

文章编号: 0253-2239(2005)10-1347-5

# 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法\*

荆振国 于清旭 张桂菊 宋世德

(大连理工大学物理系, 大连 116024)

**摘要:** 提出了一种新的白光非本征法布里-珀罗干涉(EFPI)光纤传感系统的干涉谱处理方法,在白光法布里-珀罗干涉光纤传感系统中,一个中心波长为 850 nm 的发光二极管(LED)作为宽谱光源,HR2000 高分辨力微型光谱仪用来测量返回的干涉光谱。通过跟踪干涉光谱中的特定谱峰点,法布里-珀罗干涉传感器的腔长值可以被解调出来。应用反向传播神经网络,解决了单峰测量方式的级次模糊问题。反向传播神经网络能够分辨出干涉谱中不同谱峰的干涉级次,因而可以进行多个谱峰连续跟踪。从而实现了高精密度、大动态范围的测量。进行了基于这种干涉谱处理方法的白光法布里-珀罗干涉传感系统的应变测量实验。利用该传感系统实现了精密度达  $0.1 \mu\epsilon$ ,  $500 \mu\epsilon$  范围的应变测量。

**关键词:** 光学测量; 光纤传感器; 白光干涉; 非本征法布里-珀罗干涉仪; 反向传播神经网络; 应变  
中图分类号: TN253 文献标识码: A

## A Novel Wavelength Demodulating Method for White Light Optical Fiber Sensor System

Jing Zhenguo Yu Qingxu Zhang Guiju Song Shide

(Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** A novel data processing method for demodulating the information from the interference spectrum of a white light extrinsic Fabry-Pérot interferometer (EFPI) sensor system is presented. In the white light EFPI sensor system, an 850 nm LED is used as the broadband light source and a HR2000 high resolution miniature spectrometer is used to measure the interference spectrum. Through tracing a special peak point in the interference spectrum, the air gap value of the EFPI sensor can be demodulated. The order ambiguity problem of single peak tracing method is solved through the application of BP neural networks. As the BP neural networks can distinguish the interference orders of the peaks in the interference spectrum, many peaks can be traced continuously. Both high precision and large dynamic range are achieved. The data processing method is demonstrated on a white light EFPI strain sensor system.  $0.1 \mu\epsilon$  precision and  $500 \mu\epsilon$  measurement range are achieved with this system.

**Key words:** optical measurement; optical fiber sensor; white light interference; extrinsic Fabry-Perot interferometer; back propagation neural networks; strain

## 1 引 言

基于非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)的光纤传感器对应变、温度等外界物理量高度敏感,在测量领域的应用研究引起了广泛的关注。相对于其它光纤传感器而言,光纤非本征法布里-珀罗干涉仪传感器具有灵敏、体积小、制造成本低和结构坚固等方面的优点,在民用基础设施和石油化工、航空航天等领

域具有着广阔的应用前景<sup>[1~2]</sup>。

基于白光干涉原理的非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感系统具有一般波长调制光纤传感系统的优点,对光源功率波动和光纤传输损耗的不敏感,并且能够克服强度调制测量方式中常见的方向模糊,不能绝对测量的问题<sup>[3]</sup>。

本文描述了一个由微型光谱仪和发光二极管宽

\* 国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金(60028505)资助课题。

作者简介: 荆振国(1978~),男,辽宁营口市人,大连理工大学物理系博士研究生,主要从事光纤传感器制造及解调机理的研究。E-mail: jingzhenguo@hotmail.com

收稿日期: 2004-09-23; 收到修改稿日期: 2005-02-25

谱光源构造的白光非本征法布里-珀罗干涉仪光纤应变传感系统,提出了一种利用反向传播(Back propagation)神经网络实现谱峰级次辨识的干涉光谱处理方法,以实现高精密度、大动态范围的测量。

## 2 白光非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感系统的基本结构

白光非本征法布里-珀罗干涉仪光纤应变传感系

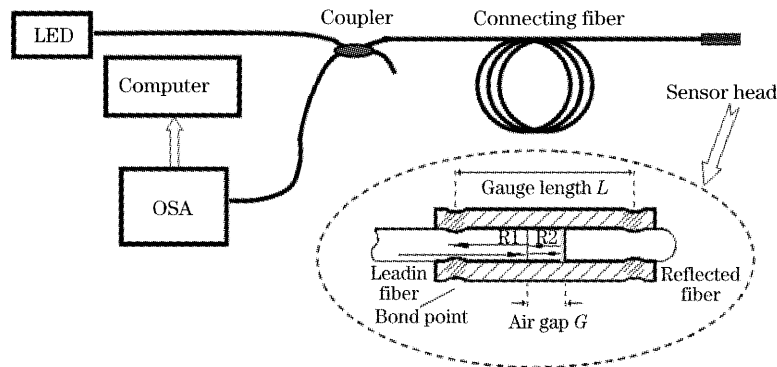


图1 白光非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感系统的基本结构

Fig. 1 The basic structure of the white light EFPI sensor system

光源发出的光经过  $2 \times 2$  耦合器和传输光纤传给非本征法布里-珀罗干涉仪传感头,由传感头反射回的干涉光谱信号再次经过传输光纤和  $2 \times 2$  耦合器,由耦合器的另一端输出传送给微型光谱仪。

非本征法布里-珀罗干涉仪传感头是将具有良好垂直端面的导入光纤和反射光纤一同置入能敏感外界应变的石英毛细管内,并使它们严格平行、同轴,利用  $\text{CO}_2$  激光将两根光纤与石英毛细管焊接在一起。导入光纤与光源和光谱仪通过传输光纤连接在一起。反射光纤背端作毛化处理,这样能消除其反射干扰。两个反射率约为 4% 的光纤端面构成了一个的低细度法布里-珀罗干涉仪,其中形成的干涉可以等效为双光束干涉。

由非本征法布里-珀罗干涉仪传感头返回的干涉光谱为

$$I(\lambda) = 2I_s(\lambda) \left[ 1 + A \cos \left( \frac{4\pi G}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right], \quad (1)$$

其中  $I_s(\lambda)$  是发光二极管光源的光谱分布函数;  $A$  是干涉光谱的可见度;  $\varphi_0$  是初始相位;  $G$  是传感头中空腔腔长,其感受外界应变变量而变化。

利用事先采集的光源光谱分布  $I_s(\lambda)$ , 将(1)式归一化,得到的归一化干涉谱为

$$I_n(\lambda) = 2 \left[ 1 + A \cos \left( \frac{4\pi G}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right]. \quad (2)$$

统的基本结构如图 1 所示。一只中心波长 850 nm、半峰全宽(FWHM)60 nm 的发光二极管作为宽谱光源。光源耦合到 62.5/100  $\mu\text{m}$  多模光纤的功率约为 100  $\mu\text{W}$ 。微型光谱仪(Ocean Optics, HR2000)用来测量返回的干涉光谱。通过调整光谱仪中 CCD 的积分时间可得到足够强度的电信号输出。该光谱仪在 800~960 nm 范围内的光谱分辨率可达到 0.12 nm。

对归一化后的光谱,利用小波算法进行降噪,可进一步得到光滑、低失真的信号。

非本征法布里-珀罗干涉仪传感头感受的应变为

$$S = (G - G_0) / L, \quad (3)$$

其中  $G_0$  为  $G$  的初始值,  $L$  为石英毛细管上两焊点的间距。

## 3 基于神经网络实现级次辨识的干涉光谱处理方法

为了从归一化干涉谱中解调出非本征法布里-珀罗干涉仪的腔长信息,并进一步得到所测量的应变变量,已经有多种相关的谱处理方法<sup>[4~8]</sup>。为了同时实现高精密度和大动态范围的测量,提出一种新的基于神经网络实现级次辨识的干涉谱处理方法。

### 3.1 单峰测量方式

单峰测量方式<sup>[4]</sup>是通过跟踪干涉谱中一特定干涉级次的谱峰,从而解调出非本征法布里-珀罗干涉仪传感器的腔长值。

干涉谱中一特定级次  $m$  的谱峰波长值  $\lambda_m$  满足如下条件:

$$G = \frac{(m2\pi - \varphi_0)\lambda_m}{4\pi} = \frac{K_m}{2}\lambda_m. \quad (4)$$

针对一个特定级次的谱峰,  $K_m$  值是一个常数。

这种测量方式的测量精密度主要取决于光谱仪的最小分辨力、降噪和寻峰所用的算法以及整个系统的信噪比。由(4)式可得系统的相对误差为

$$|\Delta G/G| \approx |\Delta\lambda/\lambda|, \quad (5)$$

其中  $\Delta G$  是腔长测量的误差,  $\Delta\lambda$  是谱峰定位的误差。

以  $L \approx 5 \text{ mm}$ ,  $G \approx 15 \text{ }\mu\text{m}$  的非本征法布里-珀罗干涉仪传感头为例, 当谱峰定位误差  $\Delta\lambda = 0.12 \text{ nm}$  时, 由(5)式及(3)式, 可得应变测量误差约为  $0.5 \text{ }\mu\text{e}$ 。由于在谱峰定位过程中应用了多项式拟和算法, 谱峰定位实际可以达到亚像元级。

单峰测量方式的优点是精密度高, 但是同时也存在着动态范围有限的缺点。为了避免谱峰级次模糊, 必须要求所选取特定谱峰的活动范围内不能出现另一个级次的谱峰, 而这个限制条件使该种测量方式的动态范围非常有限。

### 3.2 能够克服级次模糊问题的双峰测量方式<sup>[5]</sup>

双峰测量方式是利用干涉谱中任意两个相邻的干涉谱峰来求得法布里-珀罗腔长的绝对值。

设  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ) 是干涉谱中两相邻谱峰波长值, 它们的干涉级数分别是  $m$  和  $m+1$ 。则有

$$\begin{cases} 4\pi G/\lambda + \varphi_0 = m2\pi; \\ 4\pi G/\lambda_2 + \varphi_0 = (m+1)2\pi. \end{cases}$$

上述两式相减可以得出腔长值

$$G = \lambda_1 \lambda_2 / 2(\lambda_1 - \lambda_2), \quad (6)$$

与单峰测量方式相比, 双峰测量方式克服了级次模糊问题, 然而其精密度却要低得多。

由(5)式可得

$$\left| \frac{\Delta G}{G} \right| \approx \sqrt{2} \left| \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right| \left| \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} \right|, \quad (7)$$

与单峰测量方式相比, 相对误差增加了  $\sqrt{2} \left| \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right|$  倍。应用  $G$  约为  $15 \text{ }\mu\text{m}$  的非本征法布里-珀罗干涉仪传感头中, 这个系数约为 50。

双峰测量方式系统的动态范围取决于光源谱宽和干涉谱的可见度。一方面, 在谱宽范围内出现两个干涉极大峰, 相邻双峰间波长差应满足  $\lambda_1 - \lambda_2 < 1/2$  半峰全宽, 当半峰全宽为  $60 \text{ nm}$  时要求  $G$  约大于  $12 \text{ }\mu\text{m}$ 。另一方面, 为了使干涉谱具有较好的可见度, 应使  $G$  小于相干长度的一半。相干长度取决于导入光纤数值孔径, 法布里-珀罗腔的光学准直等因素。非本征法布里-珀罗干涉仪传感头在腔长  $G$  小于  $17 \text{ }\mu\text{m}$  时具有较好的干涉谱可见度。上述两个条件要求非本征法布里-珀罗干涉仪传感头的腔长变化范围为  $12 \sim 17 \text{ }\mu\text{m}$ , 相应的最大可测量应变范围约为

$1000 \text{ }\mu\text{e}$  左右。由于单模光纤较小的数值孔径, 如果采用单模系统, 可以使测量范围增大很多。

### 3.3 利用神经网络实现谱峰级次辨识

为了同时实现高精密度和大动态范围的测量, 有必要结合上述两种测量方式的优点, 在单峰测量的同时辨识所跟踪谱峰的级次。通过对出现在有效光谱范围内谱峰的级次辨识, 解决单峰测量方式的级次模糊问题, 进行多个谱峰的连续跟踪, 从而实现大动态范围的测量。

首先对传感头在整个测量范围内施加连续的应变, 同时记录干涉光谱中信噪比最好的两个干涉极大峰的波长值(认为是原始光谱中心附近的两个峰, 距离最近的称之为主极大峰, 另一个称之为次极大峰)。以主极大峰和次极大峰的波长值分别为  $x$  和  $y$  轴坐标, 在一平面上绘出施加连续应变过程中记录下的各点, 这一平面空间称之为相空间。在有效光谱范围内出现的各个级次的主极大峰在相空间就对应着多条连续的曲线。通过对传感头施加连续应变, 使其在相空间遍历各级次对应的轨迹后, 只要将各轨迹曲线记录下来, 就能以此实现主极大谱峰干涉级次的辨识。相空间中各级次轨迹是一组近似平行的平滑曲线。反向传播神经网络非线性函数逼近功能可以很好地实现相空间中各谱峰轨迹的记录及辨识。

反向传播神经网络是一种多层前馈神经网络, 可以实现从输入到输出的任意非线性平滑函数的逼近。在确定反向传播神经网络结构后, 利用输入输出样本集对其进行训练, 使网络实现给定的输入输出映射关系。经过训练的反向传播神经网络, 对于不是样本集中的输入, 也可以给出合适的输出<sup>[9]</sup>。

为了利用反向传播神经网络逼近相空间中的某一主极大峰相应的非线性轨迹曲线, 首先建立一个三层反向传播神经网络, 如图 2 所示。网络输入层包含节点数  $R-1$ , 相应于主极大峰的波长数据; 输出层包含节点数  $S_2-1$ , 相应于次极大峰的波长数据; 隐层包含节点数  $S_1$  由输入层数据和输出层数据之间函数关系的线性程度决定。隐层神经元作用函数选用 S 型函数, 输出层作用函数选用纯线性函数。然后, 依要求指定训练目标和训练时间, 用轨迹曲线中的数据对集对所建立的神经网络进行训练。

对训练好的反向传播神经网络可以进行仿真。同时将原始曲线轨迹和经过训练的反向传播神经网络仿真结果在同一图中绘出, 可以看到仿真得到的曲线对原始曲线轨迹逼近效果。

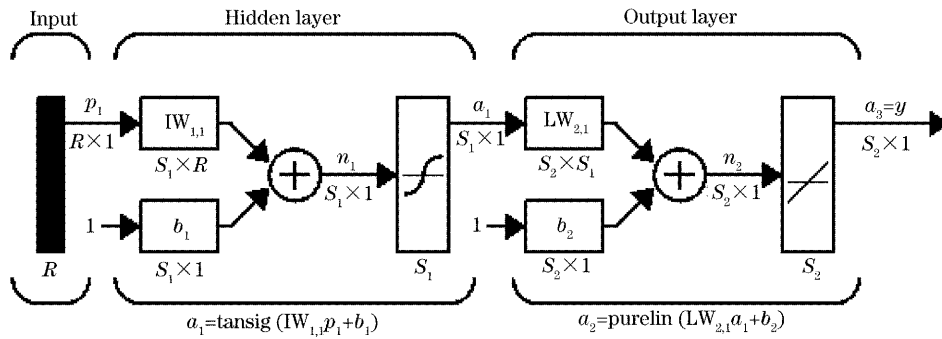


图 2 三层反向传播网络模型

Fig. 2 Three-layer BP neural network

针对相空间中每一条轨迹曲线都训练出相应的反向传播神经网络后,可以依此来实现谱峰级次的辨识。取得某一时刻的干涉极大双峰,将主极大峰的波长值代入各个训练好的神经网络仿真出相应级次的次极大峰波长值。将各个仿真得到的次极大峰波长值与真实次极大峰波长值相比较,最为接近的那个仿真次极大峰波长值所对应的级次就是此刻主极大峰的干涉级次。

### 4 实验结果

为了检验上述干涉谱处理方法,对图 1 所示系统中非本征法布里-珀罗干涉仪应变传感器进行了应变测量实验。

将非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感器和测量分辨力为  $1 \mu\epsilon$  的电阻应变片并排粘贴于悬臂梁的同一位置。对两只传感器加载  $500 \mu\epsilon$  范围的连续应变,用计算机记录过程中各时刻的中心干涉极大双峰的波长值和电阻应变片的应变值。

相空间中部分级次的轨迹曲线如图 3 所示。

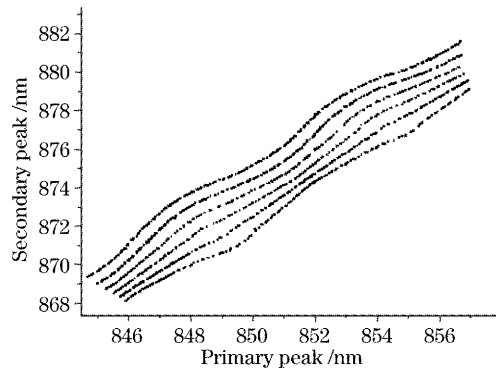


图 3 相空间中部分级次的轨迹曲线

Fig. 3 Some traces in the phase space

图 4 是相空间中相邻两个级次的轨迹曲线和所训练相应神经网络仿真输出的曲线。所训练的神经

网络仿真曲线与真实轨迹曲线的相对偏差小于  $0.06 \text{ nm}$ ,远小于相邻级次轨迹曲线最小约  $0.5 \text{ nm}$  的间距,能够依此实现谱峰级次的辨识。

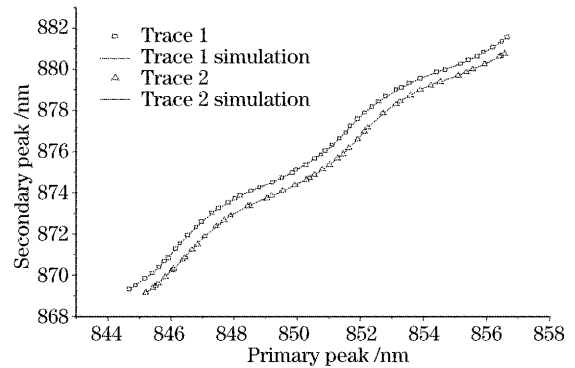


图 4 相邻级次的轨迹曲线和相应神经网络仿真输出

Fig. 4 Two neighbouring traces and their neural network simulations

利用电阻应变片得到的应变值,对各级次主极大谱峰的波长值进行应变标定,这一标定过程也是利用反向传播神经网络来完成的。标定完成即可以利用非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感器进行应变测量。

再一次对两个传感器加载的连续应变,同时记录光纤传感器应变的测量值和电阻应变片应变的测量值,结果如图 5 所示。

光纤传感器和电阻应变片得到的测量结果基本一致。光纤传感器和电阻应变片测量结果的相对偏差小于  $2 \mu\epsilon$ ,估计主要来源于电阻应变片测量值的离散化和对应变梁的非理想粘结导致两个传感器间的相对蠕动。

将非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感器自由放置,进行  $300 \text{ s}$  的连续测量,采样率约为每秒 3 采样点,测量结果如图 6 所示。

传感系统的精密度可用相同的规定条件下,同一待测量连续重复测量结果标准偏差的 2 倍来表

示<sup>[10]</sup>。图 6 中数据的标准偏差约为  $0.05 \mu\epsilon$ ，可得该传感系统的测量精密度约  $0.1 \mu\epsilon$ 。

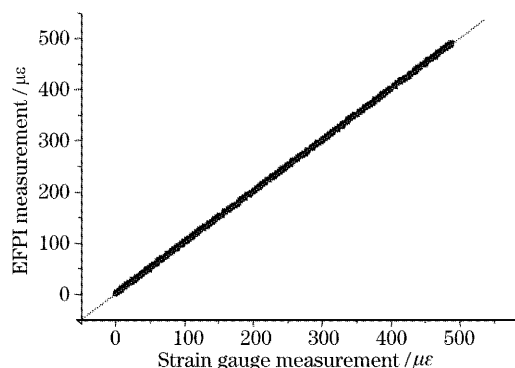


图 5 非本征法布里-珀罗干涉仪传感器和电阻应变片测量结果

Fig. 5 Experimental results of the EFPI sensor and the strain gauge

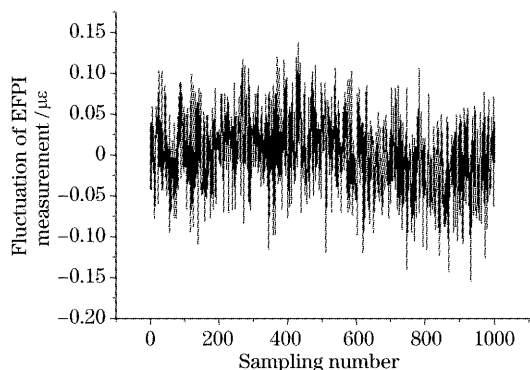


图 6 精密度测量的实验结果(300 s)

Fig. 6 Experimental results of precision measurement (in 300 s)

## 5 结 论

提出了一种新的白光非本征法布里-珀罗干涉仪光纤传感系统干涉谱处理方法。利用神经网络进行谱峰级次辨识,进行多个谱峰的连续跟踪,同时实现高精密度、大动态范围的测量。 $500 \mu\epsilon$ 测量范围

和  $0.1 \mu\epsilon$  精密度的实验结果证明了该方法的可行性。低成本的发光二极管宽谱光源和紧凑的微型光谱仪构造的应变测量系统具有良好的稳定性和较高的性能价格比,可望在结构健康监测领域发挥重要的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Jinsong Leng, Anand Asundi. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors[J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **103**(3): 330~340
- 2 Russell G. May, Anbo Wang, Hai Xiao *et al.*. SCIIB pressure sensors for oil extraction applications[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3852**: 29~35
- 3 K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt. *Optical Fiber Sensor Technology* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. 193~237
- 4 Bing Qi, Gary R. Pickrell, JunCheng Xu *et al.*. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3165~3171
- 5 H. Xiao, W. Huo, J. Deng *et al.*. Fiber optic whitelight interferometric spectrum signal processing for absolute measurements[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3852**: 74~80
- 6 Claude Belleville, Gaetan Duplain. White light interferometric multimode fiber-optic strain sensor [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 78~80
- 7 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber optic Fabry Perot interferometric sensing system based on optical amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186 (in Chinese)  
江 建,饶云江 冉曾令 等. 光放大外腔式光纤法布里珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 183~186
- 8 Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong *et al.*. Experimental study on the affection of gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 88~92 (in Chinese)  
陈伟民,王 宁,朱 永 等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 88~92
- 9 Zhang Liming. *Models and Applications of Artificial Neural Networks* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993. 32~51(in Chinese)  
张立明. 人工神经网络的模型及其应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 32~51
- 10 Yuan Xiguang. *Manual of Sensor Techniques* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986. 58~59 (in Chinese)  
袁希光. 传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986. 58~59