

利用成像光谱技术的光纤光栅多传感器复用*

陈伟民 江毅** 黄尚廉
(重庆大学光电仪器系, 重庆 400044)

摘 要 根据光纤光栅多传感器复用时信号的光谱特征, 提出了采用成像光谱技术对复用信号进行解调的方案。在分析了成像光谱复用方案原理、推导了其测量分辨率及复用能力等主要性能指标的基础上, 给出了验证实验系统及相应实验的结果。

关键词 成像光谱, 光纤光栅, 多传感器复用。

1 引 言

能够简单地在同一光纤上串连地制作多个光纤光栅传感器、实现多传感器复用, 是光纤光栅传感器的一大突出优点。但若不解决复用信号的解调, 还不能真正实现多传感器复用。迄今为止, 已有多种复用解调方案^[1, 2], 但这些方案都要采用制造工艺复杂、价格昂贵的专用器件进行光谱扫描, 因而在国内难以适用。因此, 尽量采用通用元器件、寻求一种国内现阶段既切实可行, 又价格相对低廉的复用信号解调方案, 应是国内开展光纤光栅多传感器复用技术的主要突破口。基于成像光谱技术的波分复用解调方案就是这样一种较为理想的选择。

2 成像光谱技术的复用原理

2.1 光纤光栅传感器的光谱特性

由光纤光栅的原理可知, 当一束宽带复色光沿光纤入射到一个栅距为 Λ 、平均折射率为 n_{eff} 的光纤光栅上时, 只有波长为 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 的单一光束被反射。如果外界影响作用于光纤光栅, 引起 n_{eff} 或 Λ 变化时, 必然导致 λ_B 变化, 因此测出 λ_B 的变化, 便可求出外界是影响的大小, 实现对外界参量的实时测量。如果把一系列栅距分别为 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_m$ 的光纤光栅如图 1 所示地串行复制在同一光纤上, 则用单色仪分别接收其光源 P_0 、反射光 P_r 、透射光 P_t 时, 其输出光谱将如图 2 所示。显然每一光纤光栅传感器都具有唯一的特征谱线, 且当该光栅受外界作用时, 该特征谱线将只在其特定位置附近移动(图 2 中虚线所示), 各个传感器互不影响。因此光纤光栅多传感器复用时, 其信号的解调本质上就是测量图 2 所示反射光谱 P_r 。

* 国家自然科学基金重点项目, 国家基金委、国家教委、航空部联合资助。

** 现在北京理工大学工作。

收稿日期: 1997-08-03; 收到修改稿日期: 1997-10-17

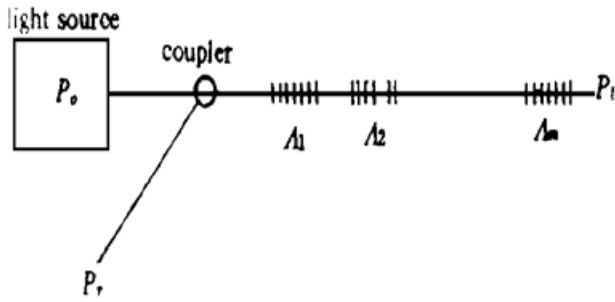


Fig. 1 Configuration of multiplexed FBG sensors

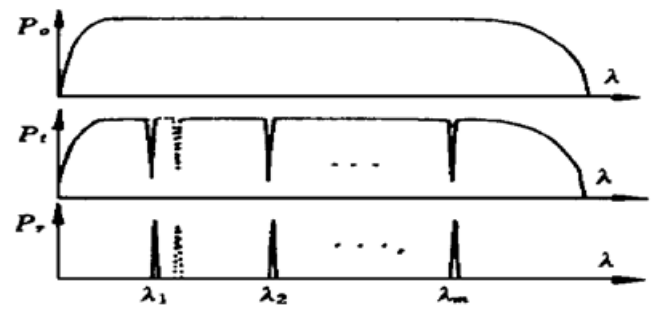


Fig. 2 Spectrum of multiplexed FBG sensors

2.2 成像光谱复用方案

如果单色仪的波长分辨率足够高，而各光纤光栅的特征谱线又相距足够远，则可直接利用图 2 的反射光谱图。即用单色仪接收 P_r ，就可方便地实现信号的解调、测量，而且结果直观、可信。事实上在光纤光栅制造过程中，就是用此方法来实时检验的。但因单色仪体积庞大、存在机械扫描机构，虽然曾经有人提出过这类解调方案，但它显然不适合作为现场测量装置。但是如果将单色仪改为成像光谱仪，就能去掉其庞大的机械扫描机构以及相应的光学附件和电子线路，得到一个结构简单、实用的复用信号解调装置。由于成像光谱仪是用图像传感器各光敏元(像元)分别获取各光谱线的信息，因而将测量光谱线的问题简化成了判断光斑所在像元位置的问题，提高了系统的稳定性与可靠性。其结构原理如图 3 所示。

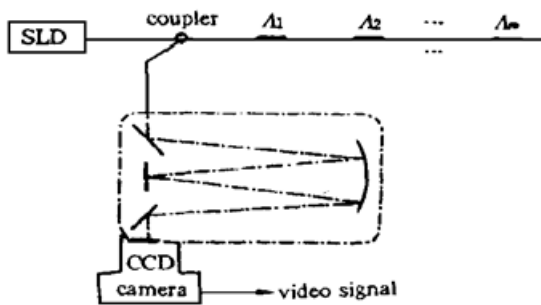


Fig. 3 Schematic of multiplexing FBG sensors with image spectrometer

3 成像光谱复用方案的性能分析

3.1 测量灵敏度及分辨率

若成像光谱仪采用栅距为 d 的反射光栅作分光元件，且只取 + 1 级衍射，则由光栅单色仪原理可知，在入射角为 i 的条件下成像光谱仪的线色散为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f_2'}{\sqrt{d^2 \cos^2 i + 2\lambda d \sin i - \lambda^2}} \quad (1)$$

对于光纤光栅而言，环境变化引起其反射波长 λ_B 的变化 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

故在恒温 ($\Delta T = 0$) 及恒应变 ($\Delta\epsilon = 0$) 条件下分别有

$$\frac{d\lambda}{d\epsilon} \approx \frac{\Delta\lambda}{\Delta\epsilon} = K_\epsilon, \quad \frac{d\lambda}{dT} \approx \frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = K_T \quad (3)$$

直接采用光栅单色仪解调时，单色仪的应变及温度分辨率 s_ϵ 及 s_T 分别为

$$s_\epsilon = \frac{dl}{d\epsilon} = \frac{dl}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\epsilon}, \quad s_T = \frac{dl}{dT} = \frac{dl}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \quad (4)$$

当采用成像光谱仪时，最终的接收元件是图像传感器，因而图像传感器也要影响系统的分辨率。如定义 dl/dp 为图像传感器单位像元素所占空间的距离(即像元间距 δ)，则它可写为

$$\frac{dl}{dp} = \frac{dl}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\epsilon} \frac{d\epsilon}{dp}, \quad \frac{dl}{dp} = \frac{dl}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \frac{dT}{dp} \quad (5)$$

将(1)式、(3)式和(4)式分别代入(5)式中可得成像光谱解调系统的应变灵敏度 S_ϵ (即光纤光栅承受每单位应变产生的谱线偏移在图像传感器上对应的光斑移动像元数) 及温度灵敏度 S_T (即光纤光栅承受每摄氏度温度变化产生的谱线偏移在图像传感器上对应的光斑移动像元数) 分别为

$$S_\epsilon = \frac{dp}{d\epsilon} = \frac{K_\epsilon}{\delta} \frac{f_2'}{\sqrt{d^2 \cos^2 i + 2\lambda d \sin i - \lambda^2}} \text{ (pixel}/\mu\epsilon) \quad (6)$$

$$S_T = \frac{dp}{dT} = \frac{K_T}{\delta} \frac{f_2'}{\sqrt{d^2 \cos^2 i + 2\lambda d \sin i - \lambda^2}} \text{ (pixel}/^\circ\text{C}) \quad (7)$$

由此可知, 增大成像光谱仪成像物镜焦距 f_2' 及光纤光栅的应变、温度灵敏度 K_ϵ 、 K_T , 或减小光谱仪的分光光栅之栅距 d (即增大光栅的线纹数) 及图像传感器像元间距 δ , 都能提高此系统的灵敏度。

比较(4)式及(6)式、(7)式可知, $S_\epsilon = s_\epsilon/\delta$ 及 $S_T = s_T/\delta$, 即成像光谱仪解调时, 系统分辨率比单纯采用光栅单色仪提高 $1/\delta$ 倍。因而选用高位数 (即像元间距 δ 小) 的图像传感器能提高系统灵敏度。

由于系统分辨率为可分辨的最小被测的参量, 故成像光谱解调系统的应变及温度分辨率 R_ϵ 及 R_T 分别为

$$R_\epsilon = d\epsilon = dp/S_\epsilon, \quad R_T = dT = dp/S_T \quad (8)$$

式中 dp 为图像处理技术所能达到的像元识别能力, 一般情况下为一个像素 (即 $dp = 1$ pixel)。如采用亚像素技术, 则很容易达到十分之一像素 (即 $dp = 0.1$ pixel)。

3.2 系统复用能力

从成像光谱仪角度考虑, 如成像光谱仪的准直透镜与成像透镜的焦距分别为 f_1' 及 f_2' , 而光纤芯径为 $2a$, 则每个光纤光栅传感器在成像光谱仪的图像传感器上所成像斑大小 y' 及像斑所占像元数 P_0 分别为

$$y' = f_2' 2a / f_1', \quad P_0 = y' / \delta = (f_2' / f_1') (2a / \delta) \quad (9)$$

如每个光纤光栅应变测量及温度测量的动态范围分别为 $B_\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1$ 及 $B_T = T_2 - T_1$, 则由(6)、(7)式可知, 它所占用的像元区间为

$$P_1 = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} S_\epsilon d\epsilon = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \frac{K_\epsilon f_2'}{\delta \sqrt{d^2 \cos^2 i + 2d\lambda \sin i - \lambda^2}} d\epsilon = \frac{K_\epsilon f_2'}{\delta \sqrt{d^2 \cos^2 i + 2d\lambda \sin i - \lambda^2}} (\epsilon_2 - \epsilon_1) = S_\epsilon B_\epsilon \quad (10)$$

$$P_1 = \int_{T_1}^{T_2} S_T dT = \int_{T_1}^{T_2} \frac{K_T f_2'}{\delta \sqrt{d^2 \cos^2 i + 2d\lambda \sin i - \lambda^2}} dT = \frac{K_T f_2'}{\delta \sqrt{d^2 \cos^2 i + 2d\lambda \sin i - \lambda^2}} (T_2 - T_1) = S_T B_T \quad (11)$$

因此每个光纤光栅传感器的像斑在图像传感器上所占总像元数 P 为

$$P = P_0 + P_1 \quad (12)$$

若线阵图像传感器的总像元数为 Z , 则成像光谱仪能够复用的光纤光栅传感器总数为

$$M_1 = Z/P \quad (13)$$

另一方面从光源考虑时，由于每个光纤光栅光谱带宽 $\Delta\lambda_0$ 为

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_B \sqrt{(\Delta n/2n)^2 + (1/N)^2} \tag{14}$$

其中 n 与 N 分别为该光纤光栅的折射率及总线纹数。而光纤光栅传感器由于被测参量影响引起的波长移动为 $\Delta\lambda_{\text{shift}} = K_\epsilon B_\epsilon$ 或 $\Delta\lambda_{\text{shift}} = K_T B_T$ ，故单个光纤光栅占用的总光谱区间为

$$\Delta\lambda = 2\Delta\lambda_0 + \Delta\lambda_{\text{shift}} \tag{15}$$

若系统所采用的宽带光源的光谱范围为 $\Delta\lambda_L$ ，而各光纤光栅的光谱区间又恰好彼此互不重叠，则由光源带宽决定的复用能力为

$$M_2 = \Delta\lambda_L / \Delta\lambda \tag{16}$$

因而综合(13)式及(16)式，则此成像光谱仪系统实际最多能复用的光纤光栅传感器数为

$$M = \min \{M_1, M_2\} \tag{17}$$

4 系统实验

为了验证成像光谱技术用于光纤信号复用解调的可行性，采用了图 4 所示实验系统^[3]。

用中心波长为 850 nm，带宽为 30 nm 的红外发光二极管(LED)作测量的宽带激励光源。实验用光纤光栅的中心波长为 827.5 nm、带宽为 0.2 nm，应变灵敏度及温度灵敏度分别为 $K_\epsilon = 0.645 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ($\epsilon = \Delta l/l$ ，定义 $1 \mu\epsilon = 10^{-6}$) 及 $K_T = 5.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。成像光谱仪的准直镜及成像透镜焦距分别为 $f_1 = 25 \text{ mm}$ 及 $f_2 = 120 \text{ mm}$ ，入射角 $i = 60^\circ$ ，反射光栅为 1200 l/mm，用 He-Ne 激光器调整光路。图像传感器采用 795×596 的工业 CCD 面阵摄像机 ($\delta = 8 \mu\text{m}$)，经图像卡数字化处理后变为 512×512 像素的矩阵。分别以应变仪及温度计作为实验标定装置。

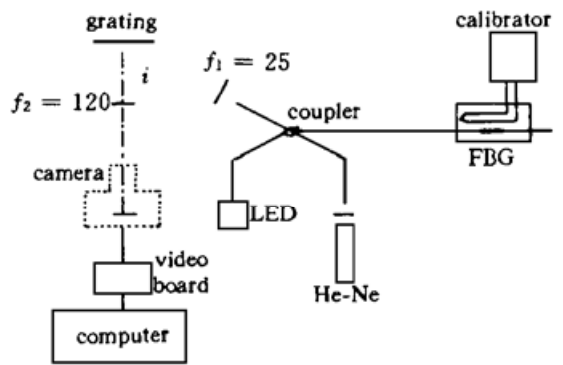


Fig. 4 Schematic of experimental setup

根据实验条件，因光纤光栅的 $K_\epsilon = 0.645 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 及 $K_T = 5.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ，故由(6)式、(7)式可求得此系统的应变及温度测量灵敏度的理论值分别为： $S_\epsilon = 0.0117 \text{ pixel}/\mu\epsilon$ 及 $S_T = 0.0837 \text{ pixel}/^\circ\text{C}$ 。实际由系统测定的传感器成像中心位置与应变及温度关系分别如图 5、图 6 所示。由该实验结果可得系统实际应变测量灵敏度及温度测量灵敏度分别为 $S_\epsilon = 0.0118 \text{ pixel}/\mu\epsilon$ 及 $S_T = 0.0933 \text{ pixel}/^\circ\text{C}$ 。如图像细分的精度为 $dp = 1/10 \text{ pixel}$ ，故由(8)式及可得系统理论应变及温度测量分辨率分别为 $R_\epsilon = 8.547 \mu\epsilon$ 及 $R_T = 1.195^\circ\text{C}$ ；而由实验结果得到的系统实际应变及温度测量分辨率分别为 $R_\epsilon = 8.544 \mu\epsilon$ 及 $R_T = 1.072^\circ\text{C}$ 。显然理论与实验结果基本吻合。

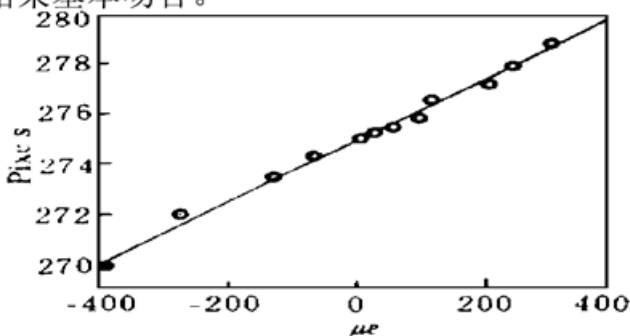


Fig. 5 Position of image versus strain

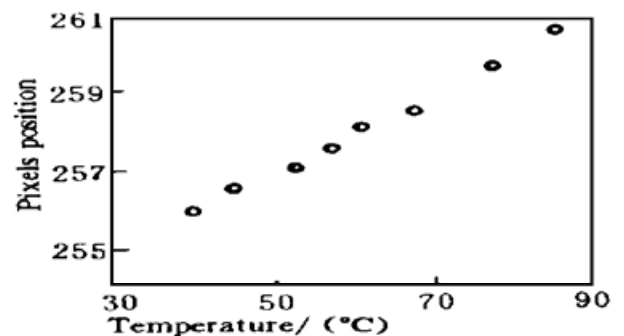


Fig. 6 Position of image versus temperature

另由(9)式可计算得单个传感器成像光斑所占像元数为 $P_0 = 4.3$ 。实际由系统测得的光斑所占像元数 $P_0 \approx 5$ 。如设每只光纤光栅的应变测量范围为 $B_\epsilon = 2000 \mu\epsilon$ (动态范围约为 47 dB), 则由(15)式可知每个光纤光栅传感器所占光谱范围为

$$\Delta\lambda = 2 \times 0.2 \text{ nm} + 0.645 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon \times 2000 \mu\epsilon = 1.69 \text{ nm}$$

故对 $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ 的普通光发射二极管, 由(16)式可知, 系统可复用的光纤光栅数量最多为: $M_2 = 30/1.69 \approx 17$ 。

如仅从成像光谱仪角度出发, 由(10)、(12)式可知每个光纤光栅传感器所占像元数为: $P = 5 + 0.0118 \times 2000 = 28.5 \text{ pixel}$, 若按图像传感器总像元数 $Z = 512$ 个像素计, 则可复用的光纤光栅数为: $M_1 = 512/28.5 = 17.96 \approx 17$ 。

综合前两个结果, 在此条件下, 系统实际可复用的光纤光栅数最多为 $M = 17$ 。

同理, 在温度测量范围为 $B_T = 500^\circ\text{C}$ (动态范围约为 54 dB) 的条件下, 可求出系统实际可复用的光纤光栅数最多为 $M = 10$ 。

结 论 利用成像光谱技术, 可对光纤光栅多传感器的复用信号进行解调。其原理明确、结构简单、便于实现, 且成本低廉、复用容量大。由于条件限制, 目前还无法制作任意波长的光纤光栅, 故实验系统只用了一只光纤光栅传感器。但从实验效果来看, 不管解调还是复用, 都能达到预期目标。而且如果再将多根光纤光栅串联复用系统并联使用(图 7 所示), 则更能数倍提高复用容量。

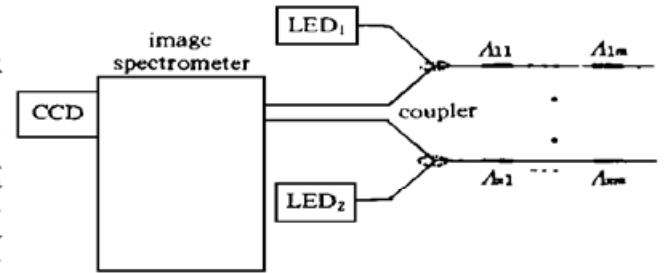


Fig. 7 Proposed schematic of parallel arrangement

参 考 文 献

- [1] Y. J. Rao, In-fiber Bragg grating sensors, *Measur. Sci. & Technol.*, 1997, 8(2): 355~ 375
- [2] Y. J. Rao, D. A. Jackson, Recent progress in multiplexing techniques for in-fiber Bragg grating sensors. *Proc. SPIE*, 1996, 2895: 514~ 518
- [3] 江 毅, 光纤光栅及其传感技术的研究. 重庆大学博士论文, 1996. 72~ 82

Image Spectrometry in Multiplexing FBG Sensors

Chen Weimin Jiang Yi Huang Shanglian

(Department of Instruments, Chongqing University, Chongqing 630044)

(Received 3 August 1997; revised 17 October 1997)

Abstract According to the spectral feature of the signal generated by the multiplexed fiber Bragg grating (FBG) sensors, image spectrometry is proposed to demodulate multiplexed signal. The principle of the demultiplex is analyzed and the main features, such as sensitivity of measurement and the multiplexing capacity of the system is derived. The experimental setup and results are presented.

Key words demultiplex, image spectrometry, fiberoptic Bragg grating sensor.