

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205572

# 基于中值滤波的 OFDR 二维形状感知精度提升研究\*

张 昆<sup>1</sup> 白 清<sup>1,2</sup> 周晓旭<sup>2</sup> 孙志杰<sup>2</sup> 王 宇<sup>1</sup> 刘 昕<sup>1</sup> 靳宝全<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室 太原 030024;

2. 山西省交通科技研发有限公司 太原 030600)

**摘要:**基于光频域反射(OFDR)的二维形状传感技术存在相干噪声和光谱匹配错位,导致瑞利散射波长偏移曲线出现乱峰、杂峰,严重影响形状重构精度。为此,提出一种使用中值滤波的二维形状传感精度提升方法,分析了 Frenet-Serret 标架下的 OFDR 二维形状重构原理和利用中值滤波提升传感精度的基本原理,搭建了 OFDR 二维形状传感系统,通过多组静态应变实验标定了应变-波长偏移系数,利用中值滤波方法对3种预设二维形状的瑞利散射波长偏移曲线进行降噪处理。实验结果表明,应变-波长偏移系数标定为  $1.20 \mu\text{E}/\text{pm}$ ;在  $0.5 \text{ m}$  形状传感长度上,3种形状传感末端误差分别从  $3.08\%$ 、 $0.94\%$ 、 $0.82\%$  降低至  $0.80\%$ 、 $0.66\%$ 、 $0.48\%$ 。研究表明,利用中值滤波降噪可以实现 OFDR 二维形状传感系统的感知精度提升。

**关键词:**光频域反射;二维形状传感;中值滤波;应变测量;光纤传感

**中图分类号:** TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## 2D shape sensing accuracy improvement based on OFDR using median filter

Zhang Kun<sup>1</sup> Bai Qing<sup>1,2</sup> Zhou Xiaoxu<sup>2</sup> Sun Zhijie<sup>2</sup> Wang Yu<sup>1</sup> Liu Xin<sup>1</sup> Jin Baoquan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Technology Research &amp; Development Co., Ltd., Taiyuan 030600, China)

**Abstract:** The 2D shape sensing based on optical frequency domain Reflectometry (OFDR) is limited by the coherent noise and the spectral mismatch, and the shape sensing accuracy is seriously restricted with the chaotic and ghost peaks. In this work, we proposed an accuracy enhancement method for a 2D shape sensing based on OFDR system utilizing a median filter. The measurement principle of the OFDR is analyzed. Besides, the proposed method and the Frenet-Serret framework are demonstrated. The 2D shape sensing experiment configuration is set up. And a distributed static strain experiment is conducted to calibrate the strain-wavelength shift coefficient. Then, the proposed method is used for noise reduction of the Rayleigh backscattering wavelength offset. The experimental results show that the strain-wavelength offset coefficient is  $1.20 \mu\text{E}/\text{pm}$ . At the length of  $0.5 \text{ m}$ , the end errors decreased from  $3.08\%$ ,  $0.94\%$ , and  $0.82\%$  to  $0.80\%$ ,  $0.66\%$ , and  $0.48\%$ , respectively. It is shown that the 2D OFDR shape sensing accuracy can be improved by proposed method.

**Keywords:** OFDR; 2D shape sensing; median filter; strain measurement; optical fiber sensing

## 0 引言

光频域反射(optical frequency domain reflectometry,

OFDR)是一种利用光纤中瑞利散射波长偏移的分布式光纤传感技术,可以实现对沿光纤分布的应变、振动、温度等参量的分布式测量<sup>[1]</sup>。因其优秀的空间分辨率和测量灵敏度,受到了形状传感领域的广泛关注,在介入医疗、

收稿日期: 2022-06-09 Received Date: 2022-06-09

\* 基金项目:山西省重点研发计划(202102150101005)、中国博士后科学基金(2021M691989)、山西省科技创新人才团队专项(201805D131003)项目资助

航空航天、结构监测等方面<sup>[2-5]</sup>实现了诸多应用。

光频域反射技术于 1981 年由 Eickhoff 等提出,随后便开展了多种应变测量研究,并且由 Luna 公司首次实现了基于 OFDR 应变传感的形状感知系统,利用多芯光纤光栅作为感知媒介实现了 2.1% 的二维形状传感误差和 3.9% 的三维形状感知误差<sup>[6]</sup>。然而其传感媒介采用间隔为 1 cm 光纤光栅,因此空间分辨率和形状传感精度严重受限。此外受限于干涉噪声和 OFDR 中应变解调方式,其瑞利散射偏移曲线存在杂峰和乱峰,影响形状传感精度<sup>[7]</sup>。针对这一问题,研究人员相继提出一系列方法进行改善。Meng 等<sup>[8]</sup>基于 OFDR 系统提出矢量投影法成功实现了末端误差为 13.1 mm 的形状传感。一种紫外曝光单模光纤提升了光纤中瑞利散射强度,进而实现了 OFDR 信号的信噪比提升,实现了长度为 20 cm 的形状传感,其末端误差达到了 6%<sup>[9]</sup>。2019 年,Beisenova 等<sup>[10]</sup>对单模光纤进行多路氧化镁掺杂增强瑞利散射强度,实现 OFDR 形状传感测量。除加强瑞利散射强度外,其他方法也相继提出用以改善 OFDR 信号质量以实现形状传感精度的提升。例如,局部光谱匹配法<sup>[11]</sup>用以抑制 OFDR 互相关运算结果中的伪峰,减少了瑞利散射波长偏移曲线中的杂峰。随后,该方法被用于二维形状传感实验,实现了 9.5 mm 的空间分辨率以及 1 m 二维传感长度上小于 1 cm 的测量误差<sup>[12]</sup>。Feng 等<sup>[13]</sup>提出一种衰落噪声抑制方法用以提升 OFDR 系统的信噪比,该方法通过对拍频信号时域分段来遏制相干衰落,然而这导致了空间分辨率的下降。尹国路等<sup>[14]</sup>采用镍铬记忆合金对 3 根光纤进行封装,实现了 0.58% 的二维传感末端误差,但是其数据处理涉及多次平均运算,计算成本较大。

本文提出一种使用中值滤波抑制瑞利散射波长偏移中噪声的方法,阐述了基于 OFDR 的二维形状传感原理以及基于中值滤波的噪声抑制方法。搭建了 OFDR 二维形状传感系统,并通过多组应变测量实验以及形状还原实验,标定了应变-瑞利散射波长偏移系数,最终实现了长度为 0.5 m,最大末端传感误差为 0.80% 的二维形状重构。

## 1 测量原理

### 1.1 OFDR 测量原理

图 1 所示为 OFDR 的基本光路配置,主要包括扫频激光器、由耦合器、环形器和待测光纤组成的马赫-泽德干涉结构,光电探测器和信号处理系统。如图 1 中虚线部分所示,扫频激光器发出连续啁啾激光,经由耦合器 1 和环形器注入待测光纤激发各位置处的瑞利后向散射。这些后向散射再通过环形器进入耦合器 2 与来自参考臂的分束扫频光混合,最终在光电探测器中发生相干拍频,

生成拍频信号。经由信号处理步骤获得待测光纤上的应变信息。

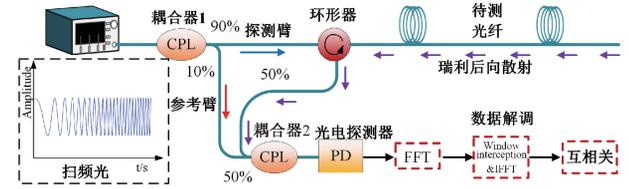


图 1 OFDR 的基本结构

Fig. 1 Basic configuration of OFDR

OFDR 的信号处理流程涉及到拍频信号的多次域变换。其具体的解调步骤如图 2 所示,根据外差相干探测原理,光纤中的瑞利后向散射与参考臂中的参考光进行干涉拍频生成拍频信号。待测光纤各位置处生成的次拍频信号具有恒定的中心频率,其频率大小  $f_b$  可表示为:

$$f_b = \frac{2\gamma n z}{c} \quad (1)$$

其中,  $\gamma$  为扫频光源扫频速率、 $n$  为光纤折射率、 $c$  为真空中的光速、 $z$  为光纤上某一瑞利反射点到光纤首端的距离。根据式(1)可知,待测光纤不同位置对应不同中心频率的拍频信号。

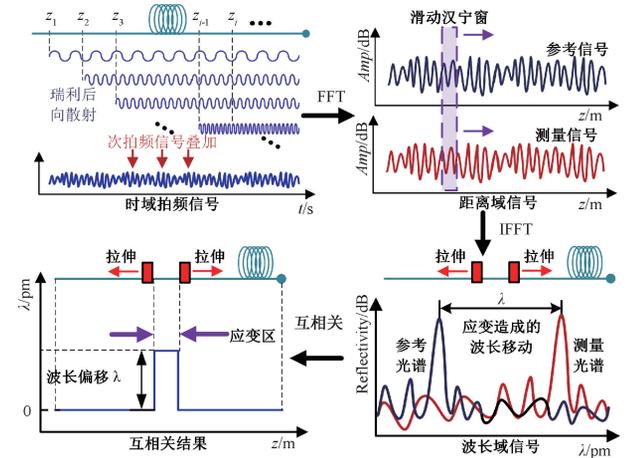


图 2 OFDR 系统测量原理

Fig. 2 The principle of OFDR

如图 2 所示,采集到的拍频信号可视为待测光纤不同位置处次拍频信号的叠加。对拍频信号进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)<sup>[15]</sup> 得到频域信号,即距离域信号。通常,参与 OFDR 解调的拍频信号有两组,一组为不包含外界信息的参考信号,另一组为包含外界信息的测量信号。使用滑动窗对参考距离域信号和测量距离域信号进行遍历截取。对截取后的局部距离域信号进行逆傅里叶变换 (IFFT), 获得波长域信号,即瑞利散射谱。对参考波长域信号和测量波长域信号进行互相关运算,即可获得相应位置的瑞利散射波长偏移。

通过图 2 所示的解调流程,可以获得沿光纤分布的瑞利波长偏移,进而得到光纤上的应变分布,基于传感光纤的布置结构和应变分布信息,可以实现二维形状传感。其中,应变大小  $\varepsilon$  与波长偏移  $\lambda$  的关系可由式(2)描述:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\lambda} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$  为施加的应变大小, $\lambda$  为瑞利散射波长偏移。 $\delta$  是应变—波长偏移系数,可由实验测出。

### 1.2 二维形状重构原理及误差评估方法

基于 OFDR 应变测量系统,将传感光纤贴附于待测结构上下表面。利用待测物表面应变分布结合 Frenet-Serret 标架可以实现二维形状传感<sup>[16]</sup>。

图 3 所示为传感光纤的布置结构。其中, $s$  为待测物体上下传感光纤纤芯间距, $\kappa_i$  为待测物各位置处的曲率。根据应变分布,曲率  $\kappa_i$  可由式(3)计算:

$$\kappa_i = \frac{\Delta\lambda_i}{s} \delta \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_i$  待测物位置  $i$  处上下表面光纤瑞利散射波长偏移之差。在空间坐标系下,连续可微曲线上任意一点可由 Frenet-Serret 标架下的  $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$  三个单位矢量表征。其中  $\mathbf{T}$  是单位切向量, $\mathbf{N}$  为单位法向量, $\mathbf{B}$  为单位副法向量。形状重构曲线各点处的曲率  $\kappa$ , 挠率  $\tau$  与  $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$  三矢量关系可由式(4)描述:

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{T} \\ d\mathbf{N} \\ d\mathbf{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa & 0 & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $d\mathbf{T}, d\mathbf{N}, d\mathbf{B}$  分别为  $\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B}$  矢量的微分, $\kappa$  为曲率, $\tau$  为挠率。在平面坐标系中,二维形状重构曲线挠率  $\tau=0$ 。因此,对于二维曲线重构,Frenet-Serret 矢量与曲率关系可简化为式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{T} \\ d\mathbf{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

结合式(3)、(5),代入初始条件  $\kappa(0)=0, \mathbf{T}(0)=(1,0), \mathbf{N}(0)=(0,1)$ ,可得各点单位切向量  $\mathbf{T}(i)$ 。利用式(6),计算得到二维形状重构曲线各点平面坐标  $(x_i, y_i)$ :

$$\begin{aligned} x_i &= \int_0^i SR \times T_x(i) dl \\ y_i &= \int_0^i SR \times T_y(i) dl \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $SR$  为系统的传感空间分辨率。 $T_x(i)$  是第  $i$  个点主切向量的  $X$  轴投影, $T_y(i)$  为第  $i$  个点的主切向量  $Y$  轴投影。

末端形状重构误差是衡量形状传感精度的重要指标,它反映了待测物体末端位置与真实位置的偏差程度,由式(7)可知基于 Frenet-Serret 标架的形状重构方法其测

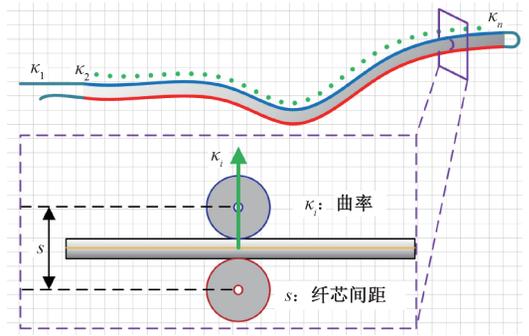


图 3 光纤布置结构示意图

Fig. 3 Schematic of measurement fiber setups

量误差是随测量长度逐渐累积的。末端形状重构误差可由式(7)计算:

$$v = \frac{\sqrt{(x_m, y_m) - (x_i, y_i)}}{L} \times 100\% \quad (7)$$

其中, $v$  为末端形状重构误差; $L$  为测量长度; $(x_m, y_m)$  为测量形状终点坐标, $(x_i, y_i)$  为待测形状终点真值坐标。

### 1.3 中值滤波原理

受限于相干衰落噪声以及互相关算法,OFDR 系统的解调过程中存在互相关伪峰。导致沿待测光纤分布的波长偏移解调结果出现鬼峰。由于 OFDR 中的相邻位置处的瑞利散射信号具有很强的关联性,导致参考瑞散射信号与测量瑞利散射信号互相关处理时的伪峰往往以孤点噪声的形式出现在波长偏移曲线中。中值滤波器作为一种非线性的信号处理方法,可以很好的抑制孤点噪声。同时,对于物体表面形变,其曲率梯度分布呈现连续可微特点。因此,选择中值滤波抑制瑞利散射波长偏移噪声,提升 OFDR 二维形状传感精度。由式(3)可知,曲率  $\kappa$  与波长偏移量之差  $\Delta\lambda$  线性相关,进而影响待测物体表面曲率分布。考虑到二维曲线重构中的积分过程,使得测量误差逐步累积,严重制约二维形状重构的精度。本文所述的形状重构精度提升方法基于中值滤波。利用中值滤波抑制瑞利散射偏移信号中的噪声,其原理可由式(8)描述:

$$\text{Median}(\lambda_i) = \begin{cases} \lambda_{m+1}, & n = 2m + 1 \\ \frac{1}{2}(\lambda_m + \lambda_{m+1}), & n = 2m \end{cases} \quad (8)$$

式中: $n$  为滤波窗宽, $\lambda$  为瑞利波长偏移信号。使用滑动窗对互相关解调结果进行截取,并对截取信号进行排序,取中位值代替窗内所有波长偏移。重复以上过程,直到滑动窗遍历整个瑞利波长偏移信号。最终结果可由式(9)表达:

$$R_i = \text{Median}(\lambda_{i-m}, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_{i+m}) \quad i \in Z \quad (9)$$

其中,  $R_i$  是经过中值滤波后的瑞利散射波长偏移信号。作为一种非线性滤波方法<sup>[17-19]</sup>, 经过去噪后的瑞利散射波长偏移信号中的边缘信息得以保留, 同时移除了较为离散的波长偏移, 削弱了由互相关伪峰和相干衰落带来的系统噪声, 进而实现系统二维形状测量精度的提升。

## 2 实验设计与结果分析

本节基于第 1 节所述理论搭建实验系统, 进行应变—波长偏移系数  $\delta$  标定以及二维形状传感精度提升实验验证。

### 2.1 应变—波长偏移系数标定

图 4 为 OFDR 二维形状传感实验系统示意图。扫频激光器 TLS 提供波长范围为 1 540~1 560 nm, 扫频速度  $\gamma = 20 \text{ nm/s}$  的连续扫频激光。扫频光通过分光比为 90 : 10 的耦合器 C1 分别进入主干涉臂和辅干涉臂。其中, 辅干涉臂包含两个分光比为 50 : 50 的耦合器 C5, C6, 延迟光纤以及光电探测器 PD3。利用辅干涉臂采集到的拍频信号可以抑制因扫频激光器非线性扫频造成的主干涉拍频信号中的频谱展宽<sup>[20]</sup>。

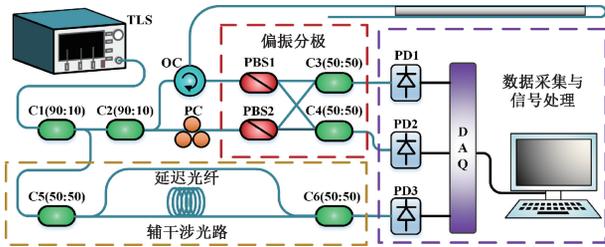


图 4 OFDR 二维形状传感实验系统配置

Fig. 4 OFDR 2D shape sensing experimental setups.

主干涉臂包含一个分光比为 90 : 10 的耦合器 C2、偏振控制器 PC、环形器 OC 和由偏振分束器 PBS1、PBS2、50 : 50 耦合器 C3、C4 以及两个光电探测器 PD1、PD2 组成的偏振分极接收光路。在主干涉光路中, 90% 扫频激光通过环形器 OC 进入负责传感的单模光纤中, 并激发传感光纤中各位置的瑞利后向散射。这些瑞利后向散射通过环形器 OC 进入偏振分极接收光路并与参考臂分束光一同进入 PD1、PD2 中生成拍频信号。最终, 主干涉和辅干涉中产生的拍频信号被数据采集卡 DAQ 采集并输入计算机完成数据处理。

为标定应变-波长偏移系数  $\delta$  以实现二维形状重构。将长为 5.55 m 单模光纤接入系统, 并在待测光纤 4.80~5.20 m 施加了从 0~1 000  $\mu\epsilon$  大小的应变, 应变增加间隔为 100  $\mu\epsilon$ 。采样时间设置为 1 s, 采样率为 1 MHz。距离域滑动汉宁窗宽设置为 200 点(50%的重叠, 传感空间

分辨率  $SR = 3.7 \text{ mm}$ ), 瑞利散射波长偏移  $\lambda$  及系数  $\delta$  标定结果如图 5 和 6 所示。

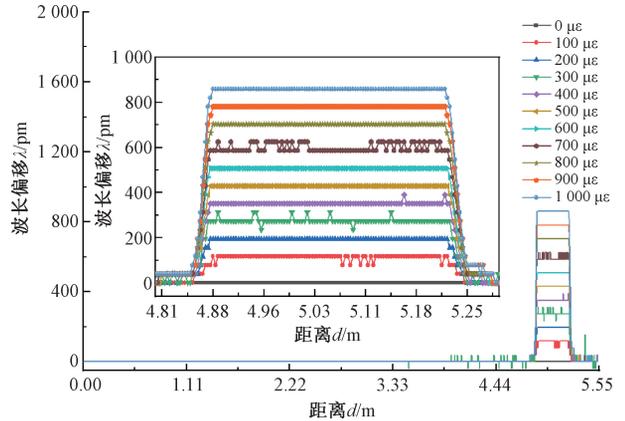


图 5 施加 0~1 000  $\mu\epsilon$  应变造成的波长偏移  $\lambda$

Fig. 5 The wavelength shift  $\lambda$  caused by the 0~1 000  $\mu\epsilon$  strain

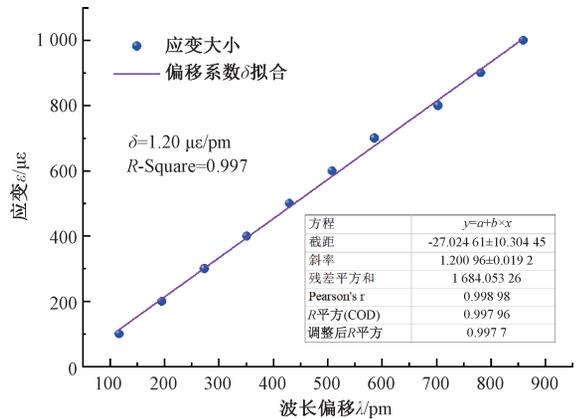


图 6 应变-波长偏移系数  $\delta$  标定

Fig. 6 Strain-wavelength migration coefficient  $\delta$  calibration

从图 5 中可以看出, 应变造成瑞利散射波长  $\lambda$  的偏移, 随着应变大小增加, 波长偏移量  $\lambda$  增大。作为对比, 无应变区波长偏移  $\lambda = 0$ 。然而在应变区中, 波长偏移曲线存在部分杂峰, 出现位置呈现随机状态。这将导致形状还原时的曲率  $\kappa$  跳变, 影响传感精度。为确定应变-波长偏移系数  $\delta$ , 对每组应变进行了 10 次测量, 取平均值进行拟合。如图 6 所示, 拟合结果表明, 系统接入的单模光纤应变-波长偏移系数  $\delta = 1.20 \mu\epsilon/\text{pm}$ ,  $R$ -square 为 0.997, 线性度良好。

### 2.2 二维形状传感精度提升实验

沿用 2.1 节中的参数设置, 为实现二维形状传感将已标定偏移系数的单模光纤紧密贴附于长为 50 cm, 宽为 2.1 cm 的匀质柔性钢片上下两侧表面, 并使用热熔胶固定。上下两侧光纤之间纤芯间距  $s = 0.13 \text{ mm}$ 。在实验台上嵌入螺钉将柔性钢条弯曲固定, 使用坐标纸记录柔性钢条弯曲形状各点坐标。

如图 7 所示,将贴附光纤的钢条进行了 3 种形状弯曲,并按照第 1 节所述步骤解调弯曲带来的波长偏移,并使用中值滤波(滤波窗宽  $n = 7$ )去除波长偏移曲线中的鬼峰。其结果如图 8 所示。

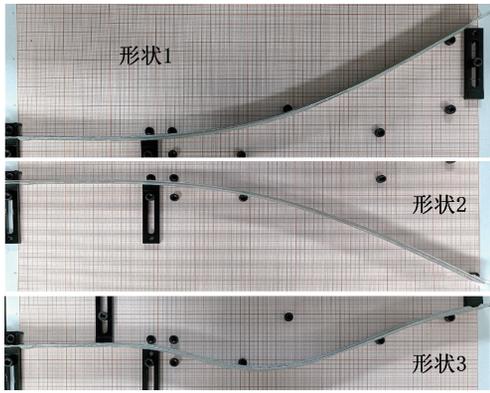
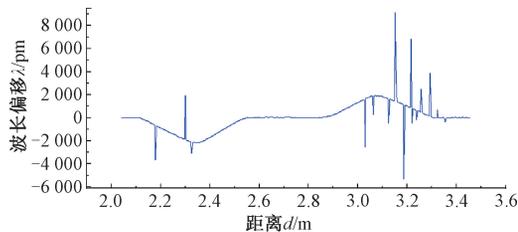


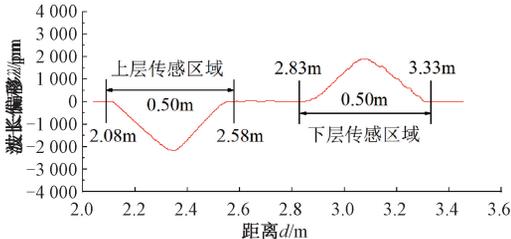
图 7 3 种预设二维形状

Fig. 7 Three preset 2d shapes



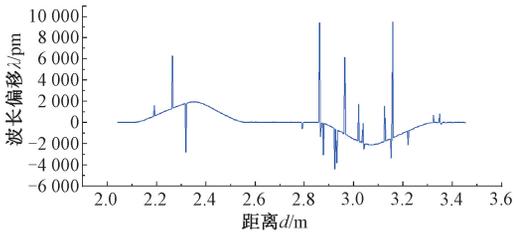
(a) 形状1滤波前

(a) RBS shifts of shape 1 without filtering



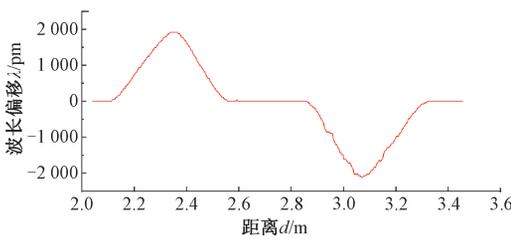
(b) 形状1滤波后

(b) RBS shifts of shape 1 with filtering



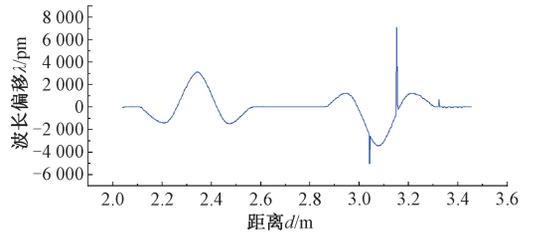
(c) 形状2滤波前

(c) RBS shifts of shape 2 without filtering



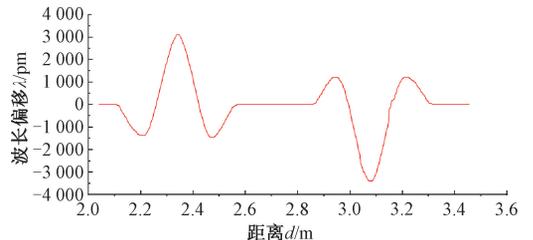
(d) 形状2滤波后

(d) RBS shifts of shape 2 with filtering



(e) 形状3滤波前

(e) RBS shifts of shape 3 without filtering



(f) 形状3滤波后

(f) RBS shifts of shape 3 with filtering

图 8 二维变形造成的瑞利散射波长偏移曲线及其中值滤波降噪结果

Fig. 8 RBS shift by 2D deformation and the noise reduction results of median filter

图 8(a) 所示为形状 1 造成的瑞利散射波长偏移,其中,2.08~2.58 m 对应贴附于待测物上表面弯曲造成的瑞利散射波长偏移,2.83~3.33 m 为待测物下表面弯曲造成的波长偏移。形状 1 中上表面受到压缩,下表面受到拉伸。故而,上下两侧光纤中瑞利散射波长偏移方向相反。光纤形变区域处出现较多杂峰,使用中值滤波进行去除,其结果如图 8(b) 所示。可以看出经过中值滤波,待测物体上下表面波长偏移杂峰基本消除,抑制了形状重构过程中的曲率跳变。图 8(c)、(d) 和图 8(e)、(f) 分别为形状 2、形状 3 造成的瑞利散射波长偏移及中值滤波结果。

在获取 3 种形状造成的瑞利散射波长偏移后,基于 2.1 节标定的应变-波长偏移系数进行形状重构,其结果如图 9 所示。实验结果表明,实现了二维形状的高精度还原。经过中值滤波后的形状更接近于预设理论形状。形状 1、2、3 基于中值滤波去噪的重构误差分别为 0.80%、0.66%、0.48%。而基于原始数据重构的形状误差分别为 3.08%、0.94%、0.82%。这表明利用中值滤波去除形状还原过程中的瑞利散射波长偏移鬼峰可以提升重构精度。

### 3 结 论

本文基于光频域反射技术,构建了二维形状传感系统,进行多组静态应变实验标定应变-波长偏移系数为

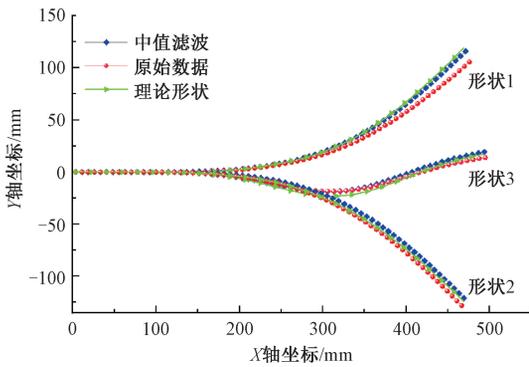


图 9 预设 3 种二维形状重构结果

Fig. 9 Preset three 2D shape reconstruction

1.  $20 \mu\text{ε}/\text{pm}$ 。针对瑞利散射波长偏移噪声,提出使用中值滤波方法进行抑制以提升形状还原精度,并通过 3 组二维形状传感实验验证了该方法的可行性与有效性。实验结果表明,该方法降低了二维形状传感误差,在 0.5 m 形状重构长度上,3 种形状重构末端误差分别从 3.08%、0.94%、0.82% 降低至 0.80%、0.66%、0.48%,实现了末端误差低于 1% 的高精度二维形状传感。

## 参考文献

- [ 1 ] DING Z Y, WANG C H, LIU K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review [ J ]. *Sensors*, 2018, 18(4):1072.
- [ 2 ] LIANG C S, BAI Q, YAN M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry [ J ]. *IEEE Access*, 2021, 9:41647-41668.
- [ 3 ] 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. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(8):20-30.
- [ 4 ] 谷行, 白清, 王清琳, 等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(1):25-31.
- GU H, BAI Q, WANG Q L, et al. Research on accuracy improvement of Brillouin optical time domain reflectometer temperature measurement based on window function optimization [ J ]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(1):25-31.
- [ 5 ] 邓理. 地铁跨海隧道火灾自动报警系统设计与可靠性仿真 [ J ]. *电子测量技术*, 2020, 43(1):157-161.
- DENG CH. Subway cross-sea tunnel fire automatic alarm

system design and fail-safe analysis [ J ]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(1):157-161.

- [ 6 ] 赵士元, 崔继文, 陈勳勳. 光纤形状传感技术综述 [ J ]. *光学精密工程*, 2020, 28(1):10-29.
- ZHAO SH Y, CUI J W, CHENG M M. Review on optical fiber shape sensing technology [ J ]. *Optical and Precision Engineering*, 2020, 28(1):10-29.
- [ 7 ] CHEN D, LIU Q W, HE Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR [ J ]. *Optical Express*, 2017, 25(7):8315-8325.
- [ 8 ] MENG Y J, FU C L, DU C, et al. Shape sensing using two outer cores of multicore fiber and optical frequency domain reflectometer [ J ]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2):6624-6630.
- [ 9 ] PARENT F, LORANGER S, MANDAL K K, et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers [ J ]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(4):2210-2221.
- [ 10 ] BEISENOVA A, ISSATAYEVA A, IORDACHITA I, et al. Distributed fiber optics 3D shape sensing by means of high scattering NP-doped fibers simultaneous spatial multiplexing [ J ]. *Optics Express*, 2019, 27(16):2074-2087.
- [ 11 ] ZHAO S Y, CUI J W, SUO L J, et al. Performance investigation of OFDR sensing system with a wide strain measurement range [ J ]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(16):3721-3727.
- [ 12 ] SHAO C, YIN G L, LV L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing [ J ]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8):1-4.
- [ 13 ] FENG W, WANG M F, JIA H L, et al. High precision phase-OFDR scheme based on fading noise suppression [ J ]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(3):900-908.
- [ 14 ] 尹国路, 徐州, 蒋锐, 等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术 [ J ]. *光学学报*, 2022, 42(1):1-20.
- YIN G L, XU ZH, JIANG R, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency domain reflectometer [ J ]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1):1-20.
- [ 15 ] 刘畅, 张丕状, 姚金杰, 等. 基于 FFT+FT 的 FMCW 雷达高精度测距算法研究 [ J ]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(10):65-69.
- LIU CH, ZHANG P ZH, YAO J J, et al. High precision ranging algorithm of FMCW radar based on FFT+FT [ J ]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019,

- 38(10): 65-69.
- [16] MOORE J P, ROGGE M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [17] 韩正新, 乔耀华, 李冰冰, 等. 基于中值滤波和改进提升小波的输电线路激光测距信号去噪方法 [J]. *电气自动化*, 2019, 41(2): 45-48.  
HAN ZH X, QIAO Y H, LI B B, et al. De-noising method for laser ranging signal on transmission lines based on median filtering and improved lifting wavelet [J]. *Power System & Automation*, 2019, 41(2): 45-48.
- [18] 朱玲嫵, 常建华, 李红旭, 等. 改进的激光雷达回波信号去噪方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(10): 1608-1613.  
ZHU L Y, CHANG J H, LI H X, et al. Improved de-noising method of lidar echo signal [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(10): 1608-1613.
- [19] 徐帆, 常建华, 刘秉刚, 等. 基于 VMD 的激光雷达回波信号去噪方法研究 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(11): 1443-1448.  
XU F, CHANG J H, LIU B G, et al. De-noising method research for lidar echo signal based on variational mode decomposition [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(11): 1443-1448.

- [20] FANG Z, LIANG C S, XU S W, et al. Spatial resolution enhancement of OFDR sensing system using phase-domain-interpolation resampling method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3202-3210.

### 作者简介



**张昆**, 2020 年于太原理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: zhangkun1119@link.tyut.edu.cn

**Zhang Kun** received his B. Sc. degree in 2020 from Taiyuan University of Technology.

Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



**靳宝全** (通信作者), 2010 年于太原理工大学获得机电工程专业博士学位, 现为太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向为传感器、光纤传感及工程应用。

E-mail: jinbaoquan@tyut.edu.cn

**Jin Baoquan** (Corresponding author) received the Ph. D. degree in mechatronic engineering from the Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, in 2010. Now he is a professor with the Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System. His main research interests include the areas of sensors, optical fiber sensing and engineering application.