

# 全光纤低相干光纤位移传感技术

李 力 王春华 黄肇明

(上海大学光纤所, 上海 201800)

**摘 要** 提出并演示了一种由两光纤构成的杨氏干涉解调系统的全光纤低相干光纤位移传感系统。该技术从根本上避免了光源频率、光强的波动, 及光在传输过程中由系统带来的损耗、光的偏振方向的改变引起的信号衰落问题。其结构简单, 易于调整, 测量分辨率可达 0.054 mm。

**关键词** 光纤传感器, 干涉仪, 相干, 干涉图样。

## 1 引 言

利用低相干技术的光纤传感器已成为光纤传感器研究领域中的一个重要分支。在静态参数的测量中, 低相干技术与全相干技术相比的优点为: 1) 可以检测出被测参量引起的绝对的光传输相位变化; 2) 对光源频率及功率的稳定度的要求较低, 测量精度不依赖于光源的稳定度; 3) 从原理上避免了全干涉技术中尚不可解决的信号衰落问题, 有较高的工作稳定性; 4) 对工作环境的要求大大降低, 可以工作在较恶劣的条件下。

采用低相干技术的光纤传感器的基本结构是由两个级联的干涉仪构成的。前一个干涉仪用作传感干涉仪, 被测参量引起的光传输相位变化在后一个干涉仪中得到补偿并被读出, 也即由后一个干涉仪解调出传感干涉仪的相位变化。传统的相干解调工作是由反射镜构成的迈克尔逊干涉仪在时域完成的<sup>[1, 2, 3]</sup>。其测量精度由光源的频谱宽度决定, 测量动态范围由光源频谱的纵模间隔决定。这样的时域相干解调系统的优点是测量动态范围大, 但由于由反射镜构成的迈克尔逊干涉仪系统调整要求严格, 且含机械移动部件, 仅适合于实验室条件下工作。加之时域上的相干解调所需的机械扫描周期长, 使测量速度难以提高。

九十年代初以来, 人们设计出了各种空间解调干涉仪来替代时域相干解调。这些解调干涉仪或由一组经特殊加工的镜子构成<sup>[4]</sup>, 或由衍射光栅实现。空间相干解调的最大优点是由线性电荷耦合器件 CCD 实现的电扫描替代了时域相干解调的机械扫描。这不仅使得相干解调系统可以做得小型化、集成化, 而且大大提高了测量速度。但就上述的空间相干解调系统而言, 其实现仍然不易。

本文提出了一种利用光纤构成的杨氏干涉仪来实现空间相干解调的全光纤传感器, 不仅大大简化了解调干涉仪的结构, 完全避免了空间相干解调所需的镜组精密加工工作, 而且提高了测量灵敏度。

## 2 原 理

### 2.1 基本原理

系统原理框图如图 1 所示。由超辐射激光器(SLD)发出的光进入光纤传感干涉仪。此传

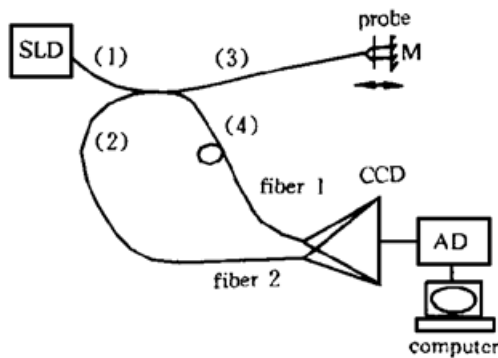


Fig. 1 System schematic diagram

感干涉仪由光纤耦合器及在此光纤耦合器的一个端口上的一片反射薄膜构成。光纤耦合器的前向分支(4)作为参考信号臂, (3)端口的出射光经全反射膜 M 的反射后返回(3)臂, 部分反射光经(2)端口耦合输出作为测量信号臂。全反射膜的位移, 引起信号臂光的传输相位的改变。解调干涉仪由光纤耦合器的(2)、(4)臂相隔  $d$  距离平行放置, 两束出射光在空间叠加组成的杨氏干涉系统构成。光的干涉图样由置于距光纤端面  $z$  处的 CCD 读出。

在 CCD 接收处的光场可由下式表示:

$$E_1 = \Psi_1(\nu, x, z) \exp \{-j[\Phi_1 + \beta_f L_1 + 2\beta_0(L_r + \Delta L)]\} \quad (1)$$

$$E_2 = \Psi_2(\nu, x, z) \exp[-j(\Phi_2 + \beta_f L_2)]$$

式中  $L_1, L_2$  为两束光在光纤中传播所经过的光纤路径长度,  $L_r$  为光纤端面与反射膜的间距,  $\Delta L$  为反射膜移动距离,  $\beta_f$  为光在光纤中的相速,  $\beta_0$  为光在自由空间中的相速,  $\Phi_1, \Phi_2$  为两束光的空间传播相位。设置光纤长度使  $\beta_f L_1 + 2\beta_0 L_r = \beta_f L_2 = \beta_f L$ , 则由 CCD 接收到的光强为:

$$I(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \langle (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* \rangle dv \quad (2)$$

$$= |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2|\Psi_1 \cdot \Psi_2|^2 \gamma(\tau) \cos(\omega\tau)$$

其中  $\gamma$  为两束光的互相干系数,  $\tau = (\Phi_1 - \Phi_2 - 2\beta_0 \Delta L) / \beta_0 c$ 。

$z$  一定时,  $\tau$  随  $x$  的不同而改变, 当  $\tau < t_c$  ( $t_c$  为光源的相干时间) 时, 两束光在空间干涉;  $\tau = 0$  时,  $\gamma = 1$ , 干涉最强;  $\tau > t_c$  时,  $\gamma = 0$ , 两束光不相干, 也即仅是两束光强的简单幅度相加。因此, 利用 CCD 沿  $x$  轴方向进行光强扫描, 检测干涉峰峰顶的位置, 便可得出由被测参量引起的绝对位移

$$\Delta L = (\Phi_2 - \Phi_1) / 2\beta_0 \quad (3)$$

### 2.2 光纤杨氏干涉仪结构与 $\Phi_2 - \Phi_1$ 的关系

#### 2.2.1 两条平行放置的光纤构成的杨氏干涉解调仪

两条平行放置的光纤构成的杨氏干涉解调仪如图 2 所示。因为 CCD 置于  $y = 0$  平面上, 所以讨论只限于  $xoy$  平面上。设光纤 1、2 输出端面上的光场为高斯分布, 表示如下:

$$E_1 = A \exp \left[ - \left[ \frac{x + d/2}{w_0} \right]^2 \right] \exp [-j(\beta_f L - 2\beta_0 \Delta L)]$$

$$E_2 = B \exp \left[ - \left[ \frac{x - d/2}{w_0} \right]^2 \right] \exp (-j\beta_f L)$$

(4)

式中  $w_0$  为光强下降  $1/e$  时的光斑半径,  $d$  为两光纤间距。

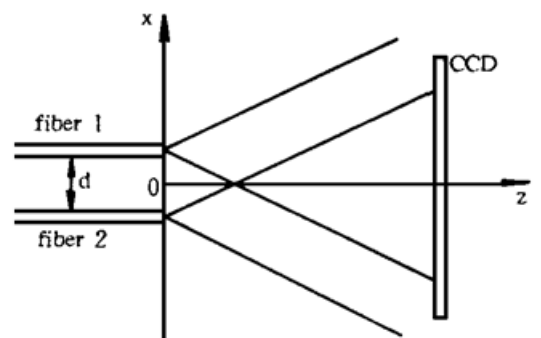


Fig. 2 Young's interference decoder by two parallel fibers

由高斯光束的空间传播理论和  $w_0 \ll d$ 、 $w_0 \ll z$  的条件下, 可得在  $z$  平面上的场表达式为

$$\begin{aligned} E_{1z} &= A \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[ - \left[ \frac{x + d/2}{w_0} \right]^2 - j \left[ \beta_0 \left[ z + \frac{(x + d/2)^2}{2z} - 2\Delta L \right] + \beta_f L \right] \right] \\ E_{2z} &= B \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[ - \left[ \frac{x - d/2}{w_0} \right]^2 - j \left[ \beta_0 \left[ z + \frac{(x - d/2)^2}{2z} \right] + \beta_f L \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由此可求得干涉峰的位置为:

$$x_{\text{peak}} = \frac{2z\Delta L}{d} \quad (6)$$

从(6)式可见: 1) 被测量  $\Delta L$  可由 CCD 读出的干涉峰的峰顶位置唯一地确定, 而与干涉峰的幅值也即检测到的光功率的大小无关。因此光源光强、频率的波动及系统引起的传输功率的不稳定都不会影响系统的测量精度。2) 光纤杨氏干涉仪结构对测量起着决定作用,  $z/d$  越大, 测量灵敏度就越高。

### 2.2.2 夹角为 $2\alpha$ 、沿 $z$ 轴有 $t$ 错位的两根光纤构成的杨氏干涉解调仪

夹角  $2\alpha$ 、沿  $z$  轴有  $t$  错位时的两根光纤构成的杨氏干涉解调仪如图 3 所示。由坐标的旋转平移可得 CCD 处光场的表达式为:

$$\begin{aligned} E'_{1z} &= E_{1z}(x \cos \alpha + z \sin \alpha, -x \sin \alpha + z \cos \alpha) \\ E'_{2z} &= E_{2z}[x \cos \alpha - (z - t) \sin \alpha, \\ &\quad x \sin \alpha + (z - t) z \cos \alpha] \end{aligned} \quad (7)$$

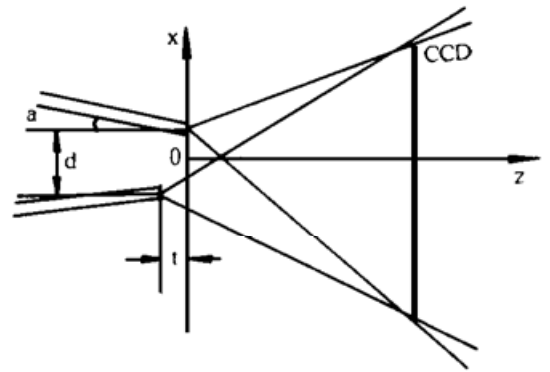


Fig. 3 Young's interference decoder by two fibers with  $2\alpha$ -angle and  $t$ -misplace

干涉峰顶的位置表达式为:

$$x_{\text{peak}} = \frac{2z\Delta L}{d} \left( 1 - \frac{t}{2\Delta L \cos \alpha} \right) \quad (8)$$

将(8)式与(6)式比较可见, 由错位  $t$  引起的干涉峰位置的移动等效于被测量引起的干涉峰的移动, 这一特点在进行系统调整时非常有益, 即可通过  $t$  的调节来补偿系统光程的不平衡。而倾角  $\alpha$  只对  $t$  的光程补偿程度起作用, 对测量灵敏度无影响。

### 2.3 系统分辨率

由前面的讨论可知, 本系统的分辨率完全取决 CCD 面上干涉峰峰顶位置的分辨率。因此, 干涉峰的形状、解调干涉仪的结构、系统噪声、以及 A/D 转换精度都将对系统的测量灵敏度产生影响。假设 CCD 能准确确定干涉峰位置的宽度为由其峰值高度下降至  $\exp(-k)$  倍时对应的干涉峰宽度, 并设光源的光谱为  $\rho(\lambda) = \exp[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda^2]$  的高斯分布, 则由傅里叶变换可求相干因子的表达式为:

$$\gamma(\tau) = \exp \left[ - \frac{1}{4 \ln 2} \left[ \frac{\pi c \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \tau \right]^2 \right] \quad (9)$$

其中  $\Delta\lambda$  为半功率谱宽。由此求得干涉峰顶位置由一个 CCD 单元确定的系统分辨率为:

$$\Delta L_{\min} = \frac{2\lambda a d}{\pi \Delta\lambda z} \sqrt{k \ln 2} \quad (10)$$

其中  $a$  为 CCD 单元宽度。由(10)式可见, 系统的测量分辨率由  $\Delta\lambda$ 、 $k$ 、 $z/d$  和  $a$  决定。光源谱宽  $\Delta\lambda$  直接影响测量分辨率, 图 4 为计算得出的干涉峰包络与光源谱宽的关系曲线。可见谱宽越宽, 相干长度越短, 干涉峰就窄, 系统的测量分辨率也就越高。 $k$  是一个综合指数, 它由系

统 CCD 器件本身的测量精度、A/D 转换精度、杂光干扰噪声以及电路噪声等决定,可在系统实现和器件选择时予以考虑。 $z/d$  代表了解调干涉仪的结构, $z/d$  越大,分辨率越高。但受光源功率限制,CCD 不可能放在离光纤端面太远处。图 5 给出了不考虑系统噪声, $a = 14 \text{ mm}$ ,  $\Delta\lambda = 15 \text{ nm}$ 、 $30 \text{ nm}$  时,不同 A/D 转换精度下,系统分辨率与  $z/d$  的关系的理论计算曲线。

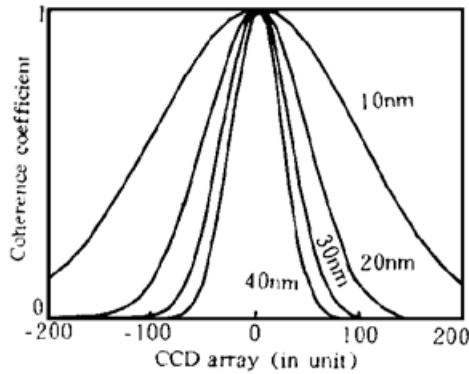


Fig. 4 Theory relationship between the envelop of interferogram and spectrum

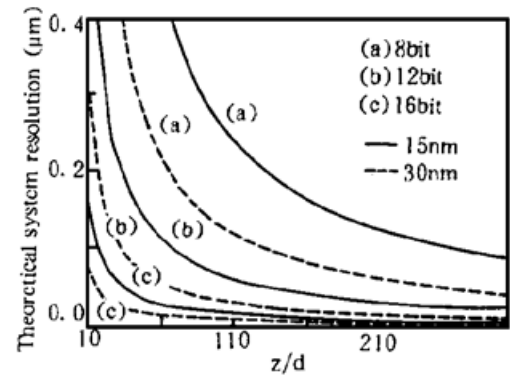


Fig. 5 Theory relationship between system resolution and  $z/d$

### 3 实验结果

实验系统如图 1 所示。超辐射光源 SLD 的中心频率为  $0.85 \mu\text{m}$ , 半功率谱宽为  $12 \text{ nm}$ , CCD 为 2048 单元, 每个单元宽度为  $14 \mu\text{m}$ 。系统工作在良好的遮光条件下, 因此杂光噪声可不计。放大电路信噪比大于  $40 \text{ dB}$ 。A/D 转换精度为 12 bit。CCD 将光信号转换成电信号, 再经放大、采样保持电路和 A/D 转换后, 进行计算机数字平滑及幅度归一化处理, 滤掉信号中的高频分量及直流分量, 以提高干涉峰位置的分辨率。CCD 的驱动频率为  $1 \text{ MHz}$ , 积分时间分为 16 档, 通过软件进行设置。数据采集工作在驱动器时钟统一支配下同步工作, 数据的读出是在软件的控制下逐个字节地写入计算机内存。系统的测量速度主要由 A/D 转换速度、计算机运行速度及需要进行数字信号处理的量来决定, 本系统的测量速度约为  $3 \text{ Hz/s}$ 。因计算机显示屏像素个数限制, 故仅取干涉峰附近 600 个单元画图。

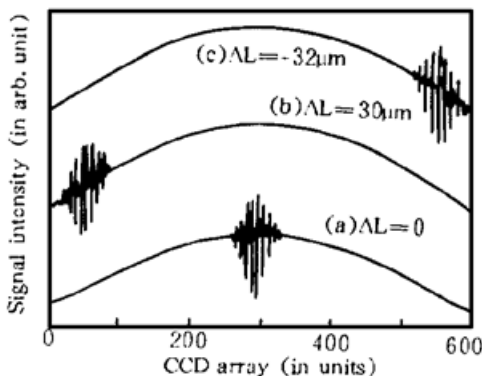


Fig. 6 Interferograms at three position in case of  $z/d = 60$ ,  $\Delta\lambda = 12 \text{ nm}$

图 6 分别给出了  $z/d = 60$ , 反射镜 M 在 (a) 初始位置(零相位差的位置)时、(b) 向前移动  $32 \mu\text{m}$  时、(c) 向后移动  $30 \mu\text{m}$  时的干涉图样。干涉峰峰顶位置可由一个 CCD 单元确定的重复率大于 30 次, 系统的测量分辨率为  $0.117 \mu\text{m}$ 。继续增大  $z/d$ , 干涉峰变宽, 其峰顶位置的分辨率降低。图 7 给出了  $z/d = 130$ 、信号经数字处理前后的干涉图样。此时, 干涉峰变宽, 峰顶位置由一个 CCD 单元确定的重复率小于 10 次。由此可见, 为追求高分辨率而增大  $z/d$ , 会导致测量准确性下降, 解决的方法是增加光源谱宽。图 8 给出了光源谱宽为  $30 \text{ nm}$ ,  $z/d = 130$  时, 信号经数字处理前后的干涉图样。此时峰顶位置由一个 CCD 单元确定的重复率大于 30 次, 系统分辨率为  $0.054 \mu\text{m}$ 。

此时峰顶位置由一个 CCD 单元确定的重复率大于 30 次, 系统分辨率为  $0.054 \mu\text{m}$ 。

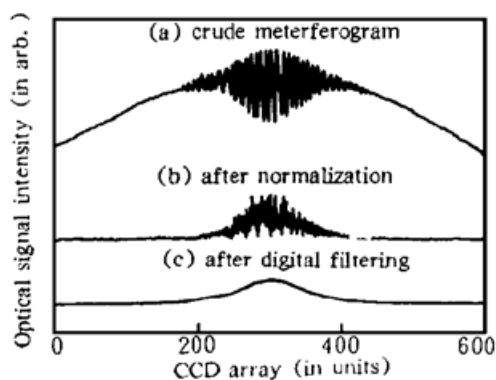


Fig. 7 Interferogram before and after digital signal processing when  $z/d = 60$ ,  $\Delta\lambda = 12$  nm

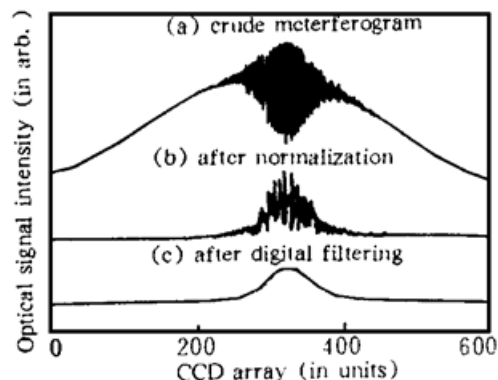


Fig. 8 Interferogram before and after digital signal processing when  $z/d = 60$ ,  $\Delta\lambda = 12$  nm

**结 论** 本文提出了由两光纤构成的杨氏干涉解调系统的全光纤低相干光纤位移传感技术, 被测位移量由干涉峰顶的位置确定, 与光源的中心频率及光强无关, 因而系统有着很高的工作稳定性。系统的测量分辨率由 A/D 转换精度、系统噪声及光源谱宽决定。谱宽越宽, 精度越高。光源谱宽为 12 nm 时的系统分辨率为  $0.117 \mu\text{m}$ ; 而采用谱宽为 30 nm 的光源时, 系统稳定工作后, 其分辨率可高达  $0.054 \mu\text{m}$ 。这样的光纤传感器不仅工作稳定性好, 测量精度高, 而且结构非常简单, 极易调整, 且如果配以相应的探头, 可进行多种准静态参量的测量。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Jinghua, Wang Chunhua, Huang Zhaoming, Alignment of principal axes between birefringent fibers by spatial technique and its distribution-sensing effect. *Proc. SPIE*, 1991, **1572**: 69~ 73
- [2] Huang Zhaoming, Wang Chunhua, Zhang Jinghua, Measurement of polarization modal dispersion and mode-coupling parameter of PFMs. *Proc. SPIE*, 1991, **1572**: 140~ 143
- [3] E. A. Swanson, D. Huang, M. R. Hee *et al.*, High-speed optical coherence domain reflectometry. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(2): 151~ 153
- [4] A. Koch, R. Ulrich, Displacement sensor with electronically scanned white-light interferometer. *Proc. SPIE*, 1990, **1267**: 126~ 133

## All Fiber Displacement Optical Fiber Sensor by Weak-Coherence

Li Li      Wang Chunhua      Huang Zhaoming

(Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 6 June 1996; revised 3 March 1997)

**Abstract** An all fiber Weak-coherent optical fiber sensor(OFS) system for displacement measurement with a fiber Young's decoding interferometer is proposed and demonstrated. The OFS of this kind avoids the fatale signal-fading problem in whole-coherence OFS, which is caused by the fluctuation of source wavelength and power, power loss in propagation, as well as the changes of polarization direction. The OFS system is not only of simple structure, easy-adjustment, but also with high resolution up to  $0.054 \mu\text{m}$ .

**Key words** optical fiber sensor, interferometer, coherence, interferogram.