第 33 卷 第 3 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 3
2020 年 9 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2020

基于 DFB 光纤激光拍频解调的高分辨率声发射检测技术

贾 青[1], 马怀祥[1], 张文涛[2], 黄稳柱[2]

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043;
2. 中国科学院 半导体研究所,北京 100083)

摘要:提出了一种结构简单的基于分布式反馈(DFB)光纤激光器的拍频解调系统,该解调系统的应变分辨率可以达到 6.4×10^{-3} $\mu\varepsilon$,动态范围可以达到 400 MHz。提出的基于 DFB 光纤激光拍频解调技术的应变分辨率高于基于匹配光栅、线性滤波器和阵列波导光栅滤波器波长解调技术。动态范围大于基于可调谐激光器的相移光纤布拉格光栅强度解调技术和基于光纤干涉仪的光纤激光相位解调技术。整个系统的 2 个激光相互拍频得到拍频信号,通过基于虚拟仪器的信号采集处理系统进行处理。由高采样率的数据采集卡采集数据,通过基于 LabVIEW 的软件系统进行信号分析,得到拍频信号的频谱图。由频谱图得到拍频信号的带宽,再根据波长与频率的关系,DFB 光纤激光器的灵敏度得到解调系统的应变分辨率。根据 NI 数据采集卡的采样率得到解调系统的动态范围。采用短时傅里叶变换法的时频分析方法提高应变分辨率。提出的 DFB 光纤激光拍频解调的声发射检测技术能够以较高的应变分辨率实现对由磨损或断裂等故障引起的高频声发射信号的检测。

关键词:分布式反馈光纤激光器;解调;拍频;LabVIEW;时频分析;声发射

中图分类号: TN253 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-0373(2020)03-0086-07

0 引言

声发射是由材料局部能量快速释放而产生的一种瞬态弹性波现象。大多数材料在磨损和断裂时,都会产生高频的声发射信号。在石油化工、交通运输、航天等众多领域[1]中,现代机械设备在工作过程中都会出现磨损或断裂等故障。因此有必要使用声发射传感器来检测这些故障。光纤声发射传感器与传统的电学类声发射传感器相比,具有频带宽、不受电磁干扰、灵敏度高、体积小、不必与被测物体接触、电子设备与传感器可以间隔很远等优点。因此,光纤声发射传感器将被用于检测由磨损或裂纹等故障引起的高频声发射信号。

光纤布拉格光栅声发射传感器是目前应用最广泛的声发射传感器之一。光纤布拉格光栅波长解调技术通常包括基于匹配光栅、线性滤波器和阵列波导光栅滤波器波长解调技术[2],基于匹配光栅的波长解调技术的应变分辨率相对较低,最高为 0.01 $\mu\varepsilon$,基于线性滤波器的波长解调技术的应变分辨率不高,最高为 2.4 $\mu\varepsilon$,基于阵列波导光栅滤波器的波长解调技术应变分辨率较低,最高为 8 $\mu\varepsilon$,这些波长解调技术的应变分辨率有待提高[3]。另外几种解调技术包括基于可调谐激光器的相移光纤布拉格光栅强度解调技术和基于光纤干涉仪的光纤激光相位解调技术,虽然这 2 种解调技术有很高的应变分辨率[4],但是动态范围很小。还有一种解调技术是基于光纤激光器的拍频解调技术,这种解调技术具有结构紧凑、波

收稿日期:2019-03-14 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190039
基金项目:石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2018047)
作者简介:贾青(1992—),男,硕士研究生,研究方向为于光纤声发射传感。E-mail:1104605338@qq.com
贾青,马怀祥,张文涛,等. 基于 DFB 光纤激光拍频解调的高分辨率声发射检测技术[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):86-91,96.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分复用能力强[5]、动态范围大[6]等优点。基于光纤激光器的拍频解调技术包括基于分布式布拉格反射激光器的偏振正交拍频解调技术和基于分布式反馈激光器的拍频解调技术。限制基于分布式布拉格反射激光器的偏振正交拍频解调技术应用的主要原因是应变分辨率低，只有少量的微应变。为了提高应变分辨率，提出了基于 DFB 光纤激光器的拍频声发射解调技术。该解调技术能够以较高的应变分辨率检测由磨损或断裂等故障引起的声发射信号。

1　解调原理

基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统原理如图 1 所示，DFB 光纤激光器将经过波分复用器的 980 nm 的泵浦光进行泵浦并输出激光，经波分复用器，光纤隔离器 2 与 1 550 nm 光纤激光器发出的激光经光纤隔离器 1 在光纤耦合器处相遇并产生拍频信号，并经光电探测器转化成电信号；再通过基于虚拟仪器的信号采集处理系统进行处理。得到拍频信号的频谱图。根据频谱图得出拍频信号的 3 dB 带宽，根据波长与频率的关系(1 pm 相当于 125 MHz)和 DFB 光纤激光器的灵敏度(1 pm/$\mu\varepsilon$)得到解调系统的应变分辨率[7]。最后根据数据采集卡 NI 5772 的采样率得到解调系统的动态范围。

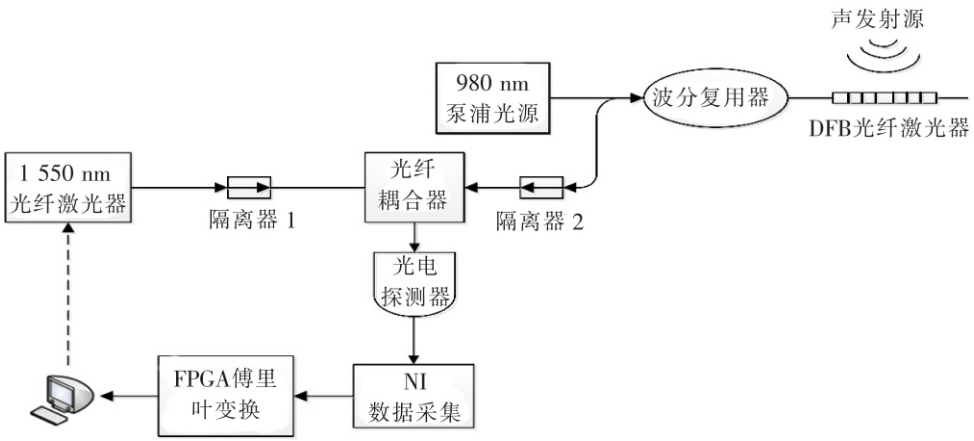


图 1　基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统原理图

在图 1 的实验装置中，DFB 光纤激光器的波长 λ_B 由相移光栅反射光谱的中心波长决定，可以表示为

$$\lambda_B = 2\, n_{\mathrm{eff}}\, \Lambda \tag{1}$$

式中，n_{eff}为光纤纤芯的折射率；Λ 为光栅周期。1 550 nm 光纤激光器和 DFB 光纤激光器的输出电场可表示为

$$E_1(t) = E_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \tag{2}$$

$$E_2(t) = E_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \tag{3}$$

式中，f_1、f_2 分别为 NKT 光纤激光器和 DFB 光纤激光器的激光频率；φ_1、φ_2 分别为 1 550 nm 光纤激光器和 DFB 光纤激光器的光相位。

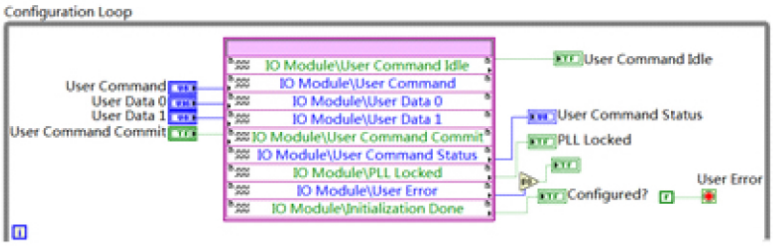
当 NKT 光纤激光器和 DFB 光纤激光器的 2 个激光束相遇时，光电探测器的光电流为

$$u(t) \propto E_1 E_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \tag{4}$$

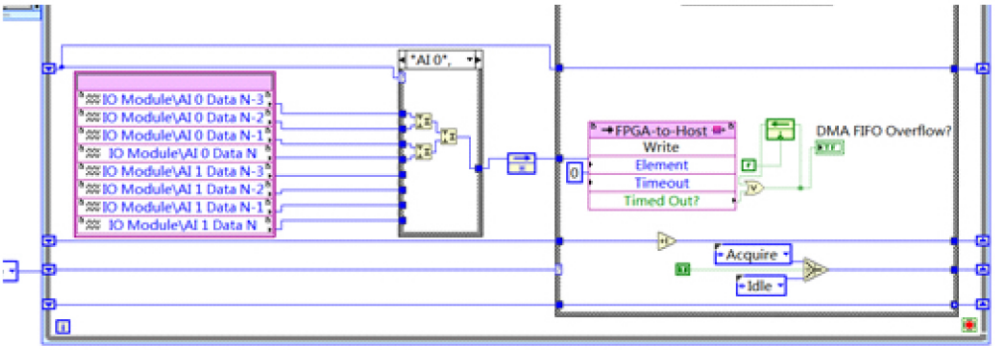
2　实验方法及结果

以上解调原理中的基于虚拟仪器的信号采集处理系统是首先进行现场可编程门阵列 FPGA 编译，其 LabVIEW 程序如图 2 所示，其中图 2 (a)为 FPGA 编译代码的配置循环图，图 2 (b)为 FPGA 编译代码的模拟输入图。编译完成后，读取采集到的数据，读取得到拍频信号的频谱图，数据读取代码图如图 3 所示。信号采集处理流程如图 4 所示，开发的信号分析软件界面如图 5 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

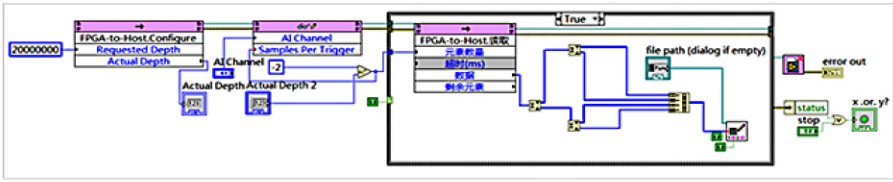


(a)FPGA 编译代码的配置循环图

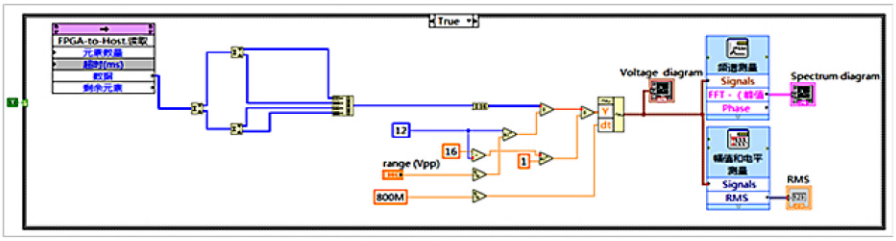


(b)FPGA 编译代码的模拟输入图

图 2 FPGA 编译代码图



(a)数据读取代码的数据判断图



(b)数据读取代码的频谱显示图

图 3 数据读取代码图

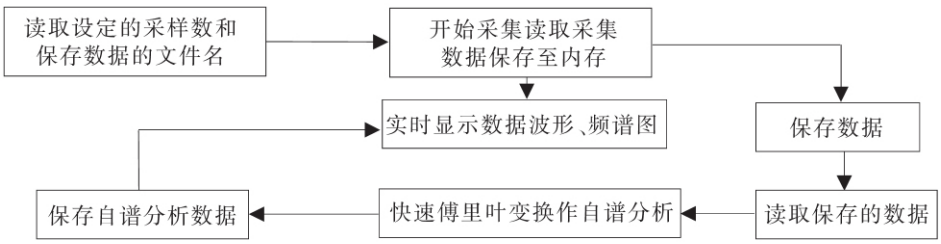
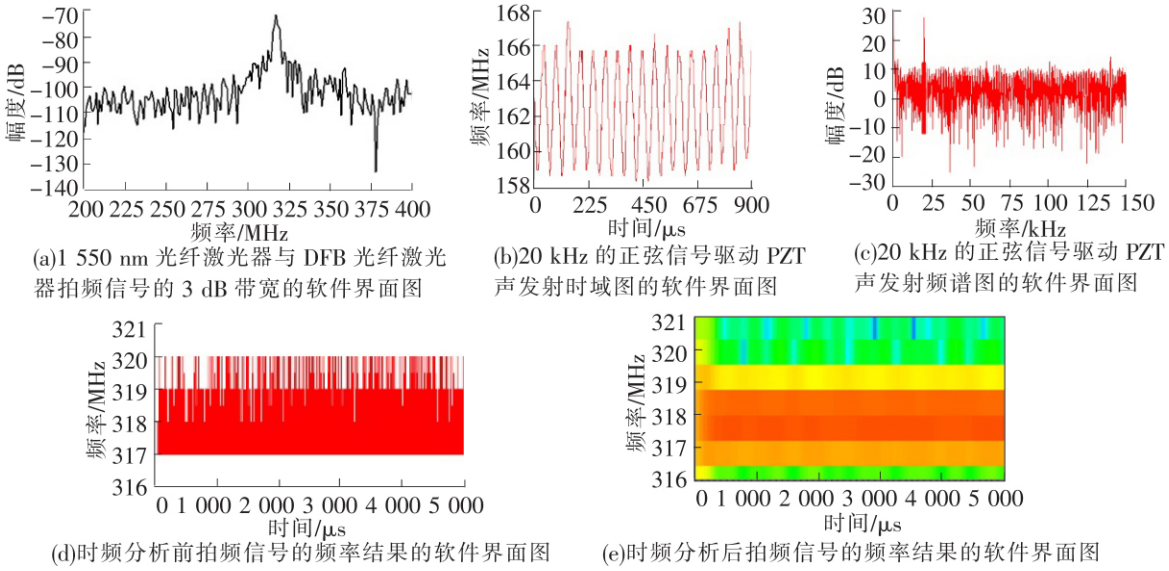


图 4 信号采集处理流程图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

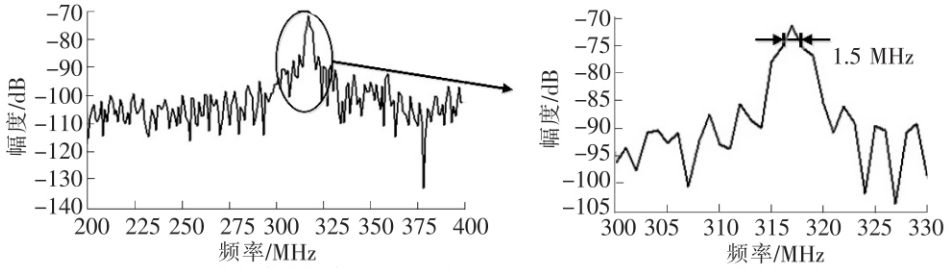


(a)1 550 nm 光纤激光器与 DFB 光纤激光器拍频信号的 3 dB 带宽的软件界面图　(b)20 kHz 的正弦信号驱动 PZT 声发射时域图的软件界面图　(c)20 kHz 的正弦信号驱动 PZT 声发射频谱图的软件界面图

(d)时频分析前拍频信号的频率结果的软件界面图　(e)时频分析后拍频信号的频率结果的软件界面图

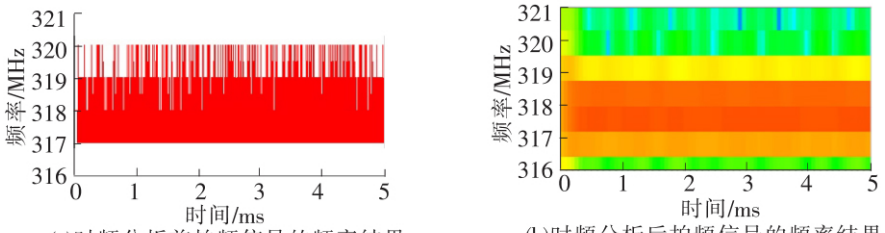
图 5　信号分析软件界面图

完成上述编程后,通过使用图 1 的基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统进行实验,得出整个解调系统的应变分辨率。实验步骤是使用光谱仪观察 DFB 光纤激光器的激射波长,得到其中心波长为 1 537.19 nm,调节 1 550 nm 光纤激光器的激光波长,当波长为 1 537.195 nm 时,此时的拍频信号的时域图经 FFT 处理得到的拍频信号的频谱图中出现最大峰值(拍频信号),如图 6 (a)所示。对得到的拍频信号做放大处理,得到拍频信号的 3 dB 带宽,为 1.5 MHz,如图 6 (b)所示。与此结果相对应的拍频信号的频率的时域图如图 7 (a)所示。根据波长与频率关系(1 pm 相当于 125 MHz),DFB 光纤激光器的灵敏度为 1 pm/$\mu\varepsilon$,可以得到解调系统的应变分辨率为 1.2×10^{-2} $\mu\varepsilon$。



(a)1 550 nm 光纤激光器与 DFB 光纤激光器拍频信号的 3 dB 带宽示意图　(b)1 550 nm 光纤激光器与 DFB 光纤激光器拍频信号的 3 dB 带宽放大示意图

图 6　1 550 nm 光纤激光器与 DFB 光纤激光器拍频信号的 3 dB 带宽示意图



(a)时频分析前拍频信号的频率结果　(b)时频分析后拍频信号的频率结果

图 7　时频分析前后拍频信号的频率结果

NI 数据采集卡的采样率决定了解调系统的动态范围,测试过程中所使用的数据采集卡 NI 5772 的采样率为 800 MHz,经 FFT 运算后得到的拍频信号的频谱图的频率范围为 0～400 MHz,所以该解调系统的动态范围为 400 MHz。

经上述计算得到解调系统的应变分辨率为 1.2×10^{-2} $\mu\varepsilon$,可以使用时频分析的方法来提高解调系统

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的应变分辨率,本实验所使用的时频分析方法是短时傅里叶变换法,此方法实际上是一种加窗的傅里叶变换,它是随着窗函数在时间轴上的滑动而形成的一种信号时频表示[8]。短时傅里叶变换实现在时间域和频率域组成的二维空间信号的特性寻找。时频平面上的时间分辨率 Δt 是由时窗的宽度 T 决定,它的值的大小是相邻窗的重叠部分的长度,可由公式 $\Delta t=(T-L)/f_s$ 表示,其中,L 为时窗滑动步长;f_s 为采样频率。L 可取 T 的一半,若使解调系统的解调速度达到 1 MHz,此时 Δt 等于 1 μs,而拍频信号的采样率为 800 MHz,所以 $T-L=800$,即 $T=1\ 600$。频率分辨率 Δf 是由频窗的宽度 B 决定[9],可以由公式 $\Delta f=f_s/N$ 表示,其中,N 为采样点数。

由不确定性原理,对于任何有限能量的信号,它的时宽 T 和频宽 B 总是满足式 $T\times B=\Delta t\times\Delta f\geqslant 1/4\pi$,可以得到 $\Delta f\geqslant 79.578$ kHz,通过理论分析得到的频率分辨率最高为 79.578 kHz(相当于应变分辨率为 6.37×10^{-4} με),由计算频率分辨率的公式 $\Delta f=f_s/N$,f_s 为 800 MHz,若使频率分辨率最高,采样点数为 10.054 k。设置好采样点数后得到的时频分析结果如图 7 (b)所示。根据时频图所得到的解调系统的频率分辨率为 800 kHz(相当于应变分辨率为 5.2×10^{-3} με),根据波长与频率的关系可得解调系统的应变分辨率为 6.4×10^{-3} με。

以上分析方法有一定缺陷,窗函数的主瓣宽度反应其频率分辨率,主瓣越宽,频率分辨率越低。而实验中所选用的窗函数是汉宁窗,该窗函数的主瓣宽度很宽,使得时频分析所得到的频率分辨率下降,低于理论计算值,可以选择主瓣宽度窄的矩形窗来提高频率分辨率,从而减小与理论分析的差异。

通过使用上述的时频分析方法使得基于 DFB 光纤激光器拍频解调的声发射检测技术的应变分辨率达到了 6.4×10^{-3} με。而基于匹配光栅的波长解调技术的应变分辨率为 0.01 με、基于线性滤波器的波长解调技术的应变分辨率为 2.4 με、基于阵列波导光栅滤波器的波长解调技术应变分辨率为 8 με。基于 DFB 光纤激光器拍频解调的声发射检测技术的应变分辨率高于基于匹配光栅、线性滤波器和阵列波导光栅滤波器波长解调技术的应变分辨率[3]。

3 光纤激光声发射验证实验

为了验证以上搭建的基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统能否准确地检测声发射信号,用此解调系统做了压电陶瓷(PZT)声发射实验与低速冲击探测实验进行验证。

首先通过压电陶瓷(PZT)声发射模拟实验来验证。使用透明胶将 DFB 光纤激光器粘接在钢板的表面上,在距 DFB 光纤激光器较近的地方用 502 胶耦合 PZT 驱动器,如图 8 所示,20 kHz 的正弦信号驱动 PZT 声发射时域图如图 9 所示,频谱图如图 10 所示。由 20 kHz 的正弦信号驱动 PZT 声发射频谱图可得,正弦信号的频率为 20 kHz,与所施加的正弦信号的频率相同。

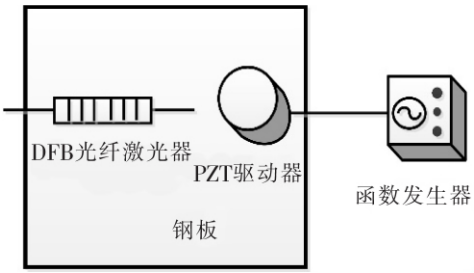


图 8 DFB 光纤激光器与 PZT 粘接在钢板表面示意图

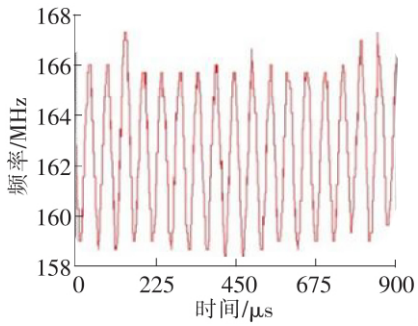


图 9 20 kHz 正弦信号驱动 PZT 声发射时域图

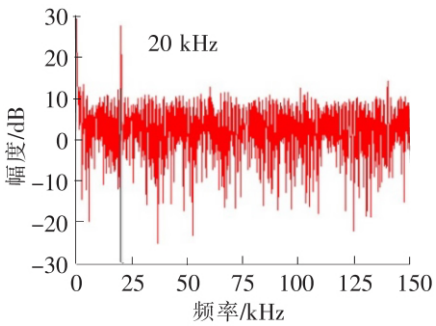


图 10 20 kHz 正弦信号驱动 PZT 声发射频谱图

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

然后通过低速冲击探测实验来验证。使用透明胶将 DFB 光纤激光器粘接在钢板的表面上，在距离 DFB 光纤激光器 40 cm 处，使用一个直径为 10 mm、重 1.5 g 的钢球，从钢板上方 25 cm 高处下落模拟突发型声发射信号，基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统探测到的模拟声发射信号的时域图如图 11 所示。所以得出基于 DFB 光纤激光器的拍频解调系统能够准确的探测到突发型声发射信号。

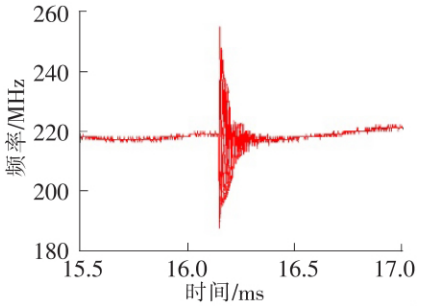


图 11　单通道光纤激光声发射检测所探测到的模拟声发射信号时域图

4　结论

基于 DFB 光纤激光器的拍频解调声发射检测系统可以达到 6.4×10^{-3} $\mu\varepsilon$ 的高应变分辨率，并且可以使解调系统的动态范围达到 400 MHz。基于 DFB 光纤激光器的拍频解调声发射解调技术的优势很大，其应变分辨率高于基于匹配光栅、线性滤波器和阵列波导光栅滤波器波长解调技术，动态范围大于基于可调谐激光器的相移光纤布拉格光栅强度解调技术和基于光纤干涉仪的光纤激光相位解调技术。该解调技术能够以较高的应变分辨率检测由磨损或裂纹等故障引起的声发射信号。通过正弦信号驱动 PZT 声发射模拟实验和低速冲击探测实验证明，可以利用 DFB 光纤激光器准确地检测出声发射信号。

参　考　文　献

[1]Wild G, Hinckley S. Fiber Bragg Grating Sensors for Acoustic Emission and Transmission Detection Applied to Robotic NDE in Structural Health Monitoring[C]// IEEE Sensors Applications Symposium. San Diego: IEEE, 2007:1-6.

[2]温立志，张成社. 光纤 FBG 光栅传感测试技术研究及其应用[J]. 石家庄铁道学院学报:2004,17(4):71-74.

[3]Perez I M, Cui H L, Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings[J]. Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2001, 4328(8):209-215.

[4]Lu S, Jiang M, Sui Q, et al. Acoustic emission location on aluminum alloy structure by using FBG sensors and PSO method[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(8):742-749.

[5]Guo T, Wong A C L, Liu W S, et al. Beat-frequency adjustable Er^{3+}-doped DBR fiber laser for ultrasound detection. [J]. Optics Express, 2011, 19(3):2485-92.

[6]Guan B O , Jin L , Cheng L , et al. Acoustic and Ultrasonic Detection with Radio-Frequency Encoded Fiber Laser Sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2):302-313.

[7]Huang W, Zhang W, et al. Distributed feedback fiber laser for sub-nanostrain-resolution static strain measurement by use of swept beat-frequency demodulation[C]//. Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference. Jeju: International Society for Optics and Photonics, 2015:965500-965504.

[8]周云，李世平，罗鹏. 基于 Hanning 自卷积窗函数的短时傅里叶变换[J]. 计量技术,2012(3):8-11.

[9]马鑫. 基于时频分析的雷达智能终端系统的研究与实现[D]. 南京:南京理工大学,2013.

（下转第 96 页）

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Three-Dimensional Advanced Geological Prediction Technology for Tunnel Seismic Wave Method and Its Application

Sun Zhitao, Lou Guochong, Man Lingcong

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Long-distance advanced geological prediction is the key step in the construction of new tunnels. At present, the long-distance seismic wave method advanced detection technology adopted in the world has a single way to collect data, and it also has poor engineering adaptability, low work efficiency and poor forecasting effect. In short, this paper proposed a three-dimensional geological prediction technology based on the theory of seismic wave fluctuation and combined with the tunnel construction space , establishing a three-dimensional prediction observation system for tunnels which was applied into practical engineering selecting the hammering method as the excitation method, and these technologies provided technical support for the safe construction of tunnels, subways and other projects.

Key words: seismic wave method; three-dimensional geological prediction; tunnel

(上接第91页)

DFB Fiber Laser for High-resolution Acoustic Emission Detection Technique Based on Beat Frequency Interrogation

Jia Qing[1], Ma Huaixiang[1], Zhang Wentao[2], Huang Wenzhu[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Semiconductor Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A compact detection system based on distributed feedback (DFB) fiber laser using beat frequency interrogation was proposed, the detection system can reach a high strain resolution of $6.4\times10^{-3}\mu\varepsilon$. And the dynamic range of the demodulation system can reach 400 MHz. The strain resolution of DFB beat frequency demodulation technique based on fiber laser is higher than that based on matched grating, linear filter and arrayed waveguide grating filter. The dynamic range is greater than the phase-shifted fiber Bragg grating intensity demodulation technique based on tunable laser and the fiber laser phase demodulation technique based on fiber interferometer. The two lasers of the whole system beat frequency each other to get the beat frequency signal. Then the signal acquisition and processing system based on virtual instrument developed by the Research Group is processed. Data are collected by a high sampling rate data acquisition card, and the spectrum of beat frequency signal is obtained by signal analysis based on LabVIEW software system. The bandwidth of beat frequency signal is obtained from the spectrum diagram, and the strain resolution of the demodulation system is obtained according to the relationship between wavelength and frequency, the sensitivity of DFB fiber laser. The dynamic range of the demodulation system is obtained according to the sampling rate of NI data acquisition card, and the strain resolution is improved by the time-frequency analysis method of short-time Fourier transform. The acoustic emission detection technique based on beat frequency demodulation of DFB fiber laser can detect high frequency acoustic emission signals caused by wear or fracture with high strain resolution.

Key words: distributed feedback fiber laser; demodulation; beat frequency; LabVIEW; time-frequency analysis; acoustic emission

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net