

文章编号:1004-4213(2010)08-1367-5

基于经验模态分解消噪的光纤光栅解调系统*

李志全,曹平,王亚男,刘正君,张景茹

(燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:为了提高光纤 Bragg 光栅解调系统的解调准确度,提出利用经验模态分解对信号进行滤波分析和降噪处理的方法.该方法将经验模态分解得到的固有模态函数,分为信号分量起主导作用模态与噪音分量起主导作用模态,并利用反映信号主要结构的模态对信号进行重构实现去噪.实验表明,解调系统输出信号能够识别出中心波长的位置,精确得到 Bragg 波长的漂移量,输出谱失真小、信噪比高.对温度实验数据进行曲线拟合,拟合线性度为 0.998,提高了系统的解调准确度.

关键词:光纤光栅;经验模态分解;信号重构;噪音

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103908.1367

0 引言

光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为传感元件由于其灵敏度高、防电磁干扰、耐腐蚀、避免接地回路、带宽大和远程操控能力,引起了广泛的关注,基于光纤光栅的传感器在民用工程领域和军事领域均有广泛的应用前景^[1-3].目前,对于光纤光栅传感器的理论研究已趋于成熟,具备了批量生产能力^[4].光纤光栅将外界物理量的变化转换为 Bragg 波长的变化,因此精确地解调出 Bragg 波长的漂移是应用的关键.由于各种光噪音的干扰使得输出信号波形产生失真,因此以反射谱的最大值作为 Bragg 波长的峰值位置会产生误差,降低了传感器的测量准确度.

为了提高 Bragg 波长的测量准确度,文献^[1-7]中提出对光功率谱应用数字滤波、匹配滤波等滤波方式提高信号的信噪比.这些方法对提高测量准确度起到积极的作用,但实质上还属于一般的时-频变换的范畴,不具备自适应信号分解和解调能力^[5-7].

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是最新发展起来的处理非线性非平稳信号的方法^[8],其主要的优点在于基函数可以从信号自身获得,克服了传统方法的局限性.根据信号时间尺度的不同,EMD 可以将复杂的信号分解成若干个按频率由高到低排列的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),故可以将其看作是以信号极值特征尺度为度量的时空滤波过程.基

于此本文提出利用 EMD 对信号进行滤波分析和降噪处理.

1 FBG 解调系统

图 1 为基于可调谐 F-P 解调系统图.宽带光源发出的光经过隔离器、耦合器,经光纤进入光栅传感阵列,其中满足 Bragg 条件的光被反射后经耦合器进入可调谐光纤 F-P.通过在 PZT 上施加以扫描电压驱动信号调节 F-P 腔长使其透射波在一定光谱范围内工作在扫描状态,当传感光栅的反射谱与 F-P 滤波器的透射谱峰值重合时,滤波器的透射光强最大,如事先标定 F-P 腔透射谱峰值波长——电压的关系,则通过光电探测器探测此透射光强,并结合此时施加在 PZT 上的电压值便可得到传感光栅的波长变化量,从而得出被测量的大小.

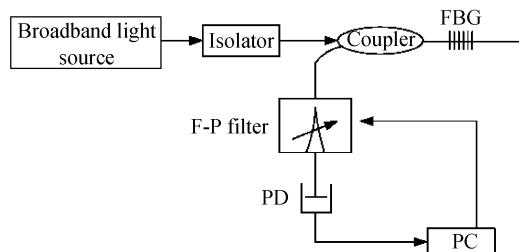


图 1 FBG 解调系统结构图
Fig. 1 Schematic diagram of FBG demodulation system

未切趾的 FBG 的反射谱型如图 2:可见由主峰和旁瓣组成的,旁瓣是光纤光栅固有的.工程上广泛应用的光纤光栅一般都是经过切趾技术得到的切趾光纤光栅,其反射谱可以认为是高斯分布的.光纤光栅在均匀受力或均匀测温的条件下,其谱形沿波长方向整体平移,形状不会发生改变,本文正是在这种前提下进行 EMD 消噪实验的.

*国家自然科学基金(60877047)和河北省自然科学基金(F2008000873)资助

Tel:0335-8052840

Email:wwb1448@163.com

收稿日期:2010-01-21

修回日期:2010-03-15

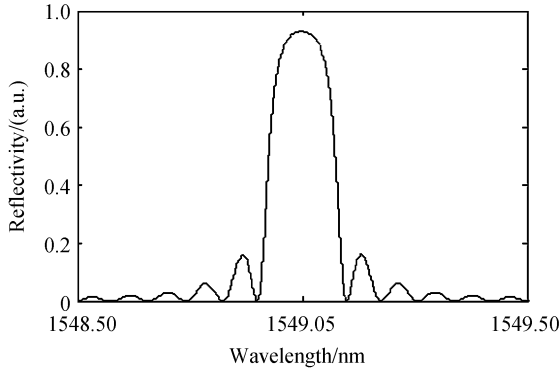


图2 FBG的反射谱

Fig. 2 The reflection spectrum of FBG

传感光栅反射谱和 F-P 透射谱均为高斯分布,即

$$R(\lambda) = R_B \exp\left[-4 \ln \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\Delta \lambda_B^2}\right] \quad (1)$$

$$T(\lambda) = R_M \exp\left[-4 \ln \frac{(\lambda - \lambda_M)^2}{\Delta \lambda_M^2}\right] \quad (2)$$

最终进入光电探测器 PD 的信号为

$$P(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{4 \sqrt{\ln 2}} I_0 R_B R_M \frac{\Delta \lambda_B \Delta \lambda_M}{\sqrt{(\Delta \lambda_B^2 + \Delta \lambda_M^2)}} \cdot \exp\left[-\frac{4 \ln 2}{\Delta \lambda_B^2 + \Delta \lambda_M^2} (\lambda_B - \lambda_M)^2\right] \quad (3)$$

式中, λ_B 、 λ_M 分别为传感光栅和 F-P 透射光的中心波长; $\Delta \lambda_B$ 、 $\Delta \lambda_M$ 分别为其半高宽度; R_B 、 R_M 分别是传感光栅中心波长反射率和 F-P 中心波长透射率, I_0 为入射光强。

2 经验模态分解

EMD 方法将一个复杂的信号分解为若干个 IMF 之和,它基于一个基本的假设:任何复杂的信号都是由一些不同的 IMF 组成,每一个 IMF 不论是线性或是非线性、非平稳的,都具有相同数量的极值点和过零点,在相邻的两个过零点之间只有一个极值点,而且上、下包络线关于时间轴局部对称,任何两个模态之间是相互独立的;任何时候,一个信号都可以包含许多 IMF,如果模态函数相互重叠,便形成复杂信号。

EMD 分解任意信号 $x(t)$ 基本过程为:确定信号所有的局部极值点;用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线、局部极小值点连接起来形成下包络线,上、下包络线的平均值记为 m_1 , 求出 $x(t) - m_1 = h_1$ 。如果 h_1 不满足 IMF 的条件,把 h_1 作为原始数据,重复上述步骤,得到上、下包络线的平均值 m_{11} , 在判断 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件,如不满足则重复循环 k 次,得到 $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$, 使得 h_{1k} 满足 IMF 的条件。记 $c_1 = h_{1k}$, 则

c_1 为信号 $x(t)$ 的第一个满足 IMF 条件的分量。将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到 $r_1 = x(t) - c_1$, 将 r_1 作为原始数据同样求出 $x(t)$ 的第二个满足 IMF 条件的分量 c_2 , 重复循环 n 次,得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量。这样就有

$$\left. \begin{aligned} r_1 - c_2 &= r_2 \\ \dots \\ r_{n-1} - c_n &= r_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当 r_n 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束。

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (5)$$

式中, r_n 称为残余函数,代表信号的平均趋势。

3 EMD 去噪滤波原理和信号重构

EMD 去噪滤波是从高频至低频逐步筛选出噪音,最低频的 IMF 分量一般为原始信号的趋势或均值,对混有随机噪音的信号,经分解后的高频 IMF 分量通常为噪音,这就是 EMD 滤波的基本原理^[9]。

在文献[10]中详细研究白噪音序列经 EMD 分解后各 IMF 分量的性质,提出各个 IMF 分量的能量密度与其平均周期的乘积为一常量。文献[11]中应用分形高斯噪音作为模拟实验数据,对 EMD 进行二进制滤波器进行研究,得到与文献[9]类似的结论。如果应用一种方法分离出含有噪音的 IMF 信号,将剩余的 IMF 分量组合即得到实际有效信号,也就是完成信号的重构。

设能量密度为

$$E_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [A_n(j)]^2 \quad (6)$$

平均周期为

$$\bar{T}_n = \frac{2N}{O_n} \quad (7)$$

式中, A_n 为振幅, O_n 为第 n 个 IMF 分量的极值点总数,则

$$E_n \bar{T}_n = C \quad (8)$$

式中, C 为一常量。

对于原始信号进行 EMD 分解得到的各个 IMF,按式(6)~(8),求出 E_n 、 \bar{T}_n 和 $E_n \bar{T}_n$ 与分解级数的关系曲线。因为噪音的 $E_n \bar{T}_n$ 为一常量,所以 $E_n \bar{T}_n$ 关系曲线的转折点处的分解级数即为含噪音的 IMF 的级数。确定好含噪音 IMF 的级数后,将剩余的 IMF 组合即得到实际有效信号,实际有效信号为

$$x'(t) = \sum_{i=k}^n c_i + r_n \quad (9)$$

4 实验与分析

FBG 传感解调系统进行 EMD 消噪实验,实验图如图 1. 实验采用的 FBG 利用相位模板法制成,中心波长为 1 549. 02 nm,反射谱的 3 dB 带宽为 0. 23 nm. 将传感器置于恒温箱中,对 FBG 进行温度传感实验,采样数据点为 4 000,解调系统输出信号如图 3. 可以看出,波形的最大值受到噪音的干扰,以波形的最大值为 FBG 的 Bragg 波长值容易引起测量误差,降低光纤传感探头的测量准确度.

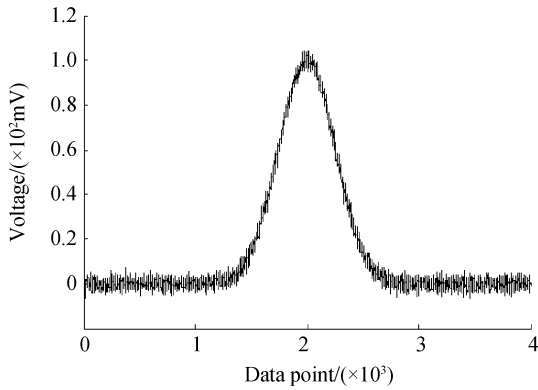


图 3 解调系统输出信号
Fig. 3 The output signal of demodulation system

对输出信号进行 EMD 分解(如图 4),得到 9 个 IMF 分量($c_1 \sim c_9$)和一个残余函数 r_9 . 利用式(6)~(8)求出各 IMF 分量的能量密度(E_n)、平均周期(\bar{T}_n)及能量密度与平均周期之积($E_n \bar{T}_n$)的序列图(如图 5). 图 5 可以看出,第 1 级至第 5 级 IMF 信号分量的能量密度与平均周期之积($E_n \bar{T}_n$)基本上为

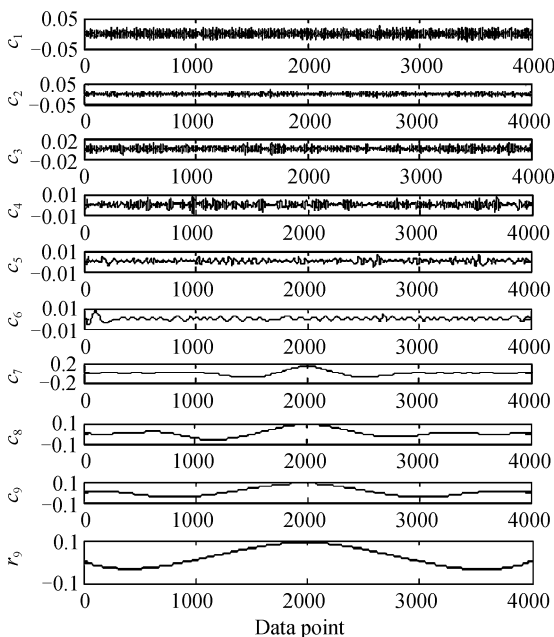


图 4 EMD 分解结果
Fig. 4 The result of EMD decomposition

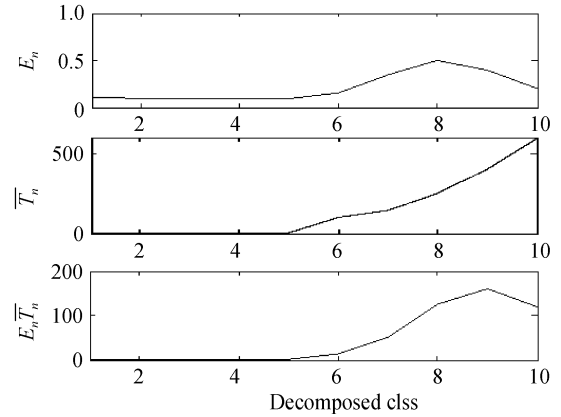


图 5 分解级数与 E_n 、 \bar{T}_n 以及 $E_n \bar{T}_n$ 关系曲线
Fig. 5 The relationship between decomposed class and E_n , \bar{T}_n and $E_n \bar{T}_n$

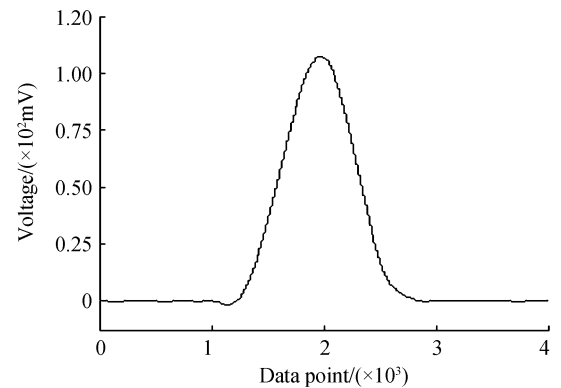


图 6 解调系统重构信号
Fig. 6 The reconstructive signal of demodulation system
常量, 大约为 0. 1, 从第 6 级 IMF 信号分量开始 $E_n \bar{T}_n$ 发生突变, 迅速增大(第 6 级 IMF 信号分量的 $E_n \bar{T}_n$ 的值为 15). 从前面的分析知, 噪音的 $E_n \bar{T}_n$ 为一常量, 所以含噪音 IMF 的级数为 5. 分离出含有噪音的 IMF 信号, 此时的剩余信号分量即为实际有效信号, 即将 $c_6 \sim c_9$ 组合得到实际有效信号. 重构后信号如图 6, 显然经过 EMD 消噪后, 解调系统输出信号能够识别出中心波长的位置, 精确得到 Bragg 波长的漂移量.

本文对 EMD 方法和其他滤波方法进行了对比. 采用 59 阶 Kaiser 窗低通 FIR 滤波器对解调系统输出信号进行滤波处理. 滤波后谱形如图 7. 图 7 与图 6 相比较看出图 6 谱形平滑, 能够分辨出峰值的位置.

设计 FIR 滤波器常用的方法是窗函数法, 这就存在选择恰当的窗函数减小截断效应的问题, 当选择某一种窗函数后其时频窗口的大小是固定的. 而 EMD 方法的基函数在分解过程中自适应地随信号产生, 可以看成是一组自适应的滤波器, 滤波过程简单, 滤波效果较好.

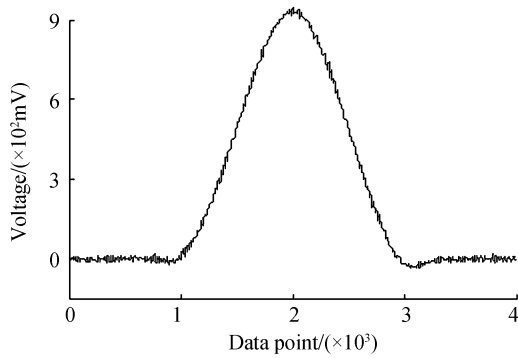


图7 经 FIR 滤波器滤波后的信号
Fig.7 Signal from FIR filter

图8 为做温度实验时的温度与 FBG 反射波中心波长的关系曲线. 为了验证 EMD 消噪在 FBG 解调系统中的作用, 按照无 EMD 消噪环节和带 EMD 消噪环节两种情况进行两组对比实验. 对实验数据进行曲线拟合, 拟合线性度分别为 0.988 和 0.998. 由此可见, 在光纤光栅解调系统中引入 EMD 消噪, 线性度提高 1.02%, 从而提高系统的解调准确度.

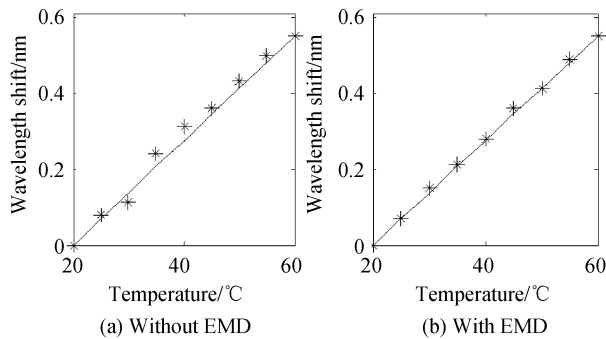


图8 温度与 FBG 反射中心波长变化量关系曲线
Fig.8 The relationship between temperature and wavelength shift

5 结论

针对光纤光栅解调系统中的噪音干扰, 提出了利用 EMD 对含噪光纤光栅解调输出信号进行实时消噪的方法. 通过对测量信号进行 EMD 分解, 得到各阶 IMF 分量. 由于有效信号与噪音在 IMF 分量中不会出现混叠即频率交叉的情况, 因此可以直接从原含噪音信号中减去含噪音 IMF 分量得到信号的重构. 光纤光栅温度解调实验证明, 输出谱失真小、信噪比高、解调系统的线性度提高 1.02%, 提高了系统的解调准确度.

参考文献

- [1] TANG Ting, SHI Yi-kai. Optical fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Opt Precision Eng*, 2002, **10**(1): 79-83.
唐婷, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(1): 79-83.
- [2] QIAN Jin-wu, SUN Liu-chuan, SHEN Li-yong, et al. On sensing apparatus for bending deformation in trenchless underground pipeline detection[J]. *Opt Precision Eng*, 2005, **13**(2): 179-184.
钱晋武, 孙流川, 沈林勇, 等. 非开挖地下管线探测中的弯曲变形检测装置研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(2): 179-184.
- [3] SANG Xin-zhu, YU Chong-xiu, YAN Ban-ban, et al. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Opt Precision Eng*, 2006, **14**(5): 771-774.
桑新柱, 余重秀, 颜盼盼, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 771-774.
- [4] LI Dong-sheng, HUO Zhi-pu. FBG digital demodulation based on signal autocorrelation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 914-917.
李东升, 霍志璞. 基于信号自相关原理光纤光栅数字解调方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 914-917.
- [5] WU Fu-gang, JIANG De-sheng, HE Wei. Measuring the shift of fiber Bragg grating wavelength based on correlation analysis [J]. *Computer Measurement & Control*, 2007, **15**(5): 593-595.
吴付岗, 姜德生, 何伟. 基于相关分析的光纤光栅 Bragg 波长偏移量测量[J]. *计算机测量与控制*, 2007, **15**(5): 593-595.
- [6] SHI Zhen-jiang, LI Zhi-quan, ZHENG Hua, et al. Study on FBG demodulation based on real-time wavelet-denoise [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 334-346.
史振江, 李志全, 郑华, 等. 基于实时小波消噪的光纤光栅解调系统研究[J]. *压电与声光*, 2009, **31**(3): 334-346.
- [7] 余德介, 程军圣, 杨宇. 机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 27-29.
- [8] SUN Wei-feng, PENG Yu-hua, XU Jian-hua. A de-noising method for laser ultrasonic signal based on EMD[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2008, **38**(5): 121-126.
孙伟峰, 彭玉华, 许建华. 基于 EMD 的激光超声信号去噪方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2008, **38**(5): 121-126.
- [9] CHEN Kai. A de-noising method based on EMD[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, **44**(5): 603-171.
陈凯. 基于经验模式分解的去噪方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, **44**(5): 603-171.
- [10] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2003, **11**(2): 112-114.
- [11] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[C]. *Proceedings of the Royal Society of London SE-RIESA*, 2003, **2**: 2317-2345.

FBG Demodulation System Based on EMD Denoise

LI Zhi-quan, CAO Ping, WANG Ya-nan, LIU Zheng-jun, ZHANG Jing-ru

(*Department of Instrument Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

Abstract: In order to improve the accuracy of the fiber Bragg grating demodulation system, a denoising processing and filtering analysis method based on empirical mode decomposition is proposed. The intrinsic mode functions obtained by EMD are derived into signal component dominating modes and noise component dominating modes. Denoising can be achieved by reconstructing the signal using the modes reflecting the main structures of the signal. The experimental results show that the output signal of demodulation system can achieve identifying the location of central wavelength and the Bragg wavelength shift accurately. The output spectrum has the features of less distortion and higher SNR. The curve fitting of temperature shows that the fitting linearity is 0.998, and the accuracy of demodulation system is greatly improved.

Key words: Fiber Bragg grating; Empirical mode decomposition; Signal reconstruction; Noise



LI Zhi-quan was born in 1954. He received the Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2000. Now he is a Doctoral Supervisor and engaged in the research of nonlinear photoelectric sensing.