

## 激光与光电子学进展

## 基于拍频解调的光纤激光温度传感系统

沈言霞, 宋书林, 童星星, 王浩威, 郭瑜\*

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214000

**摘要** 为了提高光纤激光器的温度灵敏度和数据完整性,提出了一种基于拍频解调的光纤激光温度传感系统。利用光纤激光谐振腔中的光纤布拉格光栅(FBG)进行温度传感,将FBG的波长变化依次转变为谐振腔内的波长变化和光纤激光器拍频信号的频移变化,大幅提高了系统的灵敏度。通过Python程序实现秒级数据自动采集及保存,提高了工作效率。用矩形框中心点位置法代替直接寻峰值法对温度信号进行解调,可避免频率抖动较大引起的误差。相比光学解调技术,该系统利用成熟的电学解调技术解调,无需昂贵的波长解调仪,降低了解调成本。实验结果表明,该系统具有较高的灵敏度和测量精度,平均灵敏度为74.087 kHz/°C,测量精度为 $0.47 \times 10^{-3}$  °C。

**关键词** 光纤光学; 温度传感器; 光纤布拉格光栅; 拍频解调; 中心点位置

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212771

## Fiber Laser Temperature Sensing System Based on Beat Frequency Demodulation

Shen Yanxia, Song Shulin, Tong Xingxing, Wang Haowei, Guo Yu\*

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000, Jiangsu, China

**Abstract** To improve the temperature sensitivity and data integrity of the fiber laser, a fiber laser temperature sensing system based on beat frequency demodulation is proposed. The fiber Bragg grating (FBG) in the fiber laser resonator is used for temperature sensing. The wavelength change of FBG is successively transformed into the wavelength change of the resonator and the frequency shift of the fiber laser beat frequency signal, which greatly improves the sensitivity of the system. The Python program is used to realize the second-time data automatic collection and saving, thus improving the working efficiency. The error caused by large frequency jitter can be avoided by demodulating the temperature signal through the rectangular frame center position method instead of direct peak value finding method. Compared with optical demodulation technology, the system uses mature electrical demodulation technology to demodulate instead of expensive wavelength demodulation instrument, reducing the cost of modulation. The experimental results show that the system has high sensitivity and measurement accuracy. The average sensitivity of the system is 74.087 kHz/°C. The measurement accuracy of the system is  $0.47 \times 10^{-3}$  °C.

**Key words** fiber optics; temperature sensor; fiber Bragg grating; beat frequency demodulation; center position

## 1 引言

温度是一个非常重要的物理参数,在日常生活<sup>[1-2]</sup>、工业生产<sup>[3-4]</sup>、生物医学<sup>[5-6]</sup>等领域都需要进行温度监测和精确控制。随着社会的进步,对温度传感器的性能要求越来越高。为了实现对温度的高精度测量,人们已经做了大量的研究工作,如热电偶测温<sup>[7]</sup>、热敏电阻测温<sup>[8]</sup>、红外线热成像测温<sup>[9]</sup>、声波测温<sup>[10]</sup>、光谱法测温<sup>[11]</sup>、荧光测温<sup>[12]</sup>以及最有研究潜力的光纤布

拉格光栅(FBG)测温<sup>[13]</sup>。

基于FBG的温度传感器具有抗电磁干扰能力强、体积小和成本低等优点,得到了人们的广泛关注。Lin等<sup>[14]</sup>基于光纤环形激光器设计了一种高灵敏的光纤温度传感器系统,在25~35 °C范围内的温度灵敏度为2 nm/°C,但该系统通过跟踪FBG波长偏移获取传感信息,需要昂贵的波长解调仪,解调成本较高。近年来,基于电学拍频解调的光纤激光器测温技术逐渐成为研究热点。Chang等<sup>[15]</sup>提出了一种用于分布式布里

收稿日期: 2021-10-20; 修回日期: 2021-11-25; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2022-01-05

通信作者: \*guoyu@jiangnan.edu.cn

测传感器拍频信号提取的卷积神经网络(BFSCNN)算法,实现了分布式光纤的温度和应变检测。Wang等<sup>[16]</sup>提出了一种具有复合腔光纤激光器的FBG传感器系统,复合腔光纤激光器产生的纵模相互叠加形成拍频信号的包络调制,但该系统不仅需要频谱仪,还需要光谱仪进行解调,增加了解调成本。Wang等<sup>[17]</sup>提出了一种基于光纤激光拍频和游标效应的Fabry-Perot(F-P)传感系统,F-P腔不仅是系统的传感部分,还是激光谐振腔的一个反射镜,激光腔输出的模式受到F-P腔反射带宽的限制,且传感部分的尺寸较大。周昱<sup>[18]</sup>提出了一种基于分布式布拉格反射(DBR)激光谐振腔结构的多纵模拍频光纤激光传感器,可实现应力和温度测量,应力和温度灵敏度分别为 $-0.49\text{ kHz}/\mu\text{e}$ 和 $-6.29\text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。该系统通过加热光纤激光谐振腔中的掺铒光纤改变谐振腔的长度,灵敏度不高且温度传感器体积较大。

本文提出并设计了一种基于拍频解调的光纤激光温度传感系统。该系统用DBR谐振腔中的FBG作为

传感元件,大幅提高了系统的传感灵敏度,减小了系统传感体积。用自动采集装置实现秒级数据的采集与保存,使采集数据具有完整性,同时又提高了工作效率。此外,使用矩形框中心点位置法代替直接寻峰值法对温度信号进行解调,避免了频率抖动较大时引起的误差问题。相比传统的光学解调,该系统利用成熟的电学解调技术降低了解调成本。

## 2 传感器的结构及工作原理

### 2.1 传感器装置图

基于拍频解调的多纵模光纤激光传感器测温系统结构如图1(a)所示。1480 nm泵浦光经过波分复用器(WDM)输入端发射到光纤激光腔中,其中,两个中心波长匹配的FBG作为激光器的腔镜,两个FBG之间用一段掺铒光纤(EDF)作为增益介质。当温度信号作用于谐振腔的FBG 2时,谐振腔中的光信号被调制,调制后的光信号反射通过波分复用器后到达光电探测器(PD),在PD上产生多个拍频信号(BFS),多个

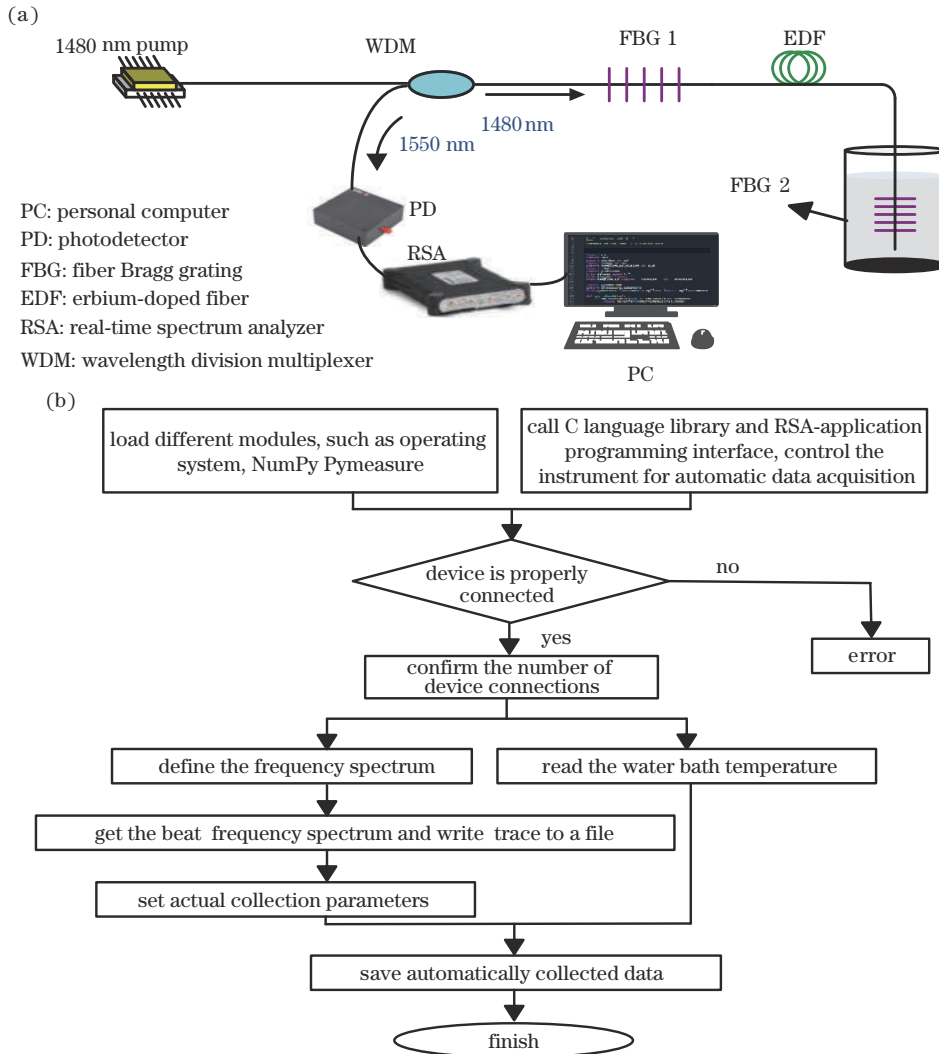


图1 多纵模光纤激光传感器测温系统。(a)测温系统;(b)数据自动采集过程

Fig. 1 Multi-longitudinal mode fiber laser sensor temperature measurement system. (a) Temperature measurement system; (b) automatic data acquisition process

拍频信号到达实时频谱分析仪(RSA)后,计算机(PC)的Python程序自动采集实时频谱分析仪中包含温度信号的拍频数据,数据自动采集过程如图1(b)所示。最后,采用矩形框中心点位置法代替直接寻峰法进行拍频解调得到温度信号,提高数据处理精度。

## 2.2 实验工作原理

当 1480 nm 泵浦光的功率足够大时,激光器的谐振腔内会产生很多等频率间隔的纵模,第  $m$  个纵模的波长可表示为

$$\lambda_m = 2nL/m, \quad (1)$$

式中: $n$ 为谐振腔内的有效折射率; $L$ 为整个激光器的有效腔长。由耦合波理论可知,当满足相位匹配的条件时,FBG的布拉格反射波长可表示为

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

式中: $n_{\text{eff}}$ 为芯层导模的有效折射率; $\Lambda$ 为FBG的栅距。激光谐振腔周围温度的变化主要是由FBG周围温度变化引起的,当外界温度变化时,FBG的中心波长也会发生变化。FBG的温度灵敏度系数<sup>[19]</sup>可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\left[\xi - \frac{n_{\text{eff}}^3}{2}(P_{11} + 2P_{12})\cdot\alpha + K\cdot\alpha\right] + \alpha, \quad (3)$$

式中: $T$ 为FBG的温度; $\xi$ 为FBG的折射率温度系数; $P_{11}$ 和 $P_{12}$ 为弹光效应的张量; $K$ 为波导效应导致的波长漂移灵敏度系数; $\alpha$ 为光纤热膨胀系数。在不考虑外界因素情况下,纯熔融的石英FBG的温度灵敏度系数本质上由材料折射率的温度系数决定,而波导效应和弹光效应不会对光栅的波长变化造成明显影响<sup>[19]</sup>,因此可将式(3)简化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \lambda_B\left(\frac{\xi}{n_{\text{eff}}} + \alpha\right). \quad (4)$$

当激光谐振腔周围的温度发生变化,即FBG周围温度发生变化时,激光器就会出现波长漂移,可表示为

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m\left(\frac{\xi}{n_{\text{eff}}} + \alpha\right)\Delta T. \quad (5)$$

传感器的拍频信号在PD上产生并由RSA检测,激光腔内任意两个模式之间产生的拍频信号<sup>[20]</sup>可表示为

$$f_N = f_p - f_q = \frac{c}{\lambda_p} - \frac{c}{\lambda_q} = \frac{N}{2nL}, \quad (6)$$

式中: $N = p - q$ 为拍信号的阶数(正整数), $p$ 和 $q$ 为激光模数; $f_p$ 为 $p$ 阶多纵模信号; $f_q$ 为 $q$ 阶多纵模信号; $\lambda_p$ 为 $p$ 阶纵模波长; $\lambda_q$ 为 $q$ 阶纵模波长; $c$ 为真空中的光速。将式(1)代入式(6),得到拍频信号的频率为

$$f_N = \frac{N}{2nL} = \frac{N}{m\lambda_m}. \quad (7)$$

当传感器检测温度变化时,拍频频移<sup>[21]</sup>可表示为

$$\Delta f_N = -\frac{N}{m\lambda_m} \cdot \frac{1}{\lambda_m} \frac{\Delta\lambda_m}{\Delta T} \cdot \Delta T, \quad (8)$$

将式(5)、式(7)代入式(8),得到

$$\Delta f_N = -f_N \cdot \left(\frac{\xi}{n_{\text{eff}}} + \alpha\right) \cdot \Delta T. \quad (9)$$

从式(9)可以发现,当温度升高(降低),即温度变化 $\Delta T > 0$ ( $\Delta T < 0$ )时,拍频频移为负(正),相应的拍频频率减小(增大)。通过监测布拉格波长移动引起的拍频变化,就能获得外界温度的变化情况,由式(6)可知,FBG对外界温度变化的灵敏度依赖于导模有效折射率的变化,且灵敏度大小与选取的频率大小有关,谐振腔越短,拍频频率越大。

实验中自动采集已选定的拍频信号,由于拍频信号由点数构成,在设定中心频率的带宽内每个点数与频率都一一对应,拍频谱第 $n$ 个点对应的频率 $f_n$ 可表示为

$$f_n = (f_c - X_{\text{BW}}/2) + (X_{\text{BW}}/P) \times n, \quad (10)$$

式中: $f_c$ 为设定的中心频率; $X_{\text{BW}}$ 为设定的频率带宽; $P$ 为构成带宽内拍频信号的点数。根据点数位置和频率的一一对应关系,使用矩形框中心点位置法代替直接寻峰值法进行温度信号传感解调,可实现相对准确的温度测量。

## 3 实验结果分析

实验中使用的EDF长度为0.6 m且在1532 nm处的吸收系数为37.8 dB/m,FBG 1的中心波长和3 dB带宽分别为1552.051 nm和0.221 nm,FBG 2的中心波长和3 dB带宽分别为1552.066 nm和0.224 nm,两个FBG的反射率均为93.69%。测得的谐振腔长为1.372 m,根据式(6)可知相邻纵模之间,即 $N=1$ 时的频率间隔为75.057 MHz。

在保持室温不变的情况下,用Python自动采集程序采集拍频信号数据。其中,自动采集程序设定采集频谱的中心频率为675.458 MHz,带宽为1 MHz时,采集4001个点,构成的拍频信号每个点的位置与频率刻度都一一对应,用于温度检测的拍频信号的中心频率为675.501 MHz,在设定的频谱范围内。每秒采集一次数据,图2为不同时刻采集的拍频信号。可以发现,在保持室温不变的情况下,采集的拍频信号大致相同,但在拍频信号中出现多个极大值,采用直接寻峰值法时容易造成频率波动较大,影响测量结果。

图3为寻找矩形框中心点位置的示意图。以功率大于-75 dBm小于-30 dBm的长度表示矩形框的长度,找出功率大于-75 dBm的所有点位置,并找出拍频信号中功率等于-75 dBm的两个点位置,这两个点之间的距离表示矩形框的宽度,两点之间的中心位置即为矩形框的中心位置。用矩形框中心点位置对应的频率变化代替峰值变化可提高精确度。矩形框的宽度可根据拍频信号确定,但中心点位置是唯一的,从而避免直接寻峰中一个峰值对应多个频率点或一个拍频中存在多个极大值的现象。

保持室内温度不变,2 h内采集到拍频信号中心点



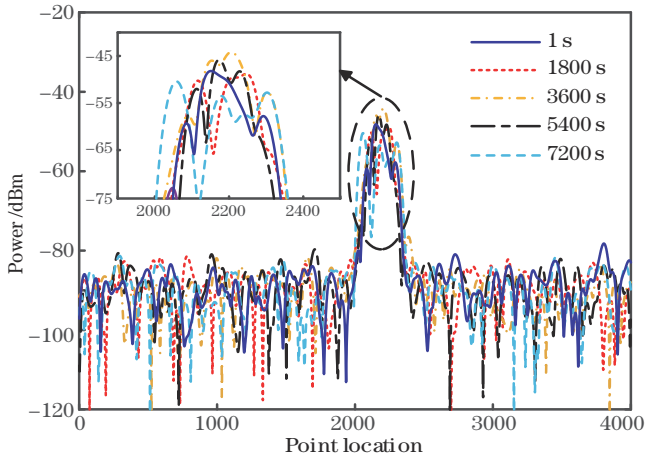


图 2 不同时刻采集的拍频信号

Fig. 2 Beat frequency signals collected at different time

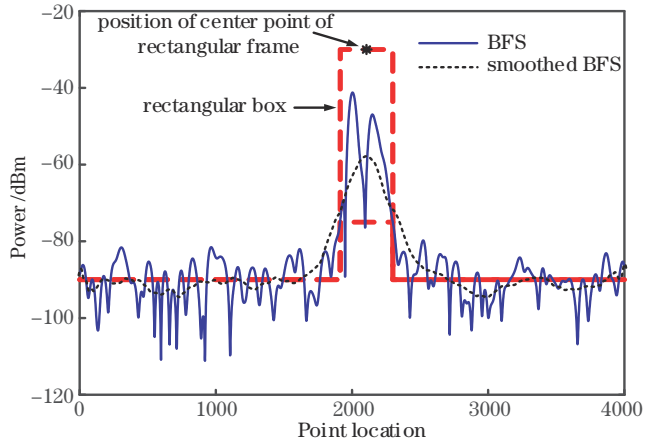


图 3 矩形框中心点位置的寻找

Fig. 3 Finding the position of the center point of the rectangular frame

位置变化如图 4 所示。由于自动采集系统采集的数据带有噪声信号,为了消除或减弱噪声信号的影响,需对采集的数据进行平滑处理。平滑后曲线的中心点位置均值为 2178.5,最大点位置为 2195,最小点位置为

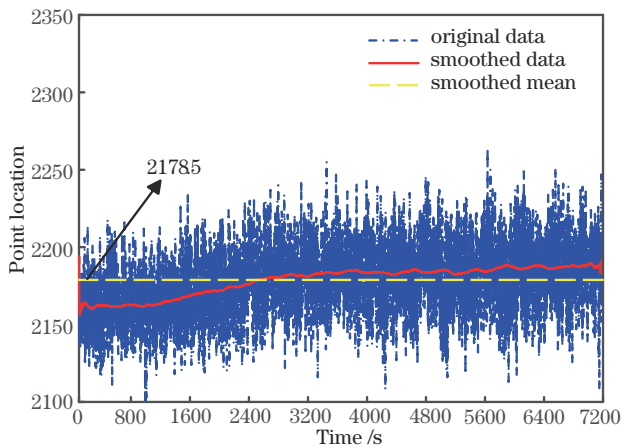


图 4 拍频信号中心点的位置变化

Fig. 4 Position change of the center point of the beat signal

2156.2, 总共波动 38.8, 对应的频率波动为 9.698 kHz, 稳定性较好。这表明测量微小温度变化时, 系统对实验结果的影响较小。

将空调设置到一定温度, 保持室内温度不变, 自动采集程序中设定中心频率、频谱同稳定性实验一样。由式(9)所示, 拍频率随温度的变化而变化, 因此将带宽以及采样点数分别设为 2 MHz 与 8001。将用于传感的 FBG 2 浸在水中, 然后记录水温从 31.96 °C 到 21.35 °C 变化时的拍频信号, 结果如图 5 所示。可以发现, 随着温度的降低, 拍频信号的中心点位置增大。

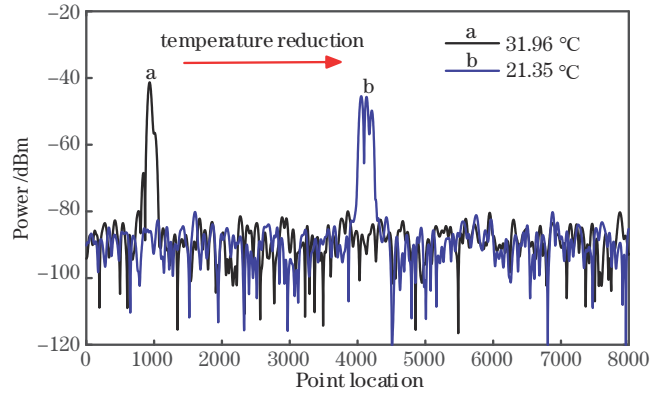


图 5 不同温度下拍频信号的中心点位置变化

Fig. 5 Position change of the center point of the beat frequency signal at different temperatures

温度变化时, 2 h 内采集的拍频信号中心点位置变化如图 6 所示。其中, 水温共变化了 10.60 °C, 矩形框中心点位置共变化了 3141.7, 对应频率变化了 785.326 kHz。由式(9)可知, 温度越高, 拍频率越低, 对应中心点位置越小。通过位置与频率一一对应的关系, 得到平均温度灵敏度为 74.087 kHz/°C。系统稳定时的频率波动为 9.698 kHz, 整个温度波动为 0.13 °C。由于拍频信号在光电探测器上从光信号转换为电信号, 实验中用 RSA 观测并采集转换后的多纵

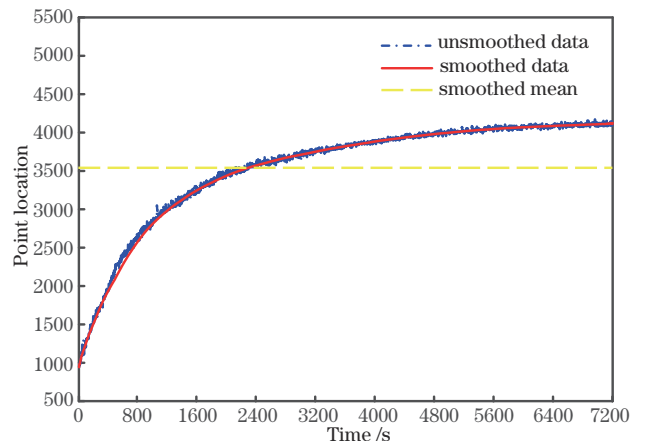


图 6 拍频信号中心点位置随温度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of the center point position of beat frequency signal with temperature

模拍频信号。RSA 能分辨的最小频率为 10 Hz, 光纤激光温度传感器拍频的带宽为 35 Hz, 即频谱仪的最高精度为 35 Hz, 计算得到该传感器的精度为  $0.47 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据图 6 中的中心点位置与温度变化时间的非线性关系, 通过多项式拟合得到拍频信号的温度响应, 如图 7 所示, 其中:  $x$  表示频率;  $y$  表示温度。可以发现, 该系统具有良好的测温能力, 且能做到秒级连续监测温度。

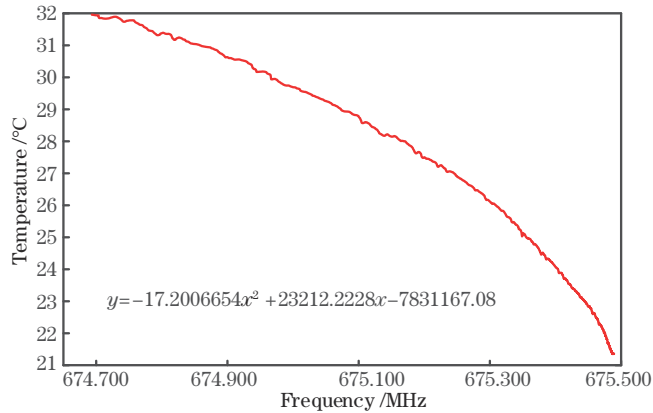


图 7 拍频信号的温度响应

Fig. 7 Temperature response of beat frequency signal

## 4 结 论

介绍了一种基于拍频解调的多纵模拍频光纤激光温度传感系统, 并给出了详细的设计和分析过程。对于多纵模光纤激光传感系统, 将光纤激光谐振腔中具有高灵敏度的 FBG 用于温度检测, 大幅提高了检测的灵敏度。用自动采集装置采集数据, 使采集数据具有完整性的同时提高了工作效率, 减小了手动采集数据的实验误差。用寻矩形框中心点位置法代替直接寻峰值法对温度信号进行解调, 提高了监测精度。结果表明, 该温度检测系统具有结构简单、成本低、灵敏度高、稳定性高和可重复使用等优点, 在实际运用中具有重要意义, 在大型建筑监测、粮仓存储、医学和卫生保健监测以及其他温度传感领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 刘统玉, 王兆伟, 李振, 等. 光纤传感技术在煤矿瓦斯、火灾隐患监测预警中的应用研究进展[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 110-117.  
Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Advance of fiber optic sensors application for coal mine methane and fire hazards monitoring[J]. Shandong Science, 2019, 32(5): 110-117.
- [2] 刘东东, 高绍和, 梁明阳, 等. 光纤测温传感器技术在粮仓中的应用[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(12): 69-70.  
Liu D D, Gao S H, Liang M Y, et al. Application of optical fiber temperature sensor technology in granary[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2020, 45(12): 69-70.

- [3] 李翊, 潘存治, 杨慧. 智能变电站温度实时监测系统的设计与实现[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(1): 74-81.  
Li Y, Pan C Z, Yang H. Design and implementation of temperature real-time monitoring system for intelligent substation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2020, 33(1): 74-81.
- [4] 向健, 李静, 吴秋奇, 等. 核电厂电气设备温度实时监测及预警系统设计[J]. 电气开关, 2021, 59(3): 41-45, 48.  
Xiang J, Li J, Wu Q Q, et al. Study on real-time monitoring and early warning system of electrical equipment temperature in a nuclear power plant[J]. Electric Switchgear, 2021, 59(3): 41-45, 48.
- [5] Zhang H, Shang J Y, Liu X J, et al. High-sensitivity fiber liquid crystals temperature sensor with tiny size and simple tapered structure[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(10): 101202.
- [6] Zhang Z Y, Suo H, Zhao X Q, et al. 808 nm laser triggered self-monitored photo-thermal therapeutic nano-system  $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}@\text{SiO}_2/\text{Cu}_2\text{S}$ [J]. Photonics Research, 2019, 8(1): 32-38.
- [7] Han H S, Hwang C H. Development and validation of simple-shield thermocouple in fire environments[J]. Journal of Fire Sciences, 2020, 39(1): 53-71.
- [8] Nakajima T, Tsuchiya T. Ultrathin highly flexible featherweight ceramic temperature sensor arrays[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(32): 36600-36608.
- [9] Pan D, Jiang Z H, Maldague X, et al. Research on the influence of multiple interference factors on infrared temperature measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10546-10555.
- [10] 张弛. 融合微波和声波的粮食水分和温度检测技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020: 95-104.  
Zhang C. Study on measurement technology of grain moisture and temperature based on combining microwave and acoustic method[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020: 95-104.
- [11] 任秀云, 王玲, 田兆硕, 等. 实用化拉曼光谱水下温度遥测系统研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 778-783.  
Ren X Y, Wang L, Tian Z S, et al. Study on practical Raman lidar seawater temperature remote sensing system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(3): 778-783.
- [12] Long S W, Lin S P, Ma D C, et al. Thermometry strategy developed based on fluorescence contrast driven by varying excitations in codoped  $\text{LiNbO}_3$ [J]. Photonics Research, 2020, 8(2): 135-142.
- [13] Zhang H L, Cong B T, Zhang F, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by Mach-Zehnder cascaded with FBG sensor based on multi-core microfiber[J]. Optics Communications, 2021, 493: 126985.
- [14] Lin W H, Liu Y B, Shao L Y, et al. A fiber ring laser sensor with a side polished evanescent enhanced fiber for

- highly sensitive temperature measurement[J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 586.
- [15] Chang Y Q, Wu H, Zhao C, et al. Distributed Brillouin frequency shift extraction via a convolutional neural network[J]. *Photonics Research*. 8(5): 690-697.
- [16] Wang X, Wang L S, Wang J, et al. High sensitivity interrogation system of fiber Bragg grating sensor with composite cavity fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107228.
- [17] Wang X, Chen T W, Meng D L, et al. A simple FBG Fabry - Perot sensor system with high sensitivity based on fiber laser beat frequency and vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 71-75.
- [18] 周昱. 光纤激光传感系统拍频信号解调研究[D]. 南京: 南京大学, 2020: 33-39.
- Zhou Y. Beat frequency signal demodulation of fiber laser sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020: 33-39.
- [19] 赵静. 光纤光栅温度特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010: 27-30.
- Zhao J. Study on the temperature characteristics of fiber grating[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010: 27-30.
- [20] Yu X J, Dong X, Chen X F, et al. Polarimetric multilongitudinal mode fiber laser for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 4941-4947.
- [21] Yin Z W, Gao L, Liu S C, et al. Fiber ring laser sensor for temperature measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(23): 3403-3408.