

基于自相关数字解调的二线制光纤传感网络

李东升^{1,2} 王 静^{1,2} 隋青美^{1,2}

(¹山东大学控制科学与工程学院测控技术与仪器系, 山东 济南 250061)
²山东大学光纤传感技术工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要 光纤光栅传感器最大优势是复用能力强,易实现大规模远距离测量。但目前使用的光纤传感网络多采用波分复用技术,系统规模增大时,测量精度明显下降;且光源与传感器串联在同一根光纤上,信噪比低、可靠性差、难于扩展,限制了光纤传感器的复用能力。为此提出二线制光纤传感网络,它采用并联结构,光源与传感器并联在两根彼此独立的光纤之间,信噪比高,可靠性好,容易扩展;同时,通过对光电二极管输出信号的自相关运算,可以区分中心波长相同但谱线形状不同的传感器,保证测量精度不受系统规模影响。理论分析和实验研究表明,二线制光纤传感网络的信噪比固定,测量精度不受系统规模影响,且故障率低,因此是一种适合工程应用的光纤传感网络。

关键词 光栅传感;光纤传感网络;二线制网络;自相关数字解调

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092953.0053

A Two-Fiber Sensing Network Based on Autocorrelation Digital Demodulating Method

Li Dongsheng^{1,2} Wang Jing^{1,2} Sui Qingmei^{1,2}

¹ *Surveying Technology & Instrument Department, School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*
² *Optical Fiber Sensor Technology and Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*

Abstract The multiplying ability is the greatest advantage of fiber Bragg grating (FBG) sensor, which is easy to realize the large-scale remote measurement system. But at present, the measuring accuracy of optical fiber sensing network constituted by WDM drops obviously when the measuring point quantity increases, and the structure that connected the light source and FBG sensors in series on the same optical fiber reduces the signal-to-noise ratio (SNR) and reliability, and makes the system difficult to expand. In order to solve these problems, a new kind of sensing network called two-fiber sensing network is proposed. The two-fiber sensing network connecte the light source and FBG sensors in parallel between two independent fibers, which increases the SNR, decreases the system fault rate and makes the system easy to expand. At the same time, sensors with same central wave length but different spectrum can be differentiated through the autocorrelation operation of photodiode output signal, which guaranteed the measuring accuracy is not influenced by the measuring point quantity of system. The theoretical analysis and experiment study indicate that the two-fiber sensing network has a fixed SNR and a lower fault rate, and the system's measuring accuracy is not influenced by its scale, therefore it is a kind of optical fiber sensing network which suits for engineering application.

Key words FBG sensors; fiber sensing network; two-fiber network; autocorrelation digital demodulating method

1 引 言

光纤光栅传感器高昂的成本是阻碍其大规模应用的重要原因。通常采用复用技术^[1~6]通过降低传感器平均成本解决这一问题,而波分复用技术^[7,8]

因成本低、维护方便、可靠性高已成为实际应用中构成光纤传感网络的最基本方法。但是,波分复用技术允许复用的测点数目一般不超过 20 点,远不能满足降低成本的需要;而且,由于测点波长变化范围不

基金项目: 山东省重点基金(Z2006G06)资助课题。

作者简介: 李东升(1972—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术与微弱信号处理等方面的研究。

E-mail: lidongshengjn@gmail.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,博士,教授,主要从事新型检测技术方面的研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

允许重合,各点测量精度会随系统容量的增加而降低,不利于工程应用。同时,由于采用串联结构^[9,10],系统可靠性低、不易扩展、维护困难,令使用成本大幅增加,进一步阻碍了其推广应用。

二线制光纤传感网络是采用光纤光栅自相关数字解调方法^[11]构成的一种总线式光纤传感网络。它采用梯形结构,传感器并联在两根彼此独立的光纤之间,利于远传,可靠性好,容易扩展,易于维护;同时,通过自相关数字解调方法利用光纤光栅反射谱形状实现测点定位,不仅使系统容量大幅增加,而且具有测量精度高,实时性好,对环境适应性强的特点,能够有效降低系统安装成本和使用成本,是一种适合工程应用的新型光纤传感网络。

2 二线制光纤传感网络

图 1 是二线制光纤传感网络结构示意图,其中与宽带光源相连接的光纤为发送光纤,作用是将宽带光源发出的光平均分配到各传感光栅;而与自相关数字解调仪连接的光纤为接收光纤,作用是将各传感光栅反射信号合成一束后送入自相关数字解调仪进行数字解调。传感光栅并联在发送光纤和接收光纤之间,其波长变化范围可以不同,也可以相同,但反射谱线形状必须有明显差异。

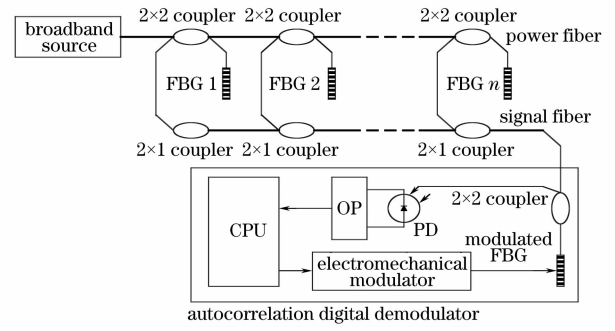


图 1 二线制光纤传感网络

Fig. 1 Two-wire fiber sensing network

为保证自相关数字解调仪接收信号的质量,要求第 m 个传感光栅的耦合因子为 $k_m = 1/(n-m+1)$, n 是系统复用传感光栅总数。这样可以保证每个传感光栅取走输入功率的 $1/n$ 。由于被传送到接收光纤上的信号功率相同,所以任意测点返回自相关数字解调仪的信号强度相等,有利于解调系统的设计与实施。

3 自相关数字解调原理

图 1 中,假设传感光栅与调制光栅的反射谱均为高斯分布,且各测点信号互不相关,可以得到光电探测器输出为

$$P(t) = I_0 R_M \sum_{i=1}^n R_{S_i} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -4 \ln 2 \left[\frac{[\lambda_i(t) - \Lambda_{S_i}]^2}{B_{S_i}^2} + \frac{[\lambda_i(t) - \Lambda_M]^2}{B_M^2} \right] \right\} d\lambda, \quad (1)$$

式中 I_0 是分配给传感光栅的光强度, Λ_M, R_M 是调制光栅中心波长和反射率, $\Lambda_{S_i}, B_{S_i}, R_{S_i}$ 是第 i 个传感光栅的中心波长、半高带宽及反射率。

若调制光栅中心波长在机电调制器控制下作线性扫描,且传感光栅中心波长在同一扫描周期内不发生变化,则相邻扫描周期光电探测器输出信号的自相关为:

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^{+\infty} P_{k+1}(t) P_k(t-\tau) dt = \sum_{i=1}^n K_i \exp \left[-\frac{a_i^2}{2} (K_{\text{scan}} \tau - \Delta \lambda_i)^2 \right], \quad (2)$$

式中 $K_i = \frac{K_{S_i}^2 \sqrt{\pi}}{2\sqrt{2} a_i K_{\text{scan}}}$, $a_i = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{B_{S_i}^2 + B_M^2}}$, $K_{S_i} = \frac{\sqrt{\pi}}{4 \sqrt{\ln 2}} \frac{I_0 R_{S_i} R_M B_{S_i} B_M}{\sqrt{B_{S_i}^2 + B_M^2}}$ 是系统常数, K_{scan} 是调制光栅扫描速率, $\Delta \lambda_i = \lambda_{S_i, (k+1) T_{\text{scan}}} - \lambda_{S_i, k T_{\text{scan}}}$ 是相邻扫描周期第 i 个传感光栅中心波长的变化量, $\lambda_{S_i, k T_{\text{scan}}}$ 、 $\lambda_{S_i, (k+1) T_{\text{scan}}}$ 是第 i 个传感光栅在第 k 个和第 $k+1$ 个扫描周期内的中心波长。选择 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, 使满足

$$\begin{cases} R(\tau_1) = \sum_{i=1}^n K_i \exp \left[-\frac{a_i^2}{2} (K_{\text{scan}} \tau_1 - \Delta \lambda_i)^2 \right] = K_1, \\ R(\tau_2) = \sum_{i=1}^n K_i \exp \left[-\frac{a_i^2}{2} (K_{\text{scan}} \tau_2 - \Delta \lambda_i)^2 \right] = K_2, \\ \vdots \\ R(\tau_n) = \sum_{i=1}^n K_i \exp \left[-\frac{a_i^2}{2} (K_{\text{scan}} \tau_n - \Delta \lambda_i)^2 \right] = K_n. \end{cases} \quad (3)$$

解(3)式可得相邻扫描周期传感光栅中心波长的增量：

$$\Delta\lambda = \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \\ \dots \\ \Delta\lambda_N \end{bmatrix},$$

进而得到传感光栅中心波长的实际漂移：

$$\lambda_{S_i, (k+1)T_{scan}} = \lambda_{S_i, kT_{scan}} + \Delta\lambda. \quad (4)$$

4 实验结果与分析

将表 1 所列光纤光栅分别粘贴在等强度梁 1 和等强度梁 2 上,并构建 $n=3$ 的二线制光纤传感网络如图 2 所示。记录初始状态,然后为两等强度梁分别施加不同的作用力,保证作用在等强度梁 1 上的力是作用在等强度梁 2 上力的两倍,记录自相关数字解调仪读数,并以百分表测出对应等强度梁应变,得到图 3。

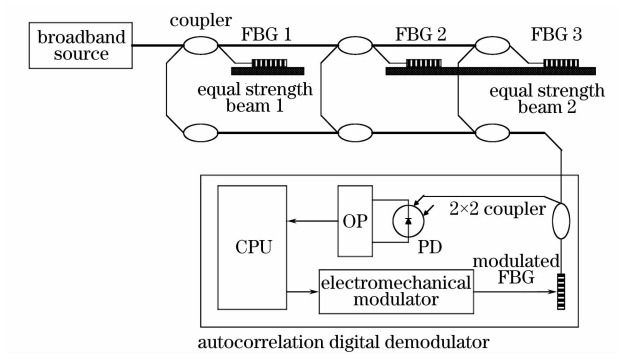
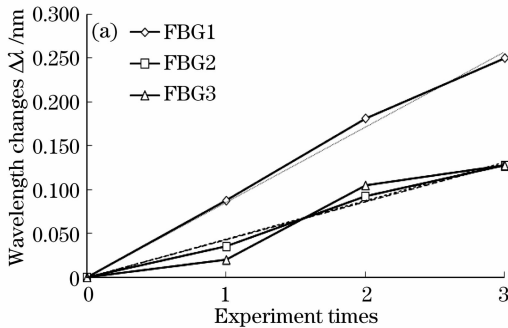


图 2 二线制光纤传感网络实验装置图

Fig. 2 Experiment setup for two-wire fiber sensing network

表 1 FBG 传感器特征参数表

Table 1 Characteristic parameters of FBG sensors

Sensor	Wavelength /nm	Bandwidth /nm
FBG 1	1521.94	0.17
FBG 2	1522.24	0.46
FBG 3	1526.09	0.43

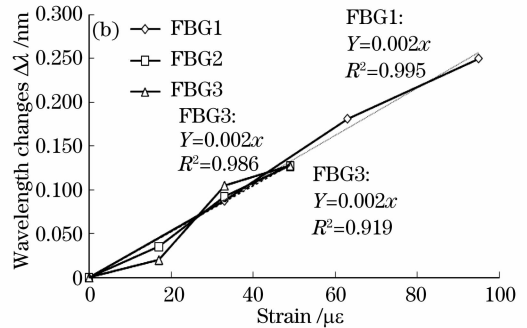


图 3 FBG1/FBG2/FBG3 实验结果。(a) FBG1/FBG2/FBG3 实验读数；(b) FBG1/FBG2/FBG3 拟合直线

Fig. 3 Experimental results of FBG1/FBG2/FBG3. (a) Experimental readings of FBG1/FBG2/FBG3; (b) fitting straight lines of FBG1/FBG2/FBG3

图 3 中实线为各传感器测量读数,虚线为其对应变的拟合直线。可以看出,即使传感光栅中心波长相同,基于自相关数字解调的二线制光纤传感网络仍然可以实现解调,但其测量灵敏度较理论值低^[12]。这是由于传感光栅实际互相关值不为零引起的,通过选择合适谱线形状的传感光栅可以避免这种情况出现,优化数字解调方法也可以在一定程度上提高测量灵敏度。

5 结 论

基于自相关数字解调方法的二线制光纤传感网络是一种梯形结构网络,不仅可以有效传输信号,保证系统远距离测量能力,而且便于维护,易于扩展。更重要的是,它能够通过传感光栅反射谱形状进行测点定位,从而增加系统复用光栅数量,降低系统成

本,因此是一种适合工程应用的光纤传感网络。

参 考 文 献

- Ni Xiaoyi, Wang Ming, Chen Xuxing *et al.*. Wavelength multiplexing of optical fiber microelectromechanical system Fabry-Pérot pressure sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 776~780
倪小琦,王 鸣,陈绪兴 等. 光纤微机电系统法布里-珀罗压力传感器的波分复用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 776~780
- Li Ruoming, Yu Youlong, Dai Wenjiang *et al.*. Active time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1950~1954
李若明,余有龙,代文江 等. 光纤光栅传感器阵列有源时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1950~1954
- Okawara Chiaki, Saijyou Kenji. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing [J]. *Acoustical Science and Technology*, 2007, **28**(1): 39~42
- Li Li, Lin Yuchi, Fu Luhua *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(4): 473~477

- 李 丽,林玉池,付鲁华 等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(4): 473~477
- 5 Park Yong-Lae, Chau Kelvin, Black Richard J. *et al.*. Force sensing robot fingers using embedded fiber Bragg grating sensors and shape deposition manufacturing[C]. Rome, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States, 2007
- 6 Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Pérot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 7 Okawara Chiaki, Saijyou Kenji. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2008, **29**(3): 232~234
- 8 Larrode M G, Koonen A M. All-fiber full-duplex multimode wavelength-division-multiplexing network for radio-over-multimode-fiber distribution of broadband wireless services[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, **56**(1): 248~255
- 9 Abbenseth S, Lochmann S I. Overcoming restrictions of traditional FBG sensor networks using SIK-DS-CDMA [C]. Warsaw, Poland; 2005
- 10 Fei Z, Qing W, Jianping Y. Sequence-inversion-keyed optical CDMA coding/decoding scheme using an electrooptic phase modulator and fiber Bragg grating arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(5): 1508~1515
- 11 Li Dongsheng, Huo Zhipu. Digital demodulation method for fiber Bragg grating sensors based on signal autocorrelation principle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 914~917
- 李东升, 霍志璞. 基于信号自相关原理的光纤光栅数字解调方法[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 914~917
- 12 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 198~203
- 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 198~203