

激光与光电子学进展

用于分布式光纤声传感的薄壁圆筒声增敏实验研究

夏菁^{1,2,3}, 江俊峰^{1,2,3*}, 王双^{1,2,3}, 丁振扬^{1,2,3}, 梁冠华^{1,2,3}, 钮盼盼^{1,2,3}, 刘译泽^{1,2,3}, 张学智^{1,2,3}, 刘铁根^{1,2,3}¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;³天津大学光纤传感研究所天津市光纤传感工程中心, 天津 300072

摘要 研究了基于光纤缠绕薄壁圆筒的声增敏方法, 基于 3×3 耦合器建立了声压灵敏度标定实验系统, 实验探讨了薄壁圆筒的方向特性, 实验研究了半径、壁厚尺寸参数对光纤声增敏的影响, 实现的声压灵敏度达到 1.338 rad/Pa (−117.47 dB re rad/μPa)。光纤缠绕薄壁圆筒接入所搭建的准分布式声传感系统进行实验, 在 20.06 km 传感距离上, 恢复的 1 kHz 正弦波形与施加波形误差不超过 4.1%, 比未增敏光纤环传感信噪比提高了 21.03 dB, 显示了薄壁圆筒声增敏的传感效果。该研究结果为高灵敏度的准分布式声传感的进一步发展提供了实验基础。

关键词 光纤光学与光通信; 光纤传感器; 分布式声传感; 光纤光学; 薄壁圆筒; 相位

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213403

Experimental Study on Acoustic Sensitization of Thin-Walled Cylinder for Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing

Xia Jing^{1,2,3}, Jiang Junfeng^{1,2,3*}, Wang Shuang^{1,2,3}, Ding Zhenyang^{1,2,3}, Liang Guanhua^{1,2,3},
Niu Panpan^{1,2,3}, Liu Yize^{1,2,3}, Zhang Xuezhong^{1,2,3}, Liu Tiegeng^{1,2,3}¹School of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;³Engineering Center of Optical Fiber Sensing, Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract An acoustic sensitization method based on a fiber-wrapped thin-walled cylinder is studied. The sound pressure sensitivity calibration experiment system is established based on a 3×3 coupler. The directional characteristics of a thin-walled cylinder are experimentally investigated. The influence of the cylinder radius and wall thickness on the acoustic sensitization of fiber is studied experimentally, and the sound pressure sensitivity reaches 1.338 rad/Pa (−117.47 dB re rad/Pa). Then, the fiber-wrapped thin-walled cylinder is applied to a quasi-distributed acoustic sensing system for testing. For a 20.06-km sensing distance, the error between the 1-kHz sinusoidal applied waveform and experimental recovered waveform is below 4.1%. The signal-to-noise ratio (SNR) is 21.03 dB higher than that of unsensitized fiber coil sensing, showing the effect of the acoustic sensitization sensing of the thin-walled cylinder. The results provide an experimental basis for further developing high-sensitivity quasi-distributed acoustic sensing.

Key words fiber optics and optical communication; optical fiber sensors; distributed acoustic sensing; fiber optics; thin-walled cylinder; phase

1 引言

分布式声传感(DAS)技术在水声探测^[1]、地震波探测^[2-5]、结构健康监测^[6-7]等领域有着广泛应用前景。DAS通常采用单模光纤作为传感元,由于光纤自身的杨氏模量较高,对声波压力直接探测时的敏感度低。

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-01-28; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61735011, 61675152)、科技部重大科学仪器开发专项(2013YQ030915)、天津市高层次创新创业团队人才发展特支计划、天津 131 创新人才第一层次培养计划

通信作者: *jiangjfxu@tju.edu.cn

为了提高光纤声压灵敏度,近年来研究人员探索了多种光纤外部增敏方法,即将现有光纤固定于薄膜、薄板、圆筒等外部增敏结构上。如 2014 年 Masoudi 等^[8]将 0.7 m 长的光纤以直线方式粘贴于 25 mm 厚的聚苯乙烯薄片,实现了最小声压为 86 dBC 的声测量;2015 年 Wu 等^[9]将 8 cm 长的光纤以直线方式粘贴于厚度为 0.2 mm 的 304 不锈钢板上,能够实现 76 dBC 以上的声测量;2020 年本文课题组^[10]将 9 cm 长的光纤粘贴于张紧的聚苯乙烯薄膜上实现了 1.5 kHz 和 3 kHz 的声信号探测。相比于平板结构,圆筒型结构更容易实现长光纤缠绕。光纤绕筒增敏在基于迈克耳孙干涉仪的光纤水听器上得到广泛关注^[11-12],因此该方法同样可应用于 DAS。2017 年本文课题组^[13]将 2 m 长的光纤绕制于直径 10 cm、波节间距 10.4 mm 的薄壁波纹圆筒上,实现了最小声压为 60.1 dBC 的声测量;2018 年 Murray 等^[14]将 10 m 长的 Corning Clear Curve ZBL 光纤绕制于半径为 1.43 cm、壁厚为 1.6 mm 的聚碳酸酯圆筒上,实现了 0.206 rad/Pa(-133.73 dB re rad/ μ Pa)的平均声压灵敏度;2020 年 Li 等^[15]将 5 m 长的光纤绕制于半径为 62 mm、壁厚为 0.5 mm 的 PET 材料制成的圆筒上,实现了 2.512 rad/Pa(-112 dB re rad/ μ Pa)的声压灵敏度;2021 年 Lu 等^[16]将光纤连续绕制于实心声敏感柱上制作成光缆,每 1 m 的光缆长度上实际缠绕光纤长度 7.5 m,实现了 -146 dB rad/ μ Pa/m 的声压灵敏度。在光纤自身结构方面研究人员也展开了初步探索,如 2021 年 Yao 等^[17]通过 0.48% 的磷掺杂浓度制作具有软化包层的光纤,包层直径减小到 80 μ m,相比普通单模光纤相位灵敏度提高 54%,但是特种光纤制作将增加应用成本和难度。

本文针对基于光纤缠绕薄壁圆筒的声增敏方法,首先基于 3 \times 3 耦合器建立了声压灵敏度标定实验系统,实验研究了光纤缠绕薄壁圆筒的声方向响应特性,结果显示声压灵敏度在薄壁圆筒径向与声源入射方向的夹角为 0 $^\circ$ 时最高。进行了多种半径、壁厚尺寸参数组合下的薄壁圆筒声压响应实验研究,其中外径 20 mm、壁厚 0.5 mm 的薄壁圆筒绕制光纤后实现了 1.338 rad/Pa(-117.47 dB re rad/ μ Pa)的声压灵敏度。然后将光纤缠绕薄壁圆筒接入所搭建的准分布式声传感实验系统进行声传感实验,在 20.06 km 传感距离上,恢复出 1 kHz 正弦波形,声传感解调信噪比达到 53.65 dB,且显示了良好的线性声压响应。

2 基本原理

2.1 声增敏响应模型

光纤绕制薄壁圆筒声增敏是将长度为 L 的光纤紧密绕制于外径为 a 、壁厚为 t 的薄壁圆筒上,并用胶固定,如图 1(a) 所示。

当薄壁圆筒外径远小于声源波长时,它在声场中受到的声压可视为均匀径向压力 p ^[18-19],外径改变变量

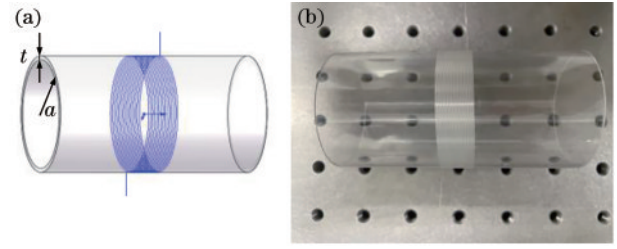


图 1 光纤绕制薄壁圆筒的(a)示意图和(b)实物图

Fig. 1 Fiber-wrapped thin-walled cylinder. (a) Schematic diagram; (b) physical map

Δa ^[20]可以表示为

$$\Delta a = \frac{pa}{E} \left[\frac{a^2 + (a-t)^2}{a^2 - (a-t)^2} - \mu \right], \quad (1)$$

式中, E 和 μ 分别表示薄壁圆筒的杨氏模量和泊松比。由于光纤被胶固定在薄壁圆筒外表面,声致薄壁圆筒外径变化所引起光纤长度的改变可表示为

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta a}{a}. \quad (2)$$

相应光纤相位变化量为^[21]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nL \cdot \Delta a}{\lambda a} \left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) \left[p_{12} - \mu_t (p_{11} + p_{12}) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: n 表示光纤折射率; λ 表示传输光波长; p_{11} 和 p_{12} 为光纤材料弹光系数; μ_t 为光纤材料泊松比。

声压灵敏度 S 定义为

$$S = \frac{\Delta\phi}{p}. \quad (4)$$

2.2 声压灵敏度的标定

声压灵敏度标定系统结构如图 2(a) 所示,采用 3 \times 3 耦合器构建迈克耳孙干涉仪进行光纤绕制薄壁圆筒的相位提取。绕制于薄壁圆筒上的光纤接入 3 \times 3 耦合器的其中一臂,另一臂接有延迟光纤作为参考臂并实现两臂光程匹配,两臂末端接有法拉第旋光镜,消除偏振影响。两个探测器探测到的信号相位相差 2 $\pi/3$,可表示为

$$I_1 = A_1 + B_1 \cos[\Delta\phi(t)], \quad (5)$$

$$I_2 = A_2 + B_2 \cos[\Delta\phi(t) + 2\pi/3], \quad (6)$$

式中: A_1 和 A_2 是直流分量; B_1 和 B_2 是振幅; $\Delta\phi(t)$ 为两臂之间的相位差。采用微分交叉相乘解调算法^[22]进行解调,流程如图 2(b) 所示。首先对 I_1 、 I_2 去直流并归一化得

$$\hat{I}_1 = \cos[\Delta\phi(t)], \quad (7)$$

$$\hat{I}_2 = \cos[\Delta\phi(t) + 2\pi/3]. \quad (8)$$

然后利用下式计算相位:

$$\Delta\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot$$

$$\int \left[(\hat{I}_1 + \hat{I}_2) \frac{d(\hat{I}_1 - \hat{I}_2)}{dt} - (\hat{I}_1 - \hat{I}_2) \frac{d(\hat{I}_1 + \hat{I}_2)}{dt} \right] dt. \quad (9)$$

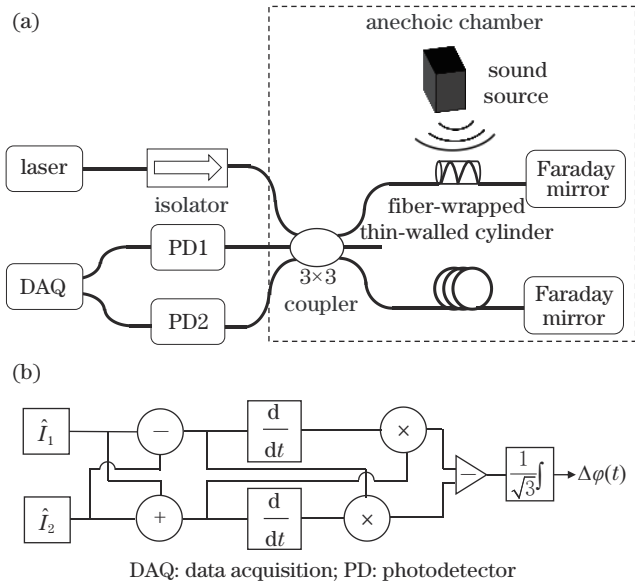


图2 基于3×3耦合器的迈克尔孙干涉相位提取标定装置图。
(a)相位提取标定装置;(b)解调算法示意图
Fig. 2 Diagram of Michelson interference phase extraction calibration device based on 3×3 coupler. (a) Phase extraction calibration device; (b) schematic diagram of demodulation method

3 薄壁圆筒声增敏数值仿真与实验研究

3.1 数值仿真研究

影响声压灵敏度的主要因素为薄壁圆筒的外径 a 、壁厚 t 、杨氏模量 E 和泊松比 μ_1 。当圆筒材料确定后,主要改变外径与壁厚调节灵敏度。表1是可用于光纤声增敏传感研究中的3种材料的杨氏模量和泊松比。对于单模光纤, $p_{11}=0.121$ 、 $p_{12}=0.27$ 、 $\mu_1=0.17$ ^[11]。图3显示了声压灵敏度理论计算值与薄壁圆筒材料参数和几何参数的计算曲线。从图3(a)可以

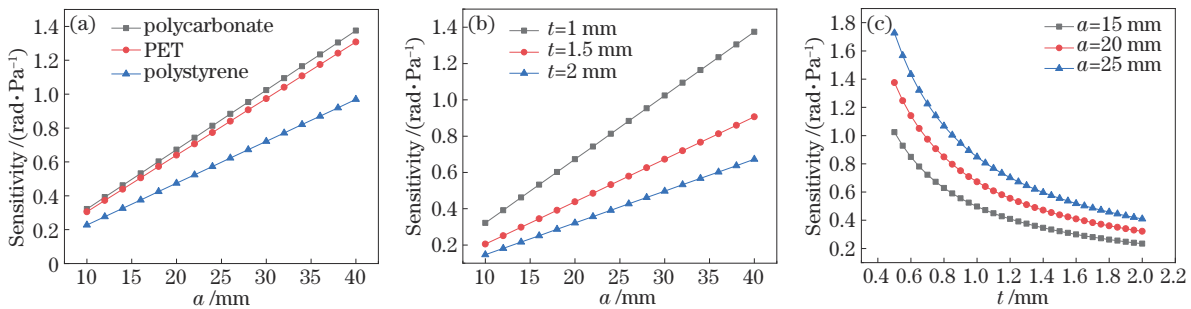


图3 声压灵敏度理论计算值与薄壁圆筒的(a)材料、(b)外径和(c)壁厚的关系曲线
Fig. 3 Curves of relation between calculated value of sound pressure sensitivity and (a) material, (b) outer radius, and (c) wall thickness of thin-walled cylinder

3.3 薄壁圆筒外径与壁厚对声压灵敏度影响的实验研究

受实际可获得的薄壁圆筒限制,实验中薄壁圆筒的外径和壁厚参数如表2所示,其中外径为20 mm、

壁厚分别为0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 mm的薄壁圆筒是由壁厚为1 mm的薄壁圆筒机加工减薄而成。图6(a)是壁厚分别为1 mm和1.5 mm时,声压灵敏度随外径变化的关系,图6(b)是外径为20 mm时,声

表1 不同材料的杨氏模量和泊松比

Table 1 Young's modulus and Poisson's ratio of different materials

Material	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio
Polystyrene	3.38	0.34
PET	2.50	0.39
Polycarbonate	2.38	0.37

3.2 薄壁圆筒声响应方向性实验研究

长度为9 m的单模光纤密排缠绕在长度为100 mm、壁厚为1 mm、外径为25 mm的薄壁圆筒外壁上,并用胶固定,薄壁圆筒两端固定在减震海绵上。按照图2(a)搭建的实验系统测量声压灵敏度。激光光源中心波长为1550 nm,光功率为485 μ W,探测器带宽为45 MHz,采样速率为1 MS/s。扬声器放置在距离薄壁圆筒中心0.4 m处,声源入射方向沿薄壁圆筒径向。用作对比的电麦克风(Bruel & Kjaer 4191)紧贴着薄壁圆筒中心上方放置,测量实际声压。信号发生器驱动扬声器发出频率为1 kHz的正弦声信号,通过改变信号发生器输出电压幅值来改变入射声压大小。图4显示了薄壁圆筒有很好的声压线性响应,声压灵敏度为0.910 rad/Pa(-120.82 dB re rad/ μ Pa)。

为了探究薄壁圆筒声增敏的方向性,按照图5(a)所示,改变声源入射方向与薄壁圆筒径向夹角,测量了不同方向下的声压灵敏度,测量结果如图5(b)所示。可以看出当声源入射方向沿薄壁圆筒径向时(方位角为0°或180°时),薄壁圆筒声压灵敏度最大,是90°入射方向的3.43倍。

图6(a)是壁厚分别为1 mm和1.5 mm时,声压灵敏度随外径变化的关系,图6(b)是外径为20 mm时,声压灵敏度随壁厚变化的关系,图6(c)是壁厚为1 mm时,声压灵敏度随外径变化的关系。可以看出,声压灵敏度随外径的增加而增大,随壁厚的增加而减小。

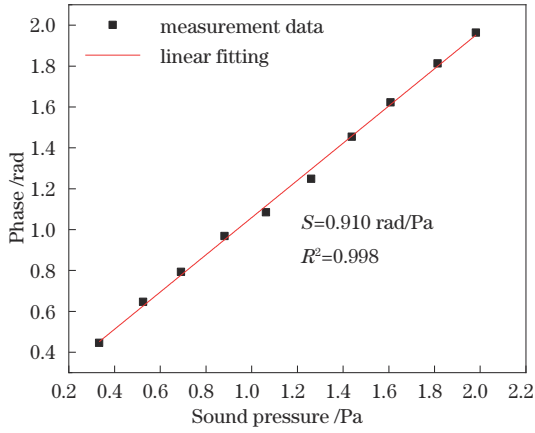


图 4 绕制于外径 25 mm、壁厚 1 mm 的薄壁圆筒光纤相位随声压的变化

Fig. 4 Phase of fiber wrapped on thin-walled cylinder with an outer radius of 25 mm and a wall thickness of 1 mm varies with sound pressure

压灵敏度随壁厚变化的关系,图中的虚线为理论计算值。从图 6 中可知实验值变化趋势和理论计算值基本一致。在外径为 20 mm、壁厚为 0.5 mm 时,有最大声压灵敏度 1.338 rad/Pa(-117.47 dB re rad/ μ Pa)。

表 2 实验中使用的薄壁圆筒外径和壁厚参数

Table 2 Parameters of outer radius and wall thickness of thin-walled cylinders used in experiments

t / mm	a / mm						
0.5	—	—	—	20	—	—	—
0.6	—	—	—	20	—	—	—
0.7	—	—	—	20	—	—	—
0.8	—	—	—	20	—	—	—
0.9	—	—	—	20	—	—	—
1.0	14	15	16	20	21	22.5	25
1.2	—	—	—	20	—	—	—
1.5	—	—	16	20	—	—	25

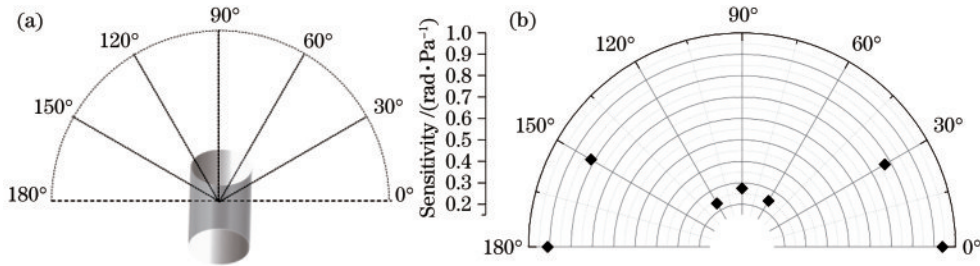


图 5 薄壁圆筒声响应方向性研究。(a)实验中声源的入射方位角布置示意;(b)声压灵敏度随方位角的变化

Fig. 5 Research on acoustic response directivity of thin-walled cylinder. (a) Layout of incident azimuth of sound source in experiment; (b) sensitivity of sound pressure varies with azimuth

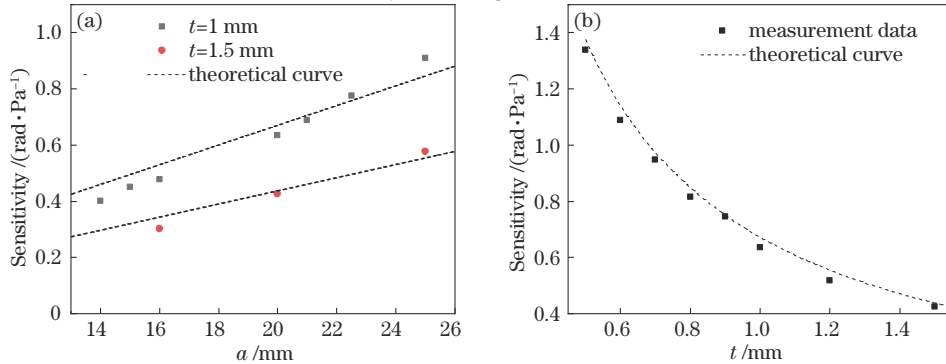


图 6 声压灵敏度随薄壁圆筒的(a)外径与(b)壁厚变化的实验测量结果

Fig. 6 Experimental measurement results of sound pressure sensitivity varies with (a) outer radius and (b) wall thickness of thin-walled cylinder

4 薄壁圆筒声增敏的 DAS 实验研究

使用光纤绕制薄壁圆筒(壁厚为 1 mm、外径为 25 mm)接入准分布式声传感系统中进行测试,如图 7 所示,详细的系统介绍见文献[23]。窄线宽激光器(NLL)发出的连续光经偏振控制器调节后,至双平行马赫-曾德尔调制器(DP-MZM),被调制成具有不同频移的双脉冲,两个脉冲之间的时间间隔与脉冲宽度均为 100 ns。调制的双脉冲光经前置掺铒光纤放大器

(EDFA1)放大,并通过光纤环形器进入长度 20.03 km 的传感光纤,传感光纤尾端接入 4 个弱光纤光栅(WFBG)。相邻的 WFBG 之间的传感光纤长度 L 均为 10 m,其中第 1 个和第 2 个 WFBG 之间的传感光纤中有 9 m 绕制成直径为 50 mm 的光纤环,第 3 个和第 4 个 WFBG 之间接有绕制于薄壁圆筒的光纤。两个相邻的反射脉冲叠加形成拍频信号,通过光纤环形器被后置掺铒光纤放大器(EDFA2)放大。扬声器作为声源距薄壁圆筒中心 0.4 m,距离光纤环中心 0.3 m,三

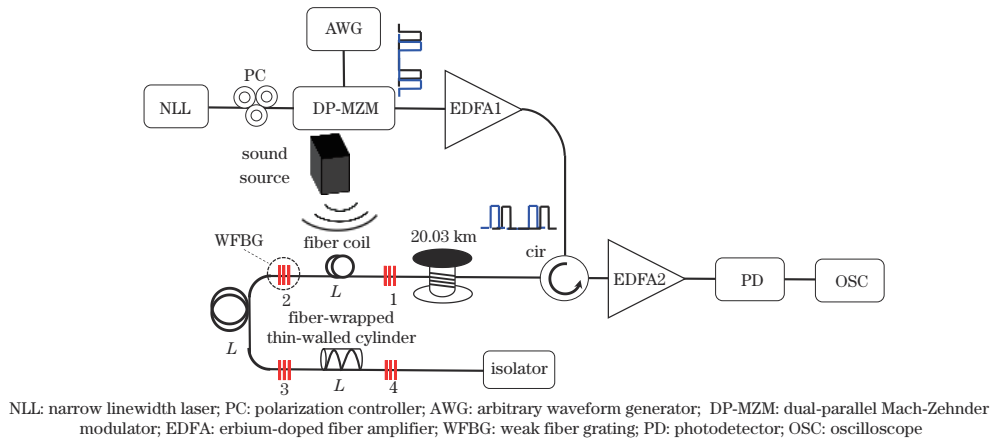


图 7 准 DAS 系统图

Fig. 7 Schematic of quasi-DAS system

者位于同一条直线上,声源频率为 1 kHz,入射方向与光纤环径向和薄壁圆筒径向夹角均为 0° 。

用电麦克风(Bruel & Kjaer 4191)测得薄壁圆筒中心处声压为 1.86 Pa,光纤环中心的声压为 6.57 Pa。图 8(a)所示是 DAS 探测信号时空图,对未增敏光纤环区域和薄壁圆筒增敏的光纤传感区域探测信号进行相

位解调,时域图和频域图如图 8(b)~8(e)所示,时域图中的实线为施加的 1 kHz 正弦波形。虽然薄壁圆筒中心处声压仅为光纤环中心的声压值的 28.3%,增敏后信噪比却提高了 21.03 dB,未增敏和增敏区域解调信号与施加正弦波形的最大误差分别为 25.3% 和 4.1%。

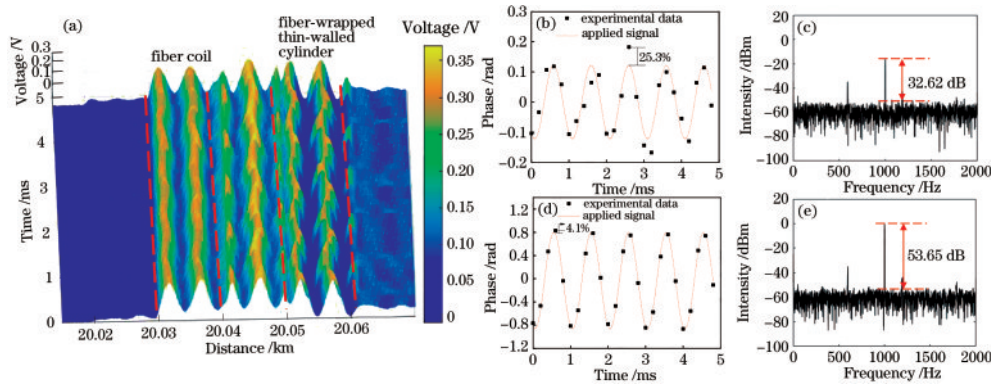


图 8 准 DAS 系统的原始信号和解调结果。(a)探测信号时空图;未增敏传感区域解调信号的(b)时域图和(c)频谱图;增敏传感区域解调信号的(d)时域图和(e)频谱图

Fig. 8 Original signals and demodulation results of quasi-DAS system. (a) Space-time diagram of detective signal; (b) time domain diagram and (c) spectrum diagram of demodulated signals in unsensitized sensing area; (d) time domain diagram and (e) spectrum diagram of demodulated signals in sensitized sensing area

图 9 是利用 DAS 系统解调出的相位和所标定的

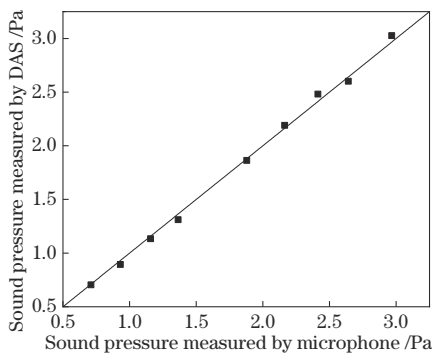


图 9 麦克风和 DAS 系统测量声压值

Fig. 9 Sound pressure measured by microphone and DAS system

声压灵敏度计算出的声压测量曲线。DAS 系统测量声压值与电麦克风测得的实际声压值相关系数达到 0.9987,显示了很好的线性解调。

5 结 论

基于 3×3 耦合器建立了声压灵敏度标定实验系统,实验研究了光纤缠绕薄壁圆筒的声方向响应特性,结果显示,薄壁圆筒响应依赖于声源入射方向,其中声压灵敏度在薄壁圆筒径向与声源入射方向的夹角为 0° 时比 90° 时提高了 3.43 倍。通过使用不同半径、壁厚多种尺寸参数组合的薄壁圆筒进行声压响应实验,结果表明,薄壁圆筒外径增大、壁厚减小可以提高声压灵敏度,采用 20 mm 外径、0.5 mm 壁厚薄壁圆筒,绕

制 9 m 光纤实现了高灵敏的声压灵敏度 1.338 rad/Pa (-117.47 dB re rad/ μ Pa)。将光纤缠绕薄壁圆筒接入所搭建的准分布式声传感实验系统,在 20.06 km 传感距离上,恢复的 1 kHz 正弦波形与施加波形最大误差不超过 4.1%,声传感解调信噪比达到 53.65 dB,与 9 m 长的直径为 50 mm 光纤环直接探测相比,信噪比提高了 21.03 dB,显示了薄壁圆筒的声增敏效果。接入薄壁圆筒增敏的 DAS 系统显示了良好的线性声压响应,所测量声压值与参考电麦克风测量声压值相关系数达到 0.9987。该研究为薄壁圆筒在高灵敏度分布式光纤声传感中的进一步应用优化打下了基础。

参 考 文 献

- [1] Matsumoto H, Araki E, Kimura T, et al. Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 2797.
- [2] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5778.
- [3] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. *Science*, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [4] Brisbourne A M, Kendall M, Kufner S K, et al. Downhole distributed acoustic seismic profiling at Skytrain Ice Rise, West Antarctica[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(7): 3443-3458.
- [5] 倪家升, 刘铁根, 尚盈, 等. 用于石油物探的分布式光纤声波地震检波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(3): 0306006.
Ni J S, Liu T G, Shang Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic seismic geophone for petroleum geology exploration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(3): 0306006.
- [6] Hubbard P G, Xu J, Zhang S H, et al. Dynamic structural health monitoring of a model wind turbine tower using distributed acoustic sensing (DAS) [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(3): 833-849.
- [7] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于 Φ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306003.
Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306003.
- [8] Masoudi A, Belal M, Newson T P. Distributed optical fibre audible frequency sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91573T.
- [9] Wu Y Q, Gan J L, Li Q Y, et al. Distributed fiber voice sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6803810.
- [10] Ma Z, Jiang J F, Wang S, et al. High performance distributed acoustic sensor based on digital LFM pulse coherent-optical time domain reflectometer for intrapulse event[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 012016.
- [11] 王俊, 陈开, 唐靖, 等. 芯轴式干涉型光纤水听器深海探头的研制[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2019(4): 14-16, 27.
Wang J, Chen K, Tang J, et al. Development of deep-sea detector of the mandrel interferometric optical fiber hydrophone[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2019(4): 14-16, 27.
- [12] Yang Y, Luo Z C, Wang Z M, et al. High-performance fiber optic interferometric hydrophone based on push-pull structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-13.
- [13] 陈文杰, 江俊峰, 刘琨, 等. 基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 070706.
Chen W J, Jiang J F, Liu K, et al. Research on improving detection sensitivity to acoustic based on coherent-OTDR distributed fiber-sensing system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 070706.
- [14] Murray M J, Davis A, Redding B. Fiber-wrapped mandrel microphone for low-noise acoustic measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3205-3210.
- [15] Li H, Sun Q Z, Liu T, et al. Ultra-high sensitive quasi-distributed acoustic sensor based on coherent OTDR and cylindrical transducer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(4): 929-938.
- [16] Lu B, Wu B Y, Gu J F, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on Φ -OTDR and its field test[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [17] Yao J Z, Han B, Jiang X L, et al. Cladding softened fiber for sensitivity enhancement of distributed acoustic sensing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8216-8222.
- [18] Jarzynski J, Hughes R, Hickman T R, et al. Frequency response of interferometric fiber-optic coil hydrophones [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, 69(6): 1799-1808.
- [19] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A, et al. Optical fiber sensor technology[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(4): 626-665.
- [20] (美) 杨 W C, (美) 布迪纳斯 R G. 罗氏应力应变公式手册[M]. 岳珠峰, 高行山, 王峰会, 等, 译. 7 版. 北京: 科学出版社, 2005: 460-571.
Young W C, Budynas R G. Roark's formulas for strain and stress[M]. Yue Z F, Gao X S, Wang F H, et al., Transl. 7th ed. Beijing: Science Press, 2005: 460-571.
- [21] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(18): 2867-2869.
- [22] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105966.
- [23] Liang G H, Niu P P, Jiang J F, et al. Heterogeneous-frequency-dual-pulse chain and weak FBG array for quasi-distributed acoustic sensing with improved response bandwidth[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): 7740-7744.