



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目：基于拍频解调的光纤激光温度传感系统
作者：沈言霞，宋书林，童星星，王浩威，郭瑜
网络首发日期：2022-07-18
引用格式：沈言霞，宋书林，童星星，王浩威，郭瑜. 基于拍频解调的光纤激光温度传感系统[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220713.1428.330.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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, 提出并实现了基于拍频解调的光纤激光温度传感系统。本文采用光纤激光谐振腔中的光纤光栅用于温度检测, 将光纤光栅的波长转变为谐振腔内波长变化, 最终转化为光纤激光器的拍频信号频移变化, 大大的提高了系统的灵敏度。通过 Python 程序能够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问题。与光学解调技术相比, 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。系统的平均灵敏度为 $74.039 \text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$, 根据频谱分析仪的最高精度, 可得该传感器的测量精度为 $0.47 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有较高的灵敏度和测量精度。

关键词 激光器; 温度传感器; 光纤光栅; 拍频解调; 中心点位置

中图分类号 TP253; TP212 **文献标志码** A

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, China

Abstract In order to improve the temperature sensitivity and data integrity of fiber laser, a fiber laser temperature sensing system based on beat frequency demodulation is proposed and realized. In this paper, the fiber Bragg grating in the fiber laser resonant cavity is used for temperature detection, and the wavelength of the fiber Bragg grating is transformed into the wavelength change in the resonant cavity, and finally into the frequency shift change of the beat frequency signal of the fiber laser, which greatly improves the sensitivity of the system. Through the Python program, the second-order data can be collected and saved automatically, and the work efficiency is improved. The error caused by large frequency jitter can be avoided by demodulating the temperature signal by using 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, without expensive wavelength demodulation instrument, reducing the cost of understanding modulation. The average sensitivity of the system is $74.039 \text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$. According to the highest accuracy of the spectrum analyzer, the measurement accuracy of the sensor is $0.47 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$. It has high sensitivity and measurement accuracy.

Key words laser; temperature sensor; fiber bragg grating; beat frequency demodulation; center position

OCIS codes 140.3510; 140.3518; 280.3420; 280.6780

*E-mail: guoyu@jiangnan.edu.cn

1 引 言

温度是一个非常重要的物理参数，在日常生活^[1-2]、工业生产^[3-4]、生物医学^[5-6]等许多领域都需要进行监测和精确控制。随着社会的进步，对温度传感器的性能要求越来越高。到目前为止，为了实现对温度的高精度测量，研究者已经做了大量的研究工作。如热电偶测温^[7]，热敏电阻测温^[8]，红外线热成像测温^[9]，声波测温^[10]，光谱法测温^[11]，荧光测温^[12]，以及最有研究潜力的光纤光栅测温^[13]。

基于光纤光栅温度传感器因其抗电磁干扰、体积小和成本低等优点，受到广泛关注。2021 邵理阳等^[14]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，该系统是通过跟踪光学光纤光栅波长偏移来获取传感信息的，由于需要昂贵的波长解调仪增加了解调成本。

近年来，基于电学拍频解调技术的光纤激光器测温技术逐渐成为研究热点。2020 年，唐明团队^[15]提出了一种用于分布式布里渊传感器拍频信号（BFS）提取的 BFS 提取卷积神经网络（BFSCNN）算法，实现沿光纤的温度和应变的检测。光纤光栅作为传感元件组成的传感系统在当前一直承载着重要的作用。2021 年，王旭等人^[16]提出了一种具有复合腔光纤激光器的光纤光栅传感器系统，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，但该系统既需要光谱仪也需要频谱仪进行解调，增加解调成本。2021 陈天威等人^[17]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，系统中的 F-P 腔不仅作为系统传感的传感部分还是激光谐振腔的一个反射镜，激光腔输出的模式会受到 F-P 腔反射带宽的限制，且传感部分较长。2020 年，周昱^[18]提出了一种用于应力和温度同时测量的基于分布布拉格反射（DBR）激光谐振腔结构的多纵模拍频光纤激光传感器，应力和温度灵敏度分别为 -0.49 kHz/με 和 -6.29 kHz/°C。但该系统是将光纤激光谐振腔中的掺铒光纤进行加热，引起谐振腔长度的改变，灵敏度不高且温度传感体积较大。

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，该系统具有以下优势：1) 使用 DBR 谐振腔中的光纤光栅（FBG）作为传感元件，大大的提高了系统的传感灵敏度，减小了系统传感体积；2) 使用自动采集装置，实现秒级数据采集与保存，使采集的数据具有完整性同时又可提高工作效率；3) 通过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，可避免频率抖动较大引起的误差问题；4) 与传统的光学解调相比，通过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分析

2.1 传感器装置图

本文提出了一种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) 的输入端发射到光纤激光腔中，其中两个中心波长匹配的光纤光栅 (FBG) 作为激光器的腔镜，两个 FBG 之间的一段掺铒光纤 (EDF) 作为增益介质。当温度信号作用于谐振腔的 FBG2 上，使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)，在光电探测器上产生多个拍频信号 (BFS)，多个拍频信号到达实时频谱分析仪 (RSA)，通过写入计算机中 (PC) 的 Python 程序自动采集射频频谱分析仪中的调制有温度信号的拍频数据。数据自动采集过程如图 (b) 所示。并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。

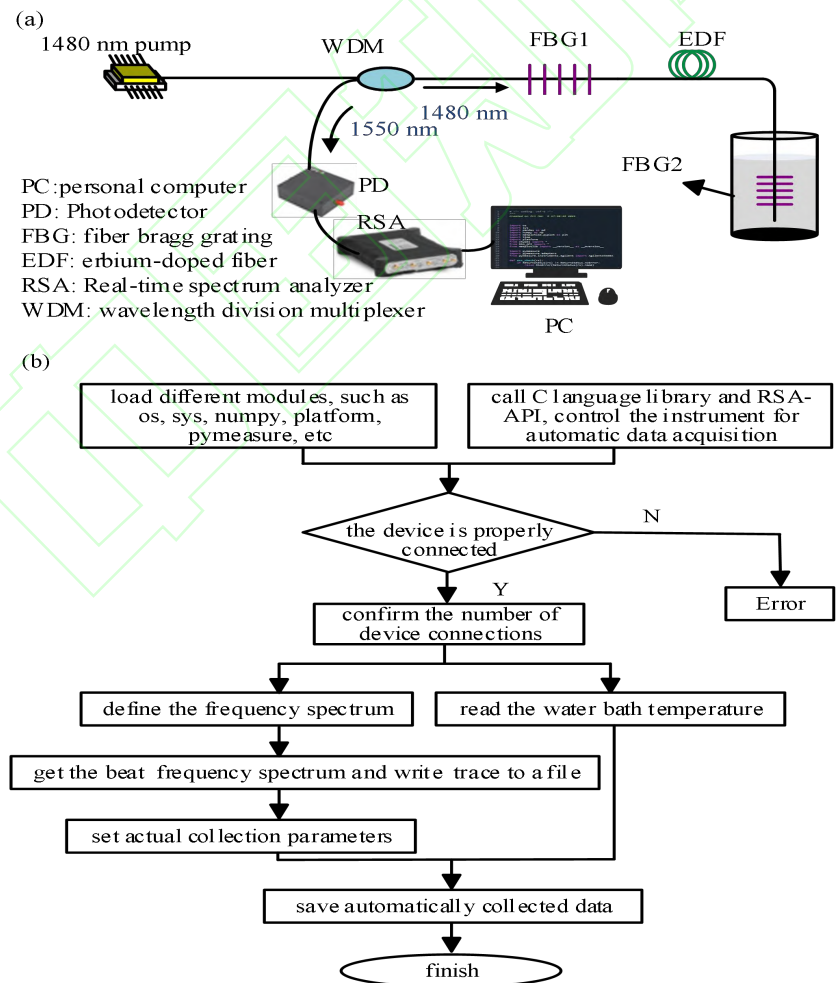


图 1 多纵模光纤激光传感器测温系统。(a) 测温系统；(b) 自动采集数据框图

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

2.2 实验工作原理

当 1480 nm 泵浦激光足够强时，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，表示为

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m}, \quad (1)$$

其中 n 这里是谐振腔内的有效折射率， L 是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以写成

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

其中 n_{eff} 是芯层导模的有效折射率， Λ 是光纤光栅的栅距。由于激光谐振腔周围温度的变化主要是由光纤光栅周围温度变化引起的，当外界温度变化时，光纤光栅的中心波长也会发生变化，光纤光栅温度灵敏度系数可以表示为^[19]

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

其中 ξ 为光纤光栅折射率温度系数， P_{11} 和 P_{12} 指弹光效应的张量， K_{wg} 波导效应导致的波长漂移灵敏度系数， α 为光纤热膨胀系数。在不考虑外界因素的作用，纯熔融的石英光纤光栅的温度灵敏度系数本质上是由材料折射率的温度系数决定的，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^[19]，因此 (3) 可以简化为

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

一旦激光谐振腔周围的温度发生变化，即光纤光栅周围温度发生变化时，激光器就会出现波长漂移，表示为

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

传感器的拍频信号是在 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为^[20]

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

其中 N 为拍信号的阶数，其值为 $N = p - q$ ($N = 1, 2, 3, \dots$)， p 和 q 是激光模数。将式 (1)

带入式（6）可得拍频信号的频率为

$$f_N = \frac{Nc}{2nL} = \frac{Nc}{m\lambda_m}, \quad (7)$$

当传感器检测温度变化时，拍频频移可以表示为^[21]

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

将式（5）（7）带入式（8）可得

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

从公式（9）可以看出，随温度的升高（降低），则拍频频移为负（正），相应的所选拍频频率减小（增大）。通过监测 Bragg 波长移动而引起的拍频变化，就可以知道外界温度的变化情况，由公式（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大小。并且灵敏度大小与选取的频率大小有关，并由公式（7）可知，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，由于拍频信号是由点数构成，在设定中心频率的带宽内每个点数与频率都一一对应，拍频谱的第 n 个点对应的频率有：

$$(\text{中心频率}-\text{带宽}/2) + (\text{带宽}/\text{点数}) * n$$

n 是指拍频谱内第 n 个点数的位置。根据点数位置和频率关系一一对应关系，通过用矩形框的中心点位置对应的频率变化代替直接寻找拍频的峰值变化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，其中 FBG1 和 FBG2 的中心波长和 3 dB 带宽分别为 1552.051 nm、1552.066 nm 和 0.221 nm、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 为 1 时的频率间隔为 75.057 MHz。

在保持室温温度不变的情况下，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，构成拍频信号的每个点位置与频率刻度都一一对应，用于温度检测的拍频信号 675.501 MHz

在设定的频谱范围内。每 1 秒中采集一次数据，图 2 为 1 s，1800 s，3600 s，5400 s，7200 s 时采集的拍频信号。图中可以看出在保持室温温度不变情况下，采集到的拍频信号大致相同。但在拍频信号中出现多个极大值，若采用直接寻峰法时，容易造成频率波动较大，影响测量结果。

图 3 表示寻矩形框中心点位置法的示意图。以功率大于 -75 dBm 小于 -30 dBm 的之间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，这样可以避免直接寻峰中出现的存在一个峰值对应多个频率点或者是一个拍频中存在多个极大值的现象。

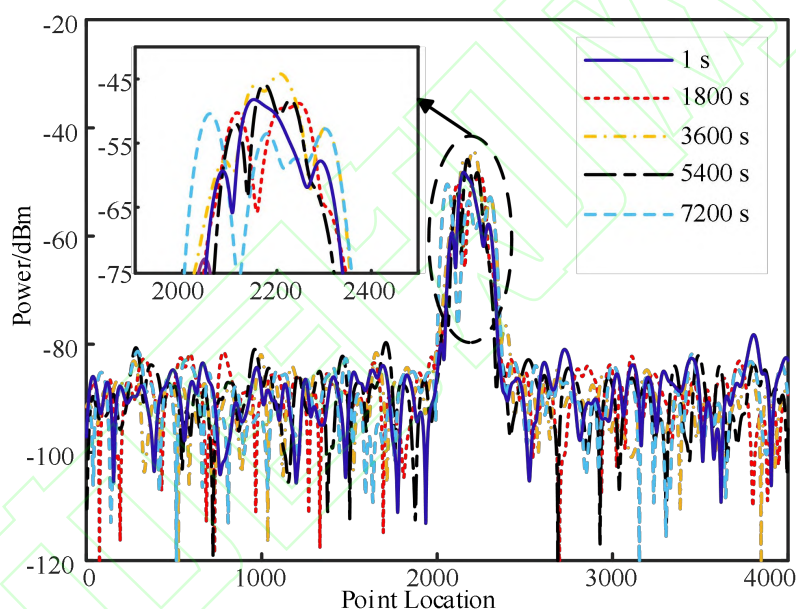


图 2 在 1 s, 1800 s, 3600 s, 5400 s, 7200 s 时的拍频信号

Fig. 2 The beat frequency signal at 1 s, 1800 s, 3600 s, 5400 s and 7200s

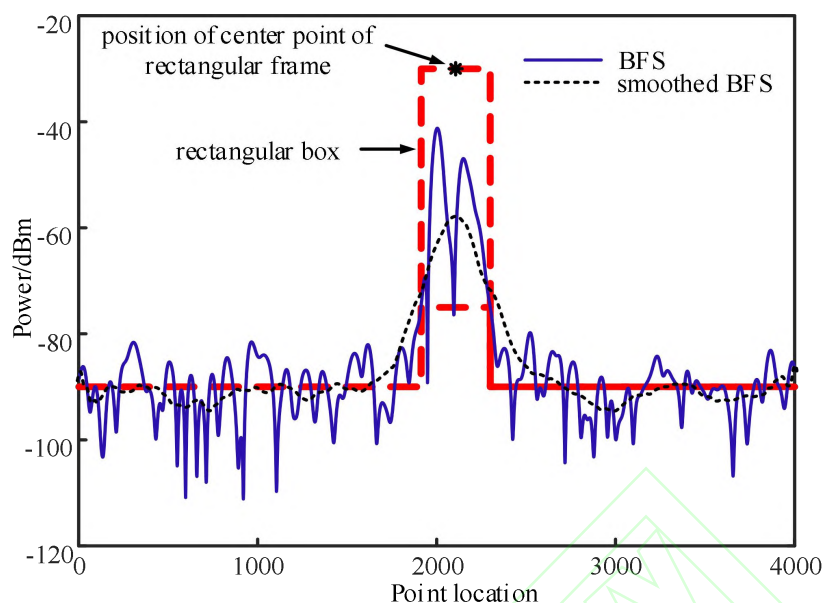


图 3 寻矩形框中心点位置法的示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the method of finding the center point of a rectangular frame

保持室内温度不变，两小时内采集到拍频信号中心点位置变化如图 4 所示。由于自动采集系统采集到的数据带有噪声信号，为了消除或者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平均值为 2178.5，最大点位置为 2195，最小点位置 2156.2，总共波动 38.8，对应于频率波动 9.698 kHz，稳定性较好，当测量微小温度变化时，系统对实验结果影响较小。

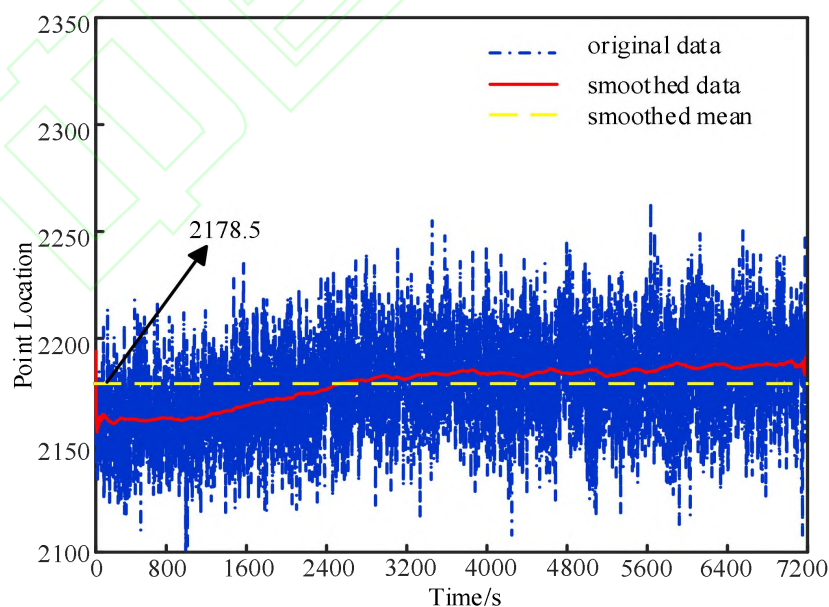


图 4 两小时内拍频信号中心点位置变化图

Fig. 4 The position change diagram of the center point of the beat frequency signal within two hours

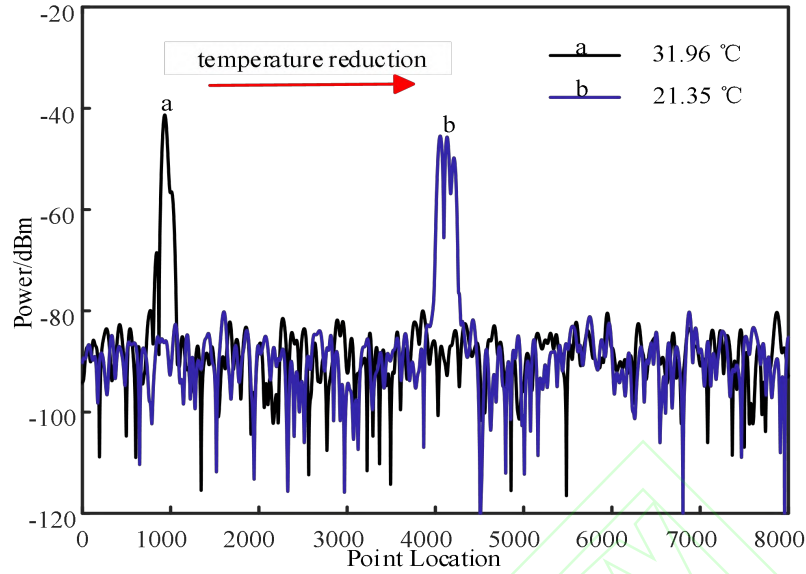


图 5 不同温度下拍频信号中心点位置变化图

Fig. 5 The position change diagram of the center point of the beat frequency signal at different temperatures

将空调设置一定温度保持室内温度不变。测量系统的灵敏度，其中自动采集程序中设定中心频率、频谱设置同稳定性实验一样。根据（9）式可知，拍频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 FBG2 浸在水中，水温从 31.96 °C 到 21.35 °C 变化时的拍频信号，有明显的中心点位置变化，随着温度的降低，中心点位置增大，结果如图 5 所示。

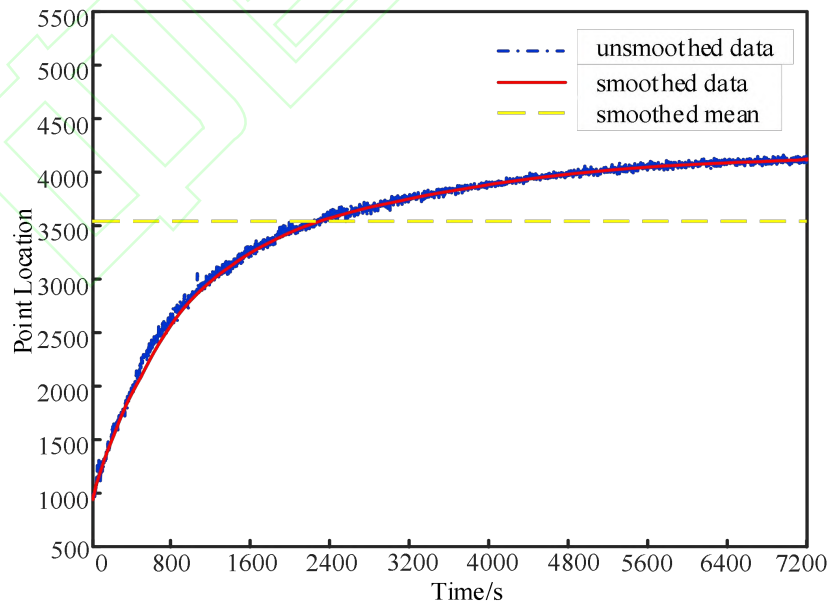


图 6 两小时内采集到的拍频信号中心点位置随温度变化图

Fig. 6 The position of the center point of the beat frequency signal collected within two hours varies with temperature

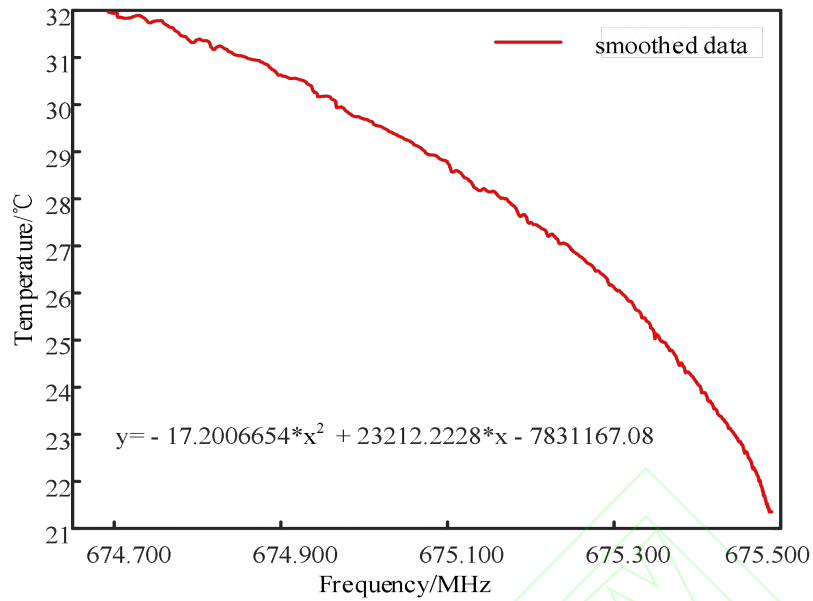


图 7 拍频信号的温度响应

Fig. 7 Temperature response of beat frequency signal

温度变化时，两小时内采集到的拍频信号中心点位置变化如图 6 所示。其水温变化总共变化 10.60°C ，其矩形框中心点位置共变化 3141.7，对应频率变化 785.326 kHz。由公式 (9) 可知，温度越高，拍频频率越低，对应于中心点位置越小。通过位置与频率一一对应的关系，可以得到平均温度灵敏度为 $74.087\text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$ 。系统稳定时的频率波动为 9.698 kHz，即对应于整个温度波动为 0.13°C 。由于拍频信号是在光电探测器上进行光信号到电信号的转换，实验中用的是 RSA 观测并采集转换后的多纵模拍频信号。RSA 所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，所以频谱仪的最高精度为 35 Hz，根据灵敏度计算可得该传感器的精度为 $0.47 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 。

由图 6 可知中心点位置与温度时间非线性关系，因此通过多项式拟合可以得到拍频信号的温度响应，如图 7 所示。因此，提出的系统具有良好的测温能力，且能做到秒级连续监测温度。

4 结 论

本文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，并进行了详细的设计过程和分析。对于多纵模光纤激光传感系统，提出用光纤激光谐振腔中具有高灵敏度的光纤光栅用于温度检测，大大的提高了灵敏度。使用自动采集装置，采集的数据具有完整性同时可提高工作效率，可减小手动采集数据的实验误差。通过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,可以提高精度。低成本,结构简单的温度检测系统还具有高灵敏度,高稳定性和可重复使用等优点。这在实际运用中具有十分重要的意义,表明该传感器在大型建筑监测,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。

参考文献

- [1] Liu T Y, Wang Z W, Li Z, et al. Application and Research Progress of Optical Fiber Sensing Technology in Monitoring and early warning of coal mine gas and fire hazards[J]. Shandong Science, 2019, 32(5): 110-117.
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.
- [2] 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.
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.
- [3] Li Y, Pan C Z, Yang H. Design and implementation of Real-time temperature Monitoring system for Intelligent Substation[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2020, 33(1): 74-81.
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.
- [4] Xiang J, Li J, Wu Q Q, et al. Design of real-time temperature monitoring and early warning system for electrical equipment in nuclear power plant[J]. Electrical Switch, 2021, 59(3): 41-45+48.
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.
- [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, 2021, 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 Y2O3: Nd3+/Yb3+/Er3+@SiO2@Cu2S[J]. Photonics Research, 2020, 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, Maldguez 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] Zhang C. Study on Detection Technology of Grain moisture and temperature based on Microwave and Acoustic Wave[D]. Beijing, Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020: 95-104.
张驰. 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.

- [11] Ren X Y, Wang L, Tian Z S, et al. Study on practical underwater temperature Telemetry system based on Raman Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(3): 778-783.
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.
- [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 LiNbO₃[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, 439: 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 and 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] Zhou Y. Research on beat signal Demodulation of Optical Fiber Laser Sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020: 33-39.
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.
- [19] Zhao J. Study on Temperature Characteristics of Fiber Bragg Grating[D]. Hebei: Yanshan University, 2010: 27-30.
赵静. 光纤光栅温度特性研究[D]. 河北: 燕山大学, 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.