频谱混叠对光纤陀螺振动特性测试的影响

宋凝芳 赵亚飞 潘 雄 张春生

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 振动过程中的频谱混叠会使光纤陀螺中采样后信号相对于原信号产生失真现象,从而影响测试结果.为了验证频谱混叠带来的影响,并进一步抑制频谱混叠现象的发生,设计实现了一套用于获取光纤陀螺原始输出的闭环数据采集系统(速率可达 1 MHz × 16 bit),分析了振动测试过程中光纤陀螺闭环数据的特征,发现目前光纤陀螺中常用滤波器无法有效滤除闭环数据中振动成分,因此可能会由于采样频率设置不当引起频谱混叠;通过 matlab 仿真和陀螺振动实验对频谱混叠造成的影响进行了验证;针对频谱混叠现象提出了抑制措施.实验结果表明对于采用类似数据采集过程的光纤陀螺,改进后的设计可以有效避免频谱混叠现象的发生.

关 键 词: 光纤陀螺; 闭环数据; 振动测试; 频谱混叠; 采集系统

中图分类号: U 666.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)04-0433-06

Influence of frequency mixing on vibration test of fiber optic gyroscope

Song Ningfang Zhao Yafei Pan Xiong Zhang Chunsheng

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Frequency mixing happening in vibration test on fiber optic gyroscope (FOG) can cause signal distortion of the output of FOG, which will influence the test result. In order to verify the consequence of frequency mixing and restrain it, a closed-loop data acquisition system which was used to get the original output of FOG (namely closed-loop data) was designed and realized (the speed could reach 1 MHz × 16 bit). The character of closed-loop data in vibration test was analyzed and the fact that the vibration error could not be wiped out by filter was known, which would cause frequency mixing if the sampling frequency was not proper. The frequency mixing was verified through simulation by matlab and vibration test on FOG. The restraining method of frequency mixing was given. Experiments show that for the FOG whose data acquisition process was designed as what was referred, the design improved could avoid frequency mixing very well.

Key words: fiber optic gyroscope; closed-loop data; vibration test; frequency mixing; data acquisition system

振动特性是光纤陀螺动态特性的一个重要组成部分,是衡量陀螺性能的一个重要指标.理论上,与传统机械陀螺和激光陀螺相比,光纤陀螺的全固态、无运动部件的特点,使其具有抗冲击、抗振动、对加速度不敏感的优势[1-2],但由于光纤的弹光效应,使光纤陀螺在实际应用中受到冲击、振动等外界应力的影响时,会产生非互易相移,影响光纤陀螺的精度和稳定性[3-5].研究人员之前对光纤陀螺振动特性的分析主要集中于光纤环和光电器件尾纤固化、避免机械谐振点以及环路控制的改进等方面[6-10],这些措施从源头上已经可以将振动误差控制在可接受范围内,使陀螺的精度和稳定性维持在正常水平内.但是由于陀螺中的滤波器一般无法彻底消除原始输出中的振动成分,因此在陀螺的振

收稿日期: 2013-06-13; **网络出版时间**: 2013-12-05 11:13; **DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0335

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131205.1113.002.html

作者简介: 宋凝芳(1968-),女,天津人,研究员,snf@263.net.

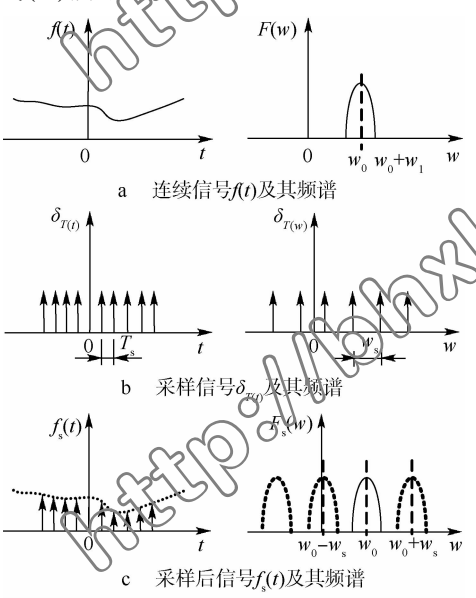
http://bhxb.buaa.edu.cn

动测试过程中很可能会由于采样频率的设计不当导致振动测试时出现频谱混叠现象. 本文从陀螺振动测试过程中可能发生采样频谱混叠的角度分析采集过程对于振动特性测试的影响,通过对陀螺闭环数据的分析明确了振动成分会混入陀螺的原始输出,进而通过仿真分析和陀螺振动实验验证了频谱混叠现象的发生,并提出了有效的改进措施抑制了频谱混叠对振动测试带来的影响.

1 频谱混叠现象原理分析

通常所说的频谱混叠一般是指信号的采样过程中不满足奈奎斯特采样定理(即采样频率要高于目标信号最高频率成分频率的 2 倍),则采样之后的信号在恢复到时域之后就会由于频谱的混叠而产生失真[11]. 本文所指的频谱混叠是指一个信号 a 由于时域的采样发生频谱的搬移之后和另外一个信号 b 的频谱发生了叠加,从而导致了 b 信号在时域上产生了失真的现象.

如图 1a 所示,设一个连续信号 $f(t)$ 的频谱分布为 $F(w)$,中心频率 $w_0 = 2\pi f_0$,带宽 $2w_1 = 2(2\pi f_1)$,使用频率为 $w_s = 2\pi f_s$ 的采样信号对其进行采样,采样信号及其频谱如图 1b 所示,采样后的信号 $f_s(t)$ 及其频谱 $F_s(w)$ 如图 1c 所示. 采样后信号 $f_s(t)$ 由原信号 $f(t)$ 与单位冲击序列 $\delta_{T(t)}$ 相乘得到,表达式如式(1)所示. 对式(1)进行傅里叶变换,得采样后信号的频谱 $F_s(w)$ 表达式如式(2)所示.



a 连续信号$f(t)$及其频谱

b 采样信号$\delta_{T(t)}$及其频谱

c 采样后信号$f_s(t)$及其频谱

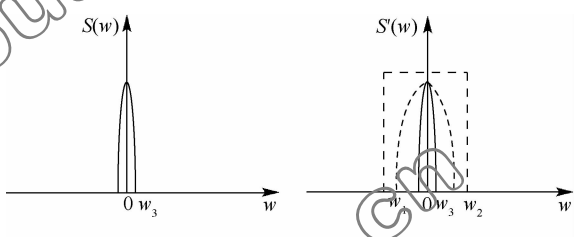
图 1 采样过程的信号波形和频谱

$$f_s(t) = f(t) \times \delta_{T(t)} = f(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \tag{1}$$

$$F_s(w) = \frac{1}{2\pi}[F(w) \times \delta_{T(w)}] = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(w - nw_s) \tag{2}$$

图 1c 显示经过采样之后原信号的频谱发生了搬移,搬移间隔即为 $w_s = 2\pi f_s$,当 $w_s = w_0$,或 w_s 和 w_0 接近时,搬移到中心频率为 $w_0 - w_s$ 处的部分频谱会在 0 Hz 的附近.

假设一低频有用信号 $s(t)$,其频谱中心频率为 0,带宽为 $2w_3$,其频谱记为 $S(w)$,如图 2a 所示,且 $w_3 < w_1$. 假设图 1a 所示信号 $f(t)$ 混入到有用信号 $s(t)$ 中形成信号 $s'(t)$,则如果使用频率为 $w_s(w_s = w_0)$ 的采样信号对 $s'(t)$ 进行采样,并且使用中心频率为 0,带宽为 $2w_2$ 的低通滤波器进行滤波(一般陀螺输出之前会进行此操作),则采样完成后信号频谱 $S'(w)$(如图 2b 所示)为 $S(w)$ 和 $F_s(w)$ 的中心频率为 $w_0 - w_s$ 的频谱成分的叠加,从而使得变换到时域后有用信号 $s(t)$ 中混入了干扰频率成分,这就是本文所指的频谱混叠现象.



a 有用信号原始频谱 b 混叠后有用信号频谱

图 2 频谱混叠现象示意图

2 振动状态光纤陀螺闭环数据分析

2.1 闭环数据概述

图 3 所示为数字闭环光纤陀螺的原理框图. a 点信号处理模块给出用于完成闭环的数据,b 点信号处理模块给出输出数据,两个节点处数据相同,本文称 a 点的数据为闭环数据. 一般陀螺完成一次闭环控制的时间为渡越时间 τ,即光在光纤中传输一圈所用的时间,$\tau = \dfrac{nl}{c}$,一般 $n = 1.5$,$c = 3 \times 10^8$ m/s,l 为光纤长度(一般为几百米到几千米),则若 $l = 200$ m(一般长度会大于此长度),则 $\tau = 1$ μs,闭环数据的更新率为 1 MHz. 目前陀螺设计中为了减小采集系统的压力,输出一般为 ms/s 级周期. 陀螺中一般会将高速的闭环数据进行降频处理,作为最终的输出,即在陀螺内部对 b 点数据进行滤波,降低高频噪声,滤波的主瓣衰减频率一般为几 kHz;采集系统对 c 点数据高速采样(几 kHz)并经过多点平滑获取低速数据(ms/s 级数据更新周期),这也正是频谱混叠现象可能发生的

http://bhxb.buaa.edu.cn

位置.为了研究频谱混叠现象对陀螺振动特性的影响,需要明确振动状态下陀螺 b 点和 c 点的数据特征,然后对后续的采样以及多点平滑的过程进行研究.

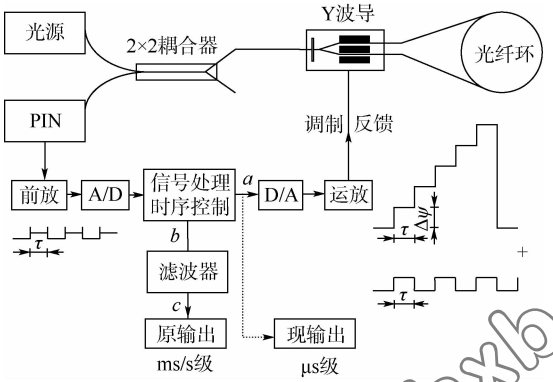


图 3　数字闭环光纤陀螺原理框图

本文研究对象为北航光电所自行研制的某型号高精度光纤陀螺.陀螺光纤长度为 1 600 m,经实测陀螺渡越时间 $\tau=7.5$ μs,即闭环数据(a,b 点数据)更新速率达到 133.3 kHz.b 点数据经过主瓣衰减频率为 4 kHz 的滤波器后得到 c 点数据,采集系统经过对 c 点数据 2 kHz 的采样之后,对数据进行 2 048 个数据的累加平滑,从而使陀螺的最终输出数据更新率为 1 Hz.

2.2　闭环数据的获取

本文采用基于 FPGA(Field Programmable Gate Array)和 USB 2.0 高速方案的数据采集系统完成了光纤陀螺闭环数据的采集,其中 FPGA 采用 Xilinx 公司的 XC3S200-TQ144,USB 2.0 高速协议控制芯片采用了 CYPRESS 公司的 CY7C68013A,数据传输方式采用了以 FPGA 为主控芯片的 SlaveFIFO 方式,通过充分利用 FPGA 的 Block Ram 和 USB 控制芯片中的端点,采用并行传输方式,设计实现了传输速率可达 16 bit×1 MB 的高速数据采集系统,从而可以满足 1 MHz 以下闭环数据的采集,采集系统框图如图 4 所示.



图 4　光纤陀螺闭环数据采集系统框图

2.3　振动状态下闭环数据特征分析

本部分主要研究固定频率振动情况下,图 3 中 b 点和 c 点陀螺输出数据的特征,即采集之前数据的特征.根据使用环境,陀螺振动测试频率范围一般为为 0 ~ 2 kHz,因此选用 100 Hz,500 Hz,1 kHz,1.2 kHz,1.5 kHz,1.8 kHz,2 kHz 和 2.2 kHz 正弦振动,对 b 点数据进行功率谱分析,获取不同振动频率下闭环数据功率谱分布,见图 5.

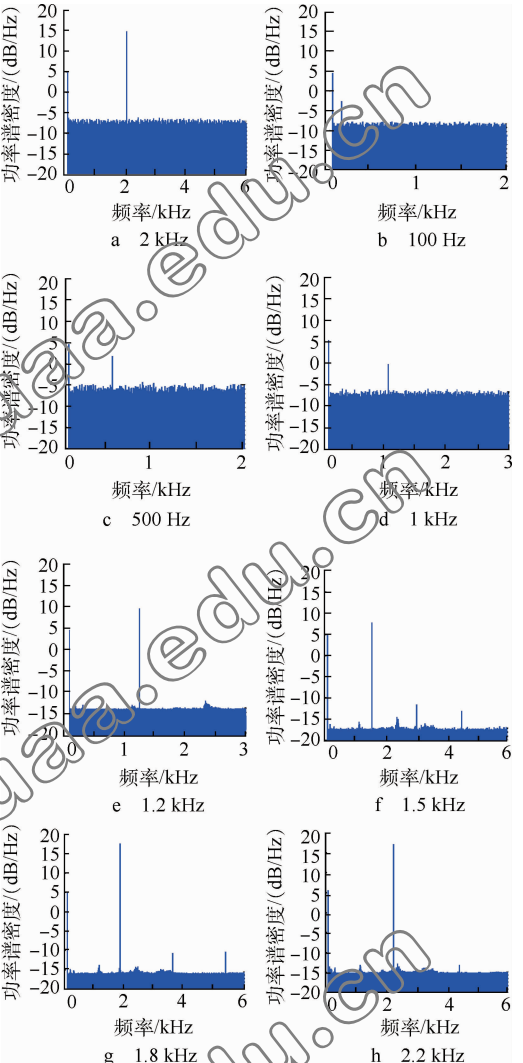


图 5　不同振动频率下闭环数据功率谱

由图 5 可以看出,在不同振动频率实验中,闭环数据功率谱主要有 3 种频谱成分,即 0 Hz 成分(直流成分)、相应振动频率成分以及相应振动频率的倍频成分(如 500 Hz 振动时,闭环数据功率谱中 0 Hz 和 0.498 8 kHz 最为显著;1.8 kHz 振动时,闭环数据功率谱中 0 Hz,1.796 kHz,3.591 kHz 和 5.387 kHz 的成分最为显著).

通过以上分析可知,在固定频率振动测试时,振动成分会以加性干扰形式混入闭环信号中,并且可能会混有此振动成分的微弱倍频成分,相当于混入了正弦规律变化的非互易相移.这主要是由于振动引起了光纤环内部应力的改变,通过弹光效应影响光信号通过光纤环后产生的附加相移,相移的大小和应力成线性关系,所以当振动为正弦信号时,由振动引起的附加相移的变化也符合正弦变化.

由于图 3 中闭环数据从 b 点到 c 点的过程经历了陀螺内部的滤波器,目前陀螺中最常用为滑动平均滤波器,滤波器对 b 点数据进行滤波处理,主

http://bhxb.buaa.edu.cn

瓣衰减频率为 4 kHz. 这是综合考虑滤波器资源占用和对高频噪声的滤波效果设定的,以振动频率为 2 kHz 时的输出考查滤波器的滤波效果(如图 6).

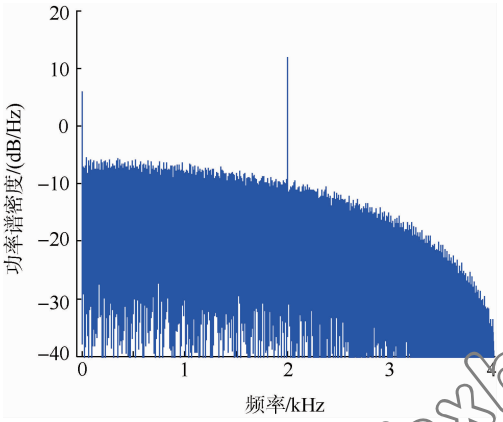


图 6 滑动平均滤波器滤波后数据功率谱(c 点输出)

通过分析滤波器滤波效果发现滤波器的输出中含有 2 kHz 附近的振动成分,即未能有效滤除振动带来的干扰,且通过滤波器的数据的频谱中没有低于 1 Hz 的低频成分存在. 以上实验表明,目前陀螺中常用的滤波器无法有效抑制振动干扰,并且由于越靠近低频,滤波器的衰减越小,因此可以推测滤波器对于低频干扰的滤除效果更差. 由于窄带宽、高衰减的滤波器需要的阶数远高于目前滤波器,对于资源以及延时的影响很大,通过滤波器的设计来彻底消除振动引入的干扰成分很困难,因此振动引入的相应频率的干扰成分会进入后续的采集环节.

3 频谱混叠对陀螺振动特性影响

通过 2.3 节的分析可知,振动测试中相应振动频率的干扰成分会混入陀螺的闭环数据中,并且在通过滤波器之后陀螺的输出中依然含有此频率的干扰. 一般经过陀螺内部的降噪处理后这些干扰只会引起陀螺最终输出稳定性的微小变化,但是如果在对该数据进行采样平滑的过程中发生频谱混叠现象,最终的输出就会有很大的偏差. 下面将通过仿真和实验来分析和验证频谱混叠现象对于陀螺振动特性测试的影响.

3.1 仿真分析

在 Simulink 中设计仿真模型对采样过程进行仿真,仿真模型如图 7 所示. 本仿真分析的输入数据用来模拟图 3 中 c 点的输出,包括陀螺的正常输出(图 7 中随机数)和混入的振动成分(图 7 中正弦信号).

根据频谱混叠理论可知,对于接近直流成分的陀螺输出,混频一般发生在采样频率和振动成

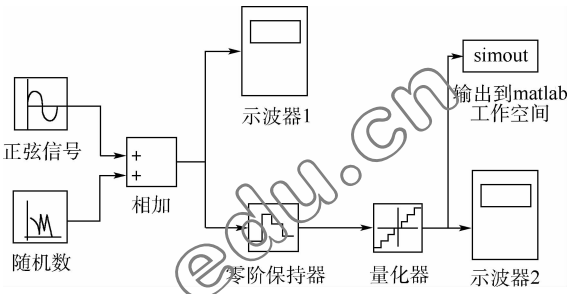


图 7 光纤陀螺输出采样部分仿真模型

分很接近的情况. 由于陀螺输出采样频率为 2 kHz,因此干扰成分频率都选择在 2 kHz 附近. 图 7 中正弦信号模块产生 f = 2 kHz,1.999 9 kHz,2.000 1 kHz,1.999 6 kHz,2.000 4 kHz,1.8 kHz 和 2.2 kHz 的正弦信号,用来模拟由于振动混入的干扰成分;随机数模块产生随机数,用来模拟陀螺的正常输出. 对二者叠加之后产生的信号进行 2 kHz 的采样量化,将数据存入文件,对文件中数据进行 2 048 个数据的直接平均,最终得到 1 Hz 输出. 根据频谱混叠原理,和 2 kHz 频率差绝对值相同的两个干扰成分会引起相同的输出,因此仅列出 2 kHz,2.000 1 kHz,2.000 4 kHz,2.2 kHz 干扰下的输出(量纲为 1),如图 8 所示.

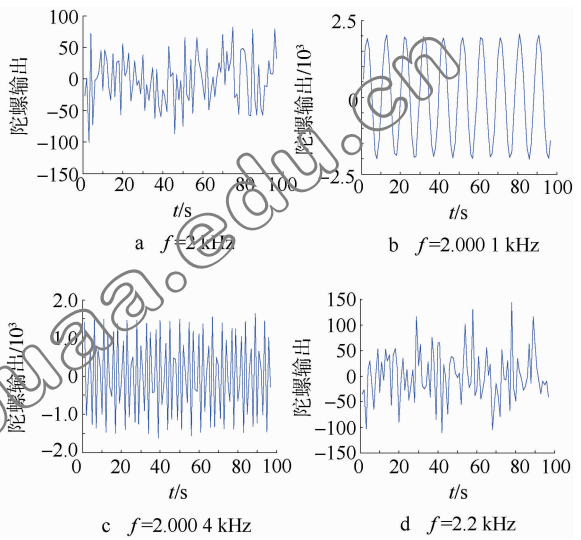


图 8 不同频率成分干扰下 2 kHz 采样后 1 Hz 输出

图 8 仿真结果说明,如果后期采样频率和振动频率非常接近,陀螺中经过滤波器的数据在经历了采样和多点平滑之后会出现大幅度的周期成分,从而造成数据极大的漂移,影响陀螺的振动特性测试;如果采样频率和信号中频率成分差值绝对值较大(远大于最终输出数据带宽的一半),可以发现最终输出是没有大幅度周期成分出现的;当信号中含有与采样频率完全相同的频率成分时,最终输出正常,没有发生频谱混叠现象. 以上仿真足以说明由于采样频率设置不当引起的频谱混叠

http://bhxb.buaa.edu.cn

现象对于陀螺振动特性测试会有很大影响.

3.2　实验分析

采用 2.1 节中所述光纤陀螺进行实验,使用 2 kHz采样,进行 2048 个数据平滑,最终输出数据频率为 1 Hz 的采集系统采集陀螺数据. 实验包括扫频振动实验和固定频率振动实验,扫频实验采用 4 g,0 ~ 2 kHz ~ 0 频率变化过程,实验结果如图 9 所示.

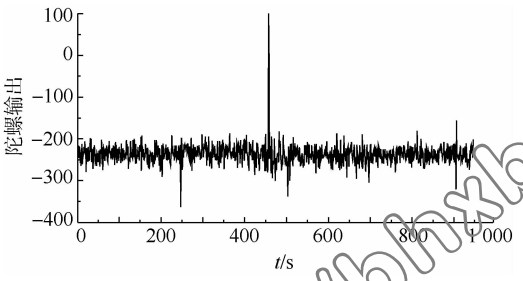
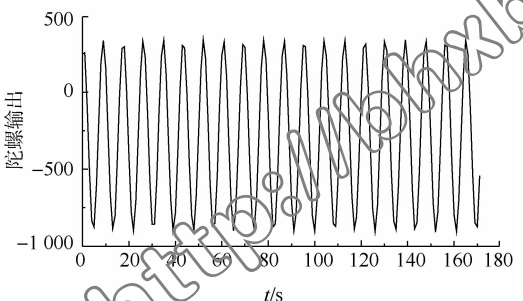
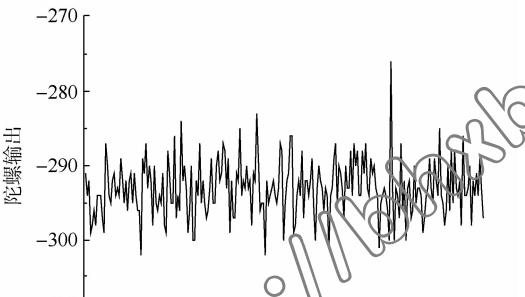


图 9　0 ~ 2 kHz ~ 0 扫频振动 1 Hz 最终输出

由图 9 可以发现,1 Hz 的输出在振动频率扫描到 2 kHz 附近时出现一个尖峰,说明 2 kHz 的振动状态不同于其他频率振动状态,因此对陀螺进行固定频率为 3.1 节中所设频率的振动实验,结果如图 10 所示.



a　2 kHz



b　非2 kHz

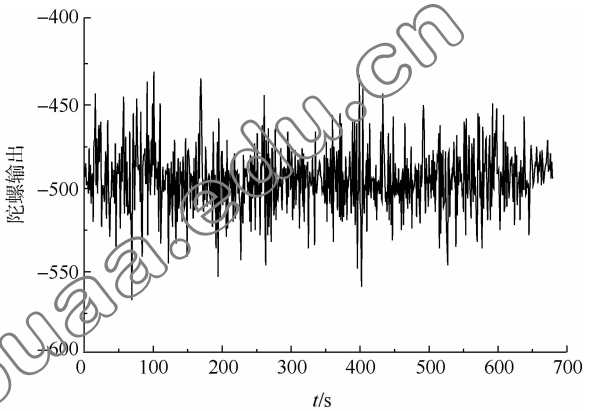
图 10　固定频率振动 1 Hz 最终输出

由图 10 可以发现 2 kHz 固定频率振动 1 Hz 的最终输出中含有频率为 0.1 Hz 左右的低频大幅度周期成分,而其他几个振动频率下陀螺的输出正常.

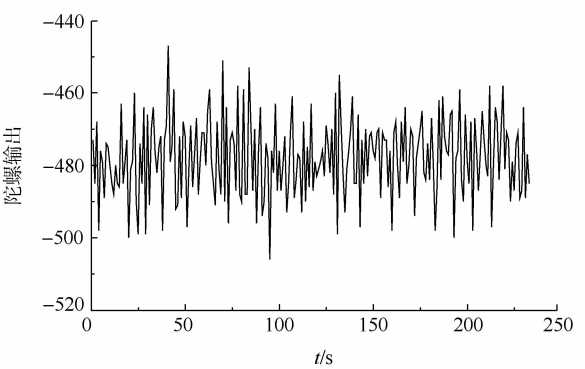
由 2.3 节中闭环数据分析可知振动干扰成分是出现在 2 kHz 附近,并不是严格的 2 kHz,因此结合仿真分析可以确定是 2 kHz 附近的频率成分在 2 kHz 的采样时发生了频谱混叠,经过 2048 个数据的平滑后,最终以频率差为频率的干扰成分进入了 1 Hz 输出数据中,从而出现了上述现象,这也同时解释了其他振动频率下 1 Hz 输出没有大幅度周期成分的现象.

综上所述,正是频谱混叠现象造成了实验中 0.1 Hz 大幅度周期信号的产生,这也与频谱混叠现象的理论分析和仿真分析结果对应,证明了振动测试时可能会因为采集频率的设置不当最终导致所测得的结果出现问题,而这些问题同时又不是陀螺本身产生的,从而会使得对系统故障的判断出现错误. 根据频谱混叠理论、仿真分析以及实验可知,要想成功避免此类问题,在设计采集过程时需要满足采样频率与振动频率上限的差值远大于频谱混叠的带宽,而频谱混叠的带宽是由陀螺的最终输出频率决定的.

为了进一步验证以上改进措施,根据系统振动测试频率为 0 ~ 2 kHz 的条件,将采集系统的 2 kHz采样改为了 4 kHz 采样,4 096 个数据平滑获取 1 Hz 输出进行实验,实验结果如图 11 所示.



a　0~2 kHz~0扫频



b　2 kHz固定频率

图 11　改进后扫频振动和固定频率振动 1 Hz 最终输出

图 11 说明使用 4 kHz 的采样频率采样时,由

http://bhxb.buaa.edu.cn

振动引起的 2 kHz 以内干扰信号频谱搬移时无法混入 0 ~ 0.5 Hz 的范围内,因此无频谱混叠发生,最终输出正常,证明了改进措施的有效性.

4 结 论

本文通过理论分析与实验验证得到如下结论:

1) 指出了光纤陀螺振动特性测试中频谱混叠现象对陀螺性能测试的影响;

2) 明确了频谱混叠现象产生的原因;

3) 通过优化采样频率等措施避免了频谱混叠现象的发生,为光纤陀螺振动性能地有效评价以及光纤陀螺检测系统优化设计提供了指导.

参考文献(References)

[1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Norwood: Artech House, 1993: 1 - 5

[2] Pavlath G A. Closed-loop fiber optic gyros[C]//Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference. Washington: SPIE, 1996: 47 - 60

[3] Lefèvre H C. Fundamentals of interferometric fiber optic gyroscope[C]//Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference. Washington: SPIE, 1996: 2 - 27

[4] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 84 - 86
Zhang Guicai. The principles and technologies of fiber optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 84 - 86(in Chinese)

[5] 蔡明. 光纤陀螺光纤环振动和温度对其精度影响及检测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
Cai Ming. Study on the influence on accuracy and detection of fiber vibration and temperature of FOG[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012 (in Chinese)

[6] 孟娟. 光纤陀螺振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009
Meng Juan. Study on the vibration performance of fiber optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009 (in Chinese)

[7] 宋凝芳, 张春熹, 李立京, 等. 数字闭环光纤陀螺振动误差分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(8): 702 - 704
Song Ningfang, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Analysis of vibration error in digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(8): 702 - 704 (in Chinese)

[8] 吴衍记, 刘淑荣. 数字闭环光纤陀螺频率特性分析与测试[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 730 - 734
Wu Yanji, Liu Shurong. Testing and analyzing for frequency characteristics of digital closed-loop FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 730 - 734 (in Chinese)

[9] 舒建涛. 高精度光纤陀螺光纤环振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011
Shu Jiantao. Study on the performance of fiber optic gyroscope coil under vibration condition[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011 (in Chinese)

[10] 舒建涛, 李绪友, 吴磊, 等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2201 - 2206
Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2201 - 2206 (in Chinese)

[11] 孙学军. 通信原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 61 - 63
Sun Xuejun. Communication fundamentals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 61 - 63 (in Chinese)

http://bhxb.buaa.edu.cn