

基于TS-DFT的温度和应变快速监测系统

李为¹, 钟世泰¹, 刘墨曦², 徐朝玉², 吴志超², 黄田野²

(1. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523000;

2. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 架空输电线路的温度和应变实时监测对于安全稳定的电力传输具有重要意义, 而传统的电类传感器难以适用于超长距离传输和严峻的自然环境(例如雷击、高温和覆冰等)。光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)作为一种典型的无源光学传感器具有抗电磁干扰、可准分布式测量和多维复用等特点。为了解决电类传感器不适用的问题, 提出了一种可用于输电线路实时监测的快速FBG温度和应变传感方法。该方法以脉冲光纤激光器为光源, 利用时域拉伸色散傅里叶变换(time-domain stretch dispersive fourier transform, TS-DFT)技术将FBG的波长偏移映射到时域, 实现实时解调的同时极大地提升了传感速率。实验测得温度和应变的时域灵敏度分别为12.92 ps/°C和0.64 ps/ $\mu\epsilon$, 传感系统的检测速率达到了42.2 MHz。所提出的传感方案有望为超长距离架空输电线路故障检测提供支持。

关键词: 电缆; 光纤布拉格光栅; 时域拉伸色散傅里叶变换; 监测

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0126-05

Temperature and Strain Rapid Monitoring System Based on TS-DFT

LI Wei¹, ZHONG Shi-tai¹, LIU Mo-xi², XU Chao-yu², WU Zhi-chao², HUANG Tian-ye²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Dongguan 523000 China;

2. China University of Geosciences (Wuhan) School of Mechanical Engineering and Electronic Information, Wuhan 430074 China)

Abstract: Real-time monitoring of temperature and strain of overhead transmission lines is of great significance for safe and stable power transmission. However, traditional electrical sensors cannot apply to ultra-long-haul transmission and severe natural environment (e.g., lightning, high temperature and icing, etc.). As a typical passive optical sensor, fiber bragg grating (FBG) has the characteristics of anti-electromagnetic interference, quasi distributed measurement and multi-dimensional multiplexing. To solve the problem that electrical sensors are not applicable. This paper a fast FBG temperature and strain sensing method. This method utilizes the pulsed fiber laser as the light source and the time-domain stretch dispersive fourier transform (TS-DFT) technology to map the wavelength shift of FBG into the time domain, which can simultaneously realize the real-time demodulation and the great improvement of sensing rate. The time domain sensitivities of temperature and strain measured in the experiment are 12.92 ps/°C and 0.64 ps/ $\mu\epsilon$, respectively. The detection rate of the sensing system reaches 42.2 MHz. The proposed sensing scheme is expected to provide support for fault detection of ultra-long-haul overhead transmission lines.

Keywords: cable; fiber bragg grating; time-domain stretched dispersive fourier transform; monitoring

0 引言

近年来的研究分析数据表明我国电力设备的发热故障频率增加, 架空输电线路的覆冰灾害也在不断加剧, 这已经严重影响了我国电力设备的安全运行^[1]。电力设备发热已经成为电力系统发生故障的主要原因^[2], 并严重影响了电力系统的稳定运行效率^[3]。电力设备的热效应是许多故障发生的前兆, 严重的过热故障将给电力行业带来巨大的利润损失^[4], 因此只有实施电力设备和输电线路的实时温度监测, 才能保障电力设备和系统的正常运行^[5]。

在我国北方地区, 冬季较长, 冰雪天气时常发生, 而架空输电线路覆冰灾害将给输电线路安全和人民的生产生活造成重大影响^[6]。因此, 开展架空输电线路的应变实时监测研究, 对掌握覆冰状态下线路的受力情况、线路融冰等都具有十分重要的意义^[7-8]。

光纤传感具有绝缘性能好, 体积小, 耐高温高压和抗电磁干扰等优势, 特别适用于输电线路或电网设备的参数测量^[1]。此外, 光纤的频率响应度较高, 也可同时用于电网的高速数据通信。其中, 光纤布拉格光栅(FBG)能够将温度和应变等参数的变化转换成光栅反射波长位置的

变化,目前已被广泛应用于电力参数监测系统中^[9]。传统的FBG传感多采用光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)进行波长测量实现被测信号的解调,但OSA的波长扫描速度低,无法实现温度或应变等信号的实时监测^[10]。因此,开展高灵敏度和超快检测速率的光纤传感器的研究,对光纤传感器的应用及电力参数的实时监测均具有重要意义。本文基于超短脉冲锁模光纤激光器(mode-locked fiber lasers, MLL)和TS-DFT技术提出了一种FBG传感器的快速解调方法,并实现了应变和温度快速检测。

1 传感解调原理

FBG可将其中传输的一个导模和与之相反方向传输的导模耦合而形成窄带反射^[11],峰值反射的布拉格波长(λ_B)为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为模式的有效折射率, Λ 为光栅周期。施加于FBG的温度或应变会造成FBG的 n_{eff} 和 Λ 发生改变,从而引起 λ_B 的偏移,这一变化关系可以表示如下。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_t + \xi_t)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon] \quad (2)$$

式中, ΔT 是温度变化量, α_t 是光纤的热膨胀系数, ξ_t 是光纤的热光系数, ε 是施加在FBG上的轴向应变, p_e 是有效应变光学常数^[12]。

当分别考虑温度、应变对于 λ_B 的影响时,温度、应变与 λ_B 的关系分别如下:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_t + \xi_t)\Delta T] \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_t + \xi_t)\Delta T] |D| L \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知温度、应变和 λ_B 均成线性关系。通过TS-DFT技术将 λ_B 的偏移映射至时域,其映射关系如下所示:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon |D| L \quad (6)$$

式(5)、式(6)中, ΔT 为 λ_B 经过时域拉伸后对应的时域单射光谱时间偏移量, $|D|$ 为时域拉伸色散元件的群速度色散值, L 为色散元件的长度^[13]。

基于TS-DFT技术的FBG传感系统,主要由MLL、FBG阵列(该阵列中具有不同布拉格波长的多个FBG)和TS-DFT光谱测量装置(群速色散介质为高色散光纤)组成。激光器产生的具有特定波长范围的超短光脉冲通过FBG阵列后,光谱中的FBG波长分量将被反射,且这些分量的波长与FBG阵列周围的温度或施加的应变呈线性关系^[11]。利用TS-DFT技术可将透射光谱中与温度及应变线性相关的FBG波长偏移映射为时域上的时间偏移。此时,如果利用光谱中不同的波长特征作为基准,便可推算出温度和应变的测量值。例如,通过将Kelly边带波长作为参考可以解算出温度变化信息,这是因为Kelly边带波长由激光器腔内参数决定,施加在FBG上的温度或应变不会改变激光器的腔内参数;通过相邻FBG波长作为参考,可以解算出应变信息,这是因为传感器FBG和参考FBG在同一介质中,温度引起的波长偏移是相同的,两个波长偏移之间的差异便是应变测量结果。

2 基于TS-DFT技术的温度和应变检测装置

图1为温度和应变快速检测装置原理图,该装置的光源部分采用稳定性较好的全保偏光纤激光器。标准单模光纤上制备了中心波长分别为1 569.05 nm(FBG1)、1 571.3 nm(FBG2)、1 574.91 nm(FBG3)和1 576.99 nm(FBG4)的4个10 mm长的FBG,四个FBG采用串联的方式。探测得到的信号在耦合器处被分为95:5的两路光场,其中5%用于光谱探测,95%用于时域信号探测。在温度检测时,为了提高时间灵敏度并降低温度检测实验过程中的示波器(oscilloscope, OSC)采样速率和带宽要求,TS-DFT中的散射光纤长度为10 km色散补偿光纤(disprersion compensating fiber, DCF)。在应变试验时,色散光纤采用30 km长的单模光纤(single-mode fiber, SMF),以降低实际应变检测系统的成本。高速(power dilivery, PD)和OSC用于采集时域中的单射光谱。用于检测FBG平均光谱的OSA的最小波长分辨率为0.02 nm。在实际操作中,采用PD和一个单通道的高速数据采集板代替OSA检测,便可实现温度和应变数据的高速采集。

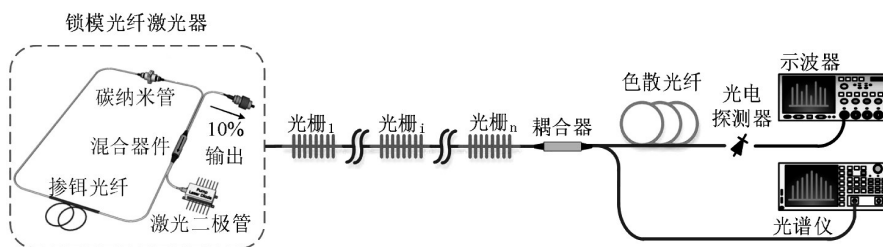


图1 基于TS-DFT技术的快速光纤布拉格光栅温度和应变检测装置

3 实验结果

3.1 温度传感实验

图2展示了包含FBG阵列和不包含FBG阵列的时域单射光谱,可以发现包含FBG阵列的时域单射光谱存在对应的凹陷,该凹陷的时间漂移量可用于检测温度和应变的变化值。

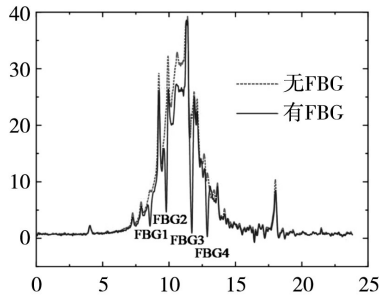
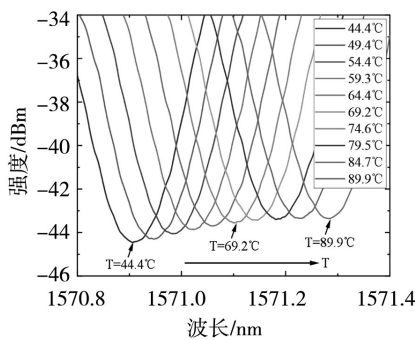
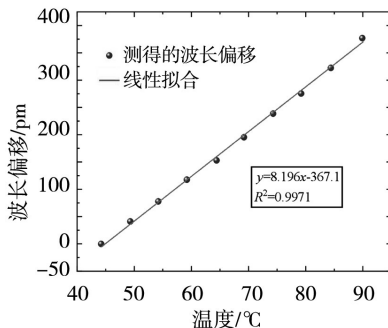


图2 OSC测得的无FBG阵列和有FBG阵列的时域单射光谱

利用温控台将FBG2环境温度从44.4℃开始至89.9℃,步长设置为5℃。OSA测得的FBG2在不同温度下的透射光谱及其FBG波长偏移量的线性拟合结果分别如图3所示。由图3(a)可知,FBG2波长随温度升高存在红移现象,且为线性关系。FBG2的 λ_B 线性地右移了约400 pm,对应波长温度灵敏度为8.196 pm/℃。图3(b)为FBG2长随温度变化的线性拟合结果,其拟合结果的 R^2 值分别高达0.9971,这表明FBG波长随温度的变化具有极高的线性度。



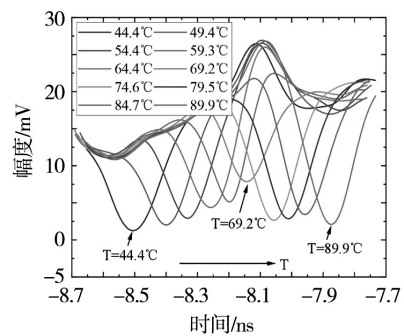
(a) 频域光谱



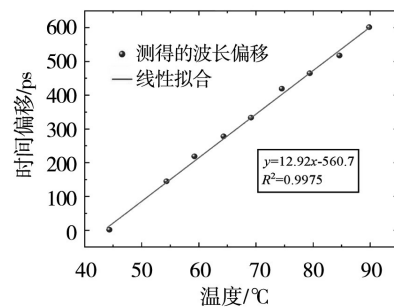
(b) 波长偏移及其线性拟合

图3 OSA测得的FBG2在不同温度下的光谱和波长偏移

利用TS-DFT技术采集的FBG2在不同温度下的时域单射光谱如图4所示。为了解算FBG2随温度的时间偏移值,图4(a)利用光谱左侧的Kelly边带旁瓣位置对时域光谱进行了对齐操作。如图4(a)所示,FBG2的时域单射光谱中的布拉格波长位置随温度线性红移,变化规律同上述OSA测量结果保持高度一致。在45℃的温度变化范围内,FBG2时间偏差约为600 ps,其对应的时间偏移量和温度变化之间具有较好的线性关系,温度灵敏度为12.92 ps/℃。将FBG2单帧光谱中随温度变化的时间偏移值进行数据处理和数据拟合,可以得到图4(b)所示线性拟合结果,其拟合得到的 R^2 值分别为0.9975。对比发现时域拟合结果与频域拟合基本一致,存在的微小差异可能由光纤的色散、非线性、激光波长漂移等因素引起。在实际应用时,该差异可以通过补偿算法进行校正。



(a) 时域光谱



(b) 时间偏移量及其线性拟合

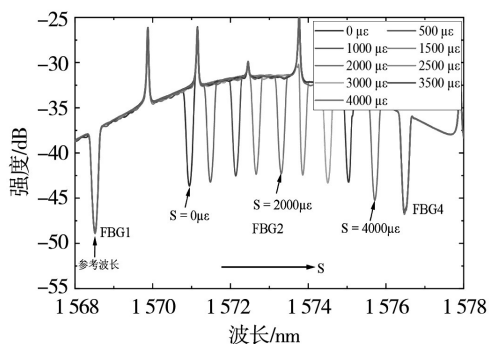
图4 OSC测的FBG2在不同温度下的时域光谱及时间偏移

3.2 应变传感实验

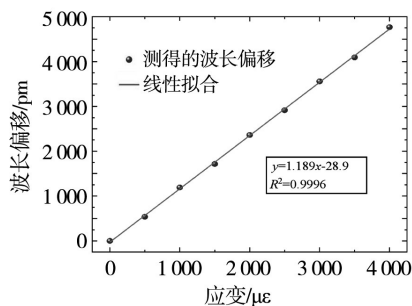
将总长度L为50 cm的包含FBG2的单模光纤两端固定在位移平台上,随后移动其中一个平台施加应变,使得应变从0 $\mu\epsilon$ 开始以500 $\mu\epsilon$ 为步长增加到4 000 $\mu\epsilon$,FBG1和FBG4作为参考光栅。

OSA测得的布拉格波长偏移结果如图5所示,从图5(a)可以看出,当应变从0 $\mu\epsilon$ 增加到4 000 $\mu\epsilon$ 时,FBG2的布拉格波长线性偏移了约4.8 nm,其对应的应变灵敏度约为1.189 pm/ $\mu\epsilon$,同时发现作为应变测量参考的FBG1和FBG4的波长几乎不变,这表明环境温度没有变化。FBG2

的 λ_B 在不同光纤应变值下的偏移量的线性拟合结果如图5(b)所示,其拟合得到的 R^2 值为0.9996,这表明FBG对应变的传感检测具有极高的线性度。

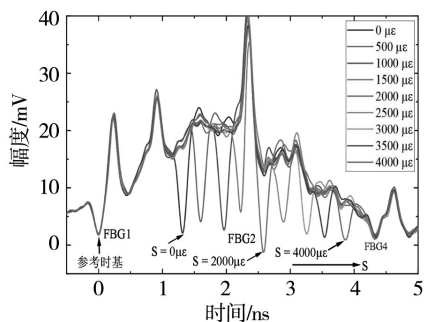


(a) 透射光谱

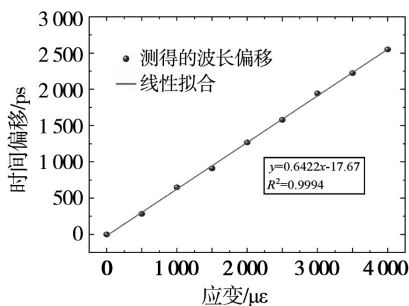


(b) 波长偏移量及其线性拟合

图5 OSA测得的FBG2在不同应变下的波长偏移及线性拟合



(a) 时域单帧光谱



(b) 时间偏移量及其线性拟合

图6 OSC测的FBG2在不同应变下的透射时域光谱及时间偏移

同样地,利用TS-DFT技术进行了与温度实验类似

的时域应变传感解算实验,结果如图6所示。时域应变传感解算实验通过将FBG3与FBG1的时域光谱对齐来消除温度对波长偏移的影响。图6(a)为不同应变值下对齐后的时域单射光谱,可以发现当应变从 $0\mu\epsilon$ 变化至 $4000\mu\epsilon$ 时,FBG2的布拉格波长时域位置红移了大约2.5 ns,且与应变量呈线性关系,而作为参考的FBG1和FBG4波长位置没有明显变化,这表明FBG2的波长偏移确实是由施加的应变引起。FBG2布拉格波长位置的时间偏移值及其线性拟合结果如图6(b)所示,其拟合结果的 R^2 值高达0.9994,对应的时间灵敏度约为 $0.6422\text{ ps}/\mu\epsilon$,这表明基于TS-DFT技术的FBG时域应变解调方法也具有较好的线性度和灵敏度。

3.3 FBG快速检测验证实验

相对于传统的OSA光谱测量和干涉型传感解调方法,基于TS-DFT技术的传感解调方法的最大的优点是能够实现信号的快速检测。为了验证其快速检测特性,利用两个位移台和一个压电致动器进行了动态应变检测实验。为了增加FBG的应变灵敏度,将用于固定FBG2的两个固定平移台之间的距离从50 cm减少到2.8 cm。用于拉伸光纤的位移台在压电致动器的带动下可以产生最大约 $20\mu\text{m}$ 的位移,此时这段光纤所对应的最大应变范围为0至 $714\mu\epsilon$ 。压电致动器在信号发生器和压电致动器驱动器的作用下,可产生周期性的形变,从而可将周期性的动态应变施加于FBG和单模光纤尾纤上。

图7展示了压电致动器形变频率设置为600 Hz时的动态应变实验结果。可以观察到,图7(a)和图7(b)中被施加周期性应变的FBG2的布拉格波长位置(光谱凹陷)存在明显的周期性振荡,该振荡波形与正弦波高度相似,而用作参考的FBG1和FBG4的布拉格波长位置保持稳定。图7(c)为算法提取到的FBG2布拉格波长位置的变化波形。值得注意的是,激光器所输出的光脉冲的周期为23.7 ns,因此图7(c)中的横坐标可以由腔周期转化为时间,以便分析应变的变化频率。分析发现,FBG2的应变波形频率为600 Hz,这与所加正弦波频率一致。同时,应变波形中除了由OSC量化精度和环境扰动引起的高频噪声以外,无明显波形失真。上述结果表明,以脉冲光纤激光器作为光源,并通过TS-DFT技术进行时域光谱解调的FBG传感器可以实现被测信号的快速解调。由于实验中所用压电致动器3 dB带宽为700 Hz,因此实验仅测量600 Hz时的应变变化。实际上,光纤光栅的反应速率非常高,因此本文所提出的基于TS-DFT技术的FBG传感快速解调方法仅取决于光纤激光器的重复频率,所以可以通过增加光纤激光器的重复频率来提高解调速度。

此外,图7(c)中波形数据显示最大 $714\mu\epsilon$ 应变值对

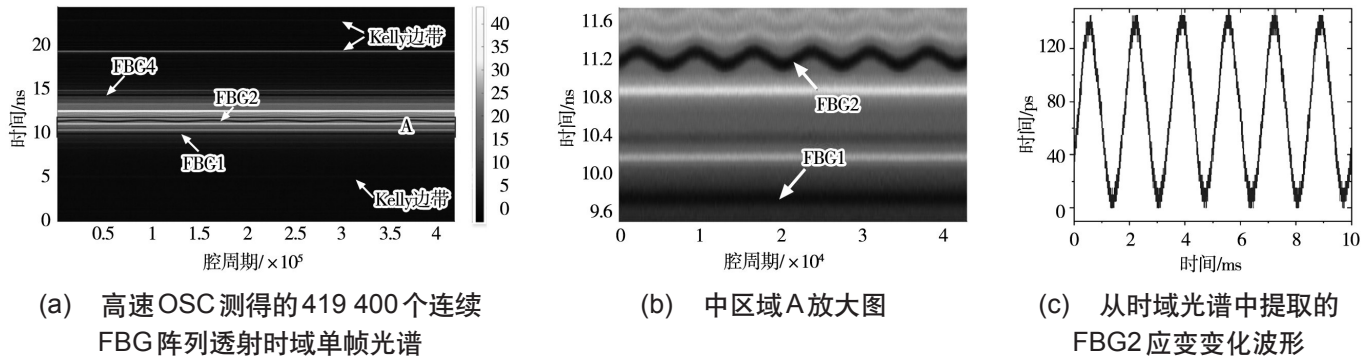


图7 动态应变测量实验结果

应的时间位移约为 140 ps, 计算得到的应变灵敏度约为 $0.2 \text{ ps}/\mu\epsilon$, 低于图 6 所示的实验结果。主要原因为 FBG 两端的应变、工作台的位移误差和压电致动器的形变等导致 FBG 实际形变长度小于 $20 \mu\text{m}$ 。

4 结束语

本文设计了基于 MLL 和 TS-DFT 技术的 FBG 温度和应变快速解调装置。紧凑型 MLL 和 TS-DFT 技术同时被用于实现 FBG 的温度和应变检测。在解调过程中, 可以通过不同的参考同时快速地解调温度和应变信息。最终获得的传感器温度灵敏度为 $12.92 \text{ ps}/^\circ\text{C}$, 应变灵敏度为 $0.6422 \text{ ps}/\mu\epsilon$, 解调速率为 42.2 MHz 。这对于实际的电力系统热故障的快速检测和高架杂物或者冰雪所引起的线路形变的快速检测具有重要应用意义。有望在保障供电网络稳定运行、工矿企业的安全生产等实际应用中取得重要突破。

参考文献:

- [1] 马国明, 王思涵, 秦炜淇, 等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3032-3047.
- [2] Wang Z D. Thermal Design and Cooling Performance Evaluation of Electronic Equipment Containing Power Electronic Devices[J]. International Journal of Heat and Technology, 2021, 39(2): 451-459.
- [3] 谷山强, 王海涛, 严碧武, 等. 基于示温涂料的输电线路金具发热故障诊断[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 186-189.
- [4] Zhang J, Huang L D, Chen T, et al. Simulation based analysis of electrical fire risks caused by poor electric contact between plug and receptacle[J]. Fire Safety Journal, 2021 (126): 103434.
- [5] 樊卓杨, 吴超, 王霞. 光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(10): 1-12.
- [6] Zou H L, Tang Y Q, Zhang S F, et al. Research on ice disaster risk of transmission line based on annual ice extremum[C]. 3rd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Changsha, China, 2019: 2476-2480.

[7] Chai Q, Luo Y, Ren J, et al. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids[J]. Optical Engineering, 2019, 58(7): 072007.

[8] 张乐, 周步祥, 王小红, 等. 导线覆冰监测系统的力学模型与预警功能优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 42-46.

[9] Yan Q Z, Zhou C M, Feng X B, et al. Galloping Vibration Monitoring of Overhead Transmission Lines by Chirped FBG Array[J]. Photonics Sensors, 2022, 12(3): 220310.

[10] Lei M, Zou W W, Li X, et al. Ultrafast FBG Interrogator Based on Time-Stretch Method[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 778-781.

[11] Singh A K, Berggren S, Zhu Y, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber Bragg grating embedded in a composite laminate[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(11): 115025.

[12] Reddy M V, Srimannarayana K, Apparao T V, et al. Design and development of high-temperature sensor using FBG[C]. Conference on Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications IX, 2015(9586): 958601.

[13] 王志, 贺瑞敬, 刘艳格. 时间拉伸色散傅里叶变换在被动锁模光纤激光器研究中的应用[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508002.

作者简介: 李为 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 通信工程。