文章编号 2095-1531(2014)04-0519-13

光纤光栅传感信号解调技术研究进展

吴 晶[1,2,3],吴晗平[1,2*],黄俊斌[1],顾宏灿[1]
(1.海军工程大学 兵器工程系,湖北 武汉 430033;
2.武汉工程大学 光电子系统技术研究所,湖北 武汉 430205;
3.海军工程大学 管理工程系,湖北 武汉 430033)

摘要:光纤光栅传感器是一种新型传感器,有着非常广泛的应用前景。限制光纤光栅传感器大量实际应用的主要障碍是传感信号解调,因而,光纤光栅传感信号解调是光纤光栅传感器应用的关键技术之一。本文对现有已报道的光纤光栅传感信号的解调方法进行综述,并归类为:边缘滤波法、匹配滤波法、可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、射频探测法、光栅啁啾法、CCD分光仪法、干涉法。对各种方法的原理及相关改进方法进行了阐述,并对其优缺点做了比较分析,最后,对光纤光栅传感信号的解调技术发展进行了展望。

关 键 词:光纤光栅传感器;信号解调;滤波法;干涉法
中图分类号:TN253 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20140704.0519

Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors

WU Jing[1,2,3], WU Han-ping[1,2*], HUANG Jun-bin[1], GU Hong-can[1]
(1. *Department of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*;
2. *Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430205, *China*;
3. *Department of Management Science, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wuhanping601@sina.com*

Abstract: Fiber Bragg grating sensor is a new kind of sensor, which has a very broad application prospect. The main obstacle to limit its wide application is signal demodulation. So the sensing signal demodulation for fiber Bragg grating is one of the key technologies for fiber Bragg grating sensor applications. The reported signal demodulation methods of fiber Bragg grating sensor are reviewed and classified into edge filter demodulation method, matched filter method, tunable filter method, tunable narrowband laser interrogation method, radio frequency signal measurement method, chirped FBG method, CCD measurement method, and interference method. The principle of various methods and some improved methods are elaborated, and their advantages and disadvantages are analyzed. Finally the demodulation technology for the development of fiber Bragg grating sensing signal is discussed.

Key words: fiber Bragg grating sensor; signal demodulation; filter method; interference method

收稿日期:2014-03-21;**修订日期**:2014-05-16
基金项目:总装"十二五"预研资助项目(No. 51327030202)

1 引 言

光纤光栅(FBG)自产生以来,就成为通信和传感领域的研究热点。尤其是在传感领域,FBG传感器作为一种新型传感器,相对传统传感器具有质量轻、体积小;高灵敏度、高分辨率;耐腐蚀、耐高温;抗电磁干扰;能组建大规模准分布式传感网络等特点[1]。因而被广泛应用到民用工程结构、舰船结构、核设施等领域的安全监测[1-3]。

FBG栅传感器作为一种波长调制器件,在应用时如何精确地解调出波长变化量,是FBG传感器走向实用化需要解决的关键问题之一。为此,研究人员作了大量的工作,并提出了很多行之有效的解调方法。本文对现有解调方法进行综述,按照解调原理进行分类,并对各种方法的解调精度、成本、复用能力和优缺点进行了比较和分析,以期为FBG传感器能更广泛的应用于传感领域提供参考。

2 FBG解调方法分类

目前,FBG传感信号的解调方法有很多,根据各种解调方法的原理和特点,将现有的解调方法分为以下几类:

2.1 边缘滤波法

该法用某些滤波器的线性滤波特性,将FBG反射信号的波长漂移量转化为光功率变化量,通过测量光功率变化量来实现波长解调。原理如图1(a)所示,当FBG的反射信号经过线性滤波器时,滤波器的输出功率随反射信号的中心波长改变而改变,从而可将FBG反射信号的中心波长变化量转化为功率强度变化量,实现波长解调。

图1(b)是用体积光学线性滤波器实现的线性解调系统[4]。试验结果显示其测量范围为11$m\varepsilon$,应变分辨率为375$\mu\varepsilon$。其优点是:能有效抑制光源输出功率的起伏影响,系统响应速度快,成本低,适合动态、静态测量,具有较好的线性输出。不足之处:测量精度受体积滤波器准直和稳定性的影响较大,分辨率较低,不利于携带。

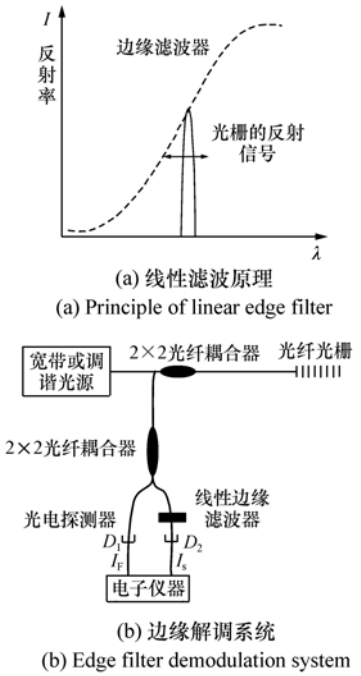

图1 边缘滤波解调系统及原理

Fig. 1 System and principle of edge filter demodulation

针对体积光学线性滤波器的不足,1994年M. A. Davis提出用光纤波分复用(WDM)耦合器替代体积光学滤波器,实现一个全光纤线性滤波系统[5]。系统原理如图2所示。

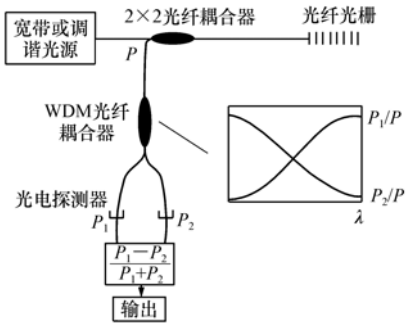

图2 WDM边缘滤波解调系统

Fig. 2 WDM filter demodulation system

FBG的反射信号经光纤波分复用(WDM)耦合器从两个端口输出,两端口的透过率反射信号的波长近似成线性关系。则系统的输出 $\eta = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}$ 与反射波长成线性关系,因此,可通过测量系统的输出值来确定反射波长值。其优点是:

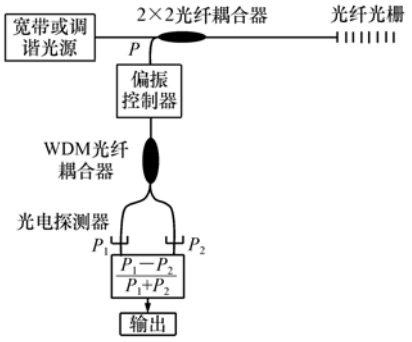

图 3　采用偏振控制器的 WDM 边缘滤波解调系统

Fig. 3　WDM filter demodulation system with polarization controller

提供一种全光纤、便携式解调系统,降低了连接损耗,提高了系统的分辨力。不足之处:WDM 具有偏振特性,导致测量波长精度不高。针对 WDM 的偏振特性,2005 年田珂珂在系统上增加一个偏振控制器,用于控制输入光的偏振状态,有效提高了系统解调精度和稳定性[6],如图 3 所示。试验结果显示:系统的波长解调范围为 10 nm,波长分辨率为 0.01 nm。此后,研究人员采用边缘滤波法进行了大量研究,在系统结构和滤波器选择上作了很多改进,如阵列波导光栅(AWG)、长周期光纤光栅、非对称 F-P 滤波器、光源的边缘滤器,如表 1所示。

表 1　边缘解调算法性能对照表

Tab. 1　Performance comparison of edge filter demodulation method

滤波器类型	测量范围	分辨率	波长解调范围	线性性能	突出优点
体积滤波器[4]	$11m\varepsilon(\varepsilon)$	$375\mu\varepsilon(\varepsilon)$		较好	响应速度快,适合动/静态测量
WDM[5-6]		0.01 nm(λ)	10 nm	一般	全光纤系统、利于携带、损耗低
AWG[7-9]		0.5 pm(λ)		一般	解调速度快、分辨率高、可复用
长周期光纤光栅[10-14]		0.01 nm[10-11](λ) 0.003 nm[14]	3.5 nm[10-11] 6 nm[14]	较好	精度高,解调范围大
非对称 F-P 滤波器[15]		0.01 nm	7 nm	较好	系统结构简单,受环境影响小
放大自发辐射光源(ASE)[16-17]	2 500$\mu\varepsilon(\varepsilon)$	1.06$\mu\varepsilon(\varepsilon)$	2.5 ~ 3 nm	较好	全光纤结构、解调速度快、稳定性好

2.2　匹配滤波法

该法用与传感光栅参数相近的参考光栅来跟踪传感光栅波长变化的解调方法。系统如图 4(a)所示。传感光栅 FBG1 的反射信号光经耦合器输入到参考光栅 FBG2,FBG2 在压电驱动元件作用下跟踪 FBG1 的反射波长变化,当 FBG2 反射波长与 FBG1 反射波长匹配时,反射功率最大,通过测量驱动信号可解调出被测量。2004年陆青

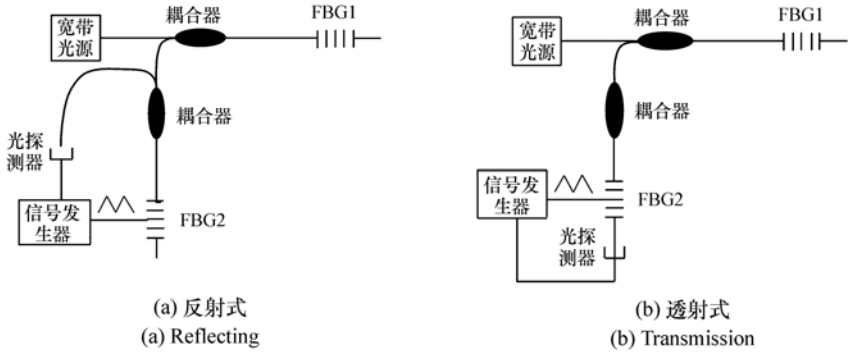

图 4　单点匹配滤波系统

Fig. 4　Matched filter system with single point

采用此法实现应变测量精度为3.0$\mu\varepsilon$,测量范围为522$\mu\varepsilon$[18]。匹配滤波系统不仅有反射式还有透射式,透射式的光电探测器放置于接收透射光位置,通过检测透射光功率来解调被测物理量,系统如图4(b)所示。

另外,匹配滤波法还可将参考光栅采用并联、串联方式实现阵列光栅解调,如图5所示。

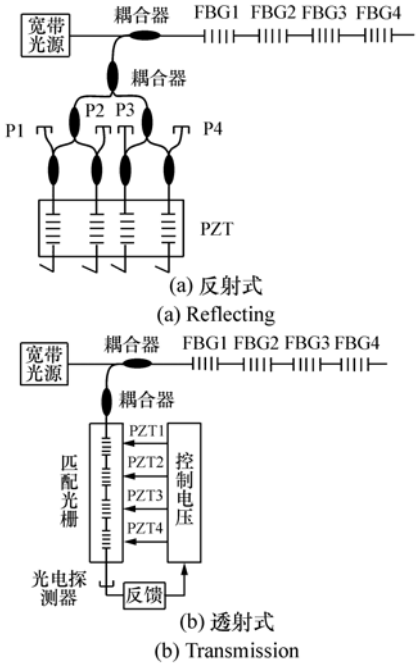

图5 分布式匹配滤波系统

Fig. 5 Distributed matching filter system

由匹配滤波原理可知,当参考光栅和传感光栅的反射谱达到完全匹配时,其反射光功率最大或透射光功率为零,而实际难以实现完全匹配,通常选择最佳匹配。而输出光功率是绝对值,因此会在完全匹配点两侧各有一个最佳匹配点,导致双值问题。针对该问题,可采用多档光栅并联解调,通过合理选择并联解调光栅的中心波长和带宽,将反射光功率与应力的非线性问题转化为线性问题,可解决双值问题[18-19]。也可以合理选择匹配光栅中心波长、带宽和中心波长差,使传感光栅反射谱与并联的两个光栅都有重叠部分,通过对并联匹配光栅的组合扫描,判断两个重叠部分的变化方向来确定反射谱唯一性[20]。

匹配滤波法优点:结构简单、成本低、适合于静态和低频动态测量。不足之处:测量范围有限,检测灵敏度由PZT位移灵敏度决定,PZT的非线性影响输出结果,系统光损耗较大。

2.3 可调谐滤波法

该法是用不同光学器件和辅助器件构成可调谐光学器件,当可调谐滤波器光谱与传感光栅光谱匹配时,输出值最大,从而跟踪传感光栅波长变化。测量分辨率受反射信号信噪比、可调谐滤波器和传感光栅带宽影响。

2.3.1 可调谐光纤F-P滤波法

该法用F-P腔的波长选择特性来实现波长解调,系统如图6(a)所示,传感光栅反射的窄带光谱经耦合器进入F-P滤波器,当传感光栅反射光谱与F-P滤波器透射光谱重合时,滤波器输出功率最大。F-P腔透射谱与F-P腔的间隔有关,而F-P腔的间隔则受压电体上的锯齿波扫描电压控制,因此,通过测量最大光强值对应的扫描电压可解调出传感波长。另外,也可将光纤F-P滤波器前置,实现图6(b)所示解调系统。将宽带光源光谱变成窄带光谱,扫描传感光栅,当窄带光谱与传感光栅反射谱相同时,产生反射,通过检测反射光谱即可实现波长解调。此法优点是:信号稳定,解

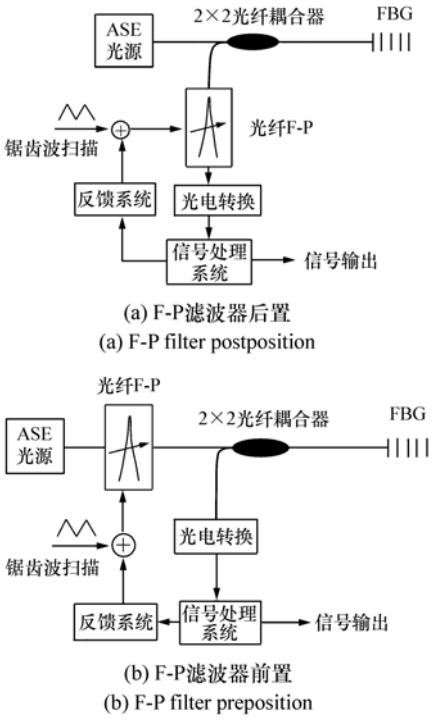

图6 可调谐光纤F-P滤波器解调系统

Fig. 6 Tunable fiber F-P filter demodulation system

调范围大,一般都在 40 nm,精度近似 1 pm,能实现大规模光栅传感网络复用。缺点:可调谐 F-P 滤波器的非线性和不重复性影响解调精度,当扫描频率增加时,滤波器输出信噪比下降,目前的扫描频率一般为 1 kHz。

针对 F-P 滤波器的不重复性问题,2006 年,王军提出采用一个固定波长光栅作为参考光栅的方法,有效减小了可调谐 F-P 滤波器输出中心波长漂移产生的影响[21]。另外,针对驱动电压 V_{FSR} 的变化量不稳定产生的误差,提出了双波长参考法,通过增加可调谐 F-P 滤波器扫描驱动电压的变化范围,使其在一个扫描周期内能两次探测到参考光栅的反射峰,则这两个峰值之间的光谱间距为一个 FSR,对应的扫描电压差为一个 V_{FSR},从而可实时动态测出 V_{FSR},有效提高了系统解调精度。

2009 年,陈亮针对 F-P 滤波器透射波长与驱动电压值线性度不高的问题,提出了一种引入带标记热稳定标准具模块来实现实时校准的解调方法,系统如图 7 所示,宽带光经 F-P 滤波器调谐成窄带光谱后经耦合器分成两路,一路输入到传感光栅,另一路输入到带标记热稳定标准具,标准具透射光作为校准数据[22]。该方法利用带标记热稳定标准具的梳状滤波特性,对传感光栅的反射谱进行分段实时寻峰。优点:有效解决了可调谐 F-P 滤波器驱动电压与透射光谱之间重复测量点扰动影响,解调精度可达 1 pm,不足之处是解调精度受单位谱宽内采样点数的影响。

2011年,刘琨等人针对F-P滤波器非线性问题,采用多项式拟合法来描述 F-P 滤波器透射波长和驱动电压的非线性关系,有效减小了波长的随机误差;另外,采用参考光栅法降低传感光栅波长的定位误差,有效提高了系统解调精度[23]。

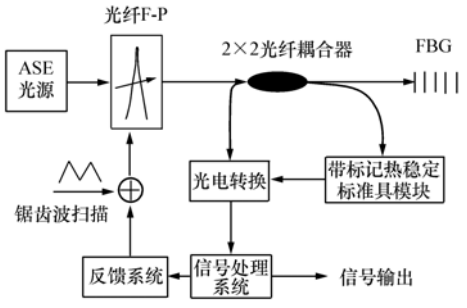

图 7　带标准具模块的可调谐 F-P 滤波器解调系统

Fig. 7　Tunable fiber F-P filter demodulation system with Fabry-Perot cavity standard utensil

2.3.2　声-光可调谐滤波法

该法以电调谐实现波长扫描。工作模式分为扫描模式和锁定模式。扫描模式:电压控制震荡器(VCO)控制声 – 光可调谐滤波器(AOTF)在传感波长范围内扫描,并记录传感光栅反射功率;锁定模式:检测系统采用反馈回路来跟踪特定的光栅波长[24]。优点是:能进行多波长信号的并行处理,从而可实现复用;不足:系统检测精度受 AOTF 带宽影响,精度不高。

2.3.3　可调谐半导体量子阱电子吸收滤波法

该法用量子限制 Stark 效应,调节半导体量子阱电子吸收滤波探测器的吸收边缘,得到一种波长可调谐滤波器[25]。优点:成本低、体积小。不足:解调精度低。

2.4　光源波长可调谐扫描法

2.4.1　可调谐窄带光源解调

该法是通过受锯齿波电压周期作用的外置 PZT 控制可调谐窄带光源,输出在一定波长范围内周期性变化的窄带光谱,扫描传感 FBG 阵列,当光源输出的窄带光谱波长与传感 FBG 反射波长相等时,探测器输出的光功率最大[26]。系统如图 8 所示。

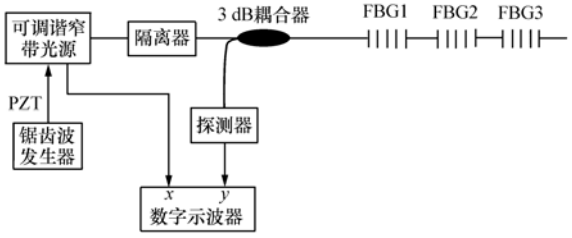

图 8　可调谐窄带光源解调系统

Fig. 8　Tunable narrowband source demodulation system

优点:信噪比和分辨率较高,可得到的最小波长分辨率为 2.3 pm,温度分辨率为 0.2 ℃。缺点:稳定性、可调谐范围和 PZT 响应时间等因素限制了其实际应用。2011 年,张治国等人采用周期性调谐反射式半导体光放大器(R-SOA)与可调谐 FBG 构成窄带可调谐激光器,在波长

1 551.91 ~1 553.92 nm 范围内,实现系统波长探测精度为 0.02 nm,系统结构简单,稳定性高[26]。

2.4.2 锁模调制解调法

该法使用多个传感 FBG、一个宽带反射器和一个锁模调制器构成一个多模态共轴激光腔,通过改变锁模调制器的频率,将激光腔锁定在不同的模态下,输出不同波长的激光,从而对传感光栅进行寻址[28],系统如图 9 所示。缺点:系统分辨率和动态测量范围受锁模结构限制。

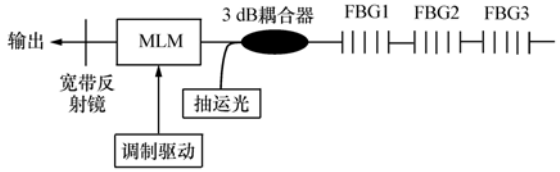

图 9 锁模解调系统

Fig. 9 Mode-locked demodulation system

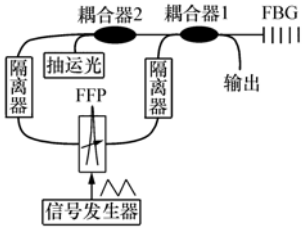

图 10 环形腔光纤激光器激射解调系统

Fig. 10 Erbium-doped fiber ring laser demodulation system

2.4.3 环形腔光纤激光器扫描法

该法是将可调谐 FFP 置于环形光纤激光器,通过 FFP 滤波器调节掺铒环形腔工作波长。环形腔由隔离器、可调 FFP 滤波器、掺铒光纤放大器组成。当 FFP 透射谱与某个传感光栅反射谱一致时,环形腔才能产生激光,通过检测环形腔输出光强便可解调出传感光栅波长[29]。系统如图 10 所示。优点:信噪比高,可以实现波分复用;不足之处:应变分辨率不高,只能在某一波长上静态扫描,不能检测振动信号。

2.5 射频探测法

该法将光源发出的光信号调制成一定频率的正弦射频信号来照射传感光栅和参考光栅,通过监测反射回的射频信号强度变化量来实现波长解调。2008 年 Dong 采用此法实现传感信号解调[30],系统如图 11 所示。

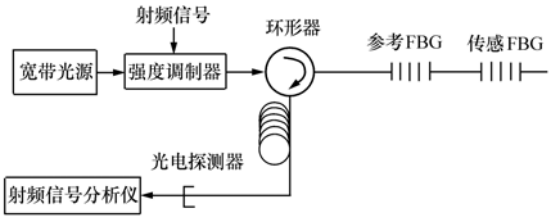

图 11 射频探测法解调系统

Fig. 11 Radio frequency signal measurement system

宽带光源发出的光信号经光电调制器(EOM)调制成一定频率正弦射频信号,经过光栅反射回的光功率信号可表示为:

$$P_{r,s} = P^{c}_{r,s}[1 + m\sin(2\pi ft + \varphi_{r,s})], \quad (1)$$

式中,f 为调制频率,$m(0 < m < 1)$ 为调制系数,P_r 和 P_s 分别为参考 FBG 和传感 FBG 发射的光功率,P^c_r 和 P^c_s 分别为相应的载波光功率,φ_r 和 φ_s 分别为两个调制信号的相位。假设宽带光源的光谱较平坦,则两个 FBG 的调制信号功率相等,即 $P^c_r = P^c_s = P_c$,则输出功率可表示为:

$$P_{out} = P_r + P_s = 2P_c + P_0\sin(2\pi ft + \varphi_0), \quad (2)$$

式中:$P_0 = \sqrt{2}mP_c[1 + \cos(\Delta\varphi)]^{1/2}$ 为射频信号输出强度,P_c 为直流分量,φ_0 为射频信号输出相位。$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_r$ 为两调制光信号相位差,可表示为:

$$\Delta\varphi = 2\pi f(2n\Delta L/c + DL\Delta\lambda), \quad (3)$$

式中:n 为光纤折射率,c 为光速,ΔL 为两个 FBG 间距离,D 为长单模光纤的色散系数,L 为长单模光纤的长度。

由以上可知,输出功率 P_{out} 与 $\Delta\varphi$ 有关,而 $\Delta\varphi$ 又与传感 FBG 波长变化量 $\Delta\lambda$ 有关,因此,可通过检测输出光功率变化量解调出波长变化量。优点:成本低,灵敏度可调,可实现温度补偿,能实现高速测量。不足之处:应变分辨率受光源功率强度和调制信号噪声影响较大。

2.6 光栅啁啾解调法

该法用光栅啁啾效应来测量被测参量信息,根据解调机理可分为强度解调法和相位解调法。

2.6.1 强度解调法

强度解调法是将被测参量的变化转换为光栅

反射光功率的变化,通过测量啁啾光栅反射光功率来测量被测参量信息。系统如图 12 所示,经啁啾光栅反射回的窄带光信号,经耦合器输出到光电探测器,功率可表示为 $P = \eta\int_{\lambda}\rho(\lambda)R(\lambda)\mathrm{d}_{\lambda}$ (η 为光功率传递系数;$\rho(\lambda)$ 为宽带光源的功率普密度,$R(\lambda)$ 为啁啾光栅的反射率)。

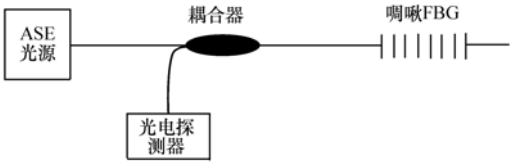

图 12　强度型光栅啁啾解调系统

Fig. 12　Intensity-Modulated demodulation system with chirped FBG

实测过程中,可选用一个功率谱密度相对较平坦的宽带光源,则 $\rho(\lambda)$ 为常数,此时探测功率为 $P = \eta\rho R\Delta\lambda$。2005 年,Dong 采用此思想,提出在直角三角形悬臂梁侧面粘贴光纤光栅,通过悬梁臂弯曲效应产生的光栅啁啾效应,使反射带宽产生变化,导致输出光功率发生变化[31]。2004 年,刘波等人利用啁啾光栅的类矩形反射谱特性,用其作为带通滤波器选择波长,并结合长周期光纤光栅边沿线性滤波技术,实现指定波长范围内传感波长解调[32]。优点:不受环境温度影响;不足之处:应用范围有限,仅适用于与啁啾效应相关参量测量,灵敏度较低。

2.6.2　相位解调法

该法用啁啾光栅波长与相位延迟呈线性关系,将啁啾光栅作为波长敏感元件的波长解调技术。系统如图 13 所示,传感光栅反射信号经光纤放大器放大,由环形器进入啁啾光栅,产生与其中心波长相对应的相位延迟。经啁啾光栅反射回的光信号送入光电探测器,实现光电转换。通过相位探测器来比对探测信号相位和参考信号相位,得到相位变化量。因 $\Delta\varphi = \dfrac{2\alpha(\lambda_1 - \lambda_0)\Omega_0 n}{c_0}$ (α 为由啁啾光栅决定的常数;λ_0 为 Bragg 光栅的初始波长;λ_1 为 Bragg 光栅变化后的波长;Ω_0 为调制频率;n 为纤芯有效折射率),因此,可以通过相位变化量求出波长值,从而实现波长解调。

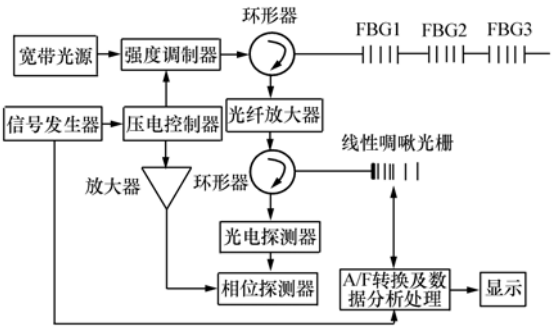

图 13　相位型光栅啁啾解调系统

Fig. 13　Phase-Modulated demodulation system with chirped FBG

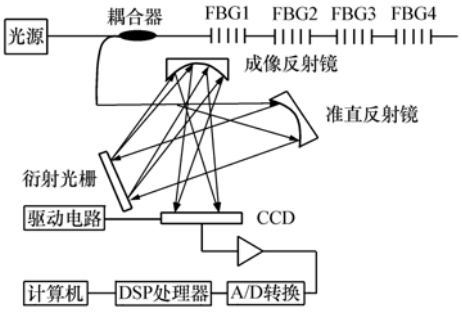

图 14　CCD 分光仪解调系统

Fig. 14　CCD demodulation system

2011 年,李志全等人采用此法实现准分布式光纤 Bragg 光栅传感器解调,系统应变测量范围为 0 ~ 2 000$\mu\varepsilon$,温度测量范围为 0 ~ 80 ℃,相位变化与被测信号线性度达到 0.998[33]。优点:采用全光纤结构、解调速度快、不需要对光强变化进行补偿设计、灵敏度可调、便于实现复用。

2.7　CCD 测量法

该法用衍射光栅将传感光栅反射谱在空间展开,再用 CCD 同时测出各波长的相对光强,根据光斑在 CCD 上的不同成像位置,计算出各波长漂移量,系统如图 14 所示[34-35]。优点:成本低、光能利用率高、响应速度快、抗干扰,可用于静态和动态测量,可实现大容量光栅复用。不足之处:影响波长分辨率的因素较多。

2011 年,崔剑针对低分辨率 CCD 测量 FBG 值波长时影响解调精度的两个因素:一是受 CCD 像素数目限制,扫描 FBG 反射谱获得采样点数有限,精确重构 FBG 反射普难度较大;二是用特定

函数拟合反射谱与 FBG 实际反射谱差异较大。采用基于 FBG 实际反射谱构建基函数匹配 CCD，测量获得有限测量点，确定 FBG 峰值波长偏移量[36]。实现了 CCD 采样点数少、光谱分辨率较低情况下对 FBG 峰值波长偏移量的高精度测量。

2.8 干涉解调法

这类方法是利用干涉仪将波长变化量转化成相位变化量来实现解调，具体分为以下几种：

2.8.1 非平衡 Mach-Zehnder 干涉法

该法是利用非平衡 Mach-Zender(M-Z)干涉仪将传感光栅波长变化量转换成相位变化量，系统如图 15 所示[37]。传感光栅反射光经耦合器入射到非平衡 Mach-Zender(M-Z)干涉仪，干涉仪两臂长度不相等，其中一个臂的长度使用压电陶瓷(PZT)进行动态调整，从而动态改变臂长差 d。干涉仪输出光经光电转换输入相位解调仪，得到输出光相位变化量 $\Delta\varphi$，根据 $\Delta\varphi=\frac{2\pi nd}{\lambda_B^2}\Delta\lambda_B$，可解算出传感光栅反射波长变化量 $\Delta\lambda_B$。

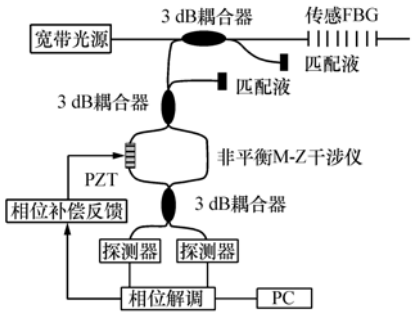

图 15 非平衡 Mach-Zehnder 干涉解调系统

Fig. 15 Unbalanced Mach-Zehnder interferometer demodulation system

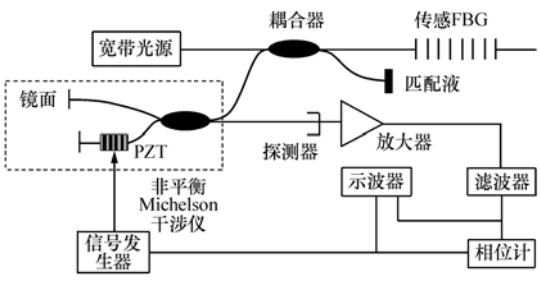

图 16 Michelson 干涉仪解调系统

Fig. 16 Michelson interferometer demodulation system

优点：响应速度快，分辨率高，多适用于动态测量，可对传感网络解调。不足之处：解调精度非线性，解调范围较小，不适用绝对应变测量，易受外界因素干扰。2008 年，张锦龙等人针对该法的不足，采用 XPM(交叉相位调制)技术，应用锁相位方法调制 M-Z 干涉仪信号光相位，避免了使用 PZT 等机械结构，大大提高了系统可重复性和速度，较好地解决了干涉法解调精度非线性和解调范围较小的问题，系统温度测量精度可达 0.1 ℃[38]。

2.8.2 Michelson 干涉解调法

该法利用 Michelson 干涉仪将传感光栅波长变化量转换成相位变化量，系统如图 16 所示[39]。传感光栅反射光经两个耦合器入射到 Michelson 干涉仪，用安装在短臂上的手锯齿电压驱动的压电陶瓷来调解两臂之间光程差，干涉仪输出信号经光电转换、放大、滤波等处理后输入相位计，同时将 PZT 驱动信号作为参考信号输入相位计，调整驱动信号参数，使两路信号频率相同，此时通过相位计输出值可计算出传感光栅波长值。优点：可用于静态和动态测量，响应速度快，应变分辨率达 5.5$\mu\varepsilon$，灵敏度为 1.8$\mu\varepsilon$，可实现复用传感网络解调。不足之处：测量精度受环境影响较大。

2.8.3 Sagnac 干涉解调法

该法用 Sagnac 干涉仪将传感光栅波长变化量转换成相位变化量，系统如图 17 所示[40]。传感光栅反射光经耦合器被分成相等且方向相反两束光，经过保偏光纤产生不同的相位延迟，在相遇点发生干涉，产生与波长相关相位差，通过测量相位差可确定波长，实现解调。

优点：全光纤结构，易于实现小型化，适合静态和动态测量，静态分辨率达 2.12$\mu\varepsilon$，动态分辨率达 77$n\varepsilon/\sqrt{\text{Hz}}$，稳定性和重复性较好。2009 年，张锦龙等人运用此法进行温度测量，平均精度可达 0.03 ℃，准确度 ±0.0 ℃[41]。2003 年，Zhao Dong-hui 等人提出用包含线性啁啾光栅的 Sagnac 光纤环作为干涉仪的解调方案，如图 18 所示[42]。由于顺时针和逆时针传播的光束在啁啾光栅中的反射位置不同，从而导致两束光的相位差发生变化，且与波长有关，从而实现波长解调。静态分辨率达 ±4.2$\mu\varepsilon$，动态分辨率达 0.406$\mu\varepsilon/\sqrt{\text{Hz}}$，且分

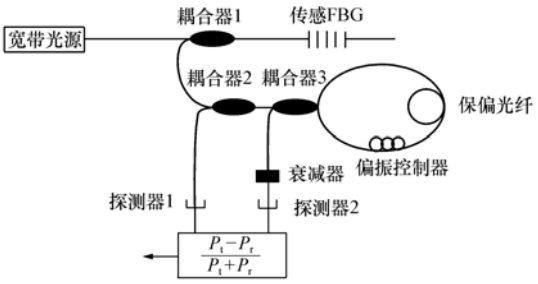

图 17　保偏光纤的 Sagnac 干涉解调系统

Fig. 17　Sagnac interferometer demodulation system with polarization maintaining fiber

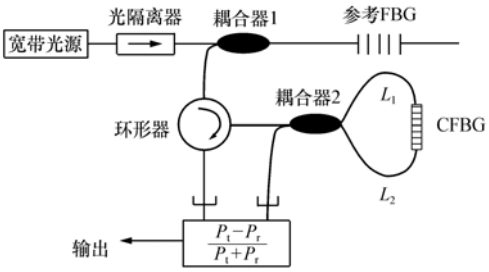

图 18　线性啁啾光栅的 Sagnac 干涉解调系统

Fig. 18　Sagnac interferometer demodulation system with chriped FBG

辨率和动态范围易调节,线性和稳定性较好。

2.8.4　基于光纤偏振分束器和保偏光纤的干涉解调系统

2010 年,王葵如等人采用光纤偏振分束器(PBS)和保偏光纤(PMF)中偏振模干涉原理实现光纤 Bragg 光栅波长解调,系统如图 19 所示[43]。传感光栅反射的窄带谱经偏振控制器进入保偏光纤,激起两个正交偏振模式,经单模光纤进入偏振分束器,两个模式又激起 4 个正交偏振模式,发生干涉后输出成两路信号给探测器。输出信号值与传感光栅反射波长成一一对应关系。

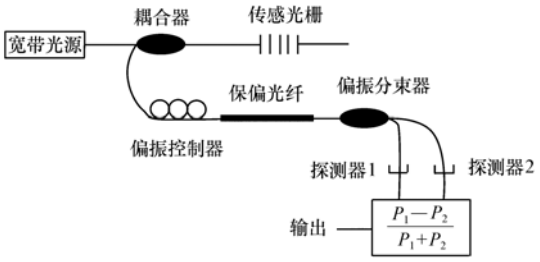

图 19　基于光纤偏振分束器和保偏光纤的干涉解调系统

Fig. 19　Sensor demodulation system using PBS and PM

优点:结构简单、稳定性好、检测精度高,波长分辨率 <1 pm,测量精度 < ±1 pm,光损耗小,对光源功率要求较低,相对其它干涉解调方案受环境影响较小。

为方便了解各种方法优缺点,这里建立一个较粗糙对照表,如表 2 所示。

由表 2 中可看出,边缘滤波法、匹配滤波法、光栅啁啾法、CCD 分光仪法适用于解调精度要求不高,动态范围不大的测量,成本较低;可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、射频探测法、干涉法适合于解调高精度,高频动态信号;可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、CCD 分光仪法、干涉法适用于大容量复用网络解调。

表 2　不同解调算法性能对照表

Tab. 2　Performance comparison of these demodulation method

解调算法	测量范围	解调精度	解调速度	动态测量能力	复用能力	长期稳定性	成本
边缘滤波法	小	低	快	弱	弱	好	低
匹配滤波法	小	低	快	弱	中	中	低
可调谐滤波法	大	高	快	强	强	好	中
波长可调谐光源扫描法	大	高	快	强	强	弱	高
射频探测法	中	高	快	强	弱	中	高
光栅啁啾法	小	低	快	弱	中	中	低
CCD 分光仪法	小	低	快	强	强	好	低
干涉法	小	高	快	强	强	中	低

3 结束语

本文根据解调方法的原理和特点将现有方法归纳为:边缘滤波法、匹配滤波法、可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、射频探测法、光栅啁啾法、CCD分光仪法、干涉解调法。光纤光栅传感器解调技术虽已取得了很大进展,但仍有许多需要深入研究的地方。

在今后的工作中需要进一步深入研究的问题包括以下几个方面:

(1)更大容量分布式传感网络解调。虽然可调谐滤波法、波长可调谐光源扫描法、CCD分光仪法、干涉法可以实现一定容量的分布式传感网络解调,但还不能满足一些大型工程结构,如桥梁大坝、大型舰船和航天器监测系统需要,这是实现光纤光栅传感监测系统规模化的一个关键。

(2)进一步提高系统解调精度、速度和解调范围。现今一些实时在线监测系统对光纤光栅传感系统的性能指标要求较高,而系统解调精度和测量范围两项指标相互制约,因此,如何采用最优化方法同时提高解调系统各方面性能也是今后研究方向之一。

(3)有效降低解调系统成本,实现产品化。在实际生产过程中,产品成本高低是其能否实用化的一个关键因素。通常器件性能越高,价格也越贵。因此,如何在保证系统性能最优化前提下尽可能降低系统成本,使其实现产品化,也是今后研究方向之一。

参考文献:

[1] 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器概况[J]. 光电子·激光,2002,4(13):420-430.
JIANG D SH,HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics · Laser*,2002,4(13):420-430. (in Chinese)

[2] 林钧岫,王文华,王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. 大连理工大学学报,2004,44(6):931-936.
LIN J X,WANG W H,WANG X X. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique[J]. *J. Dalian University Technology*,2004,44(6):931-936. (in Chinese)

[3] 李燕,徐迈,王庆亚,等. 紫外写入光纤光栅应变传感特性研究[J]. 发光学报,2000,21(1):61-63.
LI Y,XU M,WANG Q Y,*et al*.. Strain sensing properties of UV-written fiber grating[J]. *Chinese J. Luminescence*,2000,21(1):61-63. (in Chinese)

[4] MELLE S M,LIU K,MEASURE R M. A Passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,1992,4:516-518.

[5] DAVIS M A,KERSEY A D. All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler[J]. *Electronics*,1994,30:75-77.

[6] 田珂珂,肖浩,曹春耕,等. 利用WDM光纤耦合器的光纤光栅传感解调技术[J]. 光电工程,2005,32(2):49-51.
TIAN K K,XIAO H,CAO CH G,*et al*.. Demodulation of fiber Bragg Grating sensing system based on WDM fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2005,32(2):49-51. (in Chinese)

[7] 黄景堂,黄旭光,赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J]. 光学学报,2008,28(11):2067-2070.
HUANG J T,HUANG X G,ZHAO H W. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensor using the interrogation of arrayed waveguide grating[J]. *Acta Optica Sinica*,2008,28(11):2067-2070. (in Chinese)

[8] 钱翠萍,彭保进,万旭,等. 基于阵列波导光栅温度特性的分布式光纤布喇格光栅解调法[J]. 光子学报,2012,41(7):836-840.
QIAN C P,PENG B J,WAN X,*et al*.. A new demodulated system of distributed FBG based on temperature characteristics of AWG[J]. *Acta Photonica Sinica*,2012,41(7):836-840. (in Chinese)

[9] YASUKAZU SANO,TOSHIHIKO. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Lightwave Technology*,2003,21(1):132-139.

[10] 刘波,童峥嵘,陈少华,等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法[J]. 光学学报,2004,24(2):199-202.
LIU B,TONG ZH R,CHEN SH H,*et al*.. A novel method of edge filter linear demodulation using long-period grating in

fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*,2004,24(2):199-202. (in Chinese)

[11] 沈文杰,赵美蓉,宋乐.基于长周期光栅滤波的光栅解调系统[J].激光与红外,2012,42(1):72-75.
SHEN W J,ZHAO M R,SONG L. Filter demodulation of fiber Bragg grating based on long period grating[J]. *Laser Infrared*,2012,42(1):72-75. (in Chinese)

[12] ZHU D D,LI ZH Q,SUN_F,*et al*.. Simultaneous strain and temperature measurement system with fiber Bragg grating [J]. *SPIE*,2007,6279:627968.

[13] 姜明顺,孟玲,隋青美,等.一种新颖的双边缘滤波光纤布拉格光栅解调技术[J].光电子·激光,2011,22(3):355-358.
JIANG M SH,MENG L,SUI Q M,*et al*.. A novel double edged filter wavelength interrogation technology for FBG[J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2011,22(3):355-358. (in Chinese)

[14] 邹红波,梁大开,曾捷,等.基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅解调系统[J].南京航空航天大学学报,2011,43(6):723-727.
ZOU H B,LIANG D K,ZENG J,*et al*.. FBG demodulation system based on cascaded long-period fiber grating[J]. *J. Nanjing University Aeronautics Astronautics*,2011,43(6):723-727. (in Chinese)

[15] 梁有程,江绍基,余志强,等.基于非对称 F-P 滤波器的光纤光栅解调技术[J].激光与红外工程,2007,36(6):906-909.
LIANG Y CH,JIANG SH J,YU ZH Q,*et al*.. Fiber Bragg grating sensor demodulation technique based on asymmetric F-P filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2007,36(6):906-909. (in Chinese)

[16] 乔学光,丁锋,贾振安,等.一种基于 ASE 光源的边缘滤波解调技术的研究[J].光电子·激光,2009,20(9):1170-1173.
QIAO X G,DING F,JIA ZH A,*et al*.. Research on a demodulation technology based on edge of linear filters of ASE light source[J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2009,20(9):1170-1173. (in Chinese)

[17] 乔学光,丁锋,贾振安,等.基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统[J].光学学报,2010,30(8):2219-2223.
QIAO X G,DING F,JIA ZH A,*et al*.. High precision optical filter Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection[J]. *Acta Optica Sinica*,2010,30(8):2219-2223. (in Chinese)

[18] 陆青,詹亚歌,向世清.光纤光栅应力传感器信号检测中双值问题的研究[J].中国激光,2004,31(8):988-992
LU Q,ZHAN Y G,XING SH Q. Two-values question in signal detecting of strain sensor based on fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*,2004,31(8):988-992. (in Chinese)

[19] 詹亚歌,陆青,向世清,等.优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究[J].光子学报,2004,33(6):711-715.
ZHAN Y G,LU Q,XIANG SH Q,*et al*.. Study on the optimization of matched grating interrogation technique of fiber grating sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*,2004,33(6):711-715. (in Chinese)

[20] 贾振安,郑德琳,刘颖刚,等.一种快速光纤光栅匹配解调系统的研究[J].光通信技术,2012,6:1-3.
JIA ZH A,ZHENG D L,LIU Y G,*et al*.. Study of fast fiber grating matching demodulation system[J]. *Technology Optical Communication*,2012,6:1-3. (in Chinese)

[21] 王军.光纤 F-P 及 FBG 传感器通用解调系统研究与设计[D].重庆:重庆大学,2006.
WANG J. Study and design of general demodulation system for fiber F-P sensor and FBG sensor[D]. Chongqing: Chongqing University,2006. (in Chinese)

[22] 陈亮,黄俊斌,顾宏灿,等.一种实时校准的光纤 Bragg 光栅传感器解调系统[J].传感器与微系统,2009,28(7):89-91.
CHEN L,HUANG J B,GU H C,*et al*.. Real-time calibrating demodulation system of fiber Bragg grating sensor[J]. *Transducer and Micro System Technologies*,2009,28(7):89-91. (in Chinese)

[23] 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,2010,21(7):970-973.
LIU K,LIU T G,JIANG J F,*et al*. Nonlinearity investigation of tunable optical based on FBG sensing system[J]. *J. Op-*

toelectronics Laser,2010,21(7):970-973. (in Chinese)

[24] XU M G,GEIGER H,ARCHAMBAULT J L,*et al*.. Novel interrogating system for fiber Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter[J]. *Electronics Letters*,1993,29:1510-1511.

[25] COROY T,MEASURES R M. Active wavelength demodulation of a Bragg grating fiber optic strain sensor using a quantum well electro absorption filtering detector[J]. *Electronics Letters*,1996,32(19):1811-1812.

[26] BALL G A,MOREY W W,CHEO P K. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation[J]. *IEEE J. Lightwave Technology*,1994,12:700-703.

[27] 张治国,张民,王立芊. 一种基于反射式SOA的FBG传感解调方法[J]. 光电子·激光,2011,22(9):1286-1289.
ZHANG ZH G,ZHANG M,WANG L Q. A FBG wavelength demodulation method based on reflective SOA[J]. *J. Optoelectronics Laser*,2011,22(9):1286-1289. (in Chinese)

[28] KERSEY A D,MOREY W W. Multiplexed Bragg grating fibre-laser strain-sensor system mode-locked interrogation[J]. *Electronics Letters*,1993,29(1):112-114.

[29] YUN S H,RICHARDSON D J,KIM B Y. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser [J]. *Optics Letters*,1998,23(11):843-845.

[30] DONG X Y,SHAO L Y,FU H Y,*et al*.. Intensity-modulated fiber Bragg grating sensor system based on radio-frequency signal measurement[J]. *Opt. Lett*.,2008,33(5):482-484.

[31] DONG X Y,YANG X F,ZHAO C L,*et al*.. A novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement[J]. *Smart Mater. Struct*.,2005,14(2):N7-N10.

[32] 刘波,童峥嵘,曾剑,等. 一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法[J]. 光子学报,2004,33(1):57-60.
LIU B,TONG ZH R,ZENG J,*et al*.. A demodulation method based on chirp grating reflective filter in fiber Bragg grating sensing system[J]. *Acta Photonica Sinica*,2004,33(1):57-60. (in Chinese)

[33] 李志全,曹平,任晓丽,等. 啁啾光栅解调的准分布式光纤Bragg光栅传感器[J]. 光电子·激光,2011,22(4):491-494.
LI ZH Q,CAO P,REN X L,*et al*.. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensor using the demodulation of chirped grating [J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2011,22(4):491-494. (in Chinese)

[34] CHEN S,HU Y,ZHANG L,*et al*.. Digital spatial and wavelength domain multiplexing of fiber Bragg grating based sensors[J]. *Proceedings of the Optical Fiber Sensors Conference*(OSF-12),Williamsburg,VA USA,1997:448-451.

[35] 姚远,易本顺,肖进胜. 光纤光栅传感器的波长解调技术研究进展[J]. 光通信技术,2007,11:41-45.
YAO Y,YI B SH,XIAO J SH. Research progress in wavelength demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. *Technology Optical Communication*,2007,11:41-45. (in Chinese)

[36] 崔剑,懂小鹏,吴兆喜,等. 基于FBG实际反射谱匹配的FBG峰值波长偏移量的高精度确定方法[J]. 中国激光,2011,38(7):0705001(1-5).
CUI J,DONG X P,WU ZH X,*et al*.. A high_precision method for determining the FBG peak wavelength shift based on FBG actual reflection spectrum match[J]. *Chinese J. Lasers*,2011,38(7):0705001(1-5). (in Chinese)

[37] KERSEY A D,BERKOFF T A,MORIE W. High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron Lett*.,1992,28(3):236-238.

[38] 张锦龙,余重秀,王葵如,等. 基于XPM的锁相光纤光栅传感器解调系统[J]. 光电子·激光,2008,19(6):743-745.
ZHANG J L,YU CH X,WANG K R,*et al*.. Demodulation system for phase-locked fiber grating sensor based on XPM [J]. *J. Optoelectronics·Laser*,2008,19(6):743-745. (in Chinese)

[39] 余有龙,谭华耀,钟永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光学学报,2001,21(8):987-989.
YU Y L,TAM H Y,ZHONG Y K. A fiber Bragg grating sensor system with interferometer demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*,2001,21(8):987-989. (in Chinese)

[40] SEUNG HWAN CHUNG,JUNGHO KIM,BONG AHN YU,*et al*.. A fiber Bragg grating sensor demodulation technique using a polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2001(13):1343~1345.

[41] 张锦龙,王葵如,余重秀,等. 基于保偏光纤的高精度光纤光栅传感解调方案[J]. 中国激光,2009,36(3):727-731.
ZHANG J L,WANG K R,YU CH X,*et al*.. A high precision demodulation scheme for fiber grating sensors based on polarization-maintaining fiber[J]. *Chinese J. Lasers*,2009,36(3):727-731. (in Chinese)

[42] ZHAO D H,SHU X W,*et al*.. Fiber bragg grating sensor interrogation using chirped fiber grating based sagnac loop[J]. *IEEE Sensors J*.,2003,3(6):734-738.

[43] 王葵如,张锦龙,余重秀,等. 利用光纤偏振分束器和保偏光纤的传感解调系统[J]. 光学 精密工程,2010,18(9):1923-1928.
WANG K R,ZHANG J L,YU CH X,*et al*.. Sensor demodulation system using PBS and PMF[J]. *Opt. Precision Eng*.,2010,18(9):1923-1928. (in Chinese)

作者简介:

吴　晶(1982—),男,湖北武汉人,博士研究生,讲师,2004 年、2007 年于大连舰艇学院分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤光栅传感技术和结构健康监测方面的研究。E-mail:wj82116@126.com

黄俊斌(1965—),男,湖南湘潭人,博士,教授,博士生导师,2010 年于武汉理工大学获得博士学位,主要从事光纤传感技术、兵器测试与故障诊断技术方面的研究。E-mail: junbinh@public.wh.hb.cn

吴晗平(1964—),男,湖南澧县人,博士,教授,博士生导师,2005 年于华中科技大学获得博士学位,主要从事光电子系统总体技术及设计的研究。E-mail:wuhanping601@sina.com

顾宏灿(1980—),男,江苏靖江人,博士,讲师,2008 年于海军工程大学获得博士学位,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail:guhongcan@yahoo.com