

·光电系统与amp;设计·

光纤 F-P 和 FBG 传感器通用解调系统的研究

杨广学, 李岩峰, 康守强

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:针对目前不同种类传感器在建筑结构及其工作环境进行实时监测应用上的实际情况,提出了一种利用可调 F-P 滤波器对光纤法珀传感器和光纤布拉格光栅传感器通用解调方案,研究了解调系统的组成和对传感器的解调原理.初步实验结果表明,系统能够对上述 2 种传感器进行解调,并具有复用能力,光纤法珀传感器的应变解调精度在 $2 \mu\epsilon$ 以下,光纤布拉格光栅传感器解调精度在 $0.5 \mu\epsilon$ 以下,是一种低成本、通用的解调系统.

关键词:光纤光栅传感器;光纤法珀传感器;可调法珀滤波器

中图分类号: TN256; TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0012-04

Investigation of General Demodulation System for Fiber Fabry-Perot Sensor and Fiber Bragg Grating Sensor

YANG Guang-xue, LI Yan-feng, KANG Shou-qiang

(College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: Regarding the present situation of different types of sensors being used in real-time monitoring building structure and its working environment, a general demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor and fiber Bragg grating sensor based on fiber Fabry-Perot tunable filter was described. The structure of this system and its principle of demodulating these fiber sensors were studied. The experiment shows that this system can demodulate these fiber sensors accurately and effectively, and it also have a multiplexing capability. The demodulation accuracy of fiber Fabry-Perot sensor is under $2 \mu\epsilon$, and the demodulation accuracy of fiber Bragg grating sensor is under $0.5 \mu\epsilon$.

Key words: fiber Bragg grating sensor; fiber Fabry-Perot sensor; Fabry-Perot tunable filter

近年来,光纤 F-P(FFP)传感器、光纤布拉格光栅(FBG)传感器已经在工程中得到广泛的应用,随着光纤传感技术的发展,逐步提出了在一些较大的工程中同时采用这两种传感器的要求.其中光纤 FBG 传感器属于频率调制型传感器,结构简单,可用于多种场合;光纤 F-P 传感器利用多光束干涉原理测量,精度较高,受温度影响较小^[1].传统上常采用两套解调装置分别对光纤 F-P 传感器、光纤 FBG 传感器的传感信号进行解调.这种解调手段在技术上比较成熟,且两种传感器的解调过程互不影响.如果能够利用某种解调系统对两种传感器通用

解调,则有望降低成本,提高系统的可靠性,更加灵活地复用光纤 F-P 传感器与光纤 FBG 传感器.文中提出了基于 F-P 滤波器的解调方法,并对此进行了分析和验证.

1 实验装置及原理

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示.整个系统由宽带光源、光纤传感器、高精度可调 F-P 滤波器(FFP-PF)及

驱动器, 高灵敏度光电探测器及电信号采集处理系统组成. 由 LED 发出的宽带光源通过隔离器进入 3 db 耦合器, 并进入光纤传感器中 (FBG 或 FFP), 传感器的反射光通过耦合器进入 FFP-TF, 滤波器在驱动器的作用下扫描波长, 滤波器透射出来的光被探测器探测转化为电信号, 再由信号采集系统采集, 进行放大、滤波处理, 光纤滤波器的扫描信号和探测器输出信号同时输入到高精度 A/D 转换器中, 转换后的信号被输入到处理器中. 滤波器光谱通带的中心波长是和其两端的电压成线性的, 使用可以通过探测其上所加的电压获知波长信息^[2].

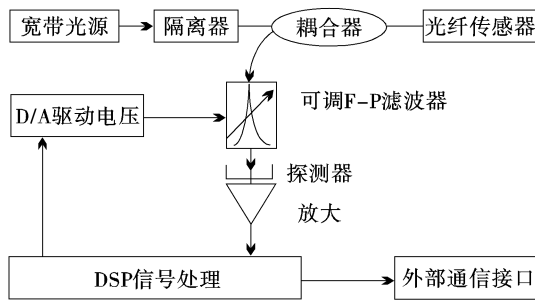


图 1 解调系统装置图

1.2 解调原理

1.2.1 FFP 传感器的解调

光纤法珀传感器是基于多光束干涉原理, 利用法珀腔长和应变的关系来达到测量目的的, 它的核心部分是一个法珀腔, 腔长为 l , 根据多光束干涉原理可以求得反射光强和透射光强分布分别为^[3]

$$I_r(\lambda) = \frac{4R \sin^2(\frac{2\pi l}{\lambda})}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\frac{2\pi l}{\lambda})} I_o(\lambda) \quad (1)$$

$$I_t(\lambda) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\frac{2\pi l}{\lambda})} I_o(\lambda) \quad (2)$$

当光纤法布里-珀罗腔的 2 个端面反射率 R 较小时 (这里 $R < 0.05$), 可以用双光束干涉代替多光束干涉, 此时有

$$(1-R)^2 + 4R \sin^2(\frac{2\pi l}{\lambda}) \approx 1$$

式(1)就可近似为

$$I_r(\lambda) = 2R [1 - \cos(\frac{4\pi l}{\lambda})] I_o(\lambda) \quad (3)$$

由于光波长 λ , 光频率 ν , 光速 c 之间存在如下关系: $\nu = \frac{c}{\lambda}$, 代入式(3)得

$$I_r(\nu) = 2R [1 - \cos(\frac{4\pi \nu l}{c})] I_o(\nu) \quad (4)$$

在工程实际应用中, 理想宽带光源是不存在的, 实际光源强度随波长的分布近似高斯分布, 其表达式为

$$I_o(\lambda) = I_o \exp - \frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2} \quad (5)$$

式中, λ_p 是光源光谱的峰值波长; B_λ 是光源光谱带宽所决定的高斯函数的半宽度.

将式(5)代入式(2), 可得到实际光源条件下光纤法珀传感器双光束干涉输出光强表达式为

$$I_r(\lambda) = 2RI_o [1 - \cos(\frac{4\pi l}{\lambda})] \exp - \frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2} \quad (6)$$

当 $R = 0.04$, $l = 30 \mu\text{m}$ 时, 其强度随波长变化的关系曲线如图 2 所示.

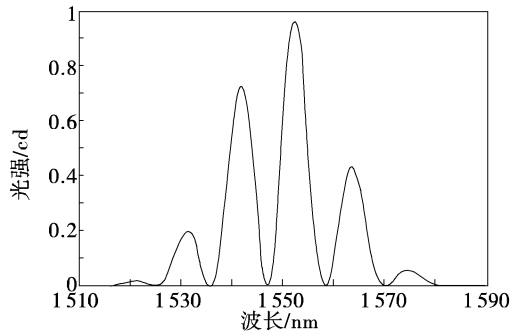


图 2 实际光源条件下 F-P 传感器输出光强信号

从图 2 可以看出, 在实际光源条件下传感器的输出不再是近似余弦函数而是具有高斯包络的震荡信号. 将 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ 代入式(5), 则式(5)变为

$$I_o(\nu) = I_o \exp \frac{(\nu - \nu_p)^2}{-2(\sigma_\lambda \nu_p / c)^2} \quad (7)$$

式中, $\nu_p = \frac{c}{\lambda_p}$, $\sigma_\lambda = \frac{B}{\sqrt{2}}$. 此时实际光强对光频率 ν 来说已不是高斯分布, 如果将式(7)中指数部分的变量展开为泰勒级数

$$\frac{\nu - \nu_p}{\nu} = \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} - \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p^2} + \dots = \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} \cdot (1 - \frac{\nu - \nu_p}{\nu_p} + \dots) \quad (8)$$

取一阶近似, 代入式(7), 得

$$I_o(\nu) = I_o \exp \frac{(\nu - \nu_p)^2}{-2\sigma_\nu^2} \quad (9)$$

式中, $\sigma_\nu = \frac{\sigma_\lambda \nu_p}{c}$, 可见高斯光源强度对光频率 ν 仍可近似为高斯分布.

式(6)的傅里叶变换为

$$F(j\Omega) = 2\sqrt{2\pi}RI_{\sigma_v}[\exp(-jv_p\Omega)\exp(\frac{-\sigma_v^2\Omega^2}{2})] + \sqrt{2\pi}RI_{\sigma_v}\{\exp[-j(\Omega - \frac{4\pi l}{c})\sigma_p]\exp[-\frac{1}{2}\sigma_p^2(\Omega - \frac{4\pi l}{c})^2]\} + \sqrt{2\pi}RI_{\sigma_v}\{\exp[-j(\Omega + \frac{4\pi l}{c})\sigma_p]\exp[-\frac{1}{2}\sigma_p^2(\Omega + \frac{4\pi l}{c})^2]\} \quad (10)$$

不考虑负频率时, 光纤法珀传感器反射输出光强信号的傅里叶变换幅频特性曲线由两高斯函数组成, 函数的中心点分别位于直流零点和 $\Omega_l = \frac{4\pi l}{c}$ 处. 因此采用实际光源只要两高斯频谱不产生混叠就可以完成对腔长的解调^[4].

在实际应用中, 得到的反射输出信号都是对光波长均匀采样的离散光强信号, 而光频率间隔和光波长间隔之间存在下列关系 $\delta v = \frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda + \delta\lambda} = \frac{c\delta\lambda}{\lambda(\lambda + \delta\lambda)}$, 由于光源光强的高斯分布特性幅值较大的样本主要分布在中心波长 λ_p 附近, 可以认为, $\lambda(\lambda + \delta\lambda) \approx \lambda_p^2$, 即 $\delta v = \frac{c\delta\lambda}{\lambda_p^2}$, 也就是说, 光强信号对光频率来说仍然可以看成近似均匀采样, 因此对一维光强信号可以直接做离散傅里叶变换

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (11)$$

式中, $x(n)$ 为光强信号, 通过找出 $|X(k)|$ 的最大值所对应的数字下标 k_l , 由数字频率 $\omega_l = \frac{2\pi k_l}{N}$ 和角频率 $\Omega_l = \frac{4\pi l}{c}$ 的关系可以得到光纤法珀传感器的腔长

$$l = \frac{ck_l}{2N\delta v} = \frac{k_l\lambda_p^2}{2N\delta\lambda} \quad k_l = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (12)$$

1.2.2 FBG 传感器的解调

FBG 传感技术是通过在光纤内写入的光栅反射或透射光谱的检测, 实现被测结构的应变或温度等量值的绝对测量^[5].

宽带光源发出的光经过 FBG 时, 由模式耦合理论可知只有波长满足 Bragg 条件的光波被 FBG 反射回来, 其余波长的光被透射, Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (13)$$

式中, λ_B 是 FBG 中心反射波长; Λ 为栅距; n_{eff} 为纤芯有效折射率. 当外界应变, 温度等被测量发生变化时, 使 FBG 的间距或有效折射率发生变化, 被 FBG 反射的 λ_B 亦产生变化, Bragg 波长的偏移量为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{eff} + 2n_{eff}\Delta\Lambda \quad (14)$$

因此, 通过实时监测反射波长的偏移量, 再根据 Δn_{eff} 、 $\Delta\Lambda$ 与待测量之间的线性关系即可获得待测物理量的变化. 宽带光源入射到 FBG 传感器, 传感器反射回的光透过 FFP 滤波器被探测器所探测, 通过寻找信号峰值的位置, 就可以确定传感器的布拉格波长.

考虑到通用系统的特殊性, 如光源带宽, 光路效率等因素的影响, 对 FBG 传感器复用的部分采用相关运算解调的方法. 如果能把每个 FBG 传感信号看作一个整体, 通过计算整个信号在周期内的相对位置, 也就求得了整个信号在周期内的相对偏移量. 为此, 设计一个基准信号 S1, 如图 3 所示, 及 5 个不同位置的信号波形: 中心位置分别为 300、1 100、3 100、5 300、5 450(记为 1~5), 如图 4 所示. 假设波形 1 由于外界条件变化产生 200 点向右的偏移量, 波形 4 与 5 间有 40% 的重叠. 用 S1 和 5 个信号波形进行相关运算计算出各个信号在周期内的相对位置^[6].

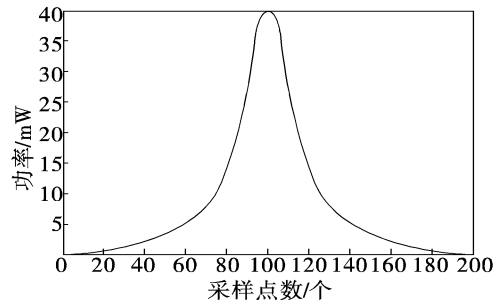


图 3 基准信号

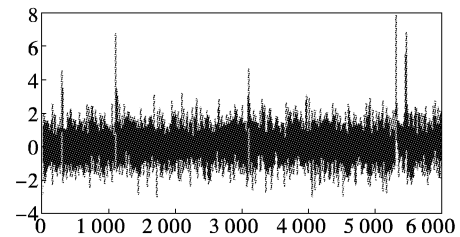


图 4 FBG 反射回来的信号波形

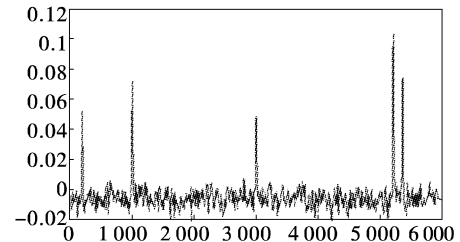


图 5 相关运算后得到的波形

由图 5 可以看到, 对同一信号进行相关运算的

值,能够反映信号位置的变化情况.经过大量仿真得知只要两波形重叠小于 40% 就可以确定各波峰值点在周期中的相对位置.

2 实验结果及分析

试验中,采用的光源是中心波长在 1 550 nm 的发光二极管(LED),谱宽为 30 nm,出纤功率大于 1 mW.光纤 F-P 可调滤波器自由光谱范围是 50 nm,精细度为 1 000,因此理论带宽为 0.05 nm.

对 FBG 解调,LED 发出的光经过 3 dB 耦合器进入 3 个串联的谱宽为 0.2 的 FBG,两光栅的间距为 1.05 nm.实验中采用调节架在光栅上施加应变,每次以 $100 \mu\epsilon$ (精度 $\pm 3 \mu\epsilon$) 的步长逐步增加光栅上的应变,解调系统测得的应变值和标准应变计得到的数据比较得出的曲线如图 6 所示.线性拟合度达到 0.975 4.

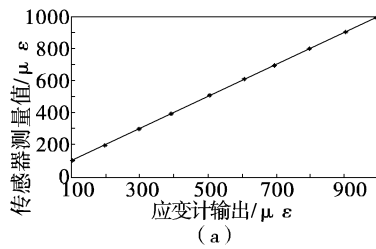


图 6 FBG 传感器与应变计输出对比

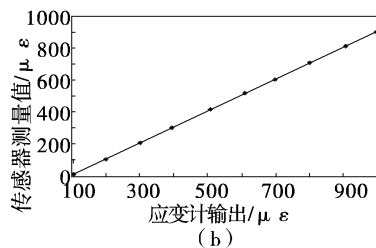


图 7 F-P 传感器与应变计输出对比

对 F-P 的解调,传感器应变测量值与应变计标准应变值的关系如图 7 所示,线性拟合度达到 0.961 6.

通过具体实验表明,系统的实际测量值和理论值存在着一定差异,但仍可较准确地得到所需应变值.同时表明了解调系统对 2 种光纤传感器的复用也具有解调能力.

3 结 束 语

在理论分析的基础上,通过 MATLAB 算法仿真和具体实验实现了光纤 F-P 和 FBG 传感器的通用解调,该系统具有精度高可复用的特点,FBG 和 FFP 传感器的应变测量精度可达 $0.5 \mu\epsilon$ 和 $2 \mu\epsilon$,可以满足工程的实际应用要求,并在信号的传感解调技术中有一定的实际意义.

参考文献

- [1] Kersey A D, Berkoff T A, Morsey W W. Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-sensor System with A Fiber Fabry-Perot Wavelength Filter[J]. Opt. Lett., 1993, 18(16):1370 - 1372.
- [2] 高庆,朱永,雷晓华,等. 光纤法珀-光栅传感器通用解调系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 197 - 198.
- [3] 王军,陈伟民,章鹏,等. 基于可调法珀滤波器的光纤法珀传感解调系统研究,激光杂志[J]. 2006, 27(4): 39 - 40.
- [4] 章鹏,朱永,唐晓初,等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 186 - 189.
- [5] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14: 391 - 396.
- [6] 杨广学,康守强,李忠华,等. 基于长信号快速相关算法的 FBG 传感解调[J]. 光电子·激光, 2006, 17(11): 1326 - 1329.

声 明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付.免费提供作者文章引用统计分析资料.如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理.