

文章编号:1002-2082(2006)04-0327-05

基于滤波法的光纤光栅传感解调方案

李志全, 李亚萍, 朱丹丹, 李立新

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: FBG 传感器对应变和温度的敏感体现在其反射光中心波长的变化上, 因此如何测量波长的变化就成为 FBG 传感器的关键。在光纤光栅的多种解调方法中, 因滤波法的测量器件制作简单, 测量系统简易、方便直观而被广泛应用。主要介绍了 8 种基于滤波法的解调方法, 对它们各自的成本、检测精度、测量范围、器件制作以及适用的环境进行了详细的比较, 分析了它们的优缺点, 以便于在不同的检测条件下选用最佳的解调方案。重点介绍了光学小波滤波解调法, 探讨了其测量系统的原理, 并指出该方法可用于微弱信号的检测与处理。

关键词: 光纤光栅; 传感解调; 滤波方法

中图分类号: TN253; TP212.11

文献标志码: A

Demodulation scheme for filtering method based fiber Bragg grating sensing

LI Zhi-quan, LI Ya-ping, ZHU Dan-dan, LI Li-xin

(College of electrical engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Because the sensitivity of the fiber Bragg grating (FBG) sensor to the strain and temperature is observed through the variation of its reflected light wavelength, it is important for FBG sensor to measure the change of the wavelength. Although there are many demodulation methods nowadays, filtering demodulation technique finds more applications because the measurement devices are easy to make, simple in structure and convenient to operate. Eight kinds of filter based demodulation methods are introduced in order to select an optimum demodulation method for the specific application, these demodulations are compared in terms of cost, accuracy, measurement range, manufacture of the devices and applicable environment, their advantages and disadvantages are analyzed. The optical wavelet transform filtering is introduced emphatically, the principle of the measurement system is discussed in depth and its potential applications are pointed out.

Key words: fiber Bragg grating; sensing demodulation; filtering method

引言

光纤布拉格光栅传感器具有传感信息波长编码, 全光纤设计, 可复用以及可靠性高和体积小等优点^[1], 在诸多传感领域已有广泛的研究和应

用。然而, 由于波长编码信号解调困难而造成系统成本过高, 普通领域难以接受。因而, 如何进行有效的信号解调, 是光纤光栅传感系统实用化推广的关键技术问题。为此, 人们提出了多种信号解调方案,

收稿日期: 2005-11-06; 修回日期: 2005-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60377002)

作者简介: 李志全 (1954—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 燕山大学教授, 博士生导师, 主要从事非线性光电检测方面的研究工作, 发表论文 100 余篇。E-mail: ysulzq@eyou.com

大致可分为滤波法、干涉法、色散法、可调窄带光源法等。下面主要介绍光纤光栅滤波解调方法。

1 光纤光栅滤波解调方法

1.1 可调谐 F-P 滤波法

如图 1 所示,由光栅阵列反射后的光进入可调谐 F-P 腔^[2]中,调谐 F-P 腔的腔长使 F-P 腔的透射波长与 FBG 的反射波长重合,探测器便能探测到最大光强,此时给 PZT 施加的电压就对应着 FBG 此时的反射波长。

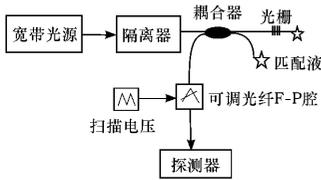


图 1 可调 F-P 滤波器解调示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunable F-P filter demodulation technique

这种解调方案的优点是体积小、价格低,且可以直接输出对应于波长变化的电信号,是一种较好的解调方案。

1.2 改进的可调谐 F-P 滤波法

在传统的可调谐 F-P 滤波法中,由于使用一般的光谱仪观察分析,分辨率不高,为此,对传统的 F-P 滤波法做了 2 种改进:一种是闭环模式;另一种是扫描模式^[3]。

1.2.1 闭环模式

对单根光栅可以使用图 2 所示的闭环模式。传感光栅的反射光进入受抖动信号驱动的可调谐 F-P 腔, F-P 腔透射光的基频分量经混频、低通滤波及积分后得到 1 误差电压。该电压与 f_d 迭加后控制 F-P 腔,使之与传感光纤光栅匹配。若事先标定 F-P 腔的波长-控制电压的关系,即可从输出的误差电压中解调出波长信息,从而得到被测物理量。

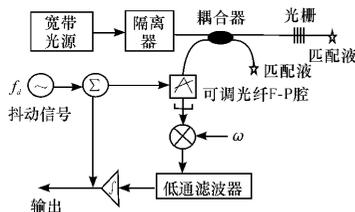


图 2 闭环模式

Fig. 2 Schematic diagram of blocked link model

采用这种解调方案可得到 $\pm 3 \mu\epsilon$ 的应变分辨率,但检测精度受 F-P 腔的稳定性及 PZT 的非线性的影响。

1.2.2 扫描模式

利用滤波法的波长扫描模式能够寻址几个光纤光栅传感单元^[4]。如图 3 所示,在扫描电压上加一高频抖动信号,根据探测电信号在扰动处为零时可锁定峰值波长来构造反馈闭环,从而大大提高了分辨率。

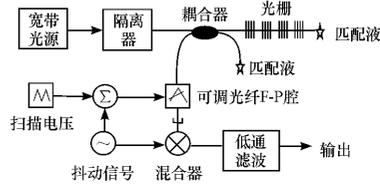


图 3 扫描模式

Fig. 3 Schematic diagram of scanning model

此方法在 4 个光栅组成的阵列探测中可得到 3 个微应变 ($3-\mu\text{strain}$) 的应变分辨率。在只有 1 个光栅时,最小分辨率小于 $0.3-\mu\text{strain}$ 。

1.3 单点匹配滤波法

1.3.1 反射式

如图 4 所示,传感光栅的反射光入射到参考光栅上,调谐参考光栅,通过探测器检测最大反射光强,此时驱动元件驱动信号对应着传感光栅的反射波长。

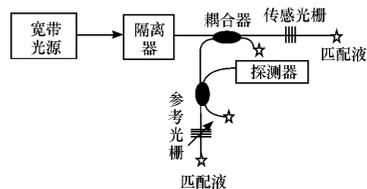


图 4 单点匹配反射式系统

Fig. 4 Schematic diagram of simple point match reflection model

1.3.2 透射式

图 5 为单点匹配透射式系统。该方案与反射式的区别在于:光电探测器不是放在接收反射光的位置,而是放置于接收透射光的位置,通过检测透射光的有无来确定是否匹配,从而避免了测量光强微弱的信号。

反射式与透射式方案优缺点对比:反射式的精度受光源稳定性和外界干扰的限制,对探测器的精度要求较高,而这些问题在透射式中是不存在的。

另外由于反射式比透射式多了一个耦合器,光能损耗较大,因此实际应用中常采用透射式系统。

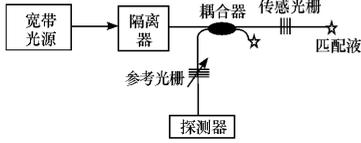


图5 单点匹配透射式系统

Fig. 5 Schematic diagram of simple point match transmission model

1.4 分布式匹配滤波法

如图6所示,由传感光栅阵列反射回来的多波长反射信号光经耦合器等功率分给并行布置在同一压电体(PZT)(压电体受线性或正弦扫描电压驱动)上的各匹配光栅。当某个接收光栅与相应传感光栅匹配时,相应的探测器接收到最大值。事先测定每个接收光栅的Bragg-电压关系就可确定相应传感光栅Bragg波长的偏移。

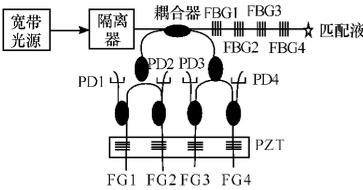


图6 分布式匹配反射式系统

Fig. 6 Schematic diagram of distributed match reflection model

该解调方案调谐简单,线性度好,可快速测定多点应变情况^[5],尤其适用于现场快速动态监测,其分辨率取决于所使用的FBG的带宽。

1.4.2 透射式

如图7所示,各匹配光栅由不同的PZT进行独立的波长调谐,且串联成滤波光栅阵列。信号光进入该阵列后,由同一个探测器接收透射光,依次单

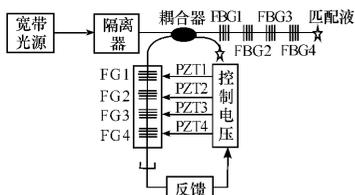


图7 分布式匹配透射式系统

Fig. 7 Schematic diagram of distributed match transmission model

独调谐各个匹配光栅,使接收光强最小。通过PZT的驱动电压取得各传感FBG的中心反射波长。

此方案信号光利用率高,分辨率达 $0.1 \mu\epsilon$ 。另外,将接收光栅按顺序制作在同一根光栅上,只需1个探测器。缺点是多个PZT造成跟踪控制较复杂,非线性误差较大。

1.5 啁啾光栅反射滤波

如图8所示,由传感光栅阵列反射后形成的窄带光源达到啁啾光栅后,其反射光分为2路光束^[6]:一束光用于直接检测,另一束光经线性滤波器后分为2路,一路接光谱分析仪进行监测,另一路光用于光电检测。

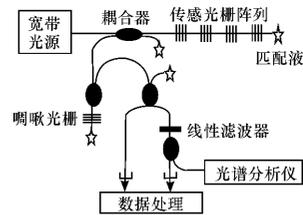


图8 啁啾光栅反射滤波系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of chirp grating reflective filtering demodulation

该方法省去了复杂的机械调谐部件,可大大提高系统的稳定性及扫描速度,适用于波分复用的多个光栅的静态和动态测量,具有结构简单、操作方便和性价比高的优点,有很好的应用前景。

1.6 体滤波法

如图9所示,从光纤光栅反射的光经耦合器均分成2路光束:一路经线性滤波器(其光谱透过率为线性函数 $F(\lambda) = A(\lambda - \lambda_0)$),另一路光束作为参考光用以补偿光路强度的变化干扰。2路光信号光强的比值 $I_F/I_R = A(\lambda_B - \lambda_0 + \Delta\lambda / \sqrt{\pi})$ 。式中, A为线性滤波器的斜率; λ_0 为零输出波长。由 I_F/I_R 就可很方便地检测出 $\Delta\lambda$ 的大小。

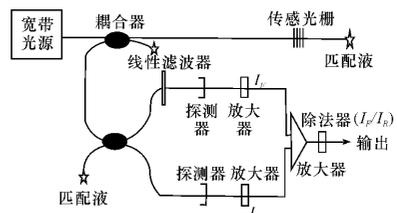


图9 体滤波法解调系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of body filtering demodulation

该方案的优点在于它能有效消除光源波动的

影响,信号处理系统不仅简单,而且可以做得很小。不足之处是系统分辨率不高,另外滤波曲线的线性近似也造成一定的误差。

1.7 边缘滤波法

此方法是利用波分耦合器^[8]在 1520~1560nm 波长范围内效率与波长基本上成线性关系这一特性进行滤波的,测量系统如图 11 所示。由传感光栅反射回来的光进入波分耦合器后分为 2 束,这 2 束光的功率与入射光的功率关系如图 11 下部所示。2 束出射光通过光电探测器变成电信号,消除光功率变化的影响后得到波长的变化量。

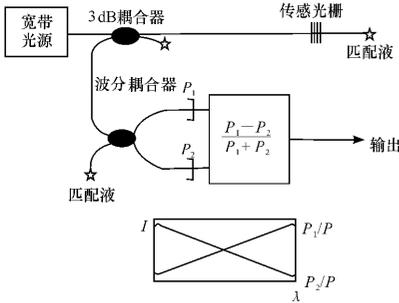


图 10 利用波分耦合器测量 FBG 波长示意图

Fig. 10 Schematic diagram of FBG wavelength measuring with wavelength-division coupler

该方法克服了体滤波法中使用大体积滤波器的不足,提供了一种结构紧凑且便携灵巧的传感解调系统的实现途径,但由于受器件传输特性的影响,测量的分辨率较低^[9]。

2 光学小波滤波法

光学小波滤波法采用宽带调谐、WDM、TDM、光学小波滤波和差频等技术实现分布式声发射波振动加速度测量系统的研究,为微弱振动信号检测与处理提供了一种新方法。测量系统如图 11 所示,可调谐光源发出的 1530~1570 nm 调谐波经光强调制器和耦合器分束后,进入 4 个带有双 FBG 的探头 A₁₁, A₁₂, A₂₁, A₂₂。由于计算机控制 VCO 对光源信号进行锯齿波调制,且 4 个测量探头每一对 FBG 的初始中心反射波长均不同,故调制光进入每个探头的时间也不同,即调制光到达每个探头时锯齿波信号的频率不同。各个探头反射回来的测量信号经光学小波滤波器后,便可得到每个表征振动加速度信号的波长变化量 Δλ_{ij}。探测信号经光电探测器转换成电信号并与参考锯齿波信号混频。每个信号与

参考信号的差频信号为 Δf_{ij}(由于每个探头的 2 个 FBG 间距很小,可认为其光强调制频率相同),通过光学编码实现 Δf_{ij}与 Δλ_{ij}(1 个探头中的 2 个中心波长)的对应,得到 Δλ₁₁, Δλ₁₂, Δλ₂₁ 和 Δλ₂₂ 之值,进而实现加速度参量 a₁₁, a₁₂, a₂₁ 和 a₂₂ 的测量。

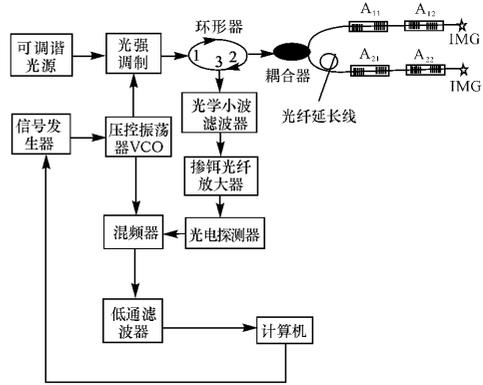
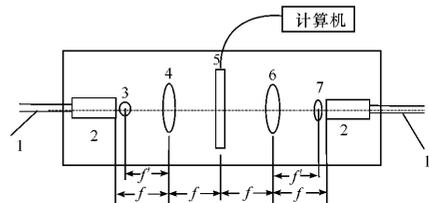


图 11 利用小波滤波器测量 FBG 波长示意图

Fig. 11 Schematic diagram of FBG wavelength measuring with wavelet transform filter

图 12 为光学小波变换滤波器的原理图,透镜 FTL₁ 和 FTL₂ 的焦平面重合。当测量光信号通过 FTL₁ 后,在其后焦面上出现信号函数的频谱,在 FTL₂ 的后焦面上测量信号重新由频域转换到时域。在 2 个透镜中间的焦面上放置 1 个电可编程空间光调制器,由计算机输入小波滤波选频函数的频谱并对其进行编程,由此得出选频函数与信号函数频谱的乘积,实现小波变换选频。实验中,为了消除外界环境对测量结果的影响,将 2 个准直透镜、2 个变换透镜及电可编程空间光调制器密封到一个黑盒子中。



- 1. 光纤; 2. 准直透镜; 3. 夫琅和费衍射孔;
- 4. 透镜 1(FTL₁); 5. 可编程空间光调制器;
- 6. 透镜 2(FTL₂); 7. 函数滤波器

图 12 光学小波变换滤波器原理图

Fig. 12 Schematic diagram of optical wavelet transform filter

3 结论

综述了光纤光栅传感信号的几种滤波解调方案及其各自的优缺点,以及不同用途传感解调系统的设计和开发。其中最具有发展前景的是可调谐F-P滤波法。该方法可以直接将波长信号转换成电信号,并具有体积小、灵敏度高、光能利用率高、操作简单且适用于工程应用的波长位移检测。总体来讲,滤波解调法比较简单,容易实现,是众多解调方案中比较好的一种方法,但很难进一步提高其传感精度,因此如何使滤波解调法的传感精度提高,将是目前面临的一大课题。

参考文献:

[1] WEIS R S, KERSEY A D, BERKOFF T A. A four-element fiber grating sensor array with phase sensitive detection[J]. IEEE Photon Tech Lett, 1994,6(12):1469-1472.

[2] KERSEY A D, BERKOFF T A. Dual wavelength fiber interferometer with wavelength selection via fiber grating elements[J]. Electron Lett, 1992, 28

(13):1215-1216.

[3] DAVIS M A, KERSEY A D. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays[J]. Electron Lett, 1995,31(18):602-603.

[4] KERSEY A D. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. Optics Letters, 1993,18(16):1370-1372.

[5] RAO Y J. In-fiber Bragg grating sensor[J]. Meas Sci Technology, 1997,8(4):335-337.

[6] ZHANG W G. Measurement of collectivity of collective flow in relativistic heavy-ion collisions using particle group correlations[J]. Physical Review, 1998,C(58):3560-3564.

[7] 董新永,刘志国,开桂云,等.一种新颖的光纤光栅带宽调谐方法[J].光学学报,2001,21(10):1275-1277.

[8] 陈长勇,乔学光,贾振安,等.光纤光栅传感应用中的波长编码信号解调技术[J].半导体光电,2003,24(2):121-127.

[9] 吴朝霞,吴飞.基于光学小波滤波的光纤光栅传感解调技术[J].传感技术学报,2004,17(3):453-456.

机载夜视镜前景展望

夜视镜可提高飞行员的夜间观察能力。最新一代夜视系统在以下方面取得了长足的进展:

- 在低照度下减小光电噪声或颗粒图像显示;
- 在城区环境下减小光晕和提高图像质量;
- 视敏度或分辨率接近人眼极限;
- 微光条件下对对比度灵敏度的影响不大,有助于扩大动态范围和增强图像细节;
- 视场:传统飞行员系统的视场为 40° ,最新开发的全景夜视镜的视场则接近 100° 。

先进直视系统的性能和图像质量均非常好,在今后5~10年内还将有进一步提高。研究工作集中在提供高质量图像和连续直接观察的技术上。

头盔显示系统 一种头盔显示系统(HMD)是将像增强器集成在头盔上。为了使重心分散,一般把像增强器装在头盔的两侧。像增强器的输出端通过光学或电子学方式与使用者眼睛前方的护目镜或显示系统连接。这种系统使两眼之间保持一定的距离,这会对各种视觉过程产生直接影响。尽管这种系统可以减轻脖子疲劳,但对视觉性能的影响还不清楚。为了解决这个问题,国际上多家夜视镜研究机构正在研究HMD系统对飞行员视觉系统和飞行性能的影响。第2种数字式HMD系统利用来自对低照度敏感摄像机(CCD)的输入。摄像机既可以与上述的头盔连接,也可以安装在座舱外的万向架上。随着飞行员头部移动,传感器转向正确的位置。这种系统的优点是可以将夜视图像与其它传感器(红外传感器)的图像融合。但是,这种系统存在的问题是CCD的灵敏度没有传统像增强器的高,需要相应的算法和计算时间。此外,传感器的转换速率可能造成视觉系统和其他系统之间存在严重的时间延迟。

数字增强 夜视镜的总发展趋势是加入数字符号信息,提供重要的飞机信息(如飞机速度和高度)、航迹综合飞行信息和综合地形信息。增加数字符号,是在近期和长期内提高直视夜视系统性能的最有前途的技术之一。基于成熟的像增强技术,开发者只需要研究符号信息对视觉和飞行性能的影响。在近期和长期内,将有几种技术可供航空兵选用。