

小波消噪在光纤陀螺温度补偿中的应用

焦 飞, 陈 璞, 朱少华

(中国航空工业集团公司 西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:分析并建立了光纤陀螺温度漂移模型,指出数据噪声会降低甚至恶化模型的补偿效果。为减小噪声的影响,分别利用数字低通滤波和小波阈值消噪法对温度变化率数据进行降噪处理。经过仿真分析发现,与数字滤波相比,小波消噪法的降噪效果更好。多轮温度试验结果对比表明,利用小波阈值法对数据进行降噪,可提高光纤陀螺温度漂移的补偿效果。

关键词:光纤陀螺;温度漂移;数字低通滤波;小波阈值消噪;误差补偿

中图分类号:TN98

文献标识码:A

The Application of Wavelet Denoising to FOG Temperature-induced Drift Compensation

JIAO Fei, CHEN Pu, ZHU Shaohua

(Aviation Industry Corporation of China, Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The temperature-induced drift model for FOG is analyzed and established. But data noise would weaken or deteriorate the effect of this compensation model. To solve this problem, digital low-pass filter and wavelet threshold-value denoising method are used respectively to reduce the data noise. It is found that the wavelet denoising method is more effective than that of the digital low-pass filter through the simulation and analysis. Comparison of the compensation results before and after denoising further verified the effectiveness of the wavelet threshold-value denoising method for improving the compensation effect of the temperature-induced drift model.

Key words: FOG; temperature-induced drift; digital low-pass filtering; wavelet threshold-value denoising; error compensation

0 引言

光纤陀螺虽已进入实用阶段,但多用于中低精度的航姿系统中。影响其进入中高精度应用领域的一个重要问题就是陀螺零偏的温度漂移,其严重影响了光纤陀螺的输出精度。解决光纤陀螺温度漂移的方法有:

1) 采取有效的温控措施。这样不但会增加陀螺的体积、质量和成本,且会延长陀螺的启动时间。

2) 采用温度补偿。这种建立在陀螺温度漂移模型基础上的数学方法,通过软件实时补偿来保证光纤陀螺的输出精度,不需额外增加任何设备,成为解决此问题的首选方案。

理论与实践证明,光纤陀螺的温度漂移与温度及其变化率有关^[1-4]。但在应用相关模型进行建模和补偿的过程中,发现数据噪声对补偿效果的影响很大,尤其是温度及其变化率噪声的引入,严重降低

了模型的补偿效果。为解决此问题,本文分别利用数字低通滤波和小波阈值消噪技术对模型数据进行了分析和预处理^[5],通过大量的试验与分析,证实了小波阈值消噪技术对于提高模型补偿效果的有效性。

1 光纤陀螺的温度漂移模型

温度是影响光纤陀螺输出的一个因素,但并不是影响光纤陀螺零偏的唯一因素。从理论上讲,温度变化率通过影响光纤环内部温度场的分布,造成光纤环内部膨胀及折射率不均匀而对在其中传输的两束光产生不同的影响,并由此引入非互易相移,即是产生温度漂移的一个直接原因。

本文采用中航工业自控所研制的某型光纤陀螺,将其放置于带隔振基础的高低温箱中,分别进行不同温度点下的定温试验,以及不同温度变化率下的变温试验。分析陀螺输出与温度及温度变化率的

收稿日期:2013-12-22

基金项目:总装十二五预研基金资助项目(51309030102)

作者简介:焦飞(1982-),男,陕西人,工程师,硕士,主要从事光纤陀螺及光纤惯性导航系统的研究。

关系后,建立陀螺温度漂移模型如下:

$$D = D_0 + D_T \cdot T + D_{\dot{T}} \cdot \dot{T} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: D 为光纤陀螺温度相关的零偏; D_0 为光纤陀螺零偏; D_T 为光纤陀螺零偏的温度误差系数; $D_{\dot{T}}$ 为光纤陀螺零偏的温度变化率误差系数; $\dot{T} = dT/dt$ 为陀螺温度变化率; ε 为随机误差。

在利用上述模型对陀螺输出数据进行补偿后发现,虽然陀螺温度漂移的趋势项得到了补偿,但同时也引入了更大的噪声。图1为常温下补偿前、后的陀螺输出对比,补偿后的数据噪声放大。

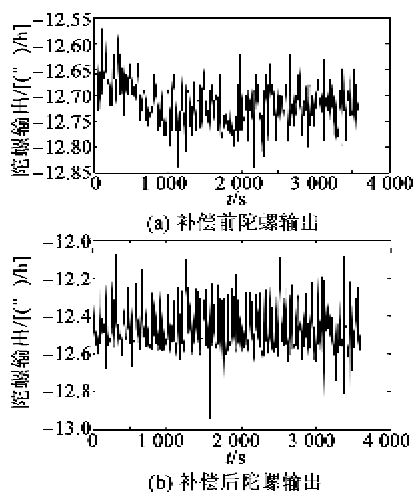


图1 补偿前、后的陀螺输出

2 数字低通滤波

测量信号中的高频噪声可通过设计低通滤波器来消除,考虑到温度数据的信噪比较大,采用线性相位的有限冲击响应(FIR)滤波器处理更合适,实际上对其进行1 s的数据平滑即可消除大部分噪声。鉴于温度变化率数据的信噪比较小,对模型补偿效果的影响更大,故本文的研究重点是温变数据的降噪。

本文采用双线性Z变换法设计阶次较低、效率较高的递归型无限冲击响应(IIR)滤波器。递归型IIR滤波器当前的输出 $y(n)$ 是输入的当前值 $x(n)$ 和以前各输入值 $x(n-1), x(n-2), \dots$,及以前各输出值 $y(n-1), y(n-2), \dots$ 的函数,其差分方程^[6]为

$$y(n) = \sum_{i=0}^M b_i x(n-i) - \sum_{i=0}^M a_i y(n-i) \quad (2)$$

式中系数 a_i 至少有一项不为0。

使用中需权衡考虑滤波器的效果和复杂度,选择合适的截止频率和阶次,所选截止频率过低会损失有用信号,过高会降低滤波效果,阶次过低同样降低滤波效果,过高会降低滤波器效率、增加滤波器复

杂度。选取温度变化率的采样与计算周期为10 s,其幅值谱如图2所示,综合考虑使用中系统温度的变化情况与温度传感器的最小分辨率等特性,设计截止频率为0.01 Hz的三阶 Butterworth 低通滤波器,其频率特性如图3所示。由图可看出,此低通滤波器的相位在通带内基本呈线性趋势,保证滤波后的数据不发生畸变。

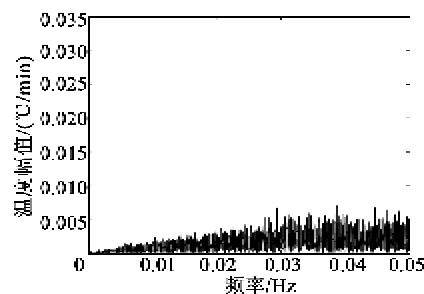


图2 温度变化率幅值谱

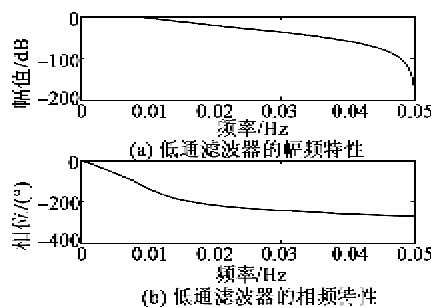


图3 滤波器频率特性

3 小波阈值消噪

小波消噪的算法很多,本文主要研究小波阈值消噪方法,它是一种实现简单而效果较好的消噪方法。一般噪声表现为高频信号,有用信号通常为低频信号或较平稳信号,因此可对输入信号进行小波分解,利用门限阈值等形式对所分解的小波系数进行处理,然后利用处理后的小波系数重构出消噪后的信号^[7-8]。本文利用小波变换阈值法对温度变化率数据进行消噪,过程如下:

1) 温变数据的小波分解。常用的小波函数中, Symlet 小波均具有正交性、紧支撑性及近似对称性,所需计算时间相对较少,且可避免信号处理后的相位畸变。故选择八阶 Symlet 小波,分解层次为5层。

2) 小波分解系数的阈值量化。相对于硬阈值函数,软阈值函数可使消噪后的信号更平滑,考虑到环境温度的变化是一个连续过程,这里选择软阈值函数更合适。通常的阈值选取规则有固定阈值、

Stein 的无偏/似然估计原理的自适应阈值及启发式阈值。启发式阈值是以上两种阈值的综合,所选择的是最优预测变量阈值,较适合信号信噪比较小的情况。故选用启发式阈值来处理小波系数。

3) 温变数据的小波重构。通过小波分解后的第 5 层低频系数和 1~5 层高频系数进行小波重构,获得消噪后的信号。

图 4 为温度变化率原始数据。经过数字低通滤波后的温变数据及经小波消噪后的温变数据。由图可看出,经小波变换阈值法消噪后的数据更平滑,噪声明显减小。

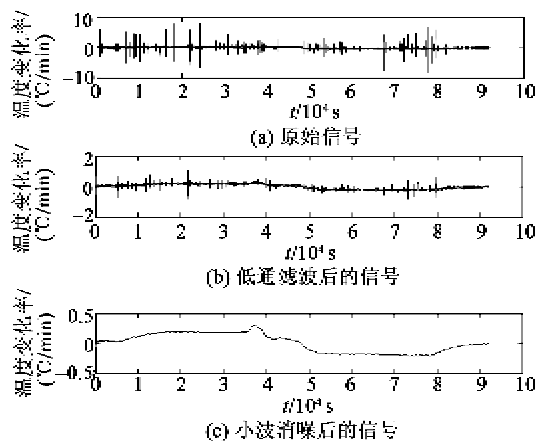


图 4 采用不同方法消噪前后的温度变化率

这是因为数字低通滤波器的截止频率一般根据信号的频谱特性选取,当有用信号和噪声的频段较接近时,为保证有用信号的无损失通过,截止频率的选取会相对保守,很难达到最优。与数字低通滤波器不同,小波的多分辨率分析特性可使其得到极佳的滤波效果。只要有有用信号与噪声的频段不发生重叠,小波分析便可通过不断对低频信号部分进行层层分解最终将两者分开,得到滤除噪声后的有用信号。

4 试验设计与数据分析

将系统放置于带隔离基础的高低温箱中,首先分别按照 0.2 °C/min、0.3 °C/min、0.4 °C/min、0.6 °C/min、0.8 °C/min 和 1.0 °C/min 等不同的温度变化率进行变温试验,之后再选择 -40 °C、-20 °C、10 °C 和 30 °C 等不同的温度点进行定温试验,试验数据的采样周期为 10 s。本文利用 0.2 °C/min 温度循环试验数据进行建模,对其他变温和定温试验数据进行补偿,以分析补偿模型在经过不同的滤波处理后的效果。

分别利用原始数据、经数字低通滤波后的数据及经小波消噪后的数据对光纤陀螺输出的温度漂移进行建模,所建模型的参数如表 1 所示。

表 1 利用不同数据所建模型参数

模型参数	建模所用数据		
	原始数据	低通滤波	小波消噪
温度项系数/ 10^{-4}	-9.061 634	-9.021 071	-8.680 501
温变项系数	0.792 051 5	0.887 045 6	0.928 722 2
常数项	-12.539 21	-12.539 67	-12.539 46

利用所建模型对 0.3 °C/min、0.4 °C/min、0.6 °C/min、0.8 °C/min 和 1.0 °C/min 的温度循环试验陀螺温度漂移进行补偿,按照 GJB2426A-2004《光纤陀螺仪测试方法》中的公式计算补偿前、后陀螺漂移的稳定性和极差,补偿效果如表 2 所示。

表 2 变温下不同消噪方式的模型补偿效果

温度变化率/ (°C/min)	陀螺 漂移/ [(°)/h]	补偿前/ [(°)/h]	未消噪/ [(°)/h]	补偿后 低通 滤波	小波 消噪
0.3	稳定性	0.167 7	0.059 0	0.041 0	0.025 3
	极差	0.719 0	1.152 3	0.657 5	0.131 3
0.4	稳定性	0.211 9	0.061 6	0.042 8	0.028 5
	极差	0.815 0	1.419 1	0.729 0	0.166 8
0.6	稳定性	0.295 4	0.078 0	0.064 6	0.046 8
	极差	1.207 0	0.903 2	1.083 7	0.236 3
0.8	稳定性	0.337 2	0.083 6	0.063 0	0.044 4
	极差	1.407 0	1.064 3	1.280 1	0.265 9
1.0	稳定性	0.369 5	0.100 2	0.079 1	0.056 7
	极差	1.864 0	1.369 9	1.788 3	0.360 5

利用所建模型对 -40 °C、-20 °C、10 °C 和 30 °C 的定温试验陀螺温度漂移进行补偿,补偿结果如表 3 所示。

表 3 定温下不同消噪方式的模型补偿效果

温度/ °C	陀螺 漂移/ [(°)/h]	补偿前/ [(°)/h]	未消噪/ [(°)/h]	补偿后 低通 滤波	小波 消噪
-40	稳定性	0.019 1	0.022 5	0.018 2	0.011 8
	极差	0.164 0	0.309 1	0.195 9	0.095 6
-20	稳定性	0.023 1	0.021 4	0.017 0	0.009 1
	极差	0.110 0	0.267 1	0.189 6	0.046 8
10	稳定性	0.023 0	0.020 3	0.019 1	0.010 4
	极差	0.132 0	0.181 2	0.149 1	0.075 2
30	稳定性	0.030 4	0.024 1	0.021 6	0.013 4
	极差	0.153 0	0.314 3	0.170 9	0.068 0

由表 2、3 可看出,利用未消噪数据进行建模和补偿后,陀螺漂移稳定性有提高,但陀螺漂移的极差

反而明显增大,这说明补偿过程引入了噪声。利用低通滤波后的数据进行建模和补偿,陀螺漂移稳定性有所提高,陀螺漂移的极差减小,与补偿前大致相当。利用小波消噪后的数据进行建模和补偿,不但陀螺漂移稳定性明显提高,且陀螺漂移的极差减小。这说明经小波消噪后陀螺温度漂移模型的有效性和适应性都得到了改善。

5 结束语

本文在建立光纤陀螺温度漂移模型的基础上,分别使用数字低通滤波和小波变换阈值法对温度及温度变化率数据进行了消噪处理,通过实验对各自模型的补偿效果进行了验证。结果表明,数据噪声对模型的补偿效果影响很大,与传统低通滤波方法相比,小波变换阈值消噪法对数据噪声的滤除更为彻底,可明显提高模型的补偿效果。

参考文献:

- [1] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2010.
- [3] 周海波,刘建业,赖际舟,等. 光纤陀螺的离散动态温度模型[J]. 应用科学学报,2008,26(4):425-429.

ZHOU Haibo, LIU Jianye, LAI Jizhou, et al. Discrete

dynamic model of FOG temperature drift[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 26(4):425-429.

- [4] 任俊骐. 光纤陀螺温度漂移及补偿方法技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.
 - [5] 杨立. 基于改进小波阈值函数的图像去噪[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2013,27(2):93-95.
- YANG Li. Image de-noising based on improved wavelet threshold function[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2013, 27(2): 93-95.
- [6] 霍炬,王石静,杨明,等. 基于小波变换阈值法处理光纤陀螺信号噪声[J]. 中国惯性技术学报,2008,16(3):343-347.
- HUO Ju, WANG Shijing, YANG Ming, et al. Noise processing of FOG signal based on wavelet threshold-value[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(3):343-347.
- [7] 余慧. 光纤陀螺动态特性的测试与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
 - [8] 何利,刘群. 基于多特征融合和小波去噪的镜头渐变检测方法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2009,21(5):690-694.
- HE Li, LIU Qun. Approach of gradual shot-boundary based on multi-feature fusion and wavelet denoising[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2009, 21(5):690-694.

(上接第767页)

验,更全面地研究其粘弹性和压电特性。最后利用该试验装置得到较理想的数据,证实了该试验装置的可靠性。为研究压电高分子薄膜的粘弹性、介电和压电性能的特点提供了一种新的试验方案。此外,该装置还可用于其他压电高分子薄膜或粘弹性薄膜材料的特性研究。

参考文献:

- [1] KAWAI H. The piezoelectricity of Polyvinylidene fluoride[J]. J Appl Phys, 1969, 8(7):975-976.
- [2] GRINSPAN A S, GNANAMOORTHY R. Impact force of low velocity liquid droplets measured using piezoelectric PVDF film [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2010, 356(1/3):162-168.
- [3] RATHOD V T. Characterization of a large-area PVDF thin film for electro-mechanical and ultrasonic sensing applications[J]. Sensors and Actuators, 2010, 163(1): 164-171.
- [4] 具典淑,周智,欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. 功能材料,2004,4(35):450-456.

JU Dianshu, ZHOU Zhi, OU Jinping. Study on strain-sensing of PVDF films[J]. Journal of Functional Materials, 2004, 4(35):450-456.

- [5] 王利恒,周锡元. PVDF 传感器动态压电特性的试验研究[J]. 工业建筑,2006,36(3):55-58.
- WANG Liheng, ZHOU Xiyuan. Experimental study on dynamic piezoelectricity characteristics of PVDF sensor [J]. Industrial Construction, 2006, 36(3):55-58.
- [6] 赵红平,叶琳,陆中琪. PVDF 压电薄膜在应力波测量中的应用[J]. 力学与实践,2004,1(26):38-41.
- ZHAO Hongping, YE Lin, LU Zhongqi. Application of PVDF guage to stress wave measurement[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 1(26):38-41.
- [7] SHIRINOV A V, SEHOMBURG W K. Pressure sensor from a PVDF film [J]. Sensors and Actuators, 2008, A(142):48-55.
 - [8] 梁爽,郑茂梅,孙平,等. 聚偏氟乙烯结晶结构及其 β 相制备方法的研究[J]. 压电与声光,2013,35(5):719-726.
- LIANG Shuang, ZHENG Maomei, SUN Ping, et al. Researches on crystal structure and preparation methods of β -phase polyvinylidene fluoride[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(5):719-726.