

基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究

陈文杰 江俊峰 刘琨 王双 马喆 张晚琛 刘铁根

Research on improving detection sensitivity to acoustic based on coherent-OTDR distributed fiber-sensing system

Chen Wen-Jie Jiang Jun-Feng Liu Kun Wang Shuang Ma Zhe Zhang Wan-Chen Liu Tie-Gen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 070706 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070706

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070706>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型长周期光纤光栅的设计与研制进展

Recent progress in design and fabrication of novel longperiod fiber grating

物理学报.2017, 66(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070704>

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals

物理学报.2015, 64(12): 120702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120702>

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors

物理学报.2015, 64(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性

Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702>

专题: 光纤传感

基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究*

陈文杰 江俊峰[†] 刘琨 王双 马喆 张晚琛 刘铁根[‡]

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 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)

(2016年11月17日收到; 2017年2月23日收到修改稿)

开展了基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究, 提出了单端固定开口波纹薄筒光纤声增敏方法, 建立了光纤声增敏装置波节间距、单波节轴向刚度、光纤长度等参数对光纤相位灵敏度的影响理论模型. 制作了3种规格的光纤声增敏传感装置进行声传感实验. 实验结果表明, 声增敏传感装置相位灵敏度达到2.975 rad/Pa, 最小声探测信号达到60.1 dB, 3种规格的声增敏传感装置的灵敏度测试值与理论分析基本一致. 研究结果为高灵敏度的光纤分布式声传感的进一步发展提供了理论和实验基础.

关键词: 相干探测, 光时域反射, 声传感, 增敏

PACS: 07.60.Vg, 07.64.+z

DOI: 10.7498/aps.66.070706

1 引言

与电磁和压电传声器相比, 光纤声传感技术具有抗电磁干扰能力强、对潮湿高温的恶劣环境适应力强、信号传输损耗小等优点^[1-4]. 研究人员已提出多种光纤声传感方法, 包括光纤光栅型^[5,6]、光纤Fabry-Perot型^[7]、马赫-曾德尔干涉仪型或迈克耳孙干涉仪型^[8]、相干光时域反射型(C-OTDR)^[9,10]、相位敏感光时域反射型(phase-OTDR)等^[11]. 其中, 基于C-OTDR或phase-OTDR的分布式光纤声传感技术具有传感规模优势. 目前国内外研究人员初步展示了分布式光纤声传感系统的声探测能力, 如Lu等^[12]将传感光纤绕环固定于金属薄板上, 基于C-OTDR分布式声传感系统探测到薄板附近的铅笔芯断裂发出的声信号; Wu等^[13]将光纤直线粘贴于金属薄板上对空气中的声信号进行探测, 能探测到最弱声压级

72 dB; Shang等^[14]采用调制相位载波解调算法提高解调信号的动态范围和灵敏度, 将光纤绕环放置于水中进行声信号探测, 探测最小声压为6 Pa, 对应声压级135 dB. 声传播是介质中压强的传播, 光纤分布式声传感本质上是探测光纤中声导致的动态微应变^[15]. 由于声信号是微小的压强, 而光纤非常纤细且刚度大, 声压直接在光纤上引起的应变非常小, 导致灵敏度低. 因此不少光纤分布式声传感研究采用压电陶瓷换能器(PZT)模拟声传感实验, 如Wang等^[16]基于phase-OTDR并采用3×3耦合器解调信号相位, 使用2个PZT模拟声振动, 展示多点声信号探测; Iida等^[17]在phase-OTDR系统中采用多频系列脉冲研究以提高系统可探测信号频率, 但实验中也使用PZT模拟声探测过程, 未对实际声音信号进行探测. 为实现高灵敏度的声传感, 本文提出了一种基于单端开口波纹薄筒的光纤分布式声传感增敏方法, 利用波纹薄筒的筒壁变形, 将声压转化为光纤轴向应变. 实验结果表明,

* 国家自然科学基金(批准号: 61675152, 61227011, 61378043, 61475114, 61505139, 61505138)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ030915)和深圳科技研究计划(批准号: JCYJ20120831153904083)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: tgliu@tju.edu.cn

该方法具有良好增敏效果, 最小声探测信号声压级可至 60.1 dB.

2 光纤分布式声增敏传感原理

2.1 基于C-OTDR的光纤分布式声增敏传感系统

基于C-OTDR的光纤分布式声增敏传感原理如图1所示, 窄线宽激光器输出连续激光, 经过50 : 50偏振分束器后, 一半作为本地参考光, 表示为

$$E_L(t) = E_{L0} \cdot \exp(j2\pi ft), \quad (1)$$

其中 f 为激光频率, E_{L0} 为本地参考光的电场振幅. 另一半通过声光调制器 (AOM)、掺铒光纤放大器 (EDFA) 被调制成移频脉冲光, 再经过环形器, 注入传感光纤中. 移频脉冲光沿光纤传输, 并在每处产生后向瑞利散射光,

$$E_s(t) = E_{s0}(t) \cdot \exp[j2\pi(f + \Delta f)t + \varphi(t)], \quad (2)$$

其中, $E_{s0}(t)$ 为返回瑞利散射光场振幅, 随着衰减不同, 返回信号光强是随时间变化的; Δf 为经过AOM产生移频; $\varphi(t)$ 则为信号光与本地参考光相位差, 表征沿光纤各处的应变情况. 在90°光混合器, 信号光与本地参考光相干产生四路干涉信号, 在X偏振方向和Y偏振方向各有2个正交信号,

$$I_X \propto A_X(t) \cdot \cos(2\pi\Delta ft + \varphi(t)), \quad (3a)$$

$$Q_X \propto A_X(t) \cdot \sin(2\pi\Delta ft + \varphi(t)), \quad (3b)$$

$$I_Y \propto A_Y(t) \cdot \cos(2\pi\Delta ft + \varphi(t)), \quad (3c)$$

$$Q_Y \propto A_Y(t) \cdot \sin(2\pi\Delta ft + \varphi(t)), \quad (3d)$$

其中 $A_X(t)$, $A_Y(t)$ 表示 t 时刻接收到 X, Y 偏振方向信号强度振幅, 经过正交相位解调, 即可得到相位差 $\varphi(t)$. 由于时间 t 是光脉冲在光纤中往返运动的时间, 对于位于光纤长度 Z 处的传感光纤, 携带其传感相位信息的信号光返回的时间 t 为 $t = 2nZ/c$, 其中 n 为光脉冲在光纤中的有效折射率, c 为真空中光速. 所以, 在 T 时刻发出的脉冲测量得到的传感光纤位置所对应的相位差为 $\Phi_T(Z) = \varphi(t) = \varphi(2nZ/c)$, 由于有重复的光脉冲周期性测量, 得到传感光纤对应的一系列等时间间隔测量的该传感位置的相位差 $\Phi_T(Z)$, $\Phi_{2T}(Z)$, $\Phi_{3T}(Z)$, \dots , $\Phi_{nT}(Z)$. 通过跟踪该位置的相位差变化, 即可得到传感光纤周围的声信号.

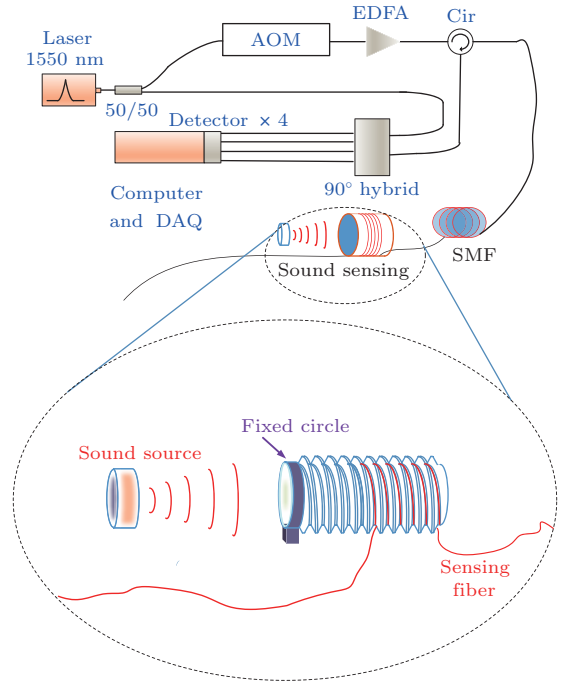


图1 基于C-OTDR的光纤分布式声增敏传感原理图
Fig. 1. Enhanced optical fiber distributed acoustic detection system based on C-OTDR.

2.2 单端固定开口波纹薄筒增敏模型

采用图2所示的单端固定开口波纹薄筒, 进行光纤声传感局部增敏. 光纤缠绕并粘贴于单端开口的单层波纹薄筒的波谷中, 即传感光纤的轴向应变变量等于所在波谷位置的环向应变变量 ϵ . 对于单层波纹薄筒, 其整体轴向刚度 K 可表示为 $K = K_0/N$, 其中 N 为有效波节数, K_0 为单波节轴向刚度.

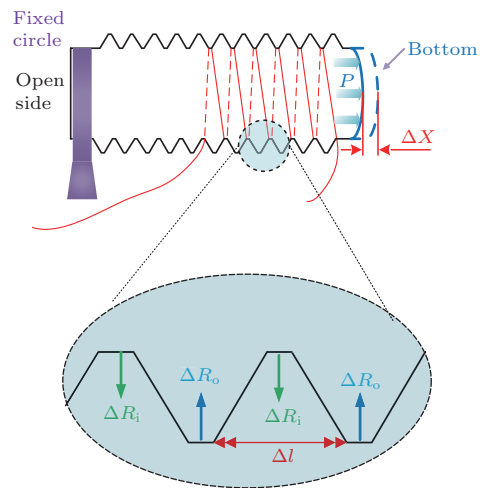


图2 基于波纹薄筒的光纤声传感增敏原理图
Fig. 2. Principle of fiber acoustic detection enhancement based on corrugated tube.

声信号通过开口进入波纹薄筒内部, 激发波纹薄筒轴向受迫振动, 带动缠绕于波纹薄筒波谷中的传感光纤发生形变, 从而增强幅值响应. 推动波纹薄筒底部沿轴向振动的最大位移 ΔX 与声信号的声压 p 和薄筒底面积 S 的乘积成正比, 同时与整体轴向刚度 K 成反比, 即有

$$\Delta X = Sp/K = NSp/K_0. \quad (4)$$

轴向拉伸或压缩产生的传感光纤应变 ε 大小为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sqrt{[2\pi(R_i + \Delta R_i)]^2 + (l + \Delta l)^2} - \sqrt{(2\pi R_i)^2 + l^2}}{\sqrt{(2\pi R_i)^2 + l^2}} \\ &\approx \frac{4\pi^2 R_i \Delta R_i + l \cdot \Delta l}{4\pi^2 R_i^2 + l^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 R_i , ΔR_i 分别为波纹薄筒内半径及其变化量, l , Δl 分别为波节间距及其变化量, 且有 $\frac{\Delta R_i}{R_i} = \frac{d^2 \Delta X}{2h^3 N}$ [18], $\Delta l = \Delta X/N$; σ 为轴向位移产生的径向薄膜应力; d 为波纹薄筒筒壁厚度; h 为波纹薄筒波节高度. (5) 式可进一步简化为

$$\varepsilon \approx \left(l + \frac{2\pi^2 d^2 R_i^2}{h^3} \right) \frac{1}{4\pi^2 R_i^2 + l^2} \frac{Sp}{K_0}. \quad (6)$$

当波纹薄筒满足 $d \ll h$, $l^2 \ll 4\pi^2 R_i^2$, $S \approx R_i^2$, 将 (4) 式和 (6) 式合并, 则声压导致光纤应变简化为

$$\varepsilon \approx \frac{l}{4\pi^2 R_i^2 n} \Delta X = \frac{l}{4\pi K_0} p. \quad (7)$$

对于粘贴长度为 L 的光纤, 轴向应变导致相位变化为 [19]

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{4\pi n L}{\lambda} \varepsilon - \frac{4\pi L}{\lambda} \varepsilon \cdot \frac{n^3}{2} [\gamma_{12} - \mu(\gamma_{11} + \gamma_{12})] \\ &= \frac{Ll}{\lambda K_0} \cdot \left\{ n - \frac{n^3}{2} [\gamma_{12} - \mu(\gamma_{11} + \gamma_{12})] \right\} \cdot p \\ &= S_e p, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, λ 为光波长, γ_{11} , γ_{12} 为单模光纤弹光系数矩阵元素; μ 为室温下石英材料泊松比. 其中,

$$S_e = \frac{Ll}{\lambda K_0} \cdot \left\{ n - \frac{n^3}{2} [\gamma_{12} - \mu(\gamma_{11} + \gamma_{12})] \right\}$$

为相位灵敏度. 由 (8) 式可知, 相位变化近似随声压线性变化, 波纹薄筒的增敏效果与波纹薄筒波节间距 l 成正比, 与波纹筒的单波节轴向刚度 K_0 成反比. 当选取波纹薄筒波节间距为 10.4 mm, 单波节轴向刚度为 5.2 N/mm 时, 声压至应变的传递系数为 159.2 nε/Pa, 光源波长 $\lambda = 1550.12$ nm, 且取 $\gamma_{11} = 0.121$ [19], $\gamma_{12} = 0.27$ [19], $\mu = 0.1817$ [20], 粘贴光纤长度 L 为 2 m, 探测相位灵敏度 S_e 为

2.975 rad/Pa. 普通单模光纤直接在声压 p 作用下, 纤芯产生的轴向应变为 $\varepsilon_f = \frac{2\mu}{E_f} p$ [19], 相位变化为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{8\pi L}{\lambda E_f} \cdot \left\{ n - \frac{n^3}{2} [\gamma_{12} - \frac{1}{2\mu}(\gamma_{11} + \gamma_{12})] \right\} \cdot p \\ &= S_{ef} p \quad [19]. \end{aligned}$$

其中, E_f 为室温下石英材料的杨氏模量, $E_f = 7.787 \times 10^4$ N/mm² [20], 则单模光纤声压至应变的传递系数为 0.0047 nε/Pa, 传递系数低 33872 倍, 长度 2 m 普通单模光纤的相位灵敏度 S_{ef} 为 2.073×10^{-4} rad/Pa, 相位灵敏度低 14351 倍. 因此, 本文采用的波纹薄筒将声压更有效地转化为光纤应变, 从而提高系统的声传感探测极限和相位灵敏度.

3 实验与结果分析

按图 1 搭建实验系统. 窄线宽激光器发出中心波长 1550.12 nm、线宽 3 kHz、功率 40 mW 的激光, 信号光先后进入 AOM, EDFA 被调制成为移频 $\Delta f = 40$ MHz、脉宽 $w = 50$ ns, 重复周期 $T = 100$ μs 的移频脉冲光, 脉冲光经过环形器进入传感光纤, 对光纤中的声信号进行探测, 声源频率固定为 300 Hz, 同时将单点声传感器放置于待测位置进行声压监测.

首先, 由于普通单模光纤的灵敏度低, 未获得有效信号, 增加其传感部分的长度, 将长度 4.7 m 的单模光纤绕制成直径 6 cm 的光纤环对声信号进行传感. 光纤环距离光纤起始位置 35 m, 将光纤环悬挂在声源前 5 cm 处, 单点声传感器放置于光纤环位置. 当光纤环所在位置声压级分别为 87.3 dB 和 99.1 dB 时, 可以从图 3(a) 和图 3(e) 时间距离相位图以及图 3(b) 和图 3(f) 距离相位中分辨出声信号在 35—40 m 之间存在声信号; 但是, 对比图 3(c), 图 3(d) 和图 3(g), 图 3(h) 探测得到的强弱两个声信号的时域信号和频谱图, 仍能分辨出 99.1 dB 声信号在 300 Hz 频率处的被测信号, 而 87.3 dB 声信号被测的频谱中, 300 Hz 的信号被其他频率噪声所淹没. 因此, 虽然能够定位低于 87.3 dB 的声信号, 但是其声信号的频率等特征已经无法探测.

我们将 2 m 长的光纤, 螺旋形粘贴在直径 10 cm、波节间距 10.4 mm、单波节轴向刚度为 5.2 N/mm 的单端开口波纹薄筒的波谷中, 该段光

纤距离光纤起始位置 35 m, 声源方向正对薄筒开口端且距其 10 cm 远. 同时, 将单点传感器放置于波纹薄筒开口位置, 监测声信号强度. 图 4 为系统探

测声压级 79.2 dB 信号的探测结果, 可以看到 35 m 处存在清晰的 300 Hz 声信号.

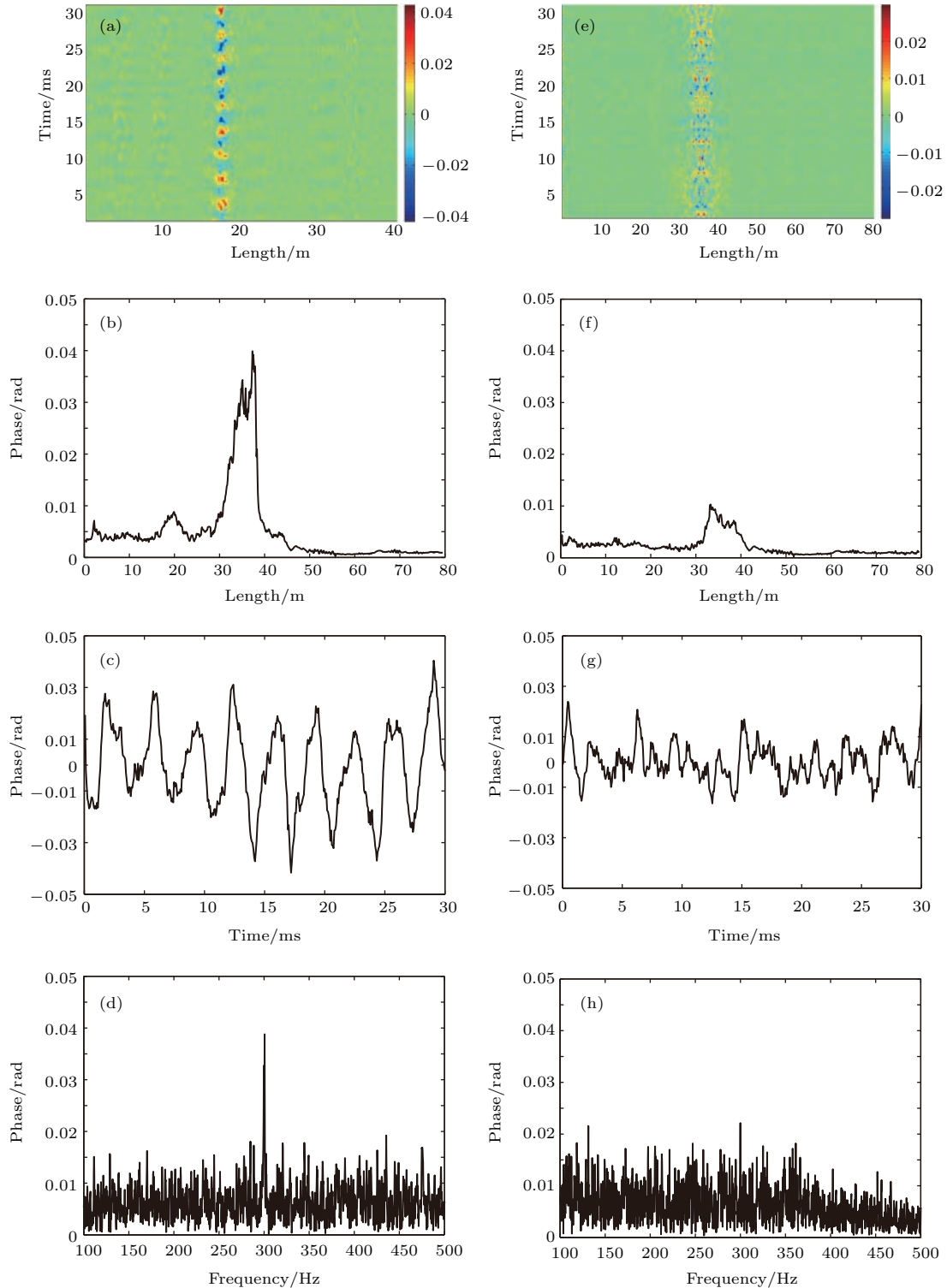


图 3 光纤环声传感探测结果 (a)—(d) 99.1 dB 时信号时间距离等高图、距离相位图、信号时域图和信号频谱图; (e)—(h) 79.2 dB 时信号时间距离等高图、距离相位图、信号时域图和信号频谱图

Fig. 3. The results of sound detecting with fiber ring: (a)—(d) Signal contour between time and length, length phase curve, signal time domain picture and signal spectrum with 99.1 dB sound pressure level; (e)—(h) signal contour between time and length, length-phase curve, signal time domain picture and signal spectrum with 79.2 dB sound pressure level.

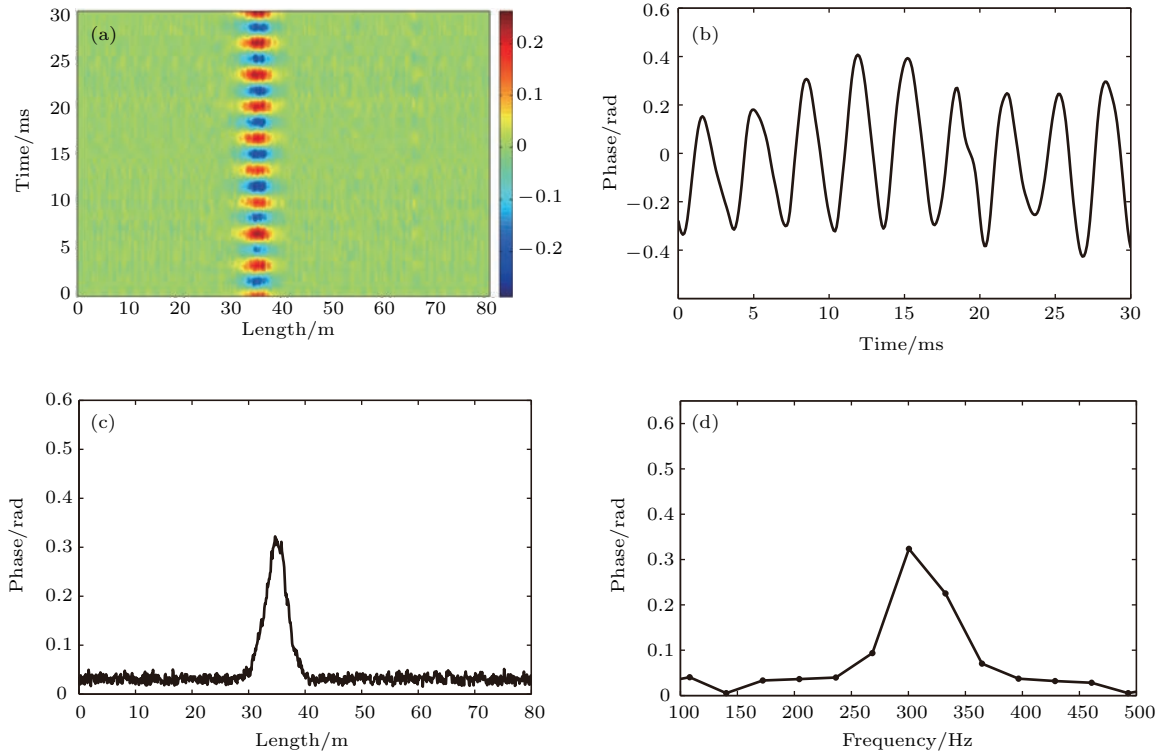


图4 声压级 79.2 dB 时的声增敏传感结果 (a) 信号时间距离等高图; (b) 信号时域图; (c) 距离相位图; (d) 信号频谱图
 Fig. 4. The sensing result with 79.2 dB sound pressure level: (a) Signal contour between time and length; (b) signal time domain picture; (c) signal length-phase curve; (d) signal spectrum.

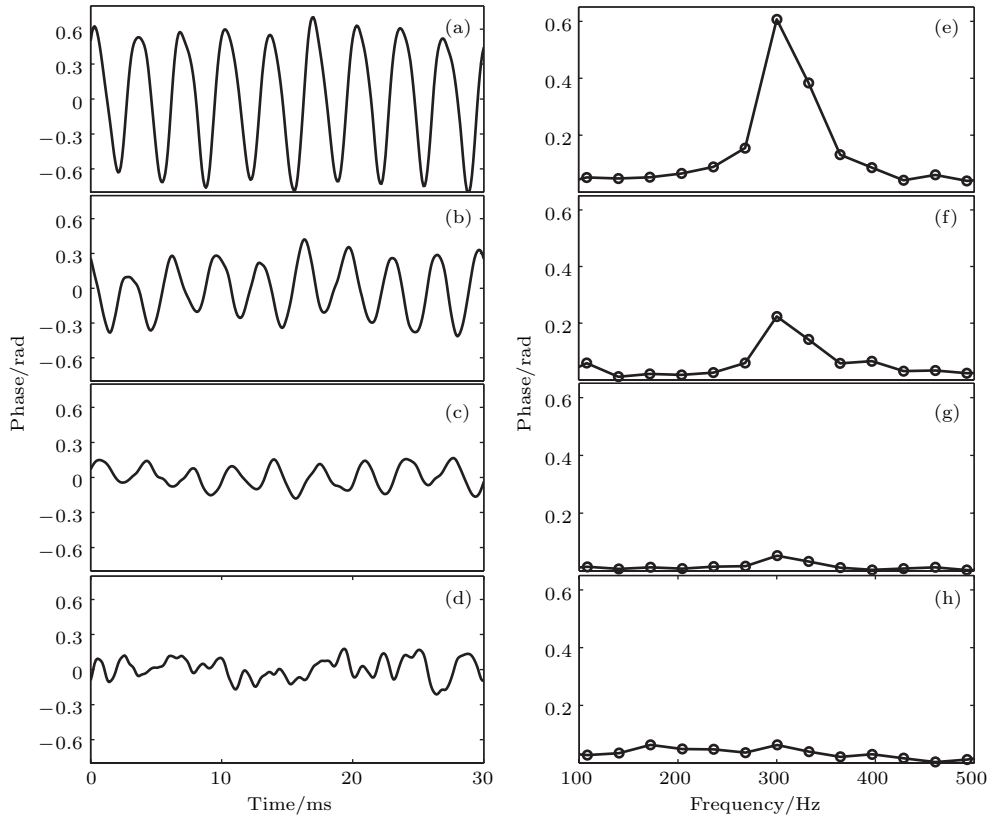


图5 声增敏传感系统探测声信号时域图和频谱图 (a)—(d) 84.6 dB, 76.3 dB, 60.1 dB, 54.3 dB 时域图; (e)—(h) 84.6 dB, 76.3 dB, 60.1 dB, 54.3 dB 频谱图
 Fig. 5. The time domain pictures and spectrum from acoustic detection enhancement: (a)—(d) Time domain picture with 84.6 dB, 76.3 dB, 60.1 dB, 54.3 dB; (e)—(h) spectrum with 84.6 dB, 76.3 dB, 60.1 dB, 54.3 dB.

表1 3种声增敏传感器主要参数
Table 1. Main parameters of three kinds of acoustic sensors.

编号	传感光纤长度 L/m	波节间距 l/mm	单波节轴向刚度 $K_0/N \cdot mm^{-1}$	理论应变灵敏度/ $n\epsilon \cdot Pa^{-1}$	理论相位灵敏度 $S_e/rad \cdot Pa^{-1}$
1	2	10.4	5.2	159.2	2.975
2	2	10.5	8.1	103.2	1.929
3	2	11.5	15.6	58.7	1.097

依次从 84.6 dB 至 54.3 dB (对应声压从 339.6 mPa 至 10.4 mPa) 改变声源强度, 进行声信号探测, 并通过傅里叶变换得到信号频谱图. 图5为不同声压下, 35 m位置处探测得到声信号时域波形及其频谱. 图中声压级分别为 84.6, 76.3, 60.1, 54.3 dB, 对应声压为 339.6, 130.6, 20.2 和 10.4 mPa. 图5显示, 在 60.1 至 84.6 dB 声压级范围内正弦信号波形清晰, 幅值随声压降低而减小, 而在声压级为 54.3 dB 时, 被探测的声信号已淹没于噪声中.

图6所示为 35 m 位置处探测得到声信号频谱幅值随声压变化的关系. 从图6可以看到, 在声压 20.2—339.6 mPa 部分, 信号幅值随声压近似成线性关系; 从图6插图中可以看到声压小于 20.2 mPa 时, 信号幅值几乎不随声压变化, 表明系统最小探测声压级为 60.1 dB. 相比未经增敏的光纤环, 最小探测声压级显著提升.

我们进一步对3个不同参数的声增敏传感装置进行实验. 由(8)式可知, 声传感增敏效果与传感光纤长度 L 、波纹薄筒的波节间距 l 和单波节轴向刚度 K_0 有关, 故选取波节间距相近、单波节轴向刚度不同的波纹薄筒, 设计制作了3种灵敏度不同的声增敏传感器, 其主要参数列于表1.

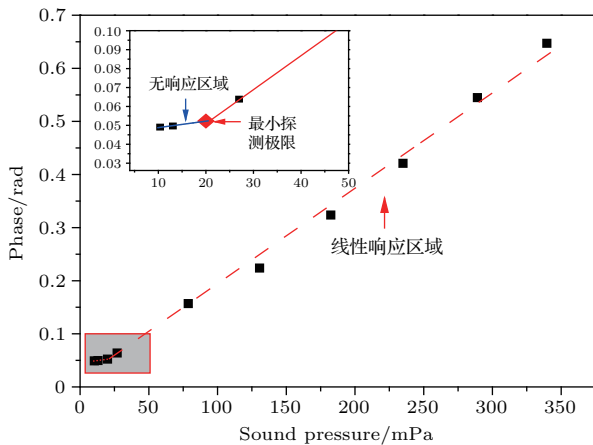


图6 探测声信号频谱幅值与声信号声压的关系(插图为局部放大图)

Fig. 6. The relationship between signal's spectrum amplitude and the sound pressure, the illustration is the zoomed in picture.

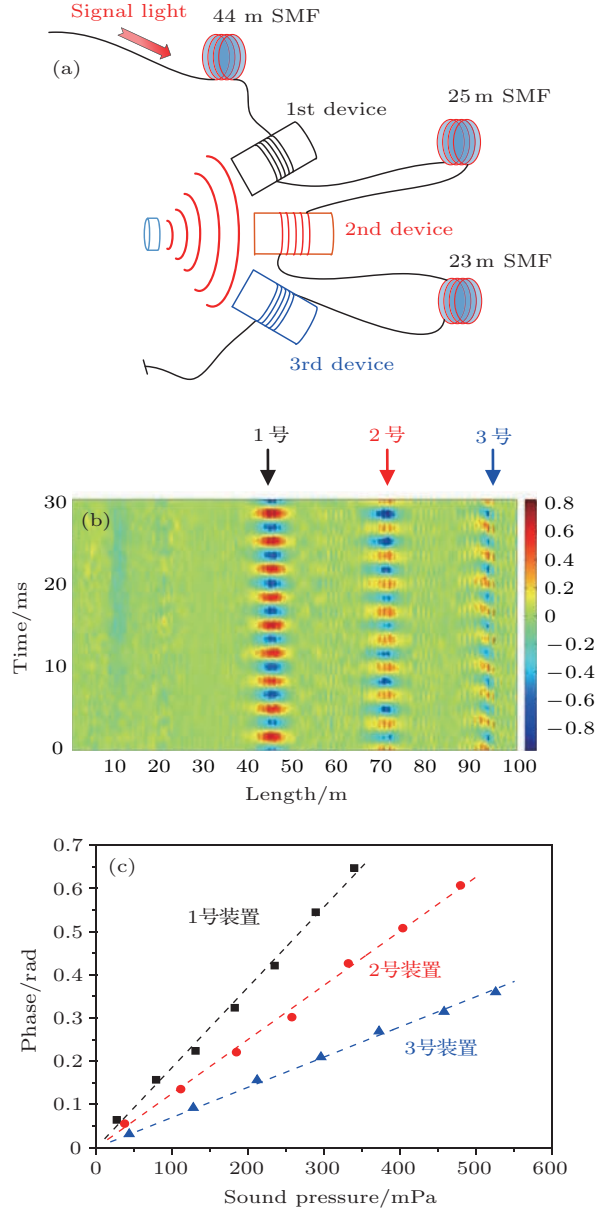


图7 3种声增敏传感装置对比实验原理图、时间距离相位图和灵敏度拟合结果 (a) 实验原理图; (b) 信号时间距离等高图; (c) 灵敏度拟合结果

Fig. 7. The principle diagram experimental result and fitting result of the compared experiment among three devices: (a) The principle diagram; (b) contour between time and length; (c) the fitting result.

将3种声增敏传感装置按图7(a)所示依次接入光路, 1号传感装置距光纤起始端44 m, 2号与1号传感装置、3号与2号传感装置间分别连接25 m

和 23 m 光纤, 传感装置固定在距声源 10 cm 处, 开口端正对声源. 同时将单点声传感器放置于波纹薄筒开口端监测声信号强度. 改变声源强度, 3 个声增敏传感装置同时进行探测.

图 7(b) 所示为 3 种声增敏传感装置的时间距离相位图, 图中分别在 45 m, 70 m 和 93 m 位置传感到声信号. 图 7(c) 为幅值声压测试结果, 可看到幅值随声压变化具有良好的线性度, 线性拟合 R^2 分别为 0.9984, 0.9990 和 0.9992; 三种声增敏传感装置的相位灵敏度测量值分别为 1.80, 1.22 和 0.68 rad/Pa, 相比 3 号传感器, 1 号和 2 号声增敏传感装置的相位灵敏度分别增加 2.712 倍和 1.758 倍. 三种声增敏传感装置的相位灵敏度理论计算值为 2.975, 1.929 和 1.097 rad/Pa; 相比 3 号传感器, 1 号和 2 号声增敏传感装置的理论相位灵敏度分别增加 2.647 倍和 1.794 倍. 相位灵敏度实验结果与理论计算值存在差异, 但趋势一致, 这可能由于实际中的部分参数偏离理论值, 但是声增敏传感装置间的比值关系基本一致. 因此建立的模型可用于实现灵敏度的灵活设计, 指导声增敏装置的声增敏传感装置几何尺寸和不同材料选择.

4 结 论

本文提出了一种基于 C-OTDR 光纤分布式声增敏传感方法, 采用单端固定开口的增敏薄筒转化声压为光纤应变. 建立声压至光纤应变传递模型用于分析单端固定开口的增敏薄筒的增敏机理, 给出了相位灵敏度与声增敏传感装置的波节间距、单波节轴向刚度等几何参数和力学参数的关系, 理论分析表明增敏薄筒能有效提高声传感灵敏度. 搭建声增敏传感系统进行测量实验, 结果表明声增敏传感装置最小探测声信号达到 60.1 dB, 3 种规格声增敏传感装置灵敏度变化趋势基本符合理论计算结果, 并且灵敏度之间比值与计算值一致. 该声增敏传感系统有效提高了声传感相位灵敏度, 通过改变增敏参数可实现灵敏度的灵活设计. 研究结果为高灵敏

度的光纤分布式声传感的进一步发展提供了理论和实验基础.

参考文献

- [1] Teixeira J G V, Leite I T, Silva S, Frazão O 2014 *Photon. Sens.* **4** 198
- [2] Wild G, Hinckley S 2008 *IEEE Sens. J.* **8** 1184
- [3] Takahashi N, Hirose A, Takahashi S 1997 *Opt. Rev.* **4** 691
- [4] Wang S, Lu P, Liao H, Zhang L, Liu D, Zhang J 2013 *J. Mod. Opt.* **60** 1892
- [5] Sakai T, Suzuki S, Wakayama S 2016 *Exp. Mech.* **56** 1439
- [6] Moccia M, Pisco M, Cutolo A, Galdi V, Bevilacqua P, Cusano A 2011 *Opt. Express* **19** 18842
- [7] Guo F, Fink T, Han M, Koester L, Turner J, Huang J 2012 *Opt. Lett.* **37** 1505
- [8] Wei P, Shan X, Sun X 2013 *Opt. Fiber Technol.* **19** 47
- [9] He H, Shao L, Li Z, Zhang Z, Zou X, Luo B, Pan W, Yan L 2016 *Sensors-Basel* **16** 681
- [10] Hussels M T, Chruscicki S, Habib A, Krebber K 2016 *In Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFs)* Limerick, Ireland, May 30, 2016 p99162Y
- [11] Palmieri L, Schenato L 2013 *The Open Opt. J.* **7** 104
- [12] Lu Y, Zhu T, Chen L, Bao X 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 3243
- [13] Wu Y, Gan J, Li Q, Zhang Z 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 1
- [14] Shang Y, Yang Y, Wang C, Liu X, Wang C, Peng G 2016 *Measurement* **79** 222
- [15] Wang D H, Jia P G, Ma Z G, Xie L F, Liang Q B 2014 *Electron. Lett.* **50** 649
- [16] Wang C, Shang Y, Liu X, Wang C, Peng G D 2014 *Asia Communications and Photonics Conference* Shanghai, China, November 11–14, 2014 pATh3A-213
- [17] Iida D, Toge K, Manabe T 2016 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition* Anaheim, California United States, March 20–22, 2016 pM2D-6
- [18] Luo W 2006 *M. S. Dissertation* (Qinhuangdao: Yanshan University) (in Chinese) [骆伟 2006 硕士学位论文 (秦皇岛: 燕山大学)]
- [19] Lü D C, Zhang X P 2010 *Acta Opt. Sin.* **25** 1025 (in Chinese) [吕丁成, 张晓萍 2010 光学学报 **25** 1025]
- [20] Zhao L J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6219 (in Chinese) [赵丽娟 2010 物理学报 **59** 6219]

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Research on improving detection sensitivity to acoustic based on coherent-OTDR distributed fiber-sensing system*

Chen Wen-Jie Jiang Jun-Feng[†] Liu Kun Wang Shuang Ma Zhe
Zhang Wan-Chen Liu Tie-Gen[‡]

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering of Tianjin University, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Tianjin 300072, China)

(Received 17 November 2016; revised manuscript received 23 February 2017)

Abstract

Coherent-OTDR technology is one of acoustic distributed fiber-sensing systems. Because of the advantages of anti-electric magnetic field interference, anti-corrosion and flexibility, it has been attracting more and more interest. Because the sound pressure is weak, the strain generated on the fiber is tiny and the sensitivity of the sensing system is low. Although many research has been made on expanding measuring distance and improving response frequency, the acoustic signals in the experiments are always replaced by PZT's mechanical stretching. In this work, a device for increasing sensitivity for acoustic in the passive acoustic detection system based on coherent optical time domain reflection (C-OTDR) is promoted. A way of improving sensitivity partly based on a thin-walled corrugated tube was promoted. The thin-walled corrugated tube was used as the element to transmit the energy of acoustic into the vibration of fiber.

In section 2, a mathematical model of sensing based on corrugated tube was established. Theoretical result shows that the vibration of fiber is mainly caused by the tube movement along the axis direction. And it also shows the linear relationship between the vibration and the sound pressure. The sensitivity of the improved sensing devices is calculated and a computational formula for sensitivity calculating are also given.

In section 3, the C-OTDR acoustic distributed fiber-sensing systems are set up. Fiberring and three types of thin-walled corrugated tubes are used for acoustic sensing. The minimum detection sound pressure level reaches 60.1 dB and the phase sensitivity reaches 2.975 rad/Pa. The experimental phase sensitivity of different sensing devices with different parameters change similarly to the theory results. The experimental results show that the way of improving sensitivity and the mechanical model for calculating sensitivity are effective. This research provides theoretical and experimental basis for further development of distributed optical fiber sensing.

Keywords: coherent detection, optical time domain reflection, acoustic sensing, sensitivity improving

PACS: 07.60.Vg, 07.64.+z

DOI: [10.7498/aps.66.070706](https://doi.org/10.7498/aps.66.070706)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61675152, 61227011, 61378043, 61475114, 61505139, 61505138), the National Instrumentation Program of China (Grant No. 2013YQ030915), and the Shenzhen Science and Technology Research Project, China (Grant No. JCYJ20120831153904083).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangjfjxu@tju.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: tgliu@tju.edu.cn