

# 双波长偏振干涉型应变与温度同时测量的光纤传感器\*

马建军 汤伟中 周文

(浙江大学信电系电子信息技术研究, 杭州 310027)

**摘 要** 针对保偏光纤给出了利用双波长偏振干涉型传感器同时测量应变和温度的一般理论, 并通过实验证明了这一理论的可行性。对 30 cm 长的 bow-tie 型光纤的实验结果表明, 在温度变化 70℃, 光纤长度变化 500 μm 测量范围内, 最大误差分别为 ±2.5℃ 和 ±8 μm。由于这一传感器只利用了正交基模的偏振干涉, 因此具有较好的稳定性。

**关键词** 光纤传感器, 偏振传感器, 应变测量, 温度测量。

## 1 引 言

灵巧结构是未来航空或航天飞行器以及民用建筑、桥梁等大型工程结构的重要发展方向。其主要概念是在结构材料内埋置传感器和执行器阵列以及微处理芯片, 实时监测和调整工程结构的载荷及工作状态, 形成所谓“自适应结构”。光纤传感器是最有希望的灵巧结构传感器。干涉型光纤应变(或压力)传感器是其中具有很大应用价值的类型。然而这种传感器的温度灵敏度很高, 成为应变(或压力)测量误差的主要来源。因此, 温度的补偿成为这类传感器能否实用的关键。

利用一根光纤实现应变和温度的同时测量显然是最为理想的, 近年来国外已有许多不同的方案得到了证明, 如椭圆芯光纤单波长双模干涉原理<sup>[1]</sup>、椭圆芯光纤双波长双模干涉与正交基模偏振干涉相结合的原理<sup>[2]</sup>、椭圆芯双模干涉与法布里-珀罗多光束干涉相结合的原理<sup>[3]</sup>等。本文将通过理论和实验证明, 利用保偏光纤, 可以摒弃双模干涉, 仍采用两个有一定间隔的波长, 但在这两个波长, 光纤均工作在单模态, 从而实现双波长偏振干涉型应变与温度的同时测量。

## 2 双波长偏振干涉型传感器同时测量应变和温度的一般理论

保偏光纤的双折射  $\Delta\beta$  是波长的函数<sup>[4]</sup>, 如果选择两个不同的波长  $\lambda_i > \lambda_c$  ( $i = 1, 2$ ,  $\lambda_c$  为光纤的截止波长), 可以写出一个普遍关系式  $\Delta\beta = \Delta\beta(\lambda_i)$  ( $i = 1, 2$ )。外界扰动可以改变双折射的值和光纤的长度, 从而引入相位变化为:

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-01-06; 收到修改稿日期: 1997-06-16

$$\delta[\Delta\Phi(\lambda_i)] = \delta[\Delta\beta(\lambda_i)]L + \Delta\beta(\lambda_i)\delta L \tag{1}$$

$L$  为光纤的长度。由(1)式可得到光纤伸长的灵敏度为:

$$\Lambda_{i,L} = \frac{\delta[\Delta\Phi(\lambda_i)]}{\delta L} = \frac{\delta[\Delta\beta(\lambda_i)]}{\delta L/L} + \Delta\beta(\lambda_i) \tag{2}$$

$\delta[\Delta\beta(\lambda_i)]/\delta\epsilon$  与光纤的泊松比、应光系数和纤芯平均折射率有关。同样由(1)式可得温度灵敏度为:

$$\Lambda_{i,T} = \frac{\delta[\Delta\Phi(\lambda_i)]}{\delta T} = \left[ \frac{\delta[\Delta\beta(\lambda_i)]}{\delta T} + \alpha\Delta\beta(\lambda_i) \right] L \tag{3}$$

$\alpha = \delta L/L\Delta T$  为光纤的热膨胀系数。 $\delta[\Delta\beta(\lambda_i)]/\delta T$  则与光纤的热光系数有关。

对于较小的光纤伸长和温度变化,可以忽略交叉灵敏度效应,从而相位变化可以表示为

$$\Delta\Phi_i = \Lambda_{i,T}\Delta T + \Lambda_{i,L}\Delta L, \quad i = 1, 2 \tag{4}$$

由(4)式可得到关于光纤伸长和温度变化的两个线性方程,可用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Phi_1 \\ \Delta\Phi_2 \end{bmatrix} = \Lambda \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{1,T} & \Lambda_{1,L} \\ \Lambda_{2,T} & \Lambda_{2,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中  $\Lambda$  为灵敏度矩阵。当由实验测得了相位变化后,便可由(5)式解出光纤伸长量(由  $\epsilon = \Delta L/L$  便可得到应变值)和温度值。

### 3 实验结果

实验装置如图 1 所示。由 He-Ne 激光器出射的光经起偏器 P、分光板 BS 和透镜入射到 bow-tie 光纤中。光纤的工作波长为 633 nm,其芯径为 2 μm,拍长在 633 nm 时小于 1.5 mm。起偏器用于旋转输入线偏振光的偏振面,使其与光纤的双折射本征轴成 45°角,从而对两个正交偏振基模同等激励。波长为 λ = 670 nm 的激光二极管 LD 出射的光经一个四分之一波片产生一束圆偏振光,同样对两个本征轴同等激励。检偏器 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 与光纤本征轴成 45°或 135°角,这样在输出端可以观察到最大的干涉对比度。两束输出光分别由两个分光板反射并由探测器 1 和探测器 2 分别接收。一段 30 cm 长的光纤作为传感部,其一端用环氧胶粘结在一个固定在平台上的金属棒上,另一端则固定在一个可移动的调节架上。同时这段光纤封闭在一个加温腔内。轴向拉伸的值用一个百分表来标定,温度值则由一个标准 PT 100 温度计来测定。两路信号通过光纤万用表由 X-Y 记录仪记录。

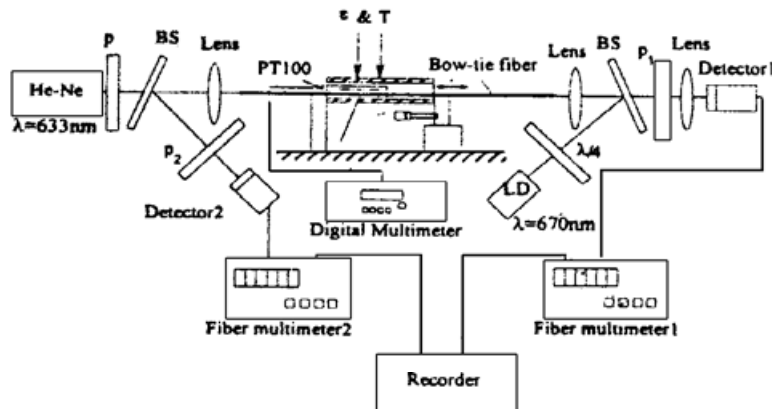


Fig. 1 Experimental setup

图 2 和图 3 给出了对光纤伸长和温度测量的实验结果。利用最小二乘线性拟合, 得到光

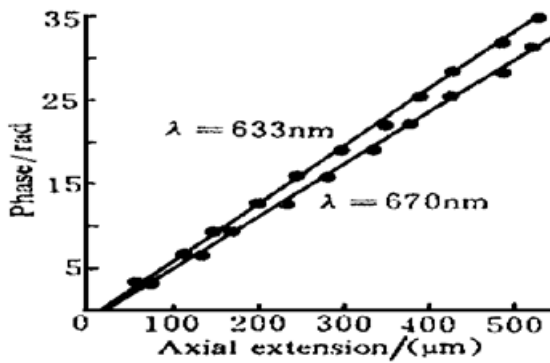


Fig. 2 Phase against axial extension for the dual-wavelength polarimetric sensor

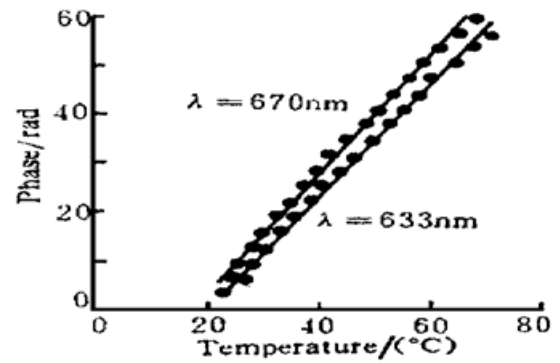


Fig. 3 Phase against temperature for the dual-wavelength polarimetric sensor

纤伸长和温度的灵敏度分别为:

$$\begin{aligned} \Lambda_{1, L} &= 0.0677 \text{ rad}/\mu\text{m} & (\lambda = 633 \text{ nm}) \\ \Lambda_{1, T} &= 1.156 \text{ rad}/^{\circ}\text{C} & (\lambda = 633 \text{ nm}) \\ \Lambda_{2, L} &= 0.0611 \text{ rad}/\mu\text{m} & (\lambda = 670 \text{ nm}) \\ \Lambda_{2, T} &= 1.229 \text{ rad}/^{\circ}\text{C} & (\lambda = 670 \text{ nm}) \end{aligned}$$

文献[5]中用 bow-tie 型光纤分别对应变和温度进行了测量, 并将获得的灵敏度数值与别人的结果作了比较。所列的典型数据为: 取 19 cm 长光纤, 应变灵敏度分别为 120 rad/mm、65 rad/mm、82.03 rad/mm、107.74 rad/mm; 温度灵敏度分别为 10.00 rad/m<sup>°C</sup>、4.99 rad/m<sup>°C</sup>、2.62 rad/m<sup>°C</sup>、4.35 rad/m<sup>°C</sup>、7.35 rad/m<sup>°C</sup>。将本文的结果折算成该长度后应变灵敏度为 42.9 rad/mm(对 633 nm 波长); 温度灵敏度为 3.85 rad/m<sup>°C</sup>, 显然, 应变与温度灵敏度与这些典型值均在同一量级, 它们之间的差异主要是由被测光纤的参数, 特别是光纤的拍长不同产生的。

## 4 讨 论

由图 2 和图 3 中线性拟合曲线与实验数据相比较, 在光纤伸长和温度的测量范围内(分别为 500 μm 和 70<sup>°C</sup>), 最大测量误差分别为 ±8 μm 和 ±2.5<sup>°C</sup>。当温度灵敏度的值均取 rad/<sup>°C</sup>, 而光纤伸长灵敏度的单位分别取 rad/μm 和 rad/cmm(1 cmm = 10 μm)时, 灵敏度矩阵的条件数是不同的, 分别为 245 和 7, 因此可以获得好条件的线性方程组。由于图 1 中的两个偏振传感器均工作于基模态, 因此与其它利用高阶模的传感器<sup>[1-3]</sup>相比, 其工作稳定性要好。

**结 论** 本文通过理论和实验证明了用双波长光纤偏振干涉传感器同时测量应变和温度的可行性。该传感器仅工作于基模态, 因此在实际应用中具有较强的适应性。

## 参 考 文 献

- [1] Shang-Yuang Huang, James N. Blake, Byoung Yoon Kim, Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **LT-1**: 23~ 33

- [2] Ashish M. Vengsarkar, W. Craig Michie, Ljilja Jankovic *et al.*, Fiber optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **LT-1** : 170~ 177
- [3] G. Z. Wang, A. B. Wang, K. A. Murphy *et al.*, Two-mode Fabry-Perot optical fiber sensors for strain and temperature measurement. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(20) : 1843~ 1845
- [4] J. Noda, K. Okamoto, Y. Sasaki, Polarization-maintaining fibers and their applications. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **LT-4** : 1071~ 1089
- [5] F. Zhang, J. W. Y. Lit, Temperature and strain sensitivity measurement of high-birefringent polarization-maintaining fibers. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(13) : 2213~ 2218

## Dual-Wavelength Optical Fiber Polarimetric Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature

Ma Jianjun    Tang Weizhong    Zhou Wen

(*Electronic Information Technology Laboratory, Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

(Received 6 January 1997; revised 16 June 1997)

**Abstract** A dual-wavelength polarimetric sensor for the simultaneous measurement of strain and temperature was demonstrated using a bow-tie fiber. In the measurement range of 500  $\mu\text{m}$  and 70 $^{\circ}\text{C}$  the maximum errors are  $\pm 8 \mu\text{m}$  and  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ , respectively. The sensor has a good stability because only orthogonally fundamental modes are used.

**Key words** optical fiber sensors, polarimetric sensors, strain measurement, temperature measurement.