



## 基于 FPGA 的光纤声波传感实验装置

陈珂<sup>1</sup>, 张广寅<sup>1</sup>, 宫振峰<sup>1</sup>, 陶鹏程<sup>1</sup>, 梅亮<sup>1</sup>, 王晓娜<sup>2</sup>, 韩秀友<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学 物理学院, 大连 116024)

**摘要:** 设计了一种基于光谱解调的光纤法布里-珀罗 (F-P) 声波传感实验装置, 该装置主要由超辐射发光二极管 (SLED) 光源、高速光谱模块和现场可编程门阵列 (FPGA) 信号处理电路组成。单模光纤端面 and 声波敏感膜片之间的空气隙构成光纤 F-P 腔, 将声波信号转换为 F-P 腔长的变化量, 利用 FPGA 对 F-P 干涉光谱信号进行高速采集, 并对 F-P 腔长进行实时解调, 实现对声波信号的高灵敏度探测。该实验教学装置涉及光纤传感、光学干涉、光电探测、FPGA 和数字信号处理等诸多内容, 适合于光电类高年级本科生的专业教学实验。

**关键词:** 现场可编程门阵列; 光纤声波传感; 法布里-珀罗干涉仪; 光谱解调; 实验教学

中图分类号: TP212.2; TH74

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220561

## FPGA-based Fiber-optic Acoustic Sensing Experimental Device

CHEN Ke<sup>1</sup>, ZHANG Guangyin<sup>1</sup>, GONG Zhenfeng<sup>1</sup>, TAO Pengcheng<sup>1</sup>,  
MEI Liang<sup>1</sup>, WANG Xiaona<sup>2</sup>, HAN Xiuyou<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronic and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** An optical fiber Fabry-Perot (F-P) acoustic sensing experimental device based on spectral demodulation is designed. The device is mainly composed of a superluminescent light-emitting diode (SLED) light source, a high-speed spectrum module and a field programmable gate array (FPGA) based signal processing circuit. The air gap between the end face of the single-mode fiber and the sensitive diaphragm constitutes the F-P cavity, which converts the acoustic signal into the variation of the cavity length. The interference spectrum signal is collected at a high speed by FPGA, which demodulates the cavity length in real time. As a result, the high-sensitivity detection of acoustic signals is realized. The experimental teaching device involves many contents such as optical fiber sensing, optical interference, photoelectric detection, FPGA, and digital signal processing, and is suitable for professional teaching experiments of optoelectronic senior undergraduates.

**Key words:** FPGA; fiber-optic acoustic sensing; Fabry-Perot interferometer; spectral demodulation; experimental teaching

高灵敏度声波探测器在自然灾害监测<sup>[1]</sup>、水声探测<sup>[2-3]</sup>和光声光谱微量气体检测<sup>[4-7]</sup>等领域具有重要的应用价值。其中, 基于法布里-珀罗 (F-P) 干涉的光纤声波传感器<sup>[8-11]</sup>以灵敏度高、体积小和不受电磁干扰等优点受到学者们的高度关注。

光纤干涉传感器<sup>[12-13]</sup>的解调方法主要分为强度解调<sup>[14-16]</sup>和光谱解调<sup>[17-18]</sup>。强度解调法具有灵敏度高、结构简单和探测带宽大的优点, 但是容易受到光纤扰动和光源光功率变化导致的信号不

稳定的影响。传统的光谱解调法采用低相干光作为干涉光源, 采集的干涉信号由光谱仪读取。采用快速傅里叶变化方法对光谱信号进行解调, 分辨率仅能达到 10 nm 量级, 无法满足微弱声波探测需求。相关解调法对采集的光谱信号和预存的干涉信号进行互相关计算, 具有高分辨率和高稳定性的优点, 但是存在解调速度慢的缺点。此外, 受限于传统光谱仪的低采样率, 使得该方法难以实现对声波等动态参量的测量。

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2024-06-15

基金项目: 大连理工大学教学改革基金项目 (YB2022016); 大连理工大学教育教学改革基金重点项目 (ZD2021006); 辽宁省普通高等教育本科教学改革项目 (20221014173); 教育部产学研合作协同育人项目 (202102153045); 光电教指分委 2020 年“一流课程与一流专业建设”教育教学研究项目 (2020SYL9); 国家自然科学基金 (62275040, 61905034)。

作者简介: 陈珂 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感和光声光谱技术方面的研究。E-mail: chenke@dlut.edu.cn

本实验设计了一种基于光谱解调的光纤 F-P 声波传感实验装置, 主要由超辐射发光二极管 (SLED) 光源、高速光谱模块和 FPGA 信号处理电路组成, 利用 FPGA 对干涉光谱信号进行高速实时采集和处理, 实现对声波信号的高灵敏度探测。

## 1 光纤 F-P 声波传感原理

### 1.1 光纤 F-P 声波传感器

本实验采用膜片式光纤 F-P 声波传感器, 如图 1 所示。光纤 F-P 传感器的结构主要包括金属外壳、有机膜片和陶瓷插针。为了平衡膜片两侧的气压, 在金属外壳处设计了一个均压孔。光纤端面与有机膜片之间形成 F-P 腔, 为了增加有机膜片的反射率, 在有机膜片表面进行镀金处理。膜片的声压灵敏度与固有频率可分别表示为:

$$S = \frac{[3(1-\mu^2)R^4]}{(16Eh^3)} \frac{(f_{mn}n^2)}{\sqrt{[(f_{mn}n^2 - f^2)^2 + 4f^2\xi^2]}} \quad (1)$$

$$f_{mn} = \frac{10.21h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \quad (2)$$

式中:  $f$  为声波的频率,  $f_{mn}$  为膜片的  $mn$  阶固有频率, 单位 Hz;  $h$ 、 $R$  分别为厚度、半径, 单位 m;  $E$  为膜片的杨氏模量,  $\xi$  为阻尼系数,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为泊松比。

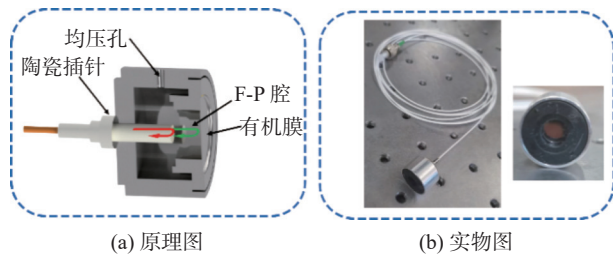


图 1 光纤声波传感器

由式(1)可知, 较大尺寸的膜片可以有效地提高光纤声波传感器的灵敏度。然而, 尺寸过大的膜片不利于光纤声波传感器的小型化设计。此外, 更薄的膜片会改善灵敏度, 但会减小膜片的稳定性。为了平衡光纤声波传感器的灵敏度、实用性和稳定性, 采用直径 9 mm、厚度 5  $\mu\text{m}$  的有机膜片作为光纤声波传感器的敏感膜片。在此条件下, 通过式(2)计算出的声波传感器的谐振频率约为 650 Hz。

### 1.2 光纤 F-P 声波传感解调原理

光纤 F-P 传感器通常分为非本征型和本征型。

两者的区别为是否使用光纤作为敏感元件。本实验采用非本征型 F-P 干涉(extrinsic F-P interference, EFPI)传感器探测声波信号。光纤 EFPI 传感器产生的干涉光强可表示为:

$$I_R = I_0 B \left[ 1 + v \cos \left( \frac{2\pi l}{\lambda} + \varphi_0 \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $B$  与 F-P 腔两个等效反射面的等效反射率有关,  $l = 2nd$  是 F-P 腔的光程差,  $\varphi_0$  是初相位。对于 EFPI 传感器, 由于半波损失  $\varphi_0 = \pi$ , 经过归一化和去直流量后可以得到:

$$I'_R = v \cos \left( \frac{2\pi l}{\lambda} + \varphi_0 \right) \quad (4)$$

为了得到标准的余弦函数, 将光谱由波长域转换到波数域:

$$I''_R = v \cos(lk + \varphi_0) \quad (5)$$

变换后的波数域光强表达式由于不等间隔采样, 可以通过插值和离散化处理, 并利用希尔伯特变换构造光谱解析信号为后续的解调进行预处理, 得到:

$$I'''_R = v e^{i \left( \frac{l\Delta k}{N} + lk_0 + \varphi_0 \right)} \quad (6)$$

通过对光谱解析信号进行离散傅里叶变换(DFT)并利用 Buneman 频率估计<sup>[19]</sup> 获得更准确的幅频谱峰值位置。对光谱解析信号进行 DFT, 可以得到:

$$F(\xi) = v \sum_{n=0}^{N-1} e^{i \left( \frac{l\Delta k}{N} + lk_0 + \varphi_0 \right)} e^{-\frac{2\pi n\xi}{N}} = v e^{i \left( lk_0 + \varphi_0 + \pi \left( \frac{l\Delta k}{2\pi} - \xi \right) \left( \frac{N-1}{N} \right) \right)} \times \frac{\sin \left[ \pi \left( \frac{l\Delta k}{2\pi} - \xi \right) \right]}{\sin \left[ \pi \left( \frac{l\Delta k}{2\pi} - \xi \right) / N \right]}, 0 \leq \xi < N \quad (7)$$

式中:  $k = \Delta k_n / N$ ,  $N$  是光谱采样点,  $\Delta k = k_1 - k_0$  为波数范围,  $k_0$  和  $k_1$  分别是光谱的起始和终止波数;  $\xi$  是光谱信号的周期数。DFT 幅度谱峰值位置的相位为:

$$\varphi(f_0) = lk_0 + \varphi_0 \quad (8)$$

通过 Buneman 频率估计可以得到 DFT 幅度谱峰值的位置为:

$$f_0 = n + \frac{N}{\pi} \arctan \left[ \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\cos \frac{\pi}{N} + \frac{|F(m)|}{|F(m+1)|}} \right] \quad (9)$$

式中:  $m$  和  $m+1$  分别是 DFT 幅度谱峰值左右的两

个整数。该方法计算量小,运算方便,幅度值 $F(m)$ 、 $F(m+1)$ 可以通过计算DFT得到。最终,利用Buneman频率估计得到幅度谱峰值,测量该位置的DFT相位得到高分辨率的F-P腔长值。

## 2 实验装置设计

### 2.1 系统结构

设计的实验装置结构图与实物图如图2所示。主要包括SLED、光谱解调仪、光纤F-P声波传感器和计算机。其中,宽谱SLED(SLD-76-LP, Superlum)作为探测光源,其中心波长约为1550 nm,光谱半高宽(full width at half maximum, FWHM)约为60 nm。出射光经过光纤环形器后射入F-P声波传感器膜片并反射回光纤,与陶瓷插芯反射的光形成双光束干涉。携带腔长变化信息的干涉光经环形器后被高速光谱解调仪采集。其中,光谱解调仪内部的FPGA信号处理电路对高速光谱信号进行采集和处理。解调仪处理的信息通过USB通信接口发送到计算机,对干涉光谱信号进行显示和进一步的信号处理。为了实现声波的定量测量,采用数字锁相放大器(SR830, Stanford Research Systems)输出声音信号驱动扬声器发声,并采用电容式麦克风作为参考声波传感器,经过计算可以得到测试声压的大小。

### 2.2 FPGA 信号处理电路设计

FPGA 信号处理电路以 FPGA 芯片为核心,

利用FPGA的快速响应能力和并行数据处理能力,对F-P干涉光谱信号进行实时采集和处理。FPGA信号处理电路的实物图如图3所示。该电路板采用4层PCB设计,主要电子器件有EP4CE115-F2317N型FPGA芯片、LTC2245IUH型高速模数转换器和FT232HL型USB2.0通信芯片。

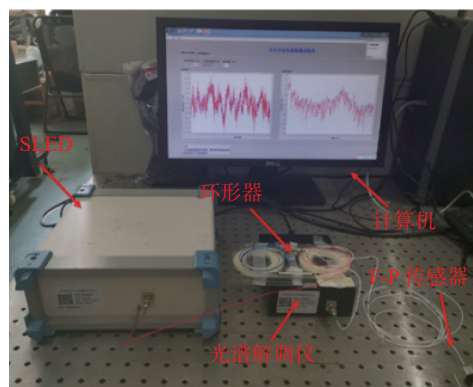
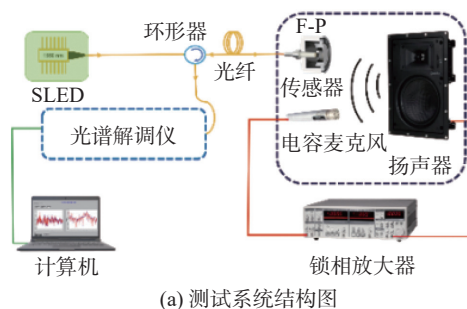


图2 光纤声波传感器的测试与解调系统图

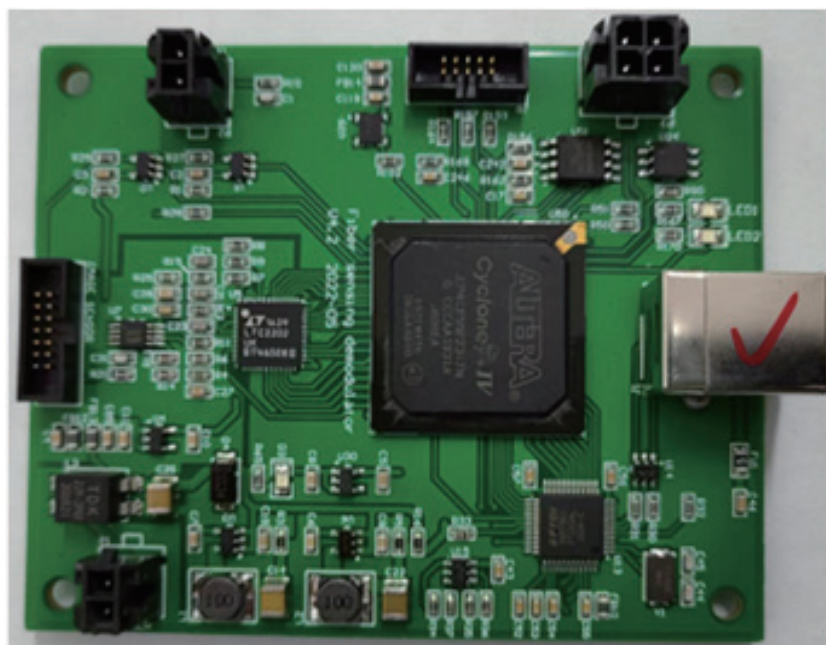


图3 FPGA信号处理电路实物图

### 2.3 FPGA 程序设计

FPGA 负责采集高速光谱信号并进行数字信号处理，FPGA 程序设计流程图如图 4 所示。FPGA 首先将 F-P 干涉光谱信号采集到内部存储器中；然后进行插值处理将信号从光谱域转换到波数域；再对数据进行 256 点 FFT 处理，并利用 Buneman 频率估计进行高精度腔长计算；最后，FPGA 控制 FT232HL 将数据通过 USB2.0 接口传输到计算机。

### 2.4 LabVIEW 程序设计

本实验采用 LabVIEW 语言进行编程，主要实现 FPGA 通信、干涉光谱显示、信号处理和曝光时间控制等功能。采集的信号首先通过调整曝光时间使得干涉光谱信号达到最大的同时不会产生饱和，如图 5 所示。确定曝光时间后，通过 LabVIEW 软件实现信号的处理与解调。其中，设计的 Buneman 频率估计算法可以在减小计算量的同时实现与补零 DFT 解调相同精度的分辨率。基于 LabVIEW 的光纤声波传感器实时解调界面如图 6 所示。结果显示，基于 LabVIEW 设计的解调算法

与数据显示程序可以达到实时测量 F-P 光纤声波传感器的腔长变化量的效果。

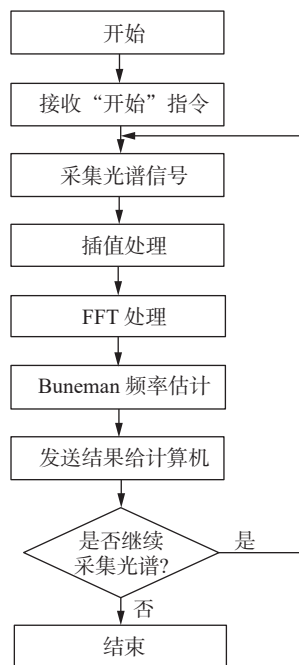


图 4 FPGA 程序设计流程图

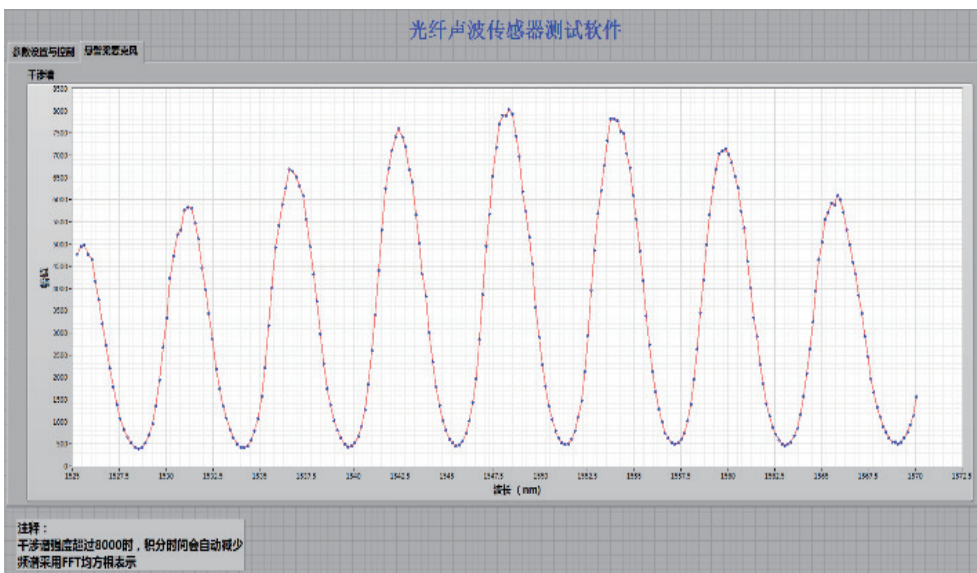


图 5 基于 LabVIEW 的光纤声波传感器测试界面

## 3 测试实验结果与分析

在实验测量的过程中，通过电容麦克风的测量得到输出频率下信号的声压，调节锁相放大器的输出电压使扬声器输出的信号维持在 100 mPa 以下。此外，光谱解调仪设定的光谱采样频率保

持在 20 kHz。扬声器的输出频率分别在 200、500、1000、3000 Hz 时，该实验装置在实验室环境中采集的声波信号如图 7 所示。实验结果验证了该系统对声音信号具有良好的响应。根据奈奎斯特准则可以得到该实验系统最大可以采集到频率为 10 kHz 的声音信号。1500 Hz 频率下不同声压时

光纤 F-P 传感器的腔长变化量如图 8 所示。输出的声压经过锁相放大器的调节实现了从 0.1~1.0 Pa 的测量。通过最小二乘线性拟合得到 1 500 Hz 下声压大小与腔长变化量的关系。结果显示, 声压

的频率响应达到了 137.03 nm/Pa。此外, 拟合优度计算  $R^2=0.999$ 。实验表明, 基于 FPGA 实现白光光谱光纤 F-P 高速解调的方案实现了大范围内动态声压的测量。

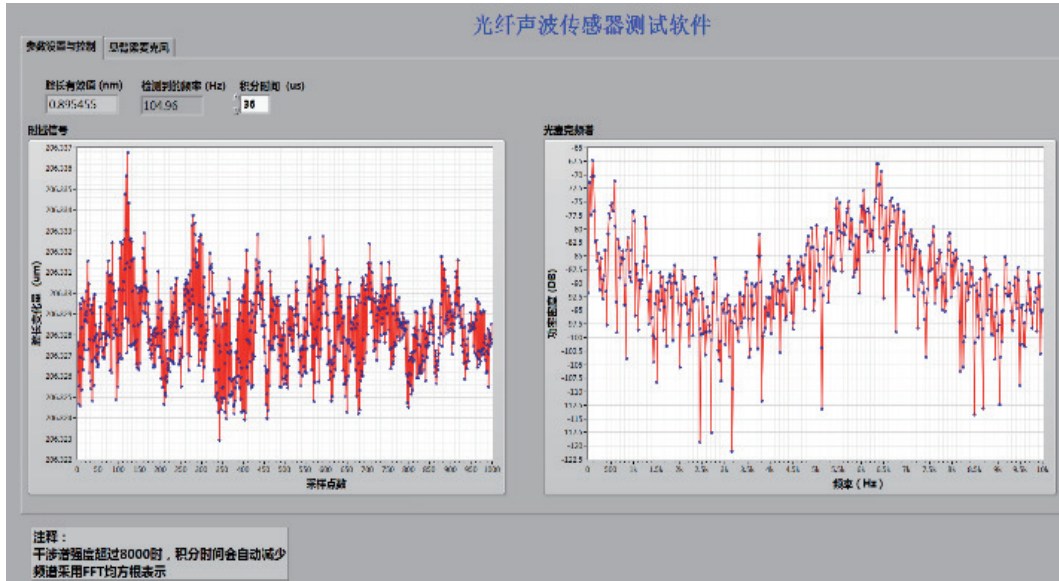


图 6 基于 LabVIEW 的光纤声波传感器实时解调界面

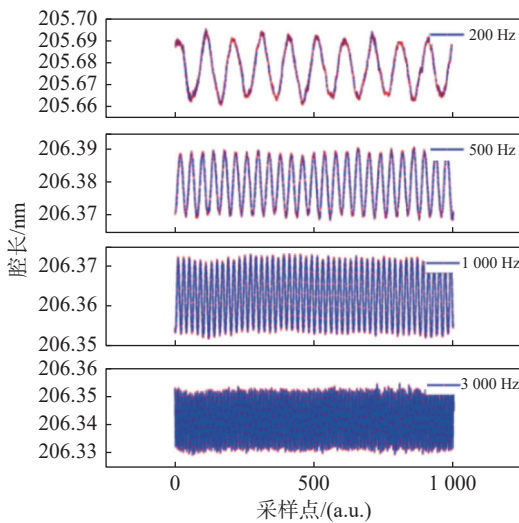


图 7 声压为 100 mPa 时光纤声波传感器测量的在不同声波频率下的时域信号

为了测量本实验教学装置在典型声音频率下的灵敏度, 将扬声器输出的声音频率和声压分别设定为 1 500 Hz 和 100 mPa。在该条件下测量的声波信号如图 9(a)所示。

采用等效噪声声压的计算方式用来估计解调装置的最小可检测压力(minimum detectable pressure, MDP), 可以表示为:

$$N_{eq} = \frac{P}{F_{SNR} \sqrt{W_{3dB}}} \quad (10)$$

式中:  $P$  是指扬声器的声压,  $F_{SNR}$  是频谱的信噪比(signal noise ratio, SNR),  $W_{3dB}$  是测量频率下的半高宽。

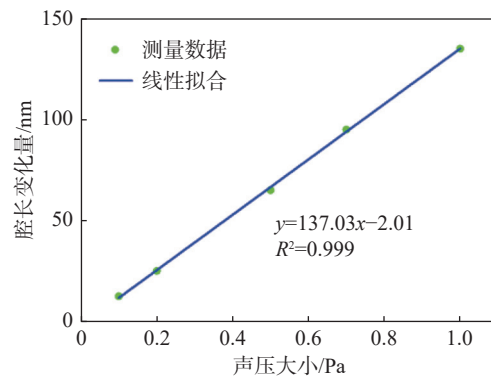


图 8 1 500 Hz 下系统的声压响应

在该条件下测量的声波信号频谱如图 9(b)所示。经过计算, 该解调仪的 SNR 为  $10^{55.9/18}=1275.1$ , MDP 为  $49.6 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。相比于 XARION 公司生产的 Eta250 型光纤声波传感器(MDP 为  $1.5 \text{ mPa}/\text{Hz}^{1/2}$ ), 技术指标具有显著优势, 可以探测更微弱的声波信号。

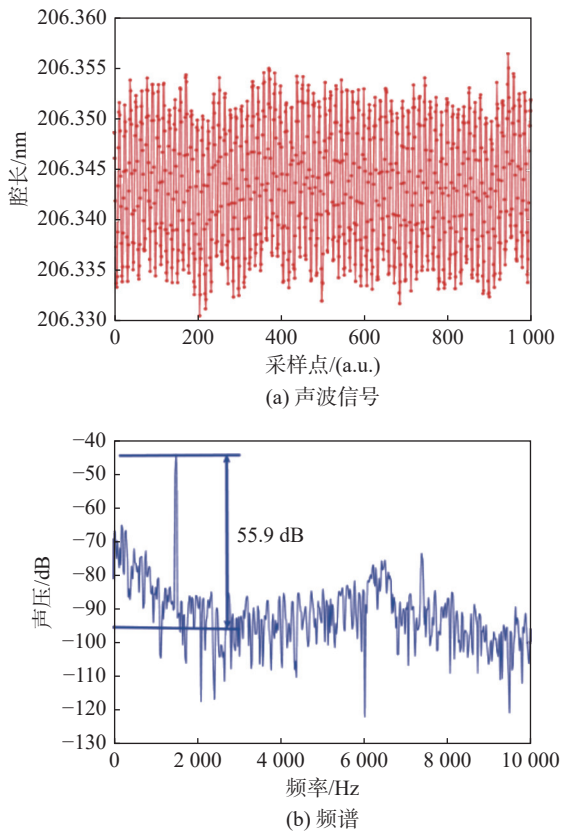


图9 系统在 1500 Hz 和 100 mPa 下的声波信号与频谱图

#### 4 结束语

为了提升高年级本科生和研究生的实验教学质量, 本文设计了一套基于 FPGA 高速光谱解调的白光干涉型光纤声波传感实验教学系统。该系统采用高速光谱模块与 FPGA 联合实现对白光干涉信号的快速采集与动态解调。光谱采样速率达到 20 kHz, 声压响应度达到 137.03 nm/Pa, 最小可检测声压达到  $49.6 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 。该方案能够满足声音信号的高速和高灵敏度探测。通过该教学实验, 学生可以深入了解光电检测系统的设计方法, 提升解决复杂工程问题的能力。

#### 参考文献

[1] 郑海刚, 黎哲君, 黄金水, 等. 次声波监测台阵及地震次声研究进展[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 122-136.

[2] 郭银景, 王蕾, 苏铭玥, 等. 光纤水听器解调技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1017-1021.

[3] LI C, LU S, ZHONG C, et al. High-sensitivity low-frequency Fabry-Perot ultrasonic hydrophone with chitosan diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(7): 6669-6676.

[4] CHEN K, ZHANG B, GUO M, et al. All-optical photoacoustic multigas analyzer using digital fiber-optic acoustic detector[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 8486-8493.

[5] CHEN K, YANG B, GUO M, et al. Fiber-optic photoacoustic gas sensor with temperature self-compensation[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2458.

[6] CHEN K, GUO M, YANG B, et al. Highly sensitive optical fiber photoacoustic sensor for *In Situ* detection of dissolved gas in oil[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.

[7] CHEN K, ZHANG B, GUO M, et al. Photoacoustic trace gas detection of ethylene in high-concentration methane background based on dual light sources and fiber-optic microphone[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 310: 127825.

[8] 陈起超, 张伟超, 白仕光, 等. 非本征光纤法-珀传感器局部放电检测研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1305-1320.

[9] 杨天荷, 陈伟根, 李志军. 基于悬臂梁光纤 F-P 声传感器的光声光谱检测法及其对微量乙炔气体的检测[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1922-1928.

[10] 陈珂, 郭珉, 王泽霖, 等. 基于光学相关的光纤法布里-珀罗传感器解调仪[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 66-71.

[11] 陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 185-190.

[12] 霍佳雨, 高博. 基于通信类创新人才培养的光纤传感实验教学改革[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(4): 92-95.

[13] 王晓娜, 陈珂, 周新磊, 等. 基于新型激光干涉仪的玻璃测厚实验装置[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(3): 134-139.

[14] 王坤博, 周瑜, 刘超, 等. 强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器[J]. 应用声学, 2017, 36(5): 438-444.

[15] CHEN K, GONG Z, GUO M, et al. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer based high sensitive cantilever microphone[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 107-112.

[16] MAO X, YUAN S, ZHENG P, et al. Stabilized fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor based on improved wavelength tuning technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(11): 2311-2314.

[17] CHEN K, YU Z, YU Q, et al. Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone[J]. Optics Letters, 2018, 43(14): 3417.

[18] 江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 193-197.

[19] YANG Y, MA F, CHEN K, et al. High-speed and high-resolution low-coherence interferometric demodulation without phase jumps[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12225-12231.