

FBG 波长高精度解调的研究进展

杨 志^{1,2,3}, 鞠婉秋^{1,2,3*}, 李永倩^{1,2,3}

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003;2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室,河北 保定 071003;3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室,河北 保定 071003)

摘要:在恶劣的环境下能准确地检测出光纤布喇格光栅(FBG)波长对工程监测非常重要。综述了在不同的解调系统中提高波长解调精度的方法和波长信号处理方法,主要介绍了基于可调谐激光器、可调谐滤波器和光谱仪的解调系统提高波长校准精确度的研究进展,分析了信号解调过程中的算法对 FBG 传感解调性能的影响。

关键词:光线布喇格光栅;解调系统;高精度;波长标定;峰值检测

中图分类号:TN247 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)03-0004-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.03.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress in high precision demodulation of FBG wavelength

YANG Zhi^{1,2,3}, JU Wanqiu^{1,2,3*}, LI Yongqian^{1,2,3}

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China; 3. Baoding Key Laboratory of Optical fiber sensing and optical communication Technology, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: It is very important to detect the fiber Bragg grating (FBG) wavelength accurately for engineering monitoring in bad environment. This paper reviews the methods of improving wavelength demodulation accuracy and wavelength signal processing in different demodulation systems. It mainly introduces the research progress of demodulation system based on tunable laser, tunable filter and spectrometer to improve wavelength calibration accuracy, analyzes the influence of the algorithm in the process of signal demodulation on the demodulation performance of FBG sensor.

Key words: fiber Bragg grating; demodulation system; high precision; wavelength calibration; peak detection

0 引言

光纤传感技术具有高灵敏度、抗电磁干扰、紧凑性、抗恶劣环境和多路复用能力等优点,已成为学术界和工程界研究的热点。光纤布喇格光栅(FBG)传感技术是光纤传感的主要组成部分之一,FBG 传感器具有操作简单、准点传感和固有的波分复用等优点,被

广泛应用于边坡测量^[1]、航空航天^[2]、水文应用^[3]、地震及海洋观测^[4]等方面。将 FBG 传感器应用于实际工程所需解决的关键技术是信号的解调,如何实现波长信号的高精度解调是国内外学者研究的重点。本文按照解调原理对近年来的波长解调技术进行分类叙述,分析其存在的问题及一些解决方法。

1 FBG 反射波长的高精度标定

FBG 解调器用于获得 FBG 的光谱,然后拟合出 FBG 的反射波长,这些波长通常与物理量的变化呈线性关系。FBG 反射波长的微小偏移量能够准确反映温度、位移和应变等物理量的变化情况,为了获得更精准的信息,对 FBG 反射波长的高精度解调变得尤为重要。国内外学者基于不同的解调方法设计了很多光纤

收稿日期:2019-09-18。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61775057)资助。

作者简介:杨志(1972—),男,辽宁省黑山县人,北京邮电大学博士,多次被评为华北电力大学科技工作先进个人。长期从事光纤通信与传感、无线通信等领域的科研和教学工作,在《电工技术学报》和《光子学报》等国内权威性期刊和国内外重要学术会议上发表学术论文 20 余篇,其中多篇被 EI 和 ISTP 收录。

* 通信作者:鞠婉秋(E-mail: 2316771719@qq.com)。



光栅解调系统,主要包括基于可调谐激光器的解调系统、基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器的解调系统、基于光谱仪的解调系统,目的是为了提高 FBG 反射波长检测的精准度,提高系统的可靠性和稳定性。

1.1 基于可调谐激光器的解调系统

基于可调谐激光器的解调系统主要由可调谐光源模块、波长校准模块、数据处理模块和 FBG 传感模块组成。可调谐激光器所产生的窄带光源有更好的分辨率、更宽的波长窗口和更长的距离范围(由于较高的源功率),因此允许多个光纤传感器同时解调。然而,它的长期波长稳定性较差,当可调谐激光连续高速扫描时,往往会出现非线性波长调谐和波长波动^[5-6]。在实际应用中,非线性波长调谐最终会导致测量误差和分辨率的降低,所以需要在解调系统中加入波长校准元件或建立波长校准模型,以检测到更精确的波长值。

1.1.1 提高系统稳定性、可靠性方法

近几年来,学者们对如何提高解调系统稳定性、可靠性等方面进行了深入的研究。

2011 年,Jie LIU 等人^[7]设计了一种基于分布反馈(DFB)激光器的 FBG 解调系统。DFB 激光器同时作为光源和解调设备,结构比较简单,通过调节内部温度,激光器实现波长可调谐,该方法能准确、稳定地完成 FBG 静态和动态信号的解调。但是,当 DFB 激光器连续高速扫描波长时,环境温度扰动和激光热噪声会引发波长抖动、波长非线性调谐的问题。2019 年,Yi Li 等人^[8]针对此问题在解调系统中引入了磁光波长计,可以精确地实时监测每一个波长的输出,且响应速度快、稳定性好,能够快速、稳定地测量波长,被广泛应用在波长检测方面。改进后的波长计不受温度的影响,可实时监测无法输出的波长,应用在解调系统中使得波长测量精度从 ± 3 pm 提升到 ± 1 pm,相应的温度传感分辨率提高 0.1 °C 以上,并且提高了该系统的长期稳定性。

2013 年,杨军等人^[9]提出了一种基于“扫描激光器+并行接收处理+实时校准”的高精度、大容量和可扩展的 FBG 传感解调方法。该方法用可调谐环形激光器作为扫描光源,提高了输出光源的信噪比。但是,受温度影响,可调谐激光器的驱动电压与其内部滤波器的透射波长是非线性的关系,这样通过驱动电压检测的 FBG 中心波长会有误差,故引入了 F-P 标准具,并对 F-P 标准具进行了封装处理,封装后的 F-P 标准具具有良好的温度湿度稳定性。2016 年,李超等人^[10]在系

统中加入温控模块,温控模块能保证标准具在 0.01 °C 的范围内变化,使 F-P 标准具几乎不受温度影响,因此标准具波长值可以认为是定值。带温控模块的 F-P 标准具可以实现波长的实时动态校准。2018 年,王阳阳等人^[11]在解调系统中引入了 F-P 标准具和温度补偿参考光栅,处理过的参考光栅可以对 F-P 标准具进行校准,波长的温度稳定性达到 0.4 pm。

1.1.2 提高系统解调精度方面

近年来,垂直腔面发射激光器(VCSEL)以其调谐范围宽、线宽窄、成本低和功耗低等特点在 FBG 传感领域得到了广泛的应用。Binxin HU 等人^[12]发现长波 VCSEL 的波长与注入的电流近似线性关系,可以通过调谐电流来计算波长,但解调的波长不稳定,于是他们实现了波长计算的均匀性和可预测性,提高了波长解调的精度。

另外,适合远距离解调波长的傅里叶域锁模激光器(FDML)由于其激光扫描周期短,传输延迟会使传感信号偏离实际位置,造成较大的波长解调误差。文献[13]用 F-P 标准具自动标定波长,该解调方法有效、准确。但是 F-P 标准具的间隔有限,当可调谐 F-P 滤波器随温度变化的漂移大于 F-P 标准具间隔时,波峰解调结果将受到严重影响。因此,文献[14]引入一种基于光拍频的非线性校正方法和由单峰滤波器组成的参考通道,消除了 F-P 滤波器的非线性效应和扫描波长漂移问题,提高了解调精度和线性度。

目前,基于可调谐激光器的解调系统依然面临一些核心器件与关键技术方面的挑战,应该从材料、设计等方面着手,大力加强高精度光纤光栅谐振腔、超低噪声窄线宽可调谐激光器等核心器件的研制。另外,还需要深入研究稳频激光光源的精准频率调谐技术和高精度的波长解调技术。今后该解调系统将在海洋观测领域,尤其是海底地震波勘探或地震观测、海啸监测、水声监测以及高精度压力和温度监测等方面具有很好的应用前景。

1.2 基于可调谐 F-P 滤波器的解调系统

光纤滤波器在光纤领域有广泛的应用,如可调谐光纤激光器^[15-16]、光纤传感器^[17-18]和超声成像^[19]。为了实现可调谐特性,人们开发了多种光纤滤波器:薄膜干涉滤波器^[20]、相移滤波器^[21]、F-P 滤波器^[22]和 FBG 滤波器^[23-24]等,这些滤波器具有不同的优点。其中,可调谐 F-P 滤波器作为波长解调器件,具有解调速度快、解调范围广和解调精度高等优点,已被广泛应用于 FBG 解调系统中。

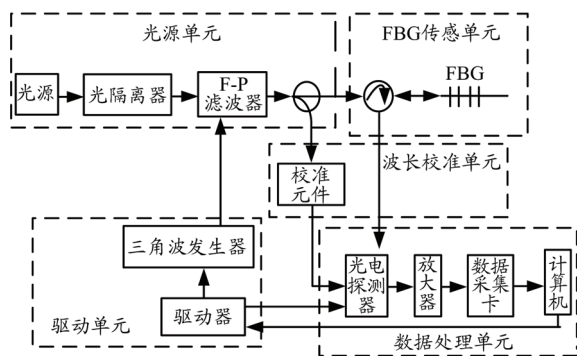


图 1 基于可调谐 F-P 滤波器的解调系统

基于可调谐 F-P 滤波器的解调系统如图 1 所示。系统由光源单元、FBG 传感单元、波长校准单元、数据处理单元和驱动单元组成。光源单元负责改善有效的窄带光源,FBG 传感单元既是一个传感元件,又是一个传输信道。波长校准单元主要用于校准 FBG 反射光谱,提高系统测量精度和稳定性。数据处理单元主要负责数据采集的控制、数据的解调、存储和显示。驱动单元负责驱动三角波发生器。

基于可调谐 F-P 滤波器的解调系统在近几年来应用较为普遍。文献[25]以可调谐 F-P 滤波器为核心器件,对温度传感信号进行解调,代替了造价高昂的光谱仪。该方法成本低、结构简单且易于实现,但是 FBG 反射波长的不确定性受到可调谐滤波器光谱宽度和波长稳定性的限制。由于 F-P 谐振腔受温度影响会发生伸缩,导致从 F-P 滤波器输出的透射波长发生偏移,造成其驱动电压与透射波长的响应曲线的非线性,解调出的 FBG 反射波长会有很大的误差,所以在解调系统中要引入参考波长来降低其不确定度。文献[26]在 FBG 参考通道加入了固定波长的参考光栅,利用固定波长与透射波长的差值来消除波长偏移的影响。何海涛等人^[27]将 F-P 标准具代替参考光栅放入参考通道,它的疏状结构使其受温度的影响相对较小,可以实时动态地标定波长。2015 年,杨刚等人^[28]利用 F-P 标准具的等频率间隔特性和宽带光源的特性分段解调出 FBG 中心波长(驱动电压与 FBG 中心波长在小区间内呈线性关系),这有效削弱了波长的扰动效应,相比已有的基于标准具的解调系统,该设计结构比较简单,同时其系统稳定性为 0.97 pm,分辨率为 0.33 pm,温度解调线性度为 0.9999。2018 年,文献[29]在每个扫描周期内对 F-P 标准具的透射光谱波长进行实时动态校准,参照已校准的 F-P 标准具的透射光谱波长计算 FBG 传感器的反射光谱中心波长,减小了数值误差,有效地消除了 F-P 标准具的伪峰,大

大提高了系统的测量精度。虽然 F-P 标准具受温度影响小,但是对其进行温度脱敏封装还是有必要的,这能够进一步提高 FBG 中心波长的解调精度。

随着解调技术的深入研究,乙炔气室(1510~1540 nm)以其对温度、压力等环境因素不敏感的优点被学者们发现。原子和分子的基本吸收线对环境温度不敏感,气体的这一特性为波长参考提供了极好的选择,而且光谱吸收线的深度会影响参考波长的精度,进而决定解调精度^[30]。采用长光程高浓度的气室能更精确校准波长,但是其波长测量范围有限,对于其测量范围以外的 FBG 波长无法校准。针对此问题,文献[31]提出了利用 F-P 滤波器透射波长周期性变化的特点,将气室校准滤波器的透射波长经过曲线拟合后,可以保证驱动电压与透射波长的线性关系。由于 F-P 腔长是变化的,导致其透射波长间的频率间隔也有微小变化,所以这种方法测量的波长值不够精确。2015 年,俞琳等人^[32]采用 CO₂ 和 C₂H₂ 混合气体,进行 C 波段和 L 波段的光纤光栅波长的解调,选取了气体吸收谱线较强的峰标定 FBG 波长,在 0~60 ℃ 范围内波长拟合标准差小于 3.3 pm,系统稳定性误差小于 2.6 pm。该方法可扩展到不同种类的气体间的组合,可提高波长校准的范围和精度,解决变温环境下滤波器电压-波长的非线性问题,但是其波长不稳定,且额外的校准步骤需要更复杂的算法。2018 年,江俊峰等人^[33]将 F-P 标准具与气室相结合做校准原件,对 FBG 波长进行高精度标定,该方法可以克服温度的干扰,消除 F-P 标准具波长漂移产生的误差,提高波长的解调精度。另外,该文献也验证了在提高波长解调精度方面,气室以多条吸收谱线作为参考比一条吸收谱线的效果好,该解调系统更适用于恶劣的环境中。

1.3 基于光谱仪的解调系统

传统的光谱仪不但体积大、造价高,而且对工作环境条件(温度、湿度和电磁干扰等)要求严格,随着光谱分析技术的飞速发展,小型化、便携式的光谱仪已经出现并应用于冶金、地质和石油化工等领域。光谱仪以其高精度、低干扰和体积小等性能优势应用在 FBG 传感系统中,能够通过 FBG 波长的变化准确获取信息,其工作原理如图 2 所示。FBG 反射波长通过光纤输入到光谱仪模块的单端口,经准直透镜后照射到体相位光栅(VPG)进行光谱分离;衍射区汇聚到一个 InGaAs 探测器阵列上,由控制单元读出信号,经过数据处理单元获得要探测的信息;USB 接口将原始数据和处理加工过的数据存储于计算机里。

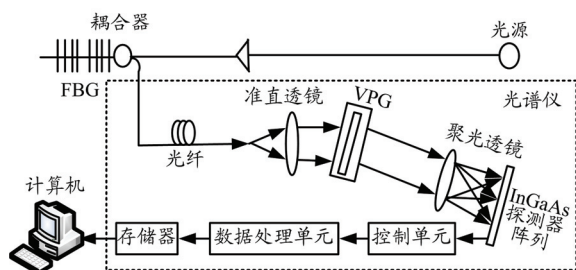


图2 光谱仪的工作原理

目前的研究都致力于将光谱仪微型化,从传统光谱仪到微型光谱仪的关键是采用阵列探测器,省去了光电倍增管及其高压电源和扫描机构,使光谱仪真正实现了微型化。采用阵列探测器可以使光谱仪具有更高的稳定性,大大提高光谱获取速度,但是,由于现有探测器(尤其是红外响应探测器阵列)制造工艺的限制,像素数目还比较少,导致位置探测分辨率较低,所以需要在提高光谱仪的光谱分辨率和测量光谱范围等方面进行深入研究。2012年,宁春丽等人^[34]设计了一个高光谱分辨率的小型中阶梯光谱仪,采用了交叉色散的形式,解决了由于中阶梯光栅使用高阶次而造成的衍射级次彼此重叠的问题;采用电荷耦合器件(CCD)探测器接收光谱,可以实现波长的精确标定,大大提高了系统的光谱分辨率。2014年,冯帆等人^[35]在此基础上扩展了测量光谱范围,设计了一个宽波段、高分辨率的光谱仪,对中阶梯光栅光谱仪的研制具有一定的指导意义。除了要提升光谱仪自身的性能外,还要对检测的波长进行标定,其准确性会影响光谱仪测量结果的精确度。文献[36]使用自动分解算法和Voigt线状谱模型来优化标定光谱的形状,不仅获得了每个峰值点的精确值,还简化了定标过程。文献[37]从实验参数控制及数据处理分析入手,深入研究了光谱仪波长定标环节中的精度影响与控制方法,其波长定标过程如图3所示。该方法通过对光谱进行预热和预测试,获得高质量、高稳定度的光谱信号,再利用软件对该信号生成的

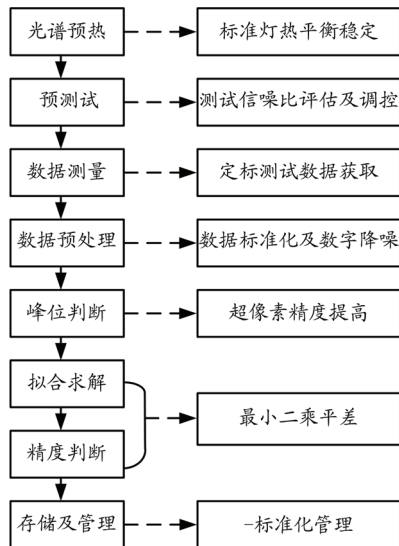


图3 波长定标过程

数据进行处理,包括降噪及高精度寻峰,最后将处理后的数据进行存储及管理。张登攀等人^[38]在解调系统中加入了F-P标准具,减小光谱仪对高精度测温的影响,进而减小系统误差,提高系统测试精度。文献[39]还提出了一些其它校准方法,例如,用精确的波长计对光谱仪波长范围内的不同波长进行校准;利用非线性晶体在1556 nm和778 nm处产生的基频光和倍频光来校准光谱仪波长刻度精度;使用氰化氢(HCN)气室作为波长标准,在1533~1557 nm波长范围内校准光谱仪。若能在提高光谱仪性能和波长检测技术方面有所突破,光谱仪有望在更多的领域得到应用。

2 高精度的波长检测方法

在解调系统中,前期虽然对FBG中心波长进行了精确标定,解决了光学器件自身特性及环境因素导致的FBG中心波长不稳定的问题,但是解调出的FBG光谱图仍会含有噪声成分,会出现很多“假峰”和“毛刺”,对波长的精准检测造成了一定影响。2011年,李永倩等人^[40]提出了一种光谱寻峰算法,该算法能够提高系统的实时性,对噪声较小的信号寻峰时,峰值比较精确,但是对噪声较大的波峰寻峰时,峰值判断会有误差,所以有必要在检测峰值前先进行去噪处理。2013年,陈勇等人^[41]克服了软阈值和硬阈值小波的缺点,设计了一种结合高斯拟合峰值搜索算法的去噪方法,针对FBG传感器信号的去噪性能,提出了一种改进的无阈值调整因子的平移不变小波。采用改进的去噪方法和高斯拟合峰值搜索算法检测波长,能够获得更高的FBG传感器信号的波长解调精度。

目前,有许多种寻峰算法应用在解调系统中,文献[42~45]对FBG解调系统中的多种寻峰算法的性能进行了比较,结果如表1所示。通过比较发现,高斯拟合算法适用于高精度解调系统。传统的寻峰算法存在

表1 寻峰算法的性能比较

寻峰算法	性能
高斯拟合算法	解调精度最高,计算量最大,稳定性好
基于正交多项式最小二乘法	解调精度次于高斯拟合算法,运算速度快、稳定性好
最小二乘法	解调精度低,运算量稍大,解调速度一般
质心法	解调精度最低,计算量最少,解调速度最快
三次样条插值法	解调精度和高斯拟合算法基本相同,运算量稍大,解调速度比高斯拟合快

对实验噪声和频谱形状敏感、计算量小和耗时等缺点,已经不能满足波长的高精度检测需求,所以需要根据算法的性能对算法进行优化选取或者对其改进使其具备更高的波长检测精度。文献[46]提出了一种基于 Levenberg-Marquardt 算法(L-M 算法)的高斯拟合法求解 FBG 峰值位置的方法。L-M 算法综合了梯度下降算法和高斯牛顿算法的优点,在高斯拟合的基础上,采用 L-M 算法求解峰值位置的方法具有精度高、稳定性好等优点,对提高解调精度具有重要意义。

以上峰值检测算法检测的都是单峰,对于分布式传感器网络的反射光谱中的多峰问题,若要对其检测,必须获得 FBG 的原始中心波长。然而,在复杂的 FBG 传感网络中,原始中心波长是不可用的。文献[47]基于此问题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,然后引入 Hilbert 变换对多峰区域进行自适应分割;考虑到光谱峰的不对称性(每个峰的位移由左右半峰面积决定),还设计了指数修正高斯函数来修正峰值位置,以获得精确的频谱信号峰值。2016 年,陈勇等人^[48]改进了去噪预处理方法,采用去噪效果最好的小波阈值去噪方法有效地去除了频谱信号中包含的噪声。与其它同类算法相比,该算法具有更好的稳定性,是一种自适应的精确解调算法,适用于分布式 FBG 传感器网络。2019 年,文献[49]预先定位去噪信号的峰值点,然后进行峰值区域分割,最后用质心法检测每个峰值区域的波长。质心算法在处理噪声原始数据时具有较高的精度和鲁棒性,此外,质心算法比 FBG 反射光谱中的高斯或多项式拟合的计算效率高,所以该算法在精度和鲁棒性方面有了显著的提高。

3 结束语

本文介绍了近年来 FBG 波长高精度解调的一些方法。这些方法中,在波长的标定方面,一些波长解调器件和波长校准元件的自身性能和对温度、压力等环境问题的敏感性导致它们对波长的标定还不够精确,这在工程应用中会影响对信息的准确获取。在未来的研究中,可以结合物理学等方面的知识对波长校准模型进行深入研究,在波长校准元件的选择和制作上以提高波长校准精度为主要方向。在数据处理(峰值检测)方面,针对单峰和多峰的寻峰算法有很多种,但是每种算法的性能不同,必须综合考虑算法的解调精度、计算量大小、解调速度和稳定性好坏。

参考文献:

- [1] XU H, LI F, ZHAO W, et al. A high precision fiber Bragg grating inclination sensor for slope monitoring[J]. Journal of Sensors, 2019(a2): 1–7.
- [2] ZHEN Ma, CHEN Xiyuan. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: recent applications and technical analysis [J]. Sensors, 2019, 19(55): 1–25.
- [3] LAN Ruoming, CAO Yuqiang. Design and realization of high precision FBG rain gauge based on triangle cantilever beam and its performance research[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(3): 229–232.
- [4] 张文涛,黄稳柱,李芳. 高精度光纤光栅传感技术及其在地球物理勘探、地震观测和海洋领域中的应用[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 94–108.
- [5] LEE S L, PIEN C T, HSU Y Y. Operation principles of wavelength sensing using transparent properties of semiconductor optical diodes [J]. Journal of lightwave technology, 2001, 19(5): 655–657.
- [6] KEISHNA Y, BYRNE S O', MUNUSWAMY K, et al. Effect of noise-induced wavelength fluctuation in tunable diode lasers on narrow-linewidth absorption measurements [J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4943–4949.
- [7] JIE L, HONG Z, PENG W, LIANG J, et al. FBG demodulation method based on DFB laser [J]. Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology, 2011(22-24): 1207–1210.
- [8] LI Y, LU B, REN L, et al. A highly precise FBG sensor interrogation system with wavemeter calibration [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48(MAR): 207–212.
- [9] 杨军,魏帅,王航,等. 一种高精度大容量可扩展光纤光栅传感解调方法[J]. 光通信技术, 2013, 37(11): 39–41.
- [10] 李超,王永杰,李芳. 基于 F-P 温控标准具的高稳定性 FBG 波长解调系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 2(1): 238–242.
- [11] 王阳阳,赵恩才,于森,等. F-P 标准具和参考光栅相结合的高稳定性 FBG 解调系统[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 336–340.
- [12] HU Binxin, JUN Guangxian, LIU Tongyu, et al. A precision fiber Bragg grating interrogation system using long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Photonic Sensors, 2016(6): 351–358.
- [13] MEI Jiawei, XIAO Xiaosheng, YANG Changxi. Delay compensated FBG demodulation system based on fourier domain mode-locked lasers[J]. IEEE, Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1585–1588.
- [14] HOU Y, WANG Y, WANG H, et al. Research and implementation of super high-speed fiber bragg grating demodulator [C]// 2019 IEEE international instrumentation and measurement technology conference (I2MTC). May 20–23, 2019, Auckland, New Zealand. Wellington: IEEE, 2019: 999–1003.
- [15] LI Q, YAN F P, PENG W J, et al. A single frequency, linear cavity Tm-doped fiber laser based on phase-shifted FBG filter [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56: 304–306.
- [16] KONSTANTAKI M, CANDIANI A, PISSADAKIS S. Optical fibre long period grating spectral actuators utilizing ferrofluids as outcladding overlayers[J]. Journal of the European Optical Society, 2011(6): 88–91.
- [17] YANG C, XIA L, WANG Y, et al. Wavelength tunable single longitudinal mode fiber laser pinned to 25 GHz spacing[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(10): 2404–2406.

- [18] NING Y N, MELDRUM A, SHI W J, et al. Bragg grating sensing instrument using a tunable Fabry-Perot filter to detect wavelength variations [J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(4): 599-606.
- [19] TOSI D, POEGGEL S, LEEN G, et al. Adaptive filter-based interrogation of high-sensitivity fiber optic Fabry-Perot interferometry sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 206: 144-150.
- [20] GUO J, XUE S, ZHAO Q, et al. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2014, 22(16): 19573-19580.
- [21] 王璐玮,陈越,赵宜鹏,等. 相移光纤光栅多重滤波特性研究及应用 [J]. 光散射学报, 2015, 27(3): 291-298.
- [22] DENG Y, LI M, HUANG N, et al. Ka-Band tunable flat-top microwave photonic filter using a multi-phase-shifted fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 1-8.
- [23] LIU S, DONG X, SUN J, et al. Free-spectral range tunable Fabry - Perot filter with superimposed fiber Bragg gratings[J]. Optics Communications, 2009, 282(24): 4729-4732.
- [24] KONG Y, DIAO L, GAO F, et al. The ultra narrow-band fiber grating filter [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(3): 1220-1222.
- [25] LI Qiaoyi, XIONG Yanling, LI Shouduo, et al. A fiber grating temperature demodulator based on the tunable F-P filter [C]// International Conference on Measurement, Aug 16-18, 2013, Harbin, China. Beijing: IEEE, 2013: 292-294.
- [26] 刘琨,刘铁根,江俊峰,等. 基于 FBG 传感系统的可调光滤波器非线性研究[J]. 光电子·激光, 2010(7): 18-21.
- [27] 何海涛,姚国珍,李保罡,等. 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调技术研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(6): 5-7.
- [28] 杨刚,许国良,涂郭结,等. 基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 98-103.
- [29] ZHU W, WANG J, JIANG J, et al. A high-precision wavelength demodulation method based on optical fiber Fabry-Perot tunable filter [J]. IEEE Access, 2018(6): 1-1.
- [30] FAN Xiaojun, JIANG Junfeng, ZHANG Xuezhi, et al. Self-marked HCN gas based FBG demodulation in thermal cycling process for aerospace environment[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22944-22953.
- [31] 乔学光,王瑜,傅海威,等. 可调谐法布里 - 珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 852-855.
- [32] 俞琳,刘铁根,刘琨,等. 基于多波段混合气体吸收谱线的波长标定方法研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1146-1151.
- [33] 江俊峰,臧传军,王双,等. 变温环境 FBG 解调仪复合多波长参考稳定方法研究[J]. 光电子·激光, 2018, 29(6): 575-581.
- [34] 宁春丽,齐向东,陈少杰,等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3406-3410.
- [35] 冯帆,段发阶,伯恩,等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014(7): 20-25.
- [36] 马艳,夏果,黄禅,等. 一种简单精确的 CCD 阵列光谱仪波长定标方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(z1): 147-153.
- [37] 刘丽莹,李野,郑峰,等. 小型 CCD 光谱仪波长定标精度控制与影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 19-27.
- [38] 张登攀,王璿,王永杰. 基于 FBGA 光纤光栅解调系统的实时校准方法[J]. 激光与红外, 2015(7): 825-829.
- [39] TERRA O, HUSSEIN H. Calibration of grating based optical spectrum analyzers[J]. Journal of Optics, 2015, 44(4): 1-7.
- [40] 李永倩,朱向南,姚国珍. 光纤光栅解调系统信号处理算法的实现 [J]. 光通信技术, 2011, 35(9): 34-36.
- [41] CHEN Y, CHEN L J, LIU H L, et al. Research on FBG sensor signal wavelength demodulation based on improved wavelet transform[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124 (21): 4802-4804.
- [42] 蔡能宏,闫连山,陈娟子,等. 基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅传感解调系统寻峰算法对比分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2013 (4): 100-102.
- [43] LI Yongqian, XIE Yang, YAO Guozhen. Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber Bragg grating sensors [C]// International Conference on Information Engineering & Computer science, Dec. 25-26, 2010, Wuhan, China. Beijing: IEEE, 2010: 1-4.
- [44] 焦圣喜,姜娜. 基于 F-P 滤波器的 FBG 解调系统改进及其寻峰算法对比分析[J]. 数字技术与应用, 2016(4): 123-124.
- [45] 李宁,王东,王宇,等. 曲线拟合算法对光纤光栅传感解调性能的影响研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 711-714.
- [46] SONG F, SUN W, WEI J, et al. The optimization study of FBG Gaussian fitting peak-detection based on Levenberg-Marquardt algorithm [C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Oct. 20-22, 2017, Ji'nan, China. Beijing: IEEE, 2017: 3723-3727.
- [47] 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): 184-189.
- [48] CHEN Y, YANG K, LIU H L. Self-adaptive multi-peak detection algorithm for FBG sensing signal[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2658-2665.
- [49] ZHANG W, ZHANG M, WANG X, et al. The analysis of FBG central wavelength variation with crack propagation based on a self-adaptive multi-peak detection algorithm[J]. Sensors, 2019, 19(5): 1056-1058.