

环形光纤声发射传感器的相位调制特性研究*

梁艺军 徐彦德 刘志海 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 提出了一种基于光纤 Sagnac 干涉仪的环形传感器,用于固体表面传播的超声波的检测. 这种传感器的特点是能够精确地检测由固体表面传播的超声波产生的微弱振动. 当超声波信号通过光纤传感器的两个臂到达探测器时,干涉仪的输出光强度受到了超声信号的调制. 通过检测干涉仪的输出光强度并利用 Fourier 变换,测得了超声信号的振幅和频率. 而且对传感系统的位相调制特性进行了仿真,并对实验结果进行了分析,结果表明该系统可用于固体表面传播的超声波频率特征的识别.

关键词 Sagnac 干涉仪; 光纤传感器; 声发射; 位相调制特性

中图分类号 TN818 **文献标识码** A

0 引言

声发射(Acoustic Emission 简称 AE)是由于材料变形或者破坏时积蓄起来的应变能所释放的声音的传播现象. 随着声发射研究领域的扩大,声发射的含义也已广义化,如泄漏、轴承的滑动、钻井过程和木材干燥时发出的声音等也被称为 AE^[1]. 近年来,随着光纤传感技术应用领域的扩展,光纤传感器用于声发射(超声)检测的报导越来越多,各种各样的光纤干涉仪被用于检测固体介质中传输的超声波^[2~8].

本文提出了一种基于 Sagnac 干涉仪原理构成的光纤环形传感器,用来检测超声波. 该传感器既可埋入固体内部又可贴附在固体的表面上来探测固体结构中伴随着微裂纹发生及各种原因造成的振动而产生的声发射. 实验中,采用人工大理石板作为传导超声波的物体. 光纤环形传感器被贴附在人工大理石板面上的一侧,一个压电式换能器(PZT)被固结在人工大理石板面上的另一侧,PZT 的振动将会导致在人工大理石板中产生超声波. 理论分析和实验结果表明,本文提出的光纤传感器能够精确地测量在固体中传播的超声波,并通过频谱分析获得超声波的频率.

1 工作原理

单模光纤 Sagnac 干涉仪的结构如图 1. LD 是激光二极管,PD 是光电二极管. l_1 和 l_2 是干涉仪的两个臂,起传输光信号的作用. l 是一段被缠绕成圆环状的光纤,用来接收或感应超声波, 2×2 光纤 3 dB 耦合器被用来分解和合成干涉光束. 从耦合器的一个端注入的激光经过耦合器后被分成两束,一束光经 $l_1 \rightarrow l$, l_2 传输到输出端,另一束经 $l_2 \rightarrow l \rightarrow$

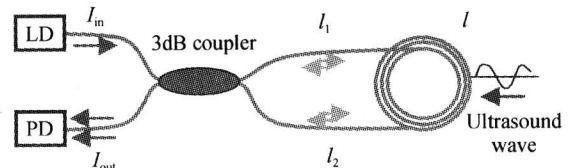


图 1 光纤 Sagnac 干涉仪原理

Fig. 1 Schematic of the fiber optic Sagnac interferometer l_1 传输到输出端. 当超声波作用于圆环状光纤 l 时,在 l 中传输的两束光的位相被调制. 超声波对干涉仪的两个臂 l_1 和 l_2 的作用可以忽略不计. 到达光探测器的两束光的光波场 E_L 和 E_R 分别被可表示为^[6,7]

$$E_L = A \exp i[\omega t - \varphi_s(t - \tau_L) + \phi_1] \quad (1)$$

$$E_R = A \exp i[\omega t - \varphi_s(t - \tau_R) + \phi_2] \quad (2)$$

式中 A 是与注入光的振幅和耦合器的插入损耗成正比的常量; ω 是光波的频率; φ_s 是超声波导致的传感区域两束光位相的变化; τ_L 和 τ_R 分别是这两束光通过传导光纤 l_1 和 l_2 从光纤敏感区域 l 传播到光探测器所经历的时间; ϕ_1 和 ϕ_2 分别是两束光在光纤敏感区域 l 的初位相,它们与传导光纤 l_1 和 l_2 的长度有关. 由式(1)和(2),输出到光探测器的光强度为

$$I_{out} \propto (E_L + E_R) \cdot (E_L + E_R)^* = 2A^2 [1 + \cos(\Delta\varphi_s + \Delta\phi)] \quad (3)$$

式中

$$\Delta\varphi_s = \varphi_s(t - \tau_R) - \varphi_s(t - \tau_L)$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$$

给 PZT 加载一个正弦波电压,并认为 PZT 的振动在人工大理石板中线性传播. 作用在光纤 l 上的超声波(或振动)对 l 中传输的光波的位相的调制可以被表示为

$$\varphi_s = \varphi_{s0} \cos \omega_u t \quad (4)$$

这里, ω_u 是超声波的频率; φ_{s0} 是位相变化的幅值,与超声波的强度成正比. $\Delta\varphi_s$ 可表示为

* 哈尔滨工程大学基础研究基金项目(HEUF04017)

Tel: 0451-82569391 Email: Liang_yijun@126.com

收稿日期: 2005-06-05

$$\Delta\varphi_s = 2\varphi_{s0} \sin \omega_u(t - \tau/2) \sin \omega_u(\tau'/2) \quad (5)$$

式中, $\tau = \tau_R + \tau_L$, $\tau' = \tau_R - \tau_L$.

在实际检测中,通常只关心信号的交流部分,式(3)可以被改写为

$$I_{out} = \cos [\gamma \sin \omega_u(t - \tau/2) + \Delta\phi] \quad (6)$$

式中, $\gamma = 2\varphi_{s0} \sin(\omega_u \tau'/2)$.

2 计算机模拟

为了验证上述理论推导的正确性及与之相适应的实验条件,利用 MATLAB 在计算机上对式(6)进行了仿真模拟. 采用如图 2 的输入信号,该信号来自于由信号发生器驱动的 PZT 换能器产生的超声波信号,其谐振频率 $\omega_u/2\pi = 25$ kHz. 分两种情况来模拟传感器的输出光强度.

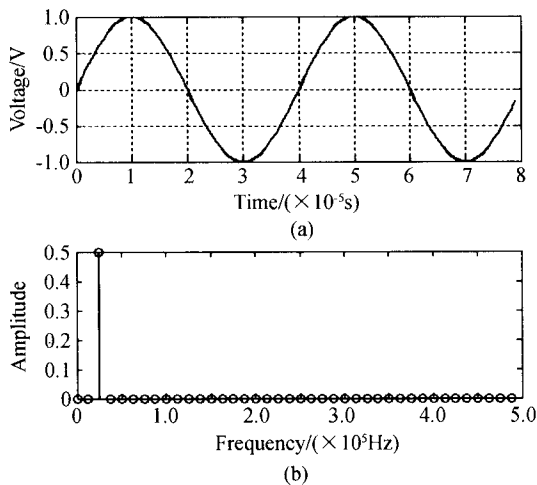


图 2 输入信号及其傅里叶频谱
Fig. 2 Input signal and frequency spectrum of Fourier transform for its

1) 对于 $\Delta\phi = 0$ 的情况,如图 3. 图 3 中(a)、(b)、(c)分别对应于式(6)中取 $\gamma = 5, \gamma = 3, \gamma = 0.5$ 时,传感器输出光强度 I_{out} 所对应的电压信号波形. 这些信号所对应的 Fourier 变换频谱如图 4(a)、

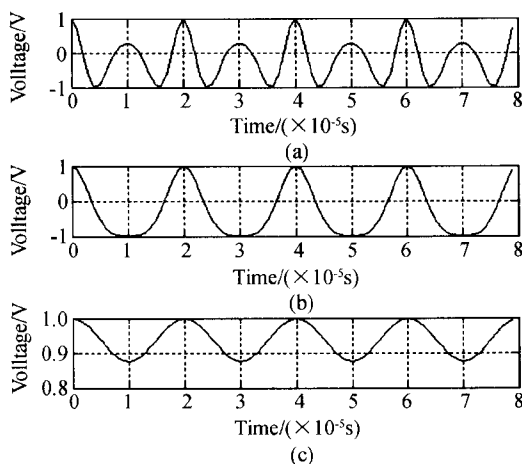


图 3 当 $\Delta\phi = 0$ 时,不同 γ 值对应的输出信号仿真结果
Fig. 3 Output signals for several of γ when the $\Delta\phi = 0$

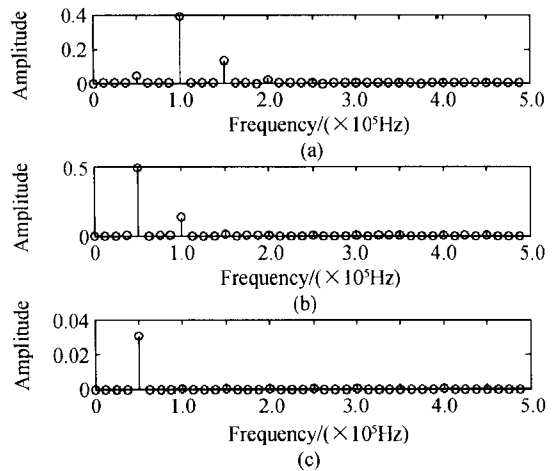


图 4 是图 3 所对应的 Fourier 变换的频谱
Fig. 4 Frequency spectrum of Fourier transform for output signals in Fig. 3

(b)、(c). 由图 3 和图 4 可以看出,随着 γ 的数值的减小,输出信号的波形越来越接近正弦波,信号趋于单一频率,但是这个频率是调制信号频率的 2 倍.

2) 取 $\gamma = 0.5$. 考虑到在实验中 PZT 的振动产生的超声波对 l 中传播的光波的位相变化的幅度改变很小,取一个较小的 γ 值. 图 5(a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 分别给出了 $\Delta\phi = 29\pi/30, \Delta\phi = 5\pi/6, \Delta\phi = \pi/2, \Delta\phi = \pi/6, \Delta\phi = \pi/30$ 时的输出信号波形,其对应的频谱如图 6. 由图 5 和图 6 可以看出,只有当 $\Delta\phi$ 取值在 $\pi/2$ 附近时,输出信号波形接近正弦波. 由傅里叶变换可知,其频率与输入信号频率相同.

根据以上仿真结果可以看出,当 γ 的数值较小,而 $\Delta\phi$ 接近于 $\pi/2$ 时,干涉仪输出信号的基频和超

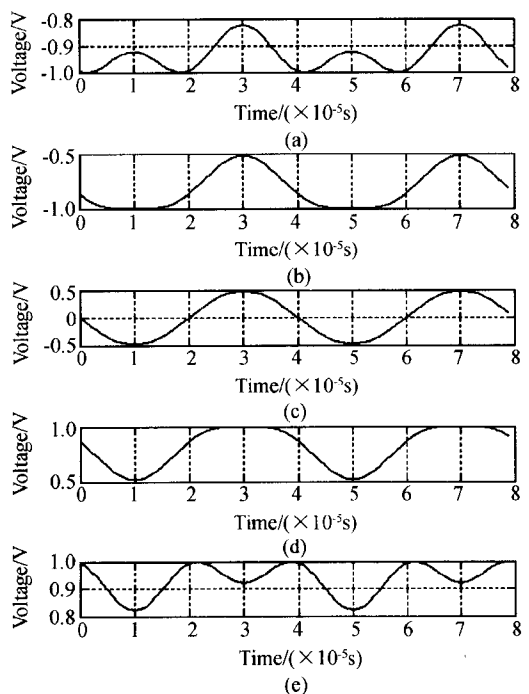


图 5 当 $\gamma = 0.5$ 时,不同 $\Delta\phi$ 值对应的输出信号仿真结果
Fig. 5 Output signals for various values of $\Delta\phi$ when the $\gamma = 0.5$

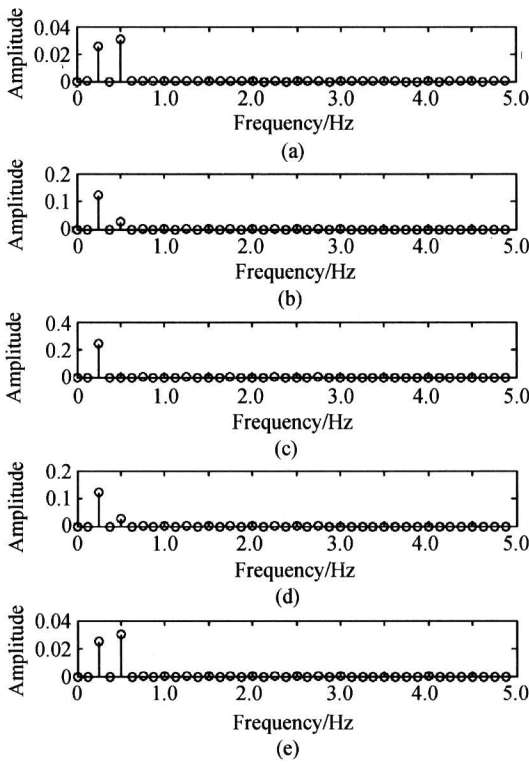


图 6 是图 5 所对应的 Fourier 频谱
Fig. 6 Frequency spectrum of Fourier transform for the output signals in Fig. 5

声波调制信号的频率相同. 当 $\Delta\phi$ 接近于 0 或 π 时, 干涉仪输出信号中除基频外, 含有越来越明显的倍频分量. 由此可见, 只要合理的构建干涉仪系统, 使之工作在灵敏度较高的区间, 即 $\Delta\phi = \pi/2$ 附近的区域, 检测信号的基频即为超声信号的频率.

3 实验装置与实验结果

图 7 给出了实验系统结构的示意图.

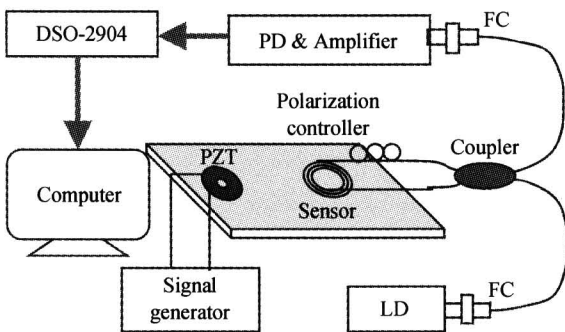


图 7 实验系统
Fig. 7 Configuration for ultrasound detection

系统包括: 激光光源 (LD)、FC 连接器、3 dB 单模光纤耦合器、单模光纤偏振控制器、单模光纤环形传感器、光电探测器 (PD) 与放大器、高速数据采集卡 (DSO-2904)、PC 机和 PZT 压电换能与函数信号发生器.

本实验使用一块尺寸为 $800 \times 800 \times 40$ mm 的人工理石板作为超声传输介质, PZT 和传感光纤被

固接在人工理石板面上. 由正弦波信号发生器驱动 PZT 作为超声发射源, 驱动频率为 25 kHz. 光纤传感器的探头部分是由直径 20 mm、匝数为 30 的光纤环构成.

根据理论分析, 适当的匹配传导光纤 l_1 和 l_2 的长度, 使 $\Delta\phi \rightarrow \pi/2$, 所得的系统输出信号如图 8, 其对应的傅里叶频谱如图 9. 由图 9 可以看出, 输出信号中含有倍频分量, 与仿真结果一致.

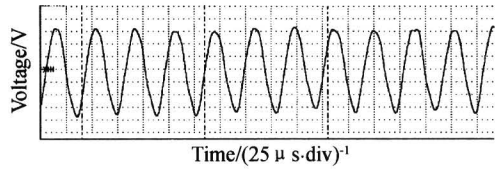


图 8 $\Delta\phi \rightarrow \pi/2$ 系统输出信号波形
Fig. 8 Sensor output voltage when the $\Delta\phi \rightarrow \pi/2$

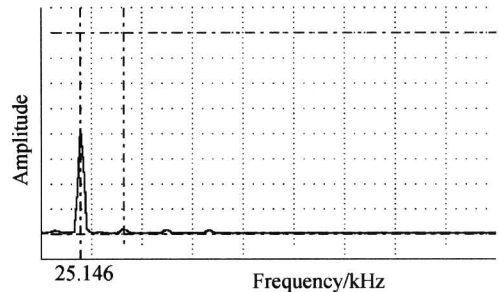


图 9 $\Delta\phi \rightarrow \pi/2$ 输出信号的频谱
Fig. 9 Frequency spectrum of Fourier transform of output signal when the $\Delta\phi \rightarrow \pi/2$

实验中, 适当的改变传导光纤 l_1 和 l_2 的长度的匹配关系, 得到如图 10 的传感系统的输出信号, 其相应的傅里叶频谱峰值为 25.024 kHz, 与驱动频率相吻合, 如图 11. 由图 11 可以看出, 其频率谱与仿真结果中 $\Delta\phi = \pi/2$ 时所对应的频谱相一致, 可见理论模拟与实验结果取得了良好的一致性.

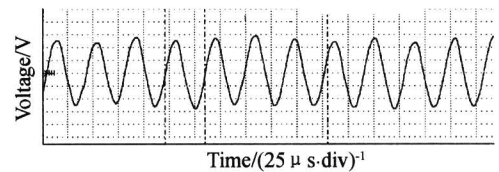


图 10 $\Delta\phi = \pi/2$ 系统输出信号波形
Fig. 10 Sensor output voltage when the $\Delta\phi = \pi/2$

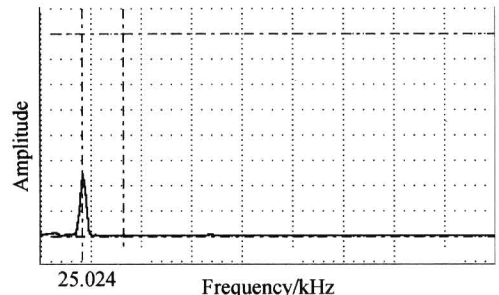


图 11 $\Delta\phi = \pi/2$ 输出信号的频谱
Fig. 11 Frequency spectrum of Fourier transform of output signal when the $\Delta\phi = \pi/2$

4 结果与讨论

本文讨论了测量超声的光纤传感器的位相调制特性,这个传感器以光学 Sagnac 干涉仪为基础,利用单模光纤和 3 dB 耦合器构成. 实验结果表明,如果能够控制传感系统工作在 $\Delta\varphi=\pi/2$ 附近,传感器探测信号的基频即为被检测信号的频率. 因此下一步的工作要解决的问题是如何控制系统的工作状态,实现对固体中传播的超声波及其频率的检测.

参考文献

- 1 藤山邦久[日]编著,冯夏庭译. 声发射(AE)技术的应用. 北京:冶金工业出版社,1996. 12
Fujiyama Q. Application of the Acoustic Emission (AE) Technology. Beijing: Metallurgy Industry Publication, Inc,1996. 12
- 2 Geoffrey A C, Philip J N, Clay K K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(1):19~30
- 3 Tae S J, Jung J L, Dong J Y, *et al.* Non-contact detection of laser-generated surface acoustic waves using fiber optic Sagnac interferometer. *Ultrasonics*, 2002, **40**(8):803~807
- 4 Pavel A F, Alexei K K, Sridhar K, *et al.* Sagnac-type fiber-optic array sensor for detection of bulk ultrasonic waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2000, **47**(3):584~590
- 5 Sverre K, Kjell B. An ultrasonic fiber-optic hydrophone incorporating a Push-pull transducer in a Sagnac interferometer. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(9):1696~1700
- 6 Tae S J, Seung S L, Young G K. Surface-bonded fiber optic Sagnac sensors for ultrasound detection. *Ultrasonics*, 2004, **42**(6): 837~841
- 7 Yuan L B, Zhou L M, Jin W. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer. *Sensors and Actuators A*, 2005, **118**(1): 6~13
- 8 Claus R O, Cantrell J H. Detection of ultrasonic wave in solid by an optical fiber interferometer. *IEEE Ultrason Symp*, 1980, 719~721

Frequency Response of Coiled-fiber Optic Sensor for Detection of the Acoustic Emission

Liang Yijun, Xu Yande, Liu Zhihai, Yuan Libo

College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date:2005-06-05

Abstract An coiled optical fiber sensor based on Sagnac interferometer for the measurement of ultrasonic wave propagated on the surface of a solid plate has been proposed and demonstrated. The advantage of this kind sensor is that the feeble vibration produced by ultrasonic wave on the surface of solid plate transmission can be detected accurately. The output optical intensity of interferometer is modulated when the ultrasonic wave signal passes through the sensing coil of the Sagnac interferometer. The amplitude and the frequency of ultrasonic signal are obtained by using Fourier transform technique. Phase-modulation property of optical fiber sensor is discussed and experiment results are also analyzed, which shows that the system could be used to detect the ultrasonic frequency characteristics on the surface of the solid plate transmission.

Keywords Sagnac interferometer; Optical fiber sensor; Acoustic emission; Characteristic of phase modulation



Liang Yijun was born in 1961 and graduated from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics with B. S. degree in optic physics in 1983. Since August 1983, he has been working in the School of Sciences, Harbin Engineering University as a professor. His research interests include fine mechanics and fiber-optic source applications and fiber-optic sensors.