

激光与光电子学进展

光纤光栅高精度解调算法研究进展综述

韩超, 胡宾鑫*, 朱峰, 宋广东, 张华, 李铁牛, 阳铖权
齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 济南 250300

摘要 光纤布拉格光栅传感器采用中心波长的变化反映被测量的变化,因此提高光纤布拉格光栅波长的解调精度具有重要意义。传统的解调算法大多抗噪性能差、解调精度有限,且无法对重叠光谱和畸变光谱进行精确解调,限制了解调系统的发展。高精度解调算法主要解决抗噪性能差、寻峰精度低等问题,能够实现传感器网络的精准解调。本文介绍了光纤光栅的传感原理,说明了光纤光栅的主要类型和制作方法。综述了近几年高精度光纤光栅波长解调算法,分单峰检测寻峰算法和多峰检测寻峰算法两种类型阐述了每种解调算法的原理和优缺点,并对未来的光纤光栅高精度解调算法进行了简要分析和展望。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 解调精度; 寻峰算法; 传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1300005

Review on Progress of High-Precision Demodulation Algorithm of Fiber Bragg Grating

Han Chao, Hu Binxin*, Zhu Feng, Song Guangdong, Zhang Hua, Li Tieniu, Yang Chengquan

Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250300, Shandong, China

Abstract The fiber Bragg grating sensor reflects the change of the physical quantity measured by the change of the center wavelength, so it is of great significance to improve the demodulation accuracy of the wavelength of the fiber Bragg grating. Most of the traditional demodulation algorithms cannot accurately demodulate overlapping spectra and distorted spectra because of poor anti-noise performance and limited demodulation accuracy, which limits the development of demodulation systems. The high-precision demodulation algorithm can realize accurate demodulation of sensor networks by solving the problems such as poor anti-noise performance and low peak-finding accuracy. The article introduces the sensing principle of fiber grating, explains the main types and production method on fiber grating, and summarizes the high-precision wavelength demodulation algorithms of fiber Bragg grating in recent years. The principle, advantages, and disadvantages of each demodulation algorithm are explained which is divided into two types: single-peak peak-finding algorithm and multi-peak peak-finding algorithm. And the article briefly analyzes and prospects the future of high-precision demodulation algorithms of fiber Bragg grating.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; demodulation accuracy; peak-finding algorithm; sensor

1 引言

压电式传感器是一种基于压电效应的传感器,它的敏感材料由压电材料制成。当压电材料受到外界力的作用时产生压电效应生成电荷,向外界输出正比于

所受外界力的电量,因此压电传感器被广泛应用于应力的检测和振动信号的监测^[1]。在使用过程中,压电式传感器因其有源带电需要进行防潮处理。矿井、大坝、桥梁等建筑结构的测量环境恶劣,易降低压电式传感器的测量精度,甚至会损坏传感器。此外,其输出的

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-08-15; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 山东省自然科学基金博士基金(ZR2019BEE019)、山东省科学院青年博士基金(2020QN005)、山东省深部冲击地压灾害评估工程实验室开放项目(LMYK-2021-010)、齐鲁工业大学(山东省科学院)2020年度本科生学术攀登计划(GDPD202006)、科教产融合科技创新工程国际合作项目(2020KJC-GH16)

通信作者: *bxhu@qlu.edu.cn

直流电稳定性差,需添加电荷放大器和高输入阻抗电路来克服这一缺陷,增加了传感器的生产成本。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器因其体积小、稳定性好、精度高、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、成本低、无源本质安全等优点被广泛应用于矿山、桥梁、大坝、火车、飞机及复合结构的健康监测^[2-19]。因其自身形态的多变性,可制成检测探头来检测外界环境的变化^[20]。波长编码的光纤光栅传感器可埋入智能结构中,能够直接或间接对振动、温度、应力等物理量进行检测。光纤光栅传感器主要是通过波长漂移来判断待测量的变化,而波长漂移对应的是反射谱的中心波长位置变化,因此光谱中心波长的快速准确解调是实现光纤光栅监测系统高精度测量的重要保障^[21]。

光纤光栅传感器广泛应用于工程和工业领域,传统的光纤光栅解调算法存在精度低、运行速度慢、抗噪性能差的缺点,已不能满足高精度、实时动态解调系统的要求。光源、复用技术、噪声、测量器件的非线性温度漂移,以及外界环境导致的光谱畸变和光谱重叠等因素是造成光纤光栅传感器解调精度不高的主要原因,改善上述问题成为了近几年来研究热点。到目

前为止,相关科研人员和专家提出了多种提升光纤光栅解调精度的算法。根据这些解调算法的特点,本文总结对比几种提升光纤光栅解调精度的算法,主要从单峰检测和多峰检测这条技术路线来进行深入讨论。

2 光纤光栅传感技术

2.1 光纤光栅传感原理

光纤光栅是石英制成的玻璃细丝。在结构上,它主要是由外层的包层和内部的纤芯构成。为保证光纤光栅在受到外力时不易折断,一般在其外层会加一层涂覆层。图1展示了光纤光栅的物理结构。利用紫外光对裸纤进行曝光刻写,使在刻写的区域内折射率沿光纤轴向呈周期性变化,因而形成了具有特殊光敏特性的光纤光栅^[22]。光纤光栅可以看作是一个具有窄带光源特性的滤波器或反射镜,只允许特定波长的光透射或反射,这个特殊的波长就是光纤布拉格波长^[23]。该波长的计算公式为

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

式中: n_{eff} 表示光纤光栅的有效折射率; Λ 表示光纤光栅的栅格周期长度。

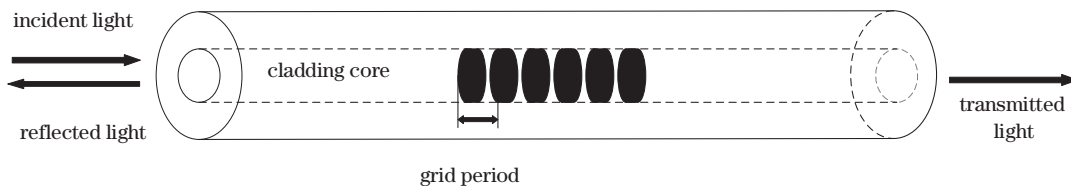


图1 光纤光栅的物理结构图

Fig. 1 Physical structure diagram of fiber grating

光纤光栅因特殊的温度和应力传感特性被作为传感器广泛应用于各个领域。因光纤光栅在拉伸、弯曲、扭转作用或者其所在的温度变化时,其内部的参数会发生变化,从而体现在光纤布拉格波长的变化上^[24]。对式(1)做微分计算可得到光纤布拉格波长的变化与栅区有效折射率变化和栅格周期变化的关系,其表达式为

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda. \quad (2)$$

温度对光纤光栅的影响主要是由光纤的热光效应、热膨胀效应和热弹效应的叠加作用所决定的,光纤光栅所处环境的温度场一般是均匀的,热弹力效应可以忽略^[25]。在温度改变时,光纤光栅的热光效应使得光纤光栅的有效折射率发生变化,进而改变光栅的布拉格波长。当在光纤光栅轴向对其施加压力时,对光栅的影响也体现在三个方面。一方面是压力导致光纤光栅产生拉伸形变,造成其栅格周期长度产生变化^[26]。另外两个方面分别是在轴间压力作用下产生的弹光效应和波导效应。弹光效应会导致弹性体的折射率发生变化,而波导效应使得光栅的直径发生改变,从而间接引起其有效折射率的改变^[26]。

2.2 光纤光栅的分类

光纤光栅常见的有光纤布拉格光栅、啁啾光纤光栅、倾斜光纤光栅、切趾光纤光栅、长周期光纤光栅(LPFG),除此以外,还有相移光纤光栅、取样光纤光栅、光子晶体光纤光栅^[27]。

1) 光纤布拉格光栅

光纤布拉格光栅的纤芯折射率均匀分布,呈周期性,其周期一般在500 nm左右,反射峰一般在1550 nm的通信波段附近^[28]。光纤布拉格光栅因其耐腐蚀、体积小、抗电磁干扰能力强,被广泛应用于温度、应力和压力测量。普通光纤布拉格光栅因其栅区的两端折射率相较于邻近纤芯是骤然升高的,没有均匀、渐变的过渡,使得反射谱产生较大的旁瓣,因此解调系统中需要加入解调算法去除反射谱中的旁瓣和噪声,提高解调精度^[28]。

2) 啁啾光纤光栅

啁啾光纤光栅是指栅区折射率包络沿轴线呈线性变化,其主要造成的变化就是反射谱展宽以及造成的各个波长的光的群延时的差异,这一特点被应用于光纤通信系统中的色散补偿^[29-30]。弥补了传统色散补偿

成本高、损耗大和非线性等缺陷。

3) 倾斜光纤光栅

纤芯中的折射率条纹与纤芯轴线呈现明显的倾斜角度,使得纤芯中传输光波更容易与包层耦合。倾斜光纤光栅不仅具备长周期光纤光栅的特性,还具备普通均匀光纤布拉格光栅的特性^[31]。既能发生纤芯模之间的自耦合,也能发生纤芯模与包层模之间的互耦合,可用于制作温度传感^[32]、折射率^[33]、化学^[34]、生物传感器^[35]。

4) 切趾光纤光栅

在工业中实际使用的光纤布拉格光栅是经过切趾处理的光纤布拉格光栅,与普通光纤布拉格光栅相比,切趾光纤光栅的栅区两端都有一个渐变的过渡,使得折射率调制包络呈现一定的函数形式,能够很好地抑制反射谱的噪声和旁瓣^[27]。通过掩模法、扫描法等均能获得优良的切趾光纤光栅^[36-37]。

5) 长周期光纤光栅

长周期光纤光栅最早使用相位掩模法制得^[38],栅区中的折射率分布周期和谱宽明显长于所有的FBG,易于与包层模耦合,在传输一定的距离后形成透射谱中的损耗峰,同时也能够被用于掺铒光纤放大器的增益平坦^[39]和带阻滤波^[40]。因纤芯模与包层模耦合,包层模易受温度、压力、折射率的影响,长周期光纤光栅被广泛应用于生物、化学等光纤传感领域,且无需进行结构强度的修改^[28]。

光纤光栅分类的重要因素是纤芯中折射率的分布,可通过改变光纤光栅纤芯内折射率分布情况改变光纤光栅的性质,其中波长随有效折射率的增大而减小。光纤光栅种类繁多,形态各异,选择合适的光纤光栅可在传感器方面提高解调精度,进一步提高解调系统的测量准确度。光纤布拉格光栅因其抗干扰能力强、成本低,被广泛应用于工业和工程领域,需加入高精度解调算法提高解调精度;啁啾光纤光栅可用于光纤通信系统中的色散补偿,降低成本,减小损耗;长周期光纤光栅的栅区谱宽和折射率分布周期长于所有光纤光栅,无需结构强度的修改,用于制作生物化学等传感器;倾斜光纤光栅除具备普通光纤光栅的特点外,还具备长周期光纤光栅的特性;切趾光纤光栅可有效抑制反射光谱的噪声和旁瓣,但制作成本较高。目前工程上使用的是普通光纤光栅,使用高精度的解调算法进行解调。该方法具有可移植性,可在任意光纤光栅检测系统中使用,降低了系统的硬件成本。

2.3 光纤光栅的制备方法

1) 纵向驻波干涉法

最早被用来制作光纤光栅的方法,利用了掺铒光纤的光敏性。将488 nm的连续Ar离子激光耦合进光纤的纤芯中,反射镜设置在纤芯的另一端,从而在纤芯内部形成驻波干涉场。当曝光时间足够长后,驻波干涉场与掺铒光纤作用,使纤芯折射率发生变化,在纤芯中产生

与干涉场一致的折射率分布,撤去激光后折射率变化会稳定存在^[27]。该方法效率低、稳定性差、实用性差。

2) 全息曝光法

全息曝光法是一种最早提出的较为实用的光纤光栅制备方法。通过分束镜将一束紫外激光一分为二,分别经两个反射镜反射并会聚后,两束相干的紫外光束相交产生周期性的干涉场。将剥去涂覆层的掺铒光纤放置在干涉场区域进行曝光,栅区内就产生折射率的周期性变化而形成光栅^[27]。该方法结构简单,刻蚀效率高,优于驻波干涉法,但面临着光源稳定性的问题和相干性的问题。

3) 相位掩模法

相位掩模法是唯一一种光纤光栅工业化制备方法。通过掩模版的相邻缝隙产生的干涉光场来改变干涉场中的光敏光纤纤芯折射率^[27]。该方法工艺简单、成品率高、对光源稳定性不敏感,容易制作出切趾光纤光栅。

4) 振幅掩模法

振幅掩模法最早用于长周期光纤光栅的制作,该方法与相位掩模法基本相同。差异在于相位掩模版是基于衍射现象产生的干涉条纹所形成的干涉场,而振幅掩模版是单纯的在不透光的金属板上镂空出栅状结构。激光束经过振幅掩模版后可直接形成周期性、敏感相间的光场,将具有光敏性的裸光纤放置在光场中曝光即可。

5) 激光直写法

激光直写法将聚集后的激光束直接作用在光线的纤芯上,通过激光的热效应引发纤芯折射率的改变,而后通过机械式位移台或扫描振镜在纤芯中产生折射率调制,从而制得一个完整的栅区^[27]。后来的红外飞秒激光刻蚀长周期光纤光栅提高了栅区的稳定性^[28]。该方法具有较高的灵活性,不需要使用昂贵的掩模版。但要求位移台和激光束的控制精度达到微米级,且光点尺寸过小,光纤纤芯和聚焦光斑校准度低,整体制作效率低^[27]。

6) 微弯变形法

对光纤纤芯施加作用力,使得光纤产生微形变,利用光弹效应产生的折射率调制^[27]。该方法具有结构简单、热稳定好等优点。

7) 腐蚀法

腐蚀法主要是通过氟化氢对光纤包层进行周期性腐蚀,使得光纤包层形成周期性环槽。因纤芯的有效折射率与包层半径和包层折射率都有关联,因此提高改变包层结构就能改变纤芯的有效折射率。当包层的表面结构发生周期性变化时,纤芯的有效折射率也会发生周期性改变。该方法制备的光纤光栅非常适用于测量压力及扭矩形变^[27]。

综上,相位掩模法具有独特的优势,光源稳定,容易实现,但生产成本较高。纵向驻波干涉法实用性差、效率低,该方法的缺点在于纤芯必须一直曝光在激光

下,需在光纤周围配置一个稳定的激光源。全息曝光法结构简单、刻蚀效率高,对光源的稳定性要求高,不稳定的光源会影响到光纤的制造工艺;此外,两束紫外光的相干度需达到工艺要求。激光直写法对位移台和激光束的控制精度要求高,需使用高精度控制算法提高控制精度;同时也应增大光点的尺寸,提高光纤光栅的生产效率;采用微弯变形法生产的光纤光栅具有良好的稳定性。今后的光纤光栅会更加偏向于以上几种方法的结合,取长补短,生产更加精密的光纤光栅,为提高解调系统的精确度奠定硬件基础。

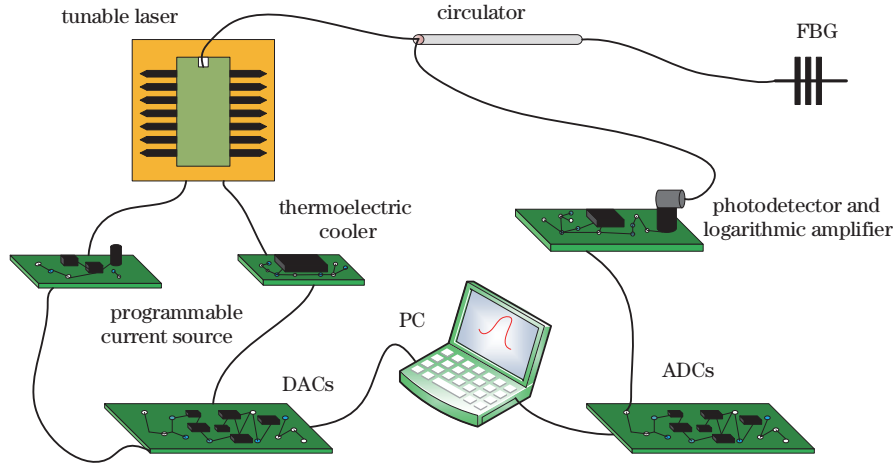


图 2 基于可调谐激光器的光纤光栅解调系统简图

Fig. 2 Diagram of fiber grating demodulation system based on tunable laser

光纤光栅解调系统的测量精度取决于FBG波长解调精度,因此提升FBG波长解调方法的精度和运行速度至关重要。

2.5 光纤光栅解调方法概述

目前,基于FBG波长检测解调算法主要包括光谱检测法、匹配光栅法、边沿滤波法、非平衡臂干涉法和扫描激光器法等。光谱检测法适用于低速变化的物理量测量,可利用光谱仪对峰值波长偏移进行直观展示,具有精度高、易于操作的优点,但该方法仅适用于低速扫描,不适用于物理量的快速变化。匹配光栅法采用两只完全相同的FBG搭建系统,分辨率较高、经济成本低,但对两只FBG参数的一致性提出了较高的要求。边沿滤波法有较快的响应速度,在对光强进行探测的同时,也将光源光谱的功率波动误差引入到系统中,降低FBG的解调精度。非平衡臂干涉法采用不等臂长的干涉装置搭建系统,干涉光谱的输出相位随FBG反射光谱的偏移而变化,该方法响应速度快,适用于动态参数的多点多通道测量,但干涉装置易受环境影响,增加了解调算法的设计难度。扫描激光器法是目前FBG快速解调领域的主要方法,采用光源对FBG反射峰进行扫描,当反射峰的中心波长等于光源输出的波长时,可检测到光谱的功率峰值点。该方法具有高分辨率,可用于高速、高精度动态解调,便于形

2.4 光纤光栅传感系统简图

基于可调谐激光器的光纤光栅传感器解调系统原理图如图2所示,可调谐激光器发出的光进入环形器并到达FBG传感器,反射光通过光电探测器(PD)转换成电流,再经对数放大器(LA)转换成电压,并进入模数转换器(ADC)。可调谐激光器的温度通过温度控制器(TEC)保持为恒定值,可编程的电流源(PCS)为激光器提供锯齿波调制电流,调谐频率为恒定值。微控制器(MCU)控制ADC采集光谱数据,通过以太网接口发送到计算机进行波长解调和数据处理。

成波分复用的传感器网络。扫描激光器法的研究方向是增加系统的复用能力,提高解调分辨率,实现FBG反射光谱峰值的精确测量,同时保证一定的解调速度。该方法的研究热点主要集中在光源、复用方法和解调算法等方面。

光源是测量范围及解调频率的主要限制因素^[28]。当紫外激光条纹强度不均匀时,优于光面光纤对入射紫外光的非线性响应,沿曝光光纤段的折射率也将呈现非线性,进而使FBG反射光谱发生变化。在光源研究上,Ball等^[41]将分布式布拉格反射(DBR)扫描光源引入FBG解调系统,实现波长分辨率为2.3 pm,灵敏度为0.2 °C的温度传感。Zhang等^[42]采用分布反馈激光(DFB),将传感器个数和实时解调频率分别提高至10只和100 kHz。Chen等^[43]实现基于单纵模激光二极管波长扫描的应变和温度传感,使应变和温度测量分辨率降低至0.11 μs和0.014 °C。张治国等^[44]用可调谐环形腔构成的光纤扫描激光器,实现了4.04 nm范围、精度为0.02 nm的FBG波长探测。通过升级改造激光器的结构可提升光源质量,提升FBG的波长分辨率和灵敏度、增加FBG传感器的可识别个数、提高实时解调频率,进一步提高解调精度,从而实现了解调系统的优化。

复用技术的提出使大面积、多探测点的结构监测成为可能。波分复用在一條传感链路上串联多个中心

波长不重叠的 FBG 传感器, 获取各传感器的波长信息实现解调^[45]。空分复用采用并行拓扑结构, 将 FBG 分配在多个通道, 通过快速光开关选择解调通道, 使各 FBG 独立工作互不影响^[46]; 时分复用技术通过在各 FBG 间连接特定长度的光纤, 使传感信号间具有特定的时间延迟从而实现解调^[47]。波分复用技术的发展使得 FBG 传感器网络理论和技术成为研究热点, 为进一步提升系统的解调精度奠定了基础。传感器网络可同时检测多个物理量、探测多个监测点, 极大促进了工程技术的发展。

解调方法研究主要集中在波长参考和寻峰处理上, 可通过在解调系统中引入参考光栅, 检测 FBG 反射光谱的相对移动量实现解调^[48]; 利用 C₂H₂ 气室^[49]、HCN 气室^[50] 构成温度稳定的波长校正模块, 提高解调精度及波长解调稳定性; 引入辅助迈克耳孙干涉仪, 将参考波长进一步细分, 使处于变温环境的解调系统误差小于 $\pm 3.5 \text{ pm}$ ^[51]。为减小解调系统的硬件经济成

本, 高精度光纤光栅解调算法应运而生, 现从单峰检测和多峰检测两条技术路线对光纤光栅解调算法进行综述和比较。

3 单峰检测解调算法

FBG 的反射光谱波形具有窄带、高反射率、两侧陡峭的特点。如图 5 所示, 实测的反射光谱 [图 3(b)] 与标准的高斯理论模型 [图 3(a)] 有较大区别, 其底部噪声较多, 光谱两侧的图像扭曲, 顶部扁平且有局部的波动。FBG 的反射光谱是纤芯内折射率调制的合成结果, 容易受到制造工艺、环境温度、应变等因素的影响, 在实际应用的过程中, 光路连接器和探测器等设备本身的非线性及延迟等原因会造成反射光谱的变形^[52]。目前传统的单峰检测寻峰算法有直接寻峰算法、一般多项式拟合法和高斯拟合算法等 6 种, 其功能较为单一。科研人员在此基础上对它们进行了改进, 现对传统和改进型两种单峰寻峰算法分别进行阐述。

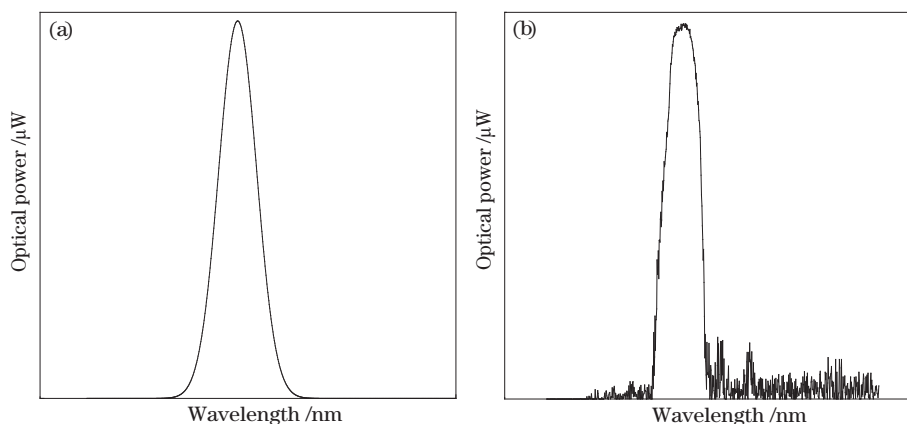


图 3 FBG 反射光谱的高斯拟合模型和实际波形。(a) 高斯拟合模型; (b) 实际波形

Fig. 3 Gaussian fitting model and actual waveform of FBG reflection spectrum. (a) Gaussian fitting model; (b) actual waveform

3.1 传统寻峰算法概述

常用的寻峰算法有直接寻峰算法、功率加权算法(质心法)、高斯拟合算法、一般多项式拟合法、高斯-多项式拟合法、高斯非线性曲线拟合法等。直接寻峰算法选取采样数据的最大值作为峰值, 该方法最简单。但采集的数据为孤立不连续的数, 光谱图像极易受到噪声的影响, 抗噪性能较差, 误差最大。图 4(a) 为直接寻峰算法的误差原理图。功率加权算法又称质心法, 其原理是以反射光功率为加权系数, 计算波长的加权平均值, 得到反射光功率在波长方向的中心位置, 将该值作为反射谱的中心波长, 同时也能体现整个谱上功率的分配状况。该方法的所采集的数据容易受到噪声影响, 抗噪性能差, 对波长分辨率、窗口大小、信噪比敏感。图 4(b) 为功率加权算法的误差原理图。

一般多项式拟合法的原理是对波形曲线进行分峰截幅后, 将拟合函数用多项式表示, 用最小二乘法作判定。该算法将采集到的数据代入拟合式计算

出系数, 再拟合成波形, 对采集数据的准确性要求很高, 抗噪性能较差。若峰值点没有被采集到, 则寻峰误差较大。

高斯拟合算法的原理是对波形曲线分峰截幅后, 直接作为高斯函数进行拟合处理, 图 5 为高斯拟合算法的原理图。拟合原理是采用最小二乘法得到最佳拟合曲线, 拟合式的均值即为峰值波长。高斯拟合算法的表达式与原始信号类似, 能较为准确地寻峰。拟合原理是将其均方差达到最小值, 不要求一定要采集到峰值点, 因此抗噪性能最好。且当波长分辨率、窗口大小和信噪比变化时, 误差变化较小, 可靠性高。

高斯-多项式拟合法的原理是对波形曲线进行高斯-多项式变换, 采用一般多项式拟合法得到峰值位置。该算法是将采集到的数据代入多项式, 先计算系数, 再反对数变换, 精度介于高斯拟合算法和一般多项式拟合法之间。拟合曲线过分依赖所观测得到的数据, 若峰值点不在观测点内, 则误差较大。

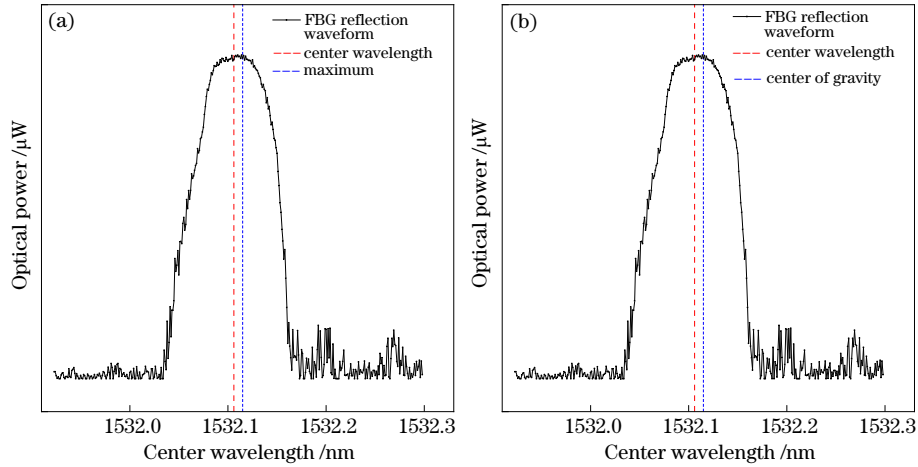


图 4 两种算法误差原理图。(a)直接寻峰算法,(b)功率加权算法

Fig. 4 Error schematic of two algorithms. (a) Direct peak-finding algorithm; (b) power weighting algorithm

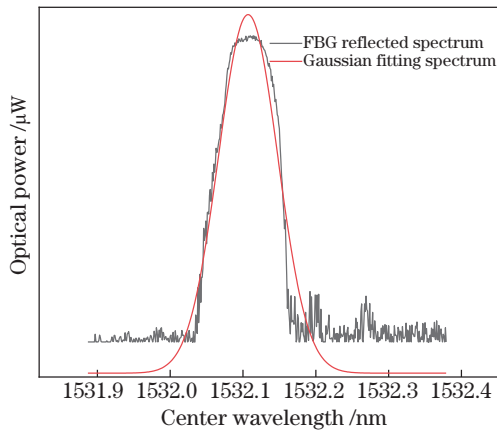


图 5 高斯拟合算法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of Gaussian fitting algorithm

高斯非线性曲线拟合算法的原理是将波形数据分峰截幅,假设事先已经知道函数的非线性关系,

$$y = f(x; a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}), \quad (3)$$

则其最佳拟合系数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{m-1}$ 通过最小二乘法来确定。高斯非线性曲线拟合算法的寻峰精确度高,但有两个未知数无法确定,该算法不实用。

表 1 总结了六种传统光纤光栅解调算法的解调精度、抗噪性能和优缺点。高斯拟合算法的解调精度高,具备良好的抗噪性能,成为相关专家学者下一阶段的改进热点。在寻峰算法相同时,波长分辨率越高,寻峰误差越小。在同一波长分辨率的情况下,质心法的寻峰误差最大,高斯非线性拟合算法误差最小,因高斯非线性拟合算法的表达式与光栅反射谱的信号相似,因此能够比较准确地寻峰^[53]。质心算法是以观测到的数据来计算,噪声导致反射光谱波动较大时,峰值波长误差也相对应较大,抗噪性能最差。这种方法只有在有害干涉噪声信号及电子噪声比较小的情况下,寻峰误差才会比较低。

表 1 6 种传统光纤光栅解调算法总结

Table 1 Summary of six traditional fiber grating demodulation algorithms

Algorithm	Demodulation accuracy	Anti-noise performance	Evaluation
Direct peak-finding	Low	Low	Higher requirements on the number of sampled spectral points
Power weighting algorithm (centroid method)	Low	Low	Peak-seeking error will be reduced in the case of low noise
General polynomial fitting	Middle	Low	Accuracy is with regard to the observed data. If the peak value is not within the sampling point, the error will be large
Gaussian fitting algorithm	High	High	Strict requirements on spectrum
Gaussian-polynomial fitting algorithm	Middle	Low	Accuracy is with regard to the observed data. If the peak value is not within the sampling point, the error will be large
Gaussian nonlinear curve fitting algorithm	High	High	Be not applicable to actual situation

3.2 改进型 FBG 单峰寻峰算法

采用对称高斯函数所建立的数学模型表达式为

$$I(\lambda) = A \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中： λ_B 为 FBG 的中心波长； $\Delta\lambda_B$ 为 3 dB 带宽； A 为反射谱的幅值。常用的高斯拟合算法对采集数据的精度具有强依赖性，抗噪能力差；有效采样点数量少，反射峰在采样点之间移动时误差变化大；且 FBG 封装时易产生啁啾现象，形成非对称反射峰，拟合误差大^[54]。为提高 FBG 反射谱的寻峰精度，提出了许多改进型的单峰寻峰算法。

胡正文、庞成鑫等在高斯拟合算法的基础上提出了一种基于 Levenberg-Marquardt (LM) 优化的高斯寻峰算法，即通过 LM 算法优化高斯拟合函数。LM 算法是对高斯-牛顿法和梯度下降法的优化，既有梯度下降法的全局特性，又有高斯-牛顿法的局部收敛性。该算法的中心波长误差由 ± 0.2 nm 降低到 ± 0.03 nm。同时减少了 FBG 反射光谱的中心波长检测系统的资源消耗，但解调误差较大，需进一步提高解调精度^[55]。图 6 为高斯拟合及 Gaussian-LM 算法的拟合对比图，图 7 为中心波长真实值的标定及高斯与 Gaussian-LM 算法的对比图。

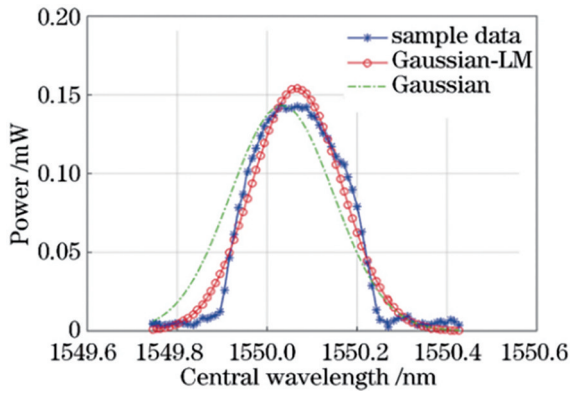


图 6 高斯拟合及 Gaussian-LM 算法的拟合对比^[56]

Fig. 6 Comparison of Gaussian fitting and Gaussian-LM algorithm fitting^[56]

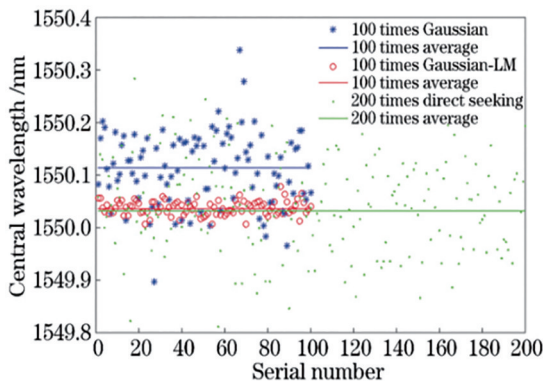


图 7 中心波长真实值的标定及高斯与 Gaussian-LM 算法的对比^[56]

Fig. 7 Calibration of true value central wavelength and comparison of Gaussian and Gaussian-LM algorithms^[56]

为进一步提高解调精度，翟新伟等^[56]提出了基于小波变换的高斯曲线拟合在峰值定位算法，利用小波变换对反射光谱信号进行分解，对小波细节分量进行

阈值量化处理。在此基础上，运用处理后的细节分量和近似分量对信号进行重构；然后对重构后的信号进行插值并做高斯曲线拟合处理，使用 LM 算法优化高斯拟合系数，使解调精度误差在 5 pm 以下。

2013 年，陈勇等^[57]在高斯多项式拟合算法的基础上提出了三点寻峰算法，分析了影响算法精度的三个因素，即窗口大小、稀疏数据个数和波长间隔。通过 FBG 反射谱确定窗口大小，设定重采样分辨率对窗口内的光谱进行重采样得到稀疏光谱数据，设定合适的波长间隔设置三点进行寻峰。该算法的寻峰精度约为 0.4 pm，增加了寻峰的准确性，但未考虑考虑光谱不对称的情况，图 8 为三点寻峰算法的示意图。为克服这一缺陷，陆祈祯等^[58]提出基于光谱奇偶函数分解的光纤布拉格光栅峰值检测方法，因宽带光功率谱密度波形与 FBG 光谱波形相似，可用于非对称高斯函数建立光谱模型。通过寻找系列平移的 FBG 光谱奇函数最大值中的最小值来确定 FBG 光谱的“重心”，并将其作为 FBG 的中心波长。该算法的均方根误差最小，抗噪性能优于蒙特卡罗算法和非对称高斯模型算法，比高斯模型算法差，需进一步提升算法的抗噪性能。

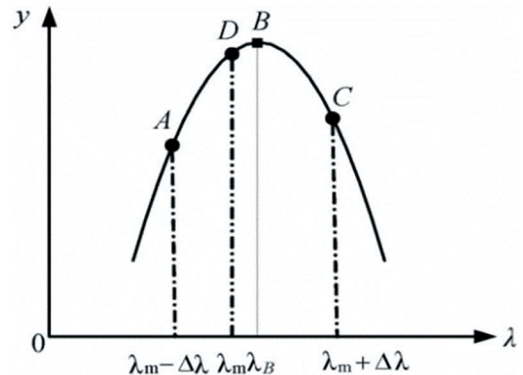


图 8 三点寻峰算法示意图^[58]

Fig. 8 Schematic diagram of three-point peak-finding algorithm^[58]

因图像处理算法在目标识别和位置提取中具有精度高、专用芯片实现并行快速处理等特点，王巧妮等^[52]将图像处理用于光纤光栅的波长解调，提出了基于 Steger 算法的 FBG 寻峰算法，其本质在于提取灰度曲线的峰值点位置。该算法具有良好的抗噪性能，在光谱非对称系数 $\alpha \leq 4$ 的范围内，其检测误差在 1 pm 的范围内，优于其他算法。为提高算法的光谱自适应性，2016 年王巧妮等^[59]在 Steger 算法的基础上提出了一种基于自适应的光纤布拉格光栅图像寻峰算法，该算法的核心是通过高斯模板及一阶、二阶微分形式与 FBG 反射光谱进行卷积，能自动检测光谱实际特征带宽、步长大小并自适应地调节算法参数，图 9 为高斯模板及其一、二阶微分形式与原光谱信号的卷积结果。在计算过程中对光谱进行噪声预处理并获得光谱的非对称情况及峰值波长等特征。同时，提高了算法在不

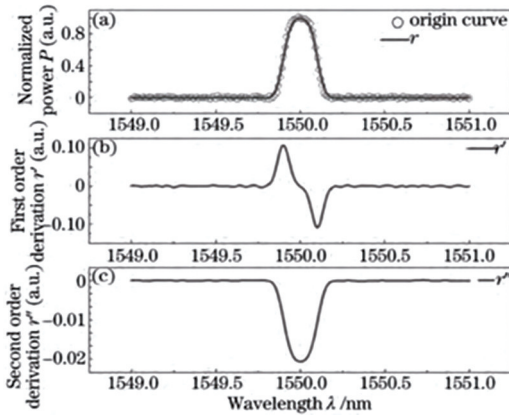


图9 高斯模板及其一、二阶微分形式与原光谱信号卷积结果^[53]

Fig. 9 Convolution results of Gaussian template and its first- and second-order differential forms with the original spectral signal^[53]

同噪声、光谱宽带及光谱形状的自适应寻峰能力,精度控制在 ± 1 pm的范围内。

在实际进行非均匀应变测量时,传感系统往往采集到的是畸变的FBG反射谱,通过处理后可以得到归一化的反射谱,但反射谱的真实反射率未知。遗传算法及其改进算法、粒子群算法及其改进算法、模拟退火算法、单纯形法和差分进化算法等基于机器学习的FBG解调算法都将计算光谱与测量光谱之间的闵可夫斯基距离(称为P范数)作为目标函数,当能够获取到测量光谱的反射率时,都能取得较好的寻峰结果。2019年,张伟等^[60]提出了改进光纤光栅应变分布解调算法中优化目标函数的理论与方法,针对传统算法仅适用于能获知FBG真实反射率的情况,利用相关系数改进FBG应变分布解调算法中优化目标函数的理论方法,为了尽量避免陷入全局最优,将该算法与差分进化算法相结合。在无法获知FBG真实反射率的情况下,依然可以对FBG进行解调,进一步提高了畸变光谱的解调精度。

Zhang等^[61]发现在使用搜索反射峰位置解调算法时,其解调精度受到FBG反射光谱的半峰全宽(FWHM)的严重限制。为克服这一问题,使用一种基于幅度比曲线的高精度解调方法代替FBG反射光谱。用正弦函数对FBG的波长进行周期性调制,得到一系列反射光谱。然后在每个波长计算二次谐波频率分量和基频分量之间的幅度比以创建幅度比曲线。与基于FBG反射光谱的解调方法相比,布拉格波长的平均最大测量误差(MME)从 ± 1.54 pm降低到 ± 0.15 pm,进一步完善了FBG解调技术。

解调精度除受到噪声、畸形光谱的影响外,还会受到元器件的非线性因素干扰。2018年,Jiang等^[62]发现高电增益和高波长扫描频率会在PD输出的FBG反射峰右侧引起拖尾失真,提出了一种用于高增益或高速传感的容忍失真FBG解调方法,用PD的时间响应函数

来拟合具有失真的峰值并确定FBG反射光谱上的峰值位置。与传统的高斯拟合方法相比,基于时间响应的方法的测量误差限制在 ± 1.777 pm内,标准偏差小于 0.940 pm,基本解决了PD输出的反射谱右尾失真现象。

综上,高斯拟合算法为传统单峰检测算法中最理想的算法,但对采集的数据具有依赖性,抗噪性能差。LM算法降低了解调系统的复杂性,提高了高斯拟合算法的抗噪性能和解调精度。小波变换法对光谱进行了分解和阈值量化处理,进而对光谱图像进行了重构,最后采用LM算法寻找到峰值点,解调精度进一步提高。三点寻峰算法对光谱图像对称性要求较高,在满足对称要求的情况下,解调精度可在 1 pm以下。图像处理算法的引入为光纤光栅的解调提供了新的思路,在提高精度的同时不再受制于光谱的对称性,进而提升了抗噪性能。

4 多峰检测寻峰算法

随着信息技术的发展,单只FBG传感器已无法满足测量需求。为更好地实现在工业和工程上的测量,将多个FBG传感器连接组成传感器网络,可以实现多种物理量的测量及传感器通信,FBG多峰检测算法应运而生,图10为FBG传感器网络解调系统简图。宽带光源发出光进入环形器并到达光分路器,将分出的光传送给FBG传感器网络。反射光进入OSA光谱分析仪并通过以太网接口发送到计算机进行波长的解调与数据处理。直接寻峰法、一般多项式拟合法、高斯拟合法、质心法、高斯多项式拟合算法和高斯非线性曲线拟合算法等传统解调算法已不能满足多峰检测要求。为更加精确地提高FBG传感器网络的解调精度和运行速度,研究人员对多峰解调算法展开了研究。

针对寻峰算法不能自适应检测光纤布拉格光栅多峰值光谱的问题,陈勇等^[63]提出了一种多峰自适应寻峰算法。采用滑动均值滤波法对光谱信号进行去噪预处理,并结合希尔伯特变换对多峰光谱自适应峰值区域分割。因光谱谱峰的不对称性,采用基于非对称广义高斯模型的峰值修正策略,实现了峰值的精确定位,图11为希尔伯特变换效果图。该算法稳定性较好,检测误差在 1 pm以下,对分布式传感网络中的多峰值检测具有借鉴意义。

Liu等^[64]提出了基于希尔伯特变换的多峰检测算法,该算法引入了分而治之的思想,可以从波分复用系统的反射光谱中提取布拉格波长。在经过希尔伯特变换和推导之后,通过分割输入反射光谱来预先定位多峰。同时将分路器阈值设置为零,增强了算法在不同维度下的可移植性,提高解调速度和精度。为分布式FBG传感器网络提供了一种精确的解调算法。

Ding等^[65]提出了一种基于连续小波变换(CWT)的多峰FBG反射谱分割方法。在CWT处理中选择具

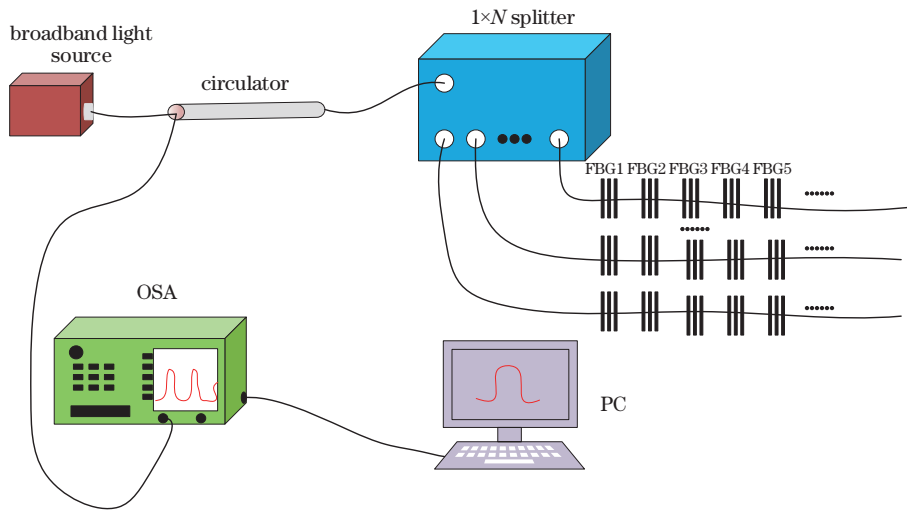


图 10 FBG 传感器网络解调系统简图

Fig. 10 FBG sensor network demodulation system diagram

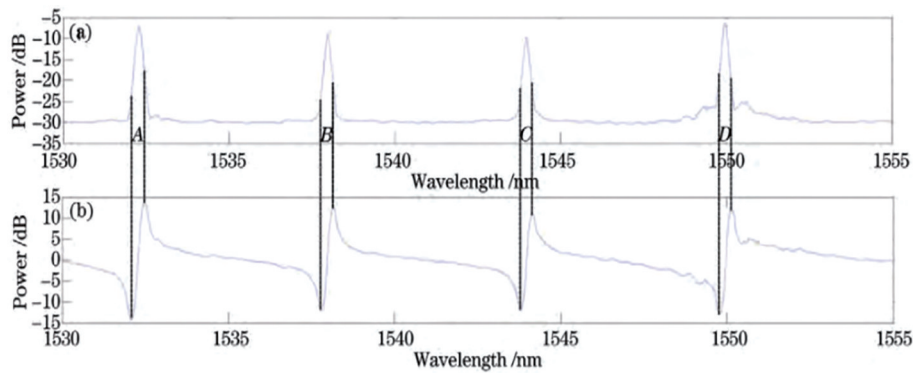


图 11 希尔伯特变换效果图^[64]。(a)平滑后的光谱;(b)希尔伯特变换后的光谱

Fig. 11 Results of Hilbert transform^[64]. (a) Smoothed spectrum signal; (b) Hilbert transformed spectrum signal

有合适尺度的一阶高斯或墨西哥帽小波基。处理后的信号中的极值点用于分割原始信号。模拟了两种情况下的多峰FBG谱:峰和噪声不重叠和峰和噪声部分重叠,对串联在一起的四个FBG进行了实验。结果表明CWT对原始信号进行分割在调整合适的分割长度和获得更准确的中心波长方面具有优势。

Guo等^[66]首次提出基于不变矩检索(IMR)的多峰值FBG解调算法,只需采集FBG光谱的36个数据点,即可实现4个FBG传感器的精确解调。该方法测量精度高,对数据采样分辨率要求较低,采样分辨率可达

20 pm,对微应变解调具有重要的参考价值。

江灏等^[67]在超高斯光谱函数的基础上构造畸变光谱的理论函数,解决了FBG传感器网络畸变光谱解调难度大的问题。将畸变FBG传感网络光谱的解调问题转化为函数优化问题,提出了基于分布式估计算法的波长解调技术。该方法不仅能够保持较高的解调精度,还能够对光谱畸变的程度作出定量估计,其平均误差控制在1 pm以内,图12为光强衰弱、展宽变宽和波形不对称三种畸变光谱的解调结果图。与传统峰值检测解调技术相比,该方法解决了

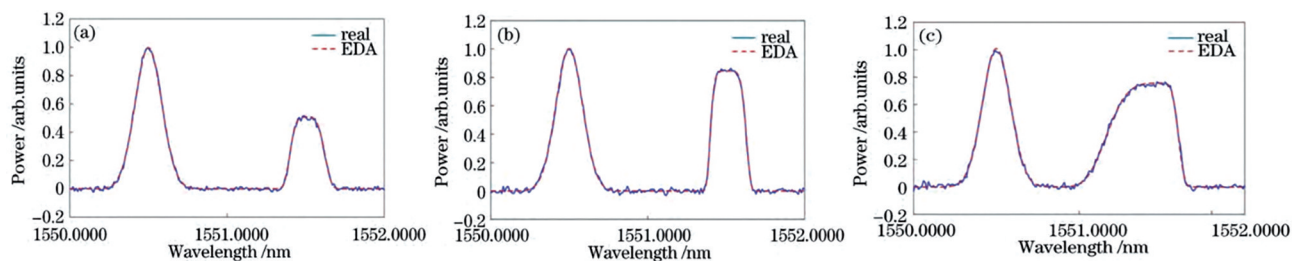


图 12 FBG 不同类型畸变的解调结果^[41]。(a)光强衰减;(b)展宽变宽;(c)波形不对称

Fig. 12 Demodulation results of different types of distortion of FBG^[41]. (a) Light intensity attenuation; (b) spectral broadening; (c) spectral asymmetry

FBG 传感网络畸变光谱波长难以解调的问题,为延长 FBG 传感网络使用寿命提供了新的途径,对提升 FBG 传感网络可靠性具有重要意义。

陈静等^[68]针对有限光源带宽条件下 FBG 传感网络重叠复用的解调瓶颈,提出基于峰值匹配分布式估计算法的波长解调方法,将光纤布拉格光栅传感网络重叠光谱的解调问题转化为函数优化问题利用理论光谱与重叠光谱之间的差异构建优化模型,通过峰值匹配分布式估计算法对该优化模型进行求解得到各光纤布拉格光栅的传感值。其中分布式估计算法采用高斯混合模型构建描述光纤布拉格光栅传感网络的解空间概率分布,由概率模型采样产生新的种群个体,并引入峰值匹配算子消除光纤布拉格光栅峰值错配,通过反复进化最终得到最优解。该方法在大规模光纤布拉格光栅光谱完全重叠的情况下,平均误差可控制在 10 pm 以内;与现有其他解调技术相比,其具有更高的解调精度,能够解决光纤布拉格光栅传感网络光谱在部分重叠甚至完全重叠情况下的波长解调问题,为提升光纤布拉格光栅传感网络复用数量提供了新的解调途径。

5 结束语

本文首先介绍了光纤光栅传感原理、光纤光栅的主要类型和制作方法以及光纤光栅传感技术。然后综述了直接寻峰算法、高斯拟合算法等传统单峰检测寻峰算法,三点寻峰算法、奇偶函数分解法等改进型单峰检测寻峰算法,以及基于希尔伯特变换的多峰检测算法、基于联系小波变换的多峰 FBG 反射谱寻峰算法等多峰寻峰算法。分析了上述算法的原理和解调性能,并对他们的优缺点进行了对比分析。

改进型单峰检测寻峰算法中,LM 算法是对高斯-牛顿法和梯度下降法的优化,既有梯度下降法的全局特性,又有高斯-牛顿法的局部收敛性,与高斯拟合算法相结合,使 FBG 波长的解调精度进一步提高。奇偶函数分解法考虑到了光谱不对称的情况,使用非对称高斯拟合模型进一步提升了解调精度,抗噪性能需进一步加强。基于 Steger 的寻峰算法,将图像处理方法引入到 FBG 解调中,克服了光谱的不对称性。优化目标函数寻峰算法在无法获知 FBG 真实发射率的情况下,仍然可以对 FBG 进行解调,进一步提高了畸变光谱的解调精度。高电增益和高波长扫描频率会在 PD 输出的 FBG 反射峰右侧引起拖尾失真,高增益容忍失真解调算法用 PD 的时间响应函数来拟合具有失真的峰值并确定 FBG 反射光谱上的峰值位置,将误差限定在 ± 1.777 pm 内。FBG 反射光谱的半峰全宽严重限制了解调精度,基于幅度比曲线的高精度解调算法克服了这一缺陷,将平均最大测量误差降低至 ± 0.15 pm。单峰检测算法是多峰检测算法的基础,需进一步提高解调的精度和抗噪性能。主要体现在光谱的非对称

性、光谱局部图像所带来的解调误差和补偿光电探测器的非线性。

多峰检测寻峰算法中,多峰自适应寻峰算法使用希尔伯特变换对多峰光谱自适应峰值区域分割,采用基于非对称广义高斯模型的峰值修正策略,检测误差在 1 pm 以下。基于希尔伯特变换的多峰检测算法引入了分而治之的思想,将多峰检测转换为单峰检测,将分路器的阈值设置为零,增强了算法的可移植性。基于连续小波变换的多峰 FBG 反射谱分割法对原始信号进行分割,调整合适的分割长度能够更加准确地寻找到中心波长。基于不变矩检索的 FBG 多峰解调算法对数据采样的分辨率要求较低,只需要光谱中任意 36 个点即可实现 4 个 FBG 的精确解调。畸变光谱解调算法解决了 FBG 传感器网络畸变光谱波长难以解调的问题,延长了 FBG 传感器网络的使用寿命。在大规模光纤布拉格光栅光谱完全重叠的情况下,重叠光谱解调算法的平均误差可以精确到 10 pm 以内,完善了重叠光谱的解调算法。

因 FBG 传感器网络的大规模使用,未来的光纤光栅高精度解调算法可能会更偏向于多峰检测寻峰算法。主要体现在以下几个方面:1) 单峰检测算法是多峰检测算法的基础,需进一步完善单峰检测算法,解决光谱不对称、光谱局部问题所带来的解调精度低的问题,对光电探测器的非线性进行补偿;2) 将多种算法相结合,取长补短,进一步提高传感器网络的解调精度和速度;3) 重点解决传感器网络的光谱畸变问题和光谱重叠问题,优化光谱畸变解调算法,延长传感器网络的使用寿命。同时,进一步提升光源质量和发展复用技术,为高精度解调算法的实施奠定良好的硬件基础。

参 考 文 献

- [1] 高全芹. 压电传感器动态特性数字化补偿方法应用研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(4): 557-560.
Gao Q Q. Study on digital compensation method for the dynamics of piezoelectric sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(4): 557-560.
- [2] Zhu W X, Shen Q X, Qin H Y. Monitoring of prestress and bond stress of self-sensing FBG steel strand[J]. Measurement, 2021, 177: 109246.
- [3] Zeng B, Zheng Y, Yu J, et al. Deformation calculation method based on FBG technology and conjugate beam theory and its application in landslide monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 63: 102487.
- [4] Fan Q G, Jia Z A, Feng D Q, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm[J]. Optik, 2021, 225: 165559.
- [5] 覃荷瑛, 林勇, 姜涌, 等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 51-55.
Qin H Y, Lin Y, Jiang Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in cable force monitoring of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 51-55.

- [6] 王蒙, 孙志慧, 张琳, 等. 基于 FBG 震动传感器的边境安防系统研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(7): 708-712.
Wang M, Sun Z H, Zhang L, et al. Research of FBG vibration system used for border security[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(7): 708-712.
- [7] Hu B X, Jin G X, Liu T Y, et al. A precision fiber Bragg grating interrogation system using long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(4): 351-358.
- [8] Qin J Q, Yin J H, Zhu Z H, et al. Development and application of new FBG mini tension link transducers for monitoring dynamic response of a flexible barrier under impact loads[J]. Measurement, 2020, 153: 107409.
- [9] Li Y, Wang H P, Cai W B, et al. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors[J]. Measurement, 2020, 153: 107449.
- [10] Jiang S F, Qiao Z H, Li N L, et al. Structural health monitoring system based on FBG sensing technique for Chinese ancient timber buildings[J]. Sensors, 2019, 20(1): 110.
- [11] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 306-317.
- [12] Wang J Q, Li Z Y, Fu X L, et al. Distributed temperature sensing system based on a densely spaced FBG array for small fire recognition[J]. Measurement, 2021, 179: 109406.
- [13] Hayle S T, Manie Y C, Dehnaw A M, et al. Reliable self-healing FBG sensor network for improvement of multipoint strain sensing[J]. Optics Communications, 2021, 499: 127286.
- [14] Alamandala S, Prasad R L N S, 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.
- [15] Paolacci F, Quinci G, Nardin C, et al. Bolted flange joints equipped with FBG sensors in industrial piping systems subjected to seismic loads[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 72: 104576.
- [16] Dey K, Roy S, Kishore P, et al. Analysis and performance of edge filtering interrogation scheme for FBG sensor using SMS fiber and OTDR[J]. Results in Optics, 2021, 2: 100039.
- [17] Guo S Y, Zhang A L, Pan H G. Passively Q-switched fiber laser with single and double wavelength switching based on parallel FBGs[J]. Optik, 2021, 241: 166973.
- [18] Hsu C Y, Chiang C C, Hsieh T S, et al. A study of strain measurement in cylindrical shells subjected to underwater shock loading using FBG sensors[J]. Optik, 2020, 217: 164701.
- [19] Feng J H, Jiang Q. Slip and roughness detection of robotic fingertip based on FBG[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 287: 143-149.
- [20] Samavati A, Samavati Z, Velashjerdi M, et al. Sustainable and fast saliva-based COVID-19 virus diagnosis kit using a novel GO-decorated Au/FBG sensor[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420: 127655.
- [21] 尚秋峰, 林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. 电测与仪表, 2010, 47(2): 1-4.
Shang Q F, Lin B H. The comparison and analysis of typical peak-detection algorithms in fiber Bragg grating sensor system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(2): 1-4.
- [22] 苑立波, AnsariFarhad. 光纤光栅原理与应用(一): 光纤光栅原理[J]. 光通信技术, 1998, 22(1): 70-78.
Yuan L B, Ansari F. Fiber-optic Bragg grating principle and its applications(I): fiber-optic Bragg grating principle [J]. Optical Communication Technology, 1998, 22(1): 70-78.
- [23] 白燕. 2 μm 波段激光线宽表征方法及单纵模掺铥光纤激光器研制与应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Bai Y. Study of laser linewidth characterization method in 2 μm band and single longitudinal mode thulium-doped fiber laser fabrication and application[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [24] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [25] Hisham H K, Abas A F, Mahdiraji G A, et al. Effect of temperature and external optical feedback on intensity and phase noise characteristics in single-mode fiber grating Fabry-Perot laser[C]//2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics, October 1-3, 2012, Pulau Pinang, Malaysia. New York: IEEE Press, 2012: 370-376.
- [26] Morishita K, Kaino A. Residual stress effects on post-fabrication resonance wavelength trimming of long-period fiber gratings[C]//OFC/NFOEC 2007-2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 25-29, 2007, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 9695524.
- [27] 张斌. 光纤光栅的制作及其传感应用[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
Zhang B. Optical fiber grating fabrication and sensor application[D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.
- [28] 杨依宁. FBG 快速解调中的光谱采样畸变及其寻峰处理研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Yang Y N. Research on spectral sampling distortion and its peak-finding algorithm in high speed FBG demodulation system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [29] Ouellette F. All-fiber filter for efficient dispersion compensation[J]. Optics Letters, 1991, 16(5): 303-305.
- [30] Atkinson D, Loh W H, O'Reilly J J, et al. Numerical study of 10 cm chirped fibre grating pairs for dispersion compensation at 10 Gbit/s over 600 km of non-dispersion shifted fibre[C]//IEE Colloquium on High Speed and Long Distance Optical Transmission, April 18, 1996, Birmingham, UK. London: IET, 1996: 5303681.
- [31] 张笑, 柳阳, 申人升, 等. 倾斜光纤光栅传感器研究进

- 展[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 170-174, 189.
- Zhang X, Liu Y, Shen R S, et al. Latest development of tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 170-174, 189.
- [32] Kang S C, Kim S Y, Lee S B, et al. Temperature-independent strain sensor system using a tilted fiber Bragg grating demodulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10): 1461-1463.
- [33] Zhao C L, Yang X F, Demokan M S, et al. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 879-883.
- [34] Miao Y P, Liu B, Zhang H, et al. Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(7): 441-443.
- [35] Maguis S, Laffont G, Ferdinand P, et al. Biofunctionalized tilted Fiber Bragg Gratings for label-free immunosensing[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19049-19062.
- [36] Pan J J, Shi Y. Steep skirt fibre Bragg grating fabrication using a new apodised phase mask[J]. Electronics Letters, 1997, 33(22): 1895-1896.
- [37] 刘艳, 郑凯, 谭中伟, 等. 非对称单侧曝光切趾使啁啾光纤光栅获得优化性能[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5859-5865.
- Liu Y, Zheng K, Tan Z W, et al. Good performance of chirped fiber Bragg gratings obtained by asymmetrically one-side exposure apodization[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5859-5865.
- [38] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 58-65.
- [39] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers[J]. Optics Letters, 1996, 21(5): 336-338.
- [40] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 58-65.
- [41] Ball G A, Morey W W, Cheo P K. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(4): 700-703.
- [42] Zhang C, Liu S Q, Wang Y M, et al. High-speed identical weak fiber Bragg grating interrogation system using DFB laser[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103236K.
- [43] Chen D R, Liu W S, Jiang M, et al. High-resolution strain/temperature sensing system based on a high-finesse fiber cavity and time-domain wavelength demodulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(13): 2477-2481.
- [44] 张治国, 张民, 叶培大. 基于环型腔掺 Er 光纤激光器的 FBG 传感系统[J]. 光电子·激光, 2006, 17(5): 509-512.
- Zhang Z G, Zhang M, Ye P D. FBG wavelength demodulation based on tunable Er-doped fiber ring laser[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2006, 17(5): 509-512.
- [45] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. Optics Letters, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [46] Rao Y J, Zhang L, Bennion I, et al. Spatially-multiplexed fibre-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection[J]. Electronics Letters, 1995, 31(12): 1009-1010.
- [47] Cooper D J, Coroy T, Smith P W. Time-division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays[J]. Applied Optics, 2001, 40(16): 2643-2654.
- [48] 刘琨. 基于 Fabry-Perot 可调谐光滤波器 and 掺铒光纤放大器的光纤传感技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- Liu K. Research of fiber sensing technique based on Fabry-Perot tunable filter and erbium-doped fiber amplifier[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [49] 江俊峰, 何盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006005.
- Jiang J F, He P, Liu T G, et al. Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006005.
- [50] Fan X J, Jiang J F, Zhang X Z, et al. Self-marked HCN gas based FBG demodulation in thermal cycling process for aerospace environment[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22944-22953.
- [51] 江俊峰, 闫金玲, 王双, 等. 环境变温下光纤布拉格光栅解调中滤波器扫描波动抑制研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1206001.
- Jiang J F, Yan J L, Wang S, et al. Suppression of sweeping fluctuation of filter in fiber Bragg grating demodulation under temperature changing environment[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1206001.
- [52] 王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810004.
- Wang Q N, Yang Y H. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810004.
- [53] 胡廷林, 王亚萍, 王斌. 光纤光栅传感信号寻峰误差研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(4): 409-413.
- Hu L L, Wang Y P, Wang B. Research on peak searching algorithms errors of fiber Bragg grating sensing signal[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(4): 409-413.
- [54] 陈恺, 张雯, 刘锋, 等. 基于数字相关匹配的光纤光栅非对称反射峰解调算法研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(3): 439-444.
- Chen K, Zhang W, Liu F, et al. Research on FBG asymmetric reflection peak demodulation algorithm based on digital correlation matching[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(3): 439-444.
- [55] 胡正文, 庞成鑫, 程冯宇. Gaussian-LM 算法在光纤布拉格光栅反射光谱寻峰中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 013001.

- Hu Z W, Pang C X, Cheng F Y. Application of Gaussian-LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak search[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 013001.
- [56] 翟新伟, 李志斌. 基于小波变换的高斯曲线拟合在峰值定位中的应用[J]. 光通信技术, 2020, 44(2): 10-13.
Zhai X W, Li Z B. Application of wavelet transform-based Gauss curve fitting in peak positioning[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(2): 10-13.
- [57] 陈勇, 王坤, 刘焕淋, 等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2751-2756.
Chen Y, Wang K, Liu H L, et al. Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2751-2756.
- [58] 陆祈禛, 丁朋, 黄俊斌. 基于光谱奇偶函数分解的光纤布拉格光栅峰值检测[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304009.
Lu Q Z, Ding P, Huang J B. Peak detection of fiber Bragg grating spectra using even-odd function for spectral decomposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304009.
- [59] 王巧妮, 杨远洪. 自适应的光纤布拉格光栅图像寻峰算法[J]. 导航与控制, 2016, 15(1): 70-74, 69.
Wang Q N, Yang Y H. Adaptive peak detection algorithm for fiber Bragg grating spectrum based on image processing[J]. Navigation and Control, 2016, 15(1): 70-74, 69.
- [60] 张伟, 苏超乾, 张梅, 等. 改进光纤光栅应变分布解调算法中优化目标函数的理论与方法[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206002.
Zhang W, Su C Q, Zhang M, et al. Theory and method for improving optimization objective function in demodulation algorithm of fiber Bragg grating strain distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206002.
- [61] Zhang X Z, Sun F, Jiang J F, et al. High-precision FBG demodulation using amplitude ratio curve with sharp peak[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 7-14.
- [62] Jiang J F, Yang Y N, Zhang X Z, et al. Distortion-tolerated high-speed FBG demodulation method using temporal response of high-gain photodetector[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 399-404.
- [63] 陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.
Chen Y, Yang K, Liu H L. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
- [64] Liu F, Tong X L, Zhang C, et al. Multi-peak detection algorithm based on the Hilbert transform for optical FBG sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 47-52.
- [65] Ding P, Huang J B, Tang J S. Multi-peak FBG reflection spectrum segmentation based on continuous wavelet transformation[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 250-255.
- [66] Guo Y, Yu C, Ni Y, et al. Accurate demodulation algorithm for multi-peak FBG sensor based on invariant moments retrieval[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102129.
- [67] 江灏, 周清旭, 陈静, 等. 畸变光谱下光纤布拉格光栅传感网络波长检测优化方法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006002.
Jiang H, Zhou Q X, Chen J, et al. Wavelength detection optimization of fiber Bragg grating sensing networks based on distortion spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006002.
- [68] 陈静, 林雅婷, 周清旭, 等. 基于峰值匹配分布式估计算法的光纤布拉格光栅传感网络重叠光谱的波长解调[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0406002.
Chen J, Lin Y T, Zhou Q X, et al. Wavelength demodulation of a spectrally overlapped fiber Bragg grating sensor network based on peak match estimation of distribution algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0406002.