# 高灵敏度、高分辨率分布式光纤应力传感器研究\*

## 李尚俊\*\* 刘永智

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 描述了分布式光光纤应力传感系统的近期发展及其应用。介绍一种分布式光纤应力传感器 系统,该系统基于保偏光纤受外力扰动时模式耦合系数与外力大小有关的原理,采用偏振耦合干涉定位确定 受力大小与空间位置方法,分析了系统的定位原理与测力大小原理以及光源、偏振器件等对系统灵敏度与分 辨率的影响。系统采用 SLD 作光源,质子交换 LiNbO<sub>3</sub>波导作偏振器件,在1.3 µm 波长条件下,获得的应力 灵敏度优于5%,空间分辨率小于10 cm。

关键 词 光纤传感器; 分布式传感器; 应力传感; 模式耦合 中图分类号 TP212

分布式光纤应力传感器是将传感光纤沿力场分布,并采用独特的探测技术去感知光纤路径上 待测力场的空间分布和随时间变化信息的一种工具。它是研究的光纤智能结构与蒙皮(smart skin) 技术发展的基础之一,既可用于新一代高性能战机又可用于民用建筑的安全检测,因此备受人们 的关注<sup>[1,2]</sup>。实现分布式应力传感目前已研制出多种方法,如偏振光时域反射(POTDR)、光相干域 反射(OCDR)、光频域反射(OFDR)以及调频载波(FMCW)等,但已报道的空间分辨率不是很高。本 文介绍一种利用单模保偏光纤两正交偏振模的干涉的分布式光纤应力传感器,在60 m长的光纤 上,其应力点探测的空间分辨率小于10 cm,应力灵敏度优于5%。

#### 1 测量原理

1.1 定位原理

让线偏振光进入单模保偏光纤的 HE<sup>T</sup><sub>1</sub>模式中,若光纤某处有侧向应力,则该处的 HE<sup>T</sup><sub>1</sub>将部分 耦合到 HE<sup>T</sup><sub>1</sub>。由于 HE<sup>T</sup><sub>1</sub>和 HE<sup>T</sup><sub>1</sub>的传播常数不同,经距离 *L* 后将存在群时延差  $\tau_1^{[3]}$ 

$$f_1 = [(d\beta_X / d\omega) - (d\beta_y / d\omega)]L$$
(1)

式中  $\beta_x \ \beta_y \$ 

 $\tau_2 = 2(\Delta L/c) \tag{2}$ 

式中  $\Delta L$ 为迈克尔逊两臂程差, c为真空中光速, 则当两模的总时延  $\tau = \tau_1 - \tau_2 = [(d\beta_x / d\omega) - (d\beta_y / d\omega)]L - 2 (\Delta L / c) < \tau_c$ 时出现两模的干涉。此时,干涉信号最大。又由单模光纤的单位长度的群时延时差<sup>[3]</sup>

$$\tau = [(d\beta_x / d\omega) - (d\beta_y / d\omega)]L - 2(\Delta L / c) = 0$$
(3)

$$(\mathrm{d}\beta_X/\mathrm{d}\omega) - (\mathrm{d}\beta_y/\mathrm{d}\omega) \approx nB/c \tag{4}$$

式中 n 为纤芯折射率, B 为光纤的归一化双折射率,  $B=(\beta_x-\beta_y)/\beta(\beta \ angle \ bn \beta_x \ angle \ bn \beta_y$ 之间的平均 值)。将式(4)代入式(3)可得

$$L = 2\Delta L / nB \tag{5}$$

由此测出 $\Delta L$ ,即知L。

<sup>2000</sup>年6月2日收稿

<sup>\*</sup> 电子部预研基金资助项目

<sup>\*\*</sup> 男 35岁 硕士 讲师

#### 1.2 测力大小原理

设光纤中传输光的时变解析信号为 f(t), 其功率谱密度函数为高斯分布

$$I(\omega) = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi} \Delta \omega} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2 \Delta \omega^2}\right]$$
(6)

式中  $\Delta \omega$ 为光源光谱半宽;  $\omega_0$ 为光源的中心角频率。设检偏器与HE<sup>x</sup>模偏振方向夹角为a(如图 1所示)、 $k^2$ 为功率耦合系数,则探测器上两电场分量为

$$E_{x} = \sqrt{1 - k^{2}} f\left(t - \frac{d\beta_{x}}{d\omega}L\right) \cos a$$
$$E_{y} = k f\left(t - \frac{d\beta_{y}}{d\omega}L - \frac{2\Delta L}{c}\right) \sin a$$
(7)

由部分相干光理论<sup>[4]</sup>,探测器上接收光强为

$$I(\tau) = (k_1^2 + k_2^2)I_0 + 2k_1k_2I_0\gamma(\tau)\cos[2\pi v\tau - a(\tau)]$$
(8)

式中  $\tau = [(d\beta_x/d\omega) - (d\beta_y/d\omega)]L - 2(\Delta L/c), k_1 \cdot k_2$ 分别为  $k_1 = \sqrt{1 - k^2} \cos a \qquad k_2 = k \sin a \qquad (9)$ 

$$\kappa_1 = \sqrt{1 - k} \cos a$$
  $\kappa_2 = k \sin a$ 

 $\diamond \gamma(\tau)$ 为复相干度,可由功率谱密度  $I(\omega)$  求得

$$\underline{\gamma}(\tau) = \int_{0}^{\infty} I(v) \exp(-j2\pi v\tau) dv = \exp\left[-\frac{\Delta \omega^{2} \tau^{2}}{2}\right] \exp[-j2\pi v_{0} \tau]$$
(10)

$$\gamma(\tau) = \exp\left(-\frac{\Delta\,\omega^2\tau^2}{2}\right) \tag{11}$$

可由 $\gamma(\tau)$ 求得位相 $a(\tau)=0$ ,则

$$I(\tau) = (1 - k^2) \cos^2 a I_0 + k^2 \sin^2 a I_0 + k \sqrt{1 - k^2} \sin(2a) I_0 \exp\left(-\frac{\Delta \omega^2 \tau^2}{2}\right) \cos(\omega_0 \tau)$$
(12)

与干涉有关的项为

$$I'(\tau) = k\sqrt{1-k^2}\sin(2a)I_0 \exp\left(-\frac{\Delta\,\omega^2\tau^2}{2}\right)\cos(\omega_0\tau) \tag{13}$$

由光弹理论和弹性力学理论可得[5,6]

$$k = \frac{32F}{\lambda \pi b \Delta \beta} (c_1 - c_2) \sin(2\theta_p) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta \beta d\right)$$
(14)

可见 k 与力扰动的大小有关,除此之外, k 还与力的扰动长度 d、角度 $\theta_p$ 等有关。式(14)中 $c_1$ 、 $c_2$ 为受力单元正面和侧面的光弹常数, b为光纤横截面半径。

由式(14)可看出,干涉信号幅值  $I'(\tau) \propto k\sqrt{1-k^2}$ , 而 k 与力 F 有关, 函数  $f(k) = k\sqrt{1-k^2}$  在 k<0.7时随 k 增大而增大,故干涉信号幅值可定性反映外界力的大小。

#### 2 系统的组成及功能

图1示出了偏振模耦合相干分布式光纤应力传感器系统结构原理,由 SLD 光源发射的光经质 子交换 LiNbO<sub>3</sub>波导起偏后耦合入保偏光纤 HE<sup>4</sup><sub>1</sub>模式中,当某处受力时,HE<sup>4</sup><sub>1</sub>将部分耦合为HE<sup>4</sup><sub>1</sub>, 让两模的光经迈克尔逊干涉仪后发生干涉,由ΔL确定力点的位置,干涉信号幅值定性反映力的大 小。系统设计时主要作了以下考虑。

#### 2.1 光源的选择

光源的选取主要考虑以下因素: 1) 谱宽。因谱宽越窄,相干时间 τ。越短,选取谱宽较宽的光



图1 偏振模耦合相干分布式光纤应力传感器系统

源有利于提高系统分辨率,但增加了系统的调节难度。2)功率。因功率越大,信号越易检测。

首先考虑选用多纵模激光器,因其功率较大谱宽较宽,但通过对多只多纵模激光器(谱宽4 nm 左右)的实验发现,它存在幅度衰减非常慢的多个干涉区,故无法用其做实验,所以采用功率小— 个数量级但谱宽大一个数量级的 SLD 来做。本实验采用谱宽38 nm、电流75 mA 时,功率为100 μW 的 SLD。

#### 2.2 可见光导引系统

由于所用光纤为1.3 μm 保偏光纤,系统所用光为不可见光,故采用 He-Ne 激光器作光路导引。 2.3 **质子交换** LiNbO<sub>3</sub>波导的选用

较常见的传统的起偏方法为空气中起偏,如图2所示。



#### 图2 常见的起偏方式

由于 SLD 功率不大,系统使用不可见光,光从空气中耦合入光纤时能量衰减大,因此要用这种办法调出系统可能性小。本文运用质子交换 LiNbO<sub>3</sub>波导作为起偏器,把 SLD 的光起偏之后直接 耦合入 HE<sup>x</sup>模,其耦合能量约为 SLD 光源总能量的1/4,消光比大于30 dB,运用质子交换 LiNbO<sub>3</sub> 波导,为采用 SLD 完成实验奠定了基础。

## 2.4 固定臂的交流调制

对干涉条纹的观察可用变象管观察到。另一办法就是调节系统使干涉条纹的粗细与探测器光 敏面宽接近相等,当一臂移动时,条纹扫过探测器表面,接收光强将发生变化,若用一压电陶瓷 加上一定频率交流电使一臂前后移动,则在示波器上当有干涉时可观察到交变信号的出现,干涉 信号的幅值除与力有关外,也与系统调节出的条纹形状、粗细有关。

### 3 实验及结论

实验在总长为60 m 的保偏光纤上进行,当在 L 为60 cm、70 cm 和10 m 处施力时,压力测试 曲线如图3所示。

图中 *A* 为干涉信号的幅值, *nB* 的实测值为  $4.4 \times 10^4$ , 由 *L*= $2\Delta L/nB$  可知, 要分辨出光纤上  $L_1 - L_2 = 10$  cm 的两个点, 对应着 $\Delta(\Delta L) = 0.022$  mm 时能看到干涉信号的变化, 这约需相干长度

 $L_c < 2 \times 0.022 = 0.044 \text{ mm}$ 。考虑到  $L_c = \lambda^2 / \Delta \lambda$ , 故应选用 $\Delta \lambda > \lambda^2 / L_c \approx 38 \text{ nm}$ 的光源,本实验采用 38 nm 的光源,清晰地分辨出了间距10 cm 的两个点。



## 4 结束语

本文利用本实验定位光纤所处环境的力场分布相当准确(<10 cm),对力的大小也能定性反映。 若将系统再加以改进,如移动臂用步进马达驱动,利用计算机自动进行数据处理,并加以固化, 可将该方法完全实用化。

- 参考文献
- 1 唐明光,邱 昆,楼培德.光纤技术在灵敏结构和皮肤中的应用.电子科技大学学报,1992,21(增刊):58~64
- 2 唐 海,刘村勇.光纤转角位移传感器的理论研究.电子科技大学学报,1992,21(增刊):65~70
- 3 Jeunhomme Luc B. 单模纤维光学原理与应用. 广西: 广西师范大学出版社, 1988
- 4 威康男,秦克诚,程 路.统计光学导论.天津:南开大学出版社,1987
- 5 吕海宝,黄 瑞,楚兴春.分布式光纤传感技术.光学仪器,1997,19(3):11~17
- 6 Tsubokawa Makoto, Higashi Tsunehito, Negishi Yukiyasu. Mode couplings due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber: an evaluation. Applied Optics, 1988, 27(1):166~173

## Research on Distributed Optical Fiber Stress Sensor with High Stress Sensitivity and High Spacial Resolving Power

Li Shangjun Liu Yongzhi

(National Key Lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Recent development and applications of distributed optical fiber stress sensor are described briefly. Based on the theory that coupling coefficient is related to external force, a distributed optical fiber stress sensor is introduced. Distribution of external force is measured by polarization coupling coherence. The principle of location and measuring strength of stress is discussed. The influence of light and polarizer and other things upon the sensitivity and resolving power of the sensor is discussed. SLD is used as light and proton-exchange LiNbO<sub>3</sub> wave-guide is used as polarizer. At the wavelength of 1.3  $\mu$ m, the resolution of the sensor is better by  $\pm 10$  cm and its sensitivity is better by 5%.

Key words optical fiber sensor; distributed sensor; stress sensin; mode coupling