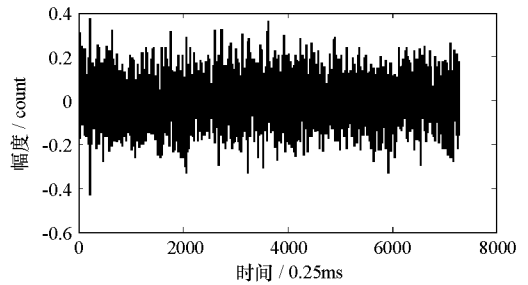


图6 剔除后再进行17- FIR滤波
Fig.6 Residual count after dither stripper of RLG filtered by 17- order FIR

3 结论

本文建立了 MDRLG 抖动信号剔除的理论,并实现了系统设计。实验验证抖动剔除后抖动信号被衰减了近 75dB,该去抖方法只需要抖动拾取信号的比例缩放和从陀螺输出中减去抖动成分的相关计算,因此理论上陀螺输出不存在时间延时,但是由于该方法不能去掉高频和随机噪声,只能去除抖动噪声,还需要 FIR 低通滤波器对剔除后的信号进行处理,以满足高精度应用要求,因此其时延仅是 FIR 滤波器带来的。该方法在保证陀螺精度的同时减小了输出信号的时间延时,拓展了 MDRLG 的应用范围。

参考文献:

[1] Chow W W, Sanders V E. The Ring Laser Gyro[J]. Review of Modern Physics, 1985,57(1): 62- 66.

[2] 严恭敏,严卫生,等. 抖动偏频激光陀螺整周期采样对捷联惯导姿态解算的影响[J]. 传感技术学报, 2007, 20(17):2268- 2271.

[3] Oelschlaeger J M, Thielman L O. GG1308 Ring Laser Gyro Inertial Measurement Systems:Honeywell's Low Cost Solution for Tactical Application [J]. Position Location and Navigation Symposium, 1990: 528- 536.

[4] Majure R G. Demonstration of a Ring Laser Gyro System for Pointing and Stabilization Applications. [J]. Position Location and Navigation Symposium, 1990: 219- 225.

[5] Fritze K R, Killpatrick J E, Berndt D F. Ring Laser Gyro Dither Stripper[P]. U. S. Patent, 5249031, Dec. 1, 1996.

[6] Killpatrick J E, Berndt D. Modular Laser Gyro[P]. U. S. Patent, 6208414. 3, 2001.

[7] Killpatrick J E, Berndt D B, Fritze K R. Laser Gyro Dither Stripper Gain Correction Method and Apparatus[P]. U. S. Patent, 5486920, Jan. 23, 1996.

[8] 张岩,李廷志,罗兵.基于FPGA的抖动偏频激光陀螺高精度信号解调[J].计算机测量与控制,2006,14(7):950-952.

[9] 刘宗玉,陈明,王玮,等.抖动偏频激光陀螺中的解调及实现技术[J].测控技术,2004,23(9):67-69.