

## 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的传感系统

李 强<sup>1,2</sup>, 黄泽铎<sup>1,2</sup>, 徐雅芹<sup>1,2</sup>, 张凌云<sup>1,2</sup>, 史 骥<sup>1,2</sup>, 王 智<sup>1,2</sup>

- (1. 北京交通大学 理学院 光信息科学与技术研究所, 北京 100044;
2. 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 基于单模-多模-单模光纤(SMS)结构的模间干涉现象, 在外界环境变化时 SMS 光纤结构输出光场散斑图样的变化规律, 提出了一种用于振动、应力及温度检测的光纤传感系统。该系统使用光电二极管测量散斑图样部分固定区域的光功率变化, 即可得到施加在多模光纤上的外界应力, 通过 FFT 和 Hilbert 变换, 可得到外界振动(频率、幅度)和温度变化信息。对该系统的振动测量和温度测量进行定标后, 经实验研究测得, 该系统振动测量误差小于 0.7 Hz, 温度测量误差小于 5.0%。该系统结构简单, 成本低, 并可用于多参量的测量。

**关键词:** 光纤传感; SMS 光纤结构; 模间干涉; 应力; 振动; 温度

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1630-07

## Optical fiber sensing system based on multimode interference of single-mode-multimode-single-mode fiber structure

Li Qiang<sup>1,2</sup>, Huang Zejia<sup>1,2</sup>, Xu Yaqin<sup>1,2</sup>, Zhang Lingyun<sup>1,2</sup>, Shi Ji<sup>1,2</sup>, Wang Zhi<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In this article, we proposed an optical fiber sensing system for measuring vibration, strain and temperature based on the multimode interference of single-mode-multimode-single-mode (SMS) fiber structure, because the output optical power of the SMS fiber structure changed with the external environment parameters, such as vibration (frequency and amplitude), strain and temperature. From the variation of the output optical power, the strain on the multimode fiber could be obtained. The frequency and amplitude of the vibration and temperature of the SMS fiber structure could be obtained when FFT or Hilbert transformation was employed. With the calibration of the system, some cases of vibration and temperature change were measured with the error of less than 0.7 Hz and 5.0%, respectively. The SMS optical fiber sensing system can be used for multi-parameter measurements with extremely simple structure and low cost.

**Key words:** optical fiber sensing; SMS fiber structure; multimode interference; strain; vibration; temperature

收稿日期: 2013-09-10; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61077048); 北京市自然科学基金(4132035); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032); 基本科研业务费(2009JBM103, 2012JBM103); 北京交通大学大学生创新训练项目

作者简介: 李强(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感、光纤通信方面的研究。Email: lq0230@aliyun.com

导师简介: 王智(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光子集成、光纤通信、光纤传感方面的研究。Email: zhiwang@bjtu.edu.cn

## 0 引 言

自 1997 年,Denis Donlajić 等人第一次提出将 SMS 光纤结构用于微弯传感<sup>[1]</sup>,各国学者开始对 SMS 光纤结构进行广泛而深入的研究。基于多模光纤模间干涉的 SMS 光纤结构具有自身结构简单、成本低廉、重量轻、集成度好和不受电磁干扰等优点,目前已实现了折射率、应力、温度、振动、位移等的测量<sup>[2-9]</sup>。参考文献[2]使用 FBG 和 SMS 的复合结构,实现了折射率测量的温度校准,在外界折射率范围为 1.33~1.39 和 1.40~1.45 时,灵敏度分别达到 200 nm/RIU 和 800 nm/RIU。参考文献[3]介绍了一种基于 SMS 光纤结构的光纤应变传感器,其灵敏度是 FBG 型应变传感器的 1.92 倍。参考文献[4]在实验中利用 5 cm 长的多模光纤对温度进行测量,达到了 15 pm/°C 的灵敏度。参考文献[9]使用 SMS 光纤结构用于位移和温度的同时测量,其灵敏度达到了 5.89 pm/μm 和 11.6 pm/°C。

参考文献[2-4],[7-9]采用光谱仪对信号光进行频谱分析,参考文献[5-7]采用光电探测器对信号光的输出功率进行探测,从而实现传感测量。采用光谱仪的传感系统存在体积大、价格昂贵、不利于系统集成等缺点,而采用光电探测器的传感系统则有效弥补了这些缺点。文中基于 SMS 光纤在外部环境发生变化时多模干涉的空间散斑图样光功率分布的变化规律,研制了用于振动、应力及温度测量的传感系统,对系统的工作原理和实验测试进行研究,实验结果表明系统精度高,振动频率测量误差小于 0.7 Hz,温度测量误差小于 5.0%。该传感系统与传统的单模光纤传感系统相比具有结构简单,集成度高的优点<sup>[10-11]</sup>,可用于振动、应力及温度等多个物理量的测量。

## 1 传感原理

SMS 光纤结构如图 1 所示。激光器输出光经输

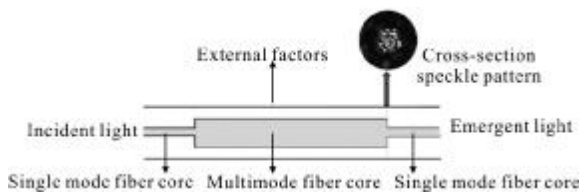


图 1 SMS 光纤结构与散斑

Fig.1 SMS fiber structure and speckle pattern

入单模光纤耦合进入多模光纤,激励多模光纤中大量模式传输,这些模式相互干涉,在光纤横截面上形成不同的干涉图样,即散斑,通过输出单模光纤耦合某局部区域的光强输出。

以多模光纤中的基模为参考,第  $i$  阶高阶模式的横向电场矢量和相对基模的相位差分别记为  $E_i(x,y)$  和  $\Delta\varphi_i$ ,以  $i=0$  表示基模,即  $\Delta\varphi_0=0$ 。如果多模光纤中共有高阶模  $N$  个,那么在输出端横截面  $S$  区域内检测到的光功率可以表示为:

$$P = \int_S \left| \sum_{i=0}^N \vec{E}_i(x,y) e^{j\Delta\varphi_i} \right|^2 ds = \sum_{i=0}^N \int_S |\vec{E}_i|^2 ds + 2 \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \int_S \vec{E}_i \cdot \vec{E}_j d\text{scos}(\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_j) \quad (1)$$

公式(1)取一阶近似,可得到如下简单形式,

$$P = \sum_{i=0}^1 \int_S |\vec{E}_i|^2 ds + 2 \int_S \vec{E}_0 \cdot \vec{E}_1 d\text{scos}(\Delta\varphi_1) = A + B\text{cos}(\Delta\varphi_1) \quad (2)$$

由公式(1)知,散斑的空间分布形式由激励条件(单模光纤到多模光纤的耦合)和多模光纤中众多模式之间的相位差决定。如果  $S$  区域为整个横截面,公式(1)右侧第二项积分因模式的正交性而为零,检测到的总光功率不变;但是,如果利用单模光纤检测多模光纤横截面部分区域,检测到的光功率  $P$  将与模式之间的相位差有关。在耦合条件不变的情况下,当多模光纤所处的外界环境未发生改变时,使用文中系统测得的光功率曲线接近于一条水平的直线,这说明多模干涉具有很高的稳定程度。当外界环境因素发生改变时,检测光功率的变化即可获得模式之间的相位差的变化,进而解调得到引起相位差变化的外部因素,最终实现振动、应力及温度的检测。

当多模光纤受到振动时,由于振动加速度使光纤内应力变化为  $F(t)$ ,由此而引起的两个模式间的相位差随之线性变化,为

$$\Delta\varphi = \gamma F(t) \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为与光纤材料有关的常数。将输出光功率经滤波、零均值后进行 FFT 处理,可得到对应的振动信息。

当多模光纤所处环境温度变化时,由于热光效

应和热胀冷缩,纤芯折射率和光纤长度均发生变化。由温度变化引起两个模式之间的相位差<sup>[8]</sup>为:

$$\Delta\varphi=k\beta\Delta T,\beta\equiv(a_T+C_T)\Delta n_{T_0}L_{T_0} \quad (4)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为真空中光的波长; $\Delta T$ 为温差; $L_{T_0}$ 为初始温度 $T_0$ 时光纤长度; $\Delta n_{T_0}$ 为初始温度时的有效折射率差; $C_T$ 为折射率温度系数,约为 $1.0\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ; $a_T$ 为热膨胀系数,约为 $5.0\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ <sup>[4]</sup>。将输出光功率经滤波、零均值后进行 Hilbert 变换,获得相位信息,从而得到对应的温度变化。

## 2 实验系统

### 2.1 系统结构

图 2 为笔者搭建的光纤传感系统。1 550 nm DFB 激光器输出功率约为 10 mW,SMS 光纤结构由 G.652 标准单模光纤和 50/125 阶跃型多模光纤构成,数字信号处理部分由 PIN、数据采集卡和计算机(Labview 软件)组成。

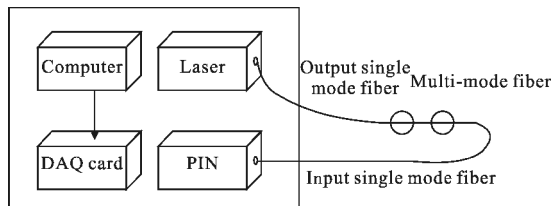


图 2 SMS 光纤传感实验系统装置

Fig.2 Setup of the SMS fiber sensing system

传感部分的多模光纤置于工作环境中,激光器输出光经 SMS 传输,外界环境因素的变化引起多模光纤输出光场的散斑图样空间分布的变化,经输出单模光纤接收横截面内部分光场功率,该光信号随外界环境参数而变,光信号经 PIN 转换为电信号,由数据采集卡实现 A/D 转换和存储,并通过 USB 接口传送到计算机,最终利用 Labview 和 Matlab 软件进行相应的数据处理,实现对外界环境参数的检测。

### 2.2 系统定标

为了应用 SMS 光纤结构进行实际的振动和温度测量,首先利用频率已知的激振器作振源对该系统进行频率定标,利用温度计对该系统进行温度测量的定标。

#### 2.2.1 频率定标

将 SMS 光纤结构的多模光纤部分绕圈固定于

平整镜面,将镜面固定于激振器振子表面。激振器由信号发生器驱动,调整信号发生器输出某一幅度和频率的正弦波,激振器振子以该频率振动,文中研制的传感系统测得的光功率将随之改变。对输出光功率(测得的是与其对应的电压)进行 FFT 处理,即可得到其频谱,从而测得振动频率。在输出频率为 30~200 Hz 情况下,实验测得的频率和信号发生器输出信号频率(理论值)之间的关系如图 3 所示。

图中横坐标为该系统测得的频率,纵坐标为信号发生器输出频率。图 3 中拟合直线方程为  $y=x-0.0433$ , $R^2=1$ ,这表明线性关系很好,此传感系统在实验频率范围内具有很高精度。在频率定标测量数据中,最大频率误差为 0.4 Hz。

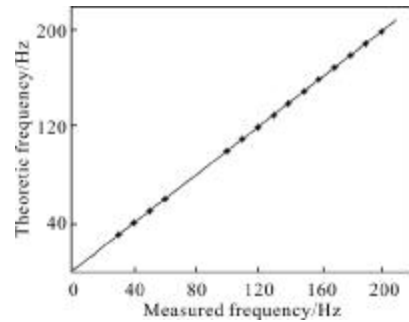


图 3 振动频率定标曲线

Fig.3 Frequency calibration of SMS sensing system

#### 2.2.2 温度定标

文中用于测量温度的多模光纤部分的长度为 10 m。由于 SMS 光纤结构在测量温度线性变化过程中精度很高,使用线性升温 and 降温过程对该系统定标<sup>[12]</sup>。实验过程中,为了使光纤受热均匀,将多模光纤放置于水槽中,通过调节水温来实现光纤的升温 and 降温过程。对输出光功率进行 Hilbert 变换,得到相位差变化,与温度计测量得到的温差值进行线性拟合,进而得到公式(4)中的  $k\beta$  系数。

图 4(a1)、(b1)、(a2)、(b2)分别为线性升温、线性降温过程中单模光纤耦合输出的电压-时间曲线和 Hilbert 变换后的相位差-时间曲线。其中线性升温过程经 130 s,水温从 40 $^\circ\text{C}$ 上升到 77 $^\circ\text{C}$ (实验中每隔 10 s 记录温度计示数);线性降温过程经 280 s,水温从 76 $^\circ\text{C}$ 下降到 50 $^\circ\text{C}$ (实验中每隔 20 s 记录温度计示数)。

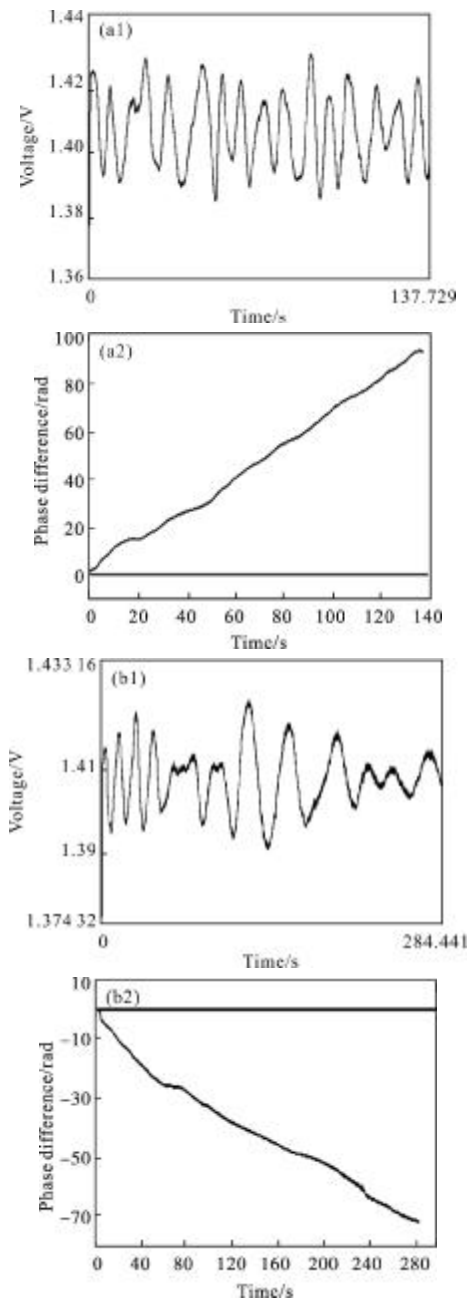


图 4 线性升温(a1)、(a2)和线性降温(b1)、(b2)时,电压信号和 Hilbert 变换得到的相位差随时间变化过程  
 Fig.4 Voltage and phase difference by Hilbert transform when temperature is linearly rising (a1),(a2) or linearly falling (b1),(b2)

将以上两组实验中温度计测量得到的温差值与对应时间的相位差值进行数据拟合,得到拟合方程为  $y=2.5347x$ , 相关系数  $R^2=0.9108$ , 如图 5 所示。这表明,相位差与温差具有较好线性关系,且可得定标系数  $k\beta=2.5347$ 。文中基于该 SMS 光纤结构的温度测量均采用这一定标系数。

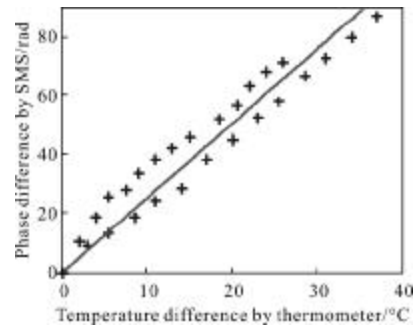


图 5 光纤测量相位差相对温度计测量值的定标  
 Fig.5 Calibration between phase difference measured by SMS and temperature difference measured by the thermometer

### 3 实验测试

经过定标后,笔者使用该传感系统,首先进行了简单的应力实验。应力检测是边界与安防的重要内容,基于 SMS 光纤结构的应力检测具有实时性,而且精度高。图 6 是 SMS 光纤结构的多模光纤受到外界应力时光功率信号对应的电压幅值变化。图中显示,在 1.6 s 时外界对多模光纤施加了应力,在 3.6 s 时开始撤除压力,从这一实验结果可以看出,SMS 结构可实现快速实时应力检测,而且灵敏度很高。

在此基础上,基于 SMS 光纤结构进行了振动和温度传感的实验。

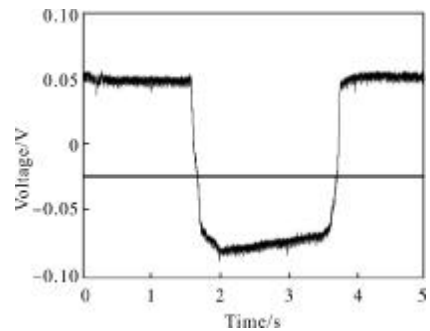


图 6 施加应力时光功率电压信号随时间的变化曲线  
 Fig.6 Voltage with respect to applied strain

#### 3.1 音频振动测量

以音响作为振源,将 SMS 光纤结构的多模光纤部分粘贴固定于音响振动膜表面,由计算机驱动音响以一定频率振动。实验测得音响的振动频率与实际播放音频频率的关系曲线如图 7 所示,实测频率与实际播放频率的最大频率误差为 0.7 Hz,拟合直线方程为  $y=1.007x-0.0348$ ,  $R^2=1$ 。这些结果表明该

传感系统在振动频率为 10~1 000 Hz 范围内具有很高精度,少量误差主要来源于音响的振动通过粘贴用的胶传递到光纤时的一些不稳定因素,如胶的强度、均匀性等。

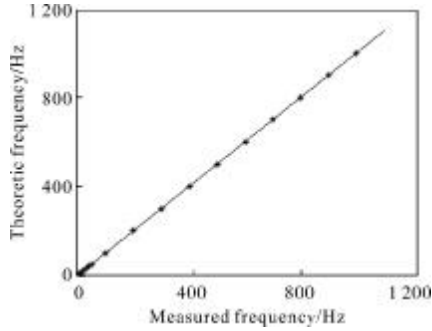


图 7 实测音响振动频率与播放音频频率之间的关系曲线

Fig.7 Curve between the sound's frequency measured by the SMS sensing system and standard output frequency

### 3.2 悬臂梁振动测量

在悬臂梁振动测量时,将 SMS 光纤结构的多模光纤部分粘贴于悬臂梁上,在悬臂梁末端悬挂固定质量砝码后瞬间释放使其振动。通过悬挂同一质量砝码,改变悬臂梁臂长来验证悬臂梁的臂长与固有频率的关系;通过固定悬臂梁臂长,改变悬挂砝码质量来研究悬挂砝码质量与振动幅度之间的关系。

实验测得,当臂长为 36 cm 时,悬臂梁固有频率为 5.8 Hz,与悬挂砝码质量无关。图 8(a)、(b)是砝码质量 50 g 时测得光功率电压信号和经 FFT 后得到

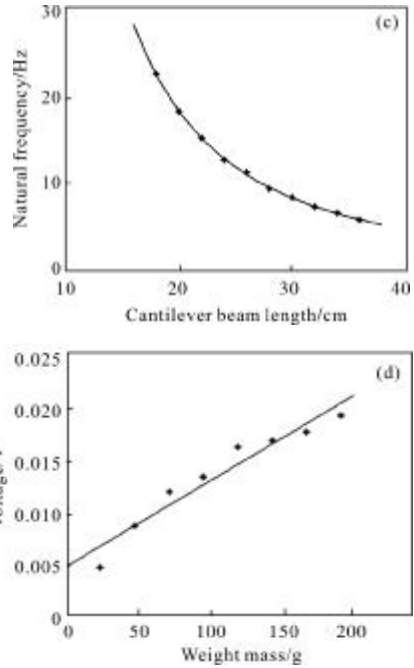
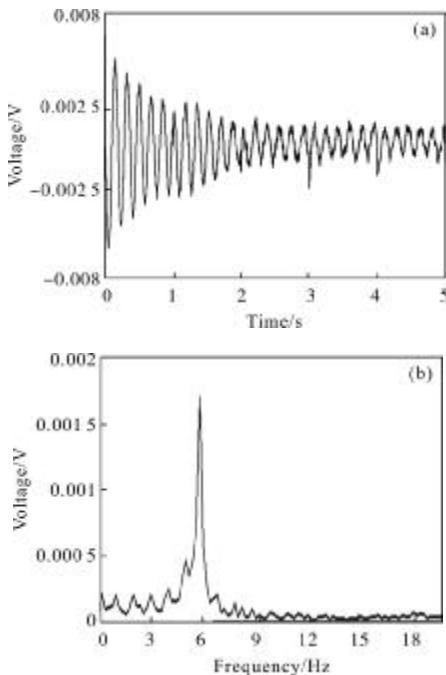


图 8 悬臂梁臂振动测量的实验结果

Fig.8 Measurements of cantilever beam's vibration

的频谱;保持砝码质量不变,改变悬臂梁长度,得到悬臂梁固有频率与臂长的关系,如图 8(c)散点。已知悬臂梁固有频率(Hz)与臂长 L(cm)的理论关系式为  $\omega \propto L^{-2}$ ,对实验数据进行拟合,得到曲线方程为  $\omega = 7\,207.6/L^2 + 0.3, R^2 = 0.999\,8$ 。悬臂梁臂长 36 cm 时,改变砝码质量,检测到光功率电压信号幅度与砝码质量的关系,见图 8(d),图中散点为实验数据,直线为线性拟合方  $y = 7.842\,9 \times 10^{-5}x + 0.004\,9, R^2 = 0.966\,2$ ,光功率信号电压幅度随悬挂砝码质量增加而成线性增加,表明悬臂梁振幅与悬挂砝码质量成线性关系。

### 3.3 温度测量

基于温度定标系数  $k\beta = 2.534\,7$ ,分别对该 SMS 光纤结构进行自然快速升温测试和线性缓慢升温测试。

将已定标的多模光纤(室温 28 °C)放置于 75 °C(温度计测量值)的热水中,多模光纤温度将自然快速上升,输出单模光纤耦合输出的电压-时间曲线与经 Hilbert 变换后得到的温差-时间曲线如图 9(a1)、(a2)所示。多模光纤温度在 1.5~3 s 之间快速从室温上升,之后上升缓慢,整个自然快速升温过程中温度变化约为 45 °C,该结果与由温度计测量得到的温差(47 °C)相差 2 °C,误差约为 4.3%。

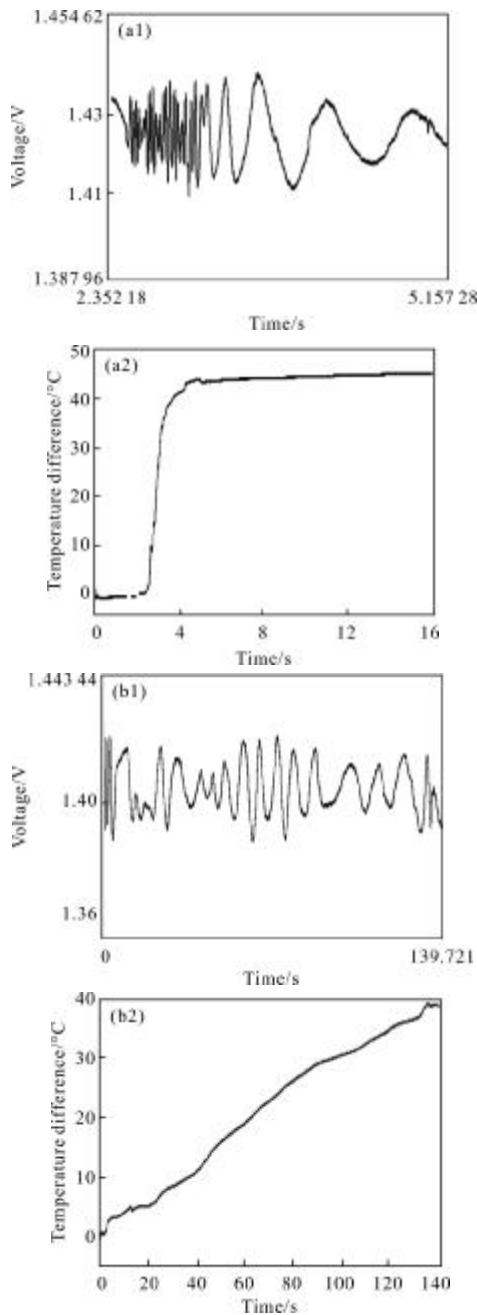


图 9 快速升温(a1)、(a2)和线性升温(b1)、(b2)时,电压信号和 Hilbert 变换得到的温度差随时间变化过程

Fig.9 Voltage and temperature difference by Hilbert transformation when the temperature is exponentially rapid rising (a1) and (a2) or linearly slow rising (b1) and (b2)

将已定标的多模光纤放置于 35 °C(温度计测量值)的温水中,利用加热板进行加热,经 140 s 水温上升至 75 °C(温度计测量值),此过程中多模光纤温度近似线性缓慢升温,输出单模光纤耦合输出的电压-时间曲线与经 Hilbert 变换后得到的温差-时间

曲线如图 9(b1)、(b2)所示。在整个线性缓慢升温过程中,多模光纤温度在 0~140 s 之间基本线性地从 0 °C 上升到 38 °C 左右,与温度计测量的温差(40 °C)相差 2 °C,误差约 5.0%。

### 4 结 论

文中基于 SMS 光纤的模间干涉,搭建了一套用于振动、应力及温度多物理量测量的光纤传感系统,对其工作原理和性能进行了研究。利用激振器进行频率定标后,对音响和悬臂梁的振动频率测量精度小于 0.7 Hz,悬臂梁振幅与施加砝码质量具有良好的线性关系。利用线性升温、降温过程进行温度定标,得到相位与温度之间的定标系数为 2.534 7,利用已定标的 SMS 光纤结构对自然快速升温 and 线性缓慢升温两个过程进行测试,实验误差小于 5.0%。

文中所搭建的振动、应力及温度光纤传感系统具有集成度高,成本低廉,抗干扰能力强,可实现多参量测量的优点,结合其他复杂的信号处理技术,还可实现温度、应力及振动的多参量同时测量,在环境监测、安防等领域有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Denis Donlagič, Miha Završnik. Fiber - optic microbend sensor structure[J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 837-839.
- [2] Rong Qiangzhou, Qiao Xueguang, Guo Tuan, et al. Temperature -calibrated fiber -optic refractometer based on a compact FBG -SMS structure [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(3): 030604.
- [3] Lv Peng, Li Enbang, Wang Wei, et al. Numerial simulation and experimental study of all -fiber multimode -interference -based strain sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(12): 199-1994. (in Chinese)
- [4] 吕鹏, 李恩邦, 王玮, 等. 光纤多模干涉应变传感器的数值模拟及实验研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(12): 1990-1994.
- [5] Li Enbang, Wang Xiaolin, Zhang Chao. Fiber -optic temperature sensor based on interference of selective higher -order modes [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9): 091119.
- [6] Agus Muhamad Hatta, Yuliya Semenova, Wu Qiang, et al. Strain sensor based on a pair of single -mode -multimode -single -mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme [J]. Applied Optics, 2010, 49 (3):

- 536-541.
- [6] Egorov F A, Potapov V T. Optical fiber vibration measuring transducers based on irregular multimode fibers [J]. *Technical Physics Letters*, 2012, 38(6): 527-530.
- [7] Wu Qiang, Yulia Semenova, Agus Muhamad Hatta, et al. Single-mode-multimode-single-mode fiber structures for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, 53(9): 2181-2185.
- [8] Saurabh Mani Tripathi, Arun Kumar, Ravi K Varshney, et al. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2348-2356.
- [9] Wu Qiang, Agus Muhamad Hatta, Wang Pengfei, et al. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 130-132.
- [10] Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al. All-fiber miniature Fabry-Perot interferometer as high temperature sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 106-109. (in Chinese)  
柯涛, 朱涛, 饶云江, 等. 全光纤微型法珀干涉式高温传感器 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 106-109.
- [11] Cui Wenhua, Chen Zhibing. Study on distributed optical fiber temperature measuring and warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 175-178. (in Chinese)  
崔文华, 陈志斌. 分布式光纤温度监测与报警系统的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(2): 175-178.
- [12] Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, et al. Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 198-203. (in Chinese)  
黄泽钹, 李强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 198-203.