

二频机抖激光陀螺抖动偏频量的精确测定

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 采用数字信号处理技术, 设计了二频机械抖动激光陀螺抖动偏频量的实时精确获取方法。从理论上说明了采用角速率绝对值和有效值的方法都能够有效地获取抖动偏频量。详细介绍了两种方法的数字化实现方法。通过仿真实验对两种数字化实现方法进行了验证, 结果表明这两种实现思路是完全可行的, 得到的偏频量随频率和抖幅的变化具有较好的线性。将实时获取的偏频量作为反馈量作用于抖动环路的闭环控制中, 比原来的压电陶瓷反馈具有更高的可靠性, 能够克服高低温带来的偏频量的变化。

关键词 信号处理; 二频机抖激光陀螺; 偏频量; 数字滤波

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0808004

Precise Measurement of Dither Offset in Mechanical Dithered Ring Laser Gyro

Fan Zhenfang Luo Hui Lu Guangfeng Hu Shaomin

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

Abstract Using digital processing technique, a novel dither offset evaluation apparatus is designed for mechanical dithered ring laser gyro (MDRLG). Theoretical analysis shows that the dither offset can be obtained both from the absolute value and valid value of angle rate. The digital realizations of both the two apparatus are introduced in detail. Simulations of them show that both the two apparatus can evaluate the dither offset even when the dither amplitude and dither frequency changes. Using the real time dither offset as the dither amplitude reference can achieve a better dither driving stability than using the feedback of piezoelectric transducer.

Key words signal processing; mechanical dithered ring laser gyro; dither offset; digital filter

OCIS codes 140.3370; 120.4640; 040.5160

1 引言

在二频激光陀螺中, 引入正弦抖动偏频能有效地减小锁区的影响^[1]。这种偏频方式与其他偏频方式相比具有不存在腔内元件、不带来累积性误差以及输出信号精度较高等优点^[2~6]。因此抖动控制对陀螺的性能具有至关重要的作用, 有必要对抖动控制进行更深入的研究^[7]。经过多年的发展, 各种抖动控制的方案不断出现。通过模拟环路、全数字环路以及数模混合等多种途径都可以实现抖动控制^[8~14]。在机械抖动激光陀螺中, 抖动偏频量是一

个非常重要的概念, 偏频量的大小及其稳定性对陀螺输出信号的性能产生很重要的影响。有较多的文献对抖动偏频量进行深入的分析讨论^[11, 15~18], 但至今尚未看到对偏频量精确测定的有关论述。和频能在一定程度上描述偏频量的大小, 由于受外界输入的影响, 将其作为偏频量有一定的局限性。

随着对二频机抖陀螺研究的不断深入, 为了对陀螺进行更为精确的控制, 偏频量的精确测定变得很有必要。以前的方案采用压电陶瓷反馈或电磁反馈可以间接获取抖动偏频量的大小, 但这两种方法

收稿日期: 2011-01-18; **收到修改稿日期**: 2011-04-29

作者简介: 樊振方(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光陀螺前沿理论与技术等方面的研究。

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(通信联系人)

都容易受灵敏度、温度以及电路增益特性等外界参数的影响^[19,20],并且要经过转换才能得到真实的偏频量。这两种方法获得的偏频量都不能实时输出。

由于二频机抖陀螺输出信号中本身含有抖动成分,如果从输出信号中直接获取抖动偏频量,则能够真实反映偏频量的大小。本文设计了从输出信号中测定偏频量的方法。该方法测量较为精确,能够实时输出,且不受外界环境的影响。采用高集成度数字信号处理器(DSP)实现了基于偏频量直接反馈的抖动闭环控制系统,实验证明达到了对抖动的精确控制,克服了温度等因素对抖动偏频量的影响。

2 偏频量与和频

抖动偏频量 Ω_{bias} 为抖动信号单位时间内扫过的角度的总和。其他文献对偏频量的定义^[21,22]可能与这个定义相差一个常数关系,没有本质的区别。设抖动信号的表达式为

$$A = A_0 \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

式中 A 为抖动幅度,一般为 $2' \sim 5'$, f 为抖频,根据不同的陀螺 f 具有不同的值,一般在 $300 \sim 1000$ Hz 之间。根据(1)式偏频量可以表述为

$$\Omega_{\text{bias}} = 4A_0 f, \quad (2)$$

抖动偏频量具有角速率的单位,文中采用 pulse/s。

在二频机抖陀螺的相关研究中一般用“和频”来衡量偏频量的大小。“和频”在不同的应用中可能有不同的含义,针对二频机抖陀螺,其含义为:激光陀螺在工作中,无论方向的正反单位时间内扫过的角度的总和。和频实际上不仅描述了抖动偏频量的大小,还包含了外界转速,是一个综合的结果。在静态下,确实可以把和频当作偏频量来看待,但当输入外界转速较大时这种近似是不精确的。例如假设抖动的抖幅为 125 个脉冲,抖动的频率为 400 Hz,那么不同输入信号下的和频值如图 1 所示。因此和频只

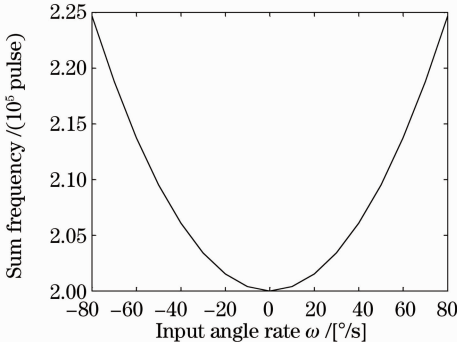


图 1 和频随外界输入角速度的变化

Fig. 1 Relationship of sum frequency and input angle rate

能在一定程度上衡量偏频量的大小,粗略描述抖动信号的作用,而且和频不能实时输出^[19],有一定的局限性。

3 抖动偏频量计算的理论分析

求取抖动信号的偏频量有两种思路,角速率有效值积分法和角速率绝对值积分法,下面的分析将会说明这两种求抖动偏频量的方法都是有效的。

3.1 基于有效值的计算方法

对(1)式求导可得角速率的表达式为

$$\omega = \frac{dA}{dt} = 2\pi f A_0 \sin(2\pi ft), \quad (3)$$

对其有效值进行积分可以表达为

$$\Omega_{\text{valid}} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} \omega^2 dt}{t_0}} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} [2\pi f A_0 \sin(2\pi ft)]^2 dt}{t_0}}. \quad (4)$$

对(4)式的积分进行运算,可得

$$\Omega_{\text{valid}} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{-\pi A^2 f \cos(2\pi ft_0) \sin(2\pi ft_0) + 2\pi (Af)^2 t_0}{t_0}}, \quad (5)$$

当 $t_0 \rightarrow \infty$ 时, $-\pi A^2 f \cos(2\pi ft_0) \sin(2\pi ft_0)$ 项为有限值,可以忽略,则

$$\Omega_{\text{valid}} = \sqrt{2\pi} Af. \quad (6)$$

(6)式与(2)式只相差一个常数,可见用有效值来求解偏频量是可取的。

3.2 基于绝对值积分的计算方法

对(3)式的绝对值进行积分可得

$$A_{\text{abs}} = \int_0^{t_0} |\omega| dt = \int_0^{t_0} |2\pi f A_0 \sin(2\pi ft)| dt, \quad (7)$$

将(7)式除以积分时间可得

$$\Omega_{\text{abs}} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{t_0} |\omega| dt}{t_0} = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{t_0} |2\pi f A_0 \sin(2\pi ft)| dt}{t_0}. \quad (8)$$

不难看出(8)式具有周期性,因此

$$\Omega_{\text{abs}} = \frac{\int_0^{1/(4f)} |2\pi f A_0 \sin(2\pi ft)| dt}{1/(4f)}, \quad (9)$$

对(9)式进行积分可得

$$\Omega_{\text{abs}} = 4A_0 f = \Omega_{\text{bias}}, \quad (10)$$

(10)式正好与(2)式对应。

4 抖动偏频量的数字化计算及仿真分析

在理论分析中,采用有效值和绝对值两种运算方法都可以计算偏频量的大小。但是上述的积分运算无法在实际中采用,因为在实际系统中,采样是有一定时间间隔的,而且通过正交解调得到的陀螺计数脉冲是经过量化的。因此必须对以上算法进行离散化处理,并对离散化后的精度进行分析研究。

4.1 基于有效值的数字化计算方法

(4)式得出的基于有效值的数字化思路如图2(a)所示。在图2(a)中,正交解调得到脉冲信号和方向信号。可逆计数器根据方向信号对脉冲做正逆计数得到角脉冲数。微分运算环节将角脉冲数做差分处理转换为角速率。高通滤波器的作用是把低频成分滤除,防止外界输入信号对偏频量测定的干扰。平方运算取得有效值,平方后的信号含有直流成分和二倍频成分。低通滤波器将二倍频成分滤除,得到直流成分。最后进行开平方运算即可得到偏频量。

在Simulink软件中对上述思路进行仿真可以得到图3(a)所示的结构,其中正弦信号发生器、零阶保持器和取整环节用来模拟陀螺实际得到的脉冲

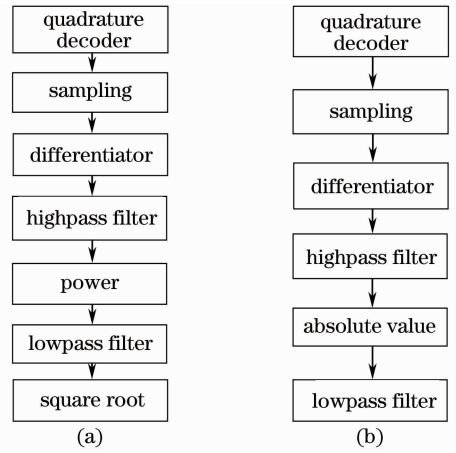


图2 抖动偏频量计算的数字化实现方案。

(a)采用有效值;(b)采用绝对值

Fig. 2 Digital realization scheme of dither bias evaluation.

(a) Using valid value; (b) using absolute value

数。采样频率为6 kHz,高通滤波器的阻带为0~100 Hz,低通滤波器的通带为0~30 Hz。对不同的抖动频率和抖动幅度做了仿真,得到实验结果如图4(a)与(b)所示。在图4(a)中,抖动幅度取为恒定值 $3.87'$,对应125个输出脉冲,抖动频率取350~450 Hz之间的不同值得到偏频量的仿真曲线,其中虚线为实际的偏频量,实线为测得的偏频量,可以看到测得的偏频量与实际的值是非常吻合的。图4(b)为抖频恒定,抖动幅度变化时的仿真曲线,仿真输出值和实际值完全重合。

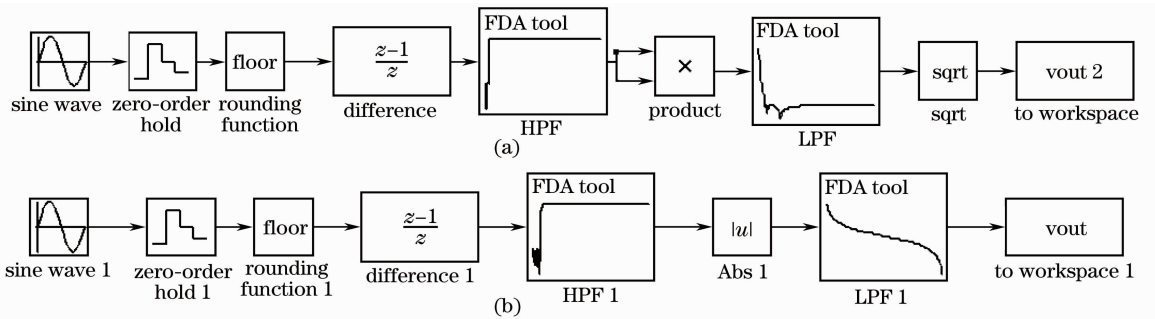


图3 两种方案的仿真。(a)采用有效值;(b)采用绝对值

Fig. 3 Simulation of the two calculation methods. (a) Using valid value; (b) using absolute value

4.2 基于绝对值的数字化设计

基于绝对值的计算方法和偏频量的实际物理意义更加吻合,对(8)式进行离散化处理可以得到图2(b)所示的结构,其与2(a)的结构基本相似,只是平方运算变成了取绝对值运算,后面少了开根号项。在Simulink中对上述思路进行仿真可以得到图3(b)所示的结构。对不同的频率和抖幅进行扫描测试,参数和方法与上面类似,结果如图4(c)与

(d)所示。在图4(c)与(d)中虚线为实际的偏频量,实线为测得的偏频量。图4(c)中大部分情况下测得的偏频量与实际的值是非常吻合的,但是在375 Hz点处出现了奇异点。

上述奇异点并不难解释。对函数 $\sin x$ 分别取绝对值和取平方,然后计算其傅里叶级数, $\sin^2 x$ 只有二倍频项,而 $|\sin x|$ 却有较强的高次谐波成分,图5为 $|\sin x|$ 的傅里叶系数的大小分布。当采样

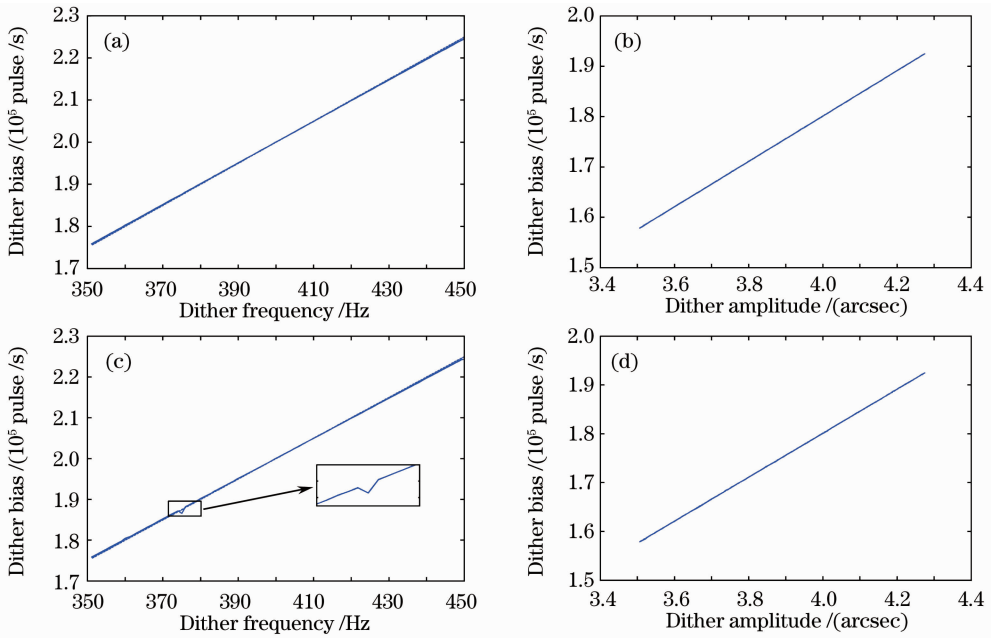


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation result

频率在抖动频率的谐波附近时有一些低频脉动,这些低频脉动经过低通滤波后可能仍会有残留,会影响偏频量的测定。在图 4(c) 奇异点处抖频的二倍频为 750 Hz,正好为采样频率 6 kHz 的基频。这就要求在采用绝对值方法计算偏频量时采样频率要避开二倍抖频的谐波点,而且采样频率越高越好。图 4(d) 虚线与实线完全重合在一起了,可以看到偏频量随抖动幅度的变化有较好的线性。

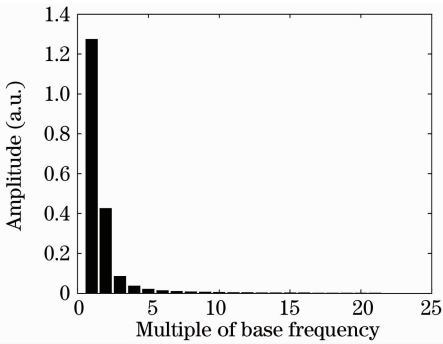


图 5 函数 $|\sin x|$ 的谐波成分

Fig. 5 Harmonics of function $|\sin x|$

5 实 验

实验室以往的抖动技术方案是通过单片机来实现系统功能。单片机通过读取压电陶瓷反馈信号的有效值,然后与参考值进行比较后对驱动电路进行控制,以达到稳幅的目的。实验采用某型号国产激光陀螺,将陀螺置于温箱内,以实现调控陀螺工作环

境温度的目的。每隔 10 min 记录一次该时间段内偏频量的平均值,测试时间为 8 h。图 6(a) 为原来采用压电陶瓷作为幅度反馈的抖动控制环路在高低温下测得的抖动偏频量,可以看到偏频量随温度的起伏是比较大的。造成这种现象的原因是:当温度发生变化时,压电陶瓷本身的灵敏度会发生变化^[19],同时对压电陶瓷反馈信号进行调理的电路特性也会发生变化,总的作用使得偏频量发生较大变化。

由于单片机位宽和计算能力的限制,通过以上方法对偏频量进行实时获取并应用于实时反馈中是不现实的。为了解决这个问题,开发了采用高集成度、带有浮点运算单元的 DSP 作为运算核心的抖动控制系统,增强了系统运算能力的同时却没有增大电路面积。图 6(b) 是直接偏频量作为抖动反馈的

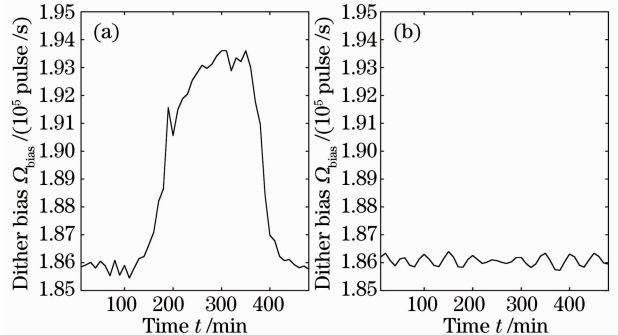


图 6 不同反馈控制的实验结果

Fig. 6 Experimental results using different feedback controls

电子系统在高低温下测得的偏频量曲线, 偏频量的目标值设为 1.86×10^5 pulse/s, 温度变化趋势和图 6(a) 相同, 可见图 6(b) 的偏频量一直在 1.86×10^5 pulse/s 的上下波动, 其稳定度明显优于图 6(a)。

6 结 论

介绍了抖动偏频量两种数字化精确计算实现方法。两种方法都能得到较小的测量误差。基于绝对值的解算方法采样频率不能在抖动信号的 $2n$ 倍附近。基于有效值的运算方法没有频率混叠, 能够避免绝对值方法存在的问题, 但开平方运算可能要占用较多的系统资源。基于以上算法开发了基于 DSP 的抖动控制系统, 实现了采用抖动偏频量对抖动幅度的直接反馈控制, 实验表明这种抖动控制方式能够有效消除温度对抖动偏频量的影响, 提高抖动控制的稳定度。

参 考 文 献

- 1 J. E. Killpatrick. Laser angular rate sensor: US Patent, 3373650[P]. 1968. 3~19
- 2 M. Fauchoux, D. Fayoux, J. J. Roland. The ring laser gyro[J]. *J. Optics*, 1988, **19**(3): 101~115
- 3 W. W. Chow. The ring laser gyro[J]. *Rev. Modern Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
- 4 Aronowitz Frederick. Fundamentals of the ring laser gyro[R]. 1999, RTO-AG-339: 1~45
- 5 Wang Guochen. Analysis of four-mode laser gyro's null shift vibration under high-low temperature process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2037~2040
王国臣. 四频激光陀螺高低温过程中零漂振荡的分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2037~2040
- 6 Yang Jianqiang, Luo Yun, Liao Dan. Study on the startup null drift characteristic of four-frequency differential laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1709~1714
杨建强, 罗云, 廖丹. 四频差动激光陀螺开机零漂特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1709~1714
- 7 Song Rui, Tang Jianxun, Zhou Jian *et al.*. Effects of dither parameters on null-shift stability and angle random walk of dithered laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2290~2294
宋锐, 汤建勋, 周健等. 抖动参数对机抖激光陀螺零偏稳定性与角随机游走的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2290~2294
- 8 Zhang Juanjuan. Laser Gyro Digital Dither Bias and Increase/Denise Technology Research[D]. Xi'an: Xi'an Shiyong University, 2009
张娟娟. 激光陀螺数字抖动偏频及加/解噪技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2009
- 9 Chen Linfeng, Yan Jizhong, Han Zonghu *et al.*. Study on optimization of dither bias for ring laser gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1387~1390
陈林峰, 严吉中, 韩宗虎等. 激光陀螺抖动偏频优化研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1387~1390
- 10 Xu Yajun. Dither Bias Research for Ring Laser Gyro[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003
徐亚军. 激光陀螺抖动偏频技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003
- 11 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
- 12 Zhang Juanjuan, Jiang Junbiao, Li Zhe. Study in digital dither bias technique of ring laser gyroscope[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, **29**(6): 63~66
张娟娟, 蒋军彪, 李哲. 环形激光陀螺数字抖动偏频技术研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, **29**(6): 63~66
- 13 Tian Haifeng. Dither Research for Ring Laser Gyro[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003
田海峰. 单轴机抖激光陀螺抖动技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003
- 14 Duan Yong, Duan Daoni, Chen Ming. The design and implement of laser gyro dither bias circuit[J]. *Mechatronics*, 2008, (5): 57~59
段勇, 段导妮, 陈明. 激光陀螺抖动偏频电路的设计与实现[J]. *机电一体化*, 2008, (5): 57~59
- 15 Tang Jianxun, Fu Wenyu, Zhang Guangfa. Experimental investigation of eliminating the dynamic lock-in error of dithered ring laser gyro[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(2): 176~188
汤建勋, 付文羽, 张广发. 消除抖动偏频激光陀螺动态闭锁误差的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(2): 176~188
- 16 Hu Zhiqiang. The error model of RLG[D]. Xi'an: Northwest University, 2008
胡志强. 激光陀螺误差模型研究[D]. 西安: 西北大学, 2008
- 17 Pan Xianfei, Jiang Mingming, Li Changhong *et al.*. Research on control method and characteristics of RLG digital dither[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, **28**(5): 99~103
潘献飞, 江明明, 李长虹等. 激光陀螺数字抖动控制方法与特性[J]. *国防科学技术大学学报*, 2006, **28**(5): 99~103
- 18 Wang Chengbin. Research on the Dithered Control of the Dithered Ring Laser Gyro[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006
王成宾. 机抖激光陀螺抖动控制误差分析与补偿[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006
- 19 Tang Jianxun, Fu Wenyu, Zhang Guangfa. A control method to keep dither bias stable[J]. *Computer Automated Measurement & Control*, 2000, **8**(1): 34~35
汤建勋, 付文羽, 张广发. 一种高精度的抖动偏频控制方法[J]. *计算机自动测量与控制*, 2000, **8**(1): 34~35
- 20 Wan Shunping. Magnetolectric dither pick-up technology in mechanically dithered ring laser gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, **15**(4): 469~473
万顺平. 机抖激光陀螺的磁电拾振技术[J]. *中国惯性技术学报*, 2007, **15**(4): 469~473
- 21 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
- 22 Zhang Pengfei, Tang Jianxun, Long Xingwu. Research on temperature characteristic of dithering mechanism in mechanically dithered RLG[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(5): 314~316
张鹏飞, 汤建勋, 龙兴武. 机抖激光陀螺抖动机构的温度特性的研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**(5): 314~316