

# 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究

黄泽铎 李 强 徐雅芹 张凌云 史 冀 刘岚岚 赵红敏 范 玲 王 智

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所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(SMS)光纤输出光功率随温度的变化规律,提出了一种温度测量的理论模型,并实现了一种新型的测温系统。通过测量光功率变化的相位即可得到与之呈线性关系的温度变化。通过两个温度变化过程对该系统进行定标,得到相位与温度之间的定标系数为 2.5347。对自然快速升温 and 线性缓慢升温两个过程进行了实验测试,系统误差小于 5%。

**关键词** 光纤光学; 光纤温度传感; 单模-多模-单模光纤结构; 模间干涉; Hilbert 变换

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0605001

## Research on Temperature Sensing Characteristics Based on Modular Interference of Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber

Huang Zejia Li Qiang Xu Yaqin Zhang Lingyun Shi Ji Liu Lanlan  
Zhao Hongmin Fan Ling Wang Zhi

(Key Laboratory on Luminescence and Optical Information of Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** A theoretical model is proposed and a novel system is built for measuring temperature based on the change rule for output power of single-mode-multimode-single-mode (SMS) fiber with temperature. The new measuring system can get the variation of the temperature which has a linear relationship with the output power by measuring the phase change of the output power. The calibration coefficient between the phase and the temperature is 2.5347 for a particular SMS fiber by comparing the two temperature variation. Then, a naturally rapid warming and a linearly slow warming of the temperature are checked by the SMS fiber and a thermometer. It is shown that the error is less than 5%.

**Key words** fiber optics; optical fiber temperature sensor; single-mode-multimode-single-mode fiber structure; modular interference; Hilbert transformation

**OCIS codes** 060.2300; 060.2310; 060.2370; 120.6780; 120.6810

## 1 引 言

目前,基于多模光纤模间干涉的单模-多模-单模(SMS)光纤结构由于其自身结构简单、成本低廉、重量轻、集成度好和不受电磁干扰等优势而成为光纤传感领域一个较为活跃的研究方向。基于 SMS 光纤结构还可实现耦合器、光开关、调制器、带通滤波器、分

光计以及光纤透镜等<sup>[1]</sup>。利用 SMS 光纤结构的应力传感器的灵敏度是利用光纤 Bragg 光栅(FBG)的应力传感器的两倍<sup>[2]</sup>。基于 SMS 光纤结构的传感器件目前仍主要用于应力和振动测量。虽然基于 FBG 和背向散射(Rayleigh、Brillouin、Raman)的传感技术仍是光纤温度传感的主流技术,且已经相对成熟,但是,

**收稿日期**: 2012-11-15; **收到修改稿日期**: 2013-02-02

**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),中央高校基本科研业务费(2009JBM103,2012JBM103),北京交通大学大学生创新训练项目资助课题。

**作者简介**: 黄泽铎(1991—),男,本科,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: xiaoxiaodeheikuai@163.com

**导师简介**: 王 智(1971—),男,博士,教授,主要从事光子集成、光纤通信、光纤传感、全光信号处理及全光网、特种光纤等方面的研究。E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号:S040421081S)

基于 SMS 光纤结构的温度传感器也逐渐开始引起人们的关注。温度变化时 SMS 光纤结构输出干涉光谱会发生蓝移或红移,利用光谱测量技术(如光谱仪等)可实现温度的高灵敏度传感。文献[3]在实验中利用 5 cm 长的多模光纤达到 15 pm/°C 的灵敏度。文献[2]分别对掺杂 GeO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的多模光纤进行研究后发现随着温度的升高,输出光谱分别出现蓝移和红移。文献[4]利用芯径为 125 μm 的无包层多模光纤(MMF)制作 SMS 光纤结构,当温度从 25 °C 上升到 375 °C 时,输出光谱主波长红移了 4.5 nm。文献[5]将 SMS 光纤结构同时应用于温度和应力测量,其灵敏度分别为 58.5 pm/°C 和 18.6 pm/με。

基于 SMS 光纤结构的温度传感技术利用光谱仪对信号光进行频谱分析,存在体积大、价格昂贵、不利于系统集成等缺点。基于 SMS 光纤结构在温度变化时输出光功率的变化规律,提出并搭建了一种新的温度传感系统,对系统的工作原理、定标和实验测试进行研究,获得了精度 5% 以内的测量结果。该系统集成度高、成本低,不仅可用于测量温度和温度变化,也可结合相应的数据处理技术实现应力和振动的测量。

## 2 传感原理

### 2.1 SMS 光纤结构

SMS 光纤结构由两段单模光纤和熔接在它们中间的一段多模光纤构成,如图 1 所示。激光器输出光经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,输出端的单模光纤耦合某局部区域的光强输出。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)和众多模式之间的相位差决定,因此,在激励条件不变的情况下,检测光功率的变化即可获得模式之间的相位差

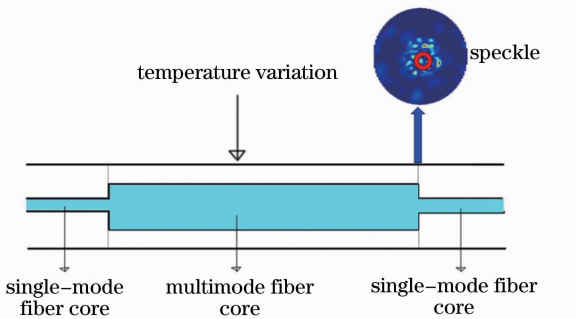


图 1 SMS 光纤结构与散斑

Fig. 1 SMS fiber structure and the speckle pattern

的变化,进而解调得到引起相位差变化的外部因素(如环境温度、光纤应力等),实现温度、应力的检测。

### 2.2 温度传感原理

文献[6~8]对 SMS 光纤结构的模式激励机理及实验验证进行了研究,本文在此基础上加以简化,讨论了 SMS 结构的温度传感原理。当多模光纤所处环境温度发生变化时,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,温度  $T$  时模式有效折射率  $n$  和光纤长度  $L$  的变化可用下式表示<sup>[1]</sup>:

$$n = n_0 + (dn_0/dT)(T - T_0) = [C_T(T - T_0) + 1]n_0, \quad (1)$$

$$L = L_{T_0} + (dL_0/dT)(T - T_0) = [\alpha_T(T - T_0) + 1]L_{T_0}, \quad (2)$$

式中  $n_0$  为某一模式在  $T_0$  温度时的有效折射率,  $L_{T_0}$  为初始温度  $T_0$  时的光纤长度,  $C_T = \frac{1}{n_0} \cdot \frac{dn_0}{dT}$  为折射率温度系数,约为  $1.0 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ ,  $\alpha_T = \frac{1}{L_{T_0}} \cdot$

$\frac{dL_{T_0}}{dT}$  为热膨胀系数,约为  $5.0 \times 10^{-7} (\text{°C})^{-1}$ [3]。若两个模式的有效折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,有效折射率差  $\Delta n = n_1 - n_2$ ,

$$\Delta n(T) = [C_T(T - T_0) + 1]\Delta n_{T_0}, \quad (3)$$

$\Delta n_{T_0}$  为初始温度时的有效折射率差。两个模式之间的相位差  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = k\Delta nL, \quad (4)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为真空中光的波长。当温度  $T$  变化时,有效折射率差  $\Delta n$  和光纤长度  $L$  也随之改变,对(4)式进行微分,可得两模式之间相位差的变化:

$$d\varphi = k\Delta n(T)dL + kL(T)d\Delta n = k[\Delta n(T)\alpha_T L_{T_0} + L(T)C_T \Delta n_{T_0}]dT. \quad (5)$$

由于  $\Delta n(T) \approx \Delta n_{T_0}$ ,  $L(T) \approx L_{T_0}$ , (5)式可简化为

$$d\varphi = k(\alpha_T + C_T)\Delta n_{T_0} L_{T_0} dT. \quad (6)$$

令  $\beta = (\alpha_T + C_T)\Delta n_{T_0} L_{T_0}$ , 则(6)式可进一步简化为

$$d\varphi = k\beta dT. \quad (7)$$

因为(7)式中  $k$  和  $\beta$  均为常数,故可表示为如下差分形式:

$$\Delta\varphi = k\beta\Delta T, \quad (8)$$

式中  $\Delta\varphi$  为相对相位差,  $\Delta T$  为温差。

以基模为参考,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

$$P = \iint_S \left| \sum_{i=0}^N \mathbf{E}_i(x, y) \exp(i\Delta\varphi_i) \right|^2 ds = \sum_{i=0}^N \iint_S |\mathbf{E}_i|^2 ds + 2 \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \iint_S \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j ds \cos(\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_j). \quad (9)$$

如果  $S$  区域为整个横截面, (9) 式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。由 (8) 式知道, 模式之间的相位差与温度变化成正比, 因此, 利用 SMS 光纤结构检测光功率, 通过相应的数字信号处理技术可以测量环境温度变化。

实验中, 输入、输出单模光纤与多模光纤均采用轴对准熔接, 这样, 多模光纤中激励的众多模式中, 较低阶模式的能量较高, 高阶模式的能量较低。因此, 对 (9) 式取一阶近似, 可得到如下简单形式:

$$P = \sum_{i=0}^1 \iint_S |\mathbf{E}_i|^2 ds + 2 \iint_S \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1 ds \cos(\Delta\varphi_1) \equiv A + B \cos(\Delta\varphi_1). \quad (10)$$

在自然升温、降温过程中, 温度变化可表示为

$$\Delta T(t) = (T_m - T_0)[1 - \exp(-t/\tau)], \quad (11)$$

式中  $T_m$  为末温,  $\tau$  为反应温度变化快慢的时间常数。

在线性升温、降温过程中, 温度变化可表示为

$$\Delta T(t) = (T_m - T_0)(t/\tau). \quad (12)$$

结合 (8)、(11)、(12) 式, 用 Matlab 对 (10) 式进行仿真, 令  $A=5, B=1, k\beta=1$ , 温差  $T_m - T_0 = 40^\circ\text{C}$ , 即  $k\beta(T_m - T_0) = 40$ , 自然升温 and 线性升温时, 得到的

光功率随时间变化的情况分别如图 2(a) 和 (b) 所示。分别对图 2(a) 和 (b) 中的光功率幅值进行 Hilbert 变换, 可以获得对应的相位变化, 从而得到对应的温度变化。图 3(a) 和 (b) 分别对应自然升温 and 线性升温时的仿真结果, 图中同时给出了对功率幅值进行 Hilbert 变换的结果和理论式 (11)、(12) 式的结果。显然, 自然升温时有明显误差, 但仍在 5% 以内, 线性升温过程的精度很高, 二者几乎一致。

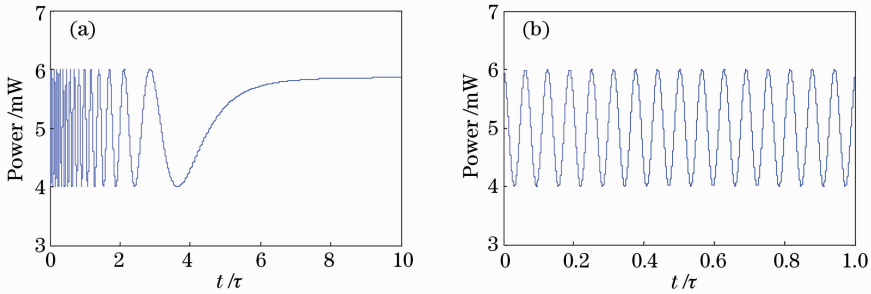


图 2 光功率随时间变化关系。(a) 自然升温; (b) 线性升温

Fig. 2 Optical power changes over time. (a) Natural warming; (b) linear warming

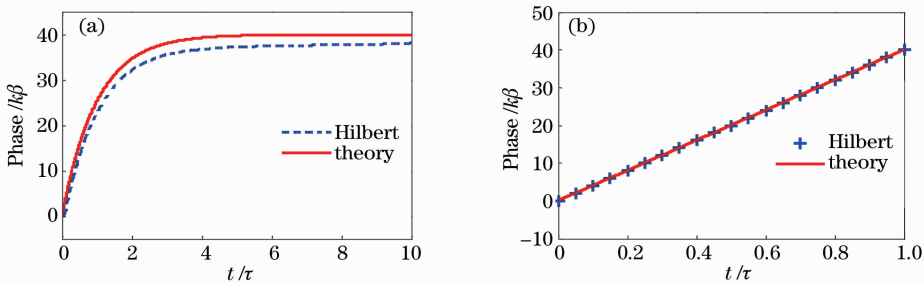


图 3 Hilbert 变换后相位变化与理论相位变化。(a) 自然升温; (b) 线性升温

Fig. 3 Phase difference by Hilbert transformation and theoretical phase difference.

(a) Natural warming; (b) linear warming

### 3 定标实验

为了使光纤尽可能受热均匀, 实验研究中将光纤置于水槽中, 通过调节水的温度来实现光纤的升温 and 降温过程。该实验系统装置如图 4 所示, 光源

是 1550 nm 分布反馈 (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, 置于水槽中的多模光纤长度为 10 m (实验中, 为降低振动等环境因素对

传感系统的干扰,将光纤绕成直径约为 8 cm 的圆)。温度计的量程为 0 ℃~100 ℃,数字信号处理部分由光电转换器 (PIN)、数据采集卡和计算机 (Labview 软件)组成,激光器和信号采集部分在系统集成箱中。

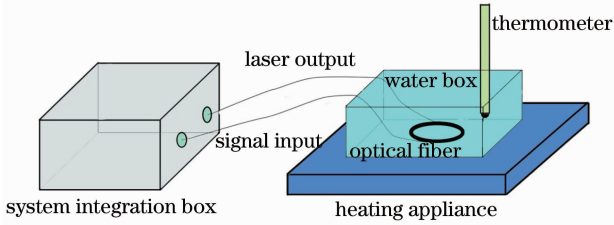


图 4 实验系统装置

Fig. 4 Experiment system installation drawing

基本工作过程是:加热板对水槽中的水加热,测温部分的多模光纤置于水槽中,光纤温度随着水温发生变化,激光器输出光经 SMS 光纤结构传输,光纤温度的变化引起输出光功率的变化,光信号经 PIN 转换为电信号,再由数据采集卡将模拟信号转换成数字信号,通过 USB 接口传送到计算机,最终利用 Labview 软件进行 Hilbert 变换和相应信号处理,得到温度的变化量。实验中,同时记录温度计的示数,用于与光纤测量结果对比。

由前文分析可知,SMS 光纤结构测量温度线性变化时精度很高,因此,利用线性升温 and 降温过程对该测量系统定标,即对输出光功率进行 Hilbert 变换得到相位差,与温度计示数进行线性拟合得到(8)式中的系数  $k\beta$ 。

线性升温实验中,光纤置于 40 ℃温水中,利用加热板对水加热,经过 130 s 后水温上升到 77 ℃

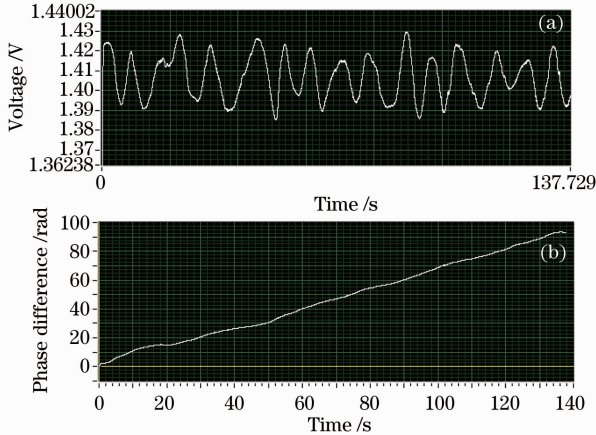


图 5 线性升温过程中(a)光纤输出的电压信号和 (b)Hilbert 变换得到的相位差随时间的变化曲线

Fig. 5 (a) Voltage and (b) phase difference by Hilbert transformation versus time when linear warming

(温度计测量值)。图 5 是线性升温过程中光纤输出的电压-时间曲线和 Hilbert 变换后的相位差-时间曲线;实验中每隔 10 s 记录温度计示数。

线性降温实验中,光纤置于 76 ℃温水中,光纤温度随着水温逐渐下降。经过 280 s 后水温下降到 50 ℃(温度计测量值)。图 6 为线性降温中光纤输出的电压-时间曲线和 Hilbert 变换后的相位差-时间曲线;实验中每隔 20s 记录温度计示数。

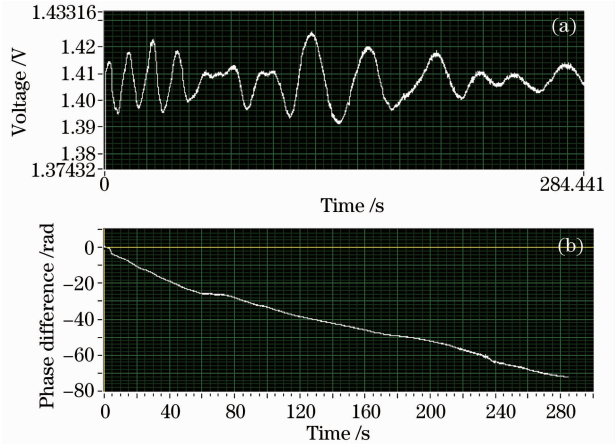


图 6 线性降温过程中(a)光纤输出的电压信号和 (b)Hilbert 变换得到的相位差随时间的变化曲线

Fig. 6 (a) Voltage and (b) phase difference by Hilbert transformation versus time when linear cooling

将以上两组实验中温度计测得的温差值与对应时间的相位差值合并在一起,如图 7 的散点所示,对这些数据进行线性拟合,得到拟合方程为  $y = 2.5347x$ ,相关系数  $R^2 = 0.9108$ 。这些实验结果表明,相位差与温差呈线性关系,且定标系数  $k\beta = 2.5347$ ,后续基于该 SMS 光纤结构的实验测量均采用这一定标系数。

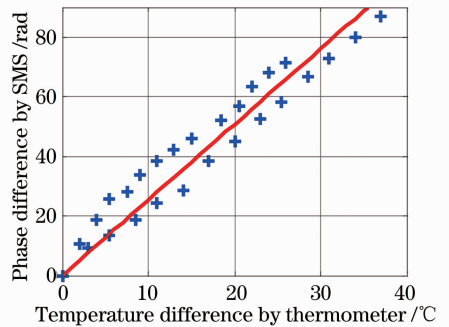


图 7 光纤测量相位差相对温度计测量值的定标

Fig. 7 Calibration between the phase difference measured by SMS and the temperature difference measured by thermometer

## 4 实验测试

分别对定标的 SMS 光纤结构进行自然快速升温测试和线性缓慢升温测试。

自然快速升温实验中,将光纤(室温  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ )放入  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (温度计测量值)的热水中,光纤温度将自然快速上升,光纤输出的电压-时间曲线和 Hilbert 变换后得到的温差-时间曲线如图 8 所示,光纤温度在  $1.5\sim 3\text{ s}$  之间快速从室温上升,之后上升速度缓慢,整个升温过程温度变化约  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该结果与由温度计测量的温差( $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ )相差  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,误差约  $4.4\%$ 。

光纤放入水中这个过程对光纤有扰动,对实验结果会产生影响,图 8 中电压幅度波动较大,与图 5 差异明显,但是经 Hilbert 变换后,相位或温度变化曲线的测量值与理论值的一致性有了明显改善,这表明输出功率幅值的不稳定对测量结果的影响大大减弱。

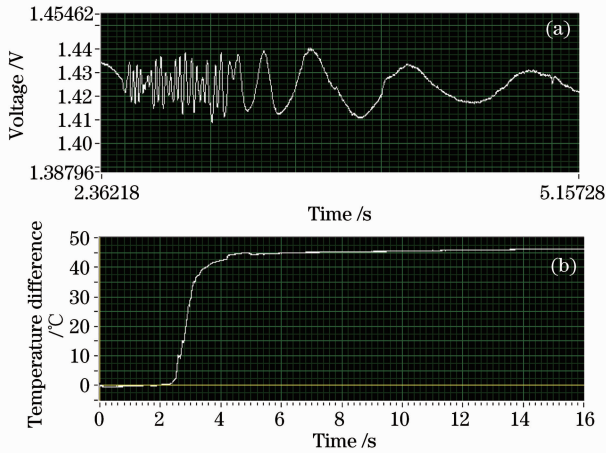


图 8 自然快速升温过程中(a)光纤输出的电压信号和 (b) Hilbert 变换得到的温度差随时间的变化曲线  
Fig. 8 (a) Voltage and (b) temperature difference by Hilbert transformation versus time when naturally rapid warming

线性缓慢升温实验中,将光纤置于  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  温水中,并利用加热板对水进行加热,经过  $140\text{ s}$  水温上升到  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (温度计测量值),这一过程中光纤的温度将随水温近似线性缓慢上升。线性缓慢升温中光纤输出的电压-时间曲线和 Hilbert 变换后的温差-时间曲线如图 9 所示。可以看出,在  $0\sim 140\text{ s}$  之间,光纤温度变化基本线性地从  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,该结果与温度计测量的温差( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )相差  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,误差约  $5\%$ 。

## 5 结果与讨论

图 5、图 6 和图 8、图 9 的实验测量输出光功率的电压幅值并不稳定,与图 3 所示的理论曲线有明显差别,主要有两个原因:1) 理论分析时取一阶近

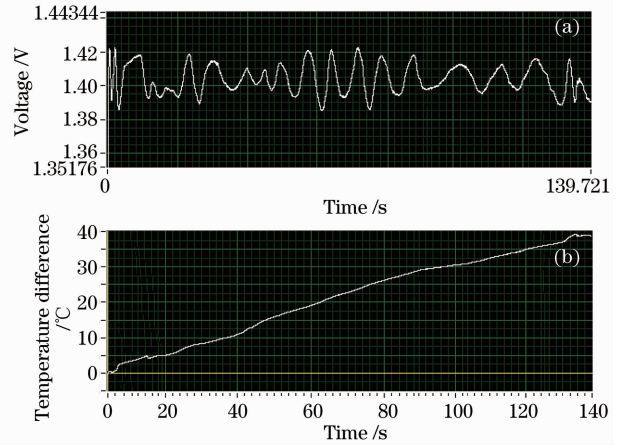


图 9 线性缓慢升温过程中(a)光纤输出的电压信号和 (b) Hilbert 变换得到的温度差随时间的变化曲线  
Fig. 9 (a) Voltage and (b) temperature difference by Hilbert transformation versus time when linearly slow warming

似,只考虑基模和最低阶高阶模的干涉,认为相位和温度变化成正比,输出功率与相位是三角函数关系。但实际存在多个模式的干涉,尽管每两个模式之间的相位差与温度变化仍然成正比,但总的干涉输出散斑功率并不与某个相位差呈三角函数关系,而由(12)式决定,因此,实际测量结果的波动性反映了多模干涉的效果。2) 实验过程中,对光纤的任何接触操作都会对光纤施加应力,应力分布具有随机性,导致测量结果出现一些不规则波动。

尽管测量的光功率有明显波动,但是经 Hilbert 变换后的相位与温度的测量值的波动性要小得多,这也正是本文实现温度测量的优点之一。

对光纤输出的电压-时间信号进行 Hilbert 变换时,无法获得表征温度变化的方向,即通过 Hilbert 变换只能得到相位差或温差的大小,无法确定温度是升高还是降低。实验中的温度变化方向是已知的,所以该实验系统能得到升温或降温的测量结果。

## 6 结 论

基于 SMS 光纤在温度变化时输出光功率的变化规律,提出了一种温度测量的理论模型,并实现了一种新型的测温系统。只需测量光功率变化的相位,即可得到与之呈线性关系的温度变化。通过线性升温 and 线性降温两个过程对该系统进行定标,得到相位与温度之间的定标系数为  $2.5347$ 。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了实验测试,系统误差小于  $5\%$ 。

基于 SMS 研究的温度传感器集成度高,成本低

廉,抗干扰能力强,可实现较大范围的温度测量。由于光纤对外部应力敏感,采用适当的信号处理技术,该系统可用于应力和振动测量,通过盲信号分离等复杂的信号处理技术,还可实现温度、应力双参量同时测量。

### 参 考 文 献

- 1 S. M. Tripathi, A. Kumar, R. K. Varshney. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(13): 2348~2356
- 2 E. Li. Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13-16): 1266~1268
- 3 E. Li, X. L. Wang, C. Zhang. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(9): 091119
- 4 J. G. Aguilar-Soto, J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon *et al.*. Multimode interference fiber optic temperature sensor[C]. Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP), 2010
- 5 Yu Liu, Li Wei. Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(13): 2516~2519
- 6 W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477
- 7 Q. Wang, G. Farrell, W. Yan. Investigation on single-mode multimode single-mode fiber structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(5-8): 512~519
- 8 Jianzhong Zhang, Weimin Sun, Libo Yuan *et al.*. Design of a single-multimode-single-mode filter demodulator for fiber Bragg grating sensors assisted by mode observation[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(30): 5642~5646

栏目编辑:王晓琰