

doi:10.13756/j.gtxyj.2016.02.013

光电器件研究与应用

一种小波阈值去噪在FBG解调中的改进方法

江虹¹, 苏阳¹, 李进¹, 程欣贝²

(1. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012; 2. 华中科技大学附属中学, 武汉 430074)

摘要: FBG(光纤布拉格光栅)传感系统的解调过程中, 噪声的存在严重影响了系统的精度。为提高系统的测量精度, 去噪是解调中不可或缺的环节, 在传统小波阈值去噪算法中软、硬阈值函数以及现有文献所设计阈值函数的研究基础上, 构造了一个新的阈值函数, 该函数对噪声的处理具有更好的效果。对含噪FBG反射信号的去噪实验表明, 新构造的阈值函数比传统的软、硬阈值函数信噪比平均提高3~5 dB, 均方根误差平均降低0.1~0.3。最后将提出的方法运用到FBG传感测温系统中, 证明了该方法的可行性, 并且可使解调精度小于5 pm, 满足FBG传感系统的精度要求。

关键词: FBG信号; 小波去噪; 阈值函数; FBG传感系统

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2016)02-0040-04

An Improved Method of Wavelet Threshold De-noising Applied to FBG Demodulation

JIANG Hong¹, SU Yang¹, LI Jin¹, CHENG Xin-bei²

(1. School of Electrical & Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Middle School Attached to HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the demodulation process of Fiber Bragg Grating(FBG) sensing system, the accuracy of the system is affected by the noise seriously. In order to improve the measurement accuracy of the system, denoising is an indispensable part in the demodulation. In this paper, we construct a new threshold function with much better denoising performance based on typical wavelet threshold denoising algorithm with soft and hard threshold function, and threshold functions in the existing literature. Through the de-noising experiment for the noisy FBG reflected signal, the result shows that the proposed threshold function can increase the average signal-to-noise ratio by 3~5 dB, and reduce the root mean square error by 0.1~0.3, when comparing with the typical soft and hard threshold function. Finally, we apply the proposed method to the FBG temperature sensing system to demonstrate the feasibility of the method. The experiment results show that the demodulation accuracy is less than 5 pm, which meet the accuracy requirement of the FBG sensing system.

Key words: FBG signal; wavelet denoising; threshold function; FBG sensing system

0 引言

FBG(光纤布拉格光栅)是一种基于光敏性测量的新型传感器,待测量的变化会引起FBG的中心波长发生变化,通过检测波长的漂移量可以得到被测参数的值,因此如何精准地解调出中心波长的漂移量是整个系统的关键^[1]。在实际的FBG传感系统中,光电探测器采集到的FBG反射谱信号通常含有大量噪声,因此在对信号进行处理和分析前必须去除噪声^[2]。小波变换具有强大的时频分析能力和高分辨率特性,基于小波变换的信号去噪处理得到了广泛的应用。阈值函数的选取是小波阈值去噪的核心部分,传统的软、硬阈值函数虽然能达到一定的去噪效果,但因其自身存在的缺陷,不适合用于精度要求高的系统中^[3]。本文针对传统方法的不足,提出了一个新的阈值函数,使之能够获得更好的去噪效果。

1 FBG信号小波去噪方法

1.1 小波去噪原理

设 $s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布的高斯白噪声,并叠加到原始信号上,则含噪信号 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

对 $f(t)$ 作离散小波变换,得到

$$\begin{aligned} \omega_f(j, k) &= \omega_s(j, k) + \omega_n(j, k); \\ j &= 0, 1, \dots, J, k = 0, 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\omega_s(j, k)$ 、 $\omega_n(j, k)$ 分别为原始信号和噪声在第 j 层上的小波系数, J 为最大分解层, N 为信号长度。由于原始信号通常表现为低频或者较为平稳的信号,而噪声信号的频率相对比较高,所以经过小波变换后,原始信号的能量主要集中在有限的小波系数上,这部分小波系数幅值较大,但数目较少;噪声的能量均匀地分布在整个小波域内,而且对应的小

收稿日期:2015-11-05

基金项目:吉林省科技厅基金资助项目(20140204007GX)

作者简介:江虹(1970—),女,吉林长春人。副教授,博士,主要从事智能仪器与智能控制系统的研究。

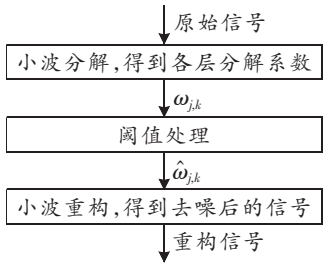


图1 小波阈值去噪流程图

1.2 阈值函数选取

小波阈值去噪的量化准则是阈值函数,硬阈值处理是将大于阈值的小波系数保留,而软阈值处理是将大于阈值的小波系数以固定量向零收缩。硬、软阈值函数的表达式如下:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k}, & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (3)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (4)$$

式中, $\omega_{j,k}$ 为原始信号经过小波变换后的小波系数; $\hat{\omega}_{j,k}$ 为估计的小波系数; λ 为预设阈值。硬阈值函数处理后的小波系数在 $\pm\lambda$ 处是不连续的,因而变换后连续性差,经小波重构后的信号可能会有震荡

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \mu\omega_{j,k} + (1-\mu)\text{sgn}(\omega_{j,k}) \left(|\omega_{j,k}| - \frac{\lambda}{\exp(|\omega_{j,k}|/\lambda - 1)^n} \right), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (6)$$

式中, $\mu = 1 - e^{-\alpha(|\omega_{j,k}| - \lambda)^2}$, α 为正数, n 为信号的分解层数。由函数式可知,构造的阈值函数与一般阈值函数处理方法相同,即将绝对值小于阈值的那部分小波系数置0,将绝对值大于或等于阈值的部分用构造的阈值函数处理。由式(6)可以看出,当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \pm\lambda$ 时, $\hat{\omega}_{j,k} \rightarrow 0$,说明函数在 $\pm\lambda$ 处连续,所以重构信号不会产生震荡;而且随着 $\omega_{j,k}$ 的不断增大,当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \infty$ 时, $\hat{\omega}_{j,k} \rightarrow |\omega_{j,k}|$,即函数以 $\hat{\omega}_{j,k} = \omega_{j,k}$ 为渐近线,减小与真实小波系数之间的偏差,克服了软阈值函数存在固定偏差的问题。从表达式中还可以看出,当 $\alpha \rightarrow 0$ 时为软阈值函数, $\alpha \rightarrow \infty$ 时为硬阈值函数,由此可见,构造的阈值函数同时具有软、硬阈值函数的特点,灵活性很强。而且随着分解层数 n 的不同,各层阈值的大小也可以自动调节,因此具有很强的自适应能力。

2 实验及分析

为了验证文中提出的阈值函数在FBG信号去噪中的优越性,利用高分辨率光谱分析仪采集不含

波系数幅值较小。因此通过选取合适的阈值,对小波系数量化处理,再对处理后的小波系数进行小波重构,即可得到去噪后的信号,去噪流程如图1所示。

产生;而软阈值函数处理的小波系数与实际的小波系数之间存在一定的偏差,重构后的信号与真实信号也存在较大的误差,而且用软阈值法,这种误差是不可避免的^[4]。

针对软、硬阈值方法的缺陷,很多研究者提出了不少新的阈值函数,使估计信号更接近原始信号。文献[5]给出的改进阈值函数如下:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \left(|\omega_{j,k}| - \frac{\lambda}{\exp(|\omega_{j,k}|/\lambda - 1)^n} \right), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases}, \quad (5)$$

这种阈值函数虽然解决了 $\omega_{j,k}$ 和 $\hat{\omega}_{j,k}$ 存在固定误差的问题,但由于缺少调节因子,在处理过程中依然存在缺陷。

研究已有文献中提出的阈值函数,可以看出它们必须满足以下两个条件:第一,当 $|\omega_{j,k}| \geq \lambda$ 时,随着 $\omega_{j,k}$ 的增大, $\hat{\omega}_{j,k} \rightarrow \omega_{j,k}$;第二,当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \pm\lambda$ 时, $\hat{\omega}_{j,k}$ 趋近于0或 λ 。根据这个规律,构造一个新的阈值函数如式(6)所示,通过变量 μ 将软、硬阈值函数结合起来,使得它在兼顾两种处理方法的同时,又能解决连续性差以及存有固定偏差的问题。

噪声的FBG原始光谱,扫描范围为1528~1568 nm,中心波长分别为1546.635、1547.655和1548.825 nm。由于实际测量中的噪声无法预知,为了精确分析SNR(信噪比),在原始光谱上叠加高斯白噪声来代替工程中的含噪信号。原始光谱信号与加上白噪声(20 dB)后的信号对比如图2所示。实验通过叠加6种不同SNR的高斯白噪声,分别是5、10、15、20、15和30 dB,用文中提到的4种阈值去噪,效果如图3所示。

从图中可以看出,4种方法对含噪信号都有一定的去噪效果,但从光滑度、原始信号的恢复度考虑,几种方法的小波去噪效果还是有一些区别,其中去噪效果最差的是硬阈值法,它虽然保留了原始信号的全局特征,但由于函数不连续产生了伪吉布斯现象,振幅很明显。相比之下,本文提出的阈值函数去噪效果最好,与原始信号最为吻合。

通常我们用SNR和RMSE(均方根误差)两个指标来评价去噪效果的优劣,SNR和RMSE的表达式如下:

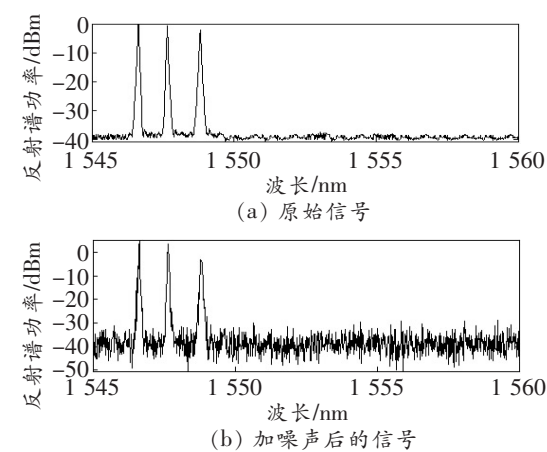


图 2 原始信号和加噪声后的信号对比

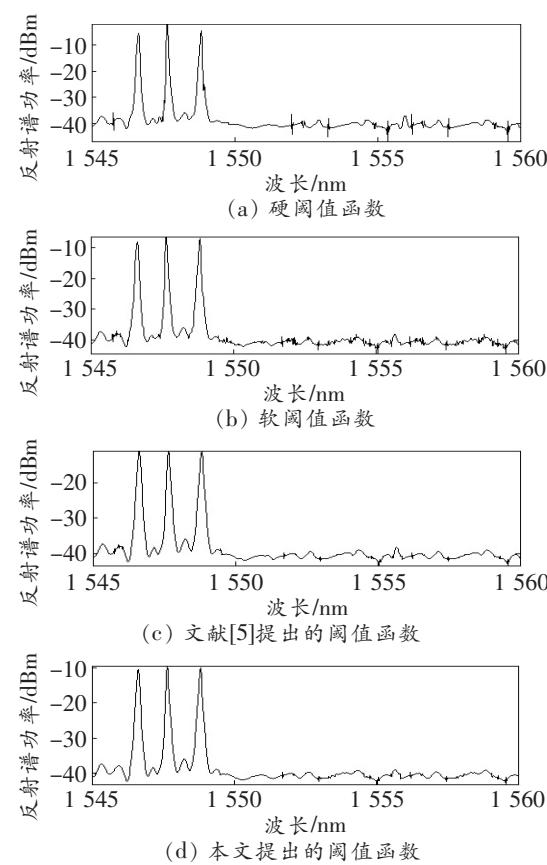


图 3 不同阈值函数去噪效果图

$$SNR=10\lg\left(\frac{\sum_{i=1}^ns^2(i)}{\sum_{i=1}^n(s(i)-\hat{s}(i))^2}\right),\quad(7)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(s(i)-\hat{s}(i))^2},\quad(8)$$

式中, $s(i)$ 表示原始信号; $\hat{s}(i)$ 表示去噪后的信号。SNR 值越大, 信号中噪声含量越少; RMSE 值越小, 测量可靠性越高, 不同阈值函数处理的信号的 SNR

和 RMSE 分别如图 4 和图 5 所示。

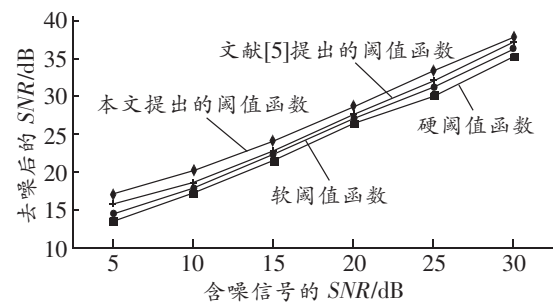


图 4 不同阈值函数去噪后的 SNR

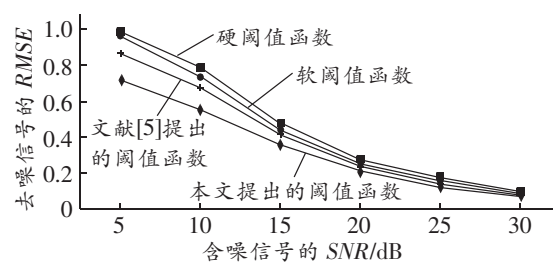


图 5 不同阈值函数去噪后的 RMSE

由图可以看出, 本文提出的阈值函数去噪效果整体上优于其他 3 种阈值函数, 采用本文方法处理后, 获得的 SNR 最大值为 37.892 dB, RMSE 最小值为 0.073 4, 由此证明该方法应用在 FBG 信号处理上有明显的优势。

3 温度测试实验

为了检验本文提出的方法在 FBG 解调系统中的应用效果, 采用传感光栅进行温度测量实验, 实验将 FBG 传感器放入与外界隔绝的恒温槽中, 恒温槽的精度达 0.1℃。从 5~60℃ 每间隔 10℃ 调节一次温度, 并测中心波长, 每个温度点测量 5 次, 取其平均值, 测量结果如表 1 所示。

表 1 不同温度下的布拉格波长			
温度/℃	波长/nm	温度/℃	波长/nm
5	1 551.568	35	1 551.877
10	1 551.618	40	1 551.925
15	1 551.671	45	1 551.974
20	1 551.719	50	1 552.025
25	1 551.773	55	1 552.075
30	1 551.824	60	1 552.123

对表中的数据进行拟合, 可以得到温度与波长的关系, 如图 6 所示。测量数据的线性相关系数 $R=0.999\ 4$, 说明将此方法用到 FBG 解调系统中, 传感光栅中心波长的温度能获得良好的线性关系, 能够很好地检测温度, 而且解调精度 $<5\ \text{pm}$ 。

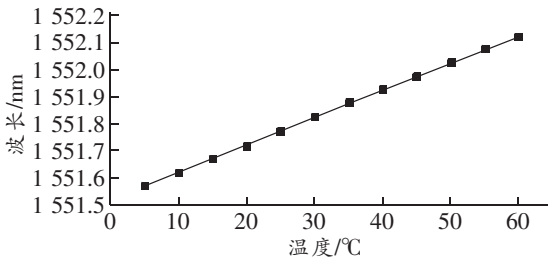


图6 波长与温度的关系曲线

4 结束语

根据FBG传感系统对精度的要求,本文针对采集到的FBG信号,用小波阈值函数去噪处理,在传统阈值函数的基础上重新构造了一个阈值函数。所提出的阈值函数能根据分解层数不同改变各层阈值的大小,具有很好的适应性。通过对几种不同阈值函数的去噪实验,结果表明,本文提出的方法能够获得更大的SNR和更小的RMSE,具有很好的去噪效

果。最后通过FBG传感测温实验的验证,表明运用此方法能获得良好的线性度和较高的灵敏度,能满足实际工程的需求,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 申雅峰,张磊,胡春艳.一种基于FPGA的光纤光栅高速解调算法[J].光通信研究,2014,(2):39—42.
- [2] 陈勇,贺明玲,刘焕淋.利用改进阈值的平移不变量小波处理FBG传感信号[J].光电子·激光,2013,24(2):246—252.
- [3] 吴朝霞,吴飞,蒋学英,等.基于光学小波滤波的光纤光栅传感解调方法的研究[J].传感技术学报,2004,17(3):453—456.
- [4] 邵鸿翔,高宏峰.改进小波阈值去噪方法处理FBG传感信号[J].激光与红外,2014,44(1):73—76.
- [5] 陈勇,贺明玲,陈丽娟,等.改进的小波变换用于处理FBG信号[J].红外与激光工程,2013,42(10):2784—2789.

(上接第39页)

3 结束语

针对LCOS芯片在WSS模块中的应用情况,本文仿真分析了像素之间的电场边缘效应对LCOS相位光栅的衍射特性和WSS模块的性能指标的影响。因寄生光栅效应产生的端口间串扰制约了光束的最大衍射偏转角度,从而决定了WSS模块的最大端口数。在给定串扰要求的前提下,减小准直器阵列的间距和增大傅里叶透镜的焦距,均有助于增加端口数;而端口间距受限于端口之间的光场串扰,不宜过小;WSS模块的尺寸正比于傅里叶透镜的焦距,焦距过大则光路过长,会增加光路调试困难且不利于模块的小型化设计。这些研究成果对基于LCOS技术的WSS模块的参数设计和性能优化工作具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] Frisken Steven, Poole Simon B, Baxter Glenn W. Wavelength-Selective Reconfiguration in Transparent Agile Optical Networks [J]. IEEE Invited Paper, 2010, 100(5):1056—1064.
- [2] Wall P, Colbourne P, Reimer C, et al. WSS Switching Engine Technologies [C]// OFC/NFOEC 2008.

San Diego, USA:IEEE,2008:1—5.

- [3] Kelly J R, Cui M, Heineman D, et al. Apparatus and method for optical switching with liquid crystals and birefringent wedges: US, US7499608 [P]. 2009-03-03.
- [4] Baxter G, Frisken S, Abakoumov D, et al. Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements [C]// OFC/NFOEC 2006. Anaheim, USA: IEEE, 2006: 1—3.
- [5] Collings N, Davey T, Christmas J. The Applications and Technology of Phase-Only Liquid Crystal on Silicon Devices [J]. Display Technology Journal of, 2011, 7(3): 112—119.
- [6] Bahat-Treidel E, Efron U, Apter B. On the fringing-field effect in liquid-crystal beam-steering devices [J]. Appl Opt, 2004, 43(1): 11—19.
- [7] Sinefeld D, Marom D M. Insertion Loss and Crosstalk Analysis of a Fiber Switch Based on a Pixelized Phase Modulator [J]. Lightwave Technology Journal of, 2011, 29(1): 69—77.
- [8] Yuan S, Riza N A. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. Applied Optics, 1999, 38(15): 3214—3222.