

非扫描式光纤法-珀解调仪分析与设计

龚天诚, 朱 永, 王 宁, 李丽慧, 李 阳

(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400030)

摘 要:利用相关解调原理研制了非扫描式光纤法-珀解调仪,进行了理论分析和系统优化。仪器以线阵电荷耦合器件(CCD)为光电探测器,结合现场可编程门阵列器件(FPGA)和上位机(ARM)处理,实现信号的实时处理。线性光不均匀性和杂散光所带来的背景噪声,导致不能准确检测出相关信号的极大值。为此,提出了一种能有效滤除背景噪声信号处理算法,提高了仪器对微弱信号的探测能力和稳定性,使其对光纤法-珀传感器腔长测量的相关系数达到0.999 9,测量波动仅为7 nm。实验结果表明,该仪器能实现对传感器腔长的实时测量,且测量精度高,稳定性和一致性好。

关键词:光纤法-珀传感器;非扫描式;相关解调;背景噪声;信号处理

中图分类号:TN253;TN763

文献标识码:A

Analysis and Design of Non-scanning Optical Fiber Fabry-Perot Demodulator

GONG Tiancheng, ZHU Yong, WANG Ning, LI Lihui, LI Yang

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper develops a non-scanning fiber Fabry-Perot demodulator based on correlation demodulation theory. Corresponding theoretical analysis and system optimization are completed. The demodulator uses a liner array CCD as photo detector combining the FPGA and ARM controller to achieve real-time signal processing. However, the demodulator can not detect the maximum value of the correlation signal accurately because of the influence of the background noise brought by the unevenness of linear light and the stray light. In order to solve this problem, a signal procession algorithm is proposed. It can filter out the background noise on the correlation signal effectively. Also the detection capability of weak signal and the accuracy of demodulation have been greatly improved, so that the correlation coefficient of the cavity length measurement is 0.999 9 and the fluctuation is only 7 nm. The experimental results indicate that the system can achieve real-time measurement, high measurement accuracy, stability and consistency.

Key words: optical fiber Fabry-Perot sensor; non-scanning; correlation demodulation; background noise; signal procession

0 引言

光纤法-珀传感器作为一种结构简单,稳定性好的传感器,具有体积小,灵敏度高,受温度影响小、抗电磁干扰能力强,静态测量精度高等特点,已广泛应用于桥梁结构健康监测、土木工程、大型民用建筑安全监测等领域^[1-2]。光纤法-珀传感解调法主要有强度解调和相位解调。强度解调系统复杂,测量精度有限,渐被相位解调所取代。相位解调包括条纹计数、傅里叶变换法和相关解调法^[3-5]。2000年,重庆大学研制出国内第一台基于傅里叶变换法的相位调制型光纤法-珀应变仪^[6],但此系统仍需超辐射发光

二极管(SLD)、光谱仪等价格昂贵的器件,解调分辨率也仅有几十纳米。近年来,相关解调原理的应用得到重视,相关解调又分为扫描式和非扫描式^[7],扫描式利用电压变化使可调法-珀腔腔长通过机械扫描方式发生变化;非扫描式则利用光楔的楔角实现腔长的变化^[8]。扫描式解调难保证可调法-珀腔腔长的准确性和扫描周期的重复性,实现难度大;非扫描式没有运动部件,解调精度高,已成为光纤法-珀传感器解调系统研究的热点。国外非扫描式相关光纤法-珀传感器解调系统已经产品化^[9],但由于技术垄断,国内市场售价高。另外,这类仪器的时间一致

收稿日期:2012-12-07

基金项目:用于局域网和广域网互联的微纳光纤带通滤波器研究基金资助项目(60707010)

作者简介:龚天诚(1988-),男,四川成都人,博士生,主要从事光纤传感与通信的研究。朱永(1973-),男,重庆人,教授,博士生导师,主要研究方向为光纤传感、光谱技术及仪器等研究。

性和稳定性一直是一个难点。

为此,根据相关解调原理研制出了基于非扫描式的光纤法-珀解调仪,并提出了一种信号处理算法,提高了仪器的测量精度、一致性和稳定性。

1 非扫描式光纤法-珀解调仪原理及特性分析

1.1 系统原理

基于非扫描式光纤法-珀解调仪的原理如图1所示。考虑到仪器的实用性和廉价性,选用卤钨灯作为光源。光源发出的光入射到光纤法-珀传感器后,将在法-珀腔的2个端面发生多次反射和透射,从而形成多光束干涉^[10]。采用准直透镜加柱面会聚透射镜的光学结构将光纤出射的光能会聚于电荷耦合器件(CCD)的光敏面上,使之能探测到足够的光强。CCD将采集到的光信号转换成电信号后经信号采集和解调模块进行放大、滤波和模数转换,最后将数据在上位机(ARM)中实时地显示与存储。

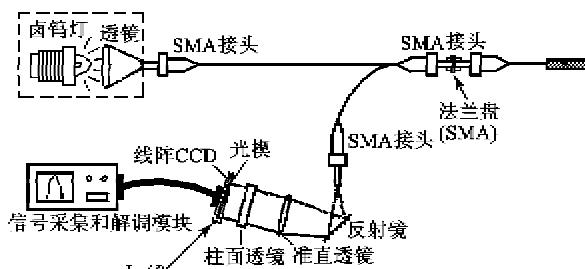


图1 非扫描式光纤法-珀解调仪原理图

根据相关解调原理,并考虑卤钨灯光源谱线在光谱和空间上都具有高斯分布,携带了光纤法-珀传感器腔长信息的反射信号^[11]透过光楔后到达线阵CCD上的强度为

$$I_{out}(x) = e^{-\frac{(x-x_p)^2}{B_x^2}} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2R_1 \left(1 + \cos \frac{4\pi L}{\lambda}\right)}{1 + R_1^2 + 2R_1 \cos \frac{4\pi L}{\lambda}} \cdot \frac{(1-R_2)^2}{1 + R_2^2 - 2R_2 \cos \frac{4\pi x \tan \theta}{\lambda}} \cdot e^{-\frac{(a-\lambda_p)^2}{B_\lambda^2}} I_0 d\lambda \quad (1)$$

式中: R_1 为法-珀腔两端面的反射率; R_2 为光楔内表面的反射率; L 为光纤法-珀传感器的腔长; x 为光楔长边上的任意位置; θ 为构成光楔两平面间的夹角; I_0 为光源光强随波长 λ 分布的常量; λ_p 为光源光谱的中心波长; B_λ 为光源光谱带宽所决定的高斯函数宽度; x_p 为光源的中心位置; B_x 为光源空间带宽所决定的高斯函数宽度。

1.2 光学特性分析

对式(1)作如下仿真:取 $R_1=0.04$, $L=20\mu\text{m}$,宽带光源的光谱范围为 $400\sim 1\,000\text{ nm}$, $\theta=0.03^\circ$, $I_0=1$, $\lambda_p=600\text{ nm}$, $B_\lambda=300\text{ nm}$, $x_p=80\text{ mm}$, $B_x=300\text{ mm}$ 。改变 R_2 的值,其结果如表1所示。

表1 光强和对比度随 R_2 的变化

组	R_1	R_2	I_{max}	I_{min}	相关条纹对比度
1	0.04	0.04	0.030 7	0.028 4	0.038 9
2	0.04	0.50	0.015 7	0.006 7	0.401 8
3	0.04	0.80	0.006 2	0.001 4	0.631 6

由表1可看出,随着 R_2 的增大,信号强度明显降低,但相关条纹的对比度却在增大。不同反射率 R_2 下的仿真结果如图2所示。

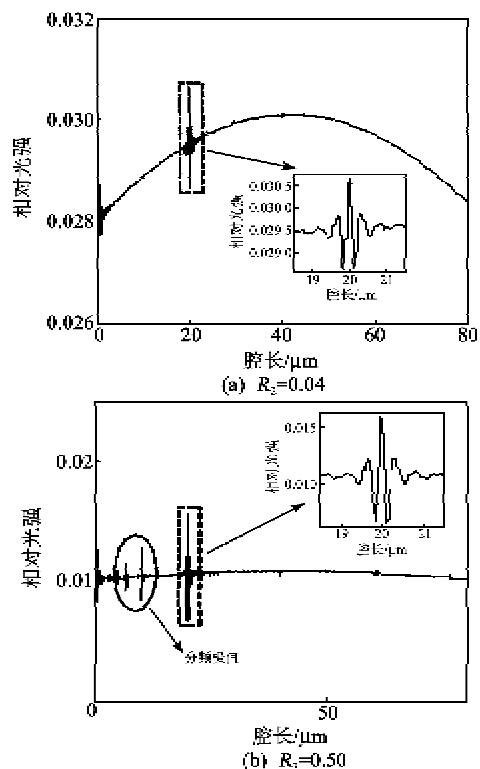


图2 不同反射率 R_2 下的相关信号

由图2可看出,在光楔所对应的两平板间距离恰好为 $20\mu\text{m}$ 处,光强的相关函数 $I_{out}(x)$ 取得极大值。当 R_2 增大时,在相关函数取得极大值的位置之前也出现了一些分频极值,且随着 R_2 的增大,出现分频极值的位置越来越多。这是由于 R_2 增大后,光在光楔内发生了多次反射和透射,在 $20\mu\text{m}$ 的 $1/n$ ($n=2,3,\dots$)处会出现相似的干涉信号,且强度逐渐减弱。

通过以上分析可知, R_2 过小,则相关条纹对比度小,不易检测到信号的极大值; R_2 过大,信号强度

减弱且会出现分频极值,干扰相关信号极大值的检测。在系统设计时,需避免相关条纹对比度过小和分频极值的出现,故 R_2 需折中考虑。

2 系统硬件设计及信号处理算法

2.1 系统硬件设计

非扫描式光纤法-珀解调仪的硬件部分主要由线阵 CCD、模拟信号处理电路、模数转换器、现场可编程门阵列器件(FPGA)和 ARM 组成,如图 3 所示。上位机发出指令,通过精简 ISA 总线^[2]发送到 FPGA,通知其执行相应的工作。此时 CCD 驱动时序控制模块开始驱动 CCD 正常工作,通过软件控制上位机发出不同的命令,可实现对 CCD 积分时间的调整。CCD 输出的信号经模拟信号处理电路,主要实现对信号的放大和滤波。处理后的模拟信号经模数转换器输出的数字信号到 FPGA 内部的 RAM 模块,再次通过精简 ISA 总线将数据传输到上位机,最终实现对信号的实时显示和存储。

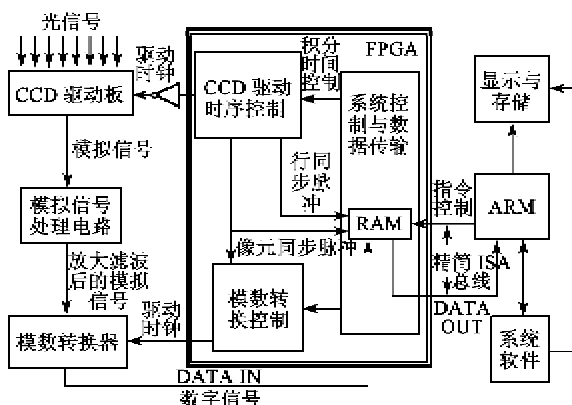


图 3 嵌入式系统硬件设计结构图

由于仪器内部的光学系统受光纤、光源耦合系统、光纤法-珀传感器和解调光楔通过系数等影响,使到达线阵 CCD 光敏面上的光强非常弱,故需选取灵敏度较高的线阵 CCD。本文中选用的线阵 CCD 为东芝公司的 TCD1304DG,其具有灵敏度高(典型值为 $160 \text{ V/lx} \cdot \text{s}$),暗电流低等特点,且具有 3 548 个有效像元,光谱响应范围为 $400 \sim 1\,000 \text{ nm}$ 。

2.2 信号处理算法

由光纤法-珀解调仪测量出来的原始信号如图 4 所示,通过模拟信号处理电路后输出信号的噪声已得到了有效抑制,且相关条纹的幅度得到了一定的增强。虚框中放大的信号为携带了传感器腔长信息的干涉信号,也正是我们所需从中解调出腔长的信号。但由于在信号上叠加了白光的空间光强分

布和随机白噪声等背景噪声^[13],且仪器内部各种杂散光入射到光楔中发生干涉,在 CCD 输出信号中出现了一些较尖锐的毛刺信号,使信号出现极大值的位置不是在虚框所包含的区域内。

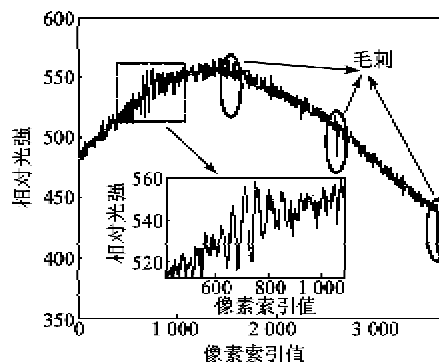


图 4 光纤法-珀光楔解调仪原始测量信号

通过对图 4 中的实验结果及分析可看出,由于光纤经柱面镜聚焦到 CCD 上的线光斑强度呈近似的空间高斯分布,相关条纹叠加在背景噪声上,故输出信号的最大值并不一定就是相关条纹的极大值。为准确检测出相关条纹的极大值,需滤除低频成分和高频噪声对相关信号的影响。为此,本文在硬件的基础上采用了一种信号处理算法,可有效滤除噪声和毛刺,提高了信号的对比如,实现了对光纤法-珀传感器腔长的精确测量。算法的具体实现流程如图 5 所示。

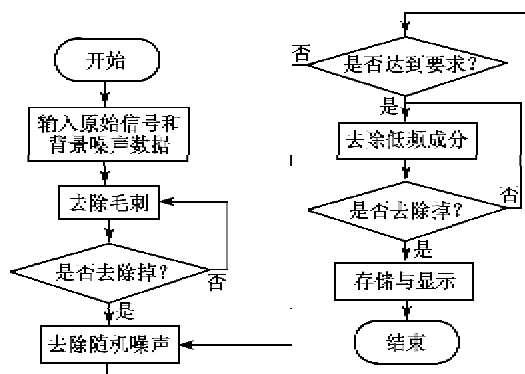


图 5 信号处理算法流程图

2.2.1 毛刺的处理

在光强不变的情况下毛刺的位置和强度不随时间而变化,且在不接入法-珀传感器的情况下毛刺仍存在。所以在进行信号测量前可先对包含毛刺的背景噪声进行多次测量,并作平均后得到一组数据,再接上法-珀传感器测量出信号,最后减掉背景噪声和进行归一化处理。

2.2.2 随机噪声的处理

通过累加平均法和移动窗口平滑算法,适当选取平均次数和窗口宽度,可在较大程度上去除随机白噪声,且能使曲线变得更平滑。

2.2.3 低频成分的处理

对当前信号的相关条纹进行频谱分析,其结果如图6所示。相关信号的频率集中在15~25 Hz,而线性光不均匀所带来的低频信号集中在10 Hz以下。采用二阶巴特沃斯(Butterworth)带通滤波器滤除该低频信号和部分高频噪声。

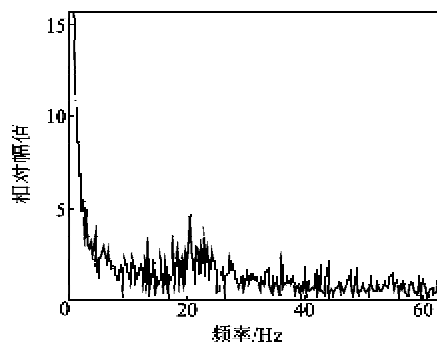


图6 相关信号的幅频特性曲线

通过以上的信号处理算法,有效滤除了信号中的低频和高频噪声,提高了相关信号条纹的对比度,可准确检测出相关条纹的极大值,其滤波结果如图7所示。

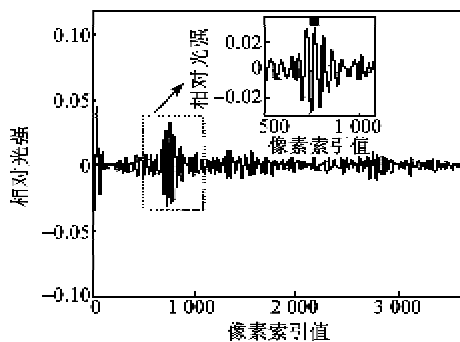


图7 信号处理结果

3 腔长标定及稳定性测试实验

3.1 腔长标定

使用本系统对光纤法-珀传感器腔长进行实际测量前须采用至少3个标准法-珀腔对系统进行标定,然后将实时测量所得到的CCD像素索引值转换成相应的腔长值。传感器腔长 L 与CCD像素索引值 X 的关系为

$$L = L_0 + \Delta d \cdot X \quad (2)$$

式中: Δd 为CCD上一个像敏元所对应的腔长变化;

L_0 为偏置值。通过对不同腔长标准法-珀腔索引值的测量可拟合出一个线性关系,进而求得 Δd 和 L_0 的值。

标定采用4个标准法-珀腔,腔长分别为14.732 μm , 15.047 μm , 16.236 μm , 16.898 μm 。标定结果如图8所示。由图可见,腔长标定结果基本一致且呈线性变化。采用最小二乘法对数据进行回归分析,计算出相关系数 r 为0.999 9,残差 σ 约为2.8 nm。

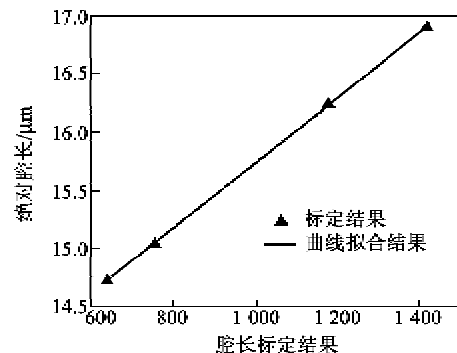


图8 腔长标定结果

3.2 稳定性测试实验

最后对系统进行了稳定性测试。在4个标准法-珀腔处于同一恒定状态下分别连续测试了1000次,结果如图9所示。由图可看出,每个标准法-珀腔的测试结果都很稳定,相关函数的极大值只向左/右偏离了一个像敏元,即本系统测量腔长的波动仅为7 nm。各组数据的均值和均方根误差如表2所示。由表2可看出,系统的测量精度和稳定性都很高。

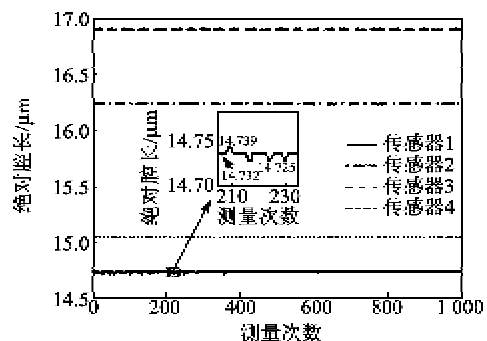


图9 稳定性测试曲线

表2 各组数据的均值和均方根误差

传感器编号	实际腔长/ μm	平均腔长/ μm	均方根误差
1	14.732 0	14.732 1	0.002 5
2	15.047 0	15.047 2	0.001 4
3	16.236 0	16.237 3	0.003 1
4	16.898 0	16.892 4	0.002 8

4 结束语

本文从非扫描式光纤法-珀传感器相关解调原理出发,设计了基于非扫描式相关解调的光纤法-珀解调仪,并建立了相关解调的模型,分析了光楔内表面反射率 R_2 和相关条纹对比度的关系。基于系统硬件实现和对解调信号的实际测量,提出了一种信号处理算法,能有效滤除背景噪声对相关信号的影响,实现了对光纤法-珀传感器腔长的准确测量,并对系统进行了腔长标定和稳定性测试。结果显示,通过算法对信号的优化处理提高了系统的测量精度和稳定性,对不同腔长传感器测量的相关系数为 0.999 9,且系统测量腔长的波动仅为 7 nm。为验证系统的稳定性,用不同腔长的传感器对仪器分别进行了 1 000 次稳定性测试实验。测试结果表明,系统稳定性好,测量精度高,且仪器集成度高,满足了实际应用需求。

参考文献:

- [1] WEI Yajun, ZHAI Zhaohui. Error analysis of dual wavelength quadrature phase demodulation for low-finesse Fabry-Pérot cavity based fibre optic sensor[J]. Optik, 2011, 122(14): 1309-1311.
- [2] ÉRIC P. Fabry-Pérot fiber-optic sensors for physical parameters measurement in challenging conditions [EB/OL]. <http://www.hindawi.com/journals/js/2009/720980/abs/>
- [3] 黄政, 白忠臣. 对 F-P 腔式气体光纤传感器信号解调方法的研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(4): 529-532. HUANG Zheng, BAI Zhongchen. Study on signal demodulation methods for Fabry-Perot cavity optic gas sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4): 529-532.
- [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. ZHANG Peng, ZHU Yong, TANG Xiaochu, et al. Demodulation of the optical fiber Fabry-Perot sensor based on fourier transform[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 186-189.
- [5] LIU En, RAN Zengling, PENG Fei, et al. Demodulation of micro fiber-optic Fabry-Perot interferometer using subcarrier and dual-wavelength method[J]. Optics Communications, 2012, 285: 1087-1090.
- [6] ZHU Yong, CHEN Weimin, FU Yumei, et al. A review of harsh environment fiber optic sensing networks for bridge structural health monitoring[C]//S. I.: Optics & Photonics, 2006.
- [7] BERTHOLD J W, JEFFERS L A, LOPUSHANSKY R L. Fiber optic sensors for the refinery of the future [C]//S. I.: Sensors for Industry Conference, 2002.
- [8] SOFYAN A. TAYA, TAHER M, et al. Optical sensors based on Fabry-Perot resonator and fringes of equal thickness structure [J]. Optik, 2012, 123(5): 417-421.
- [9] BERTHOLD J W, NEEDHAM D B. Practical application of industrial fiber optic sensing systems[C]//USA: Annual Symposium on Instrumentation for The Process Industries, 2006.
- [10] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 234-239.
- [11] 赵洪, 李敏, 张影, 等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1018-1024. ZHAO Hong, LI Min, ZHANG Ying, et al. Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1018-1024.
- [12] 成都英创信息技术有限公司. 精简 ISA 总线扩展应用实例[EB/OL]. (2008-08-01) [2012-10-30] <http://www.emtronix.com/case/case2008188.html>
- [13] 朱永, 梅浩, 甘雄, 等. 光谱背景噪声对光纤法-珀应变传感系统测量精度影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 465-470. ZHU Yong, MEI Hao, GAN Xiong, et al. Study on the influence of background spectrum noise on the accuracy of optical fiber F-P strain sensing system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 465-470.