

# 多参量同时测量的干涉型光纤传感器\*

马建军 汤伟中 周文

(浙江大学信息与电子工程学系电子物理技术研究所, 杭州 310027)

宋宗炎

(航天工业总公司北京遥测技术研究所, 北京 100076)

**摘 要** 提出用椭圆纤芯高双折射光纤偏振干涉和双模干涉结合的四参量以及双模干涉的多参量同时测量的传感理论和实验原理, 对交叉灵敏度作了分析, 同时给出了误差分析, 并结合理论模型对灵敏度矩阵的状态作了粗略估计。

**关键词** 光纤传感器, 多参量传感器。

## 1 引 言

在实际工作状态下, 作用于传感光纤的外界物理量一般有多个, 如轴向应变、径向应变、温度、弯曲、扭转、电场、磁场等, 光纤受扰部分传出的信号实际上是由这些物理量中的某几个作用的综合效应, 接收端如果不能加以区分, 将不能准确测量待测量的值。因此, 在一根光纤上实现多个参量的同时测量具有特别重要的意义。近年来研究的突出点有两个: 一是用椭圆纤芯高双折射光纤传感, 二是集中在应变和温度这两个最基本也最重要的物理量的同时测量上<sup>[1~6, 9, 12]</sup>。尽管应变和温度的同时测量已有多篇文献, 但真正的多参量同时测量的光纤传感器的研究尚未见报导。本文就此进行了理论探讨, 首先分析椭圆纤芯高双折射光纤的工作模式, 然后研究偏振干涉和双模干涉相结合及双模干涉实现多参量同时测量的原理, 并对交叉灵敏度、误差、灵敏度矩阵状态进行了分析。

## 2 工作原理

当归一化频率  $V$  为  $2.405 < V < 3.8$  时, 理想光纤可同时传播  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模, 分别为  $LP_{01}^e$ ,  $LP_{01}^o$  和  $LP_{11}^e$ ,  $LP_{11}^o$ ,  $LP_{11}^s$ ,  $LP_{11}^a$  偏振模。对于椭圆纤芯高线性双折射光纤, 不同偏振模有不同的传播常数, 偶和奇  $LP_{11}$  模将有不同的截止波长, 在某个波长范围可以只有 4 个偏振模沿波导传播, 即  $LP_{01}^e$ ,  $LP_{01}^o$ ,  $LP_{11}^e$ ,  $LP_{11}^o$  模<sup>[10]</sup>, 该波长范围由  $LP_{11}^e$  和  $LP_{11}^o$  的截止波长差所决定, 截止波长差的分离度将随纤芯椭圆度的增加而增加。例如一种保偏(Polaroid)光纤(芯径  $4.1 \times 2.2 \mu\text{m}$ ),  $LP_{11}^e$  截止波长约 633 nm,  $LP_{11}^o$  截止波长小于 488 nm, 故双模波长范围为 488~633

\* 本研究工作为国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年7月2日; 收到修改稿日期: 1995年9月22日

nm<sup>[13]</sup>。具有这种传播特性的光纤就是被广为研究的双模光纤,其传播常数分别用  $\beta_0, \beta_x, \beta_y, \beta_1$  表示,这 4 个偏振模均可沿光纤稳定传播<sup>[8]</sup>。

## 2.1 偏振干涉与双模干涉相结合的四参量传感原理

当双模波长范围的单色光入射到椭圆双模光纤,并沿光纤传播时,在无扰情形,接收端可以观察到偏振干涉和双模干涉;在外部扰动作用下,双折射变化  $\delta(\Delta\beta_i)$  和光纤长度变化产生相位差为

$$\delta(\phi_i) = \delta(\Delta\beta_i)L + \Delta\beta_i\delta L, \quad i = x, y, 0, 1 \quad (1)$$

其中  $\Delta\beta_x, \Delta\beta_y$  为模间双折射,  $\Delta\beta_0, \Delta\beta_1$  为偏振双折射。当  $\Delta\phi_x$  和 / 或  $\Delta\phi_y$  变化时,离开被扰动光纤的光强分布因  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模,  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的双模模间干涉发生变化;而当  $\Delta\phi_0$  和 / 或  $\Delta\phi_1$  变化时,输出光强分布因  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  偏振模间,  $LP_{11}$  和  $LP_{11}$  偏振模间的偏振干涉而发生变化,通过检测光强  $I$  得到位相变化。实际上由这一根光纤组成了 4 个光纤传感器,即两个偏振传感器和两个双模传感器。当然,由于  $LP_{11}$  是高阶模,检测其两个偏振模的干涉难度较大。

如果外部扰动用  $\zeta$  表示,  $\Delta\beta_i$  和  $L$  随  $\delta\zeta$  增量的改变为  $\partial(\Delta\beta_i)/\partial\zeta$  和  $\partial L/\partial\zeta$ , 定义

$$\frac{\delta\phi_i}{\delta\zeta} = \frac{\partial(\Delta\beta_i)}{\partial\zeta}L + \Delta\beta_i\frac{\partial L}{\partial\zeta} = \Delta_i, \quad i = x, y, 0, 1 \quad (2)$$

为传感器对扰动  $\zeta$  的测量灵敏度,一般可以通过实验测出。

设有四个物理量  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$  同时作用于传感光纤,且这些物理量对于单模和双模偏振干涉  $x, y$  方向的影响是不同的<sup>[10]</sup>。它们引起的总相位变化是各自独立作用时产生的相位变化的和,相互间无交叉灵敏度,在本文的“讨论”部分中将证明这个假设在被测量变化较小时是合理的。于是可以写出

$$\Delta\phi_i = \Delta_{i,\zeta_1}\Delta\zeta_1 + \Delta_{i,\zeta_2}\Delta\zeta_2 + \Delta_{i,\zeta_3}\Delta\zeta_3 + \Delta_{i,\zeta_4}\Delta\zeta_4, \quad i = x, y, 0, 1 \quad (3)$$

因此,从理论上讲,由(3)式,按双模干涉和偏振干涉可以列出关于物理量  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$  的四个线性方程,从而实现四个物理量的同时测量。

文献[10]给出了轴向应变、径向压力、静水压力和温度变化四种扰动情形的灵敏度  $\Delta_{i,\zeta}$  的计算公式,同时指出对于挤压、弯曲、扭转等扰动,不适于用双模干涉检测。

实现四参量测量可以采用如下方法:利用椭圆纤芯高双折射光纤,在波长为  $\lambda_1$  时为单模工作状态,而在波长为  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 < \lambda_1$ ) 时为双模工作状态。检测原理如图 1 所示,线偏振光与两个正交双折射轴成  $45^\circ$  角入射,对两个偏振轴同等激励。在接收端  $x, y$  方向接收两个模间干涉信号,即  ${}^2LP_{01}$  模与  ${}^2LP_{11}$  模,  ${}^3LP_{01}$  模与  ${}^3LP_{11}$  模的干涉;而在与  $y$  轴成  $45^\circ$  角和  $135^\circ$  角方向接收两个偏振干涉信号。实验装置如图 2 所示。为了分离两个波长的干涉信号,可在每个光路检测端放置一个待检波长的窄带滤光片,检偏器则对准图 1 所示的各个检测方向。在与  $y$  轴成  $135^\circ$  角处,由于  ${}^2LP_{11}$  和  ${}^2LP_{01}$  模自身及它们相互之间均产生干涉,故除了加方向上的检偏器以及滤除  ${}^2LP_{01}$  模之外,还必须将  ${}^2LP_{11}$  模除去。因为  ${}^2LP_{11}$  模是高级模,对光纤弯曲十分敏感,可以在这一路将光纤的一段弯成直径较小的小环来除去该高级模<sup>[7,8]</sup>。

## 2.2 多波长双模干涉的多参量传感原理

在双模椭圆纤芯光纤中,  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模(各两个模式)可以在一个较大的波长范围内传播。一般而言,波长不同,传播常数差  $\Delta\beta_i$  也不同,可以证明灵敏度  $\Delta_{i,\zeta}$  是波长  $\lambda$  的函数<sup>[10]</sup>。因此不同的波长有不同的灵敏度。

设有  $n$  个物理量  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$  同时作用于光纤,有

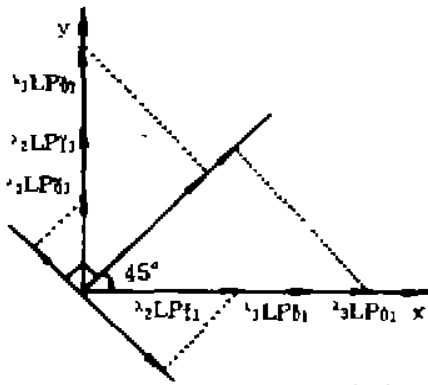


Fig. 1 Reception principle of the polarimetric and two-mode interferometric signals.  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  are the relevant wavelengths of the LP mode

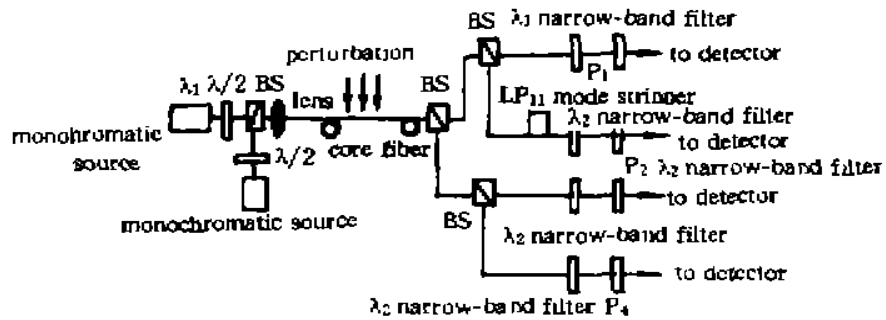


Fig. 2 Schematic of experimental principle for measurement of four parameters.  $p_1, p_2, p_3, p_4$ : polaroid analyzer.  $p_1, p_2$  make angles of  $45^\circ$  and  $135^\circ$  with  $y$  axis, respectively,  $p_3, p_4$  detect  $x$  and  $y$  axes, respectively

$$\phi_i = \Delta\beta_i(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n) L(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n), \quad i = x, y, 0, 1 \quad (4)$$

类似地，设这些物理量对于双模干涉  $x, y$  方向的影响是不同的，忽略交叉灵敏度引起的相移为

$$\Delta\phi_i = A_{i, \zeta_1}^x \Delta\zeta_1 + A_{i, \zeta_2}^x \Delta\zeta_2 + \dots + A_{i, \zeta_n}^x \Delta\zeta_n, \quad \Delta\phi_i = A_{i, \zeta_1}^y \Delta\zeta_1 + A_{i, \zeta_2}^y \Delta\zeta_2 + \dots + A_{i, \zeta_n}^y \Delta\zeta_n \quad (5)$$

$$A_{i, \zeta_j}^x = \frac{\partial(\Delta\beta_i^x)}{\partial\zeta_j} L + \Delta\beta_i^x \frac{\partial L}{\partial\zeta_j}, \quad A_{i, \zeta_j}^y = \frac{\partial(\Delta\beta_i^y)}{\partial\zeta_j} L + \Delta\beta_i^y \frac{\partial L}{\partial\zeta_j},$$

$$i = 1, 2, \dots, n/2, j = 1, 2, \dots, n$$

由于每个双模波长可产生两个方向的线性方程，因此测量  $n$  个参量只需  $n/2$  个双模波长，便可列出关于  $\Delta\zeta_1, \Delta\zeta_2, \dots, \Delta\zeta_n$  的  $n$  个线性方程。(5)式表示波长为  $\lambda_j$  时由  $n$  个物理量  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$  共同扰动在  $x, y$  方向产生的双模干涉相位差。 $A_{i, \zeta_j}^x, A_{i, \zeta_j}^y$  分别表示波长为  $\lambda_j$  时传感器对  $\zeta_j$  参量在  $x, y$  方向的双模干涉灵敏度。可以用矩阵形式表为

$$\Delta\Phi = A\Delta\zeta \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{1, \zeta_1}^x & A_{1, \zeta_2}^x & \dots & A_{1, \zeta_n}^x \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{n/2, \zeta_1}^x & A_{n/2, \zeta_2}^x & \dots & A_{n/2, \zeta_n}^x \\ A_{1, \zeta_1}^y & A_{1, \zeta_2}^y & \dots & A_{1, \zeta_n}^y \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{n/2, \zeta_1}^y & A_{n/2, \zeta_2}^y & \dots & A_{n/2, \zeta_n}^y \end{bmatrix}, \quad \Delta\Phi = \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \vdots \\ \Delta\phi_{n/2} \end{bmatrix}, \quad \Delta\zeta = \begin{bmatrix} \Delta\zeta_1 \\ \vdots \\ \Delta\zeta_n \end{bmatrix}$$

其中矩阵  $A$  中的元素均可通过实验来确定。只要矩阵  $A$  非奇异(即行列式  $\det A \neq 0$ )，便可求出被测参量  $\Delta\zeta_1, \Delta\zeta_2, \dots, \Delta\zeta_n$ 。

采用现代光纤通信中的波分复用/解复用技术可以较简单地实现这种多参量传感。如图 3 所示， $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n/2}$  为单色线偏振光或圆偏振光，在这些波长时传感光纤均工作在双模态，入射光各个波长对  $x, y$  轴均同等激励。它们集中在传感光纤中传输并经历外界扰动。解复用器再将各个波长分离出来。为实现  $x$  和  $y$  轴的同时检测，用渥拉斯顿棱镜将其分离。

利用该原理设计多参量传感器时，应考虑波分复用器相邻信道的串扰问题，否则可能会由于接收信号间相互干扰导致检测精度下降，甚至无法检测到所需信号。

根据前面的分析，采用上述的方案将不能解出对两个偏振轴的影响相同或差别很小的被

测量值，或解的误差很大，但只要在其中某个方向能引起相位变化，可以只检测这个方向。方法是双模波长数与被测参量数相同，即需要  $n$  个波长  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ，仍可采用图 3 的传感系统，但要将渥拉斯顿棱镜改为对应该方向的检偏器。

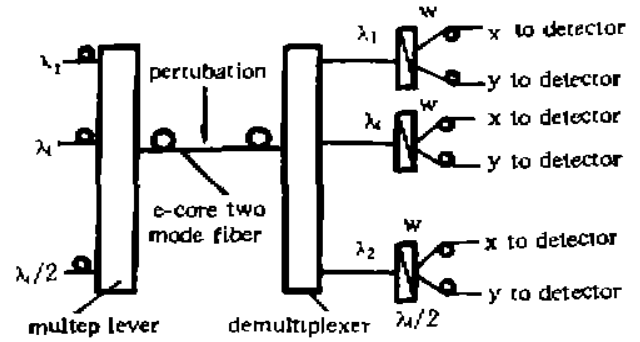


Fig. 3 The experimental setup of two-mode interferometric multiparameter fiber sensor utilizing wavelength division multiplexer (WDM)/demultiplexer, w is wallaston prism

### 3 讨 论

#### 3.1 交叉灵敏度分析

在前面的分析中没有涉及各参量之间的交叉灵敏度，下面对这个问题进行讨论。

一般情形， $\beta_i$  和  $L$  均为  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$  的函数，即扰动  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$  都将对双折射  $\Delta\beta_i$  和光纤长度变化  $\Delta L$  作出贡献。在外界扰动为  $\zeta_{10}, \zeta_{20}, \dots, \zeta_{n0}$  时，将(4)式用泰勒公式展开得

$$\Delta\phi = \Delta_{i, \zeta_j} \Delta\zeta_j + \dots + \Delta_{i, \zeta_n} \Delta\zeta_n - \sum_{j=1, j \neq k}^n \sum_{k=1}^n \Delta_{i, \zeta_j, \zeta_k} \Delta\zeta_j \Delta\zeta_k \quad (7)$$

$$\Delta_{i, \zeta_j} = \frac{\partial(\Delta\beta_i)}{\partial\zeta_j} L + \Delta\beta_i \frac{\partial L}{\partial\zeta_j}, \quad \Delta_{i, \zeta_j, \zeta_k} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2(\Delta\beta_i)}{\partial\zeta_j \partial\zeta_k} + \frac{\partial(\Delta\beta_i)}{\partial\zeta_j} \frac{\partial L}{\partial\zeta_k} + \Delta\beta_i \frac{\partial^2 L}{\partial\zeta_j \partial\zeta_k} \right]$$

展开式中已忽略了  $\Delta\zeta_j$  高阶项。其中  $\Delta_{i, \zeta_j, \zeta_k}$  即交叉灵敏度，如果各参量的变化  $\Delta\zeta_1, \dots, \Delta\zeta_n$  均比较小，则交叉灵敏度项(即展开式中最后一项)可以忽略，(7)式便简化成(3)式或(6)式的线性方程组形式。对应变和温度的实际测量已证明这个简化是合理的<sup>[4]</sup>。 $\Delta_{i, \zeta_j, \zeta_k}$  表征了波长为  $\lambda_i$  时的相位变化不仅仅是各参量单独作用时产生的相位差之和，各参量同时作用时还将产生附加的相位差，表现为对总相位的贡献，在被测参量变化较大时将不能忽略，甚至二阶高阶项也不能忽略，这就要解较为复杂的非线性方程组。原则上  $\Delta_{i, \zeta_j, \zeta_k}$  可通过实验测定，但亦需要解非线性方程组。

#### 3.2 对线性方程组解的误差分析

对于线性方程组(3)式和(6)式，由于相位变化矩阵  $\Delta\phi$  和灵敏度矩阵  $A$  的值均由实验测得，不可避免地会引入误差，这些误差对解的精确度必定有影响，在  $A$  为非奇异矩阵(即矩阵  $A$  的行列式  $\det A \neq 0$ )的前提下，影响的大小与方程组的系数矩阵  $A$  的条件数

$$\text{cond}(A) = \|A\| \|A^{-1}\| \quad (8)$$

密切相关， $\|A\|$  为矩阵  $A$  的范数，条件数  $\text{cond}(A)$  的最小值是  $1^{[11]}$ ， $\text{cond}(A) \gg 1$  时，矩阵  $A$  称为病态矩阵，相应的线性方程组称为病态方程组，其特点是  $\Delta\phi$  或  $A$  的微小误差将引起解  $\Delta\zeta$  的很大的相对误差。矩阵  $A$  的条件数越接近于 1，解的相对误差越小。在实际测量中，对于一个具体的多参量传感系统，应计算各参量灵敏度测量值组成的矩阵  $A$  的条件数，以判断线性方程组的状态。如果是病态方程组，在病态不十分严重的情况下(即条件数不是很大)，可采取适当的计算方法来求解<sup>[11]</sup>。

#### 3.3 计算实例分析

根据文献[10]的实验曲线，以保偏(Polaroid)光纤为例，作者粗略计算了多波长双模干涉和偏振干涉情形，轴向应变、温度、径向压力、静水压力等扰动同时作用于光纤时的灵敏度矩阵。

### 3.3.1 双模干涉情形

四个波长分别为 514.5 nm, 580 nm, 600 nm, 620 nm, 由于模间双折射实验结果  $\Delta\beta_x \approx \Delta\beta_y$ , 因此不适于用对  $x, y$  轴同时检测的方法。以  $x$  方向检测为例, 在这四个波长的  $\Delta\beta_x$  值分别为  $\sim 30.8$  rad/mm,  $\sim 30.1$  rad/mm,  $\sim 29.7$  rad/mm,  $\sim 29.1$  rad/mm, 取曲线上与这四个坐标点相邻坐标点的连线的斜率近似为  $\partial(\Delta\beta)/\partial\lambda$  的值, 将它们代入文献[10]中(15)式、(19)式、(23)式、(27)式, 且取式中的光纤长度为 1 m, 计算出灵敏度矩阵为:

$$A \sim \begin{bmatrix} 0.30 & 0 & 0.62 & -0.20 \\ 0.22 & 0.1 & 0.64 & -0.20 \\ 0.21 & 0.12 & 0.55 & -0.18 \\ 0.16 & 0.21 & 0.49 & -0.16 \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \lambda = 514.5 \text{ nm} \\ \leftarrow \lambda = 580 \text{ nm} \\ \leftarrow \lambda = 600 \text{ nm} \\ \leftarrow \lambda = 620 \text{ nm} \end{matrix}$$

其中第 1 至第 4 列分别对应矩阵右测相应波长的应变、温度、径向压力、静水压力的灵敏度。单位分别为: 应变: rad/ $10 \mu\epsilon$ , 温度: rad/ $^{\circ}\text{C}$ , 径向压力: rad/MPa, 静水压力: rad/MPa。注意: 为了使灵敏度矩阵的各个元素的数量级尽量接近, 以保证矩阵状态良好, 各物理量的单位选取非常重要, 实际上反映了这一特定光纤对各物理量不同的灵敏程度, 或者说各物理量产生的相位变化可比时(同数量级)需要施加该量的量级大小。对于上述矩阵, 对应的各个物理量的单位为: 应变: 10 个微应变( $10 \mu\epsilon$ ); 温度: 摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ ); 径向压力: 兆帕(MPa); 静水压力: 兆帕(MPa)。通过数值计算  $A$  的逆矩阵  $A^{-1}$ , 求出的条件数  $\text{cond}(A) \sim 400$ , 为一个病态不十分严重的矩阵, 可以通过迭代改善方法<sup>[11]</sup>得到相应方程组精确解较好的近似值。

对于只测量温度和应变的情形, 取波长为 514.5 nm, 580 nm 的情形, 灵敏度矩阵为:

$$A \sim \begin{bmatrix} 0.30 & 0 \\ 0.22 & 0.1 \end{bmatrix}$$

可求出条件数为  $\text{cond}(A) \sim 6$ , 为一个良态矩阵。可以直接解方程组得到较好的解。

### 3.3.2 偏振干涉情形

仍以保偏(Polaroid)光纤为例, 设检测  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  间的偏振干涉, 用类似方法计算偏振干涉灵敏度矩阵的条件数, 可以发现仍可用迭代改善方法求得较好的近似解。另一方面, 可以发现, 偏振干涉灵敏度比双模干涉灵敏度低了 2 个数量级。故采用双模干涉多参量传感具有更大的优越性。

**结 论** 本文对应用保偏高双折射光纤进行四参量、多参量传感的可行性进行了探讨, 证明双模干涉传感与偏振干涉传感相比对外界扰动有更高的灵敏度。对于参量变化较小的情形, 可以通过解线性方程组得到被测量的值, 如果参量变化较大, 必须考虑交叉灵敏度的影响, 归结为解非线性方程组。线性方程组的条件数实际上反映了传感器的稳定性。可用某些算法减轻方程组病态的影响, 但如果其病态情况严重, 即使用稳定的算法, 也可能得不到满意的解。并非任何参量均可作为这种原理的传感量, 被测参量必须对单模偏振干涉和双模偏振干涉的两个偏振轴(即  $x, y$  轴)产生不同的影响, 这种影响的差别越大越好, 反映在线性方程组上表现为系数矩阵  $A$  是非奇异矩阵, 或从解线性方程组的克莱姆法则, 保证系数行列式  $\det A \neq 0$ , 才能使方程组有解。如果这种影响的差别较小, 产生的后果是  $\det A$  接近于零, 从而将导致解的较大误差。这时需采用 2.3 节提到的  $n$  个波长检测  $n$  个参量的传感系统。

## 参 考 文 献

- [1] W. Craig Michie, Brian Culshaw, Scott S. J. Robberts *et al.*, Fiber optic technique for simultaneous measurement of strain and temperature variation in composite materials. *Proc. SPIE*, Fiber Optic Smart Structure and Skins IV, 1991, 1588 : 344~355
- [2] Ashish M. Vengsarkar, W. Craig Michie, Ljilja Jankovic *et al.*, Fiber optic sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *Proc. SPIE*, Fiber Optic and Laser Sensors VIII, 1990, 1376 : 249~260
- [3] M. S. Miller, J. A. Greene, S. E. Starr *et al.*, Advances in two-mode optical fiber sensors incorporating photoinduced refractive index gratings. *Proc. SPIE*, Fiber Optic Smart Structure and Skins V, 1992, 1798 : 84~94
- [4] Ashish M. Vengsarkar, W. Craig Michie, Ljilja Jankovic *et al.*, Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *J. Lightwave Technology*, 1994, 12(1) : 170~177
- [5] M. G. Xu, J.-L. Archambault, L. Reekie *et al.*, Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electron. Lett.*, 1994, 30(13) : 1085~1087
- [6] G. Z. Wang *et al.*, Two-mode Fabry-Perot optical fiber sensors for strain and temperature measurement. *Electron. Lett.*, 1991, 27(20) : 1843~1845
- [7] H. G. Park, S. Y. Huang, B. Y. Kim, All-optical intermodal switch using periodic coupling in a two mode waveguide. *Opt. Lett.* 1989, 14(16) : 877~879
- [8] W. V. Sorin, B. Y. Kim, H. J. Shaw, Highly selective evanescent modal filter for two-mode optical fibers. *Opt. Lett.*, 1986, 11(9) : 581~583
- [9] G. Meltz, *et al.*, Multi-wavelength twin-core fiber optic sensors. *In Tech. Dig. OFS Conf.*, 1986 : 67
- [10] Shang-Yuan Huang, James N. Blake, Byoung Yoon Kim, Perturbation effects on mode propagation in highly elliptical core two-mode fibers. *J. Lightwave Technology*, 1990, 8(1) : 23~33
- [11] 易大义, 蒋叔豪, 李有法, 数值方法. 浙江科学技术出版社
- [12] Faramarz Farahi *et al.*, Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity consideration. *J. Lightwave Technology*, 1990, 8(2) : 138~142
- [13] B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang *et al.*, Use of highly elliptical core fiber for two-mode fiber devices. *Opt. Lett.*, 1987, 12(9) : 729~732

## Interferometric Optical Fiber Sensors for Simultaneous Measurement of Multiparameter

Ma Jianjun      Tang Weizhong      Zhou Wen

(Institute of Electrophysics Technique, Department of Information and Electronic Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Song Zongyan

(Beijing Research Institute of Telemetry, The Ministry of Aero-Space Industry, Beijing 100076)

(Received 2 July 1995; revised 22 September 1995)

**Abstract** Two optical fiber sensors are suggested for simultaneous measurement of multiparameter incorporated in the elliptical-core fibers. One is a dual-technique fiber sensor utilizing polarimetric and two-mode interference for measurement of four parameters. Another is a two-mode interference multiparameter fiber sensor. The analyses of cross sensitivity and error are given, and the condition numbers of the sensitivity matrices is evaluated by using the theoretical model.

**Key words** optical fiber sensor, multiparameter sensor.