

# 长周期光纤光栅传感信号解调技术研究现状

王清伟 刘月明 田维坚 冯桂兰

(中国计量学院光电学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 长周期光纤光栅(LPFG)对温度、应变、液体浓度等外界环境变化的敏感度要远高于光纤布拉格光栅(FBG),在传感领域具有广泛的应用前景。然而 LPFG 的传感信号解调技术尚不成熟,大大制约了 LPFG 在传感领域的应用。针对现有 LPFG 传感信号的解调方法进行分析与评述,着重介绍了基于边沿滤波技术、法布里-珀罗(F-P)腔扫描滤波技术和阵列波导光栅(AWG)技术的几种解调方案,并对各个方案在解调精度、速度、成本等方面进行了比较与分析。此外,介绍了实现 LPFG 复用解调的方法,并在总结已有技术优缺点的基础上对 LPFG 信号解调技术的发展趋势进行了展望。

**关键词** 光纤传感;信号解调;长周期光纤光栅

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080004

## Review and Progress on Sensing Signal Interrogation Techniques of Long-Period Fiber Gratings

Wang Qingwei Liu Yueming Tian Weijian Feng Guilan

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** The working principle leads long period fiber grating (LPFG) more sensitive than fiber Bragg grating (FBG) in sensing areas such as temperature, strain, concentration, bending etc.. LPFG has great potential in the field of sensors. Compared with FBG sensing signal, the signal interrogation of LPFG needs further research to satisfy the LPFG sensing application. The signal interrogation techniques of LPFG are reviewed and analyzed. The methods of using edge-filter, Fabry-Perot (F-P) cavity and arrayed waveguide grating (AWG) to interrogate LPFG sensing signal are analyzed and compared particularly. The approach to interrogate multiplexed sensors based on LPFG is introduced. Summary and expectation of demodulation technique development trend are presented.

**Key words** fiber optic sensor; signal demodulation; long period fiber grating

**OCIS codes** 060.2300; 000.3110; 060.2370

## 1 引言

光纤光栅技术自诞生就受到了高度的重视,关于其研究与应用也不断地深入与成熟。光纤光栅发展至今已有 30 多年,其种类逐渐多元化,根据不同的出发点形成了多种分类方法。最基础的是根据周期长短进行划分。一般来说,周期小于  $1\ \mu\text{m}$  的光纤光栅被称为短周期光纤光栅,也就是人们熟知的光纤布拉格光栅(FBG)。周期从几十至几百微米的光纤光栅被称为长周期光纤光栅(LPFG)。

光纤光栅在通信与传感领域都有着极其重要且广泛的应用。在传感领域中,光纤光栅有着灵敏度高、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、可遥测、体积小、价格便宜、可埋入工程材料及能够进行分布式测量等诸多优点,因此受到了极高的重视。

**收稿日期**: 2012-02-15; **收到修改稿日期**: 2012-03-26; **网络出版日期**: 2012-05-21

**基金项目**: 浙江省重大科技专项(2010C11068)和浙江省自然科学基金(Y1091078)资助课题。

**作者简介**: 王清伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅解调方面的研究。E-mail: wqw1987126@sina.com

**导师简介**: 刘月明(1967—),男,教授,硕士生导师,主要从事微光机电系统和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: liuym@cjlu.edu.cn(通信联系人)

关于 FBG 在传感领域应用的研究一直都是热点,在其制作工艺、结构设计、应用方式、解调技术等各个方面都已经取得了极大的成就,其相关技术很多都已成熟并实现商品化。LPFG 包层模的有效折射率受外界环境影响较大,使其本身谐振波长和幅值对外界环境的变化异常敏感。这使 LPFG 在温度<sup>[1,2]</sup>、应变<sup>[3]</sup>、浓度<sup>[4,5]</sup>、弯曲<sup>[6~8]</sup>灵敏度上都要远高于 FBG,因此 LPFG 在传感领域应当具有比 FBG 更为广阔的应用前景。然而实际情况是 LPFG 在传感领域的应用要远远滞后于 FBG。

制约 LPFG 在传感领域应用的主要原因是 LPFG 传感信号的解调技术尚不成熟,目前还没有低成本、高性能、产业化的解调仪器。而 FBG 传感信号解调技术已经实现了全面的产业化。同时 LPFG 具有较大的损耗峰带宽,其透射式的工作模式导致 LPFG 复用效率低,且不像 FBG 容易实现复用调制与解调,这令 LPFG 难以满足现今传感系统对多点式、分布式测量的需求。此外 LPFG 传感器在批量生产中光栅一致性的工艺问题也是一个原因。本文对 LPFG 传感信号的解调方法进行综述,分析和比较了几种解调方案,并对解调技术的发展趋势做了展望,以期 LPFG 更好地应用于传感领域提供参考。

## 2 光纤光栅传感解调技术

FBG 的传输特点是传输方向相反的模式之间发生耦合,反射谱如图 1(a)所示,可将其视为反射型的带通滤波器;LPFG 的特点是前向传输的纤芯基模和 P 阶包层模发生耦合,无后向反射,透射谱如图 1(b)所示,可将其视为透射型的带阻滤波器。

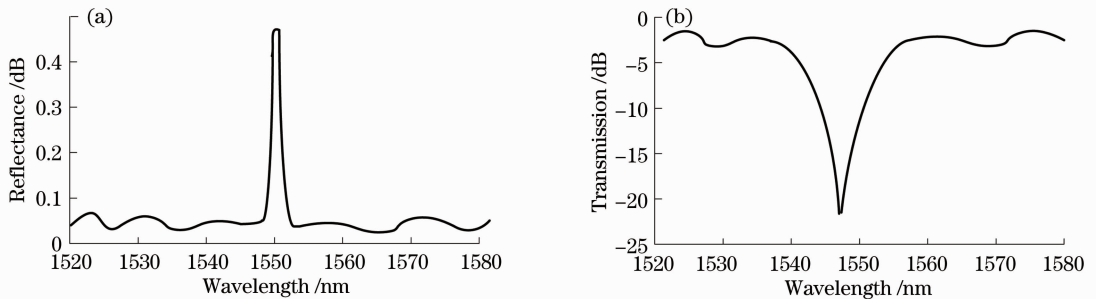


图 1 (a) FBG 反射谱和(b) LPFG 透射谱

Fig. 1 (a) Reflectance spectra of FBG and (b) transmission spectra of LPFG

对于传感系统而言,传感信号的解调技术直接影响到系统的性能以及实用化程度。光纤光栅是一种波长调制型器件,无论是 FBG 还是 LPFG,当外部待测参量发生变化时,其反射或透射波长将发生相应的漂移。根据波长漂移量与待测参量的对应关系,就可以求出待测参量的准确值。因此,光纤光栅传感解调技术的主要目的就是求出波长的漂移量。根据图 2 可知,对于 FBG 主要是求其反射回的窄带信号的波长漂移量,而对于 LPFG 则主要是其透射谱损耗峰的波长漂移量。这是二者最大的区别,也是导致 LPFG 传感信号不易解调的主要原因。

光谱分析法是最为传统同时也是精度最高的方法,它能够直接显示传感信号的光谱,因此能够准确地获得 FBG 与 LPFG 传感信号波长的漂移量。但光谱分析法要用到诸如单色仪、傅里叶变换光谱仪等光学仪

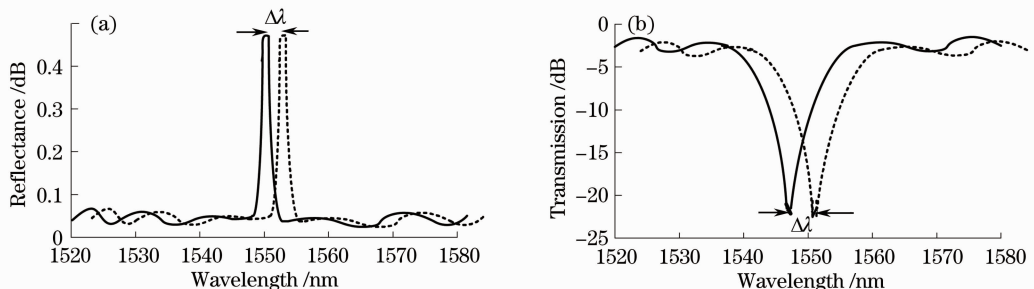


图 2 (a) FBG 和(b) LPFG 中心波长漂移量

Fig. 2 Central wavelength shift in (a) FBG and (b) LPFG

器。这些仪器普遍价格昂贵、体积大、不易维护修理。因此该方法比较适合在实验室使用,一般难以在实际工程现场的传感系统中使用。

为了能在各种应用中准确获得传感信号的波长漂移量,人们通常将传感的波长编码转化成为强度变化或者相位编码来进行测量。波长解调技术有多种分类方法,若仅从解调系统的机理来考虑,主要分为滤波法和干涉法。

干涉法是利用光波的相干性,将信息波长编码转化为相位编码。干涉法的检测精度极高,且因为随机相移使得它能够适用于动态测量。尽管优点很突出,但干涉法因为光程差不易稳定、极易受外界环境干扰,应用时有很大的难度,现今的商品化解调仪中很少采用干涉法来实现。因此,干涉法的实用化程度要远远落后于滤波法。几种典型的方案为非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪解调法<sup>[9,10]</sup>、非平衡迈克耳孙干涉仪解调法<sup>[11,12]</sup>和环镜干涉解调法<sup>[13]</sup>。

而滤波法则是现在应用最为广泛且发展很成熟的一种信号处理方法,主要是将信息波长编码转化为强度编码。它的功能是抑制不需要频段内的信号,仅让所需频段的信号通过。传统的解调方案主要有可调光纤法布里-珀罗(F-P)腔滤波解调法<sup>[14~16]</sup>、边缘滤波法<sup>[17,18]</sup>和匹配光纤光栅滤波解调法<sup>[19,20]</sup>。

分析FBG和LPFG的传输谱可以看出,FBG传感信号是一个特定波长处的窄带信号,在一般应用中对其波长漂移范围的要求只有1~4 nm,因此在几十纳米的光源有效带宽内,合理安排每一个FBG中心波长的位置,就可以级联数个甚至几十个FBG,且不会相互影响,因此容易实现FBG传感信号的解调以及复用。而对于LPFG来说,首先,它的传感信号光谱是一个具有极大带宽损耗峰的透射谱,在各个波长位置都有信号存在;其次,环境的变化不仅仅会导致其损耗峰波长变化,还会导致其衰减程度发生变化<sup>[21]</sup>;此外,LPFG还有可能出现多级透射谱的情况。因此想要准确检测出其损耗峰波长位置的变化要更加困难与复杂。上述几种传统的解调方案能够很好地实现对FBG传感信号的复用和解调,但对于LPFG,就难以取得和FBG一样的解调效果。

现今LPFG的应用主要表现为两个方面:1)利用其阻带上线性较好的区段对FBG传感信号进行滤波解调<sup>[22~24]</sup>,通常称为边沿滤波器;2)利用其对环境信息异常敏感的特性作为传感器使用。针对LPFG自身传感信号的解调技术要相对复杂。LPFG复用效率低及其传感信号难以解调是制约LPFG在传感领域广泛应用的重要原因。关于LPFG传感信号解调技术的研究一直在进行,也取得了不少成果。

### 3 几种典型的 LPFG 传感信号解调方案

LPFG的传感机理决定了其对特定波长具有损耗能力,表现在特征谱线上为一个损耗峰,如图1(b)所示。外界待测参量的变化将会使LPFG的相应波长发生微小移动,如图2(b)所示。获得该波长漂移量,再根据波长漂移量和外界待测参量的函数关系,就可以求出待测参量的准确值,达到检测目的。考虑到LPFG传感信号是具有大带宽损耗峰的透射谱,在多个波长位置皆有信号存在,因此关于其传感信号的解调势必有别于FBG。

#### 3.1 边沿滤波法

边沿滤波法的基本原理如图3所示,特定波长的光信号进入LPFG,当外部待测参数发生变化时,LPFG的透射谱将发生波长漂移,输入光信号波长位置的光栅衰减率也会相应变化,导致出射光信号的光强发生变化。边沿滤波法虽然不能准确还原LPFG谱形,但是通过测量光强的变化可以得到波长的漂移量。边沿滤波法一般有3种实现方式。

1)单波长光源法,如图4所示,输入光信号经LPFG透射被光电探测器接收,则光强的变化转化为电压的变化。当外界待测参量发生变化时,LPFG透射谱的中心波长发生漂移<sup>[25]</sup>。由于边沿滤波效应,光电探测器

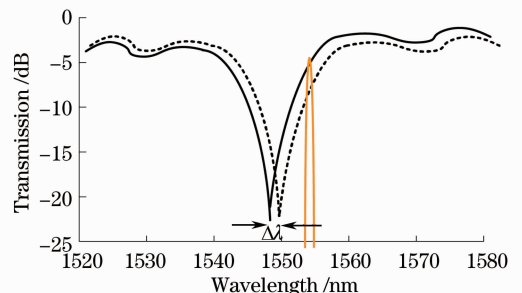


图3 边缘滤波原理示意图

Fig. 3 Sketch graph of edge filtering

(PD)接收的光强大小也会发生变化,探测器输出的电压值也相应变化。根据电压值的变化量就可以求出 LPFG 中心波长的漂移量。

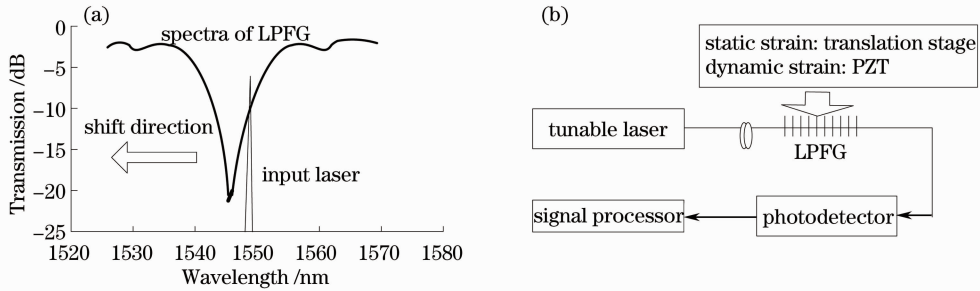


图 4 (a)单波长光源边缘滤波原理图; (b)单波长光源边缘滤波解调系统

Fig. 4 (a) Sketch graph of single-wavelength edge filter; (b) system for the strain response of LPFG

利用此方法对静、动态轴向应变进行测量<sup>[26]</sup>。将 LPFG 一端固定,另一端固定于微动平台,调整微动平台施加静态轴向应变。根据实验数据可得应变-电压关系曲线,实际应用时将所测电压值直接代入曲线方程即可求得相应的应变值。测量分辨率小于  $10 \mu\epsilon$ ,精度为  $\pm 10 \mu\epsilon$ 。如果将微动平台替换为压电陶瓷(PZT),则可采用对压电陶瓷施加交流电压的方式对 LPFG 施加动态轴向应变。改变交流电压的频率,通过最终输出电信号频率的平移量也可求出施加的应变值。实验得知 LPFG 能够响应 5 kHz 以上的动态应变。

2) 窄带滤波法。如图 5 所示,宽带光源(BBS)发出的光信号经 FBG 反射后进入 LPFG,出射光信号经由光电探测器接收送至信号处理器。此处 FBG 的主要作用是作为一个反射型窄带滤波器,目的是为 LPFG 提供一个固定波长的窄带光信号。外界待测参量使得 LPFG 透射谱与 FBG 反射光信号中心波长的相对位置发生变化,进而导致出射光强的变化,最终通过探测器输出的电压值的变化求出透射谱中心波长的变化<sup>[27,28]</sup>。这种实现方式的机理同单波长光源实现的边沿滤波法基本相同。利用这种方法对最高振动频率 6 kHz 的薄板结构振动信号进行监测,实验结果表明经由该方案所测得的时域波形及频谱与激振信号频率完全吻合<sup>[29]</sup>。这种方式系统结构易于变化,如对 FBG 或 LPFG 进行级联,可以在同一信号中包含多种信息,方便系统实现复用。若将此方式中的 FBG 作为传感器,LPFG 作为边沿滤波器件,则其结构就是现今热门的 FBG 边沿滤波解调系统,其应用已经相当广泛。

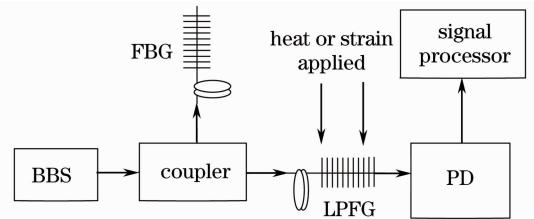


图 5 结合 FBG 的 LPFG 边缘滤波解调系统原理图  
Fig. 5 Schematic diagram of the hybrid FBG-LPFG intensity demodulation sensing system

3) 光纤环境滤波法。另外还可以直接利用边缘滤波器件对 LPFG 的透射谱进行解调,基本原理如图 6 所示,采用性能指标相同的双 LPFG,LPFG1 和 LPFG2 分别位于边沿滤波器的上升沿和下降沿。当外界待测参量发生变化时,LPFG1 和 LPFG2 各自的谐振波长将向相同的方向移动,但经边沿滤波器调制后,各自的出射光强信号变化趋势相反。用  $I_1$  和  $I_2$  分别表示经滤波后的光强,定义

$$\Delta I = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) \quad (1)$$

为 LPFG 波长的调制函数。由于  $I_1$  和  $I_2$  都与波长成线性关系,当二者斜率近似相等时有

$$\Delta I = k\lambda + b. \quad (2)$$

通过后期的数据处理,即可求得波长值。图 7 给出了一种利用光纤环境作为滤波器件的解调系统示意图。光源发出的光经光纤环境的调制,由耦合器分成两束进入双 LPFG。当外界待测参量发生变化时,LPFG 透射光强发生相应变化,光强信号经过光电探测器接收,转化为电压信号,并通过计算机进行数据处理求出波长的漂移量<sup>[30]</sup>。利用此系统对可变体机翼翼表温度进行测量,温度灵敏度可达  $0.053 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,温度分辨率  $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ,系统线性度  $0.9997$ <sup>[31]</sup>。



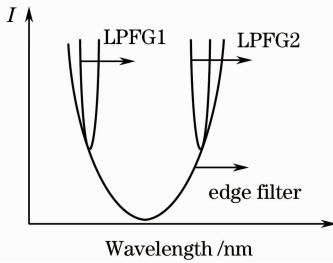


图 6 双 LPFG 边缘滤波原理图

Fig. 6 Sketch graph of edge filter using two LPFGs

### 3.2 基于 F-P 扫描滤波器的解调方案

F-P 扫描滤波器相当于一个波长选择器件,只有当输入光波长符合 F-P 腔的透射波长时才能被透射。F-P 腔由扫描电压驱动,其腔长跟施加在 F-P 腔一侧的驱动电压成正比关系。当腔长发生变化时,F-P 腔允许的透射光波长也随之发生变化。若在 F-P 扫描滤波器后端接光电探测器,当输入光波长与 F-P 腔透射波长相吻合时,探测器将探测到最大光强,此时所施加的电压就可以用来表征透射光的波长。若对其施加周期性的电压,则可对确定波段内的波长实现周期性的滤波扫描<sup>[32]</sup>。F-P 法可以通过不同波长位置处光强值所对应的电压值,近似地还原出 LPFG 的谱形,根据最小电压值可以求出中心波长及其漂移量。

基于 F-P 扫描滤波器的解调系统如图 8 所示,宽带光源发出的宽谱光经 LPFG 传感器透射进入 F-P 扫描滤波器。对 F-P 腔施加均匀扫描的周期性三角波电压,当 F-P 扫描滤波器的输出光扫过携带待测参量信息的 LPFG 透射谱并与之发生交叠时,由于 LPFG 损耗峰的作用,探测器所接收到的光强将相应地减弱,即 F-P 扫描滤波器在不同腔长下的透射谱的包络与 LPFG 透射谱重叠,如图 9 所示。出射光经光电转换和放大,光强的变化转化为电压的变化,透射谱衰减率最大处的电压值最小。在扫描电压的驱动下,一个周期内,将出现探测器两次探测到光强最小的情况。利用计算机将两次光强最小时最小电压所对应的 F-P 扫描滤波器驱动电压值进行比较,建立驱动电压值与透射波长值的对应关系,就可以得到 LPFG 中心波长的漂移量。利用此方法检测不同浓度的蔗糖溶液,得到浓度灵敏度系数  $0.00293 \text{ nm} \cdot \text{L/g}$ ,分辨率  $2.35 \text{ g/L}$ ,与用光谱仪监测相应波长做对比具有同样的效果<sup>[33]</sup>。

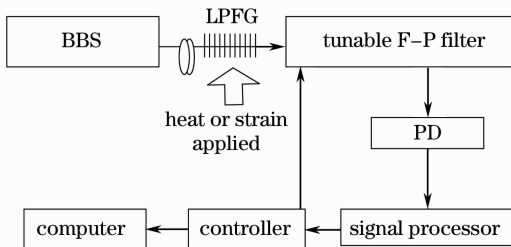


图 8 基于 F-P 扫描滤波器的解调系统

Fig. 8 System based tunable F-P filter

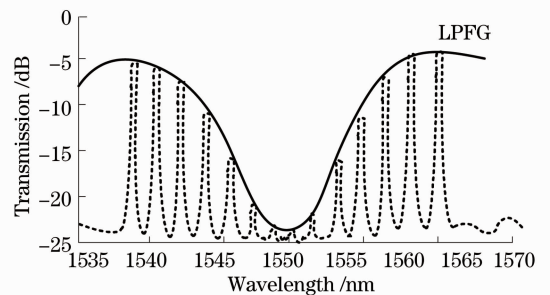


图 9 LPFG 透射谱和 F-P 相应透射谱

Fig. 9 Transmission spectra of LPFG and F-P cavity

### 3.3 基于阵列波导光栅的解调方法

阵列波导光栅(AWG)是实现波分复用和解复用的关键光学器件。利用 AWG 对光纤光栅传感信号进行解调也是现在光纤传感领域的研究热点<sup>[34]</sup>,采用 AWG 的光纤传感系统具有设计灵活、性能稳定、低插入损耗、低串扰、解调精度高等特点。

利用 AWG 对 LPFG 传感信号进行解调的原理如下:光源信号 LPFG 透射耦合进 AWG,AWG 的通道光谱与 LPFG 传感信号光谱重叠,如图 10 所示。对 AWG 各个通道出射的光信号进行光电转换,则传感信号光谱各波段功率就可以被一一测出。再利用高斯拟合重塑传感信号光谱曲线,通过计算高斯拟合函数的一阶导数便可求得中心波长,从而实现光谱曲线移动的检测,最终确定光纤光栅中心波长移动量,实现对传感信号的解调<sup>[35,36]</sup>。

解调系统原理图如图 11 所示,宽带光先经掺铒光纤放大器(EDFA)增强光能量,再通过 LPFG 调制,其透射光谱进入 AWG。光电探测器阵列对 AWG 各通道输出光强进行探测,并将结果经光电转化后送入数据处理器。处理器进行相应的曲线拟合,并对曲线求导以求得中心波长。利用此系统对应变进行了测量,结果表明采样频率越高,用以进行曲线拟合的数据越多,精确度越高。测量误差小于 0.07 nm,最小衰减变化量 0.6~0.8 nm<sup>[37]</sup>。

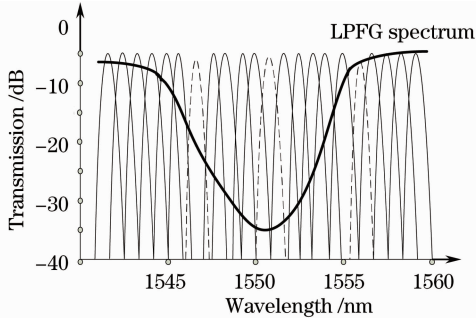


图 10 AWG 各通道光谱情况与 LPFG 光谱

Fig. 10 Spectra of AWG and LPFG

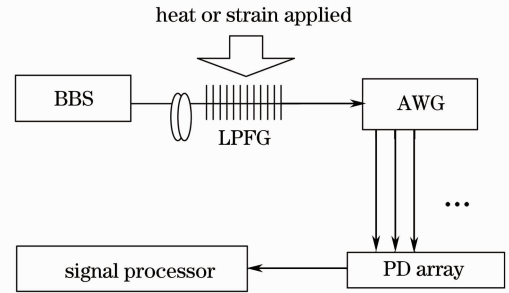


图 11 基于 AWG 的解调系统原理图

Fig. 11 Interrogation system based on AWG

以上分别介绍了利用边沿滤波法、F-P 滤波法和 AWG 对 LPFG 传感信号进行解调的方案。从解调精度上来看, F-P 法利用 F-P 滤波器进行波长选择, 将 LPFG 不同波长位置处的光信号强度准确反映出来, 利用这些光强对 LPFG 中心波长及漂移量进行确定, 因此 F-P 法解调精度最高。AWG 利用自身特性将送入其中的光信号按波长值排列, 分送到各个信道上输出, 通过 AWG 各信道输出的光强求得 LPFG 的中心波长。但是由于 AWG 的信道数目有限, 一方面只能获得有限个波长位置处的光强变化量, 另一方面各信道自身具有一定带宽, 利用一定带宽内的光强难以精确表征 LPFG 特定波长位置光强, 所以 AWG 法的精度要比 F-P 法低。边沿滤波法利用特定波长位置处的光强变化来表征 LPFG 的波长漂移量, 为了能得到准确结果, 要求所用的 LPFG 光谱中心损耗峰具有较高的衰减度和较窄的带宽, 同时要求线性边缘的线性度要非常好, 这给实际应用带来了极大的困难。最重要的是, LPFG 在中心波长发生漂移的同时其损耗峰衰减度也会发生变化, 因此不能简单地利用光强的变化表征中心波长的漂移量。因此, 边沿滤波法解调精度最低, 且难以进行实际应用。

从解调速度上来看, F-P 法需要进行逐点扫描, 所以解调速度最慢。AWG 各信道能同时反映不同波长处光强信息, 因此解调速度最快。边沿滤波法因无需扫描, 其解调速度介于二者之间。

从复用效果上来看, F-P 法可以对较大带宽范围内的信号进行扫描, 因此可以在保证精度的基础上实现级联 LPFG 的波分复用。而 AWG 有效带宽较窄, 其波长范围一般难以包含两个以上互不影响的 LPFG 传输谱, 因此难以实现复用。而边沿滤波法虽然可以利用多路耦合器对多个并联 LPFG 同时进行滤波, 但考虑到光源功率和解调精度, 其复用效率并不高。

从成本上考虑, 主要体现在各个方法所用的核心器件上。F-P 腔最为昂贵, AWG 相对成本要低, 而边沿滤波法只要滤波器件选用合适, 则可大幅度降低成本。

如何在各方案间取长补短, 提出高精度、高速、低成本、提升 LPFG 复用效率的新方法, 是今后 LPFG 解调技术发展所关注的核心问题。

#### 4 基于 LPFG 传感器的复用信号解调技术

现今传感领域对多参量分布式测量提出了极高的要求, 这使得如何设计分布式传感网络, 如何实现信号的多路复用/解复用成为传感领域需要面对的重要问题。前面已提到, 对于 FBG 而言, 其传感信号为某一特定波长处的窄带信号。只要根据实际需要合理分配多个 FBG 的中心波长位置, 在几十纳米的范围内可以复用几个甚至几十个 FBG, 且彼此间不会相互影响, 因此容易实现 FBG 传感信号的复用调制与解调。FBG 复用技术已经较为成熟并已投入实际应用。

相比而言,LPFG 传感信号光谱是透射谱,其损耗峰带宽较大,在不同波长位置皆有信号存在。若多个 LPFG 进行级联,则彼此间的谱形非常容易产生交叠。即使合理分配位置避免了谱形的交叠,又由于其损耗峰带宽较大,难以采用波分复用的工作模式,势必造成其复用效率过低。同时 LPFG 具有透射式的工作模式使其难以采用已有的时分复用系统。这些问题都对 LPFG 传感信号复用调制及解调造成了困难。

虽然 LPFG 传感信号实现复用调制与解调具有许多困难,但人们经过长期的研究,还是提出了一些思路与方案来解决这个问题。

其一是波分复用。可以在 F-P 滤波解调法的基础上进行改进,如图 12 所示。合理分配级联 LPFG 的各自谱形位置,保证各 LPFG 在实际测量所需的波长漂移范围内避免彼此谱形的交叠。尽量减小 LPFG 透射谱的带宽,使 F-P 扫描滤波器的扫描波长范围能够覆盖所有 LPFG 透射谱。当级联 LPFG 中任意一个谱形发生变化时,都能从相应的最小电压值反映出来。其二是空分复用,如图 12 所示,利用光开关对每一路级联 LPFG 进行空分复用,就可以实现对 LPFG 传感信号的复用与解调。该方法可以实现对 LPFG 传感信号较高精度的解调,但成本较高,由于需要进行扫描滤波以及光开关切换,解调速度将会较慢。还有一种并行解调方法是将图 12 中的光开关换为多路耦合器,这样大大加快速度,但同时对光源提出了更高的要求。

另外一种是基于低相干干涉原理提出的低相干复用技术<sup>[38]</sup>。相干复用技术是通过不同的干涉发生条件区分传感网络中的各个传感点。若对低相干干涉中光源引入的光程差预先设定,则可利用扫描干涉仪中的可动光路来区分具有不同光程差的传感点。

基于低相干复用原理设计的解调复用系统如图 13 所示,宽带光源波长范围覆盖 LPFG 透射损耗峰,经耦合器分配到数个光路中。设计专门的“LPFG”对的光纤型 M-Z 干涉仪传感器<sup>[39]</sup>将干涉引入 LPFG,进入其中的光信号将发生干涉。每个光路中的“M-Z LPFG 对传感器”都不相同,这样每个传感器就对其中的光信号引入了不同的光程差。多路复用的光信号通过单向光隔离器后,进入了一个类似于 M-Z 干涉仪的结构,只要对其中一个反射镜施加微量位移,就会给反射的两路信号光引入光程差。随着可动臂的扫描,不同光栅中心距离的传感器所引入的光程差会被干涉解调系统引入的光程差所补偿。补偿后的两路光信号将重新发生干涉,并被光电探测器接收,转化为电压信号后送入计算机。经数据处理可以将时间干涉图转化成空间干涉条纹,提取干涉图样信号。再通过计算干涉图样,就可以获得待测参数。例如对信号进行快速傅里叶变换(FFT)处理,可重建各 LPFG 的透射光谱,以此完成对各个传感器波长的解调。低相干复用还可采用基于迈克耳孙自干涉的 LPFG 传感器来实现,其反射式工作模式可以极大地提升复用传感系统组网的灵活性。

此外还有基于光频域反射的复用技术<sup>[40]</sup>。虽然这些复用技术尚处于实验室研制阶段,但却为 LPFG 的复用打开了新的研究方向。

## 5 LPFG 传感信号解调技术展望

关于 LPFG 传感信号解调技术的研究仍有许多需要进行深入研究的地方,主要集中于以下几个方面。

1) 提出新的方法与思路解决分布式传感组网问题及信号复用及解调问题,这样才能提高分布式测量的

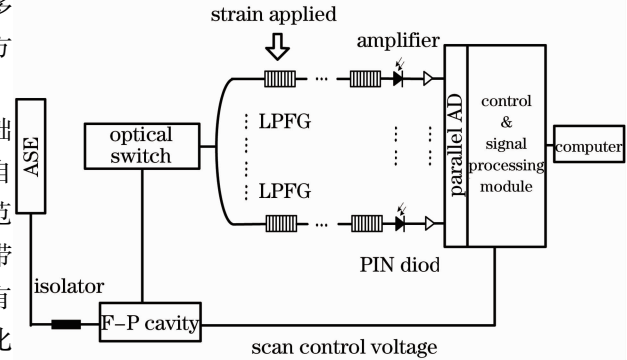


图 12 基于 F-P 法的解调复用系统原理图

Fig. 12 F-P cavity interrogation system for multiplexed sensors based on LPFG

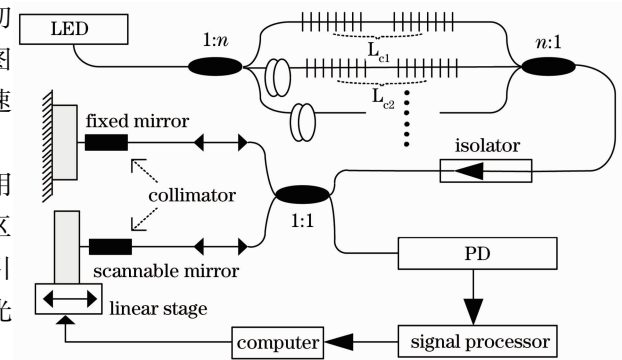


图 13 基于 M-Z 干涉仪技术的低相干解调复用系统原理图

Fig. 13 Low-coherence interrogation system for multiplexed sensors based on LPFG M-Z interferometers

精确度、测量效率以及低成本化。监测目标越多,组网越复杂,相应地对信号解调技术要求也就越高。现在大型工程诸如油田、工厂高温管道与锅炉、桥梁大坝等的安全监测系统对分布式测量提出了极高的要求。这是现在光纤光栅传感系统必须考虑的关键问题,也是实现 LPFG 的实用化与广泛化的关键。

2) 交叉敏感问题的消除。LPFG 对外界温度、应变等多种物理量的变化都具有很高的敏感性,这会给出测量结果带来极大的误差,主要是温度交叉敏感问题。解决温度交叉敏感问题的主要思想是增敏及去敏,即增加对被测量的灵敏度,同时降低对非被测量的敏感程度<sup>[41]</sup>。具体实现方法一方面可以通过设计开发新型传感器或通过传感器制造工艺解决,另一方面可以在解调系统中通过软件或硬件的方法来解决。一般来说,硬件上越复杂,软件算法越简单;硬件上越简单,软件算法越复杂。

实际应用中常采用参考光栅法<sup>[42]</sup>。例如在对应变量进行测量时,对温度进行单独测量,这样就可将结果中将由温度所导致的波长变化量分离出来。此外还有双波长法、双边缘滤波法<sup>[43]</sup>等。解决交叉敏感问题能够极大提升系统的测量精确度,从而提高系统总体性能。

3) 提升系统解调精度、解调速度、测量范围。现今工业生产对光纤光栅传感系统提出了更高的性能要求,在精度上要求解调结果达到皮米量级;在速度上要求系统响应频率达到 1 kHz 以上,以实现实时在线监测;随着实际应用对多参量测量需求的逐渐提高,需要尽可能多地增大系统测量范围,提升测点数。对于传感解调系统,提高单一技术指标较容易实现,但要以上三者同时提高就要困难得多。例如,在光纤光栅传感系统中,为了增大传感器线性响应范围,都采用宽谱光源,但宽谱光源的输出功率有限;而解调系统对于信噪比有很高的要求,这又对光源高功率提出了要求。这两方面的要求此消彼长,不可兼得。解决方式要么选用高性能的宽谱光源,要么采用微弱信号检测技术。如何处理二者之间的关系对解调系统精度以及产品成本有很大的影响。因此,如何采用最优化的方法同时提升系统各方面性能是光纤光栅传感系统一直以来的关键问题。

4) 有效降低产品成本。在实际生产中,产品成本的高低是其能否实用化的关键问题。采用性能越高的器件,系统最终性能也越高。但高性能的器件普遍价格昂贵,难以实用化。因此,在保证系统性能最优化的前提下最大程度地降低成本方能迎合市场需要,也将一直是光纤光栅解调技术的研究方向。

## 6 结束语

在光纤光栅传感领域中,LPFG 因其自身的特性已成为研究的热点方向之一。又由于 LPFG 的优点,它在光纤传感领域具有巨大的应用潜力,与其相关的解调技术是一个需要深入研究的问题。只有加大研究力度、提出更多有效的解调方案,才能早日使 LPFG 传感解调技术走向实用化。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Yingcai, Gu Zhengtian. Development of temperature sensors based on long-period fiber grating[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(2): 11~13  
吴英才, 顾铮先. 长周期光纤光栅温度传感器的研究进展[J]. 激光杂志, 2009, **30**(2): 11~13
- 2 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Very-high-temperature stable CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9): 740~742
- 3 Zhang Zhirong, Zhang Guanmao, Zhang Xiaoping. Strain and temperature sensitivities of long period fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 103~105  
张志荣, 张冠茂, 张晓萍. 长周期光纤光栅应变和温度传感灵敏度研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 103~105
- 4 Zhao Hongxia, Ding Zhiqun, Wang Jinxia *et al.*. A high sensitivity concentration sensing demodulation technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1294~1297  
赵洪霞, 丁志群, 王金霞 等. 一种高灵敏度浓度传感解调技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1294~1297
- 5 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305003  
顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0305003
- 6 Chen Chengjin, Zhou Xiaojun, Lan Lan *et al.*. Study on long-period fiber gratings based on micro-bend effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1955~1959



- 陈成金, 周晓军, 兰 岚 等. 基于微弯效应的长周期光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 1955~1959
- 7 Y. Liu, L. Zhang, J. A. R. Whllams *et al.*. Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5): 531~533
- 8 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on torsion characteristics of a new-type long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 关寿华, 于清旭, 郑建洲. 一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 9 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~238
- 10 Li Li, Lin Yuchi, Wang Wei *et al.*. The study of fiber Bragg grating demodulating technology based on unbalanced M-Z interferometer[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, **30**(2): 16~18
- 李 丽, 林玉池, 王 为 等. 光纤光栅非平衡 M-Z 干涉解调技术研究[J]. 压电与声光, 2008, **30**(2): 16~18
- 11 Y. J. Rao, D. A. Jackson, L. Zhang *et al.*. Combined spatial and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2149~2151
- 12 Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. High stability fiber 3×3 coupler interferometric displacement measurement system[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(2): 235~239
- 李 敏, 谢 芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉位移测量系统[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(2): 235~239
- 13 X. P. Dong, Shenping Li, K. S. Chiang *et al.*. Multiwavelength erbium doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(19): 1609~1610
- 14 Jia Zhenan, Liu Jing, Qiao Xueguang *et al.*. A demodulation technology based on digital tunable F-P filter for fiber Bragg grating sensing signals[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(5): 649~651
- 贾振安, 刘 静, 乔学光 等. FBG 传感信号数字化可调谐 F-P 滤波器解调技术研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(5): 649~651
- 15 Yang Guangxue, Li Yanfeng, Kang Shouqiang. Investigation of general demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor and fiber Bragg grating sensor[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, **25**(1): 12~15
- 杨广学, 李岩峰, 康守强. 光纤 F-P 和 FBG 传感器通用解调系统的研究[J]. 光电技术应用, 2010, **25**(1): 12~15
- 16 Gaspar M. Regp, Henrique M. Salgado, Jose L. Santos. Interrogation of a fiber Bragg grating using a mechanically induced long-period fiber grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(6): 1592~1595
- 17 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an *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
- 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
- 18 Jiang Mingshun, Meng Ling, Sui Qingmei *et al.*. A novel double-edged filter wavelength interrogation technology for FBGs [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(3): 355~358
- 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
- 19 Pan Zijun, Zhao Jianlin, Li Enpu *et al.*. Optimization of dynamic matched grating filtering demodulation driven by piezoelectric ceramic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 243~246
- 潘子军, 赵建林, 李恩普 等. 压电陶瓷驱动的动态匹配光栅滤波解调法优化[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 243~246
- 20 Wang Shenggen, Yan Lianshan, Pan Wei *et al.*. Investigation of track sensor based on matched fiber Bragg gratings[J]. *J. China Railway Society*, 2011, **33**(9): 68~71
- 王圣根, 闫连山, 潘 炜 等. 基于匹配光栅解调的 FBG 轨道传感器研究[J]. 铁道学报, 2011, **33**(9): 68~71
- 21 Lu Zhi. Fabrication and application of long period fiber gratings[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(1): 46~49
- 陆 志. 长周期光纤光栅制作及应用进展[J]. 光电技术应用, 2009, **24**(1): 46~49
- 22 Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005
- 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振动传感器的动态解调[J]. 中国激光, 2011, **38**(8): 0805005
- 23 Zhou Rui, Qiao Xueguang, Wang Ruohui *et al.*. Seismic wave interrogation system based on the linear edge filter characteristics of long period fiber grating[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(7): 987~990
- 周 锐, 乔学光, 王若晖 等. 基于长周期光纤光栅线性边缘滤波的地震波解调系统[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(7): 987~990
- 24 Jiang Mingshun, Meng Ling, Sui Qingmei *et al.*. High-sensitivity vibration detection system based on double-LFPFG

- demodulation[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(8): 1207~1210
- 姜明顺, 孟玲, 隋青美等. 基于双LPFG解调的高灵敏度振动检测系统[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(8): 1207~1210
- 25 Hua Jing, Liu Yueming, Liu Tao *et al.*. Status and developing of sensing signal interrogation technology of long period optical fiber grating[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, **30**(11): 4~7
- 华静, 刘月明, 刘涛等. 长周期光纤光栅传感信号解调技术现状[J]. *传感器与微系统*, 2011, **30**(11): 4~7
- 26 Li Jingyi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang *et al.*. A strain sensing system based on the novel long-period fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 431~433
- 李景义, 饶云江, 牛永昌等. 基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 431~433
- 27 Chia-Chin Chiang, Chow-Shing Shin, Shien-Kuei Liaw. An intensity modulation based high-speed and high-resolution long-period fiber grating sensor interrogating system [C]. *SPIE*, 2006, **6377**: 63770W
- 28 D. Bradley. Long-period grating fiber sensor with fiber Bragg grating demodulation[C]. *SPIE*, 1998, **3330**: 231~236
- 29 Wang Yan. Research on the Application of Long Period Fiber Grating in Smart Structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. 51~66
- 王彦. 长周期光纤光栅在智能结构中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008. 51~66
- 30 Zhou Guang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. A novel edge filter demodulation method using high birefringence fiber sagnac loop mirror[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(12): 1245~1249
- 周广, 赵启大, 开桂云等. 利用高双折射光纤环境的边缘滤波解调方法[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(12): 1245~1249
- 31 Li Kun, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Research of morphing wings' surface temperature measurement system based on long-period fiber grating[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(1): 7~10
- 李堃, 梁大开, 曾捷等. 基于长周期光纤光栅的可变体机翼翼表温度测试系统研究[J]. *光学技术*, 2011, **37**(1): 7~10
- 32 Zhao Hongxia, Ding Zhiquan, Fang Xiaohui *et al.*. A novel LPFG concentration sensing demodulation technique[J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, **30**(1): 26~28
- 赵洪霞, 丁志群, 方晓惠等. 一种LPFG浓度传感解调技术研究[J]. *光电子技术*, 2010, **30**(1): 26~28
- 33 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Ding Zhiquan *et al.*. Research on long period fiber grating demodulation with a Fabry-Perot scanning interferometer[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, **28**(3): 174~176
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 丁志群等. 基于F-P扫描干涉仪的长周期光纤光栅解调系统研究[J]. *光电子技术*, 2008, **28**(3): 174~176
- 34 Zou Fang, Wang Yubao, Feng Yuankai. Study on WDM/TDM Distributed FBG sensor networks based on AWG[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(9): 55~57
- 邹芳, 王玉宝, 冯元凯. 基于AWG的波分/时分复用FBG传感器网络研究[J]. *传感器与微系统*, 2010, **29**(9): 55~57
- 35 T. Allsop, T. Earthrowl, R. Reeves *et al.*. The interrogation and multiplexing of long period grating curvature sensors using a Bragg grating based, derivative spectroscopy technique[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(1): 44~48
- 36 K. Okamoto. Fundamentals, technology and applications of AWGs[C]. Proc. 24th ECO, 1998, **2**: 7~47
- 37 Honglei Guo, Gaozhi Xiao, Jianping Yao. Interrogation of a long period grating fiber sensor with an arrayed-waveguide-grating-based demultiplexer through curve fitting[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(11): 1771~1775
- 38 Jiang Meng. Some Studies of LPG Based Fiber Optical Sensors and Multiplexing Technologies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 85~96, 109~115
- 姜萌. 基于长周期光纤光栅的传感器与解调复用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 85~96, 109~115
- 39 Z. G. Guan, A. P. Zhang, M. Jiang *et al.*. Low-coherence interrogation scheme for multiplexed sensors based on long-period-grating Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7): 832~834
- 40 J. Zheng. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4189~4198
- 41 Wu Haifeng, Wang Xiangyu, Yong Zhen *et al.*. Development of the technology of eliminating FBG's temperature and pressure cross-sensitivity[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, (3): 11~13
- 吴海峰, 王向宇, 雍振等. 消除光纤光栅温度压力交叉敏感技术进展[J]. *光通信技术*, 2009, (3): 11~13
- 42 Qiao Xueguang, Chen Yi, Jia Zhen'an *et al.*. Study on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure based on dual FBG[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1): 12~14
- 乔学光, 陈懿, 贾振安. 基于双光纤光栅温度压力同时区分测量的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1): 12~14
- 43 Wang Hongliang, Qiao Xueguang, Zhou Hong *et al.*. Development of optimizing system of two-parameters for sensing pressure and temperature with dual-fiber Bragg grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 875~880
- 王宏亮, 乔学光, 周红等. 压力与温度双参量传感优化系统的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 875~880