

⑧ 41-44

# 分布式光纤压力传感器的光信号处理

## The Optical Signal Processing of Distributed Fiber Optical Force Sensors

李志高  
Li Zhigao

潘英俊  
Pan Yingjun

黄尚廉  
Huang Shanglian

TP 212

(重庆大学光电精密仪器系, 重庆, 630044)

A

**摘要** 在分析了来自传感光纤的微弱光信号的特点后,提出了一种带有声光调制器和偏振分光镜的马赫-泽德尔干涉仪来实现两正交偏振模的外差干涉。这种方法不仅消除了光源波动和背景光的影响,而且减小了信号处理中的损耗,提高了信噪比,得到了较高的测量精度。实验结果与理论分析得到较好的符合。

**关键词** 分布式力; 光纤传感; 光信号处理

**中国图书资料分类法分类号** TN247

光纤传感器,  
压力传感器,

**ABSTRACT** For the distributed fiber optical sensor based on the principle of mode-coupling of polarization-maintaining fiber and the theory of partial coherence of quasi-monochromatic light, it is of great importance to process the weak optical signal from the sensing fiber. The characteristics of the optical signal was analyzed and suggestions were given for modified Mach-Zehnder interferometer, which includes an acoustooptical modulator and a polarized-beam splitter to realize the heterodyne interference. The method not only eliminates the influences of light source fluctuation and background light, but decreases the loss of the signal processing, and improves S/N ratio. The experiment results coincide well with the analysis.

**KEYWORDS** distributed force; optical fiber sensing; signal processing

### 0 引 言

由于分布式光纤传感器的许多突出优点,近年来采用该传感器的探测技术得到了迅猛发展<sup>[1]</sup>。几年来,我们研究了一种基于模式耦合理论<sup>[2]</sup>的分布式光纤压力传感器并取得了一些进展<sup>[3]</sup>。本文将讨论这种传感器的光信号处理问题。

### 1 传感系统和光信号的特点

传感系统如图1所示。一束准单色线偏振光激发保偏光纤的两正交基模之一,如  $HE_{11}$

\* 收文日期 1993-11-10  
国家自然科学基金资助项目

模。当光纤上某点受到外力扰动时,  $HE_{11}$  的部分能量被转移到另一偏振模  $HE_{11}$  中, 并且其大小与所受外力的大小和方向有关。由于两正交基模的传输常数不同, 因而当它们从光纤尾端输出时, 两模之间便有一个表征作用点位置信息的位相差, 当测出  $HE_{11}$  的能量大小和这一位相差后, 外力的大小和位置便可以确定。

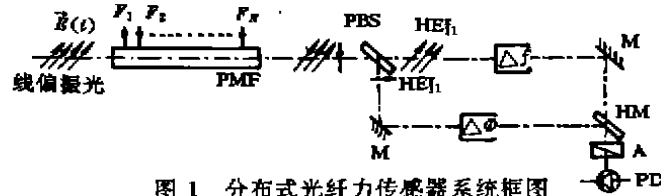


图1 分布式光纤力传感器系统框图

PMF: 保偏光纤 PBS: 偏振分束器 M: 反射镜 HM: 半透反镜 A: 检偏器 PD: 光电二极管

由以上论述和以前的分析可知, 从光纤输出的信号具有如下特点。首先, 它包含 PMF 的两正交偏振基模  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$ ; 其次, 在一定压力作用下, 被耦合出的  $HE_{11}$  模的能量远小于  $HE_{11}$  的能量。若定义功率耦合系数:  $h = P_s / (P_s + P_r)$  (1) 式中  $P_s, P_r$  分别是  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  的功率, 那么  $h \ll 1$  并且与外加压力大小平方成正比; 最后, 两基模的场是准单色的, 因为传输系统光源是 LED。

## 2 偏振外差相干分析

在图 1 中, 来自传感光纤的信号经干涉仪后, 一路被移频, 另一路被移相, 然后合成一束光经检偏后发生干涉, 干涉信号由 PD 接收。

将光纤输出的  $HE_{11}$  和  $HE_{11}$  模场信号的电场解析函数表征为载频  $\bar{\nu}$  的调制信号的形式<sup>[4]</sup>:

$$E_x(t) = a_1(t)e^{[\varphi_1(t) - 2\pi\bar{\nu}t]} \quad (2)$$

$$E_y(t) = a_2(t)e^{[\varphi_2(t) - 2\pi\bar{\nu}t]} \quad (3)$$

式中  $a_1, a_2, \varphi_1, \varphi_2$  均为实变量, 分别表示对应的电场信号的包络和位相;  $\bar{\nu}$  是光源的平均频率。由上节的讨论可知:

$$a_1(t) = \sqrt{1-h}a(t) \quad (4)$$

$$a_2(t) = \sqrt{h}a(t) \quad (5)$$

$$\varphi_1(t) - \varphi_2(t) = 2\pi\bar{\nu} \cdot \frac{\beta_r - \beta_s}{\omega} \cdot Z \quad (6)$$

式中  $a(t)$  代表 PMF 的入射光的电场矢量的实包络,  $\omega$  是光源的频率,  $Z$  是光纤上力作用点至光纤尾端的距离,  $\beta_s, \beta_r$  是 PMF 两基模的传输常数。

经检偏器 A 检偏后, 电场矢量可表示为:  $E_0(t) = K_x E_x(t) \cos\theta + K_y E_y(t) \sin\theta$  (7)

式中  $\theta$  是 A 的主轴与  $E_x(t)$  的振动方向间的夹角,  $K_x, K_y$  分别是干涉仪两臂的传输因子。由图 1 可知:

$$K_x = K_0 e^{-2\pi\bar{\nu}\Delta t} \quad (8)$$

$$K_y = K_0 e^{-\pi\bar{\nu}\Delta t} \quad (9)$$

其中  $K_0$  是干涉仪两臂中相同因素引起的传输因子。

PD 接收的光强为:  $I = \langle E_0(t) \cdot E_0^*(t) \rangle$  (10)

式中“ $\langle \rangle$ ”表示时间平均, “ $*$ ”表示复共轭。将式(7)、(8)、(9)代入(10)得:

$$I = J_{xx} \cos^2\theta + J_{yy} \sin^2\theta \cos\theta + J_{xy} \sin\theta \cos\theta + J_{yx} \sin^2\theta \quad (11)$$

式中  $J_{xx}, J_{yy}, J_{xy}, J_{yx}$  是相干矩阵  $J$  的元素, 而

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle (K_x E_x)(K_x E_x)^* \rangle & \langle (K_x E_x)(K_y E_y)^* \rangle \\ \langle (K_y E_y)(K_x E_x)^* \rangle & \langle (K_y E_y)(K_y E_y)^* \rangle \end{bmatrix} \quad (12)$$

显然,  $J$  的对角元素  $J_{xx}$  和  $J_{yy}$  是实变量, 分别代表  $x$  和  $y$  向偏振分量的强度, 而非对角元素是复共轭变量, 即  $J_{xy} = J_{yx}^*$ .

$$\text{为了讨论方便, 将混合项 } J_{xy} \text{ 归一化: } \mu_{xy} = |\mu_{xy}| e^{-i\phi_{xy}} = \frac{J_{xy}}{\sqrt{J_{xx}} \sqrt{J_{yy}}} \quad (13)$$

式中  $\mu_{xy}$  是两偏振光的复相干度, 并且  $|\mu_{xy}| \leq 1$ . 从公式(12)和(6)、(8)、(9), 并考虑到  $\Delta f \ll \bar{\nu}$ , 得到:

$$\beta_{xy} = 2\pi\bar{\nu} \cdot \frac{\beta_x - \beta_y}{\omega} - \Delta\varphi + 2\pi \cdot \Delta f \cdot t \quad (14)$$

由于  $J_{yy} = J_{xx}^*$ , 可得到  $I = K_1 I_0 (1-h) + K_2 I_0 h + 2K_{12} I_0 |\mu_{xy}| \cdot \sqrt{h(1-h)} \cos\beta_{xy}$  (15)

式中  $I_0$  是入射到 PMF 中的光强,  $K_1, K_2, K_{12}$  都是与  $\theta$  和  $K$  有关的比例因子, 因此 PD 输出的交流信号为:

$$v(t) = K' |\mu_{xy}| \cdot \sqrt{h(1-h)} \cos\beta_{xy} \quad (16)$$

而  $K' = 2\eta K_{12} I_0$  (17)

式中  $\eta$  是 PD 的光电响应度。

由部分相干理论, 只有当两束准单色光的总光程差为零, 即

$$\phi = 2\pi\bar{\nu} \cdot \frac{\beta_x - \beta_y}{\omega} \cdot Z - \Delta\varphi = 0 \quad (18)$$

时, PD 得到的相干信号才最大, 这时对应  $|\mu_{xy}| = 1$ . 利用  $h \ll 1$  并由(15)和(18)式得:

$$v(t) = K' \sqrt{h} \cos(2\pi\Delta f \cdot t) \quad (19)$$

因此只要探测出 PD 的交流信号幅值, 就可得到  $h$ , 从由  $h$  和  $P$  的关系<sup>[3]</sup>, 探测出  $P$  的大小。

在实验中,  $HE_{11}$  模的相移是通过移动三棱镜实现的. 当移动位移  $L$  时,  $HE_{11}$  的光程改变

$$2L, \text{ 则: } \Delta\phi = \frac{2L}{\lambda} \cdot 2\pi = 2\bar{K}L \quad (20)$$

式中  $\bar{\lambda}$  和  $\bar{K}$  分别是光源在真空中的平均波长和平均波数. 对于 PMF, 其双折射的程度一般用归一化的双折射率表示:

$$B = \frac{\beta_x - \beta_y}{K} \quad (21)$$

$$\text{因而有: } 2\pi\bar{\nu} \cdot \frac{\beta_x - \beta_y}{\omega} \cdot Z = \bar{K}BZ \quad (22)$$

$$\text{将公式(20),(22)代入(18)得: } Z = 2L/B \quad (23)$$

因此通过测量三棱镜的位移  $L$ , 就可以测出在光纤上的压力的作用位置。

对于沿光纤分布的多压力点, 只要其中任何两相邻压力间的距离大到足够被传感系统分辨出来, 分析方法同上述的单压力点作用情况是类似的. 这时公式(4)、(5)、(6)相应为:

$$a_1(t) = \prod_{r=1}^N \sqrt{1-h_r} a(t) \quad (24)$$

$$a_2(t) = \sum_{r=1}^N \sqrt{h_r} \prod_{i=1}^{r-1} \sqrt{1-h_i} a(t) \quad (25)$$

$$\phi_1(t) - \phi_2(t) = 2\pi\bar{\nu} \cdot \frac{\beta_x - \beta_y}{\omega} \cdot Z \quad (26)$$

式中  $N$  是光纤上所加外力的总数. 考虑到  $h_r \ll 1$  并与上述同样分析得到:

$$v_r(t) = K' \sqrt{h_r} \cos(2\pi \cdot \Delta f t) \quad (27)$$

$$Z_r = 2L_r/B \quad (28)$$

式中 $h_i$ 和 $Z_i$ 分别是光纤上第 $P$ ( $P=1,2,\dots,N$ )个压力点作用所引起的模式耦合系数的大小和作用位置。这样当三棱镜连续移动一定距离后,所有的外力的大小和位置便可全部探测出来。

### 3 实验结果

图2表示微机接收的电压信号与传感光纤上某一点所加的外力大小的关系。由图可见,在一定的范围内,电压幅值随外力大小呈线性变化,而且变化的快慢与外力的方向有关。

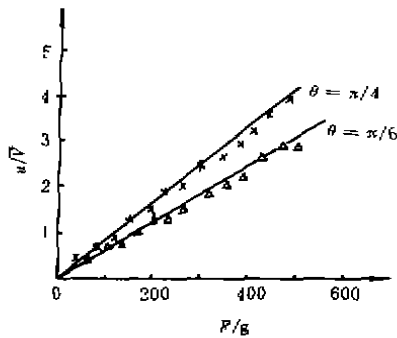


图2 输出电压与外力大小的关系

表1 外加压力的测量值与标准值的比较

$P_i/g$	$P/g$	$L_i/cm$	$L/cm$
25	24	530	533
450	437	680	680
350	347	1100	1112
25	24	1440	1430
325	320	1550	1562
275	276	2050	2056
200	198	2500	2484
150	159	2920	2921

$P_i$  外力幅值的定标值       $L_i$  外力位置的定标值

$P$  外力幅值的测量值       $L$  外力位置的测量值

表1表示了微机得到的在一根光纤上同时加有7个压力点的测量值及定标值的比较结果,从测得的外加压力的幅值 $P$ 和位置 $L$ 来看,与定标值相比有相当高的测量精度。

### 4 小结

一种改进型的马赫——泽德尔干涉仪被用于处理分布式光纤压力传感器中的微弱光信号,针对其特点,用部分相干理论对由两束正交偏振光组成的准单色光信号进行分析并推导出了相应的探测分布式压力的公式。通过接收光电转换器PD的信号幅值和三棱镜移动的位移的探测,可分别确定出光纤上外力的大小和位置。整个实验系统,消除了光源波动的影响和背景光的干扰,减小了信号的损失,提高了信噪比。实验结果表明,测量系统有较主的精度和空间分辨力。

作者要感谢中国自然科学基金的资助,同时要感谢重庆大学物理系程堂廓教授对理论分析的有益讨论。

### 参 考 文 献

- 1 Rogers A J. DISTRIBUTED OPTICAL-FIBER SENSING. Proc. of SPIE, 1991, 1511, 2~24
- 2 Makoto Tsaboakwa, Tusunehito Hikash, Yukiyasu Negeshi. Mode coupling due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber, an evaluation. APPLIED OPTICS, 1988, 27(1), 166~173
- 3 Pan Yingjun, Li Zhigao, Zou Jian, et al. An Automatic Distributed Fiber Optic Pressure Measuring System. Proc. of SPIE, 1992, 1979, 463~469
- 4 Born M, Wolf E. Principles of Optics. 6th Edition. New York, U. S. A; Pergamon press, 1980