

基于自适应寻峰算法的 FPGA 高精度 FBG 感知解调系统

苏建洪¹, 朱 星^{2,3*}, 焦 彤³

(1. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 计算机与网络安全学院, 四川 成都 610059;

3. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 针对目前光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Gratings, FBG) 解调系统结构复杂、价格昂贵、恶劣环境适应性差等问题, 研发了一种基于自适应寻峰算法的 FPGA 高精度 FBG 感知解调系统。首先, 基于 FBG 传感机理设计了光电探测模块, 将 FBG 的微弱反射信号调制为电压信号, 建立了可调谐激光器输出同步触发信号与扫描波长的对应性, 通过 FPGA 微控制器实现了 FBG 调制电压信号的高速采集。其次, 引入了卡尔曼-滑动均值混合滤波算法对原始光谱反射调制电压信号进行去噪滤波处理, 采用峰值判断算法实现了自适应多峰值区域判别, 结合双质心算法实现了多个 FBG 反射光中心波长的快速、高精度解调。实验结果表明, 该解调系统对 FBG 温度传感器中心波长解调精度可达 ± 3 pm, 温度与波长之间的线性拟合度可达 0.998 5 以上, 系统的稳定性和重复性经严格测试也表现出优异的性能。所设计的解调系统结构简单, 在工程适应性和便捷性上更具优势, 所嵌入的多峰值自适应寻峰算法解决了传统寻峰算法多峰寻峰时须预知各 FBG 峰值范围的缺陷, 更具准确性和稳定性, 能够满足 FBG 大规模工程应用需求。

关键词: FBG; 光电探测; 卡尔曼-滑动均值混合滤波; 多峰值自适应寻峰

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240273

0 引 言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Gratings, FBG) 传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、便于串接复用和高灵敏度等优点, 可以直接或间接对应变、温度和位移等物理量进行高精度感知测量, 已被广泛应用于铁路监测^[1]、结构健康监测^[2-3]、航空航天^[4]、材料化工^[5] 和医疗器械^[6] 等领域。FBG 传感器反射谱中心波长的变化可以间接反映被测物理量的变化。因此, 设计一个可以快速、高精度解调 FBG 传感器中心波长变化的 FBG 感知解调系统对实现实时准确的变形感知监测至关重要。

目前, 许多学者在提升 FBG 解调系统的解调精度、速度、稳定性、抗噪性和准确性等方面开展了研究。WANG Z 等采用改进的基于粒子群优化 (IPSO) 的光谱重建方法, 实现了在光谱失真的情况下

温度和平均应变的同时测量, 且温度和应变测量中的最大误差分别为 2.3 °C 和 55.0 $\mu\epsilon$ ^[7]; JIANG H 等提出了一种基于长短期记忆网络 (LSTM) 的波长检测方法, 实现了光谱重叠情况下波长的高速、高精度的检测, LSTM 波长解调方法均方根误差 (RMS) 达到 0.507 pm, 对 60 个 FBG 传感器网络的检测时间约为 15 ms^[8]; 刘瀚霖等采用一维卷积神经网络 (1 DCNN) 模型实现了混叠光谱的中心波长高精度解调, 解调模型 RMS 达到 0.082 58 pm, 计算时间短至 0.338 s^[9]; 秦根朝等提出了一种自适应解调方法, 通过多次曝光和自适应调整曝光周期和寻峰阈值, 显著提高了多光栅反射谱强度不一致情况下的解调性能, 该方法利用 LabVIEW 软件实现, 能在 100 ms 内完成解调, 且在最优峰值区间内寻峰稳定性相比单次曝光解调提高了 50% ^[10]; 胡劲华等基于连续小波变换-粒子群优化

收稿日期: 2024-07-11; 修订日期: 2024-08-16

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题 (SKLGP2023Z017)

作者简介: 苏建洪, 男, 硕士生, 主要从事光纤光栅传感与光电检测方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 朱星, 男, 教授, 博士, 主要从事安全智能感知监测关键技术与设备研发方面的研究。

(CWT-PSO) 算法实现了 FBG 传感网络的重叠光谱分类及解调, 仿真结果表明, 该方法在解调时间上相比传统 PSO 算法有显著降低, 且解调误差控制在 10 pm 以内^[11]; 梁磊等设计了一种变步长扫描策略, 并对其进行了仿真实验测试, 证明该策略在信噪比高于 9.23 dB 的情况下, 适用于单通道单光栅的快速解调, 解调速度相较固定步长扫描提高了 10 倍^[12]。

上述研究为提高 FBG 解调系统的精度、速度、抗噪性和复用率等提供了重要参考。然而, 大多数研究所设计的解调系统结构复杂、集成度低、成本较高, 且嵌入的解调算法大多需要较高的计算资源, 寻峰解调一般需在计算机上完成, 工程适用性较差。鉴于此, 文中设计了一种基于自适应寻峰算法的 FPGA(现场可编辑逻辑门阵列) 高精度 FBG 感知解调系统, 在 FPGA 中嵌入卡尔曼-滑动均值混合滤波算法对光谱信号进行去噪预处理, 选用峰值判断算法实现自适应多峰值区域判别, 结合双质心法完成了多个 FBG 反射光中心波长的快速、高精度解调。同时, 设计中优化了 FBG 解调系统结构, 提升了其在大规模 FBG 复用工程中的适用性。

1 高精度 FBG 感知解调系统

1.1 FBG 传感原理

FBG 是通过相位掩膜等技术形成明暗相间的条纹, 经强紫外光曝光后刻入光纤纤芯中的一种光无源器件^[13]。FBG 传感原理如图 1 所示。

当宽带光源入射到 FBG 时, 根据耦合模式理论

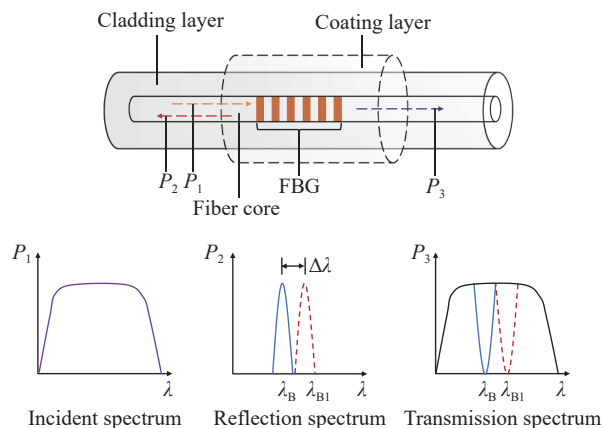


图 1 FBG 传感原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of FBG sensing principle

可知, 只有满足布拉格方程条件的入射光会被反射^[14], 其条件为:

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

式中: Φ 为模阶数 (文中仅考虑一阶反射峰, $\Phi=1$); λ_B 为 FBG 反射光谱的中心波长; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为 FBG 的栅格周期。当 FBG 所受到外界的温度、应变、压力等参量发生变化时, 会导致光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 和 FBG 的栅格周期 Λ 发生变化, 从而导致 FBG 反射光的中心波长 λ_B 随之发生变化^[15]。文中简化分析中忽略由 n_{eff} 偏移和 Λ 偏移共同引起的 2 阶波长偏移量, 对公式 (1) 微分可得 FBG 中心波长偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与 n_{eff} 和 Λ 的变化量之间的关系如下:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 、 Δn_{eff} 和 $\Delta\Lambda$ 分别为 λ_B 、 n_{eff} 和 Λ 因外界待测物理量的变化而变化的改变量。 n_{eff} 和 Λ 的变化量与外界待测物理参量的具体关系与 FBG 的自身材料特性有关, 解调系统根据这两个参数导致的 FBG 反射光中心波长偏移量即可得出外界待测物理参量的变化值。

1.2 高精度 FBG 感知解调系统原理

基于自适应寻峰算法的 FPGA 高精度 FBG 感知解调系统结构示意图如图 2 所示。主要包括可调谐激光器、FPGA 微控制器、AD(模/数)转换器、光隔离器、1×N 光分路器、光电探测阵列、光环行器以及 FBG 传感阵列。1) 系统采用空分复用和波分复用技术^[16], 通过一个 1×N 光分路器将可调谐激光器输出的扫描脉冲激光均分成 N 路光输入到后端串联的 FBG 传感器阵列进行感知; 2) 经 FBG 传感器阵列反射回来的光谱通过各个分路的环形器返回至光电转换阵列进行光电转换, 经 A/D 转换后, FPGA 微控制器采集激光器的触发信号的同时同步采集 A/D 转换之后的光栅信号; 3) 然后, 在 FPGA 微控制器内实现数字滤波、自适应峰值区域判别、快速高精度寻峰处理, 完成对 FBG 反射光谱中心波长的解调。当 FBG 传感器阵列感知的外界待测物理量状态变化时, FBG 传感器阵列反射光中心波长会发生偏移, 解调系统通过 FBG 传感器阵列波长变化量与外界待测物理量状态变化的相应关系完成对外界待测物理参量状

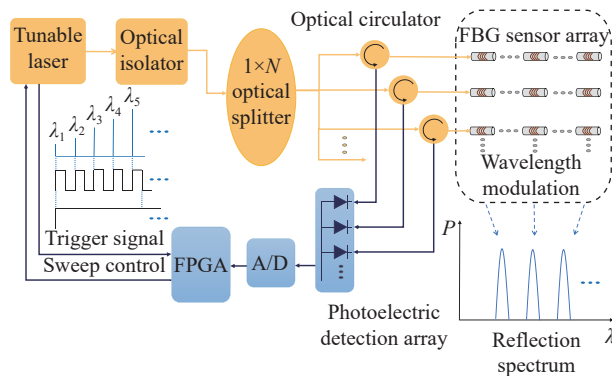


图 2 FBG 解调系统结构示意图

Fig.2 FBG demodulation system structure diagram

态变化的感知。

1.3 光电探测模块设计

在实际应用中,受光源、光路、外界环境等因素的影响,FBG 反射光信号比较微弱且夹杂着噪声,光电探测模块作为解调系统的核心部分,主要实现光电转换和低噪放大两个功能,先将 FBG 反射光信号转换为电流信号,经运算放大器低噪放大后,输出电压信号,最后通过 FPGA 控制 ADC(模数转换器)进行数

字化采集。

文中自主设计的光电探测模块为了最大限度的降低噪声对系统解调的影响做了优化改进:1)在光电转换方面,选用低噪声、宽频带、稳定性高的 InGaAs-PIN(铟镓砷光电二极管)光电二极管;2)在低噪放大方面,采用具有低输入偏置电流(最大值 1 pA)、低噪声 ($8 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$)、较高增益带宽积 (10 MHz) 的 AD8605 芯片进行光电探测模块电流到电压的转换和运算放大;3)在完成电压放大后,采用具有低输入偏置电流(最大值 1 pA)、低噪声 ($8 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$) 的 AD8646 芯片,根据原始信号的频率设计了截止频率为 15 KHz 的四阶 SK 低通滤波电路对放大后的电压信号进行滤波处理,提升信号的质量;4)在电源供电方面,分别采用 LM2576-ADJ 和 TPS7 A49 降压稳压芯片将 12 V 先降为 6.2 V,再将 6.2 V 电压降为 5 V 输出。多级降压稳压方案可保证电源输出的稳定性,降低由电源供电引起的纹波和电路布线引起的噪声,为光电转换提供“干净”的电源。光电探测模块电路原理如图 3 所示。

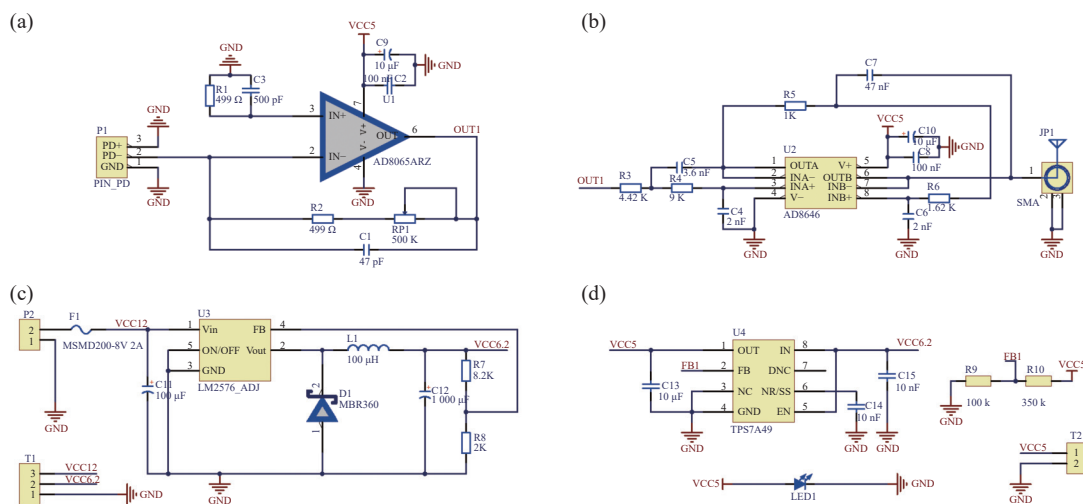


图 3 光电探测模块电路原理。(a) 光电转换与放大电路;(b) 四阶 SK 低通滤波电路;(c) 12 V 转 6.2 V;(d) 6.2 V 转 5 V

Fig.3 Photoelectric detection module circuit principle. (a) Photoelectric conversion and amplification circuit; (b) Fourth-order SK low-pass filter circuit; (c) 12 V to 6.2 V; (d) 6.2 V to 5 V

2 FPGA 微控制单元设计

FPGA 微控单元主要实现光谱数据采集、数据预

处理及自适应寻峰处理等功能,其流程图如图 4 所示,具体步骤详述如下。

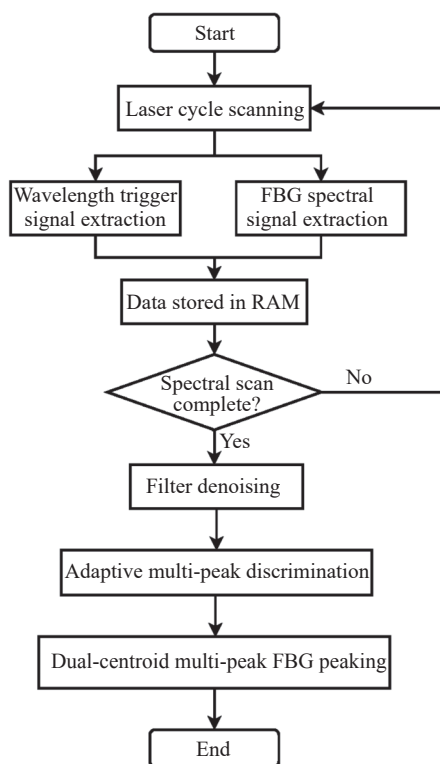


图 4 系统解调流程图

Fig.4 Flow chart of system demodulation

2.1 数据采集

通过 FPGA 微控制器采集和处理 FBG 传感器反射光谱信号,具体过程如下:可调谐激光器模块向 FBG 传感器阵列输出覆盖 1 525~1 565 nm 波长范围、10 pm 间距、共 4000 组脉冲激光的同时向外输出对应的触发信号,FPGA 微控制器识别到激光器模块发出的触发信号时,同步控制 AD 转换模块采集经光电转换后的 FBG 传感器反射光强信号,并按先后顺序将采集的数据存入随机读取存储器 (RAM) 中供运算单元进行处理。此处,将 FBG 传感器反射光强信号对应的波长信息映射为光强数据在 RAM 中的存储地址,节省存储资源。其中,存储地址与波长的关系如下:

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot t \quad (3)$$

式中: λ 为对应波长值; λ_0 为初始波长 (1 525 nm); α 为存储地址; t 为间距 (10 pm)。

2.2 数据预处理

在实际工程应用中,由于外界环境及光电转换过程中所夹杂的噪声影响,采用传统寻峰算法直接解调会带来较大误差,不适合复杂工程环境下的准分布式

FBG 传感网络多峰光谱解调,因此文中采用卡尔曼-滑动均值混合滤波算法对原始 FBG 反射光谱数据进行降噪处理,以提升 FBG 反射光谱数据质量。

卡尔曼滤波算法根据前一时刻的预测值和实际测量值得到当前时刻的最佳预测值,无需存储所有历史数据。这种递推处理方式使卡尔曼滤波更适用于 FBG 反射光谱数据这种大量数据的降噪处理。其具体实现为:通过分析 FBG 反射光谱信号的特点,当前时刻的光谱信号与前一时刻的值存在相关关系,因此建立 FBG 反射光谱信号状态空间模型如下:

$$X_K = A \cdot X_{K-1} + W(K) \quad (4)$$

$$Y_K = H \cdot X_K + V(K) \quad (5)$$

公式 (4)、(5) 分别为光谱信号的状态方程、观测方程, K 、 $K-1$ ($K=1,2,\dots,N$) 时刻光谱信号的预测值分别表示为 X_K 、 X_{K-1} , K 时刻光谱信号实际测量值为 Y_K ; A 为状态转移矩阵, H 为观测矩阵,因光谱数据为一维标量,故 A 、 H 均取 1; $W(K)$ 、 $V(K)$ 分别为状态变量的过程噪声和测量噪声,两者相互独立,协方差分别为 Q 、 R 。

$$X_{K|K-1} = A \cdot X_{K-1|K-1} \quad (6)$$

$$P_{K|K-1} = A \cdot P_{K-1|K-1} \cdot A^T + Q \quad (7)$$

通过公式 (6) 对当前时刻光谱信号预测值 $X_{K|K-1}$ (已知前一时刻预测值的情况下) 进行预测, $X_{K-1|K-1}$ 代表前一时刻光谱信号的最佳预测值。误差协方差表示为 P ,在 $K-1$ 时刻对 K 时刻误差协方差预测表示为 $P_{K|K-1}$, A^T 为 A 的转置矩阵。由公式 (6)、(7) 对光谱信号进行预测,并结合当前解调系统采集的光谱信号实际值,根据公式 (8) 可求得 K 时刻光谱信号的最佳预测值 $X_{K|K}$ 。更新方程为:

$$X_{K|K} = X_{K|K-1} + K_K \cdot (Y_K - H \cdot X_{K|K-1}) \quad (8)$$

$$K_K = P_{K|K-1} \cdot H^T \cdot (H \cdot P_{K|K-1} + R)^{-1} \quad (9)$$

$$P_{K|K} = P_{K|K-1} \cdot (1 - H \cdot K_K) \quad (10)$$

式中: K_K 为 K 时刻的卡尔曼增益; $P_{K|K}$ 为更新 K 时刻下预测的方差值;基于实时采集的 FBG 光谱数据,根据公式 (4)~(10) 可推导出当前时刻光谱数据的最优预测值。

FBG 反射光谱数据经卡尔曼滤波后可能残存少

量“毛刺”和“假峰”，因此系统结合滑动均值滤波法对经卡尔曼滤波后数据进行了平滑处理，其具体实现为：算法实时对经卡尔曼滤波后数据 $X(n)$ 进行处理，设定窗宽为 N ，数据输入以先进先出的原则进入数组，而数组每进行一次更新则对组内的 N 个数据进行一次算术平均计算， $Y(n)$ 计算公式如下：

$$Y(n) = 1/(2m+1) \sum_{k=n-m}^{n+m} X(n-k) \quad (11)$$

式中： m 取值为 $(N-1)/2$ ，窗宽 N 取值为奇数； k 为滤波器阶数。文中取 $N=5$ ，在保证平滑效果的同时避免“过平滑”丢失部分信号特征。

2.3 自适应寻峰处理

目前工程应用中 FBG 光谱多峰寻峰方法大多须预知各 FBG 原始中心波长，然后截取特定频谱范围内的单峰进行寻峰操作，而对于复杂的大型准分布式 FBG 传感网络该方法并不适用。因此，文中设计了一种峰值判断算法实现自适应多峰值区域判别，结合双质心法完成对 FBG 传感器中心波长的快速、高精度解调。

2.3.1 峰值判断算法

为实现多峰光谱的自适应寻峰，同时进一步消除由脉冲噪音或其他噪音引起的假峰现象，在降噪处理的基础上，采用峰值判断算法识别出多峰光谱数据中各谱峰峰值，以满足寻峰的基本条件。其具体实现为：从 RAM 中按地址顺序读出经降噪处理后的光谱数据 $Y(n)$ ，并对读出的数据做两级缓存处理，以便进行趋势判断；设定一个初始阈值，从读出的第一个大于初始阈值的光谱数据开始，依次递推进行 L (根据激光扫描间距及 FBG3 dB 带宽确定，取奇数) 次做差处理，差值记为 S_i ：

$$S_i = Y_{i+1} - Y_i \quad (12)$$

L 次做差处理过程中 S_i 为正的数记为 S^+ ，当 $S^+ \geq (L+1)/2$ 时，波形处于上升阶段，当 $S^+ < (L+1)/2$ 时，波形处于下降阶段。若 $S^+ < (L+1)/2$ ，则初始化参数进行下一个峰值区域判别，若 $S^+ \geq (L+1)/2$ ，则从第 $L+1$ 个数据开始寻找最大值后，初始化参数，继续进行 L 次做差处理，若波形处于下降阶段，则记录最大值的值以及该最大值在 RAM 中的存储地址，完成一个峰值的判断；随后初始化参数，继续重复上述步骤，直至寻找到多峰光谱数据中所有谱峰峰值停止。

2.3.2 双质心算法

质心法将采集的反射光谱数据看作是有质量的“质心”点，反射光谱的光强幅值视为每点的质心，光强幅值存储位置视为每点的横坐标。

$$\alpha_b = \sum y_i \cdot x_i / \sum y_i \quad (13)$$

式中： α_b 为 FBG 反射光谱峰值横坐标； y_i 为采集的 FBG 反射谱光强值； x_i 为 FBG 反射谱光强值横坐标，即其在 RAM 中对应的存储地址。通过公式 (13) 可求得反射光谱峰值位置的横坐标。

质心法实现简单、解调速度快，但其抗噪性能差，容易受到噪声影响。因此文中结合卡尔曼-滑动均值混合滤波算法，在对 FBG 反射光谱数据降噪的基础上采用双质心法进行寻峰。双质心法分别对峰值区域极大值点和次极大值点进行两次质心法运算后取平均值为所求结果，其显著提高了寻峰的稳定性与准确性。

具体实现为：由所述峰值判断算法找到滤波后光谱数据中所有谱峰的极大值点，连同其在 RAM 中的存储地址一并记录并编号为 1、2... k ...，第 k 个谱峰极大值点对应的光谱数据为纵坐标，记为 y_k ，并将其在 RAM 中的存储地址确定为该峰极大值点的横坐标，记为 x_k ；随后找到当前峰的极大值点邻近的左右点 (x_{k-1}, y_{k-1}) 、 (x_{k+1}, y_{k+1}) ，比较左右邻点幅值，确定次极大值点，其横坐标记为 $x_{\Delta k}$ ；设定取点数阈值 n ，对区间 $[x_k - n, x_k + n]$ 内的点运用质心法计算，结果记为 α_k ；对区间 $[x_{\Delta k} - n, x_{\Delta k} + n]$ 内的点运用质心法计算，结果记为 $\alpha_{\Delta k}$ ；利用公式 (14) 计算出第 k 个谱峰的实际峰值横坐标，记为 α_{bk} 。

$$\alpha_{bk} = (\alpha_{\Delta k} \cdot x_k - \alpha_k \cdot x_{\Delta k}) / (\alpha_{\Delta k} - \alpha_k + 1) \quad (14)$$

重复上述步骤，直至完成所有谱峰的实际峰值横坐标计算，随后根据公式 (3) 将所有谱峰的实际峰值横坐标 α_{bk} 转换为对应的波长信息值 λ_{bk} (1、2... k ...)，完成多个 FBG 反射光谱中心波长的快速、高精度解调。

3 实验分析

如图 5 所示，为验证本项研究的系统性能，搭建了 FBG 传感解调系统试验平台，其中解调系统所用器件及具体参数详述如下：可调谐激光器输出光功率为 20 mW，其输出光波长区间为 1 525~1 565 nm，通过

光环行器进入 FBG 传感器阵列, FBG 传感器阵列反射光谱经自主设计的光电探测器转换为电信号, 随后 FPGA 微控制器采集可调谐激光器输出的触发信号的同时同步控制 AD 转换模块采集信号, 并对其进行分析处理。

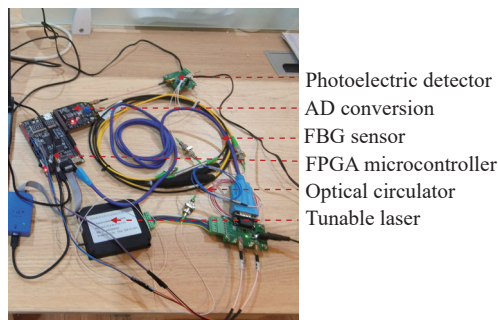


图 5 FBG 解调系统实验平台

Fig.5 FBG demodulation system experiment platform

3.1 降噪算法效果

利用文中所设计解调系统采集原始 FBG 传感器反射光谱信号, 并采用卡尔曼-滑动均值混合滤波算法对原始反射光谱信号进行降噪处理, 同时因无噪声的 FBG 光谱信号难以获取, 对原始光谱信号进行高斯拟合处理, 并将拟合得到的光谱信号作为无噪声时的光谱信号, 如图 6 所示。分别计算降噪前后反射光谱信号的信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR), SNR 的数学表达式如下:

$$SNR = 20 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N |Y(n)|}{\sum_{n=1}^N |Y(n) - D(n)|} \right) \quad (15)$$

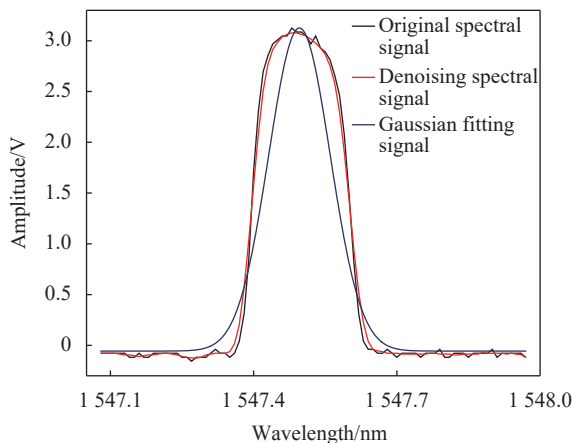


图 6 降噪算法效果

Fig.6 Effect of denoising algorithm

式中: SNR 是信噪比; $Y(n)$ 为无噪声时的光谱信号; $D(n)$ 为降噪前后的光谱信号。

根据公式 (15) 计算出降噪前 SNR 为 19.718 dB, 降噪后 SNR 为 21.412 dB, SNR 明显提高, 有效抑制了噪声干扰。同时由图 6 可见, 原始 FBG 反射光谱信号经卡尔曼-滑动均值混合滤波算法降噪得到了有效修正, 波峰处谱形结构清晰, 谱形平滑, 最大程度保留了 FBG 反射光谱信号的原始有效信息, 有效减小了噪声对峰值检测精度的影响。

3.2 解调系统稳定性与精度实验

为验证解调系统的峰值检测精度和稳定性, 选用标定温度 25 °C 下, 中心波长为 1 540.882 0 nm 的 FBG 传感器 A 进行长时间解调测试。将 FBG 传感器 A 置于高低温试验箱 (控温精度 0.01 °C) 中, 在 25 °C 环境下进行 5 h 持续解调测试, 每隔 10 min 记录一次解调数据。将解调系统采集到的 30 组光谱数据分别采用直接寻峰算法 (Direct)、质心寻峰算法 (Centroid)、一般多项式拟合算法 (Polynomial)、高斯拟合算法 (Gaussian) 和文中所提算法进行峰值检测, 5 种算法的平均中心波长、标准差、平均误差、解调速度如表 1 所示, 不同算法的寻峰结果如图 7 所示。

由表 1 和图 7 可以看出, 高斯拟合算法解调精度最高、稳定性最好, 但解调速度最慢, 且耗费底层硬件资源过多, 不适用于大容量准分布式实时解调系统; 一般多项式拟合算法和文中所提算法具有较好的解调精度和稳定性, 但一般多项式拟合算法解调速度较慢; 直接寻峰算法和质心寻峰算法解调速度最快, 但解调精度最低; 通过对 5 种寻峰解调算法对比分析的同时考虑到底层硬件资源有限, 为了节省硬件资源降低系统功耗, 同时提高系统的实时性, 降低寻峰误差, 提高寻峰解调精度, 最终选用文中所提算法完成寻峰解调。

为验证解调系统的解调精度, 选用标定温度 37.73 °C 下, 中心波长为 1 547.896 0 nm, 温度系数为 0.027 198 nm/°C 的 FBG 传感器 B, 将其置于高低温试验箱中, 依次设置高低温试验箱温度为 37、37.5、38 °C, 进行 3 组精度测试实验, 每组持续测温 2 h, 每隔 10 min 记录一次解调数据。依据温度系数计算可知, FBG 传感器 B 在 37、37.5、38 °C 下对应中心波长分别为 1 547.876 1、1 547.889 7、1 547.903 3 nm,

表 1 三种算法的平均波长、标准差和平均误差

Tab.1 Average wavelength, standard deviation and average error of the three algorithms

Peak-detection algorithm	Mean value/nm	Standard deviation/pm	Error/pm	Demodulation speed
Direct	1 540.889 4	16.106	13.767	Fast
Centroid	1 540.886 9	9.152	7.667	Fast
Polynomial	1 540.883 4	3.123	2.976	Medium
Gaussian	1 540.882 3	1.571	1.337	Slow
Proposed method	1 540.880 4	2.924	2.582	Fast

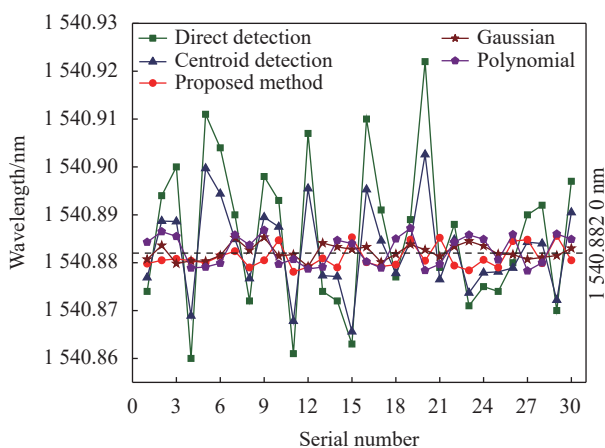


图 7 5 种峰值检测算法比较

Fig.7 Results of five peak detection algorithms

如图 8 所示为 37~38℃ 测温精度结果对比图。

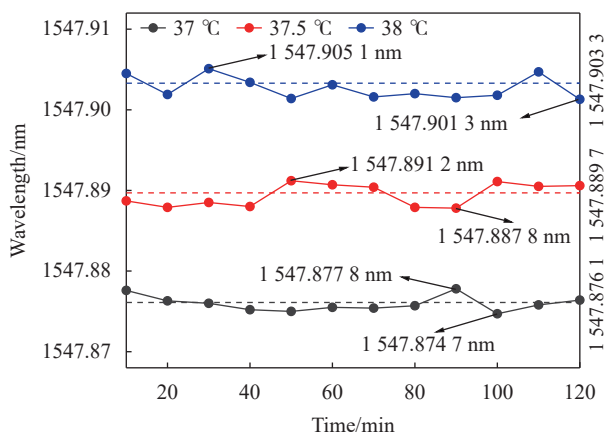


图 8 37~38℃ 测温精度结果对比

Fig.8 Comparison of temperature measurement accuracy results at 37~38℃

由图 8 可知,在 37、37.5、38℃ 温度下,该系统解调的中心波长值与标准值相比均在 ± 3 pm 范围内波动。

3.3 系统解调线性与重复性实验

为验证文中解调系统线性度,采用标定温度为 39.63℃,中心波长为 1 533.783 0 nm,温度系数为 0.025 330 nm/℃ 的 FBG 传感器 C 进行升温实验,将 FBG 传感器 C 置于高低温试验箱中,保证 FBG 传感器 C 实验过程中不受应力、振动等其他因素的影响。将高低温试验箱中的温度从 25℃ 升至 35℃,每升高 1℃,待稳定 20 min 后记录一次解调数据。将解调得到的波长值与对应温度做线性拟合处理,得出温度与波长之间的线性拟合度达到 0.998 5 以上,可知系统解调结果线性度良好。图 9 所示为解调得到的波长与温度拟合图。

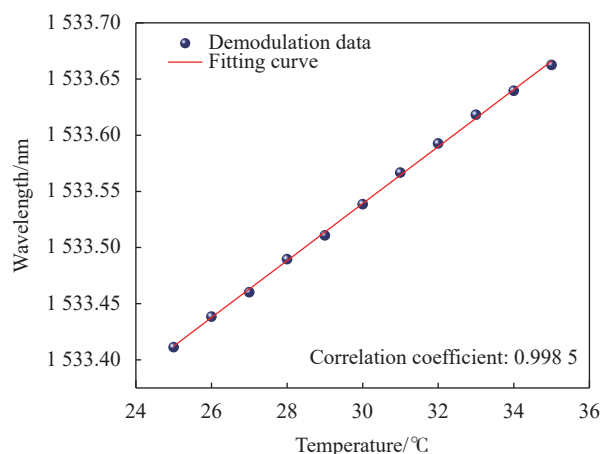


图 9 波长与温度拟合图

Fig.9 Fitting diagram of wavelength and temperature

对系统解调性能进行重复性验证,在拟合实验的基础上,再次重复进行两次降温、1 次升温测试,并对 3 次测量的数据进行拟合。系统重复性结果如图 10 所示,3 次解调的温度与实际测量温度吻合度较好,

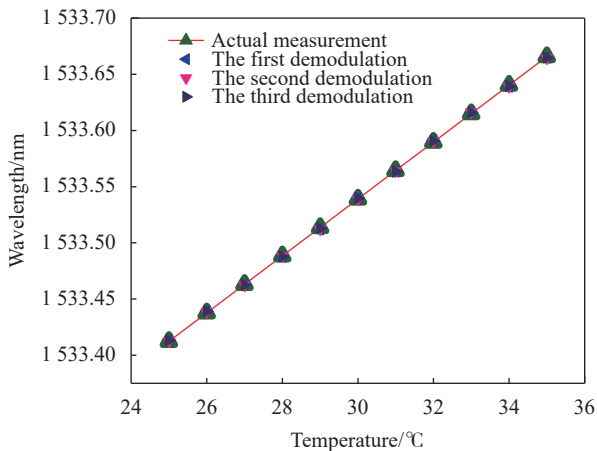


图 10 系统解调重复性实验结果

Fig.10 Experimental results of system demodulation repeatability

没有明显的迟滞和飘移。

对系统多光栅解调进行实验测试,将温度为 39.63 ℃ 时中心波长分别为 1 533.783 0、1 538.625 0、1 547.948 0 nm 的 3 个 FBG 传感器进行串联,将 3 个 FBG 传感器置于高低温试验箱中进行 10~50 ℃ 升温实验,每隔 5 ℃ 记录系统解调数据。如图 11 所示为多光栅解调波长与温度拟合曲线,表 2 为 15~30 ℃ 温度下多光栅解调实验数据对比分析结果。

通过表 2 和图 11 可以看出,系统多光栅解调过程中,各 FBG 传感器温度与波长之间的线性拟合度较好。各 FBG 传感器在每一个测试温度下其解调波长稳定性均达到 ± 3 pm 以下,结果证明该系统的多光栅解调效果良好。

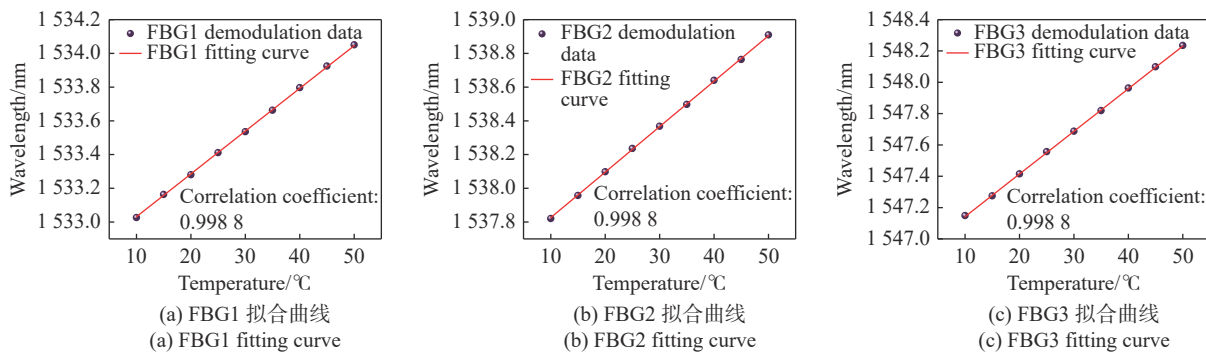


图 11 系统多光栅解调实验结果

Fig.11 Experimental results of multi-grating demodulation of the system

表 2 多光栅解调实验数据分析结果

Tab.2 Results of multi-grating demodulation experiment data analysis

FBG sensor	Temperature/°C	Actual wavelength/nm	Demodulation wavelength/nm	Error/pm
FBG1	15	1 533.159 1	1 533.161 3	2.2
	20	1 533.285 8	1 533.284 2	-1.6
	25	1 533.412 4	1 533.413 8	1.4
	30	1 533.539 1	1 533.540	0.9
FBG2	15	1 537.961 4	1 537.962 7	1.3
	20	1 538.096 1	1 538.097 8	1.7
	25	1 538.230 8	1 538.233 3	2.5
	30	1 538.365 5	1 538.366 6	1.1
FBG3	15	1 547.277 8	1 547.278 7	0.9
	20	1 547.413 8	1 547.415 3	1.5
	25	1 547.549 8	1 547.552 4	2.6
	30	1 547.685 8	1 547.687 5	1.7

4 结 论

文中结合可调谐激光器设计并搭建了一种基于自适应寻峰算法的 FPGA 高精度 FBG 感知解调系统。该系统基于 FPGA 平台,设计了光电探测模块,嵌入卡尔曼-滑动均值混合滤波算法对光谱信号进行降噪处理,有效减少了噪声扰动对寻峰精度的影响,采用峰值判断算法和双质心算法实现了多个 FBG 峰中心波长的快速、高精度解调,有效提高了解调精度。通过测温实验表明,该系统对 FBG 温度传感器中心波长的解调精度可达到 ± 3 pm,温度与波长之间的线性拟合度达到 0.998 5 以上,并展现出优异的稳定性和重复性。为优化 FBG 解调系统结构、提升其工程适应性提供了有益参考。

参考文献:

- [1] YÜKSEL K, KINET D, MOEYAERT V, et al. Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10): 105033.
- [2] ALAMANDALA S, SAI Prasad R L N, PANCHARATHI R K, et al. Study on bridge weigh in motion (BWIM) system for measuring the vehicle parameters based on strain measurement using FBG sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61: 102440.
- [3] MIELOSZYK M, OSTACHOWICZ W. An application of Structural Health Monitoring system based on FBG sensors to offshore wind turbine support structure model [J]. *Marine Structures*, 2017, 51: 65-86.
- [4] LIANG Lei, ZHU Zhenhua, WANG Hui, et al. Research on testing technology of helicopter blade load based on FBG [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2019, 30(12): 1280-1285. (in Chinese)
- [5] MA Shou, GUO Jianchun, GUO Yanli, et al. On-line monitoring system for downhole temperature and pressure [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 087102.
- [6] KIM J S, KIM B K, JANG M, et al. Wearable hand module and real-time tracking algorithms for measuring finger joint angles of different hand sizes with high accuracy using FBG strain sensor [J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1921.
- [7] WANG Zhengfang, WANG Jing, SUI Qingmei, et al. The simultaneous measurement of temperature and mean strain based on the distorted spectra of half-encapsulated fiber Bragg gratings using improved particle swarm optimization [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 153-161.
- [8] JIANG Hao, ZENG Qiying, CHEN Jing, et al. Wavelength detection of model-sharing fiber Bragg grating sensor networks using long short-term memory neural network [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20583-20596.
- [9] LIU Hanlin, XIN Jingtao, ZHUANG Wei, et al. Demodulation method of overlapping spectrum based on convolutional neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20210419. (in Chinese)
- [10] QIN Genchao, MENG Fanyong, LI Hong, et al. Adaptive demodulation of reflection spectrum intensity of fiber grating link [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20200440. (in Chinese)
- [11] HU Jinhua, ZHENG Bingli, DENG Yujing, et al. Overlapping spectrum classification and demodulation of fiber Bragg grating sensing network based on CWT-PSO algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2106002. (in Chinese)
- [12] LIANG Lei, ZHANG Yuning, DU Shangming, et al. High speed demodulation of FBG based on variable step scanning strategy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(4): 20230671. (in Chinese)
- [13] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [14] ULLAN A, QUINTELA M A, RODRIGUEZ-COBO L, et al. Sensor system based on a Brillouin fiber laser for remote in series fiber Bragg gratings interrogation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(12): 3480-3482.
- [15] CAO Houjun, SI Jinhai, CHEN Tao, et al. Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702009. (in Chinese)
- [16] KHONINA S N, KAZANSKIY N L, BUTT M A, et al. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(8): 210127.

FPGA high-precision FBG sensing demodulation system based on adaptive peaking algorithm

SU Jianhong¹, ZHU Xing^{2,3*}, JIAO Tong³

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. College of Computers and Cyber Security, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract:

Objective Nowadays, the demodulation precision, speed and stability of existing fiber grating demodulation systems have been greatly improved. However, most FBG demodulation systems are complex in structure, low in integration, poor in engineering adaptability, and the embedded peaking algorithm is complex, so the demodulation needs to be completed by the host computer, which is poor in portability and high in cost. Therefore, the research goal of this paper is to design an FBG demodulation system which is simple in structure, high in integration and can satisfy the large-scale engineering application of FBG.

Methods In view of the above problems in the current fiber Bragg grating demodulation system, a FPGA high-precision FBG-aware demodulation system based on adaptive peak finding algorithm is designed. Firstly, the sensing mechanism of FBG is studied, and a photoelectric detection module is designed to convert and amplify the weak reflection signal of FBG into a voltage signal. Based on the corresponding relationship between the synchronous trigger signal output by the tunable laser and the scanning wavelength, the FPGA microcontroller realizes the efficient acquisition of the converted FBG reflection signal. Secondly, the Kalman moving mean hybrid filtering algorithm was introduced into the FPGA microcontroller to denoise the original spectral reflection signal, the peak judgment algorithm was used to realize the adaptive multi-peak region discrimination, and the double centroid algorithm was combined to complete the fast and high-precision demodulation of the center wavelength of multiple FBG reflected light.

Results and Discussions A FPGA high-precision FBG sensing demodulation system based on adaptive peak finding algorithm is built (Fig.5). The Kalman moving mean hybrid filter is used in the FPGA to denoise the collected original spectral data and effectively correct the spectral shape (Fig.6). The experimental results show that under the same conditions, the proposed algorithm has faster demodulation speed than the traditional algorithm, while maintaining better demodulation precision and stability, and consumes less underlying hardware computing resources (Fig.7, Tab.1). When the temperature is 37 °C, 37.5 °C and 38 °C respectively, the central wavelength value of the demodulated system in this paper fluctuates within the range of ± 3 pm compared with the standard value (Fig.8). When the temperature rises from 25 °C to 35 °C, the correlation coefficient between temperature and wavelength change is above 0.998 5, and the demodulation results of the system have a good linear relationship (Fig.9). Based on the linear experiment, two cooling tests and one heating test were repeated. The temperature measured by the three demodulation experiments is in good agreement with the actual measured temperature without obvious hysteresis and drift (Fig.10), and the repeatability of the demodulation results of the system is good. The multi-grating demodulation of the system is tested experimentally, which still shows good

linearity and demodulation accuracy (Fig.11, Tab.2).

Conclusion Through theoretical and experimental research, combined with tunable laser, a FPGA high-precision FBG sensing demodulation system based on adaptive peak finding algorithm is designed and built. The system is based on FPGA platform, the photoelectric detection module is designed, and the Kalman-moving mean hybrid filter algorithm is embedded to reduce the noise of the spectral signal, which effectively reduces the influence of noise disturbance on the peak finding accuracy. The peak judgment algorithm and the double centroid algorithm are used to realize the fast and high-precision demodulation of the peak center wavelength of multiple FBG, which effectively improves the demodulation accuracy. To some extent, it solves the shortcomings of the current fiber Bragg grating demodulation system, which is difficult to deploy in the demodulation equipment and requires the help of the host computer for demodulation. The temperature measurement experiment shows that the demodulation accuracy of the central wavelength of the FBG temperature sensor can reach ± 3 pm, the fitting linearity of temperature and wavelength change is above 0.998 5, and the system shows excellent stability and repeatability. It provides a useful reference for the portability, integration and engineering of fiber Bragg grating demodulation system.

Key words: FBG; photoelectric detection; Kalman-moving mean hybrid filter; multi-peak adaptive peak finding

Funding projects: Independent Project of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (SKLGP2023Z017)