

引用格式: LIU Zijuan, WU Jiaqi, ZHANG Lixin, et al. Shape Sensing Based on Brillouin Optical Time Domain Analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(4):0406002

刘紫娟, 武佳琪, 张立欣, 等. 基于布里渊散射光时域分析的形状传感研究[J]. 光子学报, 2024, 53(4):0406002

# 基于布里渊散射光时域分析的形状传感研究

刘紫娟<sup>1,2,3</sup>, 武佳琪<sup>1,2,3</sup>, 张立欣<sup>1,2,3</sup>, 李永倩<sup>1,2,3</sup>, 王健健<sup>1,2,3</sup>, 王宽<sup>1,2,3</sup>

(1 华北电力大学(保定) 电子与通信工程学院, 保定 071003)

(2 华北电力大学(保定) 电子与通信工程学院 河北省电力物联网技术重点实验室, 保定 071003)

(3 华北电力大学(保定) 电子与通信工程学院 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 保定 071003)

**摘要:** 搭建了基于布里渊散射光时域分析技术的应变测量系统, 采用七芯光纤作为分布式形状传感器, 通过测量七个纤芯在弯曲时的布里渊散射谱, 验证了七芯光纤偏芯之间每两个对称芯所受应变值相等且互为相反数的特点。对比七芯光纤中间芯与偏芯的布里渊增益谱, 测得偏芯在不同弯曲半径下的布里渊频移变化, 得到偏芯在每个位置受到的应变值。利用并行传输标架形状重构算法对七芯光纤在曲率直径为 0.112 m 和 0.052 m 时的形状进行了重构, 当曲率直径为 0.112 m 时, 曲率重构误差为 0.375%。

**关键词:** 形状传感; 布里渊散射光时域分析; 七芯光纤; 并行传输标架

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20245304.0406002

## 0 引言

光纤形状传感技术作为一种新兴传感技术, 由传统的弯曲测量发展进化而来, 近年来在各个领域都得到了广泛研究, 如医疗领域中的软体操作器, 航空航天领域飞机蒙皮的形变监测, 桥梁在线变形监测, 柔性机器人触手形状感测等。传统的形状传感器以电信号测量为主, 包括电阻率和应变传感器、光电传感器、微电子机械传感器等<sup>[1]</sup>。这些传感器虽成本低廉, 但其布线复杂性高, 受电磁干扰影响严重, 且高度依赖供电设备, 具有诸多的局限性。

光纤传感技术因其抗干扰能力强、测量距离长、传输可靠性和精度高、布线简单等优点<sup>[2-4]</sup>, 为形状传感技术提供了一个十分有前途的方向。目前被广泛研究的光纤形状传感器主要有基于光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的形状传感器和基于分布式光纤传感系统(Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS)的形状传感器。基于FBG的形状传感器原理是使用飞秒激光将FBG以一定间隔刻写在光纤上, 通过测量FBG的波长漂移量来确定光纤在该点处所受的应变。2013年, ROESTHUIS R J等<sup>[5]</sup>将三根刻写了FBG的单模光纤, 利用粘接剂将其固定在三个呈120°的凹槽中, 这三个凹槽开在医疗活检针周围, 最终实现了最大位置误差为0.74 mm的形状传感。在单模光纤上刻写FBG构成的形状传感器仍然存在误差较大的问题, 多芯光纤的出现给研究学者们提供了一个解决该问题的方向。2019年, BUTOV O V等<sup>[6]</sup>设计了一种基FBG的高弯曲灵敏度的大直径的四芯光纤形状传感器, 四芯呈90°角对称排列, 传感器直径为2.1 mm, 该传感器的弯曲灵敏度可以达到 $3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。2020年, AHMAD A O等<sup>[7]</sup>将刻有FBG的四芯光纤集成在柔性导管中, 制作成一种四芯形状传感器, 四芯分布为一个中间芯, 三个偏芯, 三个偏芯呈120°角排列, 最终实现了对柔性导管的形状传感与定位。基于FBG的形状传感技术具有精度高, 数据处理较为简单等优点, 但受光纤光栅数量和刻写距离的限制, 只适合较短距离的测量, 且难以实现严格意义上的分布式形状测量。

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 62205105, 62171185, 52177141), 中央高校基本科研业务费专项基金项目(No. 2022MS079)

第一作者: 刘紫娟, 1162193280@qq.com

通讯作者: 张立欣, zhanglxmail@126.com

收稿日期: 2023-10-07; 录用日期: 2023-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

DFOS 因为其优秀的抗电磁干扰、测量距离长、精度高、可靠性强等优点,一直以来都受到学者们的广泛关注和研究。基于 DFOS 的形状传感器目前主要使用多芯光纤进行测量。2007 年 DUNCAN R G 等<sup>[8]</sup>利用多芯光纤实现了基于光频域反射计(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)的形状传感,与基于 FBG 的准分布式应变测量技术相比,基于 OFDR 的应变传感技术有着更高的空间分辨率和较小的远端位置误差,验证了高空间分辨率的应变测量系统可以提高光纤形状传感技术的测量精度。2019 年,SHAO C 等<sup>[9]</sup>提出了一种局部频谱匹配方法,通过匹配测量光谱中最相似的部分来确定应变引起的波长偏移,该方法能有效地消除互相关的假峰和多峰现象,采用 OFDR 形状传感实验在传感光纤 1 m 的情况下,二维形状重建误差可低至 1 cm。基于 OFDR 的形状传感技术虽然精度高,但传感距离相对较短。2016 年,ZHAO Z Y 等<sup>[10]</sup>利用差分脉冲对-布里渊光时域分析(Differential pulse pair-Brillouin Optical Time Domain Analysis, DPP-BOTDA)系统对 1 km 的多芯光纤的中间芯和偏芯的弯曲特性进行了研究,其系统空间分辨率为 20 cm。实验结果表明,光纤在弯曲时,中间位置处的纤芯应变不受影响,同时,偏芯有着较高的弯曲敏感特性。2017 年<sup>[11]</sup>,该团队对七芯光纤的布里渊频移应变系数进行了测量,中间芯和偏芯的布里渊频移应变系数分别为  $(0.048\ 556\ 8 \pm 0.000\ 249\ 5)$  MHz/ $\mu\epsilon$  和  $(0.048\ 588\ 8 \pm 0.000\ 273\ 6)$  MHz/ $\mu\epsilon$ 。2018 年,DEXIN B 等<sup>[12]</sup>设计了基于 DPP-BOTDA 系统的高性能温度不敏感形状传感器,并对半径为 12.5 cm~30 cm 的多尺寸的半圆进行了形状实验及重构,其空间分辨率达到了 10 cm。

本文采用基于受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)的 BOTDA 传感系统,BOTDA 传感系统具有信号强度大、测量精度高、动态范围广等优点,在不同曲率直径下对七芯光纤的七个纤芯进行了弯曲测量。

## 1 原理

光纤形状传感技术本质上为分布式光纤应变测量的拓展应用,通过建立光纤应变与弯曲曲率和方向角的关系,将测得的光纤应变信息转化为光纤中心轴线的曲线参数,进而重构出光纤或与之紧密贴合的被测物体的形状。

### 1.1 布里渊光时域分析系统

由于光纤介质的不均匀性,光在光纤中传输的过程中会产生散射信号<sup>[13]</sup>,包括瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。布里渊散射根据光纤内部声波场的形成机理,可以分为自发布里渊散射(Spontaneous Brillouin Scattering, SPBS)和受激布里渊散射两种。SPBS 效应使得光纤中产生背向斯托克斯光和反斯托克斯光。当入射光功率超过光纤阈值时,向前传输的入射光与反向传输的斯托克斯光发生能量交换,背向斯托克斯光的能量增大,即发生了 SBS 效应。BOTDA 系统基于光纤的受激布里渊散射原理,其原理如图 1 所示。传

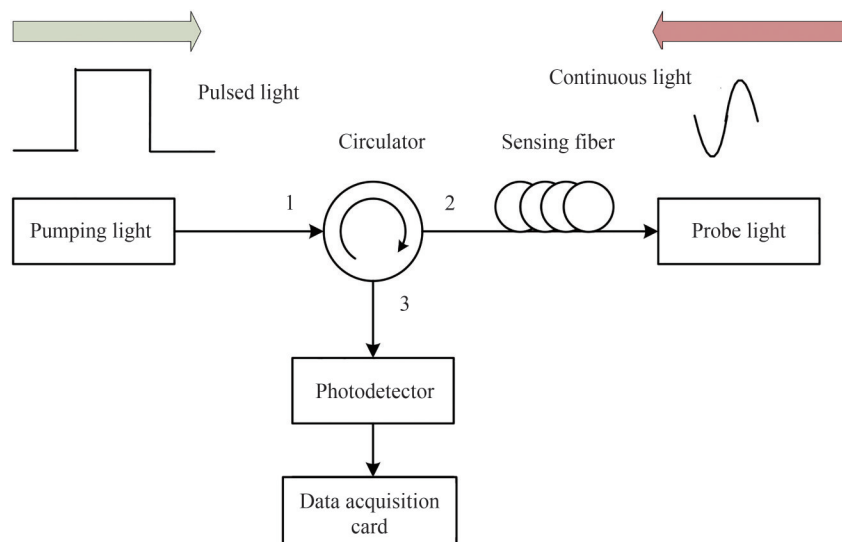


图1 基于受激布里渊散射的形状 BOTDA 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shaped BOTDA system based on stimulated Brillouin scattering

感光纤的两端分别入射脉冲光和连续光,脉冲光频率较高作为系统的泵浦光,连续光频率较低作为系统的探测光。当二者的频率差与光纤中的布里渊频移相等时,泵浦光与探测光之间发生SBS效应,对背向斯托克斯散射光进行数据处理,即可以得到整条光纤的布里渊增益谱。

本文采用多芯光纤<sup>[14]</sup>(Multi-Core Fiber, MCF)为传输介质,则分布式形状传感器的简化理论模型如图2所示<sup>[15]</sup>, $R$ 为光纤的弯曲半径, $L$ 是传感器的初始长度, $d$ 为纤芯和传感器中性轴的距离, $\Delta L$ 为纤芯被拉伸/压缩的长度。

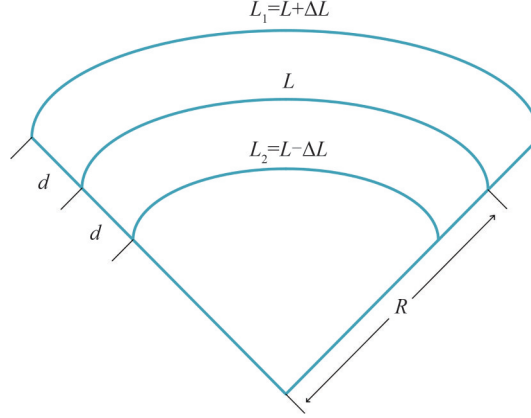


图2 分布式形状传感器简化理论模型

Fig. 2 Simplified theoretical model of distributed shape sensor

设 $L_1$ 和 $L_2$ 侧所受应力为 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ ,则两侧应力变化量有关系式

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{d}{R} = -\Delta\epsilon_2 \quad (1)$$

以基于布里渊散射信号的系统为例,其布里渊频移(Brillouin Frequency Shift, BFS)受温度和应变两种变量的影响,其中温度系数为 $C_T$ ,应变系数为 $C_\epsilon$ ,则其变化量可以表示为<sup>[16]</sup>

$$\Delta\nu_B = C_T\Delta T + C_\epsilon\Delta\epsilon \quad (2)$$

假设多芯光纤在同一位置上所受温度相同,则选用多芯光纤中任意两个芯的布里渊频移量相减,可以消除温度对BFS的影响,得到式(3)。

$$\begin{aligned} \Delta\nu_{B2} - \Delta\nu_{B1} &= C_T\Delta T_2 + C_\epsilon\Delta\epsilon_2 - (C_T\Delta T_1 + C_\epsilon\Delta\epsilon_1) = C_T(\Delta T_2 - \Delta T_1) + \\ C_\epsilon(\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_1) &= -C_\epsilon\frac{2d}{R} = -2C_\epsilon\kappa \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $C_\kappa = C_\epsilon d$ 为光纤的曲率系数, $\kappa = 1/R$ 为光纤的曲率。

## 1.2 光纤形状传感原理

光纤形状传感的主要思想是利用由多根单模光纤以固定的排列方式组合在一起制成的光纤簇型的形状传感器或者利用多芯光纤对与它接触的被测物体的应变信息进行测量<sup>[5]</sup>,再通过形状重构算法对测得的应变信息进行求解,通过重构出光纤形状传感器的中心轴线的二维或三维曲线,来反映被测对象的真实形状,同时对其形变状态做健康监测。

弗莱纳方程是最常用三维形状重构算法,但是当曲线出现拐点时,很难在曲线上定义唯一的连续弗莱纳方程,导致重构的形状精度很低,本文采用三维的并行传输标架。由沿着曲线每个点处的一个切向量 $T(s)$ 、一个法向量 $N_1(s)$ 和另一曲率分量 $N_2(s)$ 组成。 $T(s)$ 、 $N_1(s)$ 和 $N_2(s)$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} T'(s) \\ N_1'(s) \\ N_2'(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa_1(s) & \kappa_2(s) \\ -\kappa_1(s) & 0 & 0 \\ -\kappa_2(s) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T(s) \\ N_1(s) \\ N_2(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $T'(s)$ 的方向为曲线的弯曲方向。则曲率 $\kappa(s)$ 被定义为

$$\kappa(s) = |T'(s)| \quad (5)$$

根据式(4)和(5)可以得到

$$\kappa(s) = \sqrt{(\kappa_1(s))^2 + (\kappa_2(s))^2} \quad (6)$$

式中,  $\kappa_1(s)$  和  $\kappa_2(s)$  为  $\kappa(s)$  分别在  $N_1(s)$  和  $N_2(s)$  方向上的两个曲率分量, 对  $\kappa_x$  和  $\kappa_y$  进行插值拟合即可得到。

弯曲方向  $T'(s)$  和切向量  $N_1(s)$  的夹角  $\theta(s)$  表示为

$$\theta(s) = \arctan\left(\frac{\kappa_1(s)}{\kappa_2(s)}\right) \quad (7)$$

曲线  $r(s)$  就可以由式(8)求解还原

$$r(s) = \int T(s) ds + r(0) \quad (8)$$

式中,  $r(0)$  为曲线的起点位置, 一般设置为  $r(0) = (0, 0, 0)$ 。

## 2 实验系统

搭建了基于 BOTDA 的形状传感系统, 如图 3 所示。

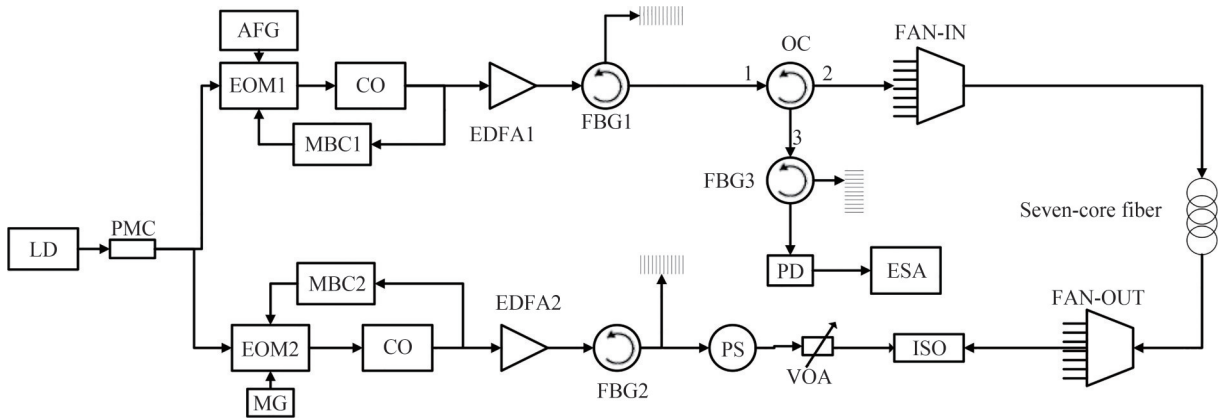


图3 BOTDA 形状测量系统

Fig. 3 BOTDA shape measurement system diagram

系统中光源为谱宽 10.3 KHz 的窄带激光器 (Laser Diode, LD), 其输出中心波长为 1 550.058 nm、光功率为 11.0 mW。分光比为 50:50 的保偏耦合器 (Polarization-Maintaining Coupler, PMC) 将 LD 输出光分为上下两路, 上支路作为泵浦光, 下支路作为探测光, 一般采用脉冲光作为泵浦光, 连续光作为探测光。上支路进入经任意波形函数发生器 (Arbitrary Function Generators, AFG) 调制的电光调制器 1 (Electro-Optical Modulator, EOM1) 进行脉冲调制生成周期为 4  $\mu$ s, 脉宽为 10 ns 的脉冲光, 其中, EOM1 被偏压控制器 1 (Modulator Bias Controller, MBC1) 锁定在谷点。脉冲光之后经掺铒光纤放大器 1 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA1) 进行信号强度放大, 接着再进入光栅滤波器 1 (FBG1) 滤除自发辐射噪声 (Amplified Spontaneous Emission, ASE)。脉冲光从 1 端口进入环形器, 从 2 端口通过扇入扇出装置进入光纤中。下支路使用微波信号源 (Microwave Generator, MG) 作为 EOM2 的驱动, 生成抑制载波的双边带信号, 其中, EOM2 被 MBC2 锁定在谷点, 连续光由 EDFA2 放大, 放大后的信号经过 FBG2 滤除 ASE 噪声和反斯托克斯光后进入扰偏器 (Polarization Scrambler, PS), PS 对其扰偏后经过可调衰减器进行调节后, 由隔离器 (Isolator, ISO) 通过扇入扇出装置进入传感光纤, 与上支路的泵浦光相互作用。散射光从 2 端口进入环形器, 然后从 3 端口进入 FBG3 滤除探测光的基频光和反斯托克斯光, 下边带经过光电探测器 (Photodetector, PD) 进行光电转换后进入频谱分析仪 (Electric Spectrum Analyzer, ESA), 选择 “zero span” 对时域信号采集。

选取同质型低串扰多芯光纤作为形状传感器, 其内部结构如图 4 所示, 光纤长度为 300 m, 纤芯直径为 8  $\mu$ m, 包层直径为 150  $\mu$ m, 保护层直径为 245  $\mu$ m, 一根纤芯位于传感器结构的中心轴位置, 其余六个纤芯位于距中间芯 41.5  $\mu$ m 的位置, 并互相呈 60° 对称分布在中间芯周围, 同时利用扇入扇出耦合器将多芯光纤的七个尾纤进行标记并分离, 节约实验时间。



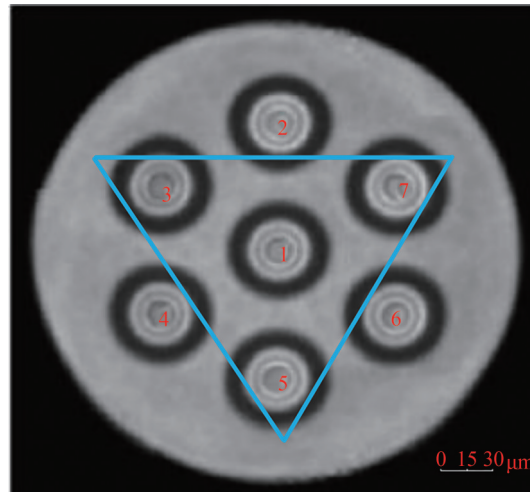


图4 七芯光纤内部结构示意图

Fig. 4 Internal structure diagram of seven-core optical fiber

### 3 形状还原及结果分析

#### 3.1 多芯光纤纤芯弯曲特性

首先选取传感光纤后端 294 m~300 m 位置处,长度为 6 m 的多芯光纤进行形状传感实验,将选取的多芯光纤 0~3 m 处拉直,3~5 m 处分别缠绕在直径为 0.112 m 和 0.052 m 的圆柱体上,5~6 m 处的光纤段同样拉直。利用多芯光纤的扇入扇出装置分别采集七个纤芯的数据,在室温且未施加应变的情况下,纤芯的布里渊频移在 10.68 GHz 左右。偏芯(纤芯 7)和轴心纤芯(纤芯 1)的三维布里渊增益谱如图 5 所示。图 5(a)为轴心纤芯的弯曲段的三维布里渊增益谱,可以看出多芯光纤的中心轴不受弯曲影响,布里渊频移没有较大变化;图 5(b)为弯曲段偏芯的三维布里渊增益谱,在多芯光纤的弯曲过程中,偏芯的布里渊频移在传感距离 290~300 m 处有明显变化,为了更直观的观察多芯光纤偏芯的弯曲特性,截取传感距离为 290~300 m 位置处,偏芯的三维布里渊增益谱如图 6 所示,可以看出布里渊频移变化较大的位置刚好处于多芯光纤弯曲段 3~5 m 处。由此可见,多芯光纤的偏芯对弯曲较为敏感,中间芯几乎不受应变影响,可以利用中间芯避免环境温度变化和轴向应变对偏芯布里渊频移的影响,为后续利用多芯光纤进行形状重构提供支撑。

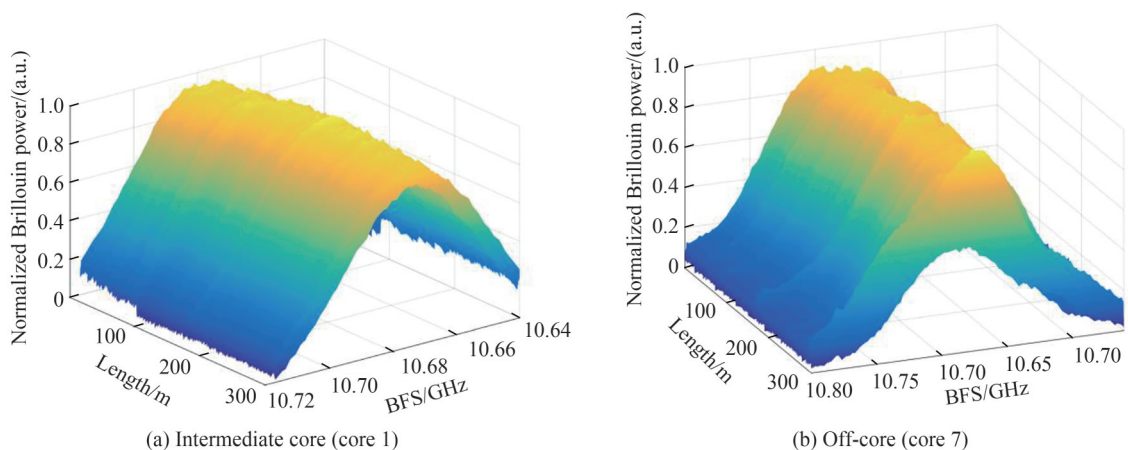


图5 多芯光纤弯曲时的布里渊增益谱

Fig. 5 Brillouin gain spectrum of multi-core fiber during bending

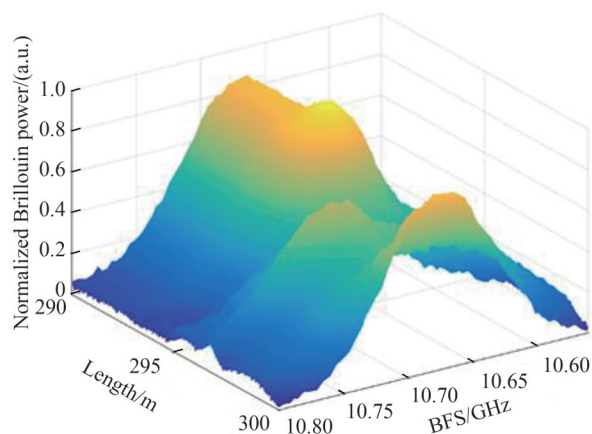


图6 多芯光纤290~300 m弯曲段的布里渊增益谱

Fig. 6 Brillouin gain spectrum in 290~300 m bending section of multi-core fiber

### 3.2 数据处理及形状还原

实验中多芯光纤七个纤芯的相对位置如图4所示,搭建基于BOTDA的应变测量系统对多芯光纤缠绕在圆柱体上的七个纤芯的布里渊频移进行采集,圆柱体的直径为0.112 m。图7为整个传感光纤段七个纤芯的布里渊频移,其中,0~3 m和5~6 m的布里渊频移接近平稳变化,对应拉直的光纤段;3~5 m处的布里渊频移有了明显的改变,对应弯曲段的传感光纤,数据处理过程中截取弯曲段的数据作为形状传感实验的有效数据,同时利用中间芯对偏芯布里渊频移进行去基准,将各个偏芯的布里渊频移减去中间芯的布里渊频移,这样可以排除光纤弯曲时的轴向应变和实验室温度变化对实验数据的影响,得到六个偏芯的布里渊频移变化量如图8所示。想要实现弯曲段的光纤形状重构,只需要三个互相呈120°的对称纤芯即可,故本文选取图7中的纤芯3、纤芯5和纤芯7对多芯光纤形状进行重构。

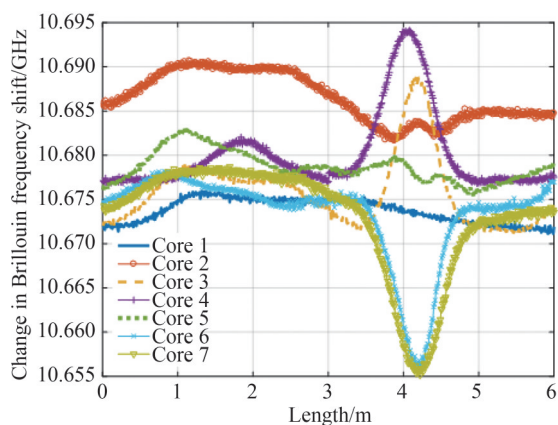


图7 传感光纤段布里渊频移

Fig. 7 Brillouin frequency shift in sensing fiber segment

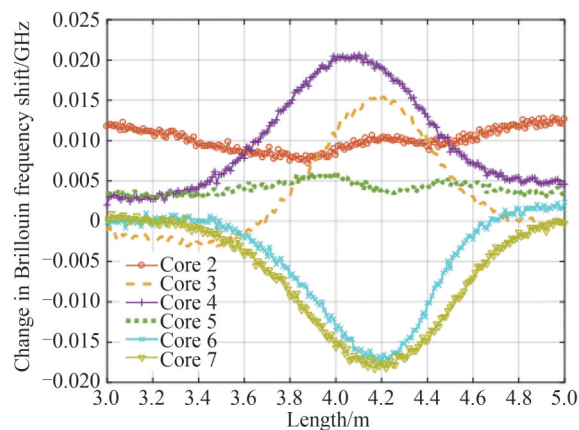


图8 各个偏芯的布里渊频移变化量

Fig. 8 Change in Brillouin frequency shift for each off-core

将纤芯3、纤芯5、纤芯7的布里渊频移变化量代入公式,选取赵志勇等<sup>[11]</sup>在2017年测得的数据0.048 6 MHz/ $\mu\epsilon$ 作为布里渊频移应变系数,得到纤芯3、纤芯5、纤芯7的应变曲线如图9所示,从图9可以看出,纤芯3受到了拉伸应变,纤芯7与纤芯3对称受到的是压缩应变,由于纤芯5几乎位于中性轴的位置,其应变值变化比较平稳。

将求解得到的三个纤芯的应变值代入并行传输标架中对传感光纤弯曲段的曲率分量 $\kappa_1$ 和 $\kappa_2$ 进行求解,将 $\kappa_1$ 和 $\kappa_2$ 代入式(6)得到光纤弯曲段的曲率 $\kappa$ ,如图10所示,图中曲率最大的位置曲率值为 $17.7879\text{ m}^{-1}$ ,即弯曲半径为0.056 21 m,实际实验中圆柱体半径为0.056 m,求解得到的弯曲半径与实际接近,二者误差为0.375%。

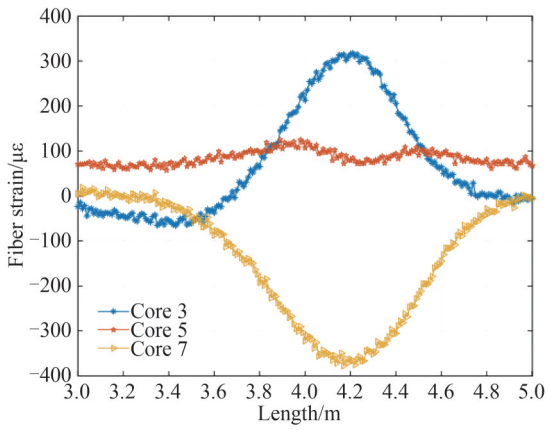


图9 纤芯3、5、7的应变曲线  
Fig. 9 Strain curves for core 3, 5, 7

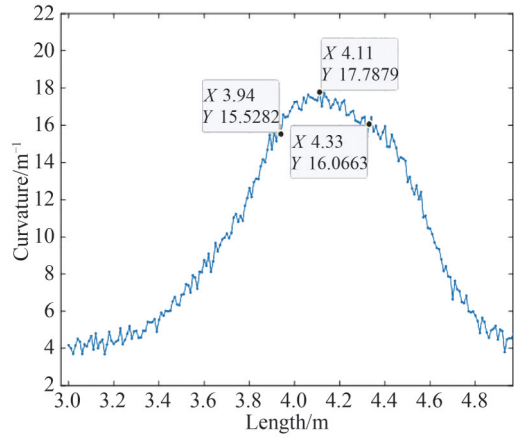


图10 多芯光纤弯曲段的曲率  $\kappa$   
Fig. 10 Curvature  $\kappa$  of the bending section of multi-core fiber

考虑本次搭建的应变测量系统的空间分辨率为1 m,故缠绕在圆柱体上的长度为2 m的传感光纤仅在曲率最接近真实曲率  $17.8 \text{ m}^{-1}$  的光纤段的应变数据为有效数据,因此,本次重构实验仅对弯曲段光纤一个圆周的二维平面的形状进行重构,选取3.94~4.33 m处纤芯3、纤芯5和纤芯7的应变数据,利用并行传输标架进行多芯光纤的形状重构,重构结果如图11(a)所示。实验中圆柱体缠绕一周的周长为0.352 m,图11(a)中圆周的周长为0.39 m,直径为0.112 m,重构出的圆周形状与实验中缠绕的光纤形状接近。

利用同样的方法,对缠绕在直径为0.052 m的圆柱体上的多芯光纤二维形状进行重构,如图11(b)所示。实验中光纤缠绕一周的周长为0.163 m,重构圆周的直径为0.050 077 m,接近实验中的圆柱体直径,圆周曲线不平滑是由于采样点数较少,随着弯曲半径的减小,想要得到较高的重构精度,就需要更多的采样点数。

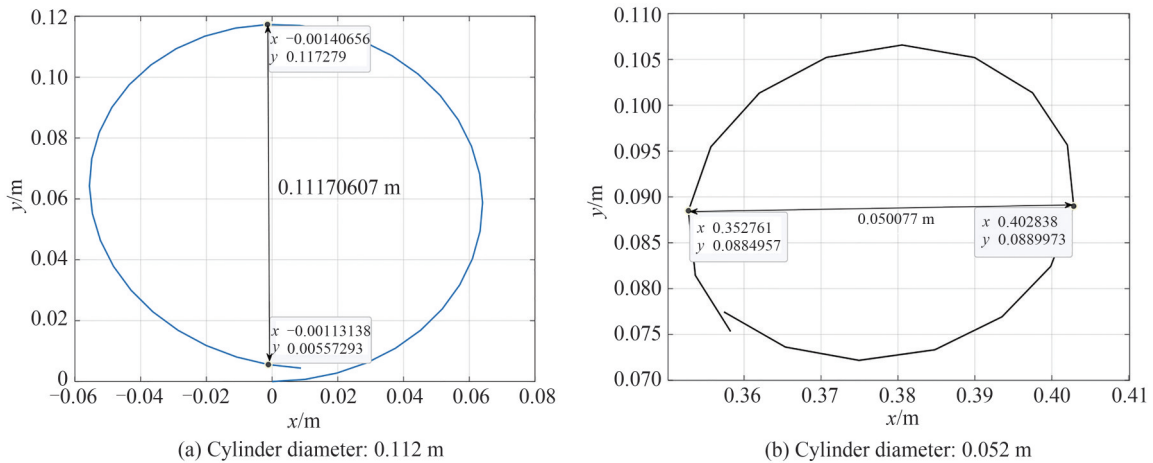


图11 弯曲段一个圆周重构形状  
Fig. 11 The bending section reconstructs the shape of a circle

## 4 结论

本文搭建了BOTDA系统,选取了长飞公司的同质型低串扰七芯光纤作为分布式形状传感器,光纤总长度为300 m,纤芯直径为  $8 \mu\text{m}$ ,包层直径为  $150 \mu\text{m}$ ,保护层直径为  $245 \mu\text{m}$ ,一根纤芯位于传感器的中心轴位置,其余六个纤芯位于距中间芯  $41.5 \mu\text{m}$  的位置,并互相呈  $60^\circ$  对称分布在中间芯周围,同时利用扇入扇出耦合器件将多芯光纤的七个尾纤进行标记并分离。搭建BOTDA系统,测量中间芯和偏芯的布里渊增益谱,验证了中间芯不受弯曲影响,且每两个对称的偏芯所受应变值互为相反数。选取互不对称,相互呈  $120^\circ$  分布的三个偏芯和中间芯,中间芯作为温度补偿,解调出在不同曲率半径时各个纤芯所受的应变值。利用并行传输标架形状重构算法对七芯光纤在曲率直径为0.112 m和0.052 m时的形状进行了重构,在曲率直径

为0.112 m时,曲率重构误差为0.375%。从实验结果可以看出,重构结果存在较大误差,主要原因有:1)分布式应变测量系统的空间分辨率较低,本实验搭建的基于BOTDA系统的空间分辨率为1 m,无法对整个传感光纤弯曲段所受的应变值进行准确测量;2)本次实验中传感光纤的长度为0~6 m,弯曲段长度为3~5 m,这就导致弯曲段缠绕在直径为0.112 m和0.052 m的圆柱体上时,需要缠绕多个圆周,会给传感光纤带来无法避免的扭转,导致重构形状存在较大误差;3)形状重构算法在求解过程中,采用四阶尤格库塔对光纤每个采样点位置的切向量和坐标值进行逐点迭代,每个位置的误差会随着光纤长度的增加,逐渐累积,造成较大误差。

#### 参考文献

- [1] MOE A, AMINOSSADATI S M, KIZIL M S, et al. Recent developments in fibre optic shape sensing[J]. *Measurement*, 2018, 128: 119-137.
- [2] LI Y Q, LI X J, FAN H B, et al. SNR improvement in self-heterodyne detection Brillouin optical time domain reflectometer using Golay pulse codes[J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(6): 414-418.
- [3] LI Y Q, ZHANG L X, FAN H B, et al. A performance enhanced Rayleigh Brillouin optical time domain analysis sensing system[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(2): 84-87.
- [4] LI X J, LI Y Q, ZENG W X, et al. Performance improvement of a self-heterodyne detection BOTDR system employing broad-band laser[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, 14(5): 325-330.
- [5] ROESTHUIS R J, KEMP M, DOBBELSTEEN J J, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1115-1126.
- [6] BUTOV O V, BAZAKUTSA A P, CHAMOROVSKIY Y K, et al. All-fiber highly sensitive Bragg grating bend sensor [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4228.
- [7] AHMAD A O, OURAK M, ROOSBROECK J V, et al. Improved FBG-based shape sensing methods for vascular catheterization treatment[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(3): 4687-4694.
- [8] DUNCAN R G, FROGGATT M E, KREGER S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[C]. *SPIE*, 2007, 6530: 65301S.
- [9] SHAO C, YIN G, LV L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8): 082010-082010.
- [10] ZHAO Z Y, SOTO M A, TANG M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [11] ZHAO Z Y, DANG Y L, TANG M, et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multicore fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 171-174.
- [12] DEXIN B, CHEN C, CHENG F, et al. A high-performance and temperature-insensitive shape sensor based on DPP-BOTDA [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-10.
- [13] ZHAGN Lixin, LI Yongqian, AN Qi, et al. Temperature sensing technology based on Rayleigh Brillouin optical time domain analysis with pulse coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 68-75.  
张立欣, 李永倩, 安琪, 等. 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 68-75.
- [14] WRAGE M, GLAS P, FISCHER D, et al. Phase-locking of a multicore fiber laser by wave propagation through an annular waveguide[J]. *Optics Communications*, 2002, 205(4-6): 367-375.
- [15] VAHESAN S. Design and fabrication of an optical fiber interrogation instrumentation system [D]. Ottawa, Canada: University of Ottawa, 2007: 33-54.
- [16] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(12): 8601-8639.

## Shape Sensing Based on Brillouin Optical Time Domain Analysis

LIU Zijuan<sup>1,2,3</sup>, WU Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lixin<sup>1,2,3</sup>, LI Yongqian<sup>1,2,3</sup>, WANG Jianjian<sup>1,2,3</sup>, WANG Kuan<sup>1,2,3</sup>

(1 College of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

(2 Hebei Key Laboratory of Electric Power IoT Technology, College of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

(3 Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, College of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

**Abstract:** In recent years, optical fiber shape sensing technology has been widely studied in various fields,



and has been widely used in robot, medical, aerospace, industrial equipment structure monitoring and submarine cables. With the change of application scenarios and the gradual improvement of measurement performance requirements, the research needs of optical fiber shape sensing technology are becoming increasingly urgent. At present, the research on fiber shape sensing is mainly divided into two directions. One is the shape sensing technology based on FBG, which takes advantage of the wavelength drift of FBG under strain and realizes shape measurement by writing FBG on multi-core fiber, which has the advantages of high precision and simple data processing. In this direction, some scholars have done more in-depth research, but this technology is limited by the number and interval of FBG writing, and cannot achieve long-distance distributed shape measurement. The other direction is the shape sensing based on the distributed optical fiber measurement system. As a medium of shape sensing technology, optical fiber is small in size, light in weight, and has strong electromagnetic interference resistance and corrosion resistance. It can be either a transmission medium or a sensing medium. When the light wave is transmitted in the optical fiber, the optical intensity, phase, frequency and other parameters of the optical fiber will change with the change of environmental parameters such as strain and temperature. The data processing equipment is used to demodulate the modulated light, and then the information of strain and temperature of the optical fiber is obtained. In this paper, the Brillouin scattering in the fiber is used to reconstruct the shape of the fiber or the measured object in contact with it, and the strain change values of more than two fiber cores in the shape sensor are measured at the same time. Then the shape reconstruction algorithm is used to reconstruct the shape of the sensor or the measured object. In this paper, the BOTDA system is built with a spatial resolution of 1 m. A homogenous low-crosstalk seven-core fiber from Changfei Company is selected as the distributed shape sensor. The total length of the fiber is 300 m, the core diameter is 8  $\mu\text{m}$ , the cladding diameter is 150  $\mu\text{m}$ , and the protective layer diameter is 245  $\mu\text{m}$ . The remaining six cores are located at a distance of 42  $\mu\text{m}$  from the middle core and are symmetrically distributed around each other at 60°. At the same time, the seven pigtailed of the multi-core fiber are labeled and separated by a fan-in fan-out coupler. By using the BOTDA system, the Brillouin gain spectra of the intermediate core and the off-core are measured, and it is verified that the intermediate core is not affected by bending, and the strain values of each two symmetric off-core are negative to each other. Three unsymmetrical cores with 120° distribution were selected, and the intermediate cores were used as temperature compensation to demodulate the induced variables of each core at different curvature radii. Finally, parallel transmission frame shape reconstruction algorithm is used to reconstruct the shape of seven-core fiber when the curvature diameter is 0.112 m and 0.052 m. When the curvature diameter is 0.112 m, the curvature reconstruction error is 0.375%, which is mainly due to the low spatial resolution of the construction system and the torsion problem in the winding process. Distributed fiber shape sensing technology has a very large application prospect, but there are still many technical difficulties that need to be overcome by researchers. The work in this paper has laid the research foundation for the subsequent distributed fiber shape sensing, and has certain practical significance.

**Key words:** Shape sensing technology; Optical time domain analysis of Brillouin scattering; Seven-core fiber; Parallel transmission standard frame

**OCIS Codes:** 060.2330; 060.2370; 290.3200; 290.5830