

利用光源温度特性提高直升机用光纤惯导性能的方法

张恩康,张红伟

(中国直升机设计研究所,天津 300300)

摘要:标度因数是评价光纤陀螺动态性能优劣的一个重要指标,其误差直接影响光纤陀螺的精度和稳定性。由于热胀冷缩效应陀螺光纤敏感线圈面积与温度呈正相关,因此提出利用光源的温度特性对陀螺标度因数误差进行线性补偿的方法,使得后续光纤敏感线圈的温度补偿效果最佳。实验结果表明:在 100 ℃变化范围(-40~+60 ℃)内,使用该方法后,陀螺标度因数误差由 1100ppm 减小到 620ppm,大大提高了光纤陀螺标度因数的温度稳定性(光纤敏感线圈温度补偿前)。

关键词:光纤陀螺;掺铒超荧光光纤光源;增益平坦滤波器;平均波长;标度因数

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)06-0023-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Method of improving the optical inertial navigation performance for helicopter by using the temperature characteristics of light source

ZHANG Enkang, ZHANG Hongwei

(China Helicopter Research and Development Institute, Tianjin 300300, China)

Abstract: Scale factor is a key indicator for evaluating the dynamic performance of fiber optic gyroscope, its error directly affects the precision and stability of fiber optic gyroscope. Because the area of the gyroscope fiber optic sensing coil is positively related to the temperature due to the thermal expansion and cold contraction effect, a linear compensation method is proposed to compensate the gyroscope scale factor error using the temperature characteristics of the light source, which makes the temperature compensation effect of the subsequent fiber optic sensing coil is the best. The experimental results show that, in the range of 100 ℃ (-40~+60 ℃), the scale factor error of fiber optic gyroscope is reduced from 1100ppm to 620ppm after using this method, which greatly improves the temperature stability of fiber optic gyroscope scale factor (before temperature compensation of fiber optic sensing coil).

Key words: fiber optic gyroscope, erbium-doped superfluorescent fiber source, gain flattening filter, mean wavelength, scale factor

0 引言

惯性导航技术是确定载体位置、速度和姿态等信息的技术,已经广泛应用于航空、航天和航海等军事领域。目前机上通常会同时装备 2 种类型的惯导器件:激光陀螺(LG)和光纤陀螺(FOG)。LG 和 FOG 都是基于 Sagnac 效应的光学陀螺,区别在于 LG 中的光在谐振腔内传播,受外界影响较小、精度较高,但其谐振腔的成本昂贵,且容易产生闭锁现象^[1];而 FOG 中的光

在光纤中传播,成本较低、寿命较长,但其光纤容易受外界的温度变化引起应力微变,进而影响陀螺的精度^[2]。所以,目前机上以 LG 为首要惯导器件,FOG 为备用惯导器件,两者同时对飞机进行导航与制导。但是,随着光纤技术的进步和对 FOG 关键技术的深入研究,FOG 的性能和精度逐步提升,使得 FOG 逐步替代 LG 作为直升机的主导航器件成为一种发展趋势^[3]。

FOG 标度因数在一些恶劣的环境条件下(尤其是温变环境中)会发生漂移,使陀螺测量值偏离真实值,因此标度因数的温度稳定性是评价高精度 FOG 动态性能的一个重要指标。FOG 的标度因数主要受光源平均波长和光纤敏感线圈 2 种因素的影响,从目前国内高校和科研院所公开报道的 FOG 技术水平来看,标度因数误差可以通过各种补偿的方法来解决。一方面,光源的平均波长稳定性将直接影响标度因数的一致

收稿日期:2022-02-08。

作者简介:张恩康(1992—),男,山东德州人,工学博士,工程师,任职于航空工业集团中国直升机设计研究所,主要研究方向是光纤陀螺、开放式航电系统架构、云原生架构、FC 网络和量子技术等。



性,该因素引起的 FOG 标度因数误差可以通过不同的光路形式、优化光路结构、采用特殊增益介质的掺杂光纤和稳定激光二极管的电流等方法补偿^[4-8];另一方面,光纤敏感线圈是引起标度因数误差的一个重要因素,许多研究学者提出采用对光纤敏感线圈进行温度补偿的方法来提高标度因数的稳定性,如一次拟合、分段拟合等方法^[9-12]。在工程上,科研院校和研究所已有给光纤敏感线圈加保温罩或给 FOG 加温控箱等方法解决标度因数随温度变化的问题,但这些方法大大增加了 FOG 的重量和体积,不符合其小型化发展趋势。

针对 FOG 标度因数随温度变化的问题,本文提出一种利用掺铒超荧光光纤光源(ED-SFS)温度特性补偿陀螺光纤敏感线圈因温度变化引起的标度因数误差的方法。

1 理论分析与设计

1.1 理论分析

FOG 是一种基于 Sagnac 效应的光纤传感器,当其旋转时,顺时针、逆时针方向传输的 2 束光将产生一个与旋转角速率 Ω 成正比的相位差 $\Delta\varphi$,可以表示为

$$\Delta\varphi = K \cdot \Omega = \frac{8\pi S}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

其中, S 为光纤敏感线圈的面积, c 为真空中的光速, $\bar{\lambda}$ 为光纤敏感线圈中光的平均波长。标度因数 K 可以定义为相位差 $\Delta\varphi$ 和旋转角速率 Ω 之间的比值。假设在实际情况下,旋转引起的相位差 $\Delta\varphi$ 由全数字闭环系统经过一系列转换得到,则标度因数通过式(1)计算获得。与标度因数误差 ΔK_T 有关的光纤敏感线圈的面积 S 和光源的平均波长 $\bar{\lambda}$ 变化可以表示为

$$\Delta K_T = \left[\frac{\Delta S(T)}{S} - \frac{\Delta \bar{\lambda}(T)}{\bar{\lambda}} \right] \frac{8\pi S}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (2)$$

其中, T 表示温度, $\Delta S(T)$ 和 $\Delta \bar{\lambda}(T)$ 分别表示光纤环面积和波长随温度的变化量。考虑到硅的热膨胀性,在变温条件下,光纤敏感线圈面积 S 随温度的变化率约有几 ppm/°C(ppm 为 10^{-6}),是其周长 L 随温度变化的 2 倍。在实际变温环境中,聚合物涂层的膨胀会使光纤处于拉伸应力状态下,因此光纤敏感线圈存在额外的长度增加。对于 80/165 μm 的熊猫型保偏光纤,光纤长度的总变化率约为 4~5 ppm/°C,则光纤敏感线圈面积的温度相关性可以表示为

$$\frac{\Delta S}{S \cdot \Delta T} = \frac{2\Delta L}{L \cdot \Delta T} = 8 \sim 10 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \quad (3)$$

式(3)表明,由于光纤敏感线圈面积的变化量 ΔS 与温度的变化量 ΔT 呈正相关变化,因此,在高低温恶劣环境下,根据式(2)可知,由光纤敏感线圈面积变化引起的标度因数误差可以通过一个平均波长同样随温度正相关的光源来补偿,并预测当光源随温度的正相关变化量与光纤敏感线圈面积的温度系数大小相等时,具有完全抵消光纤敏感线圈面积变化引起的标度因数误差的潜力。

1.2 ED-SFS 结构设计

本文设计的 ED-SFS 由电路部分和光路部分组成,其中电路结构图如图 1 所示。电路部分由系统控制模块、电源模块、温度控制模块、泵浦激光二极管(LD)驱动模块和反馈控制模块组成。电源模块是整个电路部分正常工作的基础,系统控制模块产生控制信号来维持温控模块与 LD 驱动模块的正常工作,温度控制模块为 LD 驱动模块的正常工作提供保证,LD 驱动模块控制泵浦源输出 980 nm 的泵浦光,反馈控制模块采用比例积分微分(PID)控制方案来控制光源功率的稳定^[13]。

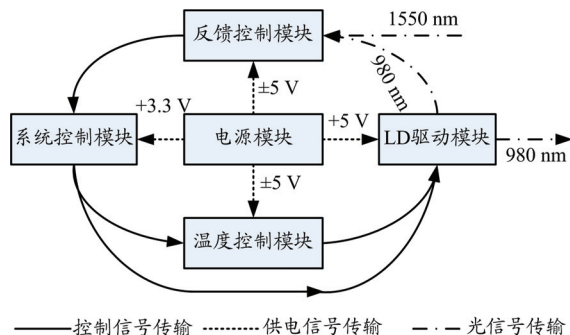


图 1 ED-SFS 电路结构图

考虑到光源平均波长的稳定性、光谱宽度和高光电转换效率的需要,本文设计了单极双程后向光路结构的 ED-SFS,其光路结构图如图 2 所示,该结构利用铒离子产生的双向自发辐射具有较高的光电转换效率。泵浦源为 1 个 980 nm 的 LD,其峰值波长和输出

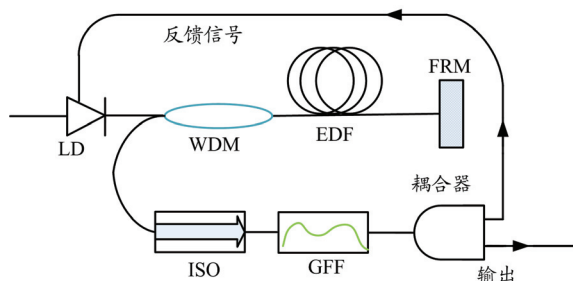


图 2 ED-SFS 的光路结构图

功率分别为 974.6 nm 和 60 mW。LD 发出中心波长为 974 nm 的泵浦光,通过 1 个 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)与一段 18.6 m 的单模掺铒光纤(EDF)连接。在 EDF 中传播的泵浦光被 EDF 纤芯中掺杂的铒离子吸收后发生自发辐射放大现象,并产生前后 2 个方向的 1550 nm 超荧光。将法拉第旋转镜(FRM)放置在 EDF 的尾端,目的是使泵浦后的 1550 nm 光再次通过 EDF 时进行二次泵浦,增加光源的转换效率。另外,FRM 还可以减小甚至消除由于外界扰动引起的偏振态波动和一些不利的偏振效应,提高 ED-SFS 的平均波长振动稳定性。

对于单级双程后向光路结构的 ED-SFS,在其输出端必须加一个光隔离器(ISO),这样不仅可以防止光源内部形成激光,更重要的是 ISO 可以消除高精度 FOG 反馈信号引起的光源不稳定性。增益平坦滤波器(GFF)作为 EDF 光源中的一个无源光器件,对光源光谱的输出起着至关重要的作用,因此将 GFF 熔接到 ISO 的输出端以平坦输出光谱。由于 GFF 的制作工艺和封装工艺的差异,GFF 可以分为电解质薄膜滤光片(EMF)类型和啁啾光栅滤波器(CGF)类型,不同类型的滤波器熔接到光路系统中,在相同的温度变化历程下,光源会呈现出不同的平均波长温度相关性变化^[14-15]。

2 实验过程与结果

2.1 实验过程

在进行光源和陀螺的变温实验之前,需要对光源进行常温性能测试,正相关 ED-SFS(PT-EDSFS)和负相关 ED-SFS(NT-EDSFS)在室温隔振条件下的输出光谱非常相似,其谱宽可用每个波长点功率的加权平均形式来表示,即

$$\Delta\lambda = \left[\sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \Delta\lambda_i \right]^2 / \sum_{i=1}^n P^2(\lambda_i) \Delta\lambda_i \quad (4)$$

其中, λ_i 为第 i 个离散间隔 $\Delta\lambda_i$ 的中心位置, $P(\lambda_i)$ 为波长在 λ_i 处测得的功率谱密度。通过计算可以得到谱宽约为 38 nm,平均波长约为 1550 nm,输出功率约为 10 mW 的 PT-EDSFS 和 NT-EDSFS,满足高精度 FOG 用光源常温性能指标要求,可以进行后续的温度补偿实验研究。

在标度因数误差温度补偿实验中,由于光纤敏感线圈内部温度变化的连续性,设置温箱变化历程为线性变化,实验过程中的温度变化如图 3 所示。初始温度为 +25 ℃,设置温度从 -40~+60 ℃ 变化,升温过程和降温过程的变温速率为 1 ℃/min。在最高温度点(+60 ℃)

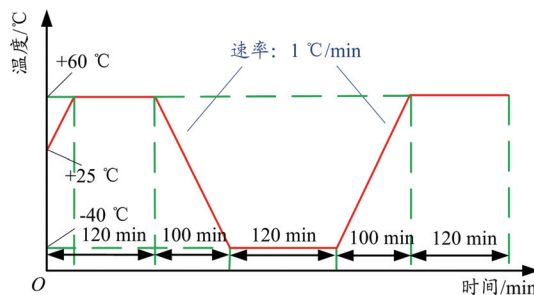


图3 实验过程中的温度变化

和最低温度点(-40 ℃)都保持 2 h,以确保光源和光纤敏感线圈内外温度的一致性。

实验时,PT-EDSFS 和 NT-EDSFS 分别被放置在高低温温箱内,光源系统采用+5 V 外部直流电源供电,通过美国 Advantest 公司型号 Q8384 光谱分析仪采集 ED-SFS 的输出光谱,设置光谱仪的波长范围为 1520~1570 nm,波长分辨率为 0.1 nm,通过一个通用串行总线连接到外部计算机上,实现光谱数据的实时采集以方便后续的数据处理。

为了比较不同温度相关性光源引起的 FOG 标度因数误差的差异,本文将 2 个不同温度相关性的光源分别安装固定在陀螺顶部进行标度因数温度测试,实验装置如图 4 所示。将陀螺系统以 Z 轴朝天的方向放入带有隔振单轴转台的温箱内,设置转台转动速度为 10°/s^[16-17],以防陀螺转动时引起的微小位置误差。FOG 的数据线与供电线通过单轴转台上的连接器引出,该连接器负责转台转动时与外部的连通,传输 FOG 数据信息与电信号。FOG 所需的+24 V 电压通过外部 220 V 标准电压转换提供,光源所需的+5 V 供电电压由 FOG 电路板上的电压转换模块得到。FOG 数据采集线的另一端连接到高速隔离转换器的输入端,该转换器将 FOG 的数据信息发送到计算机,以便进行后续的数据处理。

为了进一步验证 PT-EDSFS 可以有效减少或消除 FOG 光纤线圈温度变化引起的标度因数不稳定,本文对比了 NT-EDSFS 的陀螺测试结果,并且任选一款光

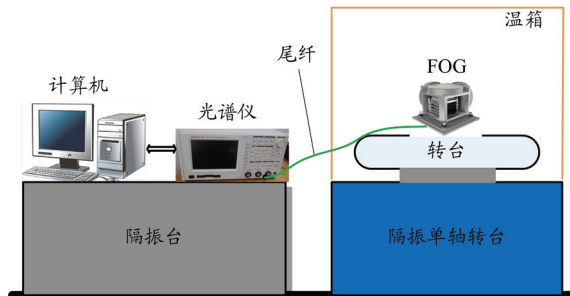


图4 实验装置图

张恩康, 张红伟: 利用光源温度特性提高直升机用光纤惯导性能的方法

源(下文用 PT/NT-EDSFS 表示)将其置于温箱外(处于室温条件下), 而 FOG 仍置于温箱内(光纤敏感线圈处于变温条件下)进行陀螺变温测试, 实验方案如图 5 所示。

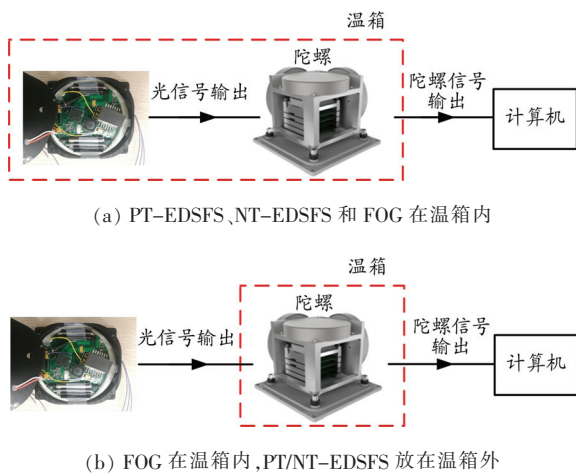


图 5 附加实验方案图

2.2 实验结果与分析

变温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的条件下, 光源平均波长随时间的变化如图 6 所示。对比图 3 和图 6 可以看出, 在变温过程中, PT-EDSFS 呈现出随温度正相关变化的趋势, $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度内平均波长变化率为 243 ppm , 其原因是在升温过程中, CGF 的中心波长朝长波长方向移动^[18-19], 在降温过程中朝短波长方向移动; 相同温度条件下, NT-EDSFS 表现出与温度变化相反的变化趋势^[20-22], $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度内的平均波长变化率为 238 ppm , 其原因是温度变化时, EMF 的中心波长变化与 CGF 相反。这表明在变温条件下, 只有 PT-EDSFS 可以有效补偿由光纤敏感线圈引起的标度因数误差。另外, 在 PT/NT-EDSFS 处于常温条件时, 其在 10 h 测试时间的平均波长稳定性非常好, 平均波长变化率只有 2.4 ppm , 表明实验中光源平均波长变化大小都满足高精度

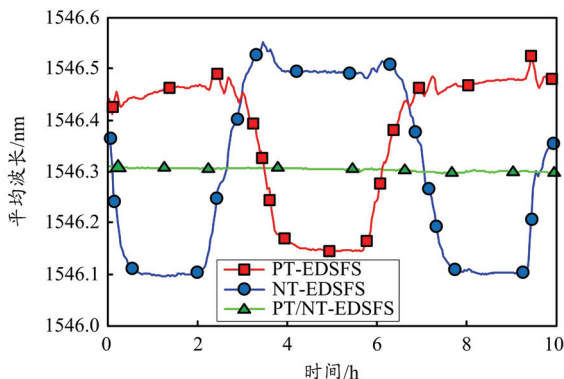


图 6 变温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的条件下, 光源平均波长随时间的变化

FOG 对光源参数的需求。光源的平均波长 $\bar{\lambda}$ 和其稳定性 $\bar{\lambda}_{\text{SB}}$ 分别表示为

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \lambda_i / \sum_{i=1}^n P(\lambda_i) \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{SB}} = 2(\bar{\lambda}_{\text{MAX}} - \bar{\lambda}_{\text{MIN}}) / (\bar{\lambda}_{\text{MAX}} + \bar{\lambda}_{\text{MIN}}) \quad (6)$$

其中, $P(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 处的光功率, $\bar{\lambda}_{\text{MAX}}$ ($\bar{\lambda}_{\text{MIN}}$) 为最大(最小)平均波长。

标度因数随时间的变化曲线如图 7 所示。对比图 3 和图 7 可以看出, 图 7 中的所有曲线与温度均呈正相关变化, 这是由于光纤敏感线圈对温度的敏感程度要远大于光源平均波长对温度的敏感程度。当 PT-EDSFS 处于变温条件下, 标度因数同时受 FOG 光纤敏感线圈和光源平均波长稳定性的影响, 式(2)括号内左边部分与括号右边部分符号相同, 可以相互抵消并使标度因数变化量降低; 当 NT-EDSFS 处于温度变化条件下时, 式(2)括号内左边部分与右边部分符号相反, 使标度因数变化量增加, 表现出明显的标度因数误差补偿效果。另外, 当 PT-EDSFS 处于室温条件时, 陀螺标度因数只受光纤敏感线圈温度影响, 即式(2)括号内右边部分光源平均波长随温度的变化对陀螺标度因数误差的影响可以近似为 0。

不同温度条件下的标度因数误差如表 1 所示。可

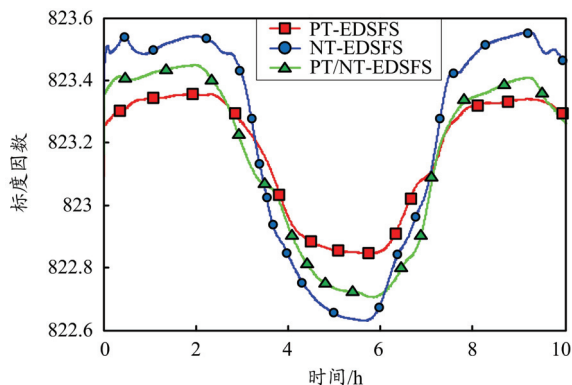


图 7 变温速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的条件下, FOG 标度因数随时间的变化

表 1 不同温度条件下的标度因数误差

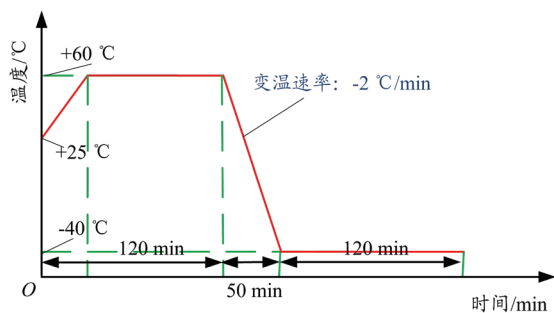
温度条件	标度因数误差
FOG 带 NT-EDSFS: $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	1100 ppm
FOG: $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$; PT-EDSFS: $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$	900 ppm
FOG 带 PT-EDSFS: $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	620 ppm

以看出,处于变温过程中,带 PT-EDSFS 的 FOG 标度因数误差比带 NT-EDSFS 的 FOG 小 480ppm, 甚至比平均波长几乎不变化时(PT-EDSFS 处于室温条件下)的 FOG 的标度因数误差小 280ppm。这表明 PT-EDSFS 可以补偿由光纤敏感线圈引起的标度因数误差,补偿后的标度因数要远优于补偿前。FOG 的标度因数稳定性 ΔK 为

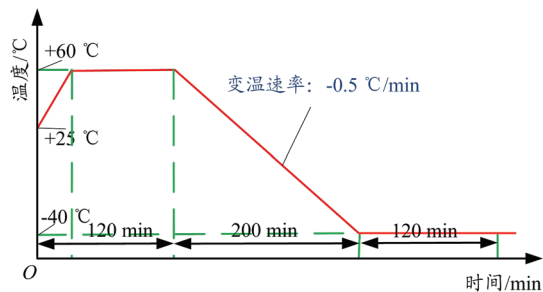
$$\Delta K = \frac{2(K_{\text{MAX}} - K_{\text{MIN}})}{K_{\text{MAX}} + K_{\text{MIN}}} \quad (7)$$

其中, K_{MAX} 、 K_{MIN} 分别为测量到的最大、最小标度因数。

为了进一步验证 PT-EDSFS 的补偿效果,本文通过实验测试了 2 种不同变温情况:快速降温和慢速降温,2 个实验的变温过程如图 8 所示。



(a) 变温速率为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (快速降温)

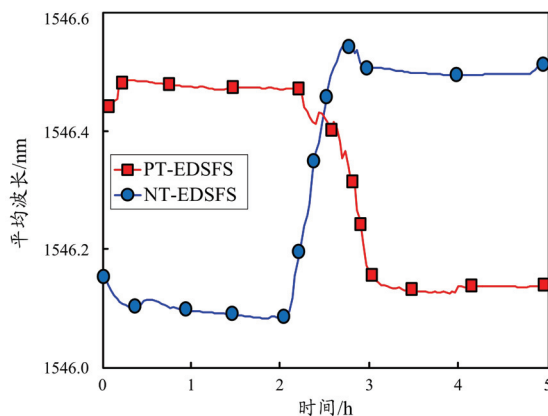


(b) 变温速率为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (慢速降温)

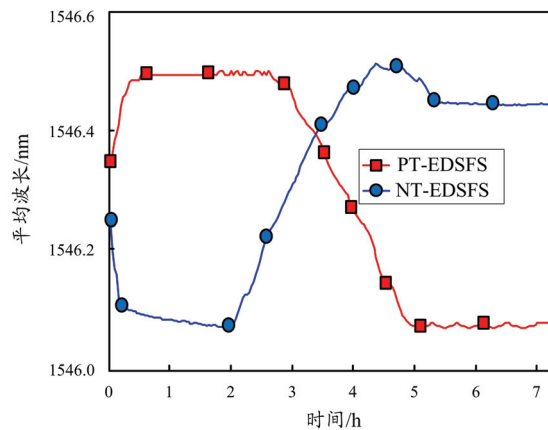
图 8 改变变温速率后实验中的温度变化过程

改变变温速度后,ED-SFS 的平均波长变化如图 9 所示。对比图 8 和图 9 可以看出,无论是快速降温还是慢速降温,PT-EDSFS 的平均波长始终随温度呈正相关变化,NT-EDSFS 的平均波长始终随温度呈负相关变化,这验证了光源温度相关性的重复性。另外,2 种光源的平均波长稳定性不仅没有受变温速率的影响,其在百摄氏度范围内的平均波长热稳定性差别也不大,始终满足 FOG 对光源性能要求。

改变变温速度后,标度因数随时间的变化曲线如图 10 所示。可以看出,无论是快速降温还是慢速降温,无论与光源是正相关变化还是负相关变化,标度



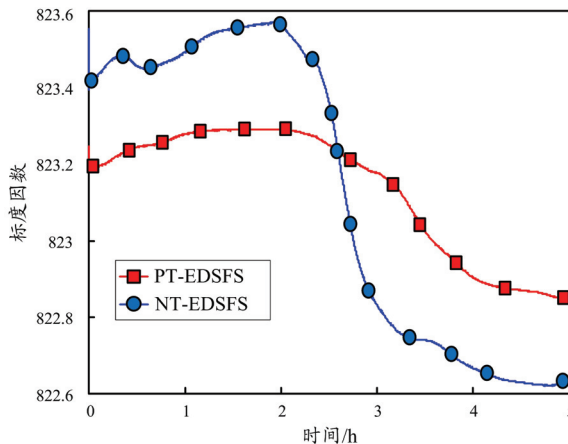
(a) 变温速率为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$



(b) 变温速率为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

图 9 改变变温速率后,ED-SFS 的平均波长随时间的变化

因数始终随温度呈正相关变化,这进一步验证了光纤敏感线圈对温度的敏感程度要大于光源平均波长对温度的敏感程度。另外,带 PT-EDSFS 的 FOG 标度因数变化量要小于带 NT-EDSFS 的 FOG 标度因数变化量。综上理论分析和实验验证表明,不论变温速率如何,PT-EDSFS 确实能补偿光纤敏感线圈导致的标度因数误差。



(a) 变温速率为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

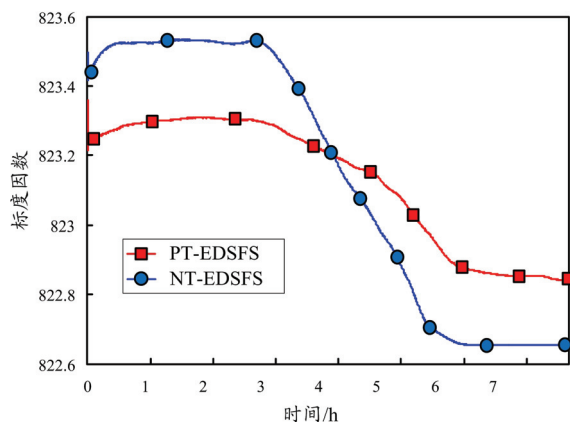
(b) 变温速率为 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

图 10 改变变温速率后, ED-SFS 的标度因数随时间的变化

3 结束语

本文首先分析了正相关光源对 FOG 标度因数的补偿原理, 随后利用光源光路结构中平坦器不同的温度特性设计了平均波长随温度呈正相关变化的光源, 并结合 FOG 进行实验验证。实验结果表明, 本文提出的 PT-EDSFS 能有效补偿由于光纤敏感线圈温度变化导致的 FOG 标度因数线性误差(光纤敏感线圈温度补偿前), 提高了 FOG 标度因数的温度稳定性。预测若将 PT-EDSFS 的平均波长变化量做到与光纤敏感线圈的温度系数变化量接近时, 具有完全补偿敏感线圈温度变化引起的标度因数误差的潜力, 对 FOG 的高精度发展和直升机用光纤惯导器件的研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] EZEKIEL S, BALSAMO S R. Passive ring resonator laser gyroscope[J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(9): 478–480.
- [2] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope: achievement and perspective [J]. Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(4): 223–226.
- [3] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19 (6pt.B): 828–832.
- [4] OU P, CAO B, ZHANG C X, et al. Er-doped superfluorescent fibre source with enhanced mean-wavelength stability using chirped fibre grating [J]. Electronics Letters, 2008, 44(3): 187–189.
- [5] GUILLAUMOND D, MEUNIER J P. Comparison of two flattening techniques on a double-pass erbium-doped superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 7(1): 17–21.
- [6] BARNARD C, MYSLINSKI P, et al. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 30(8): 1817–1830.
- [7] FALQUIER D G, DIGONNET M J F, SHAW H J. A polarization-stable Er-doped superfluorescent fiber source including a Faraday rotator mirror [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(11): 1465–1467.
- [8] FALQUIER D G, DIGONNET M J F, SHAW H J. A depolarized Er-doped superfluorescent fiber source with improved long-term polarization stability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(1): 25–27.
- [9] PARK H G, DIGONNET M, KINO G. Er-doped superfluorescent fiber source with a ± 0.5 -ppm long-term mean-wavelength stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3427–3433.
- [10] SEO M S, KIM T J, YUN S C, et al. Polarisation-scrambled Er-doped superfluorescent fibre source with improved mean-wavelength stability[J]. Electronics Letters, 2006, 42(11): 621–623.
- [11] WANG A. High stability Er-doped superfluorescent fiber source improved by incorporating bandpass filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(4): 227–229.
- [12] YE T, YANG Y C, YONG L U, et al. Research on gaussian ASE light sources[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(2): 87–91.
- [13] LI Z W, XU J W, CHEN G H, et al. Design and application of PID temperature control experiment platform [J]. Education Teaching Forum, 2018, (18): 277–278.
- [14] ZHANG L, CHEN J, GAO J, et al. Design of driving power and temperature control system for high power semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1005003-1–1005003-8.
- [15] WEN S C, WANG M, XIE J, et al. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser diode[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(4): 1–6.
- [16] CUI L, ZHANG Y R, ZHANG D W, et al. Research on the temperature characteristic of magnetic sensor in the magnetic drift compensation fiber-optic gyroscope[J]. Optik, 2018, 172: 91–96.
- [17] YAO J J, WANG L, CHEN X, et al. Bilinear interpolation compensation model for scale factor of high-dynamic range FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(3): 400–404.
- [18] HU Y, WAN S, SHI J, et al. Research on high resolution fiber Bragg grating sensing technology based on high speed parallel sampling[J]. Optics Communications, 2019, 435: 126–128.
- [19] CHENG J Q, HE J C. Quintuple-wavelength erbium-doped fiber laser based on chirped fiber grating [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (12): 1496–1499.
- [20] MALIK W A, SHETA A A, ELSHAFIEY I. A 1.8 GHz wideband high power amplifier with flat gain response by exploiting microstrip high-pass-filter [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2018, 60(3): 765–769.
- [21] LI S, WU T, ZHANG L, et al. Optimization of erbium-doped fiber length based on variable gain coefficient in femtosecond pulse amplification system [C]//Optics engineering editorial department. Proceedings of Fifth International Symposium on Laser Interaction with Matter. Changsha: Optics engineering editorial department, 2019: 142–146.
- [22] FERESHTEH M, SHARIFEH S, MOHAMMAD T, et al. Novelty design in gain flattening filter of ASE source based on fat ultra-long period fiber grating[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(3): 243–248.