

doi: 10.3788/gzxb20134209.1039

多通道光纤法-珀解调系统分析与实验

李丽慧, 朱永, 王宁, 龚天诚, 李阳

(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

摘 要:利用白光干涉型光纤法-珀传感器和非扫描式相关解调原理,设计了一种基于非扫描式相关解调的多通道光纤法珀解调系统并进行了实验研究.利用柱面镜成线性光斑的特性以及 2 倍焦距成等大倒立像的原理,建立光纤法-珀非扫描式相关解调的光学模型,进行了光学特性分析和参量优化;设计了光学系统和硬件解调系统,制作了基于非扫描式相关解调的多通道光纤-法珀解调仪样机.同时采用巴特沃斯滤波器有效滤除了噪音,提高了仪器的解调准确度.测试实验表明:当测量范围为 10~40 μm ,分辨率为 8 nm 时,稳定性可达到 7 nm,能实现对传感器腔长的实时测量,且测量准确度高、稳定性和一致性好,能够进行多点探测,提高了复用能力.

关键词:光纤法珀传感;非扫描式;相关解调;多通道

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1039-7

Analysis and Experimental Study on Multi-channel Optical Fiber Fabry-Perot Demodulation System

LI Li-hui, ZHU Yong, WANG Ning, GONG Tian-cheng, LI Yang

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A multi-channel optical fiber Fabry-Perot demodulation system based on non-scanning correlation demodulation combining with white light interfered Fabry-Perot sensor is designed. Utilizing cylindrical lens collecting and focusing light as linear light spot and get equivalent inverted image at 2 times focal length plane, the corresponding optical model is set up; the optical characteristic analysis and parameter optimization is carried on; and the optical system and embedded demodulation system is designed. A Butterworth filter is used to filter out the background noise on the correlation signal effectively. Experiments based on the prototype demodulator show that the stability is up to 7 nm, at the measuring range of 10~40 μm , with the resolution of 8nm. The experimental results indicate that the system can achieve real-time measurement, high measurement accuracy, stability and consistency, and can realize multi-point detection and improve the multiplexing capacity.

Key words: Optic fiber Fabry-Perot sensor; Non-scanning; Correlation demodulation; Multi-channel

0 引言

光纤法珀(Fabry-Perot, F-P)传感器主要由两个高反射膜层相对平行放置构成的具有一定腔长的

F-P 腔组成,它将待测信息转化为腔长的变化,可实现绝对测量^[1].同时光纤 F-P 传感器具有体积小、重量轻、耗电少、灵敏度高、性能稳定、抗电磁干扰能力强等优点,在大型民用建筑安全监测等领域具有广

基金项目:国家自然科学基金(No. 60707010)资助

第一作者:李丽慧(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感和光电仪器. Email: lilihui0001@sina.com

导师(通讯作者):朱永(1973-),男,博士,教授,主要研究方向为光纤传感、光纤通信器件、激光吸收光谱学、微型红外光谱仪器. Email: yongzhu@cqu.edu.cn

收稿日期:2013-01-23;录用日期:2013-03-27

泛的应用^[2-4]. 根据信号解调时采用光学参量的不同,解调方法分为强度解调和相位解调. 其中强度解调利用单色光源直接求解,方法简单,但加工困难、误差大、测量准确度有限、成本高;而相位解调则是采用宽带光源,利用输出信号(强度、相位等)与波长的变化关系,从而得到腔长变化,实现解调. 相位解调测量准确度较高,目前可以分为条纹计数法、傅里叶变化法和相关解调法^[5-6]. 基于相关解调原理的光纤 F-P 解调仪,因其没有运动部件、成本低、解调准确度高(在几个纳米数量级)、不需要昂贵的激光光源和光谱仪,近年来得到广泛应用^[7-8].

国外对相关光纤 F-P 传感器解调系统的研究很早就开始并已经产品化. 其中,做得最好的是加拿大的飞索公司和美国的戴维森公司^[9]. 国内重庆大学于 2000 年研制出便携式光纤应变仪,随后开发了不同型号的光纤应变传感器,目前已经应用在重庆大佛寺长江大桥、嘉陵江大桥等十余座桥梁结构健康监测中^[10]; Lu T 等将光纤 F-P 传感器用于液面测量^[11]. 经过十多年工程实践,光纤 F-P 传感器被证明其稳定性和可靠性远远高于光纤光栅传感器,近年来越来越受工程界重视.

光纤 F-P 传感器复用技术和系统成本是影响其应用的关键问题. 并联复用在结构上相互独立,传感器之间相互影响较小,稳定性好,但是需要为每个传感器提供一个解调仪,系统成本高^[12];串联复用在结构上只需要一根光纤就可以实现分布测量,接出线少、布线简单、成本低,但是解调算法相对复杂,可靠性低.

采用傅里叶变换解调方法的光纤 F-P 解调系统由光源、传感器和光谱仪构成. 它的解调分辨率为几十纳米^[13],通常一台仪器只有一个传感器通道,如果要实现多点测量,需要在仪器和传感器之间外接光纤开关,光纤开关加入到系统中,影响了信号质量,降低了系统可靠性. 陈伟民等开展了光纤 F-P 传感器的复用研究,采用并/串联混合复用的方法,通过一个解调通道实现了 4 只传感器的复用,但是传感器之间的串扰降低了系统的测量准确度^[14]. 基于相关解调原理的光纤 F-P 解调仪采用了价格低廉的宽带白光光源(波长范围为 400 ~ 1100nm),在对应的波长范围内没有光纤开关可以选用,因而其复用更加困难.

为此本文提出了基于非扫描式相关解调的多通道 F-P 解调仪,1) 该系统建立了白光干涉型光纤法珀非扫描式相关解调的光学模型,并优化了光纤法珀传感器和斐索解调仪的膜系,同时基于柱面镜

成线性光斑的特性以及 2 倍焦距成等大倒立像的原理设计了解调仪的光学结构,使 CCD 光敏面上的光斑汇聚效果达到最好;2) 根据设计的光学结构,本系统制作了基于非扫描式相关解调的多通道光纤法-珀应变解调仪样机,实现了多通道应变解调.

1 白光干涉型光纤法珀传感器原理及优化

光纤法珀传感器实际上就是在光纤内部的一个低精细度法珀干涉仪,采用低相干光源时,一般称为“白光干涉型光纤法珀传感器”,其结构如图 1^[15].

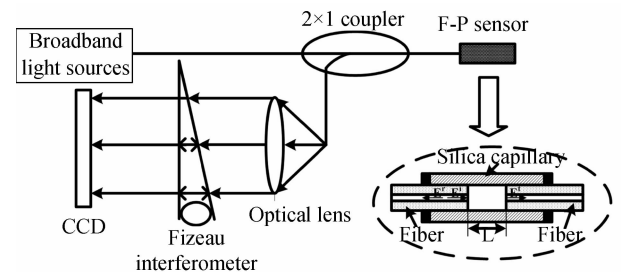


图 1 白光干涉型 F-P 传感器原理
Fig. 1 The principle of white light interference F-P sensor

宽带光源发出的复色光被耦合进光纤,之后经 2×1 耦合器进入 F-P 传感器,发生白光干涉,一部分携带腔长 L 信息的光信号被反射回去,经耦合器被解调装置接收,干涉光经透镜变为平行光,再通过斐索干涉仪进行解调,之后被电荷耦合元件 (Charge-Coupled Device, CCD) 探测接收^[16],把光信号转为电信号,最后通过 PC 机采集电信号,对其进行处理从而实现解调,得到应变大小. 该解调方法采用了腔长匹配原理,在斐索干涉仪(光楔)的不同位置具有不同的光程差,解调过程实际上是一个光学的相关运算^[17-18],其结果导致在光纤 F-P 传感器腔长与光楔高度相等(光程匹配)的位置出现光强最大值,即可解调出 F-P 腔长.

由于构成斐索干涉仪的玻璃板周围介质折射率一致,所以两个表面的反射中有一支光发生“半波损失”,应当再考虑由反射引起的附加光程差 $\lambda/2$,同时系统中所使用的光源为宽带光源,在光谱和空间上都具有高斯分布,其数学模型为

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

对式(1)进行理论计算,其中 λ_p 是光源光谱的

中心波长, B_λ 是光源光谱带宽所决定的高斯函数的半宽度, x_p 是光源的中心位置, B_x 是光源空间带宽所决定的高斯函数的半宽度; R_1 为光纤法珀端面的反射率, R_2 为光楔端面的反射率; L 为法珀腔腔长; x 为光楔长度, 与 CCD 的感光长度相同; θ 为光楔夹角; I_0 为输入光强. 计算时, 设置: 光源光谱范围 400 nm~1 100 nm, 光楔长度 x 范围为 0~35 mm, $\lambda_p = 600$ nm, $B_\lambda = 300$ nm, $x_p = 80$ mm, $B_x = 300$ mm, 结果如图 2.

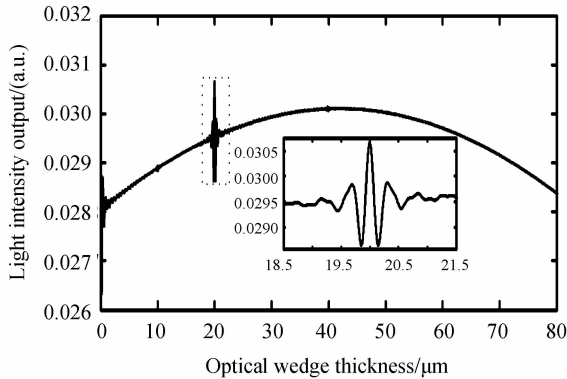


图 2 光楔厚度和输出光强的关系

Fig. 2 The relationship between optical wedge thickness and light intensity output

由图 2 可知, 光纤法珀信号经光楔解调后输出信号会在光楔厚度和传感器腔长 L 相等的时候出现最大值, 通过分析 CCD 线阵像敏元最大光强时所对应的光楔厚度, 即可解调出光纤法珀传感器的腔长信息.

式(1)可表示为

$$I_{\text{out}}(x) = e^{-\frac{(x-x_p)^2}{B_x^2}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\mathbf{A}_{\text{F-P}}^{(r)} \mathbf{A}_{\text{F-P}}^{(r)*}] \cdot [\mathbf{A}_{\text{F}}^{(t)} \mathbf{A}_{\text{F}}^{(t)*}] e^{-\frac{(\lambda-\lambda_p)^2}{B_\lambda^2}} I_0 d\lambda \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A}_{\text{F-P}}^{(r)}$ 为光纤法珀传感器的反射合成波复振幅, $\mathbf{A}_{\text{F}}^{(t)}$ 为斐索干涉仪透射合成波复振幅, 分别表示为式(3)和(4)

$$\mathbf{A}_{\text{F-P}}^{(r)} = r\mathbf{A}^{(i)} + t^2 (r e^{i\delta_{\text{F-P}}} \mathbf{A}^{(i)} + r^3 e^{i2\delta_{\text{F-P}}} \mathbf{A}^{(i)} + r^5 e^{i3\delta_{\text{F-P}}} \mathbf{A}^{(i)} + \dots + r^{2p-1} e^{i(p-1)\delta_{\text{F-P}}} \mathbf{A}^{(i)}) \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_{\text{F}}^{(t)} = t^2 (\mathbf{A}^{(i)} + r^2 e^{i\delta_{\text{F}}} \mathbf{A}^{(i)} + r^4 e^{i2\delta_{\text{F}}} \mathbf{A}^{(i)} + r^6 e^{i3\delta_{\text{F}}} \mathbf{A}^{(i)} + \dots + r^{2(p-1)} e^{i(p-1)\delta_{\text{F}}} \mathbf{A}^{(i)}) \quad (4)$$

式中 $\delta_{\text{F-P}} = 4\pi L/\lambda$, $\delta_{\text{F}} = 4\pi x \tan \theta/\lambda$, R_1 为光纤法珀传感器的端面反射率 ($R_1 = r^2$, $R_1 \leq 1$), t 为端面透射系数, $\mathbf{A}^{(i)}$ 为入射光复振幅. 由式(3)和(4)可知, 当 R_2 保持不变且小于 0.04, R_1 小于等于 0.04 时, 传感器输出复振幅中的高次项可忽略不计, 只保留式(3)中的前两项即可, 反射光中只包含一倍腔长信息则干涉信号会在腔长处出现极大值, 随着 R_1 的增大, 高次项不能忽略, 反射光中不仅包含一倍腔长信息还包含了倍数腔长信息则干涉信号在倍数腔长也出现极大值, 且随着倍数增加, 其幅度逐渐减小. 同理, R_1 保持不变且小于 0.04 时, 当 R_2 增大时, 干涉信号会在腔长分频处出现极大值. 因此需要对光纤法珀和光楔进行膜系优化, 达到最优的解调效果^[19], 通过对公式(1)进行计算可得不同 R_1 、 R_2 以及 R_3 对应的解调性能, 如表 1.

表 1 膜系优化数据对比

Table 1 Data contrast of membrane system optimization

R_1	R_2	R_3	$L/\mu\text{m}$	$\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}/\mu\text{m}$	θ	I_0	I_{\max}	I_{\min}	DC	K
0.04	0.04	0.04	20	0.4~1.1	0.065°	1	0.030 8	0.028 7	0.029 8	0.069 3
0.04	0.04	0.5	20	0.4~1.1	0.065°	1	0.015 7	0.006 8	0.010 8	0.826 7
0.04	0.1	0.5	20	0.4~1.1	0.065°	1	0.025 8	0.012 6	0.018 6	0.709 4

相对于 F-P 腔两端都镀 0.04 反射膜的膜系, 远端镀 0.1, 近端镀 0.04 的膜系, 对比度下降, 光强和直流分量均增加; 相对于光楔镀 0.04 反射膜的膜系, 镀 0.5 的膜系, 对比度增加, 光强和直流分量均下降. 通过综合分析, 最后采用 F-P 腔远端 $R_1 = 0.04$ 、近端 $R_2 = 0.04$ 、光楔 $R_3 = 0.5$ 的膜系.

2 多通道解调系统设计

多通道光纤法珀解调仪原理如图 3.

宽带光源发出光, 通过耦合透镜耦合进八根耦合光纤中, 耦合光纤和接收光纤通过耦合透镜进行耦合(见多通道设计), 同时利用带有一个通光孔的转盘依次选通 8 个通道, 使同一时间只有一个通道的光路导通. 在导通状态下, 光先通过凸透镜汇聚到 Y 型耦合器中, 到达光纤 F-P 传感器的携带一定腔长信息的干涉光再经耦合器到达解调模块, 从而解调得到该传感器的腔长信息.

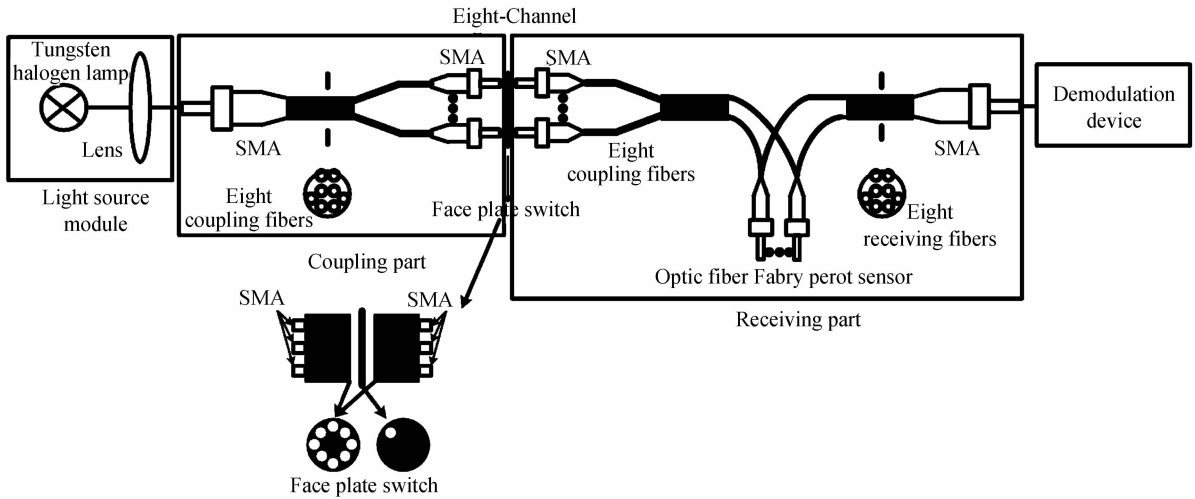


图3 多通道光纤法珀解调仪原理

Fig. 3 The principle of multi-channel optical fiber Fabry-Perot demodulation device

2.1 解调仪光学设计

在光楔解调模块中,利用2倍焦距成等大倒立像的原理对系统的光学结构进行设计,如图4.

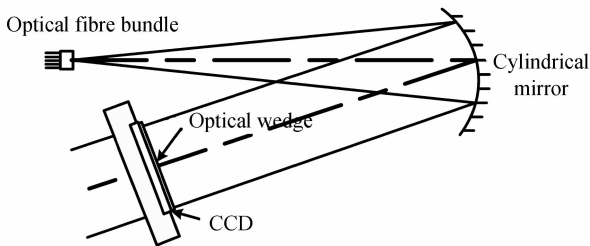


图4 系统光学结构

Fig. 4 The optical structure of system

该系统中利用柱面镜成线性光斑的特性以及2倍焦距成等大倒立像的原理,从光纤束中发出的干涉光先到达平凹柱面镜,利用柱面镜成线性光斑的特性,把点光斑转换成线光斑,之后利用2倍焦距成等大倒立像的原理,把线性光传递到光楔上,进行相关解调,最后相关光均匀的打在 CCD 有效光敏面上,实现探测接收.

根据实际情况,利用 ZEMAX 软件对柱面反射成像系统进行了计算与仿真,系统结构如图5.

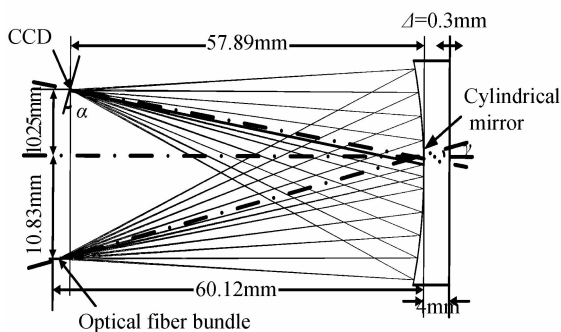


图5 实际光学结构

Fig. 5 The actual optical structure

在实际光学结构中,平凹柱面反射镜可移动的位置范围 $\Delta \leq 0.3 \text{ mm}$,可确保 CCD 上接收的光能量与之前保持一致;将入射光纤发出的光以 $\gamma = 12^\circ$ 倾斜入射,则 $\alpha = \gamma = 12^\circ$,这样可以充分利用柱面镜的反光面,增加反射的光能量,提高利用率.

不同光场的成像光斑如图6.

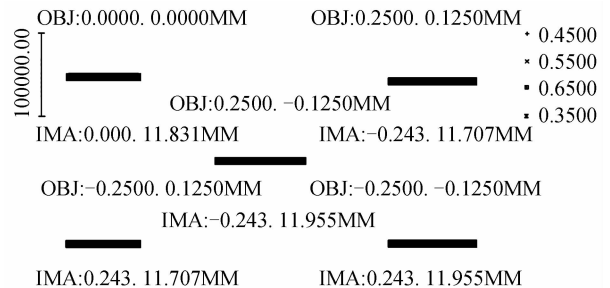


图6 光斑图

Fig. 6 Spot diagram

从图6可知,光斑重合在 CCD 有效光敏面上,其中光斑距离中心光斑的最大偏差为(0.187, 0.097)mm,远小于光斑的尺寸和 CCD 的有效感光面积,因此不同光场的重合部分能够完全照射在感光面上.其中线阵 CCD 选用东芝公司的 TCD1304DG,具有灵敏度高、暗电流低等优点.该 CCD 具有 3648 个有效像元,像元尺寸为 $8 \times 200 \mu\text{m}^2$.

2.2 多通道设计

本设计为多通道光纤法珀应变解调系统,8个通道配备一个光源进行耦合.在多通道切换模块中,每个通道的结构如图7所示:光通过耦合跳线到达每个单通道的准直透镜处,经准直透镜作用,光变为平行光,转盘转动挡住其他光路,留出一个通道,使光路导通或关闭.

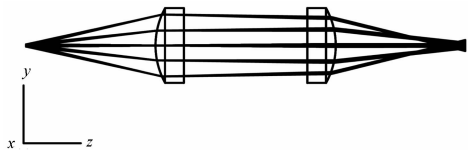


图 7 单通道光学设计

Fig. 7 The optical design of unipath

采用双透镜耦合时,两片透镜的参量一致,物和像均位于透镜的焦点处,其中准直透镜采用 H-K9L 平凸球面镜,表面镀 350~650 nm 的增透膜,先把光转为平行光,之后再汇聚于光纤中,提高耦合效率和光能利用率.在考虑光纤端面反射损耗(4%)和透镜表面的反射损耗(两片透镜的透过率为98.41%),其耦合效率为 5.9%.

3 实验与结论

根据图 3 中的系统原理,设计了基于 ARM 和 FPGA 的解调仪硬件系统,CCD 将采集到的光信号转换成电信号,经过信号处理模块,将信号进行放大、滤波和模数转换,之后通过数据传输与控制模块,将数据在上位机中实时显示与存储.上位机通过 RS232 总线向下位机发出命令以执行相应工作,具体为控制 CCD 的工作状态和通道切换装置的执行顺序,上位机通过 ISA 总线来接收下位机传输的数据.制作得到的仪器如图 8.

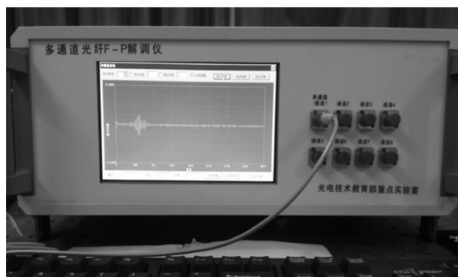
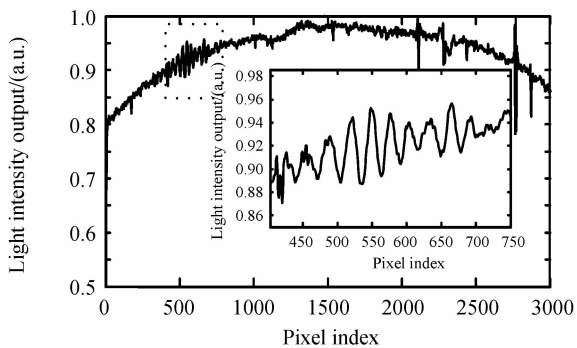


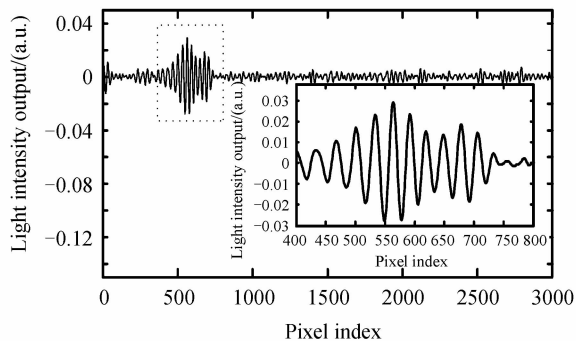
图 8 样机实物图

Fig. 8 Photograph of the experiment device

该仪器可以测量光纤法珀传感器腔长所对应的光敏元索引值,利用标定公式得到光纤法珀传感器的腔长,使用该仪器通道 1 测试标准腔长值为 15.383 μm的结果如图 9.



(a) The original waveform with bottom



(b) The waveform with butterworth filters

图 9 未去底噪的原始波形和加入巴特沃斯滤波器后的波形
Fig. 9 The original waveform with bottom noise and the waveform with butterworth filters

由于白光的空间光强分布和随机白噪音的影响,经平凹柱面镜反射到 CCD 上的光强分布不均匀,图 9(a)所测得的波形中含有噪音,严重影响信号的对比值.为了准确地找出相关条纹的最大值,有效滤除低频信号和高频噪音对相关信号的影响,采用了巴特沃斯滤波器,如图 9(b)所示,可以看出信号经过归一化处理,噪音得到明显的抑制.同时对每个通道都进行了测试,结果表明,该系统可实现多通道光纤法珀解调.

由于该系统各通道加工工艺和光纤端面都很难保证完全一致,因此,即使用同一个标准法珀腔对各个通道进行测量,结果都会略有差别.若要保证每个单通道测量结果的一致性,需要对各个通道进行腔长标定.各通道的标定结果如图 10 所示,从图中可看出各通道腔长标定结果基本一致且呈线性变化^[20].

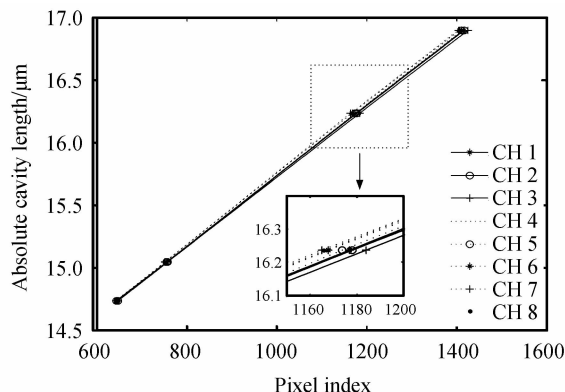


图 10 各通道腔长标定结果

Fig. 10 The calibration results of each channel's cavity length

在此基础上又进行了验证性实验,对各个通道进行稳定性测试,从而评价整个系统的稳定性.以通道 1 为例,其腔长稳定性如图 11 所示,可以看出在连续采集的情况下,光纤法珀传感器的腔长并没有随着采集次数的增加而发生太大的变化,敏感长度为 10 mm,由此可知,本系统有较好的稳定性.

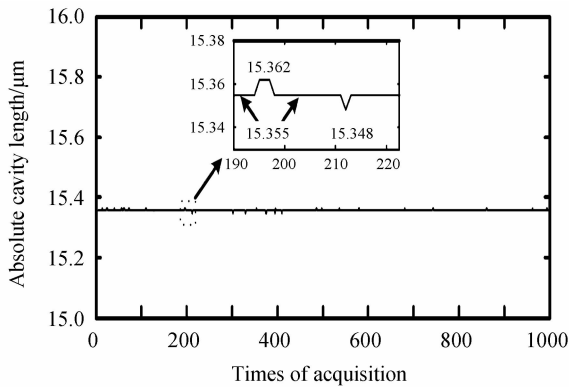


图 11 通道 1 腔长稳定性测试

Fig. 11 The testing curves of cavity length's stability in channel 1

通过对该样机进行测试,腔长范围可达 $10 \sim 40 \mu\text{m}$,在传感器敏感长度为 10 mm 时候,稳定性为 7 nm ,分辨率为 8 nm .

4 结论

低成本的光纤法珀并联复用技术能够有效地提高光纤法珀的应用,在光纤法珀传感器和相关解调原理的基础上,设计了基于非扫描式的多通道光纤法珀解调仪,通过非扫描式相关解调法实现对腔长信息的解调.建立了光纤法珀传感器解调系统的光学模型,优化了光学参量,并利用 ZEMAX 软件对光学结构进行了合理的设计与优化,同时基于该设计制作了多通道解调系统的样机,通过对该样机进行测试,腔长范围可达 $10 \sim 40 \mu\text{m}$,同时系统的稳定性和分辨率也较好,分别为 7 nm 和 8 nm .该系统具有体积小、成本低、准确度高等优点.不过仍需对该系统进行更深入的研究,可以通过改变法珀腔的腔长,解调应变大小,来验证本系统的可靠性和稳定性,同时还可以通过改善硬件电路的性能,来提高整个系统的解调准确度,这些都将是下一步研究的重点.

参考文献

- [1] LIU Dun, JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen, *et al.* Research on data acquisition of optical fiber F-P interferometer sensing signal with wavelet transform[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(1): 79-82.
刘盾, 江俊峰, 刘铁根, 等. 光纤 F-P 传感低相干信号的小波提取研究[J]. *光电子激光*, 2012, **23**(1): 79-82.
- [2] HERSEY A, DAVISM A, PATRLK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1463.
- [3] LEUNG A, SHANKAR M, MUTHARASAN R. A review of fiber-optic biosensors[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **125**(2): 688-703.
- [4] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57-79.
- [5] LI Lei, LIU Tie-gen, JIANG Jun-feng, *et al.* Birefringent wedges effects on cross-correlation polarization demodulation in optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(1): 67-73.
李磊, 刘铁根, 江俊峰, 等. 光纤 F-P 传感器偏振互相关解调中光楔参量的影响研究[J]. *光电子激光*, 2012, **23**(1): 67-73.
- [6] ZHAO Yan, WANG Dai-hua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106007.1-0106007.7.
赵艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. *光学学报*. 2011, **31**(1): 0106007.1-0106007.7.
- [7] JING Zheng-guo, YU Qing-xu, ZHANG Gui-ju, *et al.* A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347-1351.
荆振国, 于清旭, 张桂菊, 等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1347-1351.
- [8] WANG Yong, LIAO Yan-biao, TIAN Qian. Signal analysis of wavelength scanning interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 544-551.
王勇, 廖延彪, 田芊. 用于绝对距离测量的波长扫描干涉仪信号分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4): 544-551.
- [9] BERTHOLD J W, NEEDHAM D B. Practical application of industrial fiber optic sensing systems [J]. *Texas A&M Instrumentation Symposium*, Texas A&M University, January, 2006.
- [10] ZHU Yong, CHEN Wei-min, FU Yu-mei, *et al.* A review of harsh environment fiber optic sensing networks for bridge structural health monitoring [C]. SPIE, 2006, **6314** (63140Y): 1-12.
- [11] LU Tao, LI Zheng-jia, XIA Dan-qing, *et al.* Asymmetric Fabry-Perot fiber-optic pressure sensor for liquid-level measurement [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, **80**(033104): 1-4.
- [12] TONG Yan-qun, FU Yu-mei, CHEN Wei-min, *et al.* Experiment research of the parallel multiplexing of Fabry-Perot strain sensor in the fourier demodulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1506-1509.
佟艳群, 符欲梅, 陈伟民, 等. 光纤法珀应变传感器并联复用实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1506-1509.
- [13] ZHANG Peng, ZHU Yong, TANG Xiao-chu, *et al.* Demodulation of the optical fiber Fabry-Perot sensor based on fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186-189.
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.
- [14] LU Hai-song, ZHANG Peng, CHEN Wen-min, *et al.* Study on Fabry-Pert strain sensor series and paralld mixed multiplexing with discrete gap transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 842-846.
陆海松, 章鹏, 陈伟民, 等. 光纤法珀应变传感器串并联混合复用的离散腔长变换解调研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 842-846.
- [15] BHATIA V, MURPHY K A, RICHARD O C, *et al.* Multiple strain state measurements using conventional and absolute optical fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensors [J]. *Smart Material and Structures*, 1995, **4**(4): 240-245.
- [16] MENG Xiang-e, JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen, *et al.* Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1128006.1-

- 1128006.7.
- 孟祥娥,江俊峰,刘铁根,等.空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究[J].光学学报,2012,32(11):1128006.1-1128006.7.
- [17] HUANG Zhao, ZHAO Jian-lin, JIANG Bi-qiang, *et al.* Strain demodulation method based on matched fiber bragg grating Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7): 845-849.
- 黄钊,赵建林,姜碧强,等.基于匹配光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变解调方法[J].光子学报,2012,41(7):845-849.
- [18] LI Yong-qian, YAO Guo-zhen, YANG Zhi. A high precision fiber bragg grating wavelength demodulation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1405-1411.
- 李永倩,姚国珍,杨志.一种高准确度光纤光栅波长解调系统[J].光子学报,2012,41(12):1405-1411.
- [19] WANG Yong, LIAO Yan-biao, TIAN Qian. Optimization of the wavelength scanning F-P interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(10): 1361-1367.
- 王勇,廖延彪,田芊.波长扫描法布里-珀罗干涉仪的优化设计[J].光学学报,1999,19(10):1361-1367.
- [20] MA Ji-chi, LI Yan, SUN Wen-ke, *et al.* Fabry-Perot interferometer using tunable diode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1296-1300.
- 马骥驰,李岩,孙文科,等.可调波长半导体激光法布里-珀罗干涉仪[J].光学学报,2008,28(7):1296-1300.