

·信号与信息处理·

光纤光栅分布式传感器信号解调技术

李卓轩,裴丽,祁春慧,赵瑞峰,高嵩,杨光

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

摘要:分布式光纤光栅传感是光纤技术的重要应用之一,而信号解调技术是实现传感系统网络化的关键.介绍了光纤布拉格光栅(FBG)传感原理,阐述了目前国内外广泛采用的两类解调方法:波长扫描解调和参量转换解调,并对这两类解调方法中典型的解调技术进行了详细论述,归纳了各自的优缺点,为分布式光纤光栅传感解调系统设计提供了依据.

关键词:光纤 Bragg 光栅;分布式传感系统;信号解调

中图分类号: TN253; TN911.74

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0050-04

Signal Demodulation Techniques for Distributed Fiber Bragg Grating Sensors

LI Zhuo-xuan, PEI Li, QI Chun-hui, ZHAO Rui-feng, GAO Song, YANG Guang

(Institute of Light-wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Distributed fiber bragg grating sensor is one of the critical application of fiber technique, and the signal demodulation is key to achieve network of sensing system. The basic principle of fiber Bragg grating (FBG) sensors was introduced. Two kinds of demodulation methods being used commonly at home and abroad in recent years were given: wavelength scan demodulation and parameter transform demodulation, and some typical techniques in these demodulations methods were discussed particularly, the advantages and disadvantages were concluded respectively, the basis for the design of distributed FBG sensing demodulation system was provided.

Key words: fiber Bragg grating(FBG); distributed sensor system; signal demodulation

自从 1989 年 G. Meltz 等人首次报道将光纤布拉格光栅用作传感器以来,它就受到了全世界范围的广泛关注,在许多应用领域,包括建筑物和复合材料工作状态的实时检测、电缆和管道的遥感测试、电磁测量以及医学检测等,光纤 FBG 传感器都取得了持续、快速的发展^[1].

光纤光栅传感技术涉及范围很广,其中传感系统信号解调的研究一直是光纤光栅传感系统研究的重点.这是由于复杂的信号能否实时、准确地被解调直接决定了传感系统的网络化程度,进而影响着光纤光栅传感技术的实用化推广.特别是随着全光网的发展,波分复用、时分复用和空分复用等技术日趋

成熟,但 FBG 的网络规模(即 FBG 所复用的传感器数量)仍然难以满足大型、复杂监控目标的规模要求,在很大程度上是受限于分布式传感信号的解调技术.

从现有波长解调方法的应用情况来看,分布式光纤光栅传感系统信号解调主要有以下几个衡量指标^[2]:(1)光纤光栅布拉格波长或应变、温度分辨力;(2)复用传感器数量或传感网络规模;(3)实时检测问题,包括信号解调的速率和静态结合测量.

迄今为止,针对光纤光栅传感系统,人们已经提出了多种解调方案,主要包括^[2-4]: CCD 分光计法、匹配 FBG 可调滤波检测法、可调谐光纤 F-P 滤波

收稿日期:2009-07-22

基金项目:国家自然科学基金(60771008,37002);北京市自然科学基金(4082024);留学回国人员基金(教外 2008890);教育部博士点基金(200800040002)

作者简介:李卓轩(1987-),男,山西运城人,博士研究生,研究方向为光纤传感技术.

器检测法、非平衡 M-Z 干涉仪检测法、结合时域地址查询技术的非平衡 Michelson 干涉解调检测法、可调光源检测法等. 下面在介绍光纤光栅传感信号解调原理的基础上, 分类综述了几种主要的分布式光纤光栅传感解调方法的特点和性能, 归纳了各自的优缺点.

1 光纤光栅传感原理

由于光纤光栅的栅距和折射率的扰动仅会对很窄的一小段光谱产生影响. 因此, 如果宽带光波在光栅中传播时, 入射光只能在相应的频率上被反射回来, 反射光的中心波长为^[5]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期.

当外界的被测量引起光纤光栅温度、应变或应力改变都会导致反射的中心波长的变化^[2]. 也就是说, 光纤光栅反射光中心波长的变化反映了外界被测信号的变化情况. 光纤光栅中心波长与温度和应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (2)$$

式中, $\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤材料的热光系数; $P_e = -\frac{1}{n} \frac{dn}{d\epsilon}$ 为光纤材料的弹光系数. 因此, 通过探测光纤光栅波长的变化, 便可以获得相应的温度、应变和压力等信息.

2 典型的分布式光纤光栅传感信号解调方法

2.1 反射式波长扫描解调法

这种方法是在有效区分传感器阵列上各个光栅位置的基础上, 对各个传感光栅的反射谱进行扫描寻址. 目前, 扫描寻址常用的方法是通过使用信号发生器对 PZT 施加周期的电压信号, 以改变加在参考光栅上的压力大小或谐振装置的参数, 藉以达到扫描目的.

2.1.1 分布式可调匹配光栅滤波法

“分布式匹配”是指对于传感阵列中的每一个光栅, 在接收端都有一个特性一致的光栅组成匹配光栅对. “可调”是指通过驱动 PZT, 调节匹配光栅的

中心波长, 依次使各个探测器接受光功率达到最大值. 最后由 PZT 电压与波长的对应关系便可得到待测物理量. 匹配光栅滤波法有反射和透射 2 种方式. 透射方式虽然光信号的利用率高, 但多个 PZT 使跟踪控制复杂, 系统的非线性误差较大. 这里仅讨论反射式工作方式^[6].

分布式匹配 FBG 滤波解调工作于反射方式时, 如图 1 所示, 匹配光栅跟踪作为敏感元件的传感光栅的反射波长的变化, 匹配光栅平行布置在同一 PZT 上, 当 PZT 受线性或正弦扫描电压驱动时, 匹配光栅的应变发生周期性变化, 继而使匹配光栅中心波长的移位产生周期性变化, 当匹配光栅的中心波长与传感光栅的中心波长刚好重合时, 则会发生强烈反射, 从而相应探测器探测到最大光强, (图 1b 表示探测器探测到的两光栅光谱重叠部分的信号). 然后根据事先测定好的匹配光栅电压与波长的关系, 就可以求得对应传感光栅的待测物理量. 此法优点是^[7]: 对最终检测的光强无绝对要求, 所以各类强度噪声都不会对最终结果产生影响, 另外, 它的结构简单. 但它有以下 3 点不足: (1) 要求传感光栅与匹配光栅反射谱特性非常接近; (2) 受 PZT 可调范围限制, 传感光栅测量的物理量范围不会很大; (3) 受 PZT 响应速度限制, 此法不适合测量高频物理量.

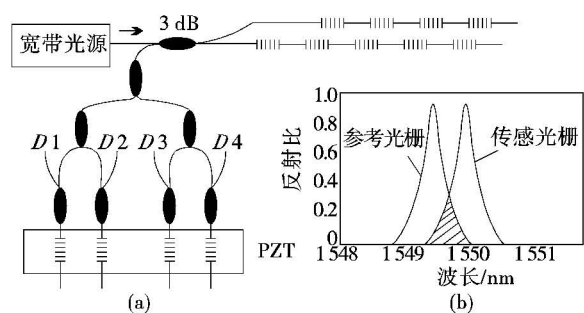


图 1 分布式可调匹配光栅解调示意图

2.1.2 可调光纤 F-P 滤波器解调法

图 2 所示为余有龙等人提出的接收端使用 F-P 滤波器 (FFPF) 检测的分布式 FBG 传感器方案^[8]. 宽带光源发出的光经耦合器入射到传感光栅阵列后, 传感光栅将对携带有被测物理量信息的光进行反射, 反射光经耦合器导引, 进入可调谐窄带光纤 F-P 滤波器, F-P 滤波器在信号发生器调谐控制信号的作用下工作在扫描状态. 具体过程是: 扫描电压加在滤波器压电元件上, 以不断改变 F-P 滤

波器的腔长,继而使可导通的窄频带不断移动,当其移动到与某个传感光栅反射光谱恰好重合时,被导通的光功率到达最大值.经探测器接收并转换成电信号,再由示波器对进行放大后的电信号进行显示.

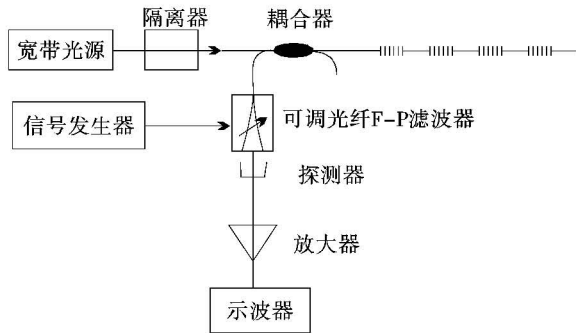


图 2 可调光纤 F-P 滤波器解调系统

由于传感光栅中心反射波长的改变量是根据事先测得的 F-P 腔透射波长与施加在滤波器上电压的对应关系得到的,此关系的标定直接决定了系统的解调精度.如果没有精确、固定的波长作参考,而是简单的应用某次实验得出的波长与电压的函数关系来确定传感光栅的波长变化量,那么将导致较大的测量误差.因此,对 F-P 的输出波长进行实时动态校准是保证系统解调精度和重复性的必要条件.图 3 所示的一种实时动态分段线性拟合方法可以对 F-P 腔解调非线性和不重复性引起的误差进行补偿^[11].

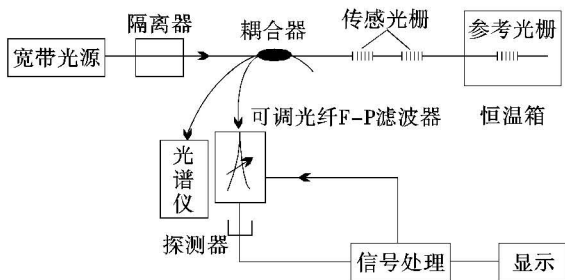


图 3 对 F-P 腔透射波长进行实时动态校准原理图

如图 3 所示,将参考光栅和传感光栅串接起来构成传感阵列,它们的反射谱相互不重叠,并将参考光栅置于恒温箱内以保证其反射谱峰值固定,且保证传感光栅反射中心波长变化范围在相邻 2 个参考光栅固定反射波长之内.然后将锯齿波扫描采集到的光栅反射谱峰值对应的电压带入到其所处波段范

围的拟合方程中,即可计算出此时传感光栅的峰值波长.

该方法借助示波器和探测器对滤波光束的时序分布进行观察,从而对复用传感器阵列成功地进行查询和解调.避免了 Kersey A D^[9] 和 Davis M A^[10] 方法中由于压电陶瓷磁滞而引起的系统误差,可以有效测得施加在传感光栅上的高频物理量.由于 F-P 腔调谐范围很宽,精度较高,适合在实用系统中采用.但由于光路中含有非光纤元件,因而滤波损耗较大,并且重复性较差,高精度的 F-P 腔成本太高.

2.2 参量转化解调法

这种方法是将传感光栅阵列中心波长的改变量转化为较容易检测的其他物理量的变化,例如:强度、相位等.针对这种方法的解调装置有很多,CCD 分光仪法和非平衡 M-Z 干涉仪法是其中典型的 2 种.

2.2.1 CCD 分光仪

CCD 分光仪法是利用衍射光栅等分光元件,将传感光栅的反射谱(或透射谱)经透镜准直后在空间展开,再投射到 CCD 阵列上.实质是将波长的检测转换成对应位置光强的测量.图 4 是基于 CCD 检测的光纤光栅传感原理图.

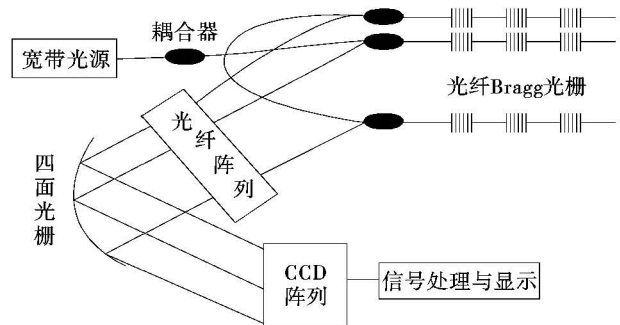


图 4 基于 CCD 检测的光纤光栅传感原理图

该方法采集了每一只光纤 Bragg 光栅沿整个扫描周期的反射光,反射率为 1% 的光栅提供的反射信号与扫描探测中反射率为 95% 的光栅提供的信号强度相当.这种检测方法利用空分复用和波分复用在体现在:由同一根光纤连接的传感光栅反射的 Bragg 波长沿 CCD 的纵向分布;不同光纤反射的光波经光纤阵列入射到曲线光栅反射后沿 CCD 的横向分布.

该方法光能利用率高,可以用于反射率只有

1%~4%的光纤光栅阵列.其优点是响应速度快、抗干扰能力强.不足之处在于影响波长分辨力的因素较多,如曲面光栅的光谱分辨力、CCD的空间分辨力等^[12].

2.2.2 非平衡 M-Z(马赫-曾德尔)干涉仪法

非平衡 M-Z 干涉仪法是一种参量转化解调法,该方法将传感光栅 Bragg 波长偏移量转化为相位变化量来进行检测.具体装置如图 5 所示^[2].

宽带光源发出的光被调制成脉冲信号,经过耦合器入射到光栅上,被反射后送到不等臂长的 M-Z 干涉仪(光程差为 nd),非平衡 M-Z 干涉仪再把 FBG 漂移 $\Delta\lambda$ 转化为相位变化 $\Delta\varphi$,当入射的光波长变化 $\Delta\lambda \sin\omega t$,输出的相位变化为

$$\Delta\varphi(\lambda) = -2\pi nd \Delta\lambda \sin\omega t / \lambda^2 \quad (3)$$

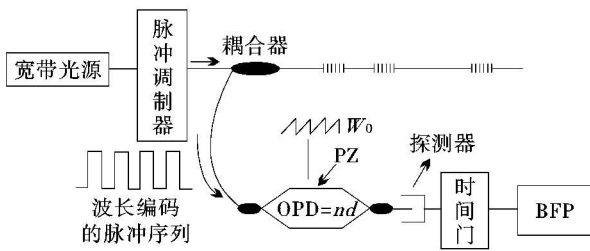


图 5 分布式非平衡 M-Z 干涉仪解调法

因此可以通过检测相位变化的大小来得知反射波长的变化,时间门的作用是对光纤光栅反射回来的信号光加以区分.

为保证各传感光栅的反射信号在输出端时域上可分离,光源脉冲宽度必须等于或小于光在任意 2 个光栅之间来回时间,这样用时间门控制 M-Z 的输出就可按顺序检测每一个光栅.

该装置具有高带宽、高解析度,Weis 等人用此方案在频率大于 10 Hz 的动态情形下应变分辨率为 $2 \mu\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$.但是在检测过程中由于随机相位的影响,这种方法只能用来测量动态应变,不适合检测静态应变.并且测量范围有限.

3 结束语

分布式光纤光栅传感系统通过共享光源、光路和电信号处理部分,并随着系统中复用传感器数目的增加,每个传感器的花费大幅减少,同时具有免受

电磁干扰、易于埋覆和构成测量网络等传统机电类传感器无法比拟的优点,具有广泛的应用前景^[7].从光纤光栅传感原理出发,讨论了两大类常用的分布式光纤光栅解调方法,又重点阐述了两类方法中典型的解调技术,并归纳出各自的优缺点.虽然这些光纤光栅分布式传感的解调技术在从实验室走向实用化的过程中还存在许多问题,比如温度、应变的交叉敏感问题,解调装置的成本问题等.但现代科学的发展和光纤光栅传感解调技术的不断成熟和完善,必将加快光纤光栅传感的工业化、商业化进程.

参考文献

- [1] Rao Y J. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(4): 297-324.
- [2] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 182-193.
- [3] 李川, 张以谟, 赵永贵, 等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 116-131.
- [4] 饶云江, 王义平, 朱涛, 等. 光纤光栅原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 168-176.
- [5] T Erdogan. Fiber Grating Spectra [J]. IEEE Journal of lightwave technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [6] 王敏, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅传感系统信号解调技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(12): 54-58.
- [7] 李林, 毕卫红. 分布式光纤光栅传感器解调系统 [J]. Technology & Application, 2007, 21(6): 21-25.
- [8] 余有龙, 谭华耀, 锤永康. 基于可调 F-P 滤波器的光纤光栅传感器阵列查询技术 [J]. 中国激光, 2000, 27(12): 1103-1106.
- [9] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. Electronics Letters, 1992, 28(3): 236-238.
- [10] M A Davis, D G Bellemore, M A Putnam, et al. Interrogation of 60 fiber Bragg grating sensors with microstrain resolution capability [J]. Electron. Lett, 1996, 32(15): 1393-1394.
- [11] 乔学光, 张磊, 贾振安, 等. 光纤 Bragg 光栅校准可调谐 F-P 滤波器解调系统的研究 [J]. 传感器与微系统, 2008, 27(1): 12-14.
- [12] 靳伟, 廖延彪, 张志鹏, 等. 导波光学传感器: 原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.