

二频机抖陀螺的自锁相抖动剥除

樊振方 罗 晖 胡绍民

(国防科学技术大学光电学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 采用抖动剥除算法能够使二频机抖陀螺的输出信号达到零延时。现有的抖动剥除算法无一例外地采用外部参考信号进行剥除运算,外部参考信号的获取会增加系统的复杂度。为了使抖动剥除更加容易实现,提出了一种新的基于自锁相的抖动剥除方法,用陀螺本身来获取抖动信号,不再需要外部参考信号。这种方法硬件结构简单,同时实验结果证明其输出结果不差于采用外部参考的方法。该方法使二频机抖陀螺可以很方便地应用于实时控制领域。

关键词 信号处理;激光陀螺;抖动剥除;自适应滤波;自锁相

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0409001

Self Phase Lock Dither Stripping Technique in Mechanical Dithered Ring Laser Gyro

Fan Zhenfang Luo Hui Hu Shaomin

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

Abstract Zero time delay can be achieved by using dither stripping method for the readout signal processing of mechanical dithered ring laser gyro (MDRLG). An external dither pickoff reference signal is needed for all existing dither stripping apparatuses. The obtaining of the dither reference will make the application system more complex, and the system will be less stable. A new dither stripping method is developed, in which external reference signal is needed no more; instead the reference signal is generated by the gyro itself. The circuit is simplified by using this method; meanwhile experimental results show that this method can achieve better output results than those of the method using external reference. This method makes the MDRLG easier to be used in the applications of fast control and tracking.

Key words signal processing; ring laser gyro; dither signal stripping; adaptive filter; self phase lock

OCIS codes 060.2800; 120.0120; 230.0230; 040.0040

1 引 言

激光陀螺是一种角传感器件,经过近 50 年的发展,其优越性已经得到充分体现,现在正朝更高精度方向发展^[1~8]。为了克服锁区,二频机抖陀螺中引入了交变的正弦偏频^[9],因此其读出信号中不仅包含了待测转速引起的脉冲数,还包含抖动偏频量。必须通过某种途径将引入的抖动信号去除,才能得到被测信号,即对陀螺输出信号进行解调。

比较成熟而且应用比较多的解调方法是采用高

阶具有相位的有限冲激响应(FIR)滤波器^[10]。使用 FIR 滤波器不可避免地产生了较大的相位延迟。这种相位延迟限制了二频机抖陀螺在火炮瞄准、巡航导弹飞控等快速跟踪场合中的应用,业界普遍认为在用于飞行器的稳定控制时会出现较大的问题,将其应用于控制领域还需要增加速率反馈回路,增大了系统的难度和成本,降低了可靠性。

为了提高信号的实时性,人们对直接剥除抖动的方法进行了广泛的研究。抖动剥除的核心思想是

收稿日期: 2010-10-21; 收到修改稿日期: 2010-11-25

作者简介: 樊振方(1984—),男,博士研究生,主要从事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方面的研究。

E-mail: luohui.luo@163.com(通信联系人)

通过适当的幅相调节方法,使抖动参考信号与陀螺计数信号中的抖动成分一致,这样就可以直接将其扣除。抖动剥除相关的专利文献非常多,按其基本思想大体可以分为两类:时域对应法^[11~14]和自适应滤波算法^[15,16]。时域对应法是通过相位、幅度及非线性分别进行修正,这种方法实现较为复杂;自适应滤波算法是采用递推最小二乘(RLS)或者最小均方误差(LMS)算法实现幅度相位的同时修正,这种方法实现简单,跟踪精度高,可以达到较为理想的精度。

本文基于自适应算法,通过运用数字信号处理技术进行理论分析,提出了一种新的抖动剥除方法。这种方法无需更改工作电路结构,采用软件方法即

可轻松实现抖动剥除,同时能增加系统的稳定性。

2 工作原理

图1是文献[16]中采用的自适应抖动剥除算法的结构图。陀螺两路正交的拍频信号经由高速模数(A/D)转换器转换为数字信号,然后经过零比较产生方波,方波经鉴相解调后得到计数信号 θ 。机械抖动会使压电陶瓷产生压电效应,产生的电压信号经过调理后送至A/D转换,信号经过带通滤波器后作为自适应滤波的参考信号 α 。关于自适应抖动剥除的详细算法实现可参考文献[16,17],在此不再重复。

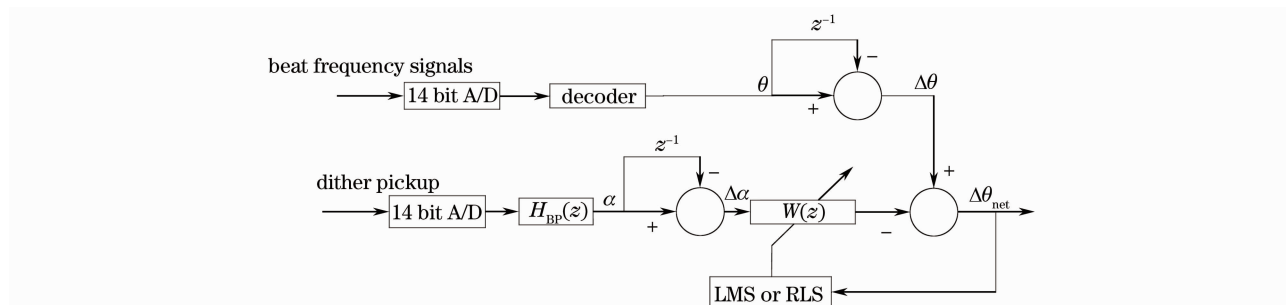


图1 自适应抖动剥除算法结构图

Fig. 1 Schematic of adaptive dither stripping method

图1中抖动拾取信号由压电陶瓷产生。压电陶瓷有迟滞特性、蠕变特性和高频振动非线性特性^[18],由压电陶瓷拾取的信号往往不是真正的抖动信号,表现为信号具有非线性,从频谱上看其中含有较高的谐波成分。为了解决这个问题,需要采用较为复杂的方法对非线性进行修正^[12]。无论是传统的抖动剥除算法还是自适应滤波算法,都无一例外地采用压电陶瓷等拾取器拾取抖动信号,这种方法要有前端调理电路,还要外加A/D转换芯片,这就增加了硬件的复杂度,同时还会引入额外的噪声。

为了克服锁区而加入的正弦抖动固然是要滤除的信号成分,但是如果从另一个角度思考,也可以把陀螺作为抖动信号的拾取器看待。激光陀螺作为高精度的角测量仪器,若利用陀螺本身对抖动信号的测量必然比压电陶瓷拾取器得到的参考信号好得多。要得到其中的抖动信号并不难,因为一般有用信号在100 Hz以内,只要对陀螺的输出信号做带通滤波即可得到抖动信号。改进后的滤波算法如图2所示,可以看到其结构比图1要简单很多。

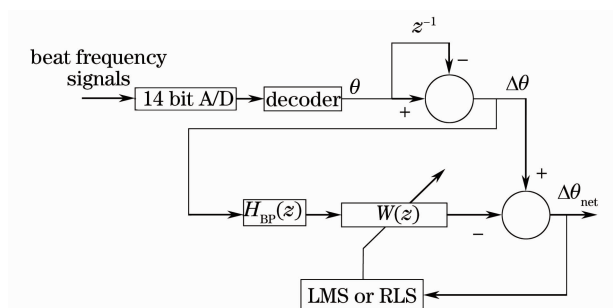


图2 自锁相抖动剥除算法的结构图

Fig. 2 Schematic of self phase lock dither stripping method

3 工作机理分析

当系统达到稳态时适应滤波器的传递函数 $W(z)$ (如图2所示)趋于稳定,不难分析陀螺信号从 $\Delta\theta$ 到 $\Delta\theta_{net}$ 的传递函数为

$$H(z) = 1 - W(z)H_{BP}(z), \quad (1)$$

式中 $H_{BP}(z)$ 为无限脉冲响应(IIR)带通滤波器的传递函数, $H_{BP}(z)$ 在设计时滤除有用信号,并且要保证抖动频率始终处在其通带内,例如某陀螺的抖动频率处于 (610 ± 10) Hz之内,带通滤波器的通带取为560~660 Hz。其幅频特性曲线如图3所示,所

用采样频率为 10000 Hz。

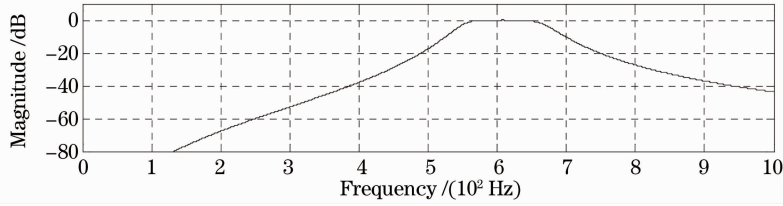


图 3 $H_{BP}(z)$ 的幅频特性曲线

Fig. 3 Amplitude response of $H_{BP}(z)$

$H_{BP}(z)$ 可以表示为

$$H_{BP}(z) = \frac{H_2(z)}{H_1(z)}, \quad (2)$$

代入(1)式可得

$$H(z) = \frac{H_1(z) - W(z)H_2(z)}{H_1(z)}, \quad (3)$$

从形式上看 $H(z)$ 是一个普通的 IIR 滤波器,然而这个 IIR 滤波器的特殊之处在于 $W(z)$ 。某一时刻当自适应滤波器进入跟随状态时,从实时监测数据中得到

$$W(z) = 1.3 - 0.3z^{-1}, \quad (4)$$

画出 $W(z)H_{BP}(z)$ 的幅相频特性曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看到在谐振频率 612.23 Hz 处的相移为零(-360° 为正好相差一个周期),因此将陀螺信号与调整后的抖动信号相减,就可以将抖动信号滤除。将 $W(z)$ 代入(3)式可得 $H(z)$,图 5 是 $H(z)$ 的幅相频特性曲线。从幅频特性曲线上可以看出,曲线有一个谷点,谷点频率值是 612.23 Hz,这与图 4 中的频率点完全一致,并且其衰减已经达到了 74 dB。

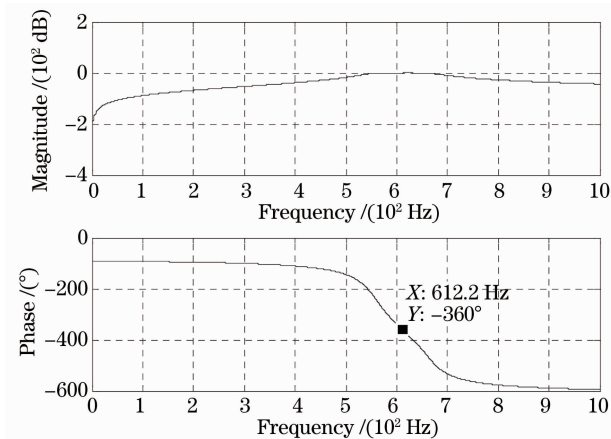


图 4 $W(z)H_{BP}(z)$ 的幅相频特性曲线

Fig. 4 Amplitude and phase response of $W(z)H_{BP}(z)$

由于热效应等原因,陀螺的谐振频率不会一直在固定的值。从上面的分析可以看出自适应滤波器的工作机理是通过自适应算法来调节 $W(z)$,从而调节参考信号的幅相频特性,使其达到和陀螺实

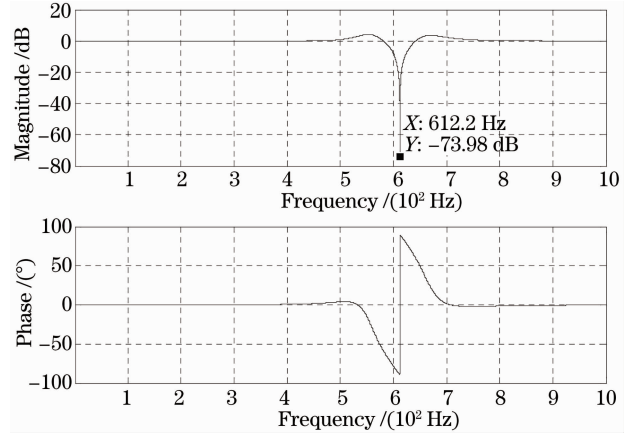


图 5 $H(z)$ 的幅相频特性曲线

Fig. 5 Amplitude and phase response of $H(z)$

时信号同步的状态,进而使机抖信号得到最大限度的衰减。

从数字信号处理的基本经验可以得知 IIR 滤波器存在群延时不一致的现象,既然 $H(z)$ 是一个 IIR 滤波器,需要考虑是否会存在相位混乱,且能否达到减小输出信号的相位延迟这一目的。

一般系统中有用信号在 50 Hz 以内,下面分析当 $0 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ 时的传递函数,将

$$z = \exp(j\omega) \left(\omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \right) \quad (5)$$

代入(2)式,从图 3 可知,若 $0 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$,则

$$|H_{BP}[\exp(j\omega)]| \approx 0, \quad (6)$$

由于 $|W[\exp(j\omega)]| \leq \sqrt{1.3^2 + 0.3^2}$, 所以

$$|W[\exp(j\omega)]H_{BP}[\exp(j\omega)]| \approx 0, \quad (7)$$

将(7)式代入(1)式可得

$$H[\exp(j\omega)] \approx 1. \quad (8)$$

由(8)式可知,在有用信号段,信号会完整无损地通过,幅度和相位没有发生任何变化。从另外一方面看,将图 5 中 $0 \sim 50 \text{ Hz}$ 局部的相频特性进行展开可以得到图 6。从图 6 中可以看出相位变化在 $5 \times 10^{-4} (^{\circ})$ 以内。某实时控制系统的要求是 20 Hz 时的相位延迟是 15° ,相对而言这种相位变化可以完全忽略不计。

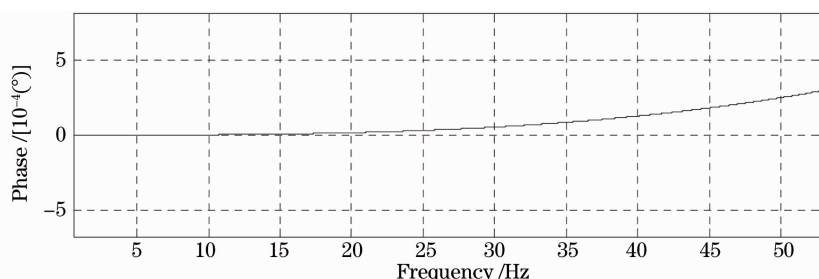


图 6 低频段的相位延迟

Fig. 6 Phase delay of lower frequency segment

4 实验分析

将本文提出的自锁相算法与采用外部参考的抖动剔除算法同时进行测试对比,只要自锁相算法得出的精度不差于外部参考的方法,就说明本方案是可行的。在这里采用了 1 s 零偏值的标准差(即零偏稳定性)来衡量抖动剔除的效果,这种方法可以较为科学地反映数据波动的大小。

实验硬件电路以现场可编程门阵列+数字信号处理器(FPGA+DSP)为处理核心,为了使实验数据具有可比性,同时实现了自锁相和外部参考两种抖动剔除方案的解算。两路正交的陀螺拍频信号首先经过高速 A/D 转换器转换为数字信号,经过零比较产生两路正交的方波信号。方波信号经过 FPGA 内部的正交解调逻辑实现四倍频计数。为了实现外部参考的抖动剔除方案,抖动拾取信号也经过高速 A/D 转换器转换为数字信号。四倍频计数值和抖动拾取信号采样值以外数据空间的形式被 DSP 读取。DSP 以 10 kHz 的频率完成两种抖动剔除解算。将 1 s 内的输出值(即每 10000 个数据)进行累加作为零偏值,然后将其通过 USB 接口传至计算机。上位机软件实时接收数据并实时算出零偏均值和零偏稳定性。

陀螺的工作电流是 0.6 mA,采用单臂光强通过小抖动稳频方法来稳定腔长。实验中尽量将陀螺置于水平位置,将地球自转的投影作为陀螺的被测测量。当地的纬度值为 28.222°,陀螺的比例因子为 3.37(°)/(h·Hz),可以得出陀螺的零偏值应在 2.105 Hz 附近。将陀螺置于室内,尽量保持温度的恒定,从而消除温度对陀螺性能的影响。

为了数据的可靠性,实验中对两个比例因子相同的陀螺分别进行了测试。测试时间为 2 h,分别记录下两种方法的零偏均值和 1 s 零偏稳定性。两个陀螺的测试数据如表 1 所示。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

	Gyro 1		Gyro 2	
	Self phase lock	External reference	Self phase lock	External reference
Bias /Hz	2.1136	2.1137	2.0867	2.0867
Bias stability /Hz	0.15	0.17	0.12	0.14

从表 1 可以看出,采用自锁相算法和外部参考方法得到的零偏值是相同的,这说明通过自锁相算法得到的输出是完全正确的。自锁相算法的零偏稳定性比采用外部参考信号的算法还稍好一些。这种现象是很容易解释的,如果采用压电陶瓷拾取信号必然会引入非线性以及额外的电路噪声;而激光陀螺是高精度的角传感器,将其作为抖动信号的拾取器,必然会有很高的精度。

5 结 论

新型抖动剔除算法的优点在于:1)结构简单,不需要额外的参考信号,不需要改变原有的电路系统;2)使用了 IIR 滤波器+自适应滤波器,因为 IIR 滤波器的运算量比较小,综合比较抖动剔除比 FIR 滤波器的运算量还要小;3)抗干扰能力强,不易受到外界电磁场的干扰;4)通过信号瞬时采样技术或倍频技术,可克服整数四倍频计数带来的量化噪声,进一步提高信号的输出精度。该算法能够扩展二频机抖陀螺的应用范围,使其非常方便地应用于飞行器的稳定控制及高精度火炮瞄准等领域。

参 考 文 献

- 1 Yang Kaiyong, Long Xingwu. Design of high-precision, large-angle incident, nonpolarization anti-reflection coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 703~706
- 杨开勇, 龙兴武. 非偏振大角度高精度减反膜的设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 703~706

- 2 Wang Guochen, Yu Jie. Analysis of the circuit infection to laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2873~2877
王国臣, 俞洁. 激光陀螺电路系统对其精度影响的实验分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2873~2877
- 3 Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei *et al.*. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 409~414
金世龙, 龙兴武, 王飞等. 激光陀螺克服高、低温冲击的技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 409~414
- 4 Wang Xingshu, Huang Zongsheng, Zhou Pu *et al.*. Comparative study on digital filtering on the random drift of laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1547~1551
王省书, 黄宗升, 周朴等. 激光陀螺随机漂移的数字滤波方法比较[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1547~1551
- 5 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
- 6 Jin Shilong, Long Xingwu, Li Xiaohong *et al.*. Research on new type control mirror of light path and optical path length for ring laser gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 562~566
金世龙, 龙兴武, 李晓红等. 激光陀螺新型光路程长控制镜的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 562~566
- 7 Gao Yukai, Deng Zhenglong. A new method for eliminating the lock-in error of mechanically dithered ring laser gyro[J]. *Chinese 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
- 8 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
- 9 W. W. Chow. The ring laser gyro[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, **57**(1): 61~104
- 10 Zhang Yan, Li Tingzhi, Luo Bing. High-accuracy signal demodulation for dithered laser gyros based on FPGA[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(7): 950~952
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
- 11 K. R. Fritze, J. E. Killpatrick, Berndt. Ring Laser Gyro Dither Stripper[P]. US Patent, 5249031, 1993, 09
- 12 J. E. Killpatrick. Dither Stripper with Non-Linearity Correction [P]. US Patent, 0201851 A1, 2004, 10
- 13 J. E. Killpatrick. Dither Stripper to Leave Base Motion[P]. US Patent, 5329355, 1994, 07
- 14 J. E. Killpatrick, Dale Berndt, K. R. Fritze. Laser Gyro Dither Stripper Gain Correction Method and Apparatus[P]. US Patent, 5486920, 1996, 01
- 15 D. A. Doheny. Adaptive Filters for Correlated Noise Reduction in Ring Laser Gyro Inertial Systems[D]. Tampa Bay: University of South Florida, 2004
- 16 Zhang Qinghua, Fan Zhenfang. Dither signal removal of ring laser gyro based on RLS[J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(5): 673~675
张庆华, 樊振方. 基于RLS算法实现激光陀螺抖动信号剔除[J]. *激光技术*, 2010, **34**(5): 673~675
- 17 Wan Jianwei, Wang Ling. Signal Processing Simulation Technology [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2008, 297~302
万建伟, 王玲. 信号处理仿真技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008, 297~302
- 18 Wang Xihua, Guo Shuxiang, Ye Xiufen *et al.*. Modeling and feed-forward control based on piezoelectric ceramic hysteretic[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, **13**(5): 766~771
王希花, 郭书祥, 叶秀芬等. 压电陶瓷迟滞特性的建模及复合控制[J]. *电机与控制学报*, 2009, **13**(5): 766~771