

## 基于人工鱼群算法的机抖激光陀螺温度补偿

于旭东,徐瑜浓,魏 国,龙兴武

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 温度是影响激光陀螺精度的主要因素之一,对温度引起的机抖激光陀螺漂移进行精确建模,对提高激光陀螺捷联惯导系统的精度具有十分重要的意义。介绍了机抖激光陀螺的温度特性,建立了基于改进人工鱼群算法(Improved Artificial Fish Swarm Algorithm,IAFSA)的机抖激光陀螺温度补偿模型,给出了 IAFSA 建模的详细步骤和方法,对传统的逐步回归方法和 IAFSA 进行了比较。结果表明:IAFSA 可以对温度引起的激光陀螺漂移进行精确建模,补偿后的激光陀螺零偏不稳定性达到  $0.00185(^{\circ})/h$ ,比传统的逐步回归方法建模精度提高了 15.5%,得到的温度补偿模型可以对陀螺的零偏进行实时补偿,设计了两种典型的温度试验,获得了满意的补偿效果。

**关键词:** 机抖激光陀螺; 温度补偿; 人工鱼群算法

**中图分类号:** V241.558 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0081-07

## Temperature compensation method for bias of ring laser gyroscope based on artificial fish swarm algorithm

Yu Xudong, Xu Yunong, Wei Guo, Long Xingwu

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

**Abstract:** Temperature is an important factor for affecting the accuracy of ring laser gyroscope (RLG). The relationship of RLG's bias to temperature should be established accurately which can improve the precision of RLG strapdown inertial navigation system. Temperature characteristic of RLG was introduced. Temperature compensation method for RLG's bias based on improved artificial fish swarm algorithm (IAFSA) was established and the steps and methods were given. The traditional modeling method of stepwise regression was also investigated to provide a comparison with the IAFSA. The result shows that the temperature compensation model by IAFSA is accurate. The bias instability of RLG output after compensation is  $0.00185(^{\circ})/h$  and its precision is 15.5% which is higher than that of the traditional stepwise regression. The results of two typical temperature tests show that temperature compensation model by IAFSA can compensate RLG's bias real-time.

**Key words:** dithered ring laser gyroscope; temperature compensation; artificial fish swarm algorithm

收稿日期:2013-05-21; 修订日期:2013-06-24

基金项目:国防预研基金(51309050301)

作者简介:于旭东(1982-),男,讲师,主要从事机抖激光陀螺及惯性导航系统方面的研究。Email:wind0909@163.com

## 0 引言

激光陀螺具有结构简单、体积小、重量轻、精度高等优点,成为捷联惯导系统的理想器件,已大量成功地运用于航空、航天、航海以及地面定位与定向等领域<sup>[1-2]</sup>。近几年,以光学陀螺为惯性元件的惯性导航系统已经成为研究热点,并有取代传统机械陀螺的趋势<sup>[3]</sup>。但是,许多应用场合尤其是军事领域,环境十分恶劣,温度的剧烈变化直接影响陀螺的精度,进而影响惯导系统的导航精度和可靠性。此外,机抖激光陀螺自身的温度变化也制约着陀螺性能的进一步提高。对于高精度的惯性导航系统,常常需要对惯性器件进行温度补偿<sup>[4]</sup>,因此,研究激光陀螺的温度特性,探讨对其进行温度误差补偿的措施具有重要意义。参考文献[5-6]采用逐步回归方法建立了机抖激光陀螺的温度补偿模型,参考文献[7]利用最小二乘支持向量机对机抖激光陀螺进行了系统级温度补偿,但建立的模型相对复杂。

人工鱼群算法(Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA)是受鱼群行为的启发,由李晓磊于 2002 年提出的一种基于动物行为的群体智能优化算法,是行为主义人工智能的一个典型应用<sup>[8]</sup>。这种算法源于鱼群的觅食行为,在一片水域中,鱼往往能自行或尾随其它鱼,找到营养物质多的地方,因而鱼生存数目最多的地方一般就是此水域中营养物质最多的地方。人工鱼群算法根据这一特点,通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群、追尾及随机行为,从而实现寻优。人工鱼群算法可以克服传统优化方法的许多不足和缺陷,实现和操作简单。对函数不连续、不可微、局部极值点密集等苛刻的情况,更加具有很好的寻优能力。针对 ASFA 算法的不足,对 ASFA 算法中固定视野,固定步长问题进行了改进,以提高收敛速度和参数估计精度。文中首次利用改进的人工鱼群算法(IASFA)对机抖激光陀螺的零偏进行温度补偿,建立了补偿模型,获得了更优的温度补偿参数,可以有效地提高激光陀螺的使用精度。

## 1 IASFA 算法基本原理

ASFA 算法是一种群集智能优化算法,它采用了自上而下的寻优模式模仿自然界鱼群觅食行为,主

要利用鱼的觅食、聚群和追尾行为,构造了个体的底层行为,通过鱼群中个体的局部寻优,达到全局最优值在群体中突现出来的目的。其算法相关定义及具体描述如下:

人工鱼群个体的状态可表示为向量  $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,其中  $X_i$  为欲寻优的控制变量,人工鱼当前位置的食物浓度为  $f(X)$ ,人工鱼个体之间的距离表示为  $d_{ij}=\|X_i-X_j\|$ ,即向量  $X_i-X_j$  的二范数,Visual 表示为人工鱼的感知距离,Step 表示人工鱼移动步长的最大值, $\delta$  表示拥挤度因子, $N$  表示参与寻优的人工鱼数目,即群体规模。

### (1) 觅食行为

设人工鱼当前状态位置,在其感知范围内随机选择一个状态  $X_j$ ,当该状态食物浓度大于当前状态时(即  $F(X_j)>F(X_i)$ ,此处以求极大值问题为例,求极小值问题可以和此进行互换),则向该方向前进一步;反之,则重新随机选择状态  $X_j$ ,判断是否满足前进条件;反复一定次数后,如果仍不满足前进条件,则随机移动一步。数学表达式表示为:

$$\begin{cases} X_j=X_i+\text{Rand}()\cdot\text{Visual} \\ x_{\text{next}k}=x_{ik}+\text{Rand}()\cdot\text{step}\frac{x_{jk}-x_{ik}}{\|X_j-X_i\|}, y_j>y_i \\ x_{\text{next}k}=x_{ik}+\text{Rand}()\cdot\text{step}, y_j<y_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n, x_{jk}, x_{ik}$  和  $x_{\text{next}k}$  分别为人工鱼状态向量  $X_j, X_i$  和人工鱼下一步状态向量  $x_{\text{next}}$  的第  $k$  个分量;Rand()为(0,1)间的一个随机数。

### (2) 聚群行为

人工鱼当前状态为  $X_i$ ,探索在其感知范围内( $d_{ij}<\text{Visual}$ )的伙伴的数目  $n_f$ ,形成集合  $N_i$ ,若  $n_f\geq 1$ ,即  $N_i$  不为空集,表明在其感知范围内有其他伙伴存在,计算这些伙伴的中心位置  $X_c$ 。

$$x_{ck}=\frac{\sum_{j=1}^{n_f} x_{jk}}{n_f} \quad (2)$$

式中: $x_{ck}$  为中心位置状态向量  $X_c$  的第  $k$  个分量; $X_{jk}$  为当前感知范围内的第  $j$  个伙伴  $X_j$  第  $k$  个分量。中心位置的食物浓度为  $F(X_c)$ ,如果  $F(X_c)/n_f>\delta$ ,表明伙伴中心位置有较多的食物且不太拥挤,则朝伙伴中心位置方向前进一步,即按公式(3)执行。否则,人工鱼执行觅食行为。

$$x_{\text{next}k}=x_{ik}+\text{Rand}()\cdot\text{step}\frac{x_{ck}-x_{ik}}{\|X_c-X_i\|} \quad (3)$$

若  $n_f=0$ , 表明可见域内不存在其他伙伴, 也执行觅食行为。

### (3) 追尾行为

人工鱼当前状态为  $X_i$ , 探索在其感知范围内 ( $d_{ij} < \text{Visual}$ ) 的伙伴的数目  $n_f$ , 且伙伴中  $F(X_j)$  为最大的伙伴  $X_{\max}$ , 如果  $F_{\max} > \delta$ , 表明伙伴  $X_{\max}$  具有高的食物浓度并且周围不太拥挤, 则人工鱼群朝伙伴  $X_{\max}$  的方向前进一步, 即按下式执行, 否则, 人工鱼执行觅食行为。

$$x_{\text{next}} = x_{ik} + \text{Rand}() \cdot \text{step} \frac{x_{\max} - x_{ik}}{\|x_{\max} - x_i\|} \quad (4)$$

若  $n_f=0$ , 表明可见域内不存在其他伙伴, 也执行觅食行为。

设置一个公告板, 记录最优的一条人工鱼的状态。根据所要解决的问题性质, 对人工鱼当前所处的环境进行评价, 从而选择一种行为。算法的终止条件一般有两种: 一是判断是否达到预设的精度指标, 二是判断某一区域人工鱼数目所占的比率。

ASFA 的实施过程与它采用的参数取值有较大关系<sup>[9]</sup>, 对 ASFA 的视野、步长、拥挤度因子等主要参数进行优化选取可以提高算法精度和收敛性能。其中, 视野  $\text{Visual}$  和步长  $\text{Step}$  按公式(5)进行动态调整:

$$\begin{aligned} \text{Visual} &= \text{Visual} \cdot \alpha + \text{Visual}_{\min} \\ \text{Step} &= \text{Step} \cdot \alpha + \text{Step}_{\min} \\ \alpha &= \exp(-3 \times G / G_{\max}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $G$  表示迭代次数;  $G_{\max}$  表示最大迭代次数;  $\alpha$  是衰减函数。这种调整较好地平衡了算法的全局搜索能力和局部搜索能力, 加快了收敛速度, 同时提高了算法的精度。在觅食行为中, 人工鱼直接移动到在视野内找到的较优位置, 以加快搜索速度; 在聚群行为中, 用整个鱼群的中心位置代替邻域中心位置; 在追尾行为中, 用群体最优位置代替邻域极值位置, 这样只需计算当前人工鱼与中心位置和最优位置之间的距离, 可以省去当前鱼与邻域所有人工鱼之间距离的计算量、计算邻域极值的计算量和计算邻域最优人工鱼与邻域的所有人工鱼之间距离的计算量, 缩短了运行时间。

## 2 机抖激光陀螺温度特性

对于工程化应用的激光陀螺, 为了适应各个领域的需求, 一般要求其具有较宽的工作温度范围, 可

以在不同的温度环境下正常工作, 且具有较高的精度。激光陀螺的基本结构如图 1 所示, 其中  $M_1$  和  $M_2$  为反射镜,  $M_3$  为半反半透镜, 用于输出光信号, 陀螺内部按一定比例充有混合的 He-Ne 气体, 用于光放电。

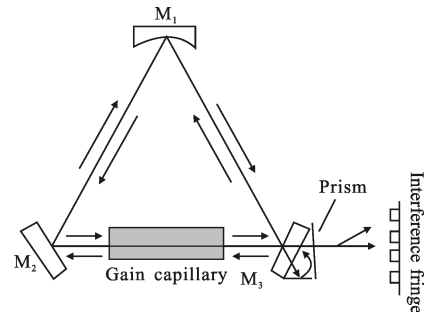


图 1 激光陀螺结构示意图

Fig.1 Configuration diagram of RLG

激光陀螺的输出会受到温度变化的影响。当外界温度变化时, 激光陀螺腔体产生热膨胀, 引起腔体的弯曲变形, 导致环路的光程产生变化, 陀螺的零偏和标度因数都会发生变化; 环境温度场的不均匀可能导致陀螺两臂放电电流的不平衡, 削弱两臂朗缪尔流效应的抵消作用, 导致陀螺零偏增大; 另外, 陀螺内部光学器件特性也会随温度变化而改变, 这同样会影响激光陀螺的零偏。总之, 温度变化和绝对温度值能够影响谐振腔激活介质增益、顺时针、逆时针光波的自作用和相互作用、反射镜特性参数、闭锁锁区、工作气体流动速度、谐振腔长度变化、谐振腔工作模式、压电陶瓷歪扭等, 从而导致陀螺零偏的不稳定。

由于温度变化影响的因素太多, 不好定量描述对某个因素有多大影响以及如何影响。通过反复温度试验发现, 激光陀螺的零偏输出与温度变化呈现出有规律的变化, 且具有较好的重复性, 因此可以采用温度补偿的方式提高激光陀螺的精度。一般情况下, 研究温度的变化导致的激光陀螺的零偏与温度、温度速率以及温度梯度的关系, 采用逐步回归方法建立动态温度模型<sup>[10]</sup>。文中采用 IASFA 获得温度补偿系数, 对激光陀螺零偏进行实时补偿。

## 3 模型建立

### 3.1 建模方法

IASFA 重点关注目标函数值, 对目标函数的性质要求不高, 对初值无要求, 对参数选择不敏感, 可以获得全局最优解, 具有较高的精度。利用 IASFA

对激光陀螺进行温度建模的基本思想是：以人工鱼参数拟合出的残差百秒方差的最小值为评价标准，找出最佳的人工鱼状态，获得温度补偿系数。其具体流程如下：

(1) 数据预处理。剔除陀螺数据中由于计数等原因产生的奇异值。由于陀螺输出的百秒平均值可以反映出陀螺零偏随温度的变化规律，将陀螺数据进行百秒平均，作为数据输入 IASFA 模型。

(2) 初始化人工鱼群。设置人工鱼群的群体规模  $N$ ，最大迭代次数  $G_{\max}$ ，人工鱼的感知距离  $Visual$ ，拥挤度因子  $\delta$ ，人工鱼最大移动步长  $Step$ ，每条人工鱼的维数  $m$ ，这里  $m=3$ ，即  $(b_1, b_2, b_3)$  形成初始鱼群。

(3) 初始化公告板。比较初始化鱼群各人工鱼的目标函数值，将目标函数值最小的人工鱼赋予公告板。目标函数的计算方法如下：

由状态  $X_i$  按下式计算拟合残差  $\sigma_n$ ：

$$b_{np} = b_p - b_0 - b_1 T_p - b_2 T_p^2 - b_3 \frac{dT_p}{dt}$$

$$\bar{b}_n = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l b_{np}, i=1, 2, \dots, l$$

$$\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^l (b_n - \bar{b}_n)^2}, i=1, 2, \dots, l \quad (6)$$

式中： $b_1, b_2, b_3$  为每一条人工鱼获得的温度模型参数； $b_{np}$  为第  $p$  个温度点的零偏拟合误差； $\bar{b}_n$  为每一条人工鱼的零偏拟合误差均值； $\sigma_n$  为每一条人工鱼的零偏拟合误差的方差。

(4) 行为选择。每条人工鱼分别执行聚群行为和追尾行为，缺省行为为觅食行为，选择  $\sigma_n$  最小的行为并更新人工鱼。

(5) 刷新公告板。每条人工鱼通过行为选择更新自己后，将自身的新状态与当前公告板的状态进行比较，若更新的人工鱼优于公告板中的人工鱼，则将公告板刷新为该条新人工鱼。

(6) 检验是否满足 IASFA 的寻优终止条件，如果满足则输出最优人工鱼，否则转到步骤(4)循环寻优。

### 3.2 试验方案

试验采用教研室自行研制的机抖激光陀螺，在陀螺上安装一个 Pt800 铂电阻，铂电阻贴在陀螺腔体阳极附近，用于精密测量陀螺的温度。将陀螺安装在磁屏蔽盒中，置于高低温箱的隔振基座上。陀螺电源、数据处理与采集电路都放在高低温箱外。温箱工

作温度范围为  $-60 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ，控制精度为  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，升降温速率可达到  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，进行  $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  的温循实验。

试验开始时，保温 2h，待陀螺稳定后再进行变温试验。试验中温箱升降温速率都为  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，升温结束后保温 2h 再进行降温过程，降温结束后保温 2h 再进行升温过程，每 1s 采集一组温度和陀螺输出数据，陀螺输出与温度的关系如图 2 所示。从图中可以看出，陀螺 1s 采样数据在低温段和高温段的离散程度不同，主要由于低温和高温对陀螺的影响情况不同。图 3 给出了 100s 平均后陀螺零偏与温度的变化规律。由图 3 可见，陀螺的零偏受温度的影响很大。

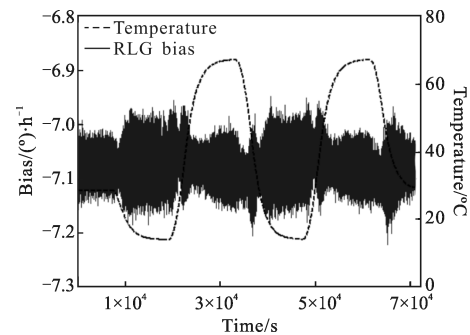


图 2 激光陀螺零偏与温度变化曲线(1 s)

Fig.2 Sampling curves of RLG bias and temperature(1 s)

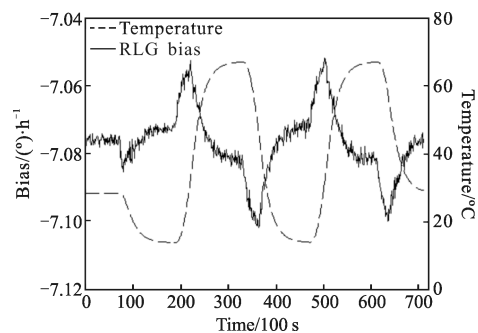


图 3 激光陀螺零偏与温度变化曲线(100 s)

Fig.3 Sampling curves of RLG bias and temperature (100 s)

### 3.3 模型建立及结果分析

影响激光陀螺零偏的温度因素很多，除了温度、温变速率、温度梯度外，还有温度、温变速率和温度梯度的交叉项<sup>[6]</sup>，以及陀螺及安装盒上不同温度点的温度梯度等<sup>[10]</sup>。剔除影响较弱的因素，保留影响显著的因素，文中只考虑温度、温变速率和温度梯度对陀螺零偏的影响，重点对比 IASFA 和逐步回归算法温度补偿的效果。

利用传统的逐步回归方法得到的机抖激光陀螺零偏的温度补偿模型如下：



利用该模型进行温度补偿后的激光陀螺零偏输出曲线如图 4 所示, 由于温度补偿只能改善陀螺零偏的不稳定性, 故只关注温度补偿前后的零偏不稳定性<sup>[7]</sup>。补偿前陀螺原始数据的零偏不稳定性(百秒均方差)是 0.009 53 (°)/h, 补偿后为 0.002 19 (°)/h, 提高了 4.35 倍。

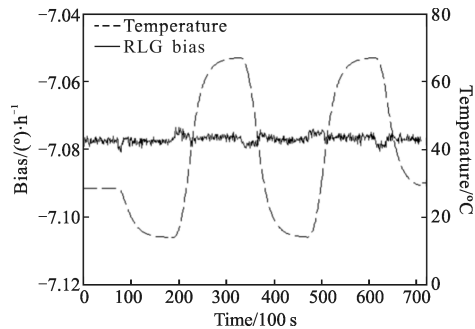


图 4 利用逐步回归算法进行陀螺零偏温度补偿的效果

Fig.4 Bias temperature compensation of stepwise regression model

采用 IASFA 获得的公告板的最优值为 0.001 85 (°)/h, 对应的人工鱼模型为:

$$B = -7.077 12 - 3.05 \times 10^{-4} T + 1.06 \times 10^{-6} T^2 + 1.81 \frac{dT}{dt}$$

如图 5 所示利用 IASFA 补偿后陀螺零偏不稳定性为 0.001 85 (°)/h, 提高了 5.15 倍。由以上结果可以看出, 采用 IASFA 获得的激光陀螺温度补偿系数更精确, 温度补偿效果更好。参考文献[11]指出, 0.0005 (°)/h 的陀螺漂移会引起 1 nm/72 h 的定位误差, 所以对于航海应用的高精度激光陀螺惯导系统, 提高陀螺温度补偿效果的意义尤其重要。

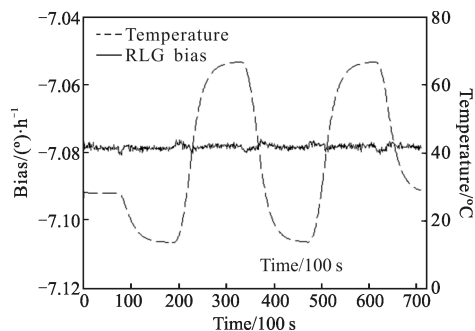


图 5 利用 IASFA 算法进行陀螺零偏温度补偿的效果

Fig.5 Bias temperature compensation of IASFA

### 3.4 试验验证

激光陀螺惯导系统一般包含三个激光陀螺、三个加速度计和配套电路, 温度补偿在导航解算之前进行。为了验证 IASFA 的实时补偿效果, 对激光陀螺的

两个典型应用进行了温度补偿, 考核其补偿效果。

试验一: 将某个激光陀螺装配到惯导系统中, 将惯导系统放置在温箱内, 对其进行随机温变试验。具体如下。

设计了一个随机温变实验, 温度速率为 1 °C/min, 具体步骤如下:

惯导系统先从 15 °C 降到 -20 °C 保温 8 h, 再升到 30 °C 保温 8 h, 再降到 0 °C 保温 8 h, 再升到 10 °C 保温 8 h, 再升到 50 °C 保温 8 h, 再降到 -5 °C 保温 8 h, 再升到 60 °C 保温 8 h, 再降到 25 °C 保温 8 h, 最后关闭温箱, 让系统自然升温, 在此温变条件下陀螺输出与温度变化关系如图 6 所示, 补偿后的陀螺输出曲线如图 7 所示。

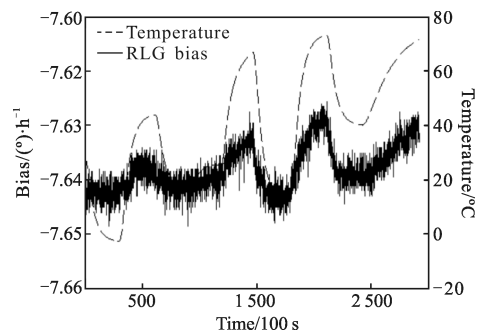


图 6 随机温变条件下陀螺的输出与温度关系(100 s)

Fig.6 Sampling curves of RLG bias and temperature in stochastic temperature conditions(100 s)

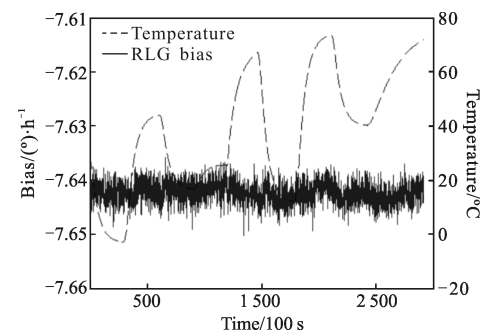


图 7 随机温变条件下利用 IASFA 进行温度补偿的效果

Fig.7 Bias temperature compensation of IASFA in stochastic temperature conditions

试验二: 在实际应用中, 当环境温度变化较小时, 惯导系统由于元器件自然散热也会自然升温, 文中试验对这种典型状态进行模拟。将惯导系统放置在室温 23 °C 的试验室内, 让其温度自然变化, 记录陀螺的输出, 陀螺补偿前的输出与温度关系如图 8 所

示,补偿后的陀螺输出曲线如图 9 所示。

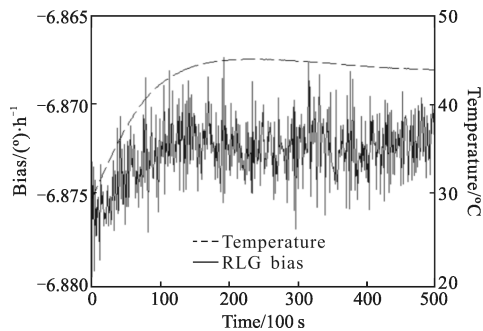


图 8 自然温升条件下陀螺的输出与温度关系(100 s)

Fig.8 Sampling curves of RLG bias and temperature in naturally temperature conditions(100 s)

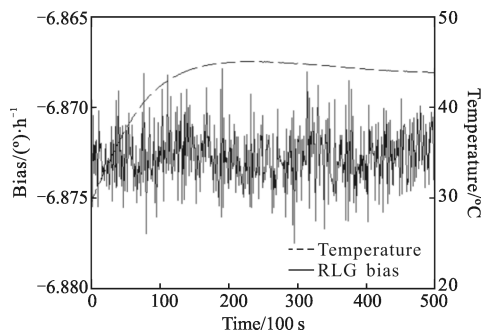


图 9 自然温升条件下利用 IASFA 进行温度补偿的效果

Fig.9 Bias temperature compensation of IASFA in naturally temperature conditions

利用 IASFA 获得的温度补偿模型对以上两个试验进行温度补偿,补偿前后的对比结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,利用 IASFA 可以对激光陀螺零偏的温度特性进行有效补偿。

表 1 两种典型条件下的温度补偿效果对比

Tab.1 Comparison of temperature compensation in two typical conditions

	Before compensation $/(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$	After compensation by IASFA/ $(^{\circ})\cdot\text{h}^{-1}$	Times
Test 1	0.015 9	0.002 01	7.91
Test 2	0.002 5	0.001 6	1.56

## 4 结 论

文中介绍了机抖激光陀螺的温度特性,建立了机抖激光陀螺温度补偿模型,利用 IASFA 获得了温度补偿参数,补偿后的激光陀螺精度达到 $0.001\ 85 (^{\circ})/\text{h}$ ,

比传统的逐步回归方法建模精度提高 15.5%。利用 IASFA 对基于激光陀螺惯导系统的两种典型情况进行了温度试验,试验结果证明:利用 IASFA 获得的温度补偿模型可以对激光陀螺的零偏进行更加有效的实时补偿。

## 参考文献:

- [1] Titterton D H, Weston J L. Strapdown Inertial Navigation Technology [M]. 2nd ed, United Kingdom: Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [2] Han Lu, Jing Zhanrong, Duan Zhemin. Laser gyro/GPS integrated attitude estimation system for ballistic missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 915-920. (in Chinese)  
韩璐, 景占荣, 段哲民. 采用激光陀螺/GPS 的导弹组合定姿系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 915-920.
- [3] 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. (in Chinese)  
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.
- [4] Zhang Pengfei, Wang Yu, Tang Jianxun, et al. Methods for compensating temperature of strap-down inertial navigation system with mechanically dithered ring laser gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 675-679. (in Chinese)  
张鹏飞, 王宇, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的温度补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 675-679.
- [5] Zhang Pengfei, Wang Yu, Yu Xudong, et al. Effect of temperature characteristic of light path on RLG's bias [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2393-2397. (in Chinese)  
张鹏飞, 王宇, 于旭东, 等. 光路温度特性对激光陀螺零偏的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2393-2397.
- [6] Pan Xianfei, Yang Jie, Wu Meiping. RLG bias compensation method in complex temperature variation environment [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(2): 234-238. (in Chinese)  
潘献飞, 杨杰, 吴美平. 复杂温变环境下的激光陀螺零偏补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2): 234-238.
- [7] Wei Guo, Li Geng, Wu Yan, et al. Application of least squares-support vector machine in system-level temperature compensation of ring laser gyroscope [J]. *Measurement*, 2011

- (44): 1898–1903.
- [8] Li Xiaolei, Shao Zhijiang, Qian Jixin. An optimizing method based on autonomous animals: fish-swarm algorithm [J]. *Theory & Practice*, 2002, 22(11): 32–38. (in Chinese)  
李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32–38.
- [9] Wang Lianguo, Shi Qihong. Parameters analysis of artificial fish swarm algorithm [J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(24): 169–171. (in Chinese)  
王联国, 施秋红. 人工鱼群算法的参数分析 [J]. 计算机工程, 2010, 36(24): 169–171.
- [10] Zhang Pengfei, Wang Yu, Tang Jianxun, et al. Research on methods for compensating temperature of mechanically dithered RLG [J]. *ACTA Armamentarii*, 2010, 31(5): 562–566. (in Chinese)  
张鹏飞, 王宇, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺多温度点实时温度补偿方法的研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(5): 562–566.
- [11] Yu Xudong, Wei Xuotong, Li Ying, et al. Application of radial basis function network for identification of axial RLG drifts in single-axis rotation inertial navigation system [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(3): 48–52. (in Chinese)  
于旭东, 魏学通, 李莹, 等. RBF神经网络在单轴旋转惯导系统轴向陀螺漂移辨识中的应用 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 48–52.