

文章编号:1001-2486(2006)05-0099-05

激光陀螺数字抖动控制方法与特性*

潘献飞,江明明,李长虹,胡小平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要:针对传统的模拟抖动控制系统体积大、灵活性差的缺点,设计了一种基于单片机的新的激光陀螺数字抖动控制方法,建立了陀螺抖动的数学模型,比较研究了传统的模拟正弦波驱动和新的数字方波驱动的抖动特性,指出了后者不同于前者的抖幅变化律及非线性的随机噪声注入方式。仿真和实验证明,该方法能很好满足激光陀螺抖动控制要求,保证陀螺性能。

关键词:激光陀螺;抖动偏频;方波驱动;随机噪声

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A

Research on Control Method and Characteristics of RLG Digital Dither

PAN Xian-fei, JIANG Ming-ming, LI Chang-hong, HU Xiao-ping

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To address the bulk and inflexibility of traditional analog dither system, a new digital dither control method for ring laser gyroscope (RLG) was designed by using single chip processor. The dither mathematical model was built and dither characteristics were investigated for square/sine wave driving signals respectively. By comparing the driving effect, it is found that the square wave driving has different variation rate of dither magnitude and nonlinear random noise infusion method. Simulations and experiments illustrate that the new method can control the RLG dither well and assure the performance.

Key words: ring laser gyro (RLG); dither bias; square wave drive; random noise

激光陀螺的锁区是影响其测量灵敏度的重要性能指标,采用各种偏频方法缩小锁区及克服锁区的影响成为研制发展激光陀螺的关键技术。机械抖动偏频是世界上应用最早的激光陀螺偏频技术,其原理是采用小振幅高速机械抖动装置强迫环形激光器绕垂直于谐振腔环路平面的轴线来回转动,为谐振腔内相向行波对提供快速交变偏频,最后在信号处理过程中消去此频差,从而获得与输入信号相对应的输出信号^[1-3]。

作为二频激光陀螺的核心技术之一,抖动偏频技术以及建立在此基础上的抖动随机注入技术是影响激光陀螺精度的关键因素,也是国内激光陀螺发展研究的热点和难点,但公开发表的文献很少。经过近些年的发展,基于模拟电路的正弦波抖动驱动方式在国产激光陀螺上的应用日益成熟,但模拟电路分立元件多、体积大,缺乏灵活性和扩展性。而基于功能强大的数字处理器的数字控制电路,可以把陀螺的抖动偏频、腔长控制、状态检测等功能集成到一个中央处理器上,极大地缩小电路体积、增强电路功能,提高电路灵活性和扩展性,是陀螺控制电路的发展趋势。

对于数字控制电路,三态方波驱动是比正弦波更易实现和精确控制的驱动形式。但由于采用不同的抖动驱动方式及抖动随机注入方式可能对陀螺精度有较大影响,而试验证明简单地把正弦波控制技术用于方波驱动不能达到满意的效果,因此数字式驱动方式目前国内实际应用较少。基于此,本文对数字抖动控制中的三态方波的驱动方式和驱动效果进行了理论研究和仿真分析,比较了方波驱动与正弦波驱动的异同,设计了方波驱动的控制方式和抖动随机注入方式,并在工程实际中得到应用。

* 收稿日期:2006-03-28

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:潘献飞(1978—),男,博士生。

1 数字抖动控制原理

激光陀螺要得到大的抖动偏频量,需要较大的抖动幅度,因此抖动机构必须始终工作在其固有的谐振频率上。常用的模拟抖动控制电路通过电路闭环控制回路实现对抖动机构谐振频率的跟踪,电路实现复杂,参数调节不便,陀螺适应性差。而数字控抖电路用软件实现上述功能,可根据陀螺抖动特性自适应调节相关参数,实现陀螺抖动的自适应控制。其控制过程可分为三个阶段:

强制抖动:系统上电,陀螺静止,首先必须给陀螺抖动机构施加强制的抖动信号,使陀螺起抖。强制抖动信号是与陀螺谐振频率接近的脉冲驱动信号,由单片机定时器控制产生。

同步抖动:陀螺受激抖动时,抖动传感器产生反馈信号,反馈信号放大整形后作为单片机的输入,单片机根据反馈信号进行同步驱动,经过短时间的动态调整,陀螺进入谐振状态,以谐振频率周期抖动,抖动控制程序生成的驱动信号也与陀螺谐振周期同步,形成闭环稳定的频率跟踪环。

随机注入:陀螺达到谐振状态后,必须在周期激励驱动信号中注入随机噪声调制,以减小陀螺动态锁区对陀螺输出的影响。随机信号由高阶 m 序列生成的伪随机序列模拟。注入随机调制后,陀螺即进入正常抖动状态。

陀螺抖动激励信号程序设计示意图如图 1 所示。

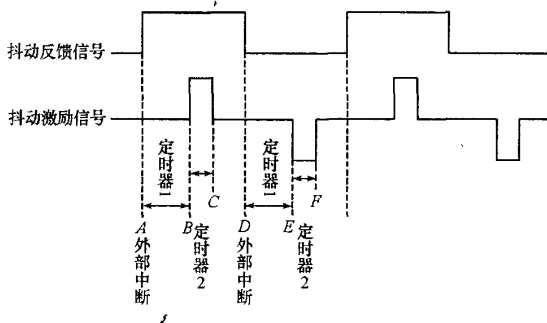


图 1 陀螺抖动激励信号生成逻辑

Fig.1 Generating logic of RLG dither driving signal

2 数字抖动控制建模

激光陀螺的抖动机构可以近似为一个典型的二阶振荡环节,其传递函数为^[4]

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{K \cdot V_D(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{1}$$

其中 θ 为抖动角度, V_D 为抖动激励电压,系统谐振频率 $\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 。设系统谐振频率 $\omega_0 = 400\text{Hz}$, 品质因数 $Q = 1/2\zeta = 10$, 则系统幅频和相频特性如图 2 所示。

抖动驱动信号是陀螺抖动机构的激励源,控制陀螺作微幅高频振动。对于传统的模拟驱动电路,驱动信号为正负交变的正弦波信号,其信号形式为

$$x_a(t) = A \sin(\omega_0 t) \tag{2}$$

对于本文设计的数字驱动电路,驱动信号为正负交变的三态方波信号,其信号形式为

$$x_d(t) = \begin{cases} -A, kT_0 - \frac{T_0}{4} - \frac{\Delta T}{2} < t < kT_0 - \frac{T_0}{4} + \frac{\Delta T}{2} \\ A, kT_0 + \frac{T_0}{4} - \frac{\Delta T}{2} < t < kT_0 + \frac{T_0}{4} + \frac{\Delta T}{2} \\ 0, t \text{ 为其他} \end{cases} \quad (0 \leq \Delta T \leq \frac{T_0}{2}, k \text{ 为整数}) \tag{3}$$

其一个周期 ($-T_0/2 \sim T_0/2$) 的驱动波形如图 3 所示。可以看出,驱动信号是一周期为 T_0 , 基波频率为 $\omega_0 = 2\pi/T_0$ 的方波信号。对 $x_d(t)$ 做傅里叶分解得

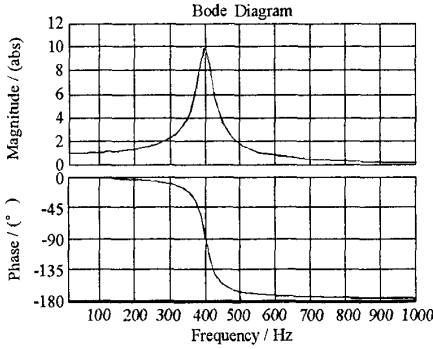


图2 陀螺抖动机构的幅频和相频特性
Fig.2 Magnitude-frequency and phase-frequency of RLG dither drive device

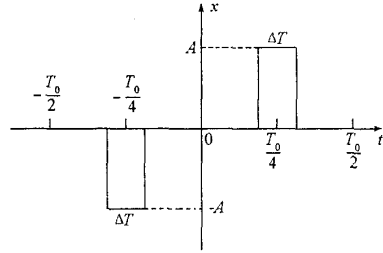


图3 抖动驱动信号曲线图
Fig.3 RLG dither driving signal

$$x_d(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \frac{k\pi}{2} \sin \frac{k\pi\Delta T}{T_0} \sin(k\omega_0 t) \quad (0 \leq \Delta T \leq \frac{T_0}{2}) \quad (4)$$

在实际应用中,虽然随着温度等外界环境的变化,抖动机构的抖动参数可能会有微小漂移,但抖动机构的谐振频率是闭环跟踪的,抖动机构的输入输出关系在闭环控制系统中是基本确定的。因此,在分析抖动机构的输入信号形式时,可以把抖动机构近似为线性时不变(LTI)系统。

对于 LTI 系统,若 $x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t}$, 系统传递函数为 $H(s)$, 则系统输出

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k H(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (5)$$

对于模拟正弦波输入 $x_a(t)$, 系统输出为

$$y_a(t) = A \sin(\omega_0 t) H(s) \quad (6)$$

对于数字三态方波输入 $x_d(t)$, 系统输出为

$$y_d(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \frac{\pi\Delta T}{T_0} \sin\omega_0 t - \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi\Delta T}{T_0} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi\Delta T}{T_0} \sin 5\omega_0 t - \dots \right) H(s) \quad (7)$$

由于信号 $x_d(t)$ 的直流分量和偶次谐波都为 0, 由图 2 陀螺抖动机构 $H(s)$ 的幅频特性可知, $x_d(t)$ 的三次及高次谐波经过抖动机构后剧烈衰减, 对抖动机构的影响趋近于 0, 而基波分量起主要作用。因此, 三态方波驱动时的系统输出可近似为

$$y_d(t) \approx \frac{4A}{\pi} \sin \frac{\pi\Delta T}{T_0} \sin(\omega_0 t) \cdot H(s) \quad (0 \leq \Delta T \leq T_0/2) \quad (8)$$

对于陀螺抖动机构, 其品质因数 Q 是一重要指标。在保证其他性能的前提下, 一般要求品质因数越高越好。 Q 越大, 高次谐波衰减越剧烈, 上式越趋近于相等, 方波驱动的抖动效果越接近于正弦波驱动, 只是其控制方式不同。

3 数字驱动的抖幅变化规律

对于正弦波驱动, 由式(6), 陀螺抖幅即抖动机构输出幅度为

$$V_a = |y_a(t)| = A \cdot |H(s)| \quad (9)$$

可见, 当抖动机构的特性 $H(s)$ 确定后, 其输出抖幅仅取决于正弦波驱动信号的幅度 A , 且与 A 成正比。设驱动信号的最高电压幅度为 A_m , 则上式变为

$$V_a = \frac{A}{A_m} \cdot A_m |H(s)| = k_a \cdot A_m |H(s)| \quad (10)$$

其中, 抖幅相对变化率 $k_a = A/A_m$ 。

因为实际抖动机构的品质因数 Q 较大, 对于三态方波驱动, 由式(8), 陀螺抖幅输出可近似为

$$V_d = |\hat{y}_d(t)| \approx \frac{4A}{\pi} \sin\left(\frac{\Delta T}{T_0} \pi\right) \cdot |H(s)| \quad (0 \leq \Delta T \leq T_0/2) \tag{11}$$

数字三态方波驱动信号的幅度 A 取最高电压幅度 A_m 不变,通过调节方波信号的占空比调节驱动的大小。上式变为

$$V_d = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\Delta T}{T_0} \pi\right) \cdot A_m |H(s)| = k_d \cdot A_m |H(s)| \quad (0 \leq \Delta T \leq T_0/2) \tag{12}$$

其中,抖幅相对占空比变化率 $k_d = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\Delta T}{T_0} \pi\right)$ 。

分别取 $A = 0 \sim A_m, \Delta T = 0 \sim T_0/2$,则正弦波驱动和三态方波驱动的抖幅变化率 k_a, k_d 如图 4 所示,细直线表示正弦波驱动,星号线表示方波驱动。

可见,正弦波驱动的抖幅变化率是线性的,输出抖幅 V_d 正比于正弦波驱动电压 A 。如图 5 所示,三态方波驱动的抖幅变化率是正弦变化的,当方波驱动信号占空比在 25%,即 $\Delta T = T_0/4$ 以下时,可近似为线性变化率;当方波占空比大于 25%时,抖幅变化率非线性,造成方波抖动随机注入的非线性;当方波占空比为 50%,即 $\Delta T = T_0/2$ 时,输出抖幅达到最大值,且方波驱动得到的陀螺抖幅略大于正弦波驱动的抖幅。

用 Matlab 对上述抖动模型进行仿真,分别用正弦波驱动,占空比 25% 和 50% 的三态方波驱动陀螺抖动机构,输出曲线即为陀螺实际抖动曲线,其驱动效果类似,但抖幅变化特性不同,与上述推导结果一致。

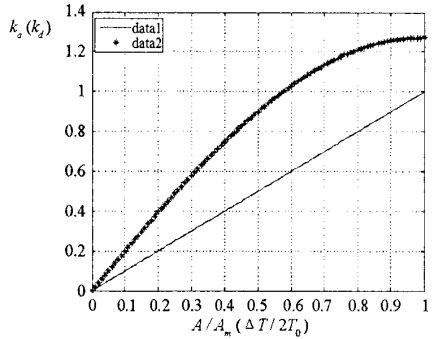


图 4 正弦波和方波驱动抖幅变化率
Fig.3 The relative ratio of dither magnitude in the case of sin wave and square wave

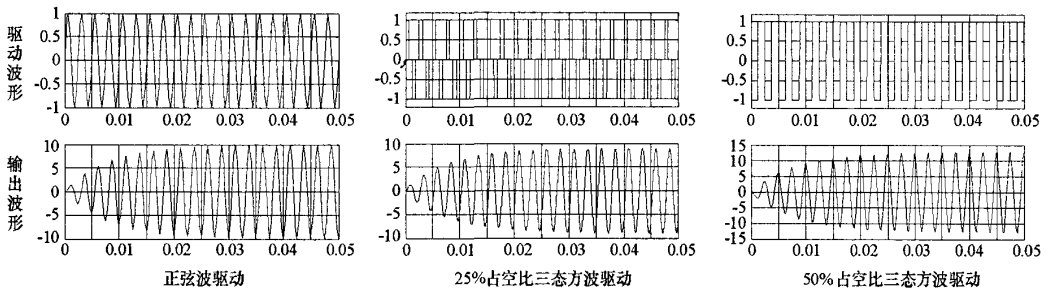


图 5 不同驱动信号下的抖动输出波形
Fig.5 The dither output waveform when the different driving signals are inputted

4 数字抖动的随机噪声注入方式

上述正弦波和方波驱动都为等幅的交变驱动,得到陀螺的高频等幅振动,可以大部分消除激光陀螺的闭锁误差。但在每个抖动周期的抖动换向点,陀螺总是不可避免地快速进出锁区,此为陀螺的动态锁区。动态锁区的存在,使陀螺精度还远远不能达到导航级的精度要求,必须予以消除。动态锁区的消除技术是陀螺抖动技术的关键,也是提高激光陀螺精度的核心技术之一。

为了消除激光陀螺的动态锁区,一般采用在抖动中注入一定强度的调幅随机噪声的方法,使抖动幅度随机变化^[5-6]。正弦波驱动一般把随机噪声调制在正弦波幅值电压 A 上,三态方波驱动则把随机噪声调制在脉冲占空比上,从而实现陀螺抖动的随机变化。由上节抖幅变化特性可知,把同样的随机噪声叠加在正弦波和方波上,将得到不同的随机输出效果。也就是说,要得到同样的随机输出效果,正弦波和方波叠加的随机调制是不同的。

设陀螺需要 $\pm \alpha\%$ 的抖动随机量,即抖幅 $V = V_0(1 \pm \alpha\%)$,则正弦波驱动时,有

$$V_a = V_{a0}(1 \pm \alpha\%) = k_a(1 \pm \alpha\%) \cdot A_m |H(s)| = A(1 \pm \alpha\%) \cdot |H(s)| \quad (13)$$

此时无论正弦波驱动幅度 A 为何值,只需在 A 上同比叠加 $(\pm \alpha\%)A$ 的随机驱动量即可得到陀螺相应的 $\pm \alpha\%$ 的随机抖动力。

当三态方波驱动时,有

$$V = V_d(1 \pm \alpha\%) = k_d(1 \pm \alpha\%) \cdot A_m |H(s)| \quad (14)$$

设 ΔT_x 为要求的抖动驱动电平宽度,则由上式可得

$$\sin\left(\frac{\Delta T_x}{T_0}\pi\right) = (1 \pm \alpha\%) \sin\left(\frac{\Delta T}{T_0}\pi\right) \quad (15)$$

当 ΔT 较小时,正弦函数为小量,则上式可近似为线性关系

$$\frac{\Delta T_x}{T_0}\pi = \frac{\Delta T}{T_0}\pi(1 \pm \alpha\%) \quad (16)$$

由此得

$$\Delta T_x = \Delta T(1 \pm \alpha\%) \quad (17)$$

只需在抖动驱动电平宽度 ΔT 上同比叠加 $(\pm \alpha\%) \Delta T$ 的随机驱动量即可。

当 ΔT 不是小量时,由式(15)可得

$$\Delta T_x = \frac{T_0}{\pi} \arcsin[(1 \pm \alpha\%) \cdot \sin\left(\frac{\Delta T}{T_0}\pi\right)] \quad (18)$$

可见,抖幅要得到 $\pm \alpha\%$ 的随机量, ΔT 的调节量 ΔT_x 不是线性同比调节的,而是正弦变化的。电平调节量的大小不仅与 α 有关,也与当前三态方波的占空比 $\Delta T/2T_0$ 有关。要得到相等的 $\pm \alpha\%$ 的随机量,三态方波占空比不同, ΔT 的调节量也不同。

因此,对于陀螺的三态方波驱动,在保证陀螺抖幅的情况下,尽可能控制三态方波的占空比在 25% 以下,此时抖幅变化率近似呈线性,可以直接采用同比的随机注入;当占空比大于 25% 时,为了保证陀螺精度,可利用式(18),根据此时的方波占空比推算方波电平调节量 ΔT_x ,以保证陀螺要求的随机强度。实际应用中为了简化实时计算量,可在控制计算机中建三角函数表,采用查表法来实现。

5 结论

抖动偏频技术是影响激光陀螺精度的关键因素之一,在模拟偏频技术的基础上,重点研究了三态方波驱动的数字偏频技术,设计实现了三态方波驱动的激光陀螺数字抖动控制方法,指出了三态方波驱动不同于正弦波驱动的抖幅特性和非线性随机噪声注入方法。本文研究的激光陀螺数字抖动控制方法,已成功应用于多套激光陀螺捷联惯导系统。实验证明,该方法能满足抖动控制要求,有效克服激光陀螺静态和动态锁区,保证陀螺精度。

参考文献:

- [1] Chow W W, et al. The Ring Laser Gyro[J]. Review of Modern Physics, 1985, 57(1): 61 - 104.
- [2] Wilkinson J R. Ring Lasers[J]. Prog. Quant. Electr., 1987, 11: 1 - 103.
- [3] Tazarets D A, Mark J G, et al. Ring Laser Gyroscope Dither Drive System and Method [P]. United States Patent: Patent Number 4,981,359, 1991.
- [4] 汤建勋, 游元平, 付文羽. 抖动偏频激光陀螺的抖动控制器[J]. 应用激光, 2000, 20(1): 24 - 26.
- [5] Priddy L W. RLG Dither Noise Injection by Means of Reference Modulation[P]. United States Patent: Patent Number 5,774,216, 1998.
- [6] Kay R M. Sinusoidal Noise Injection into the Dither of a Ring Laser Gyroscope[P]. United States Patent: Patent Number 5,416,584, 1995.

