

机抖激光陀螺零偏温度补偿方法的研究

韩 翔 胡绍民 魏 国

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 机抖激光陀螺内在的温度特性对陀螺各方面带来的影响, 制约了陀螺性能的进一步提高。为提高陀螺性能, 研究了陀螺零偏的温度补偿方法。利用单温度点比较不同温度补偿模型对陀螺零偏的补偿效果, 建立了零偏的温度补偿模型; 研究了机抖激光陀螺零偏和多温度点的关系, 根据测温点对补偿效果的影响大小, 适当精简模型中两个测温点的温度数据, 可将其作为冗余备用; 设计了分段数据实验, 验证了该模型的实用性。结果表明, 多温度点补偿效果优于单温度点的补偿效果; 模型简化大大减小计算量, 并能满足补偿要求; 利用精简后的模型补偿陀螺零偏, 相比补偿前精度提高了 1.6 倍以上, 且补偿后零偏稳定性均为 $10^{-3} (^{\circ}) / \text{h}$ 量级。

关键词 激光光学; 机抖激光陀螺; 温度补偿; 非线性最小二乘法; 零偏

中图分类号 TH744.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100519

Research on Methods for Temperature Compensation of Mechanically Dithered Ring Laser Gyroscope's Bias

Han Xiang Hu Shaomin Wei Guo

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

Abstract The temperature characteristic of basic substances in ring laser gyro (RLG) can generate bias drift, and the long time continued manipulation of RLG increases the bias drift which will deteriorate the performance of gyroscope dramatically. Then the method for temperature compensation is investigated, and the compensating model is gained by effects with different models. The relationship between mechanically dithered RLG's bias and multi-temperature is studied too. Based on the influence of different experimental temperature models, two temperature sensors can be simplified for the redundancies. Thus the experiment of data subsection is designed to validate the practicability of this temperature model. The result shows that multi-temperature compensation models are better than single-temperature models; the simplified multi-temperature model can reduce the computing scale, and still satisfies the requirement of real-time compensation; by using this simplified model, the compensation precision can be improved by 1.6 times at least, and the bias stability compensated are all on $10^{-3} (^{\circ}) / \text{h}$ level.

Key words laser optics; echanically dithered RLG; temperature compensation; method of nonlinear least square; bias

OCIS codes 140.0140; 140.3370; 140.6810

1 引 言

二频机抖激光陀螺具有启动时间短、动态范围大、可靠性高、寿命长、数字式输出便于导航计算以及良好的性价比等特点, 成为捷联惯导系统的理想器件, 并广泛应用于航空、航天、航海以及地面定位与定向等方面^[1]。但是, 温度变化对激光陀螺物性

参数、几何变形、气体流场各方面带来的影响^[2], 制约了陀螺精度的进一步提高。为了有效提高陀螺精度, 有必要研究温度的变化导致的激光陀螺的零偏与温度、温变速率以及温度梯度的关系, 主要采用逐步回归法、神经网络法等方法^[3~5]建立模型对温度误差进行补偿。

收稿日期: 2011-03-02; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

作者简介: 韩翔(1987—), 硕士研究生, 主要从事光电工程方面的研究。E-mail: pingler@163.com

导师简介: 胡绍民(1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光电信号检测方面的研究。

E-mail: hushm@21cn.com

本文建立了单测温点下机抖激光陀螺零偏的温度补偿模型,研究了陀螺零偏和多测温点的关系,简化了补偿模型,并提出了多个温度传感器的使用方案。

2 实验方案

用于实验的机抖激光陀螺上安装了4个温度传感器,温度传感器分别贴在陀螺腔体阳极附近、阴极附近和陀螺底部及陀螺盒内侧共4个点。将某型机抖陀螺静置于高低温箱中。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内循环测试24 h,采样频率是1 Hz。每秒采一组数据,包括各个温度点的温度和陀螺零偏(包含地球自转角速率在陀螺敏感轴上的分量,下同)。

实验中用零偏稳定性来衡量陀螺仪的精度,以(原零偏稳定性/补偿后零偏稳定性-1)来反映精度提高的程度,其中陀螺仪的零偏稳定性用100 s采样数据的均方差来表示,而100 s采样数据则是由原始的1 s采样数据每100个数据点求平均得到的。图1和图2是某次测试结果中4个测温点温度和激光陀螺输出的相应曲线。

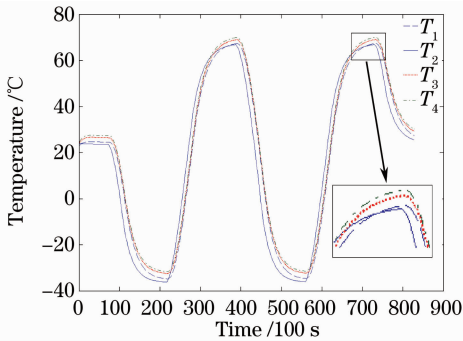


图1 不同测温点温度曲线

Fig. 1 temperature curves of different temperature sensors

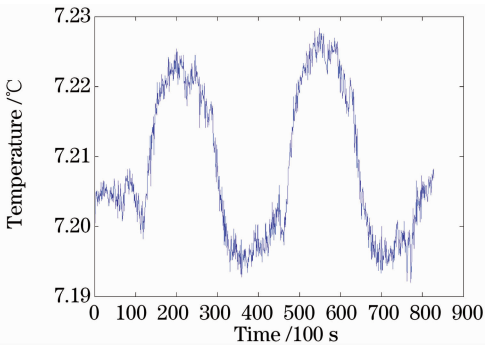


图2 机抖激光陀螺输出曲线

Fig. 2 Bias curves of the ring laser gyro

3 零偏补偿模型与结果分析

3.1 单温度点零偏补偿

温度对激光陀螺零偏的影响主要表现在以下3个方面:温度、温度梯度与温变速率,在使用单个温度传感器数据进行补偿时可采用如下模型^[6]:

$$B(T) = B_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 \frac{dT}{dt} + k_4 T \times \frac{dT}{dt} + k_5 \left(\frac{dT}{dt}\right)^3, \quad (1)$$

式中 B_0 为常系数项, T 为测温点所测得温度, dT/dt 为相应测温点的温度变化率; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 是各待拟合的未知系数。

采用非线性最小二乘法对陀螺静止稳定状态下的输出与温度数据组 $\{(B_j, T_j), j = 1, 2, \dots, N, N$ 为数据长度 $\}$ 进行拟合。对于已知的一组数据(图1) $\{(B_j, T_j), j = 1, 2, \dots, N\}$,解算出 B_0 和 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 ,使得 $b_j^2 = \sum [B_j - B(T_j)]^2$ 最小,采用非线性最小二乘法求解,可以调用Matlab中的lsqcurvefit函数。

针对(1)式中的系数项,有如下模型:模型1:取 B_0 和 k_1, k_2 ;模型2:取 B_0 和 k_1, k_2, k_3 ;模型3:取 B_0 和 k_1, k_2, k_3, k_4 ;模型4: k_1, k_2, k_3, k_4 。采用测温点3的温度数据,不同模型的补偿结果如表1所示。

表1 不同模型的补偿效果

Table 1 Compensated effects of different models

Models	Original / [10^{-3} ($^{\circ}$) /h]	Compensated / [10^{-3} ($^{\circ}$) /h]	Improved
1	10.42	5.102	1.1
2	10.42	3.038	2.4
3	10.42	3.036	2.4
4	10.42	2.953	2.5

从表中可以发现模型4补偿后的零偏稳定性精度最高。由于模型4相对于模型2增加了温度和温度变化率的交叉项,增加了不少的计算量但提高的精度很小,因此选取模型2,即建立单温度点零偏温度补偿模型如下:

$$B(T) = B_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 \frac{dT}{dt}. \quad (2)$$

3.2 多温度点零偏补偿

多温度点的零偏模型可以建立为

$$B(T_i) = B_0 + \sum_{i=1}^n \left(k_{1i} T_i + k_{2i} T_i^2 + k_{3i} \frac{dT_i}{dt} \right), \quad (3)$$

式中 B_0 为常系数项, T_i 为各测温点所测得温度, dT_i/dt 为相应测温点的温度变化率; $k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}, k_{4i}$,

$k_{5i} (i = 1, 2, \dots, n, n$ 为采用测温点的个数) 是各待拟合的未知系数。

针对(3)式中的温度项,采用4个温度传感器的温度数据,如图1所示,分析不同传感器的组合对补偿效果的影响,补偿效果如表2所示。

表2 不同测温点组合的补偿效果

Table 2 Compensated effects with different temperature models

Temperature models	Original / $[10^{-3} (^{\circ}) / h]$	Compensated / $[10^{-3} (^{\circ}) / h]$	Improved
T_2	10.42	3.886	1.7
T_3	10.42	3.038	2.4
T_3, T_1	10.42	2.912	2.6
T_2, T_3	10.42	2.468	3.2
T_1, T_2, T_3	10.42	2.407	3.3
T_1, T_2, T_3, T_4	10.42	2.302	3.5

虽然采用4个温度点补偿效果最佳,但是相对于采用 T_1, T_2, T_3 或者 T_2, T_3 加大了运算量。可只采用 T_2, T_3 作为温度补偿的温度依据,而将 T_4 作为温度 T_3 的冗余备用。其补偿后得到的零偏曲线如图3~5所示,补偿后精度相比原始零偏提高了3.2倍。在实际运用中陀螺信号的采集一般采用2 kHz的高频采样,其温度补偿根据导航解算周期而定,一

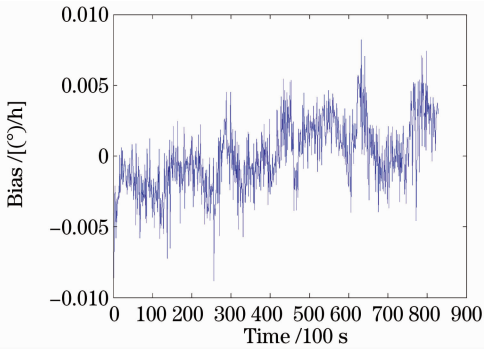


图3 补偿后零偏随时间变化的曲线

Fig. 3 Compensated bias curves of time transformation

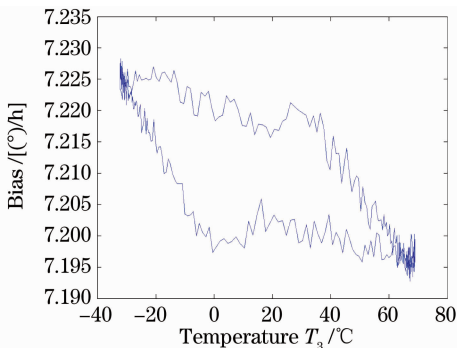


图4 单个温循的原始零偏曲线

Fig. 4 Original bias curves of multi-temperature-cycle

一般为10 ms,期间完成多维系数矩阵温度测量值的相乘都是足够的。

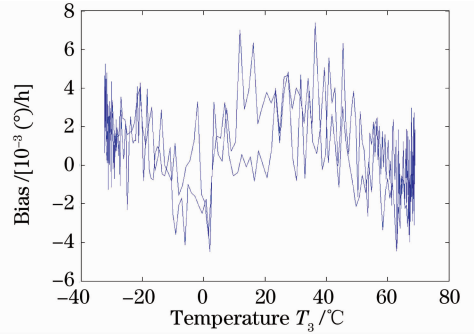


图5 补偿后单个温循的零偏曲线

Fig. 5 Compensated bias curves of multi-temperature-cycle

4 温度补偿验证实验

实验中选取了5个不同的机抖激光陀螺使用相同温箱进行温度实验,设计实验如下:将陀螺输出的原始数据从中间位置分为两部分,记为部分1和部分2,部分1采用 T_2, T_3 两个测温点温度数据,拟合得到该陀螺温补模型参数,代入模型中来估计补偿部分2的数据,考察其补偿效果。结果如表3所示,1~5号陀螺后半段零偏的精度分别提高了3.6、2.7、2.9、2.0和1.6倍,其中1号陀螺的部分1和部分2补偿后的零偏曲线如图6和图7所示。

表3 零偏补偿效果

Table 3 Compensated effects of the bias

Gyros	Part 1 / $[10^{-3} (^{\circ}) / h]$		Part 2 / $[10^{-3} (^{\circ}) / h]$	
	Original	Compensated	Original	Compensated
1	9.56	1.97	11.3	2.45
2	6.25	1.78	6.75	1.82
3	28.7	7.20	29.2	7.57
4	12.6	4.27	14.3	4.76
5	8.38	2.69	7.79	3.03

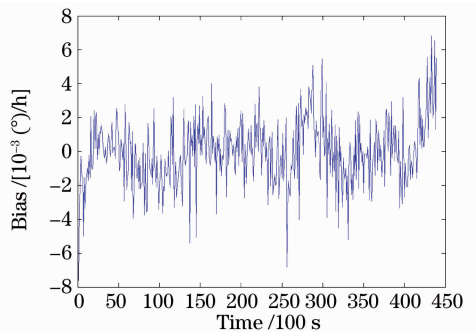


图6 部分1补偿后的零偏曲线

Fig. 6 Compensated bias curve of part 1

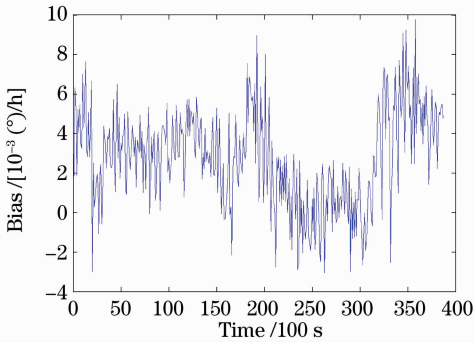


图 7 部分 2 补偿后的零偏曲线

Fig. 7 Compensated bias curve of part 2

5 结 论

1) 利用单温度点比较不同温度补偿模型对陀螺零偏的补偿效果,建立了简单易用的零偏温度补偿模型。

2) 利用多温度点温度补偿模型对机抖激光陀螺零偏做出补偿。比较了不同测温点组合对补偿精度的影响,发现多温度点补偿效果优于单温度点补偿效果。

3) 增加 T_1 、 T_4 两个测温点增加了计算量但对补偿效果提升较小,实际中可以只使用 T_2 、 T_3 两个温度数据来进行温度补偿,而将 T_1 和 T_4 作为冗余备用从而增加可靠性。

4) 设计了温度数据分段实验,验证了模型对单陀螺仪的补偿效果,也为进一步的随机温度变化实时补偿实验奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Publishing Company, 1984. 2~73
高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1984. 2~73
- 2 Wu Guoyong, Gu Qitai. Temperature's effect on four frequency RLG bias[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(3): 198~200
吴国勇, 顾启泰. 温度对四频激光陀螺零偏的影响[J]. 光学技术, 2002, **28**(3): 198~200
- 3 Zhang Pengfei, Long Xingwu, Tang Jianxun *et al.*. Research on really-time temperature compensation of mechanically dithered RLG's bias[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(6): 1279~1282
张鹏飞, 龙兴武, 汤建勋 等. 机抖激光陀螺的零偏的实时温度补偿方法研究[J]. 传感技术学报, 2007, **20**(6): 1279~1282
- 4 Guo Chuang, Xu Yongjun, Zhao Xiaoning. Investigation on the temperature compensating model for ring laser gyroscope[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 576~579
- 5 Zhang Pengfei, Long Xingwu, Tang Jianxun *et al.*. Research on temperature compensation for bias of mechanical dithered RLG based on RBF neural network[J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(2): 60~62
张鹏飞, 龙兴武, 汤建勋 等. 基于 RBF 神经网络的机抖激光陀螺零偏的温度补偿的研究[J]. 激光杂志, 2007, **28**(2): 60~62
- 6 Long Xingwu, Yu Xudong, Zhang Pengfei *et al.*. Single-rotating inertial navigation system with ring laser gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, **18**(2): 149~153
龙兴武, 于旭东, 张鹏飞 等. 激光陀螺单轴旋转惯性导航系统[J]. 中国惯性技术学报, 2010, **18**(2): 149~153