

doi:10.3788/gzxb20154401.0106005

# 一种提高快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统 信号稳定性的算法

李钧寿, 朱永, 王宁, 李健宁

(重庆大学 光电工程学院 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆, 400044)

**摘 要:** 光纤法-珀非扫描式相关解调系统的解调速度是限制其应用的一个关键问题. 本文提出了基于超辐射发光二极管的快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统, 分析了该系统的光学模型和信号特性, 设计了基于小波包络提取的信号稳定性算法. 理论计算表明: 噪声使系统采用最大值解调时有 4.33% 的误差, 而采用小波提取包络最大值解调算法能使解调误差仅为 0.33%. 研制了快速光纤法-珀非扫描式相关解调仪, 并验证了该算法的可行性. 当实验系统解调频率为 1.5 kHz 时, 采用该算法解调, 解调的腔长误差仅为 5 nm. 实验结果表明: 该方法有效地提高了系统的稳定性和解调准确度, 为快速光纤法-珀非扫描式相关解调法的稳定解调提供了一种有效的算法.

**关键词:** 光纤传感; 光纤法-珀; 相关解调; 算法; 稳定性

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0106005-7

## An Algorithm for Improving the Signal Stability of the Fast Fiber Optic Fabry-Perot Nonscanning Correlation Demodulation System

LI Jun-shou, ZHU Yong, WANG Ning, LI Jian-ning

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The demodulation speed has become the key issue limiting the application of fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulator. A fast fiber-optic Fabry-Perot (F-P) nonscanning correlation demodulator based on Super Luminescent Diode (SLD) was proposed, its principle and signal characteristics were analyzed. To improve the signal stability, envelope detection based on wavelet was presented. Theoretical calculations show that the error of the result is only 0.33% with this algorithm, while the error is 4.33% without it. A experimental prototype was made and tested, when the demodulation speed is 1.5 KHz, the demodulation error is only 5 nm with this algorithm. The experimental results indicate that envelope detection based on wavelet can improve the demodulation stability and accuracy of the fast fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulation system, providing a stable and efficient algorithm for the fast fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulation system.

**Key words:** Fiber optics sensors; Fabry-Perot sensor; Correlation Demodulation; Algorithm; Stability

**OCIS Codes:** 060.2370; 120.2230; 060.2300

## 0 引言

光纤法-珀传感器具有体积小、灵敏度高、性能稳

定、不受电磁场的干扰、便于成网等优点, 已成为应用最为普遍的光纤传感器<sup>[1-2]</sup>, 被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、大型结构

基金项目: 中央高校基本科研业务项目 (No. 106112013CDJZR120008) 资助

第一作者: 李钧寿 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电仪器等. Email: 2012080200t@cqu.edu.cn

导师 (通讯作者): 朱永 (1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光微纳器件及系统、智能光电仪器等. Email: yongzhu@cqu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-07; 录用日期: 2014-07-03

<http://www.photon.ac.cn>

监测等领域<sup>[3-5]</sup>.

光纤法-珀传感器的解调方法有强度解调和相位解调. 由于强度解调法具有系统复杂、测量准确度有限、成本高等缺点, 光纤法-珀解调更多的是使用相位解调法. 相位解调法包括条纹计数、傅里叶变换法和相关解调法, 而相关解调法又可分为扫描式和非扫描式两种, 非扫描式解调由于没有运动部件, 控制方便, 准确度高, 成本低, 因此得到广泛的应用<sup>[6-8]</sup>. 目前基于非扫描式相关解调法的光纤法-珀解调仪在国外已经产品化, 例如加拿大的飞索公司做出了单通道和多通道的光纤法-珀解调仪<sup>[9]</sup>. 重庆大学在 2000 年的时候就开始了光纤法-珀解调仪的研究, 在 2013 年研制出了基于非扫描式相关解调法的多通道光纤法-珀解调仪. 现有的光纤法-珀解调仪解调速度慢, 只能适用于信号变化比较慢的监测中<sup>[10-12]</sup>. 提高基于非扫描式光纤法-珀传感器的解调速度, 对于实现光纤法-珀传感器的实用化和扩展其应用领域具有重要科学和应用价值.

本文分析了实现光纤法-珀非扫描式相关解调的光学原理和光学特性, 设计了基于 SLD 的快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统; 分析了该解调系统的信号特性, 提出了一种提高信号稳定性的算法; 实验验证了该算法的可行性和有效性.

## 1 快速光纤法-珀非扫描式相关解调仪系统

### 1.1 系统原理

快速光纤法-珀的非扫描式相关解调的原理如图 1. 基于信号的互相关原理, SLD 光源发射出来的光经过透镜耦合到光纤, 到达光纤法-珀传感器, 在法-珀腔发生干涉. 反射光经过  $1 \times 2$  耦合器分光, 其中一路经准直系统照射在光楔上, 发生干涉, 实现互相关运算, 透射光照射到高速电荷耦合器 (CCD) 探测器上. 电

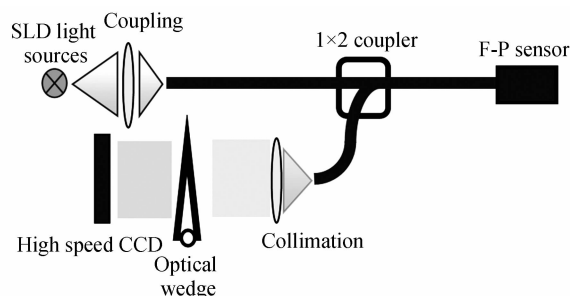


图 1 快速光纤法-珀传感器解调原理

荷耦合器实现光电转换, 经过相应的处理、采集, 即可以得到光纤法-珀传感器与光楔的相关信号.

根据相关解调的原理, 并且考虑光源在光谱和空间的高斯分布特性, 在 CCD 探测器上的光信号的表达式为

$$I_{\text{out}}(x) = e^{-(x-x_p)^2/B_x^2} \cdot \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi L}{\lambda}}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi L}{\lambda}} \cdot \frac{(1 + R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos \frac{4\pi x \tan \theta}{\lambda}} \cdot e^{-(\lambda-\lambda_p)^2/B_\lambda^2} I_0 d\lambda \quad (1)$$

式中:  $R_1$  为法-珀腔近端面的反射率;  $R_2$  为法-珀腔远端面的反射率;  $R_3$  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;  $\theta$  为构成光楔两平面间的夹角;  $I_0$  为光源光强随波长  $\lambda$  分布的常量;  $\lambda_p$  为光源光谱的中心波长;  $B_\lambda$  为光源光谱带宽所决定的高斯函数半高宽度;  $x_p$  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<sup>[9]</sup>.

非扫描式相关解调法的光源在采用卤钨灯时, 光源带宽大, 相关信号的对比度比较好, 但是由于卤钨灯发射出来的光发散角大, 不利于将光耦合到细小的光纤里面, 光信号能量弱, 所以在解调的时候需要比较长时间的积分, 难以实现快速的解调<sup>[9]</sup>. SLD 具有能量大, 发散角小等特点, 能将大部分光耦合进光纤, 光信号能量大, 同时带宽比较大的特点, 所以采用 SLD 作为快速非扫描式相关解调系统的光源就能减小积分时间, 比较快地获得相关信号, 实现快速测量. 为了实现基于 SLD 的光纤法-珀快速非扫描式相关解调, 本文将对该系统的光信号进行了特性分析, 分析 SLD 光源的带宽, 和中心波长对光学信号的影响, 间接的分析了它们对解调信号带来的影响.

### 1.2 快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统光学信号分析

为了分析 SLD 光源特性对信号特点的影响, 首先分析带宽对信号的影响. 系统参数  $R_1 = 0.04$ ,  $R_2 = 0.04$ ,  $R_3 = 0.5$ ,  $L = 80 \mu\text{m}$ , SLD 光源的中心波长采用  $\lambda_p = 830 \text{ nm}$ ,  $\theta = 0.03^\circ$ ,  $I_0 = 1$ , 中心位置  $x_p = 80000 \text{ nm}$ , 空间带宽  $B_x = 100000 \text{ nm}$ , 当  $B_\lambda$  分别为 20、30、50、70 nm 时获得的信号特性如表 1, 其中带宽为 20、70 nm 时的信号如图 2.

表 1 光源中心波长为 830 nm 带宽分别为 20、30、50、70 nm 时信号的直流分量和对比度

Table 1 Signal DC component and contrast of 20, 30, 50, 70 nm bandwidth source light with 830 nm center wavelength

Bandwidth/nm	DC Component	Contrast
20	0.0007	1.207 2
30	0.001 0	1.162 2
50	0.001 6	1.153 6
70	0.002 2	1.148 0

从图 2 和表 1 可以看出, 在相同的中心波长的情况下, 不同的带宽对信号有着重要的影响, 带宽越小,

相关信号越宽,直流分量也越小,对比度越大.相关信号太宽的情况下就会使信号与分频信号发生重叠,以至于不好解调,甚至解调不出来,同时也会使信号的条纹变多,不好确定最大值所在的位置,使解调准确度下降.

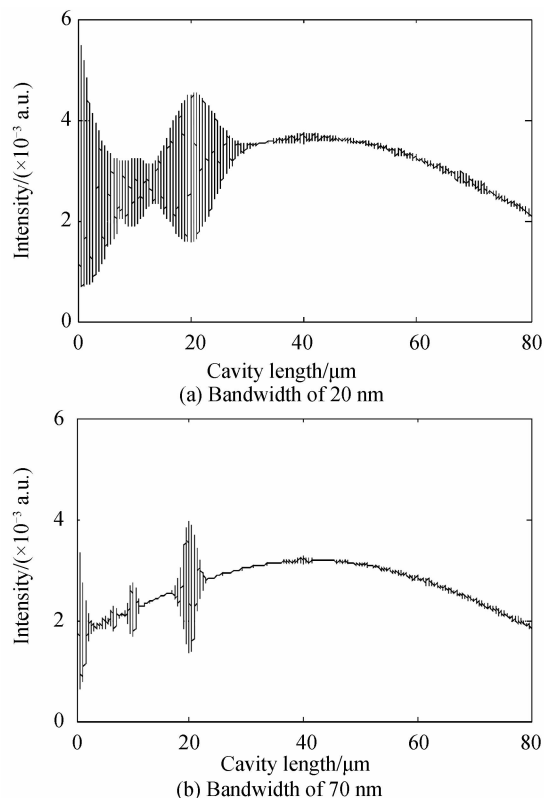


图2 光源中心波长为830 nm带宽分别为20、70 nm时的仿真信号

Fig. 2 Simulation signal of 20,70 nm bandwidth source light with 830 nm center wavelength

在分析SLD光源中心波长对信号的影响时,系统参数  $R_1 = 0.04, R_2 = 0.04, R_3 = 0.5, L = 80 \mu\text{m}, \theta = 0.03^\circ$ , SLD光源带宽  $B_\lambda = 70\text{nm}$ 的,  $I_0 = 1$ , 中心位置  $x_p = 80\ 000 \text{ nm}$ , 空间带宽  $B_x = 100\ 000 \text{ nm}$ , 当中心波长为  $\lambda_p$  分别为 530, 630, 730, 830 nm 时, 获得的信号的信号特性如表2, 其中中心波长 530, 830 nm 的信号如图3.

表2 光源带宽为70 nm, 中心波长分别为530、630、730、830 nm时信号的直流分量 and 对比度

Table 2 Signal DC component and contrast of 70 nm bandwidth source light with 530, 630, 730, 830 nm center wavelength

Center Wavelength/nm	DC Component	Contrast
530	0.002 2	1.130 3
630	0.002 2	1.138 9
730	0.002 2	1.144 5
830	0.002 2	1.148 0

从图3和表2中可以看出相同带宽的情况下,直流分量相同,中心波长越小,信号越窄,但是在长腔长

的地方会出现很多的噪声.当信号移动到这些位置的时候会使信号的信噪比下降,甚至无法准确地解调出来.所以在信号宽度允许的情况下,应该尽量选取中心波长比较大的光源.

综合考虑光源价格等因素,实验采用中心波长为830 nm,带宽为40 nm的SLD光源.

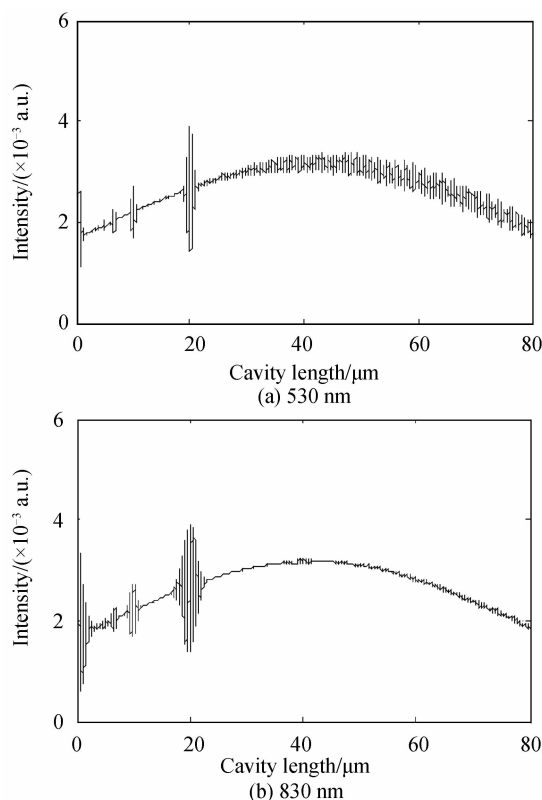


图3 光源带宽为70 nm,中心波长分别为530、830 nm时的仿真信号

Fig. 3 Simulation signal of 70 nm bandwidth source light with 530,830 nm center wavelength

## 2 快速光纤法-珀非扫描式相关解调稳定性算法

仿真获得的是理想的信号,实际系统中往往会存在噪声使信号的质量下降,图4是实验系统实际采集的一组CCD输出的原始信号,信号是反相的.从图中可以看到原始信号包含了相关信号、光源光强高斯分布而产生的弯曲基线信号、尖峰毛刺噪声、高频噪声以

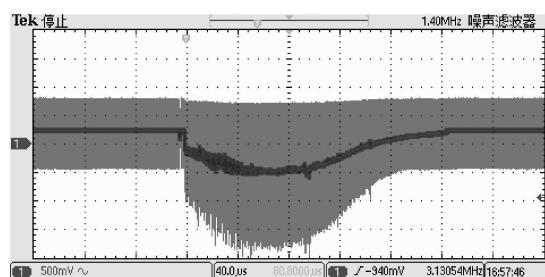


图4 从CCD采集出来未经处理的信号  
Fig. 4 Signal without processing from CCD

及随机噪声等. 如何从这么一组原始的信号中提取出相关信号, 提高信噪比, 确定相关信号所在的横坐标的位置就成为快速光纤法-珀解调的主要工作.

去除弯曲基线主要采用高通滤波器将其滤除, 而尖峰毛刺等高频噪声采用低通滤波器滤除. 去噪后的工作就是准确地求出相关信号所对应的横坐标值. 理想的情况下, 经过之前的一系列处理只需简单地求出最大值的横坐标的就是相关信号的横坐标位置. 实际上, 在快速解调的情况下信号的信噪比不好, 预处理对提高信号信噪比有限, 因为噪声的原因相关信号的最大值不一定在中间位置. 为了排除这些干扰本文提出了采用提取包络求包络最大值横坐标的方法来确定相关信号横坐标, 这样可以稳定、高准确度地解调出腔长值.

## 2.1 信号处理算法

包络提取的方法目前主要有希尔伯特变换法, 小波变换等<sup>[13]</sup>. 希尔伯特变换法提取出来的包络不能完全去除高频信号, 所以会不够平滑, 包含毛刺, 影响解调准确度. 小波变换从频率的角度来看就是一个带通滤波, 它具有中心频率和带宽可变的特点, 所以它能很好的适应不同的应用场合<sup>[14]</sup>.

对于满足  $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0$  的函数  $\Psi(x)$  称为基小波, 而小波函数则是由基小波经过伸缩和平移而派生出来的一族函数<sup>[15]</sup>, 即

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad a, b \in R \quad a \neq 0 \quad (2)$$

式中  $a$  是尺度参数,  $b$  为位置参数. 如果信号  $f(x)$  平方可积的, 则信号  $f(x)$  的小波变换的定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

式中“\*”表示共轭,  $a, b$  和  $x$  均为连续变量, 因此式(3)又称为连续小波变换. 还可以将小波变换表示为卷积的形式为

$$\begin{aligned} W_f(a, b) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx = \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \Psi^*\left(-\frac{b-x}{a}\right) dx = \\ &= f(x) * \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(-\frac{x}{a}\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

将  $W_f$  看作是  $f(x)$  经过一个传递函数为  $\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(-\frac{x}{a}\right)$  的变换频谱的滤波器的输出. 通过改变小波就可以实现不同形式的滤波, 获得不同的结果, 所以小波变换具有很好的对信号的自适应能力.

选择 Morlet 小波作为基本小波, 它是具有高斯包络的单频率复正弦函数, 数学表达式为

$$\Psi(x) = e^{-\frac{x^2}{2a}} e^{j\omega_0 x} \quad (5)$$

用 Morlet 小波对信号进行小波变换得

$$W_f(a, b) = W_{f_{\text{Re}}}(a, b) + jW_{f_{\text{Im}}}(a, b) = f(x) * \left(\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(-\frac{x}{a}\right)\right) \quad (6)$$

$W_{f_{\text{Re}}}(a, b), W_{f_{\text{Im}}}(a, b)$  分别是实部和虚部, 又根据 Morlet 小波的特点可以知道  $W_{f_{\text{Re}}}(a, b), W_{f_{\text{Im}}}(a, b)$  幅值相同, 相位相差  $90^\circ$ . 由包络检波技术的解调原理可知可以通过解调的方法提取它们中的幅值分量, 用解调的方法得到小波系数中的包络分量为

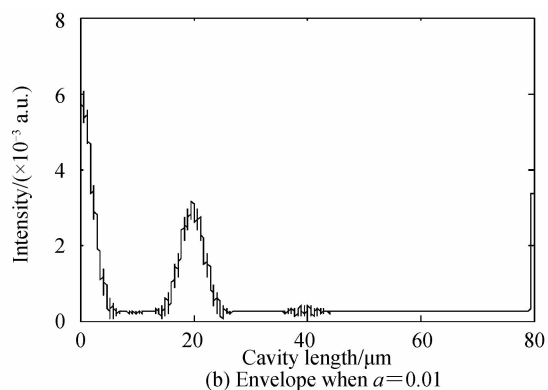
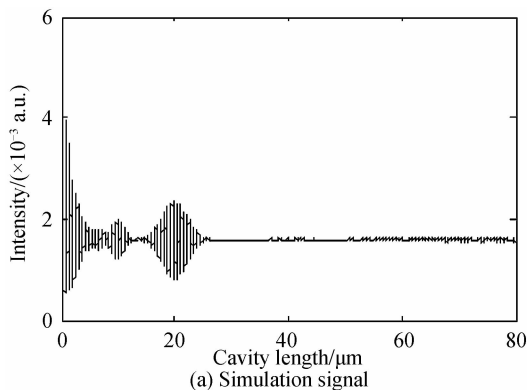
$$A(a, b) = \sqrt{W_{f_{\text{Re}}}^2(a, b) + W_{f_{\text{Im}}}^2(a, b)} \quad (7)$$

这就是信号  $f(x)$  在  $a$  尺度下的包络.

## 2.2 数值计算

取 SLD 光源中心波长为 830 nm, 带宽为 40 nm 的仿真信号如图 5 所示, 利用 Morlet 小波进行提取包络, 取  $a$  尺度分别为 0.01, 0.03, 0.5,  $\omega_0 = 200 \cdot a$  时获得的包络如图 5.

分析图 5 可以知道当  $a$  取值过小时, 通带带宽就会比较大, 就会携带有高频信息, 影响相关信号位置的



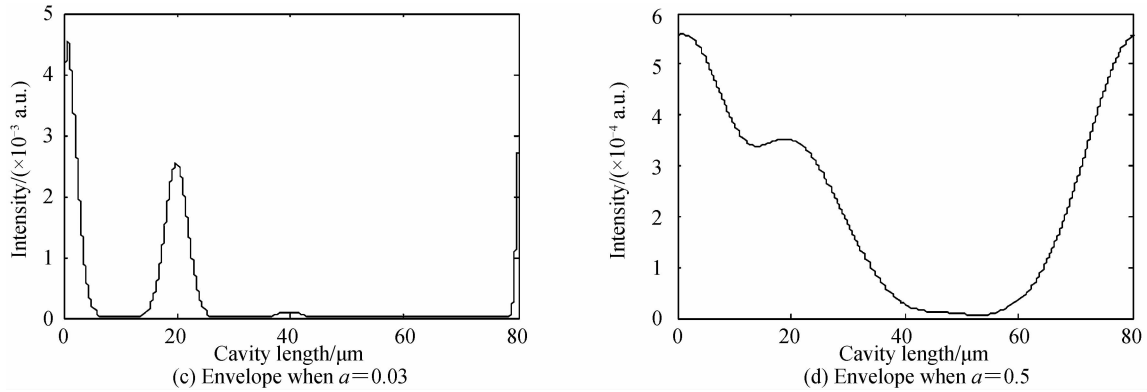


图5 仿真信号及不同尺度  $a$  下的包络信号

Fig. 5 Simulation signal and envelope with different  $a$

确定,当  $a$  取值过大时,通带带宽又会过窄,使得包络比较的平坦,不利于精确地确定相关信号的位置.同时还可以发现分频信号没有被提取出来,经分析分频信号的频率跟相关信号的频率是不一样的,所以当运用小波进行处理,带宽比较窄时就把分频信号滤除了.所以运用小波进行包络提取时,如果分频信号跟相关信号都在采集的范围内时,能排除他们之间的相互干扰.

对信号添加随机噪声,然后采用小波提取包络,获得的图像如图6.

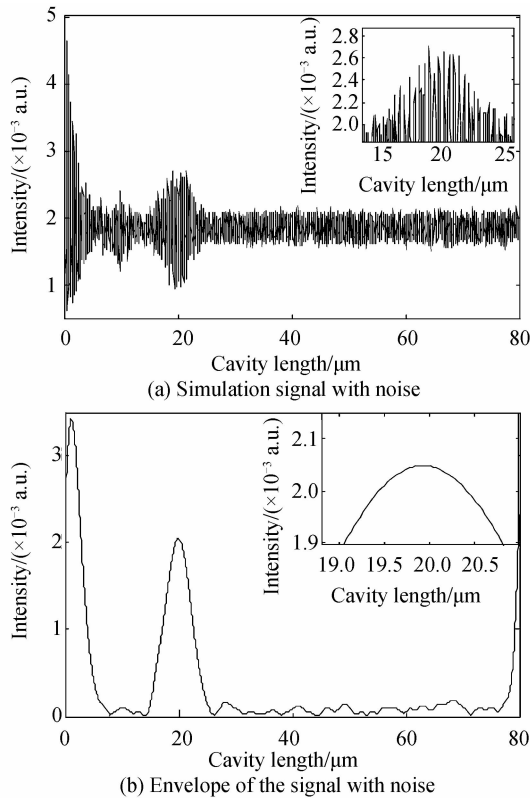


图6 叠加了随机噪声信号及其包络

Fig. 6 Signal with random noise and its envelope

从图6中可以看出由于随机噪声的扰动使得相关信号的最大值发生了偏移,偏移到了  $19.135 \mu\text{m}$  的位置,当采用小波包络提取处理后,相关信号明显地被提

取了出来,而且最大值在  $19.935 \mu\text{m}$  的位置,相对误差为  $0.33\%$ ,而采用最大值解调的误差为  $4.33\%$ .由此看见使用小波包络提取不但可以在噪声中提取出相关信号,而且在一定程度提高了修正了相关信号的位置,也就是说它能在信噪比不好的情况下提高解调仪的解调准确度.

### 3 实验

将此算法应用到实际实验系统中,系统采用  $1.5 \text{ kHz}$  的解调频率,信号采用小波包络提取算法处理,算法在 DSP 上运行需要约  $500 \mu\text{s}$  时间.图7为算法处理前后的信号图.

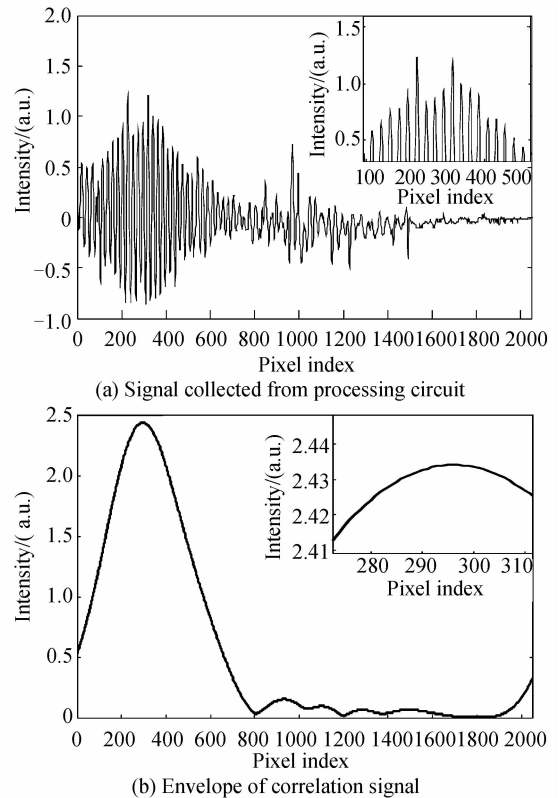


图7 实验信号及其相关信号包络

Fig. 7 Experimental signal and its envelope

从图7可以发现相关信号的包络已经被很好地提取了出来,而且相关信号的包络比原来的还要好一些.如果信号不加处理,按最大值解调,腔长在第228个像元对应的位置.而根据解调原理和仿真信号可知相关信号是对称性的,对称中心的位置就是相关信号的位置.排除噪声的影响,图7(a)中相关信号的中心的位为第295个像元对应的位置,从图7(b)的包络信号可以直接读取最大值的位置在第296个像元的位置,跟直接最大值解调差了68个像元,但是与真实值却只差了一个像元的误差,本文实验采用的光楔使得CCD相邻像元之间的对应腔长差为5 nm,所以误差5 nm.两幅图相关信号的位置基本一致,从而证明了运用小波包络提取的方法可以成功地获得相关信号的位置.

将算法应用于样机,对样机进行相应的测试,需要对样机进行标定,采用4个腔长分别为14.732  $\mu\text{m}$ 、15.047  $\mu\text{m}$ 、16.236  $\mu\text{m}$ 和16.898  $\mu\text{m}$ 的标准光纤法-珀腔对系统各通道进行标定,结果见图8,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.

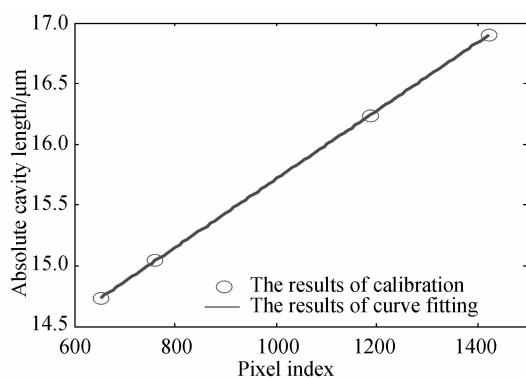


图8 腔长标定

Fig. 8 Cavity length calibration

采用腔长为16.236  $\mu\text{m}$ 的光纤法-珀传感器,让其处于一个稳定的环境,对其腔长进行测量1000次,获得的结果如图9.

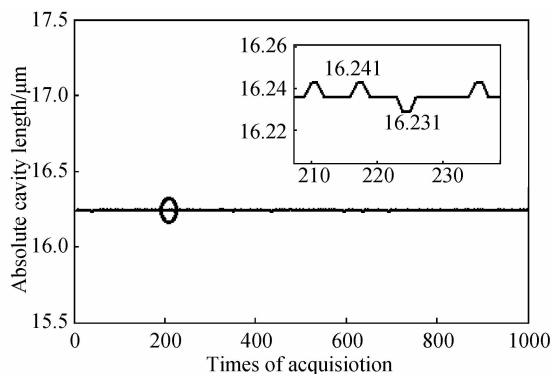


图9 系统稳定性测试

Fig. 9 System stability test

从图9中可以看到,测量结果比较稳定,只有少部分在 $\pm 5$  nm跳动,分析可知相关信号的位置只在左右

一个像元的位置跳动,可见包络提取使得相关信号成功地避免了随机噪声的干扰,实验测试结果稳定而精确.

## 4 结论

分析了基于SLD的快速非扫描式相关解调原理的光纤法-珀解调仪系统原理及信号特性,该相关信号比较宽,条纹比较多,在噪声的影响下将会使得采用最大值解调的稳定性和解调准确度下降.为了解决这个问题,本文提出了采用基于小波的提取包络的算法,去除了噪声的影响,再求取包络的最大值解调.仿真表明当由于噪声使得直接采用最大值解调,解调误差为4.33%时,采用该算法使得解调误差仅为0.33%.在1.5 kHz解调频率的快速光纤法-珀非扫描式相关解调仪样机上采用该算法进行处理,使信号解调的误差仅为5 nm,远小于直接采用最大值解调的误差.对系统进行标定,连续对腔长为16.236  $\mu\text{m}$ 的光纤法-珀传感器采集了1000次,结果仅在 $\pm 5$  nm的范围跳动,表明系统的稳定性非常好,该算法能够提高系统的稳定性和解调准确度.

### 参考文献

- [1] DING Xiao-ping, WANG Wei, FU Lian-chun. Classification and application principles of optical-fiber transducer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(6): 1176-1178. 丁小平, 王薇, 付连春. 光纤传感器的分类及其应用原理[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(6): 1176-1178.
- [2] DUAN De-wen, RAO Yun-jiang, ZHU Tao, et al. Study of fabrication and application of hollow-core photonic crystal fiber based in-line fiber-optic etalon[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(10): 2554-2558. 段德稳, 饶云江, 朱涛, 等. 基于空芯光子晶体光纤的在线法-珀标准件制作与应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2554-2558.
- [3] ALAN D K, MICHAEL A D, HEATHER J P, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1463.
- [4] JIANG Jun-feng. A research on theory and technique of demodulation of optical fiber sensors used for structure health monitoring[D]. Tianjin University, 2004. 江俊峰. 用于结构健康监测的光纤传感解调系统的理论与方法研究[D]. 天津大学, 2004.
- [5] 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**(01): 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**(01): 79-82.
- [6] SUN Bao-chen, DAI Jing-yun, ZHANG Wen-tao. Design of demodulation system for fiber optic Fabry-Perot sensors[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2007, **7**(8): 222-224. 孙宝臣, 戴静云, 张文涛. 光纤法-珀传感器解调系统的设计[J]. *微纳电子技术*, 2007, **7**(8): 222-224.
- [7] LIU En, RAN Zeng-ling, 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.
- [8] BERTHOLD J W, JEFFERS L A, LOPUSHANSKY R L.

- Optic fiber sensors for the refinery of the future[C]. Sensors for Industry Conference, Houston, Texas, USA, 2002. 12, 19-21.
- [9] BERTHOLD J W, NEEDHAM D B. Practical application of industrial fiber optic sensing systems [C]. Texas A&M Instrumentation Symposium, Texas A&M University, January, 2006.
- [10] WANG Ning, ZHU Yong, GONG Tian-cheng, *et al.* Multichannel fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **07**(1):14-16.
- [11] LI Li-hui, ZHU Yong, WANG Ning, *et al.* Analysis and experimental study on multi-channel optical fiber Fabry-Perot demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1039-1045.  
李丽慧, 朱永, 王宁等多通道光纤法-珀解调系统分析与实验 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(9):1039-1045.
- [12] GONG Tian-cheng, ZHU Yong, WANG Ning, *et al.* Analysis and design of non-scanning optical fiber Fabry-Perot demodulator[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, (06): 801-805.
- 龚天诚, 朱永, 王宁, 李丽慧, 李阳. 非扫描式光纤法-珀解调仪分析与设计[J]. *压电与声光*, 2013, (06):801-805.
- [13] ZHANG Xu-sheng, ZHU Yi-sheng, CHENG Xiao-xiong, *et al.* The method of extracting signal envelope—from Hilbert transform to wavelet transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1997, **11**(1)120-123.  
张绪省, 朱贻盛, 成晓熊, 等. 信号包络提取方法——从希尔伯特变换到小波变换[J]. *电子科学学刊*, 1997, **11**(1)120-123.
- [14] YU Hong-ying, ZHANG Hui, WANG Dun-qing. A new fast algorithm based on wavelet envelope detection technique and its application [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2007, **04**:310-313.  
余红英, 张辉, 王敦庆. 一种新的小波包络检测快速算法及其应用[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2007, **04**:310-313.
- [15] ALBERT B, FRANCIS J N. A first course in wavelets with Fourier analysis second edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010, 02.  
ALBERT B, FRANCIS J N. 小波与傅里叶分析基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010, 02.