

基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统

刘 胜^{1,2}, 韩新颖^{1,2}, 熊玉川^{1,2}, 文泓桥^{1,2}

¹武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

²武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 基于时分复用技术,提出了一种分布式弱光纤光栅(FBG)阵列振动探测系统。通过匹配干涉仪检测相邻弱 FBG 的干涉信号,可以得到振动信号的频率、相位和位置等相关信息,从而实现高灵敏度分布式测量。使用 3×3 相位解调方法对干涉信号进行解调,可以有效地降低系统的相位噪声。采用光栅个数为 660、间距为 2.5 m 的弱 FBG 阵列对该系统进行了验证。实验结果表明,系统的干涉条纹可见度与相邻弱 FBG 的波长差有关;同时,系统能准确地分辨出不同频率的信号,频率响应范围在 20~1000 Hz 之间,具有很好的频率响应;与标准的地震检波器对比发现,该系统传感单元具有更高的灵敏度。

关键词 传感器; 光纤光栅传感; 弱光栅阵列; 匹配干涉仪

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0210001

Distributed Vibration Detection System Based on Weak Fiber Bragg Grating Array

Liu Sheng^{1,2}, Han Xinying^{1,2}, Xiong Yuchuan^{1,2}, Wen Hongqiao^{1,2}

¹National Engineer Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

²School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract Based on time division multiplexing technology, a distributed weak fiber Bragg grating (FBG) array vibration detection system is proposed. By using a path-match interferometry method, the interference signals between two adjacent weak FBGs are detected, and relevant information of vibration such as phase, frequency and location is obtained, thus we can achieve high sensitivity distributed measurement. The 3×3 phase demodulation technique is employed to effectively eliminate signal fading in the interferometer. The feasibility of the system is verified by a weak FBG array with 660 gratings and 2.5 m distance between adjacent FBGs. Experimental results show that the interference fringe visibility is related to the wavelength difference between adjacent weak FBGs. Meanwhile, the proposed system can accurately distinguish weak signal with different frequencies (ranging from 20 Hz to 1000 Hz) and has better frequency response. The sensor system has higher sensitivity in contrast to standard seismic geophone.

Key words sensors; fiber Bragg grating sensors; weak Bragg grating array; path-match interferometry

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.5060

1 引 言

准分布式光纤光栅(FBG)传感网络具有灵敏度高、响应速度快、方便波长解调、耐腐蚀、抗电磁干扰等特点,已经引起了广泛的关注^[1-2]。其复用方法有多种^[3]:时分复用、波分复用和空分复用等。目前,市场上比

收稿日期: 2016-07-21; 收到修改稿日期: 2016-09-06

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFB439)、湖北省科技支撑计划项目(2014BEC059)

作者简介: 刘 胜(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 1109401518@qq.com

导师简介: 文泓桥(1978—),男,博士,副研究员,主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: whq@whut.edu.cn(通信联系人)

较成熟的光纤传感网络均基于波分复用技术,其优点是结构简单、解调速度快、测量精度高。波分复用技术充分利用了光源光功率,令 FBG 阵列中每个 FBG 传感器的谱型相互独立,带宽互不重叠,从而避免了串扰的影响,提高了系统的信噪比。但由于光源带宽和待测物理量动态范围这两个因素大大地限制了 FBG 波分复用的数量,因此在大规模复用系统成本较高^[4-6]。时分复用与波分复用同样采用串联拓扑结构,同一根光纤上任意两个 FBG 传感器反射回的光谱信号在时域上是分隔开的。利用 FBG 阵列的这种时域特性,可以实现对同一根光纤上的不同 FBG 传感器的光谱进行分辨,从而摆脱波分复用中光源带宽和待测物理量动态范围的限制^[7-9]。空分复用是另一种常见的 FBG 传感器复用技术,不同于时分复用和波分复用的串联拓扑结构,空分复用采用并联拓扑结构,各个 FBG 传感器在空间上相互独立,避免了串扰的干扰,因此清晰度和信噪比较高。但是由于空分复用测量点数少,功率利用率低,不利于大规模复用。总之,由于带宽和传输损耗,这些复用方法的 FBG 传感阵列容量是有限的。

低反射率弱 FBG 的出现,使得大规模 FBG 传感网络成为可能^[10-11]。FBG 反射率越低,复用的数量越多。迄今为止,基于弱 FBG 传感网络的研究报道有很多,采用时分复用技术,FBG 传感器复用数量也已经超过 1000 个^[12-14]。本文基于时分复用技术,以弱 FBG 阵列中相邻两个光栅之间的光纤为传感单元,构建了低相干干涉分布式振动探测系统。通过匹配干涉仪检测两个相邻弱 FBG 之间的干涉信号,可以实现高灵敏度分布式振动测量。

2 系统原理介绍

2.1 基于弱 FBG 阵列的分布式振动探测系统原理

基于时分复用技术,通过检测弱 FBG 阵列中相邻两个光栅之间的低相干干涉信号,设计了一种分布式振动探测系统。该系统的原理如图 1 所示,从宽带光源(ASE)发出的光经过半导体激光放大器(SOA)调制为脉冲光并进行第一级放大。放大后的脉冲光再经过掺饵激光放大器(EDFA)进行第二级放大,成为典型的时分复用系统中的脉冲光源,其中脉冲宽度是 20 ns,周期是 5 kHz(由于采用的是 SOA 调制,脉冲的上升沿和下降沿时间较长,故调制后的波形近似高斯曲线,其 3 dB 带宽约为 10 ns,因此当相邻光栅之间的间隔大于 2 m 时,相邻两弱光栅反射回来的脉冲在时间上就不会发生重叠)。脉冲光通过环形器进入弱 FBG 阵列。弱 FBG 阵列反射光在不同时间反射回来,相邻两个弱光栅反射光分别进入 3×3 耦合器,经过迈克尔孙干涉仪的长臂和短臂,被法拉第旋转镜(FRM)反射为 4 束。当干涉仪两臂与相邻两个 FBG 间距匹配时,时序上位于中间的两束光在耦合器相遇并产生干涉现象(整个弱光栅序列反射光信号时序图如图 2 所示)。干涉信号经过光电转换后转换为电压信号,通过高速采集卡(最大实时采样率为 250 MS/s)采集该电压信号并上传到计算机进行数据处理和显示。其中 FPGA 部分用来产生两路脉冲信号和相应的延时:一路脉冲信号用来驱动 SOA,另一路脉冲信号用来触发采集卡进行采集,通过控制两路脉冲之间的延时,实现对弱 FBG 阵列中每个光栅的逐一检测。

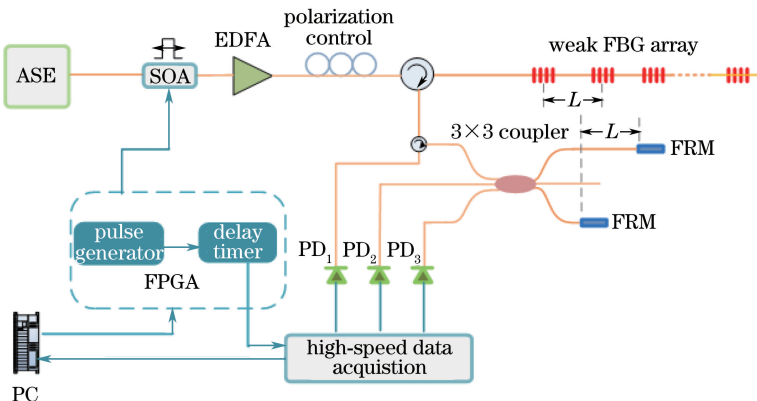


图 1 解调系统原理图

Fig. 1 Diagram of the interrogation system

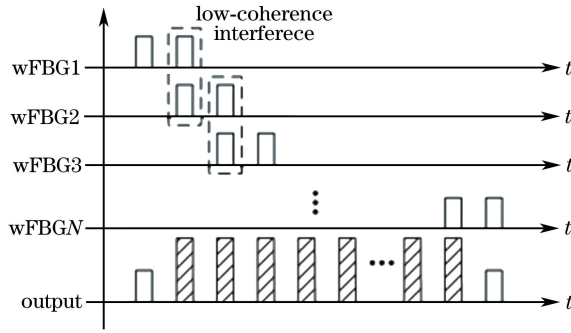


图 2 弱 FBG 序列反射光信号时序图

Fig. 2 Sequence diagram of the reflected light signal of weak FBG array

假设弱光栅序列中有 N 个弱光栅,从光源发出的一束脉冲光进入弱光栅序列后,从弱光栅反射回的光被分为两束分别进入干涉仪两臂,由于两臂之间存在光程差,因而两束光经过反射后在不同时间抵达耦合器。当干涉仪臂差匹配合适时,前面弱光栅经过长臂的反射光与后面弱光栅经过短臂的反射光在耦合器相遇并发生干涉。如图 2 所示,探测器一共可以探测到 $N+1$ 个脉冲光,前面一个和最后一个分别为弱光栅序列第一个和最后一个弱光栅反射光谱信号,中间 $N-1$ 个脉冲光即为干涉信号。通过测量相邻 FBG 之间的低相干干涉信号,实现对整根光纤的分布式振动监测。

2.2 3×3 光纤耦合器解调技术

为了消除系统的相位衰落,使用 3×3 耦合器解调技术对输出信号进行解调。3×3 耦合器作为功率分配器将光源发出的光分为三路的同时,使每个输出信号相位相差 120° 。3 个探测器(PD)分别探测 3×3 耦合器的 3 个输出信号。则其输出信号可以表示为^[15]

$$I_k = D + I_0 \cos[\varphi(t) - (k - 1)(2\pi/3)], \quad (1)$$

式中 $k=1,2,3$ 表示光路输出序号, D 表示输出光强的平均值; I_0 为干涉条纹的峰值强度; $\varphi(t) = \phi(t) + \psi(t)$,其中 $\phi(t)$ 表示相位差信号,即待测信号,而 $\psi(t)$ 表示外界扰动引起的相位差,为干扰信号。3×3 耦合器解调算法流程如图 3 所示。

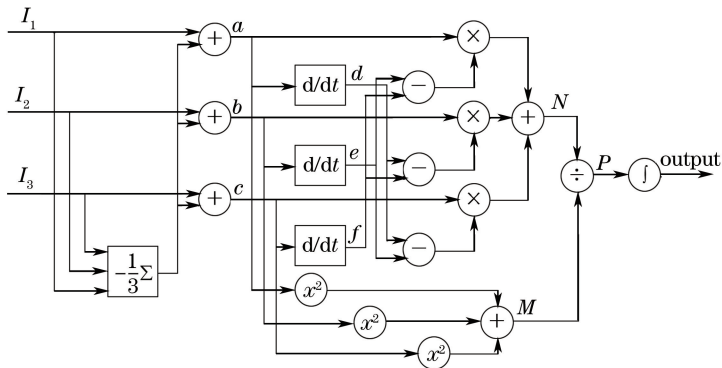


图 3 3×3 耦合器解调算法流程图

Fig. 3 Demodulation algorithm flow chart of 3×3 coupler

经过解调算法后的输出信号可表示为

$$V_{out} = \sqrt{3}\varphi(t) = \sqrt{3}[\phi(t) + \psi(t)]. \quad (2)$$

式中, $\psi(t)$ 由环境噪声引起,一般为低频信号,通过高通滤波器即可以滤除,从而得到待测信号 $\phi(t)$ 。

2.3 干涉信号的条纹可见度

由于产生干涉的两束光波的光强直接影响干涉条纹可见度,而且 FBG 具有波长选择性,只反射特定波长段的光,因此构成低相干干涉的两个 FBG 的波长必须相互匹配,且波长的匹配性直接影响干涉条纹的可见度。在实际测量中,由于制造误差,两个 FBG 的光谱不可能完全一样,其中心波长总会存在一定偏差,从而导致干涉条纹可见度降低。干涉条纹可见度的好坏直接影响到传感器的探测性能。对于弱光栅而言,其

反射谱可以近似为高斯曲线。假设两个 FBG(FBG_A 和 FBG_B) 光谱形状一致,中心波长不同,FBG 的反射谱密度为^[16]

$$R(\lambda) = R_{\max} \exp\left[-4\ln 2 \times \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\nu}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中 R_{\max} 为 FBG 的中心波长反射率, λ_0 和 $\Delta\nu$ 分别为中心频率和带宽。假设光源强度为 I_0 , 探测器测量点位于 FBG_A 中心波长处, FBG_A 和 FBG_B 中心波长差为 $\Delta\lambda$, 则 FBG_A 和 FBG_B 的返回光强 I_{FBG_A} 和 I_{FBG_B} 可分别表示为

$$I_{\text{FBG}_A} = I_0 R_{\max}, \quad (4)$$

$$I_{\text{FBG}_B} = I_0 R_{\max} \exp\left[-4\ln 2 \times \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\nu}\right)^2\right]. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可得干涉条纹可见度为

$$V = \frac{2\sqrt{I_{\text{FBG}_A} I_{\text{FBG}_B}}}{I_{\text{FBG}_A} + I_{\text{FBG}_B}} = \frac{2\sqrt{\exp\left[-4\ln 2 \times \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\nu}\right)^2\right]}}{1 + \exp\left[-4\ln 2 \times \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\nu}\right)^2\right]}. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,干涉条纹可见度与两个 FBG 的波长差有关。当波长差为 0 时,干涉条纹可见度最好,约为 100%。随着波长差的增加,干涉条纹可见度逐渐减小。

3 实验及结果分析

3.1 条纹可见度实验分析

采用峰值反射率为 0.33%、光栅个数为 660、相邻光栅间隔为 2.5 m 的弱光纤光栅阵列对该系统进行了验证。从弱光栅阵列中挑选两个弱光栅(FBG_A 和 FBG_B),其波长分别为 1550.665 nm 和 1550.672 nm,改变其中一个光栅的波长,使两个光栅产生一定的波长差,观察波长失配和干涉条纹可见度的关系。当波长差从 0 逐渐变化到 200 pm 时,干涉条纹可见度从 85%减小到 8%,由于系统的噪声和匹配干涉仪的匹配误差,系统条纹可见度不可能达到 100%。具体的实验结果如图 4 所示。

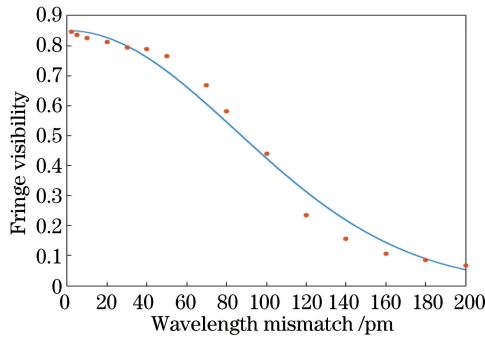


图 4 波长失配与干涉条纹可见度的关系

Fig. 4 Relationship between interference fringe visibility and wavelength mismatch

从图 4 可以发现,当波长差为小于 2 pm 时,干涉条纹可见度最大为 84.7%,当波长差逐渐增大时,干涉条纹可见度减小,当波长差超过 200 pm 时,干涉条纹可见度低于 8%。实验结果和理论分析大致相同。

3.2 干涉系统和地震检波器的对比实验

为了进一步分析该系统的可行性,将上面实验挑选出来的两弱光栅间的 30 cm 腔长贴在木板上,与标准的地震检波器作对比,如图 5 所示,标准检波器灵敏度为 28 V/(m·s⁻¹)。在木板旁边,将一个小球从高处落下,使木板在垂直方向振动,测试结果如图 6 所示。

图 6 中红色曲线为干涉系统的测试结果,蓝色曲线为地震检波器的测试结果。从图中可看出,干涉系统对振动源的响应与地震检波器基本相似,且随着振动逐渐减弱,检波器已经检测不到振动信号,而干涉系统仍可以测到微弱的振动信号,证明干涉系统较地震检波器更加敏感。以上实验分析说明该系统具备较好的

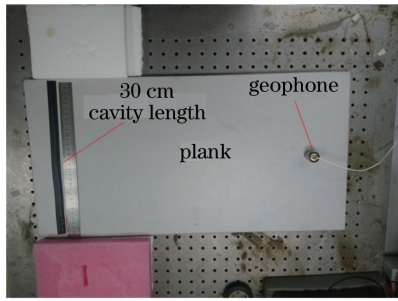


图 5 干涉系统与地震检波器对比实物图

Fig. 5 Comparative physical diagram of interference system and geophone

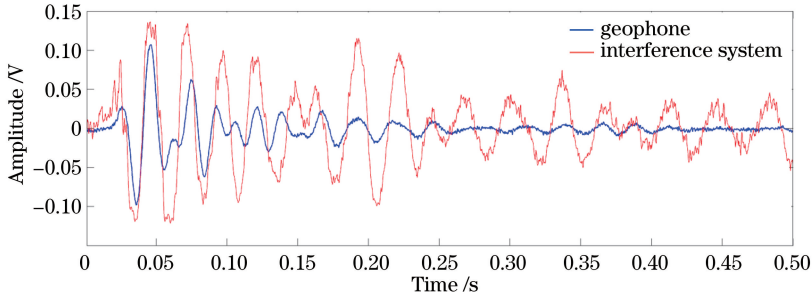


图 6 干涉系统与地震检波器测试结果对比

Fig. 6 Test results comparison of interference system and geophone

工程应用可行性。

3.3 频率响应测试

为了验证该系统的频率响应特性,从弱 FBG 传感阵列中挑选出匹配较好的两个 FBG,两个 FBG 中间的光纤部分缠绕在压电陶瓷(PZT)上,PZT 通过高压驱动会产生相应的振动信号,但由于实验条件的限制,本实验采用信号发生器作为驱动信号,其输出为正弦信号,电压幅值为 10 V。将驱动信号的频率分别设置为 20 Hz 和 40 Hz,其余参数都相同,测试结果分别如图 7、图 8 所示。

从图 7、图 8 中可以看出,该系统能够很好地实现信号的正确解调,可以分辨出不同频率的信号,具有很好的频率响应特性。

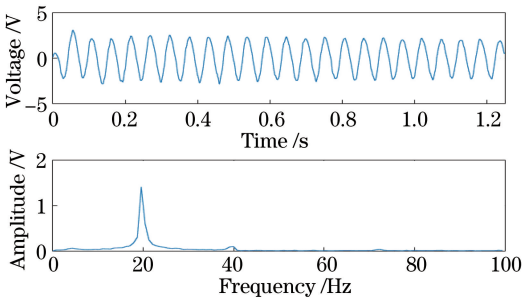


图 7 系统对 20 Hz 信号的测试结果

Fig. 7 Test result of 20 Hz signal for the system

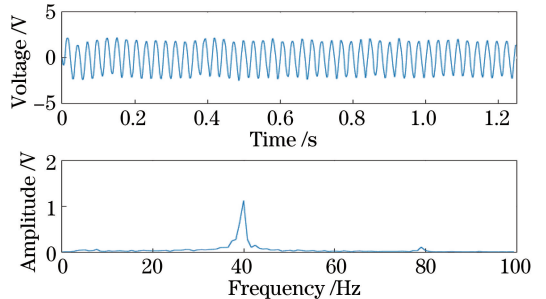


图 8 系统对 40 Hz 信号的测试结果

Fig. 8 Test result of 40 Hz signal for the system

4 结 论

基于时分复用技术,提出了一种检测相邻两个弱光栅之间干涉信号的分布式振动探测系统。采用光栅间隔为 2.5 m、个数为 660 的 FBG 阵列对该系统可行性进行了验证。实验结果表明,当两光栅的波长差在 20 pm 以内时,条纹可见度可达 82%,此时系统的响应最好,灵敏度最高;同时,系统可以准确地采集到全部干涉信号,实现对整根光纤的分布式振动监测;系统也可以分辨出不同频率的信号,频率响应范围为 20~1000 Hz;通过和标准地震检波器的对比,可以得到该系统具有更高的灵敏度,说明该系统能够很好地应用

于地震、山体滑坡等情况的实时测量,并实现高灵敏度的分布式振动监测。

参 考 文 献

- [1] Rao Y J, Ribeiro A B, Jackson D A, *et al.* Simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in fiber grating sensing network[J]. *Optics Communications*, 1996, 125(1-3): 53-58.
- [2] Ecke W, Latka I, Willsch R, *et al.* Fiber optic sensor network for spacecraft health monitoring [J]. *Measurement Science Technology*, 2001, 12(7): 974-980.
- [3] Grattan K T, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2000, 82(1-3): 40-61.
- [4] Zhang L W, Qian J W, Zhang Y N, *et al.* On SDM/WDM FBG sensor net for shape detection of endoscope[C]. *International Conference on Mechatronics & Automation*, 2005, 4: 1986-1991.
- [5] Dong Xiaopeng, Zheng Junda. Multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905007.
董小鹏, 郑俊达. 基于波分复用的光纤多防区周界传感系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905007.
- [6] Brook C A, Mark F G, Sidney A G, *et al.* Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four 8 m optical fibers during static load tests of a composite structure[J]. *SPIE*, 2001, 4332: 13.
- [7] Cooper D J, Coroy T, Smith P W. Time-division-multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(16): 2643-2654.
- [8] Wang Y, Gong J, Wang D Y, *et al.* A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 70-72.
- [9] Chen C, Wang J, Wang D N, *et al.* Intrinsic crosstalk analysis of a serial TDM FBG sensor array by using a tunable laser[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2000, 2(1): 533-534.
- [10] Wang H C, Tam H Y. Time- and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 17(12): 2709-2711.
- [11] Lloyd G D, Everall L A, Sugden K, *et al.* Resonant cavity time-division-multiplexed fiber Bragg grating sensor interrogator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(10): 2323-2325.
- [12] Wang Y M, Gong J M, Wang D Y, *et al.* A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(30): 2751-2756.
- [13] Hu C Y, Wen H Q, Bai W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1406-1411.
- [14] Zhang M, Sun Q, Wang Z. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(s13-14): 3082-3087.
- [15] Liu Chang. Research and realize on demodulation system based on the 3×3 coupler[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 15-26.
刘 畅. 3×3 耦合器解调方法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 15-26.
- [16] Shi C Z, He L H, Wang J, *et al.* Noise limit in heterodyne interferometer demodulator for FBG-based sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(10): 2287-2295.