

文章编号: 0253-2239(2004)11-1487-4

用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号*

江 毅 陈淑芬

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要: 为了简单直接地解调出光纤光栅的波长移动, 提出了另外一种非平衡马赫-曾德尔干涉仪的直接解调技术。用一只 2×2 耦合器和一只 3×3 耦合器组成非平衡的马赫-曾德尔光纤干涉仪, 作为光纤光栅的波长移动解调器。解调器输出的 3 路信号, 互成 120° 相位差。通过对 3 路输出信号计算的方法, 就可以直接解调出光纤光栅的波长移动。将 3 路信号采集送入计算机, 用软件实现了信号的解调。测量结果表明, 在干涉仪两臂长度相关 5 mm 时, 测量动态应变的分辨率达到了 $0.51 \text{ ne}/\text{Hz}^{1/2}$ 。还得到了输出信号的频谱和输入输出信号的关系。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤传感器; 光纤光栅; 马赫-曾德尔干涉仪; 3×3 耦合器

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A

Direct Demodulation for Signal from Fiber Grating Sensors by Interferometer Based on 3×3 Coupler

Jiang Yi Chen Shufen

(Department of Photo-Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 6 may 2003; revised 18 July 2003)

Abstract: To demodulate wavelength shift of fiber Bragg grating, a new direct-demodulation technique is demonstrated. An unbalanced fiber Mach-Zehnder interferometer comprising a 2×2 coupler and a 3×3 coupler is used as wavelength discriminator for fiber grating, 120° phase difference between the three outputs of interferometer. The wavelength shift of fiber grating can be demodulated directly by calculating three outputs of interferometer. Demodulation is fulfilled by software when signals are sampled and inputted into computer. The minimum detectable dynamic strain of $0.51 \text{ ne}/\text{Hz}^{1/2}$ can be achieved when the unbalanced length of the beams is 5 mm. The spectra of the demodulated signal and the relationship between the input and output are also given.

Key words: guidingwave and fiber optics; optical fiber sensor; fiber grating; Mach-Zehnder interferometer; 3×3 coupler

1 引 言

光纤光栅的传感器技术是目前最好的一种光纤传感技术。光纤光栅传感器的核心技术是解调出光纤光栅波长的变化。在目前已经提出的解调方案中^[1~5], 又以 Kersey 等^[2]演示的光纤马赫-曾德尔干涉仪解调的探测灵敏度最高, 它能够测量的分辨

力优于 $0.6 \text{ ne}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

在 Kersey 等^[2]的实验中, 用 2 只 2×2 耦合器组成非平衡的马赫-曾德尔光纤干涉仪, 光纤光栅的反射光作为干涉仪的输入。当受外界影响, 光纤光栅的波长发生变化, 即输入到干涉仪的窄线光源的波长发生变化, 干涉仪就会有条纹输出, 通过测量干涉仪输出信号的相位变化, 就可以获得加在光纤光栅上的外部扰动。

然而测量干涉仪输出信号的相位变化并不是一件容易的事。在相位变化较小时, 干涉仪的输出接

* 国家自然科学基金(60277015)资助课题。

E-mail: jy. jy@bit.edu.cn

收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-07-18

近正弦信号,可以比较简单地直接获得振动信号。但相位变化很大时,在一个振动周期干涉仪有多个条纹输出,就不能直接解调出外部振动信号了。在 Kersey 等^[2]的文章中仅仅演示了用马赫-曾德尔干涉仪来解调这一方案的可行性,并没有直接解调出外部振动信号,而仅仅看到了干涉仪的输出信号和干涉仪输出信号的频谱。本文用一只 2×2 耦合器和一只 3×3 耦合器组成非平衡的马赫-曾德尔光纤干涉仪,作为光纤光栅的波长移动解调器,将干涉仪 3 路信号模-数转换后,送入计算机进行解调^[6],可以直接解调出外部信号的扰动。

2 实 验

光纤光栅传感系统测量原理如图 1 所示。超辐射光纤光源(ASE)发出的宽带光经过一只 2×2 的 3 dB 耦合器进入光纤光栅,反射光经该耦合器取出后进入两臂不等长的光纤马赫-曾德尔干涉仪,干涉仪的 3 路输出经放大后用模-数卡采集到计算机进行信号处理,获得振动信号。

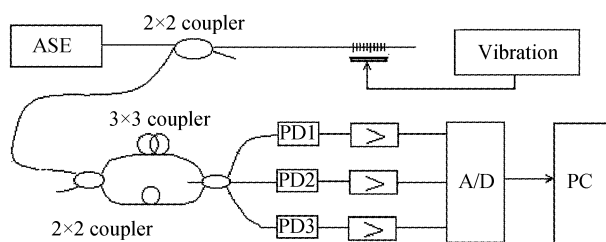


Fig. 1 Experimental setup of fiber optical Bragg sensor

A/D: A/D converter; PC: computer

超辐射光纤光源中,980 nm 的抽运光源使用的是 Lasretron QLM95470-917,掺 Er^+ 光纤长 12 m,掺杂摩尔分数为 4×10^{-4} 。在 70 mA 驱动电流时,超辐射光纤光源输出功率 $370 \mu\text{W}$ 。超辐射光纤光源的频谱如图 2 所示。光纤光栅处于静止状态时的反射光谱如图 3 所示,中心波长 1548 nm,线宽 0.2 nm。因此当光纤光栅的反射光作为干涉仪的输入激光光源时,其相干长度为 17.5 mm。即要求干涉仪的两臂的光程差小于 17.5 mm,光程差大于 17.5 mm 干涉仪可能没有干涉条纹。但干涉仪两臂的光程差不能相等,否则即使光纤光栅的波长发生变化,干涉仪也没有条纹输出。干涉仪的输出相移与输入光波长变化关系为

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda, \quad (1)$$

其中 λ 光源的波长,这里为光纤光栅的波长。纤芯折

射率 n 为 1.46, d 是干涉仪光程差, $\Delta\lambda$ 是光源的波长变化。 d 越大,干涉仪对光源波长变化越敏感,系统的灵敏度越高,但在输入光线宽一定时,输出条纹的衬比度就越差。实验中 d 取为 (5 ± 2) mm。

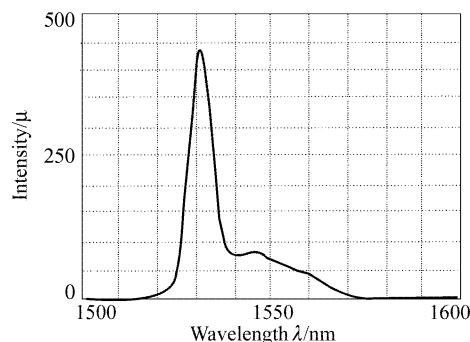


Fig. 2 The spectrum of ASE

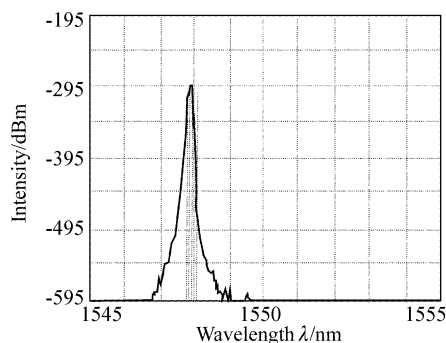


Fig. 3 The reflective spectrum of fiber grating

(1)式中,在光程差 $d = 5$ mm 时,产生 2π 相位变化所需的光纤光栅波长变化量为 0.33 nm,即 $\Delta\phi/\Delta\lambda = 0.019$ rad/pm。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长上,1000 μe 所引起的光纤光栅波长移动 1.15 nm,即 $\Delta\lambda/\Delta\epsilon = 1.15$ pm/ μe ^[2]。因此理论上系统给出的灵敏度 $\Delta\phi/\Delta\epsilon = 0.022$ rad/ μe 。光纤干涉仪的动态相位探测灵敏度典型值可达 10^{-6} rad/Hz^{1/2}^[2],因此可以测得的动态应变的分辨力约为 0.45 nε/Hz^{1/2}。

3×3 耦合器每一个端口的插入损耗如表 1 所示,由它和一只 3 dB 的 2×2 耦合器组成马赫-曾德尔干涉仪。 3×3 耦合器的输出互成 120° 相位差,实际测量得的相位关系如图 4 所示。这是从示波器上直接看到的 3 个输出信号彼此间的利萨如图,它们互成 120° 角。有些轻微的差别显示 3×3 耦合器并不完全对称,但对测量中信号解调影响不大^[6]。 3×3 耦合器不对称将引起 3 路输出信号幅度不相等,降低测量精度。可以通过调整每一路信号的放大倍数,使 3 路输出信号幅度相等。干涉仪的输出信号可以表示为

$$f_n(t) = C + B\cos\left[\phi(t) - (n-1)\frac{2}{3}\pi\right], \quad (2)$$

$n = 1, 2, 3$, 分别代表第一、二、三路输出。 $\phi(t)$ 是干涉仪两臂的相位差, 即振动信号。若最大光程差(相位)为 A , 因此

$$\phi(t) = A \cos(2\pi ft), \quad (3)$$

其中 f 是外调制频率。从干涉仪的 3 路输出端解调出振动信号 $\phi(t)$ 的原理为^[6]: 由于干涉仪 3 个输出相位是互补对称的, 所以三项相加仅剩直流 C , 再从干涉输出信号中减去直流因子 C , 则仅剩干涉信号的条纹部分, 设为 a 。分别对三个条纹函数求微分, 得 d, e, f 项, 在此三项中, 相位 $\phi(t)$ 的导数放在了 \sin 函数外面。进行 $a(f - e)$ 运算, 构成函数

$$\cos^2 \left[\phi(t) - (n-1) \frac{2}{3} \pi \right] \quad (n = 1, 2, 3),$$

这三个函数相加等于 1, 消去了 \cos 函数项, 仅剩 $[\phi(t)]'$ 。在 $[\phi(t)]'$ 的系数中还带有条纹衬比度 B , 因此还要计算出 B 。方法是分别对 3 路去掉直流成分的条纹信号求平方, 再相加, 就只留下条纹衬比度 B 。从 $[\phi(t)]'$ 的系数中消去 B 的影响, 积分后即可得到 $\phi(t)$ 。

Table 1 The insert loss of 3×3 coupler

Input	Output / dB		
	CH1	CH2	CH3
CH1	4.8	5.0	5.0
CH2	4.9	5.3	5.0
CH3	5.2	5.2	4.8

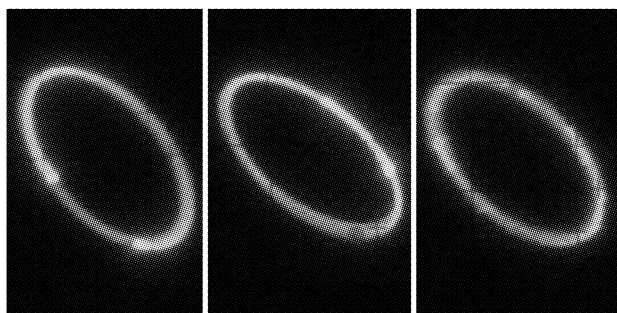


Fig. 4 The relationships of the outputs of the Mach-Zehnder interferometer

干涉仪的输出信号可以用硬件电路来解调^[7], 也可以用软件来计算处理^[6], 就可以直接求出外界振动信号。本文中是用软件 LabView 6.0 编程实现数据的采集、解调和显示。

光纤光栅粘贴到 100 mm×10 mm 的不锈钢锯片上, 锯片一端粘贴 6 g 的质量块, 另一端固定到振动台上。实验中, 3 路输出信号每一路的采样频率为 7.5 kHz。在振动频率 220 Hz 时, 用模-数转换卡采集的干涉仪的 3 路输出如图 5 所示。图 5 的数

据采集时间为 0.07 s, 共计 525 个数据。输入到激励器的正弦波形和解调出来的被测信号(如图 6 所示)将光纤光栅的振动非常好的解调出来了。图 7 是 220 Hz, 0.1 $\mu\epsilon$ 动态应变加在振动梁上时, 通过光纤干涉仪测量的振动信号的频谱。而文献[2]中的功率谱是干涉仪的输出信号, 而非振动信号。图 7 中 220 Hz 频率分量的信噪比是 33 dB, 带宽 20 Hz。因此在 220 Hz 时最小可探测的应变为 2.3 $n\epsilon$, 或者是 0.51 $n\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。

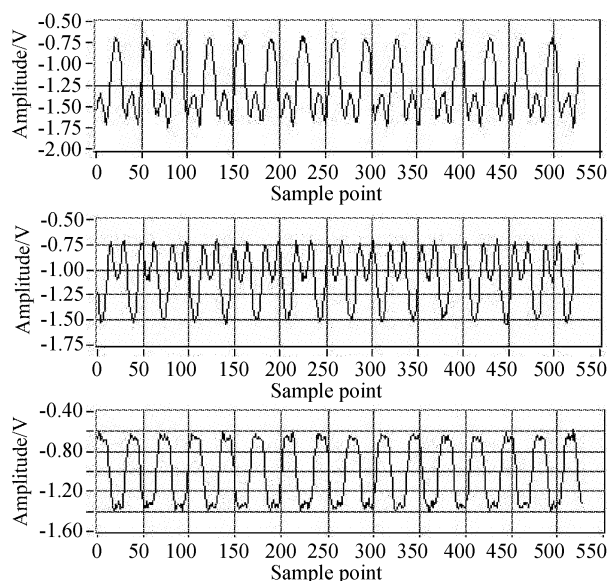


Fig. 5 The 3-arm's output signal of interferometer

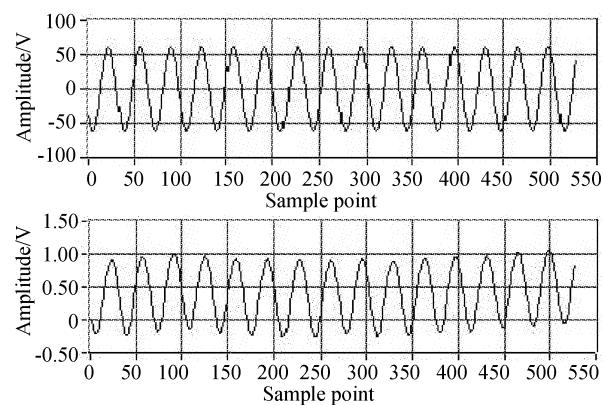


Fig. 6 The vibration signal (upper) and the demodulation output (lower)

由于振动台的动态应变变化的幅度很小, 我们很难标定应变的变化, 但振动台输入信号的幅度我们能够简单的测量出来。图 8 是该光纤光栅解调系统测量出的振动信号的峰峰值与驱动振动台信号峰峰值的关系, 它们之间的线形也比较好(但在振幅很小时, 振动台自己还没有进入线性工作区)。

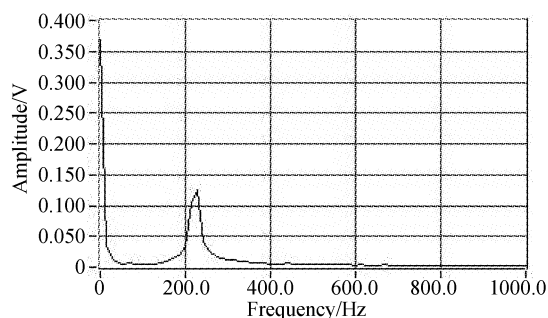


Fig. 7 The spectra of demodulated signal

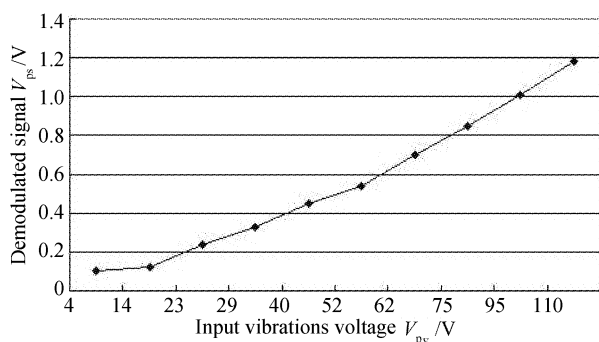


Fig. 8 The relationship of V_{ps} between the input vibration signal and demodulated output signal

结论 本文用一只 2×2 耦合器和一只 3×3 耦合器组成非平衡的马赫-曾德尔光纤干涉仪,作为光纤光

栅的波长移动解调器,通过软件解调,可以直接将光纤光栅的波长移动解调出来。得到的动态应变测量分辨力达到了 $0.51 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。

参 考 文 献

- 1 Divise M A *et al.*. Design and performance of a fiber Bragg grating distributed strain sensor system. *Proc. SPIE*, 1995, **2446**: 227~235
- 2 Kersy A D *et al.*. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 72~74
- 3 Yu Youlong, Tam Huayaw. Active spatial/wavelength-division multiplex fiber Bragg grating sensor system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(2): 131~134 (in Chinese)
- 4 Chen Weimin, Jiang Yi, Huang Shanglian. Image spectrometry in multiplexing FBG sensors. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8): 1119~1123 (in Chinese)
- 5 Shen Qiuqin, Shi Kebin, Gao Limo *et al.*. Study on the method of matching detection of fiber grating vibration sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 847~851 (in Chinese)
- 6 Jiang Yi, Lou Yingming, Wang Huiwen. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, **27**(2): 152~155 (in Chinese)
- 7 Lou Yingming, Wang Huiwen, Jiang Yi. Study of a fiber optic accelerometer using a flexural disk. *Optical Technology* (光学技术), 1998, (4): 64~66 (in Chinese)