光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260204002

基于Y波导内生特征信号的光纤陀螺温度非互易误差补偿方法

后思彤[1,2*]，于海成[2]，石海洋[2]，贺　洋[2]，张思楠[2]

（1. 北京航天控制仪器研究所，北京 100039；2. 北京航天时代光电科技有限公司，北京 100094）

摘　要： 针对光纤陀螺在全温工况下由温度相关非互易相移误差引起的长周期零偏漂移问题，提出一种基于集成光学Y波导内生特征信号的无温度传感器补偿方法——滞回感知岭回归补偿（HARC）。该方法利用Y波导内生特征信号表征器件热状态与电光链路工作点变化，通过自适应建模并结合岭回归以实现稳定且低计算量的漂移估计与在线校正。试验结果表明，相较传统温度补偿方法，HARC方法可使陀螺漂移减少23.4%，验证了Y波导内生特征信号在热漂移抑制中的有效性与重复性。所提方法为陀螺的集成化与高可靠性提供相关技术方案。

关键词： 光纤陀螺；温度误差模型；Y波导；岭回归；零偏稳定性

中图分类号： TP181；V241.5　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0462－07

Y-Waveguide Intrinsic Feature-Based Compensation of Temperature-Induced Nonreciprocal Errors in Fiber-Optic Gyroscopes

HOU Sitong[1,2], YU Haicheng[2], SHI Haiyang[2], HE Yang[2], ZHANG Sinan[2]

（1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, CHN; 2. Beijing Aerospace Times Optical Electronics Technology Co., Ltd., Beijing 100094, CHN）

Abstract: To address the long-period bias drift of fiber-optic gyroscopes under full-temperature operation caused by temperature-dependent nonreciprocal phase-shift errors, this paper proposes a temperature-sensor-free compensation method based on intrinsic feature signals from the integrated-optic Y-junction, termed hysteresis-aware ridge compensation (HARC). The proposed approach exploits Y-waveguide intrinsic features to characterize the device thermal state and variations in the electro-optic operating point. By adopting piecewise modeling and ridge regularization, HARC enables stable, low-complexity drift estimation and online correction. Experimental results show that, compared with conventional temperature-based compensation, the proposed method reduces gyroscope drift by 23.4%. This demonstrates the effectiveness and repeatability of Y-waveguide feature signals for suppressing thermal drift.

Key words: fiber-optic gyroscope; temperature error model; Y-waveguide; ridge regression; bias stability

收稿日期：2026－02－04.

基金项目：国家自然科学基金（12441501）.

* **通信作者：**后思彤

0　引言

光纤陀螺凭借其全固态、抗冲击、寿命长等优势，已广泛应用于惯性导航与高可靠性测量等领域[1]。随着高精度光纤陀螺向小型化、低功耗与高可靠方向发展，复杂温度环境下的零偏稳定性与长期漂移抑制仍是制约其性能提升的关键。由于陀螺内部多种光学器件及耦合结构具有温敏特性，环境温变与器件自热会引起器件参数漂移及温度梯度分布变化，进而改变两向传播光的等效相位、偏振与功率分布，形成非互易相位偏置（Shupe效应）[2]，最终表现为零偏漂移与标度因数波动。

针对温度主导的陀螺输出漂移问题，现有研究常将温度信息作为主要观测量来进行建模并补偿漂移[3-4]。文献[5]通过融合多种子模型进而提高补偿稳定性；文献[6]将时序建模与物理信息约束相结合，重点解决了宽温区物理一致性不足的问题；文献[7]将群智优化算法与元学习框架相结合，提高了模型的收敛效率。此类思路通过在陀螺内部布置温度传感器获取温度信息，对陀螺输出进行校正。虽然实现简单，但在面向小型化与高可靠性需求时存在一定局限：一方面，额外的温度传感器与布线会增加体积、装配复杂度与失效点，且温度传感器提供的是外部热环境的间接观测，通常只能拟合热漂移的一部分；另一方面，单点温度难以准确表征关键误差源的等效热状态，尤其在温度梯度与热滞回存在时，易产生时延与失配，限制补偿上限。

集成光学部分中的Y波导是陀螺仪工作的必备器件，同样具有显著温敏特性，其有效折射率、耦合与损耗等随温度变化，可映射到系统内部的光电检测信号幅值、偏置、调制响应与工作点参数等可观测信号。相较于外置温度传感器，该特征信号属于陀螺调制解调链路的内生信号，不仅随温度变化，还对电光调制效率与电驱链路状态敏感，能将热电耦合引起的电光链路误差共同吸收进漂移估计量中，更贴近漂移产生的实际物理过程，且无需新增硬件以及布线即可提供温度相关信息，有利于提升集成化陀螺的适配性与系统可靠性。

基于此，本文提出一种利用Y波导内生特征信号实现光纤陀螺输出漂移补偿的方法。在不引入额外温度传感器的前提下，采集与Y波导状态相关的特征信号，建立其与输出漂移的映射模型并进行补偿校正。结果表明，该方法可在温度扰动条件下有效抑制输出漂移，大幅提高陀螺仪的测量精度。

1　Y波导温度特性及陀螺误差机理

1.1　Y波导温度特性

光纤陀螺光学器件中的Y波导通常采用铌酸锂（$LiNbO_3$）晶体作为衬底[8]。$LiNbO_3$具有显著的线性电光效应：当在晶体侧施加电压形成横向静电场时，波导模式对应的有效折射率将发生变化，从而对沿波导传播的光引入附加相位[9]。外加电压V在电极间距（或等效厚度）上产生电场E，并导致有效折射率改变量：

$$\Delta n_{\mathrm{eff}}=-\frac{1}{2}n^3 r_{\mathrm{eff}}\Gamma E\approx-\frac{1}{2}n^3 r_{\mathrm{eff}}\Gamma\frac{V}{b} \tag{1}$$

式中，n为对应偏振或传播方向的折射率；r_{eff}为有效电光系数，由晶体取向与电极结构决定；Γ为光场与电场的有效重叠系数；b为电极间距。

相位调制量可由下式给出：

$$\Delta\phi=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta n_{\mathrm{eff}}L=-\frac{\pi}{\lambda}n^3 r_{\mathrm{eff}}\Gamma\frac{L}{b}V \tag{2}$$

式中，λ为工作波长，L为调制波导的有效长度。半波电压V_π满足$|\triangle\phi|=\pi$，可得：

$$V_\pi=\frac{\lambda b}{n^3 r_{\mathrm{eff}}\Gamma L} \tag{3}$$

由此可见，Y波导的调制效率与材料参数(n, r_{eff})及器件几何参数(L, b, Γ)密切相关。温度变化将同时作用于上述材料与结构参数，从而引起调制相位与半波电压的漂移。重点考虑折射率的热光效应以及器件几何尺寸的热膨胀，对温度T求微分，可得到相位的相对漂移关系：

$$\frac{\mathrm{d}\phi}{\phi}=\left(\frac{1}{L}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}-\frac{1}{b}\frac{\mathrm{d}b}{\mathrm{d}T}+3\frac{1}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}+\frac{1}{r_{\mathrm{eff}}}\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{eff}}}{\mathrm{d}T}+\frac{1}{\Gamma}\frac{\mathrm{d}\Gamma}{\mathrm{d}T}\right)\mathrm{d}T \tag{4}$$

同理，由公式(4)得到半波电压的温度漂移可写为：

$$\frac{\mathrm{d}V_\pi}{V_\pi}=\left(\frac{1}{b}\frac{\mathrm{d}b}{\mathrm{d}T}-\frac{1}{L}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}-3\frac{1}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}-\frac{1}{r_{\mathrm{eff}}}\frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{eff}}}{\mathrm{d}T}-\frac{1}{\Gamma}\frac{\mathrm{d}\Gamma}{\mathrm{d}T}\right)\mathrm{d}T \tag{5}$$

因此在一定温度范围内，V_π的变化模型为：

$$\Delta V_\pi\approx K_{\mathrm{V}}\Delta T+\delta_{\mathrm{e}} \tag{6}$$

式中，K_{V}为半波电压随温度变化的比例因子；δ_{e}用于表征非线性项引入的偏差，如制造与封装的扰

动、温度梯度、热滞后等。该结论表明，温度变化会导致Y波导的调制相位与V_π发生系统性漂移，进而影响光纤陀螺的零偏稳定性。此外，V_π及其等效特征信号，由解调链路得到的V_π工作点参数等，本质上反映了光学器件以及陀螺仪的内生电热耦合状态，可将此作为温度扰动的敏感表征量。

1.2 陀螺仪温度漂移机理

温度扰动会通过多种环节共同作用于输出，包括光源波长与功率变化、Y波导半波电压漂移、光纤环及骨架热胀冷缩导致的标度因数变化，以及噪声项随温度变化等。其中，光纤环内部温度梯度引发的Shupe效应通常是热漂移的主要来源。

当环境温度改变时，光纤环与其周围介质之间产生热交换，热量在环体内以导热形式传播，从而形成随时间演化的温度场$T(r,t)$。在光纤环内部无显著体热源且工作温区内辐射换热可忽略的条件下，光纤环温度场可近似由无热源热传导方程描述[10]，即：

$$\rho c_f \frac{\partial T}{\partial t} = k_0 \nabla^2 T$$

$$\alpha = \frac{k_0}{\rho c_f} \tag{7}$$

温度场的非均匀性使得同一段光纤在不同时间具有不同温度。由于顺、逆时针两束光在不同时间通过同一段光纤，折射率的热光效应与光纤热膨胀会导致两束光获得不同相位累积，从而产生不可逆的相位差。将该效应沿光纤长度积分，可得到温度致非互易相移的典型形式：

$$\phi_e(t) = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\delta n}{\delta T} + n\alpha_f\right)\int_0^l \frac{\partial T(l,t)}{\partial t}\frac{n}{c}(L-2l)\mathrm{d}l \tag{8}$$

式中，L为光纤环的长度，λ为工作波长，n为折射率，α_f为光纤热膨胀系数。由式(8)可见，Shupe误差的主要来源是温度场的不对称性与温度变化率的不均匀分布。优化光纤环的绕制结构可以相对降低Shupe误差，但仍需在可观测量基础上建立补偿模型以抵消等效零偏项。

2 补偿模型的建立

2.1 岭回归模型

岭回归是线性回归的一种改进方案。在多元线性回归中，若设计矩阵的列向量存在显著相关性或特征维数较高，普通最小二乘解对噪声扰动高度敏感，易出现系数幅度过大、方差膨胀与泛化能力下降等问题。因此，岭回归在线性回归的基础上，在损失函数中引入二范正则项，对回归系数施加幅值约束，从而提升估计稳定性[11]。

设训练样本的响应向量为$\boldsymbol{y}\in R^N$，特征矩阵为$\boldsymbol{X}\in R^{N\times d}$，回归系数为$\lambda$。岭回归的目标函数则定义为：

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = arg\min_\beta \|\boldsymbol{y}-\boldsymbol{X}\boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \lambda\|\boldsymbol{\beta}\|_2^2, \lambda \geqslant 0 \tag{9}$$

式中，λ为正则化系数，用于权衡拟合误差与系数范数。由式(10)可得解：

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \left(\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} + \lambda \boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{10}$$

岭回归通过在$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$上叠加$\lambda\boldsymbol{I}$增强矩阵可逆性，从而有效缓解共线性导致的数值不稳定。正则化系数λ的选取一般基于验证集或交叉验证准则确定。此外，为保证正则项对不同量纲特征具有一致约束效果，通常配合特征标准化使用。

由此，岭回归通过正则化实现偏差与方差的权衡，并通过改善病态性与抑制系数范数膨胀提升模型鲁棒性，为后续补偿模型提供了数值稳定且可解释的参数估计手段。

2.2 滞回感知岭回归补偿模型建立

选取集成光学Y波导内生特征信号作为器件内生热状态的表征量，并建立其与陀螺输出漂移间的数据驱动映射模型。光纤陀螺的工作结构如图1所示，其中电路结构由光电转换与信号放大(PIN-FET)模块、ADC采集模块、两路DAC转换模块等组成。FPGA从ADC采集的探测器信号中解调出Y波导驱动信号调制增益的数字表征量，该表征量即为输出Y波导内生特征信号。

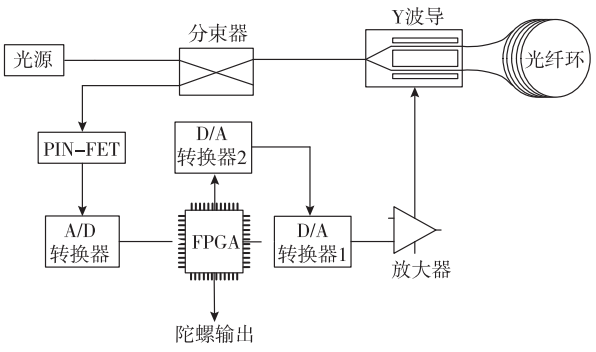


图1 光纤陀螺工作结构示意图[12]

本文使用的滞回感知岭回归补偿(HARC)算法流程如图2所示。该方法通过引入滞后对齐刻画热滞后，并采用自适应岭回归描述温变方向不对称性，进而实现对陀螺输出热漂移的估计与校正。

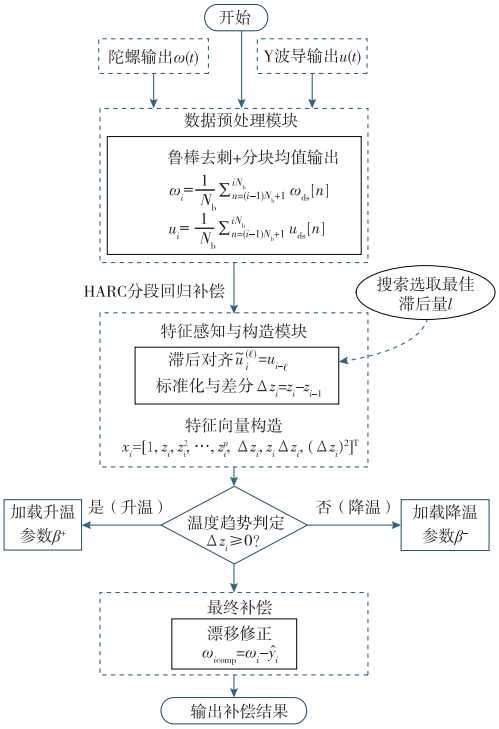


图 2　HARC 算法流程图

（1）特征信号提取与预处理

原始陀螺输出序列 $\omega[n]$，Y 波导内生特征信号 $u[n]$ 为采集输入。在一定温度扰动条件下，可将输出分解为：

$$\omega[n]=\omega_0+d[n]+\varepsilon[n] \tag{11}$$

式中，ω_0 为常值偏置，$d[n]$ 为温度引起的相关漂移项，$\varepsilon[n]$ 为测量噪声与其他扰动。本文仅基于 $u[n]$ 估计 $\hat{d}[n]$，并实现补偿输出。

$$\omega_{\mathrm{comp}}[n]=\omega[n]-\hat{d}[n] \tag{12}$$

采集序列包含毛刺、跳变与瞬态扰动，首先对输入的两个序列进行鲁棒去刺处理，降低非高斯离群点对回归目标与特征统计量的影响。

鉴于热漂移主要表现为低频缓变成分，进一步采用分块均值实现等效低通与降维。将离散采样序列按每块 N_{b} 点分组，定义块级输出：

$$\begin{aligned}\omega_i&=\frac{1}{N_{\mathrm{b}}}\sum_{n=(i-1)N_{\mathrm{b}}+1}^{iN_{\mathrm{b}}}\omega_{\mathrm{ds}}[n]\\ u_i&=\frac{1}{N_{\mathrm{b}}}\sum_{n=(i-1)N_{\mathrm{b}}+1}^{iN_{\mathrm{b}}}u_{\mathrm{ds}}[n]\end{aligned} \tag{13}$$

式中，i 为块索引，N_{b} 为每块采样点数。在抑制高频噪声的同时保留测试过程的主要变化趋势。

（2）滞后对齐

实际系统中的热传导、器件热容以及控制环路的响应会引入显著时延，使得 u_i 与漂移目标 y_i 之间存在时间错位。故引入块级热滞后参数 ℓ，并构造对齐序列：

$$\tilde{u}_i^{(\ell)}=u_{i-\ell} \tag{14}$$

在候选集合 $\ell\in[\ell_{\min},\ell_{\max}]$ 上扫描滞后量，以补偿残差统计量最小为准则确定最优滞后。

（3）特征构造

为消除量纲影响并提高岭回归的数值稳定性，使正则项对不同尺度特征具有一致约束，从而提升超参数 λ 的可迁移性与选取稳定性。先将对齐后的特征序列 $\tilde{u}_i^{(\ell)}$ 标准化为：

$$z_i=\frac{\tilde{u}_i^{(\ell)}-\mu_{\mathrm{u}}}{\sigma_{\mathrm{u}}+\varepsilon} \tag{15}$$

式中，μ_{u}，σ_{u} 分别是 $\tilde{u}^{(\ell)}$ 在训练段的均值与标准差，ε 为防止除零的极小量。

由于温度主导的陀螺输出漂移不仅与器件温度状态有关，还与温度变化速率、热扰动强度等相关，故引入一阶差分项表征趋势：

$$\Delta z_i=z_i-z_{i-1} \tag{16}$$

此外，构造包含多项式状态项与动态耦合项的特征向量：

$$\boldsymbol{x}_i=[1,z_i,z_i^2,\cdots,z_i^p,\Delta z_i,z_i\Delta z_i,(\Delta z_i)^2]^T \tag{17}$$

式中，p 为多项式阶数，用于刻画非线性映射关系；Δz_i 及其耦合项用于表征热过程动态特性。

（4）滞回岭回归

温变过程中常呈现升降温不对称的滞回特性，漂移对 Δz_i 的响应具有一定的方向依赖性。为描述该非对称性，本文提出滞回岭回归补偿，以 Δz_i 的符号对样本进行判别，分配拟合参数：

$$\hat{y}_i=\begin{cases}\boldsymbol{x}_i^{\top}\boldsymbol{\beta}^{+},\Delta z_i\geqslant 0\\ \boldsymbol{x}_i^{\top}\boldsymbol{\beta}^{-},\Delta z_i<0\end{cases} \tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{\beta}^{+}$ 与 $\boldsymbol{\beta}^{-}$ 分别对应升温和降温的映射模型。用两条正则约束的局部模型近似热滞回曲线，以提升拟合能力。

多项式特征可能引起共线性与病态问题，故参数估计采用岭回归，对截距项不施加惩罚：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\beta}&=arg\min_{\beta}\boldsymbol{y}-\boldsymbol{X}\boldsymbol{\beta}_2^2+\lambda\boldsymbol{P}\boldsymbol{\beta}_2^2\\ \boldsymbol{P}&=diag(0,1,\cdots,1)\end{aligned} \tag{19}$$

式中，λ 为正则系数，$\boldsymbol{X}$ 是由 $\boldsymbol{x}_i^{\mathrm{T}}$ 堆叠成的设计矩阵。对两类样本分别求解，得到 $\boldsymbol{\beta}^{+}$ 与 $\boldsymbol{\beta}^{-}$。

（5）在线补偿

依据 Δz_i 的符号选择对应的参数 $\boldsymbol{\beta}^{+}$ 或 $\boldsymbol{\beta}^{-}$ 得到漂移估计 $\hat{y}_i$，此外，按照公式（12）输出补偿结果。

该过程仅进行低维的线性运算与线性预测，计算量低，且易于嵌入式实现。

3 实验验证与结果分析

为验证陀螺补偿方案的有效性以及可行性，对实验室某型号光纤陀螺仪进行了三组高低温环境实验。

3.1 高低温环境实验设计

为了在全温域条件下充分激励陀螺的热漂移与热滞回效应，补偿实验采用温箱宽温域循环激励方案。实验状态如下：陀螺静止在温箱中，设置温箱首先由室温（25℃）升温至高温（65℃）并驻留 3 h，随后降温至低温（－30℃）驻留 3 h，再次升温至高温平台驻留 3 h，最后降至室温。此为一次温度循环，同时包含温度的平台稳态段与斜率动态段。

陀螺仪温度传感器表征出的温度与 Y 波导内生特征信号的对比如图 3 所示。可以看出，两者具有较强相关性。

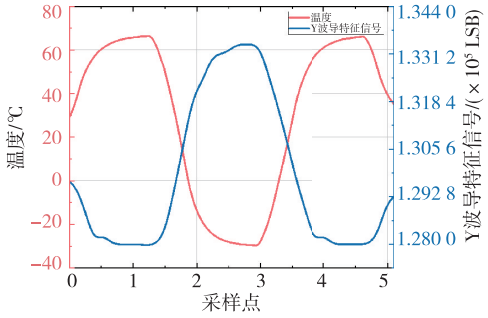


图 3 温度与 Y 波导内生特征信号对比图

3.2 陀螺仪数据采集及参数选取

采集陀螺仪输出数据，对其进行鲁棒去刺处理，以降低离群点对模型参数估计的影响。鉴于热漂移主要体现为低频缓变分量，进一步采用分块（每 100 个采样点）均值以提取低频趋势分别对输出与特征量进行块均值处理，得到块级序列。以某次实验为例，块级输出与温变率的对应关系如图 4 所示。可以看出，在温变阶段，陀螺漂移明显增强，故在后续补偿中引入动态项。

补偿后的残差标准差（STD）能够反映漂移抑制后的离散度与低频残余水平，在热漂移问题中可作为直观且易复现的评价指标。本文引入块级热滞后参数 ℓ，以补偿后的 STD 统计量最小作为选取准则[13]，在候选集合上进行扫描，滞后参数扫描结果如图 5 所示。

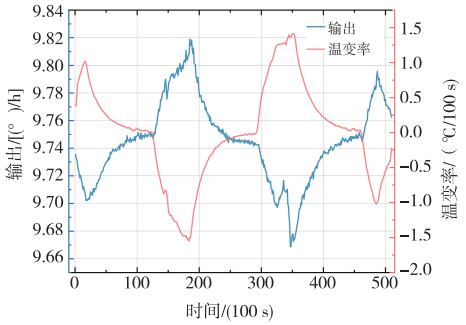


图 4 补偿前陀螺原始输出与温变率对比

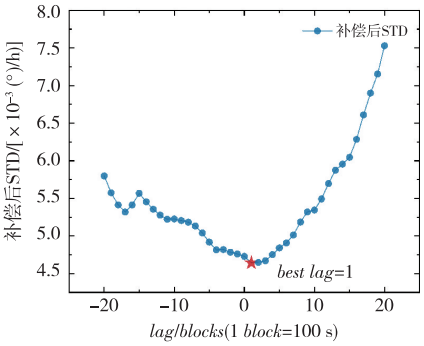


图 5 STD 随 lag 变化的扫描曲线

由图 5 可确定本组最优滞后量 ℓ（即 $lag=1$），对应的残差标准差取得全局最小，表明 HARC 能够有效对齐器件状态变化与输出漂移响应的时间关系。此外，滞后量的选取具有一定的区域稳定性，如图 6 所示，最优并非单点的偶然结果，而是在一定范围内具有低谷区。

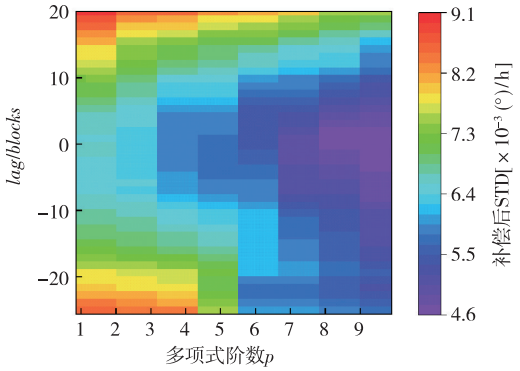
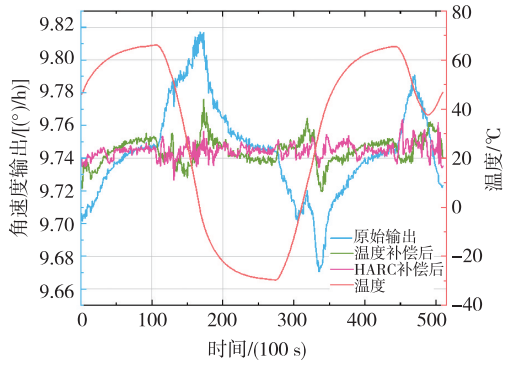


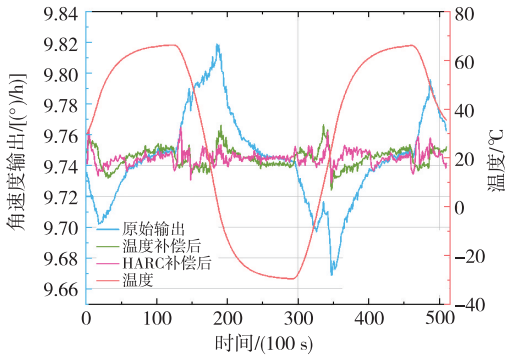
图 6 HARC 模型超参数扫描热力图

3.3 补偿效果对比

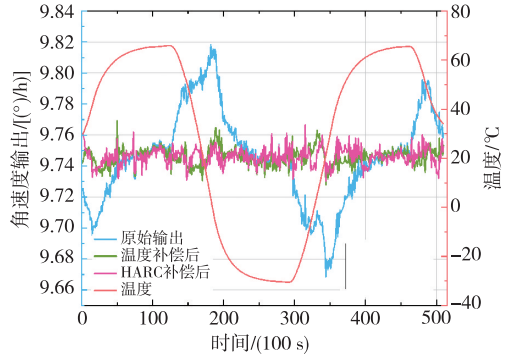
以某型号陀螺三次温度试验的数据进行实验验证，对比未补偿情况下，基于温度数据的补偿效果与基于 Y 波导内生特征信号的补偿效果。三次实验均在同一温度循环工况下进行，时域对比如图 7 所示。同时，计算基于温度补偿后与基于 Y 波导内生特征信号补偿后的零偏稳定性[14-15]。



（a）第一组实验



（b）第二组实验



（c）第三组实验

图 7　零偏稳定性时域对比图

陀螺输出未补偿前，基于温度数据补偿与基于Y波导内生特征信号补偿的零偏稳定性对比如表 1 所示。其中，T-comp 表示使用 18B20 温度传感器采集温度数据，并以此作为观测量输入补偿模型的常规温度补偿方法。

表 1　零偏稳定性[(°)/h(100 s, 1σ)]对比

试验编号	未补偿	T-comp	HARC
1	0.028 411	0.007 972	0.004 584
2	0.029 382	0.006 273	0.004 644
3	0.029 165	0.005 926	0.005 719

基于Y波导内生特征信号补偿与基于温度信号补偿后的零偏稳定性改善率对比如表 2 所示。相对于补偿前陀螺的原始输出，基于温度信号补偿后的陀螺漂移平均减小 76.8%，基于Y波导内生特征信号补偿后的陀螺漂移平均减小 82.8%。基于Y波导内生特征信号的补偿效果相较于基于温度的补偿效果平均额外提升 23.4%。该结果说明Y波导内生特征信号能够充分表征陀螺漂移的演化过程，除热漂移外还可吸收与电光链路相关的误差投影。

表 2　零偏稳定性改善率对比

补偿方式	1	2	3	平均值
T-comp	71.9%	78.7%	79.7%	76.8%
HARC	83.9%	84.2%	80.3%	82.8%

4　结论

本文面向光纤陀螺全温工况下由温度相关非互易相移引起的长周期漂移问题，提出并验证了一种基于集成光学Y波导内生特征信号的HARC方法。该方法以陀螺内部必备器件Y波导内生特征信号作为误差表征信号，将其作为系统热状态与电光链路的综合观测，在不引入额外温度传感器的前提下建立漂移估计模型，并对陀螺输出进行了在线校正。所提方法可在集成化陀螺等低功耗与高可靠性应用需求下提供一种漂移抑制路径。

参考文献：

[1] 王　巍. 高精度光纤陀螺仪技术[M]. 北京：国防工业出版社，2021.
Wang Wei. High Precision Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.

[2] 仇海涛，冯子健，石海洋. 基于PSO-RBF神经网络的光纤陀螺温度补偿及实现[J]. 半导体光电，2024，45(6)：971-976.
Qiu Haitao, Feng Zijian, Shi Haiyang. Fiber optic gyroscope temperature compensation and implementation based on particle swarm optimization-radial basis function neural network [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(6): 971-976.

[3] 张志利，张云昊，周召发，等. 光纤陀螺温度误差抑制方法研究进展[J]. 电光与控制，2026，33(5)：64-71，112.
Zhang Zhili, Zhang Yunhao, Zhou Zhaofa, et al. Research progress on temperature error suppression methods for fiber optic gyroscope [J]. Electronics Optics & Control, 2026, 33(5): 64-71, 112.

[4] 杨雷静，王竣可，苏　杭. 基于光纤陀螺的温度补偿模型改进、压缩和FPGA实现[J]. 中国惯性技术学报，2024，32(1)：79-87.
Yang Leijing, Wang Junke, Su Hang. Improvement, compression, and FPGA implementation of temperature compensation model based on fiber-optic gyroscopes [J].

Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(1): 79-87.

[5] 仇海涛, 王 开, 石海洋, 等. 基于多模型集成算法的光纤陀螺温度补偿及实现[J]. 半导体光电, 2024, 45(1): 96-100.
Qiu Haitao, Wang Kai, Shi Haiyang, et al. Fiber optic gyroscope temperature compensation and implementation based on multi-model ensemble algorithm [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 96-100.

[6] Zhang Y, Zhou Z, Zhang Z, et al. Temperature drift compensation method for fiber-optic gyroscope based on LSTM-PINN [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2026, 38(3): 184-187.

[7] Zhao J, He K, Kang L, et al. ECOA-MAML-enhanced framework for accurate temperature drift compensation in fiber optic gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(15): 30105-30117.

[8] 刘 颖, 李 言, 姬忠校, 等. 光纤陀螺用Y波导半波电压稳定性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 449-453.
Liu Ying, Li Yan, Ji Zhongxiao, et al. Research on the half-wave voltage stability of Y waveguide in FOG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 449-453.

[9] 王英利, 徐金涛, 刘尚波, 等. 热敏电阻用于补偿Y波导温度漂移[J]. 光子学报, 2014, 43(S1): 144-148.
Wang Yingli, Xu Jintao, Liu Shangbo, et al. The compensation of Y wave-guide temperature drifts by thermal resistor[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(S1): 144-148.

[10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[11] 裴天琪, 于曹阳, 连 琏. 基于岭回归约简和改进支持向量机的AUV运动快速预测方法[J]. 船舶力学, 2025, 29(12): 1838-1847.
Pei Tianqi, Yu Caoyang, Lian Lian. A fast motion prediction method for AUVs based on ridge regression reduction and improved Support Vector Machine [J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(12): 1838-1847.

[12] 宋 建, 黄继勋, 冯文帅, 等. 光纤陀螺标度因数长期变化抑制技术研究[J]. 半导体光电, 2025, 46(2): 342-349.
Song Jian, Huang Jixun, Feng Wenshuai, et al. Long-term suppression of scale-factor variation in fiber-optic gyroscopes [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(2): 342-349.

[13] Cui Y, Meng X, Qiao J. A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on two-archive mechanism[J]. Applied Soft Computing, 2022, 119: 108532.

[14] 刘元元, 杨永斌, 冯文帅, 等. 基于傅里叶变换的光纤陀螺测试环境自评估技术[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0406002.
Liu Yuanyuan, Yang Yongbin, Feng Wenshuai, et al. Self-assessment technique for fiber optic gyroscope test environment based on Fourier transform [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0406002.

[15] 何丽芳. 光纤陀螺温度控制及补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
He Lifang. Research on techniques of FOG's temperature control and compensation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

作者简介:

后思彤(2002—),女,硕士研究生,研究方向为高精度光纤陀螺电路技术。