

基于平均周期图法提高光纤光栅微弱振动信号检测能力的研究

陈 熙 董小鹏

(厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)用于微弱振动检测时,当被测振动太微弱时系统输出传感信号的信噪比小于 1,从时域采集的数据很难直接测得到信号的幅度和频率信息。提出一种信号处理方法,即将传感器在时域测量获得的连续数据分段后,对每段数据分别进行快速傅里叶变换获得其对应的功率谱信号,然后将频域信号做叠加平均得到新的数据。实验结果表明,采用这种频域叠加平均的方法处理后,FBG 传感信号在频域内的信噪比提高了 15.6 dB,明显提升了微弱信号的检测能力。初步实验表明:该系统对 FBG 波长变化的检测灵敏度可提高到 1.5 fm。该信号处理方法特别适合噪声环境恶劣、被测信号以一定频率持续存在的工程应用领域,对实际环境下微小振动的识别与检测具有较大的意义。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 高灵敏度振动; 平均周期图

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0505006

High Sensitive Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Averaged Periodogram Method

Chen Xi Dong Xiaopeng

(Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract Fiber Bragg grating (FBG) sensor monitor the micro-vibration in harsh environment is adopted. The micro-vibration cannot be detected when FBG sensor signal has low signal noise ratio (SNR) (less than 1). The averaged periodogram method is used to improve the sensitive. It divides the signal into N segments, fast Fourier transform (FFT) is performed on each data segments, then averaging the N power spectrum to get the new power evaluation. The primary results show, SNR is improved by 15.6 dB in frequency domain after the treatment with averaged periodogram method, and the FBG detection sensitivity is up to 1.5 fm. This high-accuracy sensor can be used in sustained vibration detection in structural health monitoring. It is important to increase the detection accuracy of the micro-vibration.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; high sensitive FBG vibration sensor; averaged periodogram method

OCIS codes 070.6020; 040.1880; 280.4788

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、易封装、抗电磁干扰抗腐蚀、易构成光纤网络等特点,被广泛应用在对振动或应变的传感中^[1-2]。在光纤传感系统中,外界环境的干扰会影响传感系统的灵

敏度^[3]。在工程现场微弱的 FBG 振动传感信号经常淹没在噪声中,此时无法对微小振动情况进行精确判断^[4-5]。对于在噪声环境系统输出信噪比大于 1 的情况,通常采用小波降噪、相关检测法等方法对信号进行降噪处理^[6]。对于信噪比小于 1 的情况,

收稿日期: 2013-10-23; 收到修改稿日期: 2013-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)

作者简介: 陈 熙(1987—),女,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: fxcxcx@126.com

导师简介: 董小鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤技术及其在光通信与光传感领域的应用等方面的研究。

E-mail: xpdong163@163.com(通信联系人)

可以采用对周期信号截断进行多次平均的降噪处理方法^[7]。针对信噪比远小于1的情况,此时信号完全被噪声淹没,无法对信号进行截断平均降噪的处理。本文运用平均周期图方法^[8],提出了一种FBG在工程现场的监测微弱振动的模型,提取出了在频域选定频段内信噪比仅为0.9 dB的振动信号。

2 光纤光栅微弱振动的实验测量系统

2.1 平均周期图法

平均周期图法可以在噪声环境中消除信号功率谱上的随机起伏,得到比较稳定的信号功率谱估值。该方法已经广泛应用在水下入侵目标检测识别,声呐目标识别,船舶运动预报中等^[9]。平均周期图法

$$P(j\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(j\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i(j\omega)|^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |W_i(j\omega)|^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S_i(j\omega)W_i^*(j\omega) + S_i^*(j\omega)W_i(j\omega)]. \quad (3)$$

当 N 足够大且噪声 $w(t)$ 分布与信号 $s(t)$ 无关时,由于噪声在相位上的随机性,(3)式中的交叉项 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S_i(j\omega)W_i^*(j\omega) + S_i^*(j\omega)W_i(j\omega)]$ 趋近于零,噪声的功率谱估计为一常数,则 $s(t)$ 的功率谱估计值为

$$P[S(t)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i(j\omega)|^2 = P(j\omega) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |W_i(j\omega)|^2, \quad (4)$$

式中 N 越大则谱估计值的方差越小,功率谱分辨率越低。 N 越小则谱估计值方差越大,功率谱分辨率越高。为了提取固定频率的微弱振幅的振动信号, N 尽量取大,在提高检测精度的同时降低了频谱的分辨率。

信号信噪比在频域范围内描述为信号的平均功率与噪声的平均功率(信号采集速率相关)之比,即 $R_{SN} = 10\lg\left(\frac{P_s}{P_N}\right)$,其中 P_s 为信号的平均功率, P_N 为信号带宽噪声的平均功率。在频域内计算信噪比时,信号的平均功率可以由信号的功率谱密度得到,噪声的平均功率估计值用指定信号带宽内总功率与信号功率之差的平均值表示,两者的比值即为信噪比:

$$R_{SN} = 10\lg\left\{\frac{\sum (S_k)^2}{[\sum (X_k)^2 - \sum (S_k)^2]/K}\right\}, \quad (5)$$

式中 $\sum (X_k)^2$ 为功率谱总功率, $\sum (S_k)^2$ 为信号

的实现步骤为:在保证足够的频率分辨率下将样本序列分段,分别对每段数据分别计算功率谱,最后对各个功率谱叠加并取平均值。

设 $x(t)$ 是含有噪声的信号,则 $x(t)$ 可写为

$$x(t) = s(t) + w(t), \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为传感数据, $w(t)$ 为噪声信号,时间 t 的取值范围为 $[0, T]$ 。对 $x(t)$ 进行分段,得到 N 段数据,其中第 i 段的数据记为 $x_i(t)$ 。 $x_i(t)$ 的功率谱为

$$P_i(j\omega) = |X_i(j\omega)|^2 = X_i(j\omega)X_i^*(j\omega), \quad (2)$$

式中 $X_i(j\omega)$ 为数据段 $x_i(t)$ 的傅里叶变换,且 $X_i(j\omega) = S_i(j\omega) + W_i(j\omega)$,对所有 $P_i(j\omega)$ 进行叠加平均,可得到平均后的功率谱估计值 $P(j\omega)$ 为

功率, $\sum (X_k)^2 - \sum (S_k)^2$ 为噪声功率, K 为指定的信号带宽。

2.2 实验装置

FBG 是一种性能优良的高分辨率传感元件,它的中心波长 λ_B 主要由周期 Λ 和内光场模式的有效折射率 n_{eff} 所决定,即 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ 。实验中对光栅施加应力可以改变 FBG 几何尺寸和 FBG 纤芯的有效折射率,通过 FBG 中心波长的改变量可以检测到外界的振动。

实验装置如图 1 所示,系统由 DFB 激光器光源、耦合器、FBG、等悬臂梁、压电陶瓷(PZT)、光电转换、信号采集卡和计算机组成。将中心波长为 1539.6 nm 的 FBG 和 PZT 粘贴在等强度悬臂梁的表面,采用 DFB 激光器对 FBG 进行边沿滤波解调。由于可调激光器线宽远小于光栅光谱线宽范围,在该滤波器的边带内 FBG 反射的光强 I 与 FBG 的中

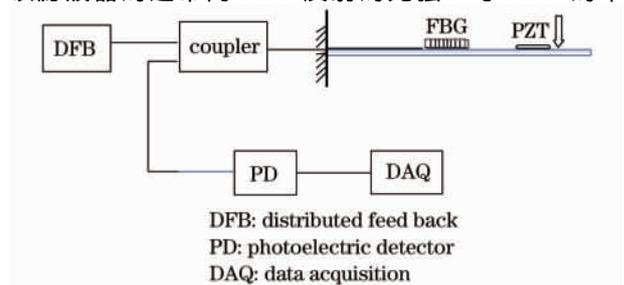


图 1 系统结构图

Fig. 1 Block diagram of the experimental setup

心波长 λ_B 成线性关系。因此,通过检测 FBG 反射的光强 I 情况,即可获得 FBG 的受力情况。实验中,DFB 光源发出的非相干光进入耦合器,该非相干光进入中心波长为 1539.6 nm 的 FBG,满足 FBG 条件的中心波长光从耦合器的另一端经过光电转换得到电压信号。信号通过数据采集卡传输到计算机上进行信号处理与分析。

3 基于平均周期图法的光栅微弱振动信号的处理结果

在实际工程环境中,FBG 微弱的振动传感信号会完全淹没在噪声中。该检测系统的噪声来源包括光学器件噪声和电路噪声。电路噪声包括仪器固有噪声,模/数(A/D)转换的高频噪声。光学仪器噪声包括光纤内瑞利散射噪声,由光源的慢变化,振动和温度等外界干扰对光学器件造成背景噪声等等。通常这些噪声叠加在一起的分布形态类似于白噪声。

在悬臂梁自由端施加线性变化的应力,光谱仪上测得光栅中心波长偏移量和光电转换电压变化量。FBG 波长的变化量与解调电压的关系如图 2 所示。FBG 波长的变化量与解调电压呈现良好的线性关系。该系统检测波长变化的电压灵敏度为 20 V/0.12 nm,可以通过电压的变化量来标定波长。

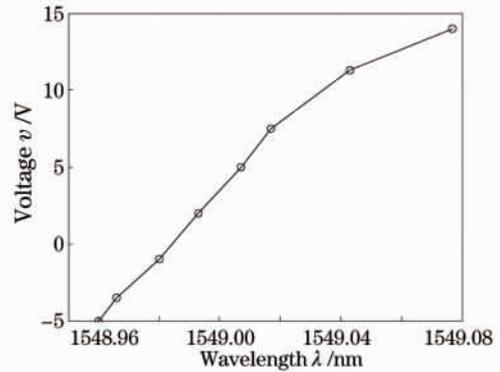


图 2 FBG 波长的变化量与解调电压的曲线

Fig.2 Linearity between wavelength shift and demodulation system

将压电陶瓷片封装在悬臂梁的自由端并由信号发生器驱动。实验中压电陶瓷片与悬臂梁同时做周期性振动,将振动通过悬臂梁施加到 FBG 上。用 5 V,10 kHz 正弦信号驱动压电陶瓷系统解调信号为如图 3(a)所示,传感信号为 10 kHz 单一频率的幅值为 200 mV 的正弦波。根据灵敏度计算得到此时 FBG 中心波长最大漂移 1.2 pm。此时解调信号观测到叠加了一些系统噪声。对信号做傅里叶变换,信号的功率谱如图 3(b)所示,频谱上出现 10 kHz 主频分量,幅值分量为 4×10^{-3} 。通过(5)式得出该功率谱在 9~11 kHz 频段内的信噪比为

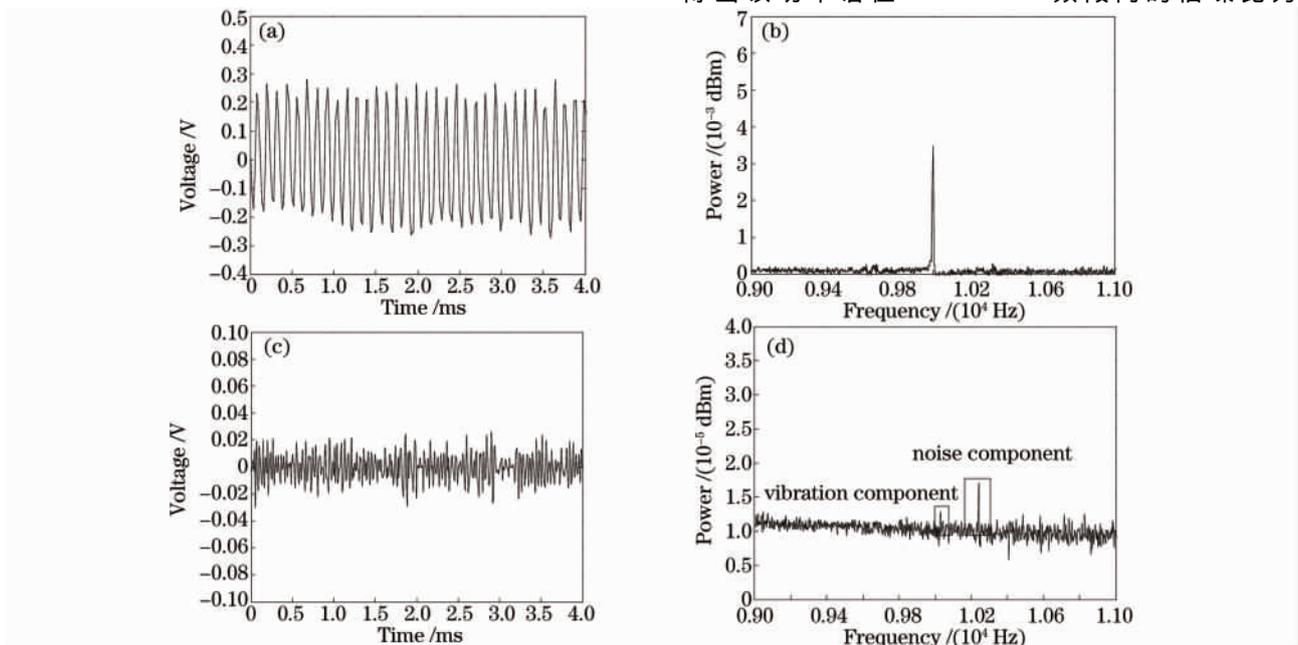


图 3 振动解调信号及其功率谱。(a) 5 V, 10 kHz 驱动下的系统解调信号; (b) 5 V, 10 kHz 驱动下的功率谱信号; (c) 50 mV, 10 kHz 驱动下的系统解调信号; (d) 50 mV, 10 kHz 驱动下的功率谱信号

Fig.3 FBG signal and power spectra. (a) FBG sensor signal when apply 5 V, 10 kHz sin signal to PZT; (b) power spectrum of 5 V, 10 kHz sensor signal; (c) FBG sensor signal when apply 50 mV, 10 kHz sin signal to PZT; (d) power spectrum of 50 mV, 10 kHz sensor signal

16 dB。用 50 mV, 10 kHz 正弦信号驱动压电陶瓷, 悬臂梁发生微弱振动, 此时由于 FBG 形变的程度比较小。系统解调信号在时域内完全被淹没在系统背景噪声中, 如图 3(c) 所示。图 3(d) 为图 3(c) 的功率谱, 10 kHz 处的频率分量完全淹没在噪声中, 10.2 kHz 处也出现了明显的干扰频率分量。此时功率谱在 9~11 kHz 频段内信噪比仅为 0.9 dB, 呈现出低信噪比不可辨识的形态。

采用 50 mV, 10 kHz 驱动下的传感信号, 经过 $N=5$ 的平均周期图法处理后结果如图 4 所示。对比图 3(d) 和图 4 所知, 处理后噪声的能量在频域内分布得到有效的控制并且趋于平坦。信号的能量 $\frac{1}{N} \sum |S_i(j\omega)|^2$ 叠加在平坦的噪声基底 $\frac{1}{N} \sum |W_i(j\omega)|^2$ 上时, 信号的能量会在功率谱上得到凸显。实验中采用 100~20000 Hz 的正弦信号驱动压电陶瓷, 在该频段内传感器的解调信号经过平均周期图法的处理后信噪比和检测精度都得到显著提高。

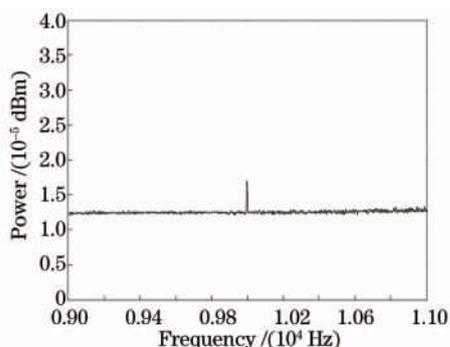


图 4 基于周期图法的功率谱

Fig. 4 Power spectra based on periodogram method

噪声基底 $\frac{1}{N} \sum |W_i(j\omega)|^2$ 体现了系统噪声水平的大小, 对噪声基底的修正不仅会提高系统的检测精度, 还会提高检测系统对噪声环境的适应性^[10-11]。经过平均周期图信号处理和噪声基底修正处理之后, 信号的信噪比在频域在 9~11 kHz 频段内由 0.9 dB 提高到 16.5 dB。图 4 功率谱中 10 kHz 谱频率分量的幅值为 5×10^{-6} 。根据傅里叶变换线性性质, 周期信号的时域幅值与频率分量幅值成正比。对比图 3(b) 信号功率谱频率分量的幅值 4×10^{-3} , 系统对 FBG 波长变化的检测灵敏度提升到 1.5 fm。

4 结 论

利用 FBG 振动传感器检测检测微弱振动, 用平均周期图法在频域选定频段上提取出了信噪比仅为 0.9 dB 的振动信号, 使得 FBG 检测系统的灵敏度提升到 1.5 fm。对检测结果进行噪声基底的修正不仅提升了系统的检测精度, 同时也增强了系统对噪声环境的适应性。本算法适用于在信噪比较低的实际工程现场对 FBG 传感器微弱振动的监测上。

参 考 文 献

- Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406005.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406005.
- Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber gratin[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.
- Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber 3×3 coupler interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 549-553.
李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉振动测量系统[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 549-553.
- Rytter A, Krawczuk M, Kirkegaard P H. Experimental and numerical study of damaged cantilever [J]. *J Engineering Mechanics*, 2000, 126(1): 60-65.
- Yang Qiuwei. The development damage identification based on vibration[J]. *J Vibration and Shock*, 2007, 26(10): 86-89.
杨秋伟. 基于振动的结构损伤识别方法研究进展[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(10): 86-89.
- Jiang Shanchao, Cao Yuqiang, Sui Qingmei, *et al.*. Research in the micro and high-precision fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 40(4): 0405002.
蒋善超, 曹玉强, 隋青美, 等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究[J]. *中国激光*, 2012, 40(4): 0405002.
- Qi Jie, Dong Xiaopeng, Shen Yanxin, *et al.*. Research on fiber gas sensor system based on scanning light source[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0905001.
齐洁, 董小鹏, 沈炎鑫, 等. 基于扫描光源的光纤气体传感系统的研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0905001.
- Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. *Signals and Systems* [M]. Englewood: Prentice-Hall, 1983. 266-268.
- Kang Chunyu, Zhang Xinhua, Zhang Anqing. A method of passive sonar target recognition based on spectrum evaluation[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, 24(6): 627-631.
康春玉, 章新华, 张安清. 一种基于谱估计的被动声呐目标识别方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, 24(6): 627-631.
- Wu Yanqun, Luo Hong, Hu Zhengliang, *et al.*. Adaptive cancellation of background noise of fiber optic vector sensor system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0305004.
吴艳群, 罗洪, 胡正良, 等. 光纤矢量水听器系统本底噪声的自适应抵消[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0305004.
- Wu H, Wen Y, Li P. Dynamic discrimination of convergence of the LMS time delay estimation in complicated noisy environments [J]. *Applied Acoustics*, 2007, 68(6): 628-641.

栏目编辑: 何卓铭