

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107325

分布式声传感型特种光纤结构设计^{*}

余双勇, 衣文索, 陈昊玥, 韩冬子, 王鑫睿

(长春理工大学光电工程学院 长春 130012)

摘 要: 分布式光纤声波传感(DAS)是一种新型光纤声感知技术。该技术的作用机理是声学信号在分布式光纤上产生微弱的形变,从而引起光纤折射率的变化。光在传输过程产生相干效应,DAS 对于正交分量信号不敏感,很难用一根直的水平光纤探测这类信号。本文主要对 DAS 探测声学信号探测灵敏度进行研究,采用 ANSYS 仿真软件分析声场对不同物理模型声学信号的感知能力,对物理模型结构最佳方案进行分析,设计出具有对声音高感知能力的物理模型。实验验证结果表明,平均提升了 3.94% 的信号幅值。经过信号解调去噪处理,得出设计的特种光纤高感知结构可以有效的获得更好的声学信号采集质量。

关键词: 分布式光纤声波传感;ANSYS 仿真;相位敏感光时域反射仪;声学信号

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Distributed acoustic sensing type special optical fiber structure design

Yu Shuangyong, Yi Wensuo, Chen Haoyue, Han Dongzi, Wang Xinrui

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: The distributed optical fiber acoustic wave sensing (DAS) is a new kind of optical fiber acoustic sensing technology. Its mechanism is that the acoustic signal generates a weak deformation on the distributed optical fiber, which causes the change of the refractive index of the optical fiber. Light produces coherent effects during transmission. DAS is not sensitive to quadrature component signals. It is difficult to detect such signals with the straight horizontal optical fiber. In this article, the sensitivity of DAS detection acoustic signal detection is mainly studied. The ANSYS simulation software is utilized to analyze the sound field's ability to perceive acoustic signals of different physical models. The best solution of the physical model structure is analyzed, a physical model with high sound perception ability is formulated. Experimental results show that the signal amplitude is increased by 3.94% on average. After signal demodulation and denoising processing, it is concluded that the designed special optical fiber high-sensing structure can effectively achieve better acoustic signal acquisition quality.

Keywords: distributed optical fiber acoustic wave sensing; ANSYS simulation; phase sensitive optical time domain reflectometer; acoustic signal

0 引 言

分布式光纤声波传感(distributed optical fiber acoustic wave sensing, DAS)是采用瑞利后向散射机理对声学信号进行探测的技术,声学信号通过摩擦或者压力耦合^[1-3]到光纤上的每一点都会引起光纤折射率的变化,从而对光学信号进行调制,完成声学信号的检测。该技术在石油、天然气^[4],地震波检测^[5-6]以及管道监测^[7-8]

等领域迅速普及。近年来,国内外学者们主要从扩大探测范围,提升频率响应能力、波形还原以及信号优化 4 个方面来提升 DAS 系统的检测性能。光源的相位噪声直接影响了 DAS 系统的扰动检测信噪比, Juarez 等^[9]于 2005 年以掺铒光纤构建的法布里-珀罗腔实现线宽为 3 KHz 的激光器,使得瑞利散射系统稳定性大大提高。早期研究人员通过提高光源功率来提高系统的动态范围,却发现光的非线性效应导致提升范围不明显。饶云江等^[10]另辟蹊径于 2010 年在相位敏感光时域反射仪

收稿日期:2021-01-04 Received Date: 2021-01-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61805022)项目资助

(phase sensitive optical time domain reflectometer, ϕ -OTDR) 系统引入双向拉曼放大技术, 将探测距离提高到 125 km。有效避免了光纤中非线性效应带来的问题。Qin 等^[11]于 2012 年提出移动平均算法和移动差分算法同 ϕ -OTDR 的数据处理相结合来提高探测信噪比, 在不改变硬件结构的同时减少运算量, 提升算法处理效果。

传统的直光纤在入射路径基本与光纤电缆垂直的系统中灵敏度不高, 很难用一根直的水平光纤探测到这种声学信号, 例如直接从地面反射地震波。因此有学者通过改变传感光纤的结构或类型来直接提升背向散射信号质量以及实现宽边灵敏度的检测, 如利用保偏光纤 (polarization maintaining fiber, PMF)^[12]、少模光纤^[13]等。但特种光纤成本较高, 且某些特种光纤难以与单模或多模光纤进行熔接。通过改进传感系统的结构并兼容传统的传感光缆与布设方案, 2015 年 Kuvshinov^[14]描述了 HWC 光纤理论上的预期响应以及直光纤电缆的侧边不敏感等问题。2018 年 Ning 等^[15]提出利用多应变投影测量来获取多分量数据的方法, 从电缆结构问题上进一步提高 DAS 系统的动态区间, 实现了多分量 DAS 是可以通过沿光纤测量的应变投影来重建应变张量的所有分量。2019 年 Shang 等^[16]通过测量 7 种光缆串联在 DAS 系统上同时检测不同位置 (不同光缆) 的声压灵敏度, 采用不同结构的光缆作为传感器, 得出敏化光缆的最高声压灵敏度为 69.9 mrad/Pa。

目前没有合适的 DAS 传感结构用于声学传感, 光缆作为 DAS 系统的传感器, 需要协调光纤与环境的相互作用, 因此光纤的选择和光缆的设计对系统的性能至关重要。本文提出一种对声学信号高灵敏度感知的特殊结构, 使 DAS 系统能够获得更好的声学信号质量。通过设计 3 种不同结构的分布式声压采集装置, 在 ANSYS 有限元平台上对不同的声音采集装置进行建模处理, 得知不同模型对应的声场分布情况; 结合光时域反射仪对光学损耗进行分析, 计算出物理模型螺距, 升角以及入射角度最优方案, 以此设计新型分布式声学信号采集装置。通过现场试验提升了声学信号的采集质量, 实现了在成本较低的前提下得到更好的声学信号检测性能。

1 基本原理

1.1 ϕ -OTDR 分布式光纤声传感基本理论

光纤散射现象进行离散镜模型建立如图 1 所示, 近似的看作无数个反射镜构成。首先假设光纤长度为 S , 均匀的分割成 N 个小段。则第 i 个小段长度为 $\Delta N = S/N$, 每个小段包含 M 个散射粒子, 如图 1(b) 所示。

N_i 段的后向瑞利散射电场强度 $E_N(N_i)$ 由 M 个反射镜叠加, 表达式为:

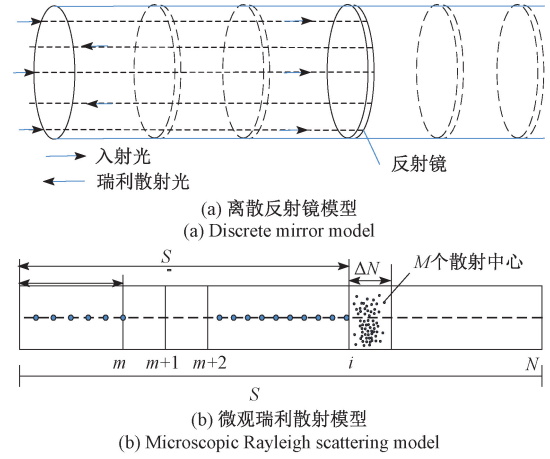


图 1 ϕ -OTDR 干涉模型

Fig. 1 ϕ -OTDR interference model

$$E_N(N_i) = E_0 e^{2\alpha S} \sum_{i=1}^M r_i e^{j\phi_i} \quad (1)$$

式中: E_0 是入射光电场强度; α 为散射衰减系数; r_i 与 ϕ_i 是散射粒子的系数和相位。假设每个散射粒子的系数均为 r 。则 N_i 段散射光强为:

$$I_{N_i} = |E_N(N_i)|^2 = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{i'=i+1}^M E_0 r e^{-4\alpha N_i} + 2E_0^2 r^2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{i'=i+1}^M \cos(\phi_{i'} - \phi_i) \quad (2)$$

式(2)中可得, 当 N_i 小段光纤外围有扰动作用时, 会引起相位差变化从而影响该段的光强变化。通过相邻周期之间散射信号之差, 也就是差分处理就可以检测出扰动位置进行定位。

1.2 测量原理

由于不均匀的瑞利散射使得激光脉冲传播时有一部分脉冲会被反射回来, 会导致光纤纤芯发生变化, 从而导致反射回来的脉冲的干涉图案也发生变化。干涉图案主要由反射回来散射光的相位决定。光波相位与其光路长度 L_0 成正比, 则:

$$L_0 = cd/v_{ph} \quad (3)$$

式中: d 是脉冲光在干涉效应区域行进的距离; c 是真空中光速; v_{ph} 是光纤中光的相速度。光纤应变引起的光路相对变化由以下关系式给出。

$$\frac{\Delta L_0}{L_0} = e_L^{(f)} - \frac{\Delta v_{ph}}{v_{ph}} \quad (4)$$

其中,

$$e_L^{(f)} = \frac{\Delta d}{d} \quad (5)$$

纤维的张力是沿着光传播的方向。 ΔL_0 、 Δd 和 Δv_{ph} 分别是 L_0 、 d 、 v_{ph} 的变化。假设干涉区域相对较短, 因此该区域光纤变形保持在一个近似恒定状态。之后所有构成

DAS 信号的所有波都具有相同的 $\Delta L_0/L_0$ 和 v_{ph} 值,电磁波在介质中的相速度 v_{ph} 与介质的介电张量 ϵ_{ij} 有关,均匀各项同性材料的介电张量在应度下的变化如下:

$$-\frac{\Delta \epsilon_{ij}}{\epsilon_0^2} = (P_{11} - 2P_{44})\delta_{ij}e_{nn} + 2P_{44}e_{ij} \quad (6)$$

式中: ϵ_0 是未变形介质的介电常数; P_{11} 和 P_{44} 是普克尔常数; δ_{ij} 是张量积; $\Delta \epsilon_{ij}$ 为变化的介电张量; e_{nn} , e_{ij} 为光缆的应变位置。式(6)有时用 P_{11} 和 $P_{12} = P_{11} - 2P_{44}$ 表示,介电张量以及普克尔常数的测量值如表 1 所示。

表 1 介电张量以及普克尔常数测量值

Table 1 The measured values of dielectric tensor and Pockels constant

参考作者	$n_0 = \sqrt{\epsilon_0}$	P_{11}	P_{12}	P_{44}
Hocker (1979)	1.456	0.121	0.270	-0.074 5 *
Budiansky et al. (1979)	1.460	0.13	0.28 *	-0.075
Hughes and Jarzynski (1980)		0.125 4	0.269 *	-0.071 8
Lagakos et al (1982)	1.458	0.126	0.27	-0.072 *

轴对称纤维变形中不会消失的应变分量是 $e_{xx}^{(f)} = e_{yy}^{(f)}$ 和 $e_{zz}^{(f)}$ 。 $e_{zz}^{(f)}$ 为沿 Z 轴方向的应变分量, $e_{xx}^{(f)}$ 和 $e_{yy}^{(f)}$ 为横向坐标轴上的应变分量。如图 2 所示。

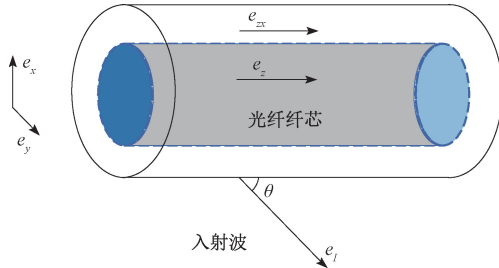


图 2 嵌入光缆的单模光纤

Fig. 2 Single-mode fiber embedded in optical cable

e_x, e_y 垂直指向光缆轴, e_z 以及 e_{zx} 分别为沿光纤以及光缆的定向应变,入射波沿着 e_l 方向传播。光大致沿着光纤的方向传输,因此得 $e_l^{(f)} \approx e_{zz}^{(f)}$ 。假设电场矢量平行于 X 轴,光波的相速度为 $v_{ph} = c\sqrt{\epsilon_{xx}}$ 以及:

$$\frac{\Delta v_{ph}}{v_{ph}} = -\frac{\Delta \epsilon_{xx}}{2\epsilon_0} \quad (7)$$

结合上述方程,得;

$$\frac{\Delta L_0}{L_0} = e_{zz}^{(f)} - \frac{\epsilon_0}{2} [(P_{11} - P_{44})e_{\perp} + (P_{11} - 2P_{44})e_{zz}^{(f)}] \quad (8)$$

式中: $e_{\perp}^{(f)} = e_{xx}^{(f)} + e_{yy}^{(f)}$, 对于表 1 给出的参数,式(8)简化为:

$$\frac{\Delta L_0}{L_0} = 0.7e_{zz}^{(f)} - 0.2e_{\perp}^{(f)} \quad (9)$$

这表明了 DAS 信号值与 $0.7e_{zz}^{(f)} - 0.2e_{\perp}^{(f)}$ 成正比,纤维被纵向或横向拉紧。

光缆应变是由正交分量信号引起的。在地震勘探等领域中主要对纵波进行解调,纵波的应变与波的传播方向平行。如果 P 波沿 X 轴传播,则该波携带的唯一非零应变是 $e_{xx}^{(w)}$,假设光缆与 X 轴成 θ 角度。如图 2 所示,应变是二阶张量,与向量不同的是,其投影具有余弦平方依赖性。 $e_{xx}^{(w)}$ 沿光缆的投影为 $e_{ll}^{(w)} = e_{xx}^{(w)} \cos^2 \theta$,通常情况下,光缆与地面耦合,使其轴向应变 $e_{ll}^{(c)}$ 近似为横向应变 $e_{ll}^{(w)}$ 。如果光纤是直的,则光缆与光纤轴重合,因此 $e_{zz}^{(f)} = e_{ll}^{(w)}$ 。DAS 信号与 $\cos^2 \theta$ 成正比,则几乎与光缆材料无关。2014 年 Mateeva 等^[17]证实了入射角度 θ 接近 90° 时,DAS 对平面 P 波的敏感度下降。在 $\theta=0^\circ$ 时 $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ 比 $\frac{E^{(c)}}{E^{(f)}}$ 小一倍,但并不会完全消失。

1.3 物理模型理论推导

建立如图 3 所示坐标轴,分析物理模型光纤弯曲与弯曲损耗之间的关系。

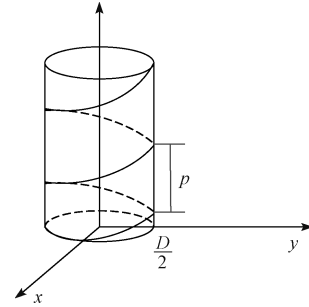


图 3 物理模型

Fig. 3 The physical model

空间螺旋曲线参数方程为:

$$R(t) = \left(\frac{D}{2} \cos(t), \frac{D}{2} \sin(t), \frac{p}{2\pi} t \right) \quad (10)$$

式中: D 为轴心直径; p 为缠绕螺距。

空间曲率计算公式为:

$$K(t) = \frac{|R' \times R''|}{|R'|^3} \quad (11)$$

式(10)代入式(11)可得:

$$K(t) = \frac{2\pi^2 D}{\pi^2 D^2 + p^2} \quad (12)$$

可知螺旋线曲率半径为:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{D}{2} + \frac{p^2}{2\pi^2 D} \quad (13)$$

对单模光纤来说,光纤的弯曲损耗为^[18]:

$$\alpha_c = A_c R^{-\frac{1}{2}} \exp(-UR) \quad (14)$$

其中,

$$A_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{aW^3} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{U}{WK_1(W)} \right]^2 \quad (15)$$

$$U = \frac{4\delta n W^3}{3aV^2 n_2} \quad (16)$$

在实际应用中,

$$V = ak_0(n_1 - n_2)^{\frac{1}{2}} \approx ak_0(2n_2\Delta n)^{\frac{1}{2}} = ak_0 n_2(2\Delta) = 2.405 \frac{\lambda_c}{\lambda} \quad (17)$$

$$W \approx 1.1428V - 0.996 \approx 2.7484 \frac{\lambda_c}{\lambda} - 0.996 \quad (18)$$

$$U = (V^2 - W^2)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

代入(15)得:

$$A_c \approx 30\sqrt{\Delta} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^3} \text{ (dB/m}^{1/2}\text{)} \quad (20)$$

其中各变量定义如表 2 所示。

表 2 光纤损耗计算变量定义

Table 2 Definition of optical fiber loss calculation variables

变量	含义
R	光纤弯曲半径
a	光纤纤芯半径
λ	OTDR 设备测量波长
λ_c	光纤截止波长
$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$	光纤纤芯包层相对折射率差
n_1	光纤纤芯折射率
n_2	光纤包层折射率
W	径向归一化衰减常数
V	归一化频率
A_c	依赖于波长的参数
U	径向归一化相位常数

圆柱体物理模型在缠绕半径和螺距一定的条件下,光功率损耗值与光纤缠绕关系如下:

$$b_l = l \times a_c \quad (21)$$

式中: l 为光纤缠绕模型长度。

$$l = n \times (p^2 + \pi D)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

则灵敏度定义如下:

$$K_\delta = \frac{\Delta b_l}{\varepsilon} \quad (23)$$

式中: Δb_l 是光纤缠绕部分施加应变前后光损耗变化值;

ε 是施加的应变。

2 仿真验证

2.1 模型仿真

为了实现一定范围的声音探测,单点声音探测往往达不到要求,需要使用分布式光纤传感技术进行分布式声音信号探测。使用单根光纤进行声学信号探测时,虽然达到了分布式测声音的效果,但信号强度的信噪比不高,探测质量不佳。因此下文对如何实现对声学信号高感知结构的设计做出研究,使获得更好的声学信号质量。

在 ANSYS 有限元仿真软件中绘制一个矩形。矩形为薄平板,长为 0.8 m,宽为 0.1 m。原点表示声源音响发声体,平面矩形与点声源相距 0.2 m。直光纤竖直铺设在平面区域中。建模完成后设置主要参数。矩形板块选择材料硬度大铝制的材料,密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,对声音的反射效果好。空气层为外部透明矩形体,把平板和声源完全包括在里面。空气层密度设置为 1.225 kg/m^3 ,声音在空气中的传播速度为 340 m/s ,完成空气层参数设置。对模型进行网格划分后选择声音传播区域,将空气层设置为完美匹配层将模拟的声场传播区域和无限声场分隔开来。添加声源激励 $\text{mass source} = 0.01 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$,无限声场声音进行衰减不进行仿真分析。经过声源激励后的仿真声压云图如图 4 所示,声压单位为 dB。红色区域为声压最高的区域,蓝色区域为声压最低区域。由图 4 可知最高声压值为 67.761 dB,最低为 49.919 dB。由图 5 为平面区域声压分布图。由图 5 可知声压分布不均匀,集中在蓝色区域,不适合作为实验装置。说明了该装置声场分布不均匀,使其传感性能较差。

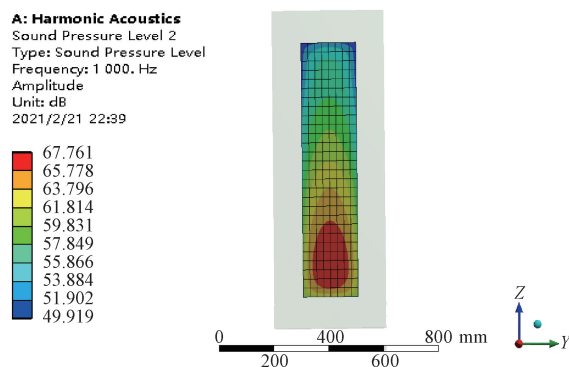


图 4 平面区域声压分布云图

Fig. 4 Sound pressure distribution cloud diagram in the plane area

按照以上参数分别设置新模型立体矩形以及圆柱体,参数不变,图 6 为立体矩形声压分布图以及图 7 为声音分布云图。光纤均匀的缠绕在立体矩形上,如图 6 所示声压分布不均匀,同一区域声压强度值不尽相同,导致

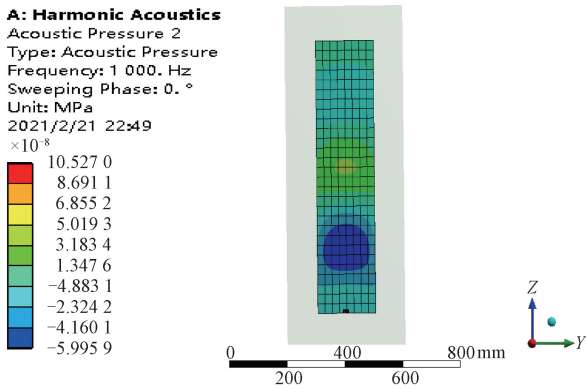


图5 平面区域声压分布图

Fig. 5 Sound pressure distribution in the plane area

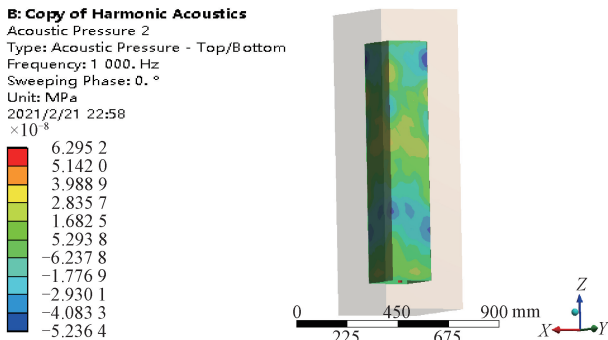


图6 声源对立体矩形声压分布图

Fig. 6 Sound pressure distribution of sound source to three-dimensional rectangular

传感性能不好。

如图7所示,最高声压值为76.762 dB,最低声压值为27.538 dB,虽然声压有了明显的提升,但是声压分布不均匀,会导致光纤在立体矩形材料上每个点的声音作用不均匀,从而影响声音的探测结果。

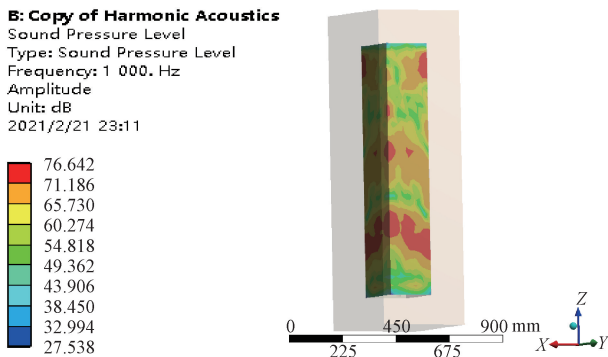


图7 声源对立体矩形声压分布云图

Fig. 7 Sound source vs. stereoscopic rectangular sound pressure distribution cloud diagram

如图8可知,圆柱体装置具有较为均匀的声压分布,最高声压值为88.881 dB,最低声压值为19.75 dB。接收到的信号比平面区域和立体区域的声压值都好。

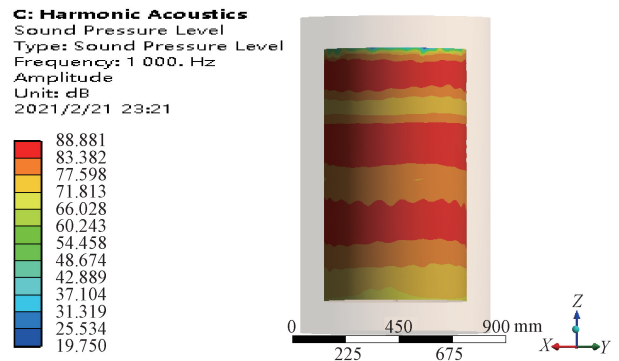


图8 声源对圆柱体声压分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of sound pressure distribution of sound source to cylinder

图9也表明圆柱体声压分布也具有较好的层次性,每一层具有相同的声场分布,在相同的高度上有着近似的声压值,整体上声压呈线性衰减。

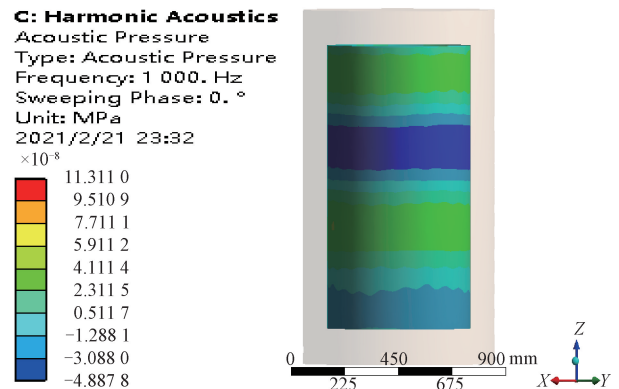


图9 声源对圆柱体声压分布图

Fig. 9 The sound pressure distribution of the sound source to the cylinder

3种模型声压对比曲线如图10所示,从曲线图中可以得知圆柱体的声压变化的较为平缓,声压值较高,可得知圆柱体模型的声音传感性能比立体模型和平板模型要好。也可看出3种模型的声压大致都是随着高度的增加而不断衰减。这是由于空气的衰减效应,没有形成密闭空间,而平板模型没有形成密闭区间,衰减会比较大,因此声压较低。立体矩形模型虽然形成了密闭区域,但是由于声音信号到达同一高度的距离不同,会出现不同声场的叠加效应,从而导致声场分布不均匀。因此根据图10结合声音的衰减性和声压分布的均匀性,得出圆柱模型为3种模型中的最佳模型。

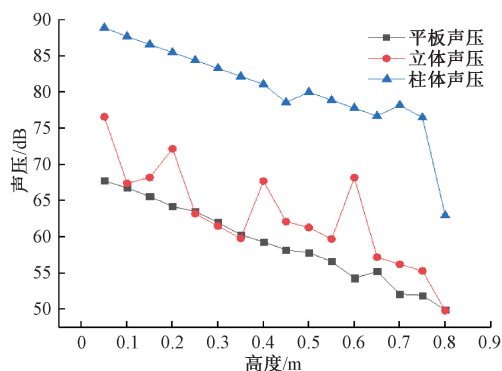


图 10 3 种模型声压对比图

Fig. 10 Comparison of sound pressure of three models

2.2 模型设计

本文采用 FH05000-MD21 型光时域反射仪 (optical time domain reflectometer, OTDR) 对光纤损耗值进行测量。本实验需要测量曲线上所有数据点的信息, 用来精确的计算损耗值。因此应用 MATLAB 数值分析软件提取曲线数据程序。

基于 1.3 节物理模型推导公式, 输入 MATLAB 数值分析软件可得出光纤缠绕圆柱体模型螺距与曲率半径之间的关系, 如图 11 所示。可知光纤螺距与曲率半径成正相关关系。

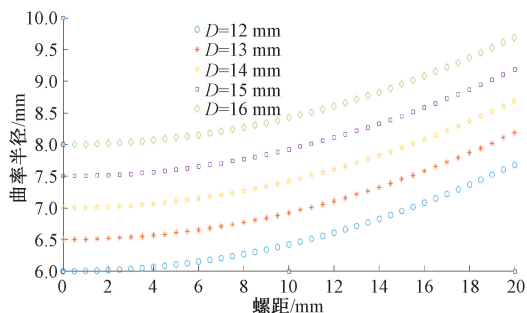


图 11 光纤曲率半径与缠绕直径和螺距之间的关系

Fig. 11 The relationship between the fiber curvature radius and the winding diameter and pitch

光纤以不同螺距紧密缠绕在铝棒上, 缠绕圈数 10 圈, 缠绕螺距设置为 15 mm, 缠绕直径为 12 mm。设定 OTDR 设备为平均化测量模式, 时长 3 min, 测量脉宽选择 50 ns, 测量范围 2 km。由 OTDR 设备测出光功率值, 经过 MATLAB 数值分析软件计算处理可以得到光纤损耗系数与曲率半径之间的关系。如图 12 所示, 随着曲率半径的增加光损耗值迅速减小, 减小到一定程度接近饱和。结合图 11 可知, 光纤损耗系数在一定区间内与光纤缠绕螺距成正相关关系, 与 1.3 节理论推导相符。

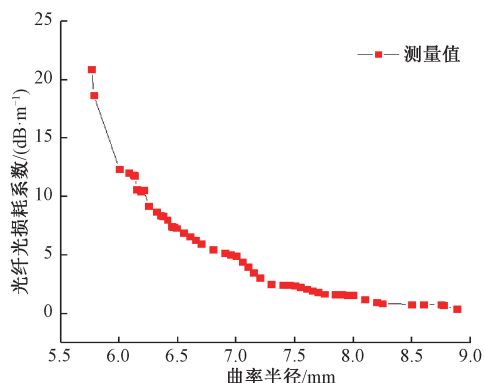


图 12 光损耗系数与曲率半径的关系

Fig. 12 Relationship between optical loss coefficient and radius of curvature

对应不同的缠绕直径, 测得不同的光损耗系数如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 不同缠绕直径下, 光纤损耗值与缠绕螺距整体均为线性关系, 光损耗值系数随着螺距的增加而减小。

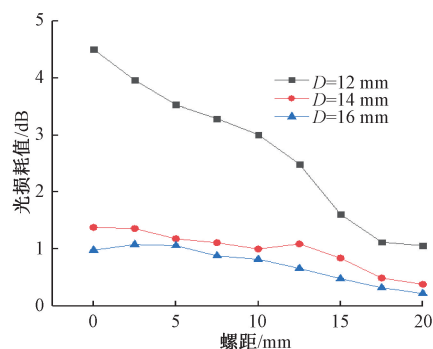


图 13 不同缠绕直径光损耗值与螺距关系

Fig. 13 The relationship between optical loss and pitch of different winding diameters

基于式(23)推导得到灵敏度计算公式, 由于变量较多, 公式较为复杂, 编写 MATLAB 仿真计算程序。参数设计如表 3 所示。

表 3 灵敏度变量定义

Table 3 Definition of sensitivity variables

参数	取值范围
D/mm	5~20
p/mm	5~20
n	2.5
A_c	7 020.416
U	1 414.311
$\varepsilon/\%$	-10

经过计算,将初始损耗,变形后损耗以及灵敏度绘制到三维坐标系中,如图14所示。从图14(a)、(b)可以看

出,光损耗值都随着模型缠绕直径和螺距以及缠绕直径和芯距的减小而显著增加,与理论推导相符。

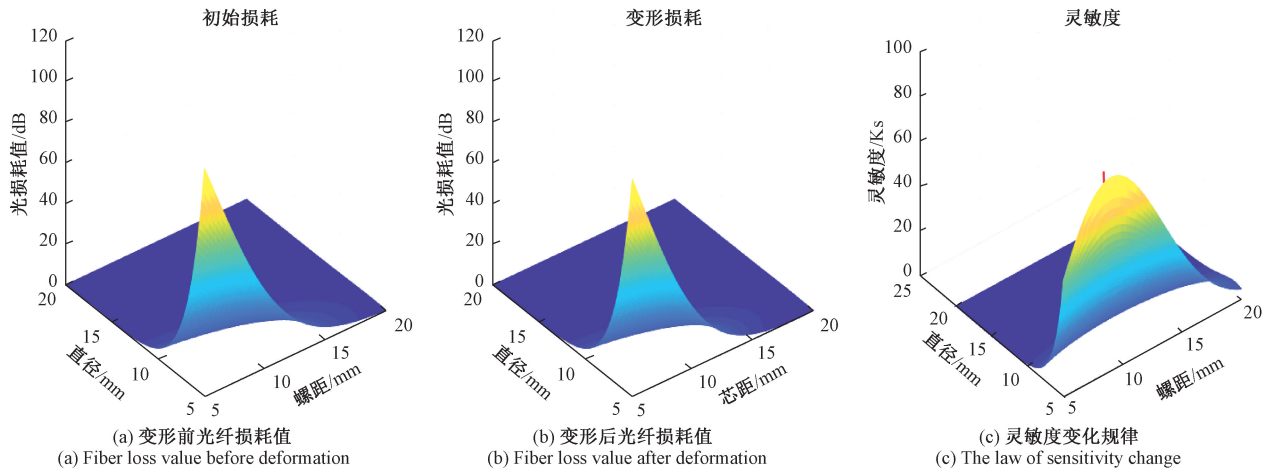


图14 初始光纤损耗值与变形后光纤损耗值以及灵敏度变化规律

Fig. 14 The initial fiber loss value and the fiber loss value after deformation and the law of sensitivity change

图14(c)为灵敏度数据图,从图中可以看出随着缠绕直径的减小,传感器灵敏度呈现逐渐增加的趋势。而随着螺距的增加,传感器灵敏度先增加后减小。因此存在一个最优螺距使得传感器灵敏度最优。

在实际结构的设计过程中,还应考虑可接受的损耗水平,结合上文实验数据与光损耗值分析,选定螺距为14.2 mm,缠绕直径为12.8 mm的特殊物理结构模型应用后续实验。文献[14]提出入射波角度为 30° 时,光纤此时接收到的信号最佳,即在该角度下瑞利波对被测信号的影响最小。因此设计新型的分布式采集装置如图15所示。光纤入射升角为 30° ,螺距为14.2 mm,缠绕直径为12.8 mm。外层为保护装置,使得光纤不与周围介质发生滑移,影响探测质量。通过光纤的一致性叠加效应,可以将分布式光纤信号进行滑动平均,进行信号的叠加处理,确保声音信号更加稳定平滑,提高采集到的声音信号质量,更有利于DAS系统探测声音信号而进行定位计算的能力,从而提高探测精度。

2.3 DAS系统噪声处理方法

在DAS系统中,内部的各种元器件以及外界的环境干扰都会引入噪声,而噪声的引入会影响DAS系统传感信号的质量。在硬件上采用设计图15的“包层”来减少外界对单模光纤产生噪声,系统中在掺铒光纤放大器上增加光纤光栅来抑制放大器产生的系统噪声等方法。虽然在硬件上可抑制较为常见的噪声,但仍然有硬件条件无法滤除的噪声水平对信号的探测造成影响,因此还需数字信号处理技术进行噪声的去除。

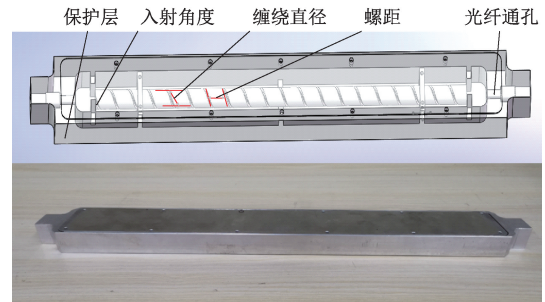


图15 特种光纤结构

Fig. 15 Special fiber structure

目前光纤传感领域常用的信号处理手段有滑动平均,小波去噪^[19-20]等。但通过滑动平均去噪的方法过于简单,去噪的效果并不理想。而小波去噪因其比较好的去噪效果被广泛使用。小波去噪是根据有效信号和噪声的区别,通过阈值的选取来保留有效信号和去除噪声信号。有效信号具有一定的连续性,而噪声信号是没有连续性的,其小波变换后系数模值较小,所以可以通过设置阈值保留高于阈值部分,将低于阈值的系数降低或剔除,完成去噪^[21]。

本次带噪声的信号如图16所示,噪声信号来源于不同的频段,使得信号源淹没在噪声信号之中,因此需要进一步对于所采集的信号进行处理。图17所示为去噪之后的信号波形。去噪之前的信号包络受到噪声的影响,原有信号有些部分几乎被掩盖,噪声信号的毛刺较为明显,而对于去噪之后的信号来说噪声的毛刺成分比较少,可以清晰的看出去噪后的信号包络。

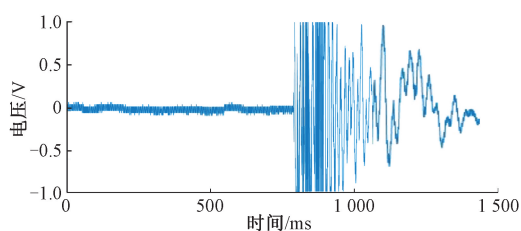


图 16 带噪信号波形

Fig. 16 Noisy signal waveform

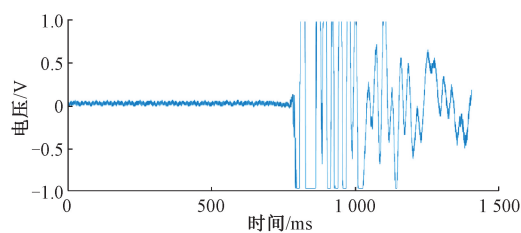


图 17 去噪信号波形

Fig. 17 Denoising signal waveform

3 实验验证

3.1 实验室实验

图 18 所示为系统原理图以及实物图。实验过程中尽量减少外来噪声。首先传感光纤使用单模直光纤与环形器相连,声源采用音频功率放大器,标准函数发生器和扬声器改装而成的自制声源。激光发出激光, FPGA 发出脉冲信号,经过声光调制器 (AOM) 将光信号调制成稳定的脉冲探测光,经掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后进入传感光纤,采用雪崩二极管 (APD) 探测模块对信号进行探测,数据采集卡 (DAQ) 进行数据采集,通过示波器来显示接收到的声音信号。分别设置 10 次不同频率的声音信号进行实验,测得传统直光纤解调出波形的最大有效幅值随着不同频率声波信号的变化如表 4 所示。

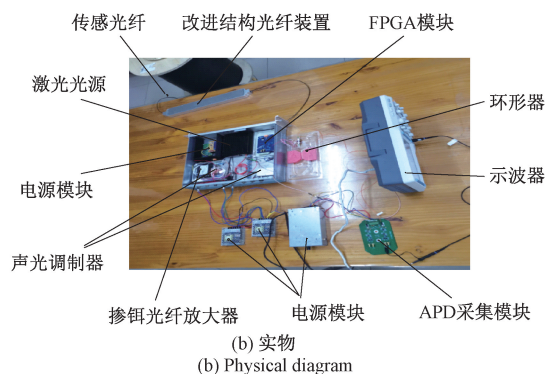
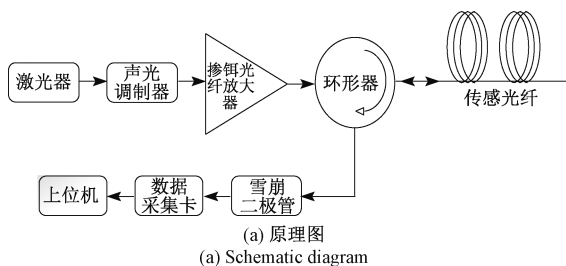


图 18 系统结构

Fig. 18 System structure

表 4 测量数据

Table 4 Measurement data

频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V
20	0.375	40	0.408	60	0.467
30	0.395	50	0.423	70	0.471
频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V		
80	0.501	100	0.542		
90	0.539	200	0.668		

同理进行改进光纤结构的实验,其波形最大有效幅值随不同频率声波变化信号如表 5 所示。

表 5 测量数据

Table 5 Measurement data

频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V
20	0.390	40	0.412	60	0.477
30	0.403	50	0.436	70	0.485
频率/Hz	振幅/V	频率/Hz	振幅/V		
80	0.522	100	0.559		
90	0.550	200	0.695		

将两组实验数据绘制成曲线如图 19 所示,可以看出改进的光纤结构会比传统的单维铺设结构具有更高的幅值,表明其具有更好的声学信号接收能力。

3.2 场外实验

在实验室的基础上进行场外实验,场外铺设长达 18 km 的光缆,7 600~7 700 m 处每 10 m 采用特殊结构的声音增敏结构,一个人在光缆 7 600 m 处按照光缆的方向开始行走至直线 7 700 m。

图 20 所示的 DAS 仪器输出中,上半部分竖直的线表示信号发生的定位直线,实时监测信号发生位置,其余波形表示探测信号波形;下半部分信号为探测到的声信号,在灰度图中越亮说明信号越强。

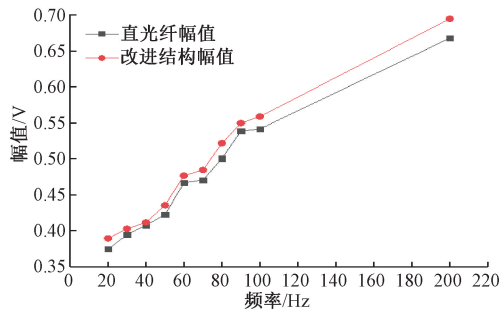


图 19 两种结构幅值随着声波频率变化情况

Fig. 19 Changes in the amplitude of the two structures with the frequency of sound waves

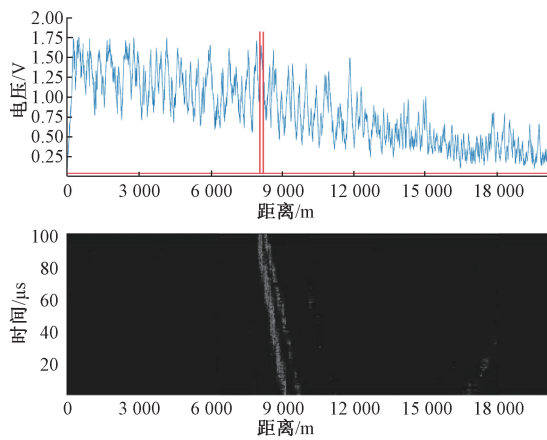


图 20 直光纤 DAS 仪器输出

Fig. 20 Straight fiber DAS instrument output

采用相同的条件,把行走部分光纤换成特种增敏光纤结构,DAS 仪器输出如图 21 所示。对比图 20 和 21,可以看出在控制外界变量的同时只改变唯一变量增敏光纤结构,图 21 下半部分信号显示区域的信号显示更密集,且亮度更高更亮。则可得出改进结构具有更强的灰度,即具有更强的声学信号感知能力。

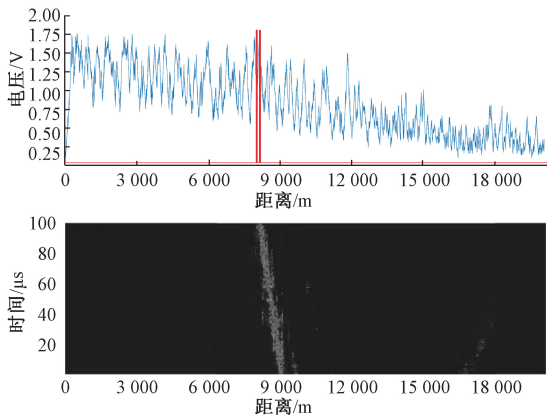


图 21 特种增敏光纤结构 DAS 仪器输出

Fig. 21 Special structure winding fiber DAS instrument output

为降低误差,分别在相同的条件下进行 10 次测量,分别测得 10 次单维直光纤铺设以及特种光纤结构的最大有效幅值如表 6 和 7 所示。

表 6 测量数据

Table 6 Measurement data

测量次数	振幅/V	测量次数	振幅/V	测量次数	振幅/V
1	1.635	3	1.631	5	1.635
2	1.629	4	1.628	6	1.631
7	1.628	9	1.631		
8	1.628	10	1.629		

表 7 测量数据

Table 7 Measurement data

测量次数	振幅/V	测量次数	振幅/V	测量次数	振幅/V
1	1.691	3	1.692	5	1.700
2	1.702	4	1.693	6	1.702
7	1.692	9	1.701		
8	1.694	10	1.704		

对比表 6 以及表 7,信号幅值整体上比没改进之前提升了 0.064 3 V。

图 22 所示为场外两种结构实验多次测量幅值的曲线对比,可明显的看出改进特种增敏光纤结构具有比单维直光纤铺设具有更高的幅值,虽然整体增加不大(只有 0.064 3 V),但是经过解调处理也会使接受信号出现显著的变化,与图 20、21 所示的信号灰度强弱结果相吻合。因此,改进结构具有更好的声学信号接收和采集能力。

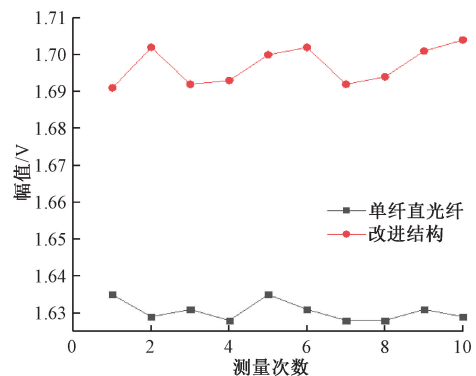


图 22 两种结构幅值随着声波频率变化

Fig. 22 The amplitude of the two structures changes with the frequency of the sound wave

4 结 论

综上所述,本文提出了一种提高 DAS 光缆特殊增敏结构的方案。实验结果表明,该设计方案与传统单维直光纤相比,在现场实验中比传统的直光纤测量回波特征最大值增加了 0.16,平均信号幅值提升了约 3.94%,经过信号解调处理,具有更强的灰度,可获得更好的声学信号质量。在特殊场合中探测微弱信号方面具有巨大的潜力。但是该种特殊结构利用光纤的一致性叠加效应获得较好的声音质量却大大缩短了光纤的铺设距离,而在不失真情况下的探测距离始终是限制 DAS 发展的主要因素之一。因此,如何保证高灵敏度和探测距离的平衡,对光纤传感领域也是一个深层次的挑战。同时本系统在分布式声学传感应用于测量地震波宽边灵敏度方面也具有深远意义。

参考文献

- [1] 董小卫,谢斌,潘勇,等. 分布式光纤声波振动传感系统研发及应用[J]. 应用光学,2020,41(6):1298-1304.
DONG X W, XIE B, PAN Y, et al. Research and application of distributed optical fiber acoustic vibration sensing system [J]. Applied Optics, 2020, 41(6):1298-1304.
- [2] 刘铁根,王双,江俊峰,等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1681-1692.
LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Research progress in aerospace optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8):1681-1692.
- [3] 刘天沐,江毅,崔洋. 光子晶体光纤温度压力传感器[J]. 光子学报,2020,49(4):120-127.
LIU T M, JIANG Y, CUI Y. Photonic crystal fiber temperature and pressure sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4):120-127.
- [4] 周小慧,陈伟,杨江峰,等. DAS 技术在油气地球物理中的应用综述[J/OL]. 地球物理学进展,2021:1-15.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20200608.1535.156>.
ZHOU X H, CHEN W, YANG J F, et al. Overview of the application of DAS technology in oil and gas geophysics[J/OL]. Progress in Geophysics, 2021:1-15.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20200608.1535.156>.
- [5] 蔡海文,叶青,王照勇,等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(5):9-24.
CAI H W, YE Q, WANG ZH Y, et al. Distributed optical fiber acoustic wave sensing technology based on coherent Rayleigh scattering [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2020, 57(5):9-24.
- [6] 宋政宏,曾祥方,徐善辉,等. 分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用 I:主动源高频面波[J]. 地球物理学报,2020,63(2):532-540.
SONG ZH H, ZENG X F, XU SH H, et al. Application of distributed optical fiber acoustic wave sensing system in near-surface imaging I: Active source high frequency surface wave [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2):532-540.
- [7] 许滨华,何宁,何斌,等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8):20-30.
XU B H, HE N, HE B, et al. Experimental research on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8):20-30.
- [8] 陈述,李素贞,黄冬冬. 埋地热力管道泄漏土体温度场光纤监测[J]. 仪器仪表学报,2019,40(3):138-145.
CHEN SH, LI S ZH, HUANG D D. Optical fiber monitoring of the soil temperature field of buried thermal pipeline leakage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3):138-145.
- [9] JUAREZ J C, TAYLOR H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Applied Optics, 2007, 46(11):1968-71.
- [10] 饶云江,李立,贾新鸿,等. 基于拉曼组合放大的长距离光纤传输系统[J]. 物理学报,2010,59(7):4682-4686.
RAO Y J, LI L, JIA X H, et al. Long-distance optical fiber transmission system based on Raman combined amplification [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7):4682-4686.
- [11] QIN Z G, CHEN L, BAO X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. Photonics Technology Letters, 2012, 24(7):542-544.
- [12] QIN Z G, ZHU T, CHEN L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. Photonics Technology Letters, 2011, 23(15):1091-1093.
- [13] YUAN M, ASHRY I, ALIAS M S, et al. Investigating the performance of a few-mode fiber for distributed acoustic sensing [J]. Photonics Journal, 2019, 11(5):1-10.
- [14] KUVSHINOV B N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves [J]. Geophysical

- Prospecting, 2016, 64(3): 671-688.
- [15] NING I L C, SAVA P. Multicomponent distributed acoustic sensing: Concept and theory [J]. Geophysics, 2018, 83(2): 1-8.
- [16] SHANG Y, WANG C, NI J S, et al. Discussion on the sensitivity of optical cables based on distributed acoustic sensing [J]. Optical Review, 2019, 26(6): 659-663.
- [17] MATEEVA A, LOPEZ J, POTTERS H, et al. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling [J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62(4): 679-692.
- [18] GAMBLING W A, MATSUMURA H, RAGDALE C M. Curvature and microbending losses in single-mode optical fibres [J]. Optical and Quantum Electronics, 1979, 11(1): 43-59.
- [19] 何乐, 丰鑫, 吴华明, 等. 直线型光纤 Sagnac 干涉仪声传感器及其去噪方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 70-77.
- HE L, FENG X, WU H M, et al. Research on linear optical fiber Sagnac interferometer acoustic sensor and its denoising method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 70-77.
- [20] 阎妍, 行鸿彦. 基于小波包多阈值处理的海杂波去噪方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 172-178.
- YAN Y, XING H Y. Sea clutter denoising method based on wavelet packet multi-threshold processing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(8): 172-178.

- [21] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

PAN Q, ZHANG L, MENG J L, et al. Wavelet filtering method and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

作者简介



余双勇, 2015 年于长春建筑学院获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向分布式光纤传感技术。

E-mail: 364302863@qq.com

Yu Shuangyong received his B. Sc. degree from Changchun University of Architecture in 2015. He is currently a master student at Changchun University of Science and Technology. His main research field is distributed optical fiber sensing technology.



衣文索 (通信作者), 2006 年于吉林大学获得博士学位。现为长春理工大学副教授兼硕士生导师。主要研究方向为分布式光纤传感技术、光纤光栅解调技术、光纤气体探测传感技术。

E-mail: yiws@jlu.edu.cn

Yi Wensuo (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Jilin University in 2006. He is currently an associate professor and a master advisor at Changchun University of Science and Technology. His main research interests include distributed optical fiber sensing technology, optical fiber grating demodulation technology, and optical fiber gas detection sensing technology.