光纤陀螺随机调制的理论分析及实验

张 ▮ 潘 雄 张春熹

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 偏置稳定性是描述陀螺性能的重要指标,而电路中的交叉干扰是导致陀螺输出漂移的重要原因. 采用随机调制的方法能够减小陀螺中交叉干扰产生的输出漂移. 采用快速傅立叶变换(FFT)的方法对方波调制和随机调制产生的交叉干扰进行了分析,分析结果表明,采用方波调制时,交叉干扰与方波同频,无法滤除,导致陀螺输出的偏置误差以及陀螺输出对光强的依赖性;而采用随机调制,交叉干扰与方波频率不同,能够滤除,从而减小交叉干扰带来的随机漂移. 采用的随机调制为$-3\pi/2,-\pi/2,\pi/2,3\pi/2$ 调制,能够保证陀螺工作点在灵敏度最高的偏置点上,其频谱主要成分为方波基波的偶次谐波,通过陀螺电路中的滤波,能够将其滤掉,消除交叉干扰对陀螺输出带来的干扰. 对方波调制和随机调制分别进行了实验,通过实验,证明了该方法的正确性,得到了随机调制能够抑制光纤陀螺中由于交叉干扰产生的输出漂移的结论.

关 键 词: 光纤陀螺; 交叉耦合; 随机调制; 误差校正

中图分类号: V 241.5$^+$9

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0195-04

Theory analysis and experiment of random modulation in FOG

Zhang Xi Pan Xiong Zhang Chunxi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Bias stability is an important performance of gyro. But in digital closed loop fiber optical gyro (FOG), it is influenced extremely by the electrical crosstalk in the electronics. Output drift can be reduced by using random modulation. The crosstalk of square wave modulation and random modulation was analyzed through fast Fourier transformation(FFT). When square wave modulation is used, the crosstalk result has the same square wave frequency with the photodetector analog output. So it can not be filtered in the gyro electronic and bias error arises in output. Further more , it causes the output dependence on the light intensity. When random modulation is used, the crosstalk result has different frequency with the photodetector analog output, so the output of FOG has more stablity. The random modulation point is $-3\pi/2,-\pi/2,\pi/2,3\pi/2$, which is the most sensitive point. The modulation wave has even harmonious of square wave frequency. Experimental results indicate that bias error can be restrained and the bias stability of output increased when random modulation is used in digital closed loop FOG.

Key words: FOG; crosstalk; random modulation; error correction

陀螺仪是敏感相对于惯性空间角运动的装置. 它作为一种重要的惯性敏感器,用于测量运载体的姿态角和角速度,是构成惯性系统的核心器件. 在飞行器导航、舰船导航和陆用导航应用中,惯性系统通过对陀螺输出进行积分获得运载体的角增量,陀螺输出漂移将严重影响数据的准确性.

在数字闭环光纤陀螺中,理想闭环条件下,输出漂移的主要原因包括相位调制器半波电压的变

收稿日期: 2004-12-17

作者简介: 张 ▮(1972-),女,吉林珲春人,讲师, zhangxi1972@163.com.

化和光波长的变化. 在实际情况中,干涉光强的变化、前置放大器放大倍数的变化也会引起陀螺输出漂移. 针对这些问题采用了相应的解决方案,如,针对调制器半波电压变化采用的第二闭环,实时调整输出阶梯波的峰值,保证阶梯波产生相位的准确性. 针对光源光功率和光波长的变化采用高精度光源驱动电路和温控电路,能够保证光源输出光功率和光波长的稳定.

研究证明,交叉干扰也是导致数字闭环光纤陀螺输出漂移的主要原因[1,2],采用随机调制代替方波调制能够抑制交叉干扰,从而减小陀螺的输出漂移. 本文对此进行了理论分析和实验研究,并得出采用随机调制能够抑制陀螺输出漂移的结论.

1 交叉干扰导致输出漂移的分析

1.1 数字闭环光纤陀螺的模型

数字闭环光纤陀螺采用方波调制技术,数字锁相技术以及数字闭环技术进行检测,它的模型框图如图1所示. 图中 Φ_s 为 Sagnac 相移,Φ_M 为调制相移,Φ_f 为反馈相移,各环节的输入输出关系在图中示出.

根据闭环陀螺的工作原理,在理想情况下系统达到稳定时,$\Phi_f \approx \Phi_s$,因此有

$$D_{out} = -\frac{2\pi LD}{\lambda C} \times \frac{2^N}{K_{fp} V_{pp}} \Omega \tag{1}$$

式中,L 为光纤长度;D 为光纤环直径;λ 为光波长;C 为真空中光速;K_{fp} 为相位调制器的调制系数;V_{pp} 为调制器的 2π 电压;N 为 D/A 转换器的位数[3].

上式表明,数字光纤陀螺的输出仅与光纤环的有效面积、光平均波长和波导半波电压有关,而与光源光强、前放的放大倍数无关,体现了采用闭环方式进行检测的优越性.

1.2 有交叉干扰的数字闭环光纤陀螺模型

在数字电路与模拟电路共存的光纤陀螺检测电路中,交叉干扰是无法避免的,由于采用方波调制,由方波产生的干扰信号与被测信号同频同相,与被测信号叠加在一起参加解调,使陀螺的输出增加了一个额外的直流偏置. 交叉干扰信号本身的不稳定,以及由于交叉干扰的引入,导致陀螺输出与光强、放大倍数的依赖性,将导致陀螺的输出信号不稳定.

如图2所示为具有交叉干扰的改进的数字闭环光纤陀螺模型.

图中 $\Delta V_1(t)$ 和 $\Delta V_2(t)$ 分别表示由阶梯波交叉干扰产生的与方波同频同相的干扰信号,设信

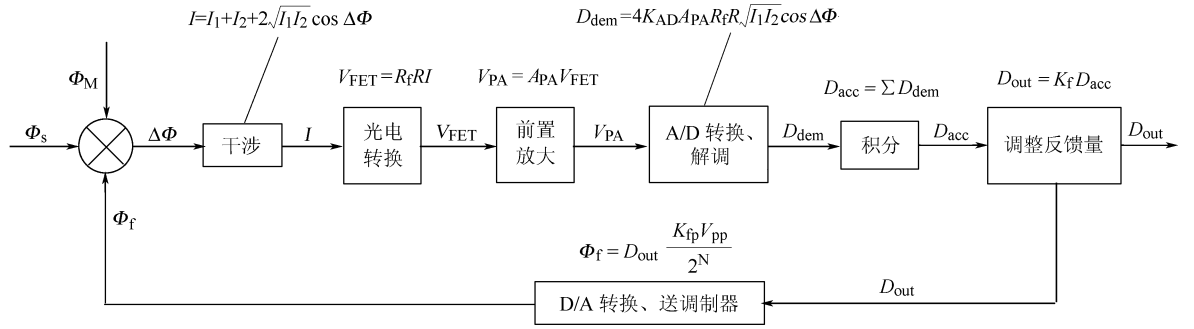


图1 数字闭环光纤陀螺模型框图

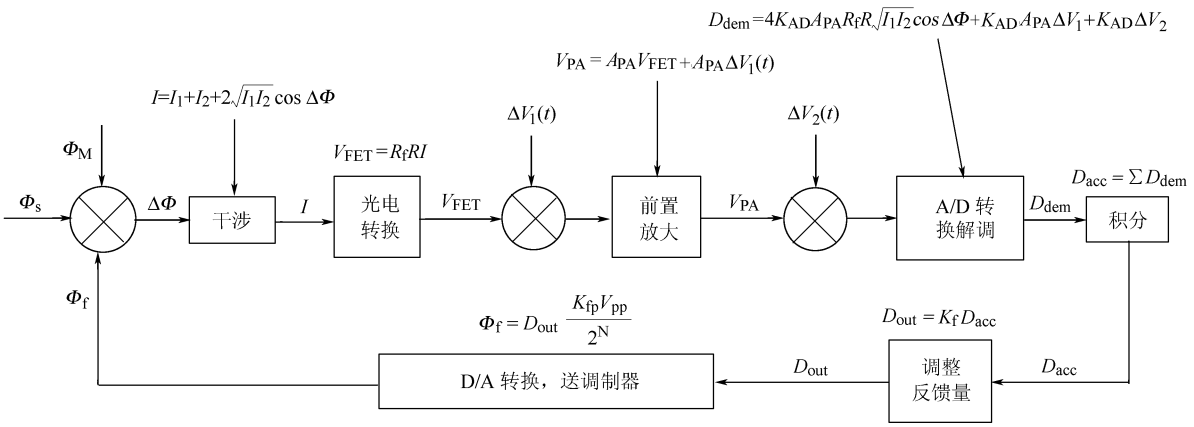


图2 有交叉干扰的数字闭环光纤陀螺模型框图

号的幅值为 ΔV_1 和 ΔV_2. 当环路稳定时,$D_{\mathrm{dem}} \approx 0$,即

$$D_{\mathrm{dem}} = 4K_{\mathrm{AD}}A_{\mathrm{PA}}R_{\mathrm{f}}R\sqrt{I_1 I_2}\cdot\cos\Delta\Phi + K_{\mathrm{AD}}A_{\mathrm{PA}}\Delta V_1 + K_{\mathrm{AD}}\Delta V_2 \approx 0 \tag{2}$$

当采用$\pm\frac{\pi}{2}$的方波调制时,上式变为

$$4K_{\mathrm{AD}}A_{\mathrm{PA}}R_{\mathrm{f}}R\sqrt{I_1 I_2}\sin(\Phi_{\mathrm{s}} - \Phi_{\mathrm{f}}) + K_{\mathrm{AD}}A_{\mathrm{PA}}\Delta V_1 + K_{\mathrm{AD}}\Delta V_2 \approx 0 \tag{3}$$

即

$$D_{\mathrm{out}} = \left(\frac{2\pi LD}{\lambda C}\Omega + \frac{A_{\mathrm{PA}}\cdot\Delta V_1 + \Delta V_2}{4A_{\mathrm{PA}}R_{\mathrm{f}}R\sqrt{I_1 I_2}}\right)\times\frac{2^N}{K_{\mathrm{fp}}V_{\mathrm{pp}}} \tag{4}$$

由此可以看出由于干扰的引入,陀螺的输入输出函数中的参数增多,函数关系变得复杂,光源光功率的变化、耦合器分束比变化、前置放大器的放大倍数的变化均影响陀螺的输出. 因此,要提高陀螺输出的稳定性,就应该从稳定公式中的参数出发,如,稳定前置放大器增益,稳定光源光功率,减小交叉干扰等. 采用随机调制能够减小交叉干扰,本文下面的小节将对此进行详细分析.

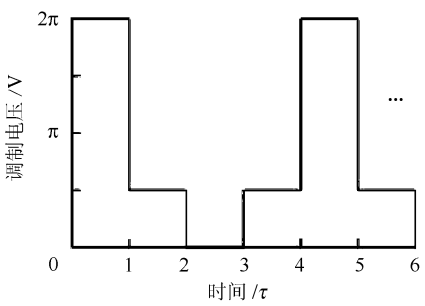
2　随机调制及其频谱分析

2.1　随机调制与方波调制等效性分析

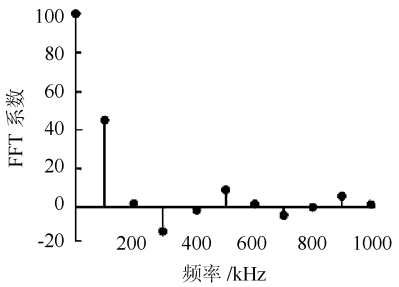
数字闭环光纤陀螺是采用数字锁相放大器来实现信号检测的,并且由方波调制实现被测信号的频谱搬迁,实现信号的锁相解调. 所用方波的周期是光纤环渡越时间的两倍,输出信号的周期与之相同. 随机调制的主题思想是采用$\left(\frac{-3\pi}{2},\frac{-\pi}{2},\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2}\right)$的调制方式代替$\left(\frac{\pi}{2},\frac{-\pi}{2}\right)$方波调制[4~6],但解调方式保持不变,因此,必须保证被测信号频谱搬迁保持不变,保证锁相解调的有效性. 干涉信号是相位差的余弦函数,因此,对于输出信号来说,叠加$\frac{-3\pi}{2}$与叠加$\frac{\pi}{2}$等效,叠加$\frac{3\pi}{2}$与叠加$\frac{-\pi}{2}$等效,因此,采用随机调制不会改变输出信号的频率和幅值.

2.2　随机调制信号的频谱分析

为产生$\left(\frac{-3\pi}{2},\frac{-\pi}{2},\frac{\pi}{2},\frac{3\pi}{2}\right)$的调制,需要将图 3a 所示的调制信号加到调制器的电极两端,图中,τ 是光纤环的度越时间. 采用 FFT(快速傅里叶变换)对该信号进行频谱分析,得到如图 3b 所示结果.



a　随机调制信号



b　随机信号频谱分析

图 3　随机调制信号及其频谱分析

图 3 中的频谱分析以光纤环长度 500 m 为例进行的,光纤渡越时间 $\tau = 2.5$ μs,被测信号是频率为 200 kHz. 通过频谱分析结果可以看出,随机调制的频谱的基频是 100 kHz,主要谐波成分是奇次谐波,即随机调制信号耦合到模拟信号端的干扰与被测信号不是同频的,采用锁相放大器进行检测,设计的数字锁相放大器的$(2n+1)$次谐波处的等效噪声带宽为

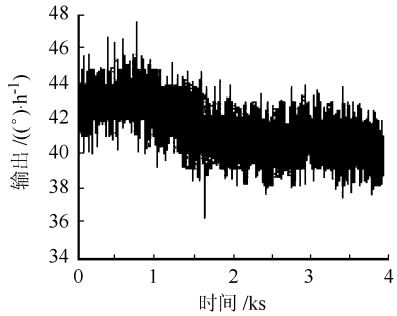
$$\Delta f_{N(2n+1)} = \frac{1}{(2n+1)^2}\cdot\frac{1}{2T_{\mathrm{c}}} \tag{5}$$

式中,T_{c} 是积分时间,设计中 $T_{\mathrm{c}} = 500$ μs,得到基波处的等效噪声带宽为 $\Delta f_{N1} = 2$ kHz,可以将干扰信号滤除,不会影响陀螺的输出. 因此,采用随机调制可以减小调制信号对模拟信号的干扰,从而抑制陀螺输出漂移.

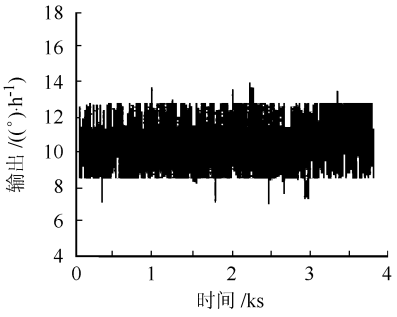
3　实验结果及分析

实验采用一只光纤环为 500 m 长的陀螺,分别采用随机调制和方波调制进行信号检测. 图 4a 是采用方波调制的陀螺输出数据,图 4b 是采用随机调制的陀螺输出数据. 图中显示的是间隔 1 s 的陀螺输出数据,计算得到 3σ 的零偏稳定性数据,图 a 为 1.5(°)/h,图 b 为 1.0(°)/h;对数据做 10 s 平滑处理,得到 1σ 的零偏稳定性数据图 a 为1.0(°)/h,图 b 为 0.35(°)/h. 从图中可以观察到,图 a 和图 b 的零偏稳定性的差异主要来自输出的漂移,图 a 中最初 1 000 s 和最终 1 000 s 的

零偏变化为2.2(°)/h,图b中的仅为0.2(°)/h.



a 方波调制



b 随机调制

图4 采用方波调制和随机调制时的陀螺输出

可以看出,采用方波调制时,陀螺输出的漂移非常显著,采用随机调制后陀螺的输出漂移减小,稳定性有了明显改善,从而提高了陀螺的零偏稳定性. 从式(4)中可以看到,正是由于交叉干扰的存在,才导致陀螺输出的漂移,本实验采用随机调制,明显减小了陀螺输出的漂移,说明采用随机调制抑制了交叉干扰,减小了陀螺漂移,实验结果与理论分析相吻合.

4 结束语

本文通过理论分析和实验研究得到:采用方波调制的数字闭环光纤陀螺的检测电路中存在调制信号对被测弱信号的交叉干扰,交叉干扰将导致陀螺的输出漂移. 采用随机调制能够抑制交叉干扰,从而减小陀螺的输出漂移.

参考文献(**References**)

[1] Cordova A, Patterson R A, Rahn J, *et al*. Progress in navigation-grade IFOG performance[A]. In: Rric Udd, Lefèvre H C, Kazuo Hotate, eds. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference[C]. Denver: SPIE, 1996. 207~217

[2] Spahlinger G. Error compensation via signal correlation in high-precision closed-loop fiber optic gyros[A]. In: Rric Udd, Lefèvre H C, Kazuo Hotate, eds. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference[C]. Denver: SPIE, 1996. 218~228

[3] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. London: ARTECH HOUSE, 1993

[4] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,1997
Hu Guangshu. Digital signal processing: theory, arithmetic and realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997(in Chinese)

[5] Vinay K I, John G P. Digital signal processing using MATLAB [M]. Beijing: Science Press, 2003

[6] Paulo S R D, Eduardo A B D, Silva S L N. Digital signal processing-system analysis and design[M]. Beijing: Pub House of Electronic Industry, 2002

[7] Sanders S J, Strandjord L K. Fiber optic gyro technology trends—a Honeywell perspective[J]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002,1:5~8