材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250914001

光纤弯曲衰减对BOTDR中布里渊频移误差的影响

赵丽娟[1,2,3]，韩自强[1]，杨曜齐[1]，陈永辉[1]，徐志钮[1*]，李岗[3]

（1. 华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003；2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室，河北 保定 071003；3. 北京博瑞翔伦科技发展有限公司，北京 100176）

摘　要： 为探究光纤弯曲衰减对布里渊光时域反射（BOTDR）系统测量准确性的影响，尤其是对布里渊频移误差的作用，文章基于Marcuse弯曲损耗理论，理论分析了弯曲半径和弯曲长度对布里渊背向散射光功率衰减程度的影响规律，并通过实验验证了理论模型的准确性。进一步，结合实验数据建立了布里渊功率衰减程度与布里渊谱信噪比之间的关系。在此基础上，提出一种研究光纤弯曲对BOTDR中布里渊频移测量误差影响的方法，并在不同弯曲半径和弯曲长度下通过实验验证了该方法的可靠性。利用所提方法获得不同弯曲半径和弯曲长度下的布里渊谱信噪比，数值生成了大量含噪布里渊谱，计算得到相应的布里渊频移误差，系统揭示了弯曲半径和弯曲长度对布里渊频移误差的影响规律。结果表明：随着弯曲半径减小或弯曲长度增大，布里渊频移误差均呈现类指数函数的增长趋势。该研究为BOTDR系统在复杂弯曲环境下的性能优化与可靠性提升提供了理论参考。

关键词： 光纤弯曲；弯曲损耗；布里渊光时域反射；布里渊频移误差

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0507－07

Impact of Fiber Bending Attenuation on the Brillouin Frequency Shift Error of BOTDR

ZHAO Lijuan[1,2,3], HAN Ziqiang[1], YANG Yaoqi[1], CHEN Yonghui[1], XU Zhiniu[1], LI Gang[3]

（1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 3. Beijing Boruixianglun Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100176, CHN）

Abstract: To investigate the impact of attenuation caused by fiber bending on the measurement accuracy of Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) systems, first, based on Marcuse′s bending loss theory, the influence of bending radius and bending length on the attenuation level of Brillouin spectrum power was investigated and validated with experimental data. Subsequently, the relationship between Brillouin power attenuation and Brillouin spectrum signal-to-noise ratio was obtained from experimental data. Based on this, a method for studying the impact of fiber bending on BOTDR measurement errors was established. The reliability of the proposed method was validated by conducting experiments with various bending radii and bending lengths. Using this method, the signal-to-noise ratio of the Brillouin spectrum was obtained for different bending radii and bending lengths. A large number of numerically generated noisy Brillouin spectra were used, and the corresponding Brillouin frequency shift error was calculated. Finally, the influence of fiber bending radius and bending length on the Brillouin frequency shift errors was investigated. The results reveal

收稿日期：2025－09－14.

基金项目：国家自然科学基金项目（62171185, 62273146）；河北省省级科技计划资助项目（SZX2020034）.

* **通信作者：**徐志钮

that the Brillouin frequency shift error nearly exponentially increases with increasing fiber bending length or decreasing fiber bending radius.

Key words: fiber bending; bending loss; Brillouin optical time domain reflectometry; Brillouin frequency shift error

0 引言

自20世纪70年代以来,分布式光纤传感技术得到快速发展。该技术能代替多个点式传感器,实现光纤沿线温度、应变、振动等多个物理量的分布式测量[1-4],从而显著提升数据监测的测量精度。其中,布里渊光时域反射计(BOTDR)系统是一种典型的分布式光纤传感系统,该系统通过采集和解调光纤中的背向布里渊散射信号来感应光纤沿线各点的应变和温度[5-8],可应用于诸如风机叶片振动监测、大型建筑结构安全监测等多个领域[9-12]。

除材料吸收、散射等因素引起的光纤损耗外,由光纤弯曲引起的损耗也会影响传输光信号的质量[13]。其中,弯曲损耗分为微弯损耗和宏弯损耗两大类:微弯损耗指光纤受到温度等外界因素影响后,光纤结构发生微小变化,产生随机的小幅(波长级)偏离所引起的微小损耗[14];宏弯损耗指光纤弯曲半径远大于光纤直径(毫米级)时产生的损耗,此时传导模被转化成辐射模,进而产生损耗[15]。

对于光纤弯曲损耗研究,最早可追溯到1969年Marcatili提出的弯曲光波导进行模式分析理论[16]。1975年,德国Marcuse最先提出光纤弯曲损耗理论[17],为光纤弯曲特性的研究奠定了坚实的理论基础。1993年,美国Bell实验室以夫琅禾费衍射理论为出发点,对光纤宏弯损耗理论进行了深入的研究和分析[18]。国内以游善红为主的科研团队围绕光纤传输系统中广泛运用的1 310 nm及1 550 nm工作波长,进行了宏弯损耗随弯曲半径变化的测量实验[19]。随后薛梦驰等指出耦合致微弯及纯弯曲致弯是影响微弯损耗的重要因素[20]。随着光纤弯曲损耗研究的不断深入,科研人员开展了其对温度、应变等传感性能影响的研究[21-24],但是鲜有针对弯曲损耗对BOTDR测量准确性影响的研究。在BOTDR测量中,宏弯损耗是影响精度的一个关键问题,它会导致布里渊谱信噪比下降、误差增大,进而可能会严重误导测量结果。

考虑到BOTDR测量误差与布里渊频移误差存在线性关系,本文聚焦于弯曲损耗对布里渊频移误差的影响。通过构建光纤弯曲衰减与布里渊背向散射功率之间的关联,利用实测得到不同布里渊背向散射光功率下的信噪比变化数据,深入探究光纤在不同弯曲条件下引起的损耗对布里渊频移误差的影响。研究结果可为BOTDR系统在复杂环境下的性能优化以及可靠性的提升提供参考。

1 光纤弯曲对布里渊散射光功率的影响

1.1 理论分析

依据Marcuse的纤芯-无限包层理论[17],光纤弯曲半径为R时,弯曲损耗系数和相关参数为:

$$2\alpha_c=\frac{\sqrt{\pi}\,U^2}{e_v W^{3/2}\sqrt{a_0R}\,V^2K_{v-1}(W)K_{v+1}(W)}\mathrm{e}^{-\frac{2}{3}\frac{W^3}{a_0^2\beta^2}\frac{R}{a_0}} \tag{1}$$

$$V=ka_0\sqrt{n_1^2-n_2^2} \tag{2}$$

$$U=a_0\sqrt{k^2n_1^2-\beta^2} \tag{3}$$

$$W=a_0\sqrt{\beta^2-k^2n_2^2} \tag{4}$$

式中,$2\alpha_c$,V,U,W分别为弯曲损耗系数、归一化频率、径向归一化相位常数、径向归一化衰减常数,β为传播常数,a_0为纤芯半径,n_1为纤芯折射率,n_2为包层折射率,k为自由空间中的波数,λ为入射波长,K_v为v阶修正贝塞尔函数。其中公式(1)对任意LP_{mn}模都成立,由于单模光纤只传播LP_{01}模,此时e_v=2。因此,对于单模光纤公式(1)可简化为:

$$2\alpha_c=\frac{\sqrt{\pi}\,U^2}{2W^{3/2}\sqrt{a_0R}\,V^2K_{-1}(W)K_1(W)}\mathrm{e}^{-\frac{2}{3}\frac{W^3}{a^2\beta^2}\frac{R}{a_0}} \tag{5}$$

式中,$2\alpha_c$为单位长度下弯曲产生的波导功率损耗系数。因此,可以得到当弯曲长度为l时,传输光信号衰减前后的功率变化如公式(6)所示:

$$P_o/P_i=\exp(-2\alpha_c l) \tag{6}$$

式中,P_i为输入光功率,P_o为弯曲衰减后的光功率。

光纤中的布里渊散射光是从原始光信号中逸散出的光,可以认为布里渊谱的反射波长与入射波长大致相同。为便于计算,本文设定二者取值均为1 550 nm。测试的实验原理图如图1所示。

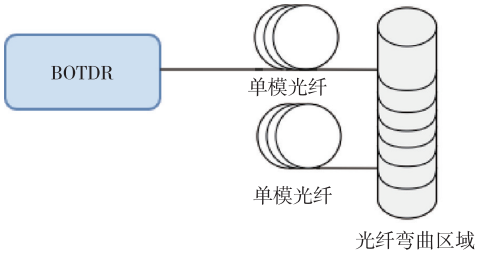


图1　实验原理图

BOTDR系统产生的光在经过一定长度的单模光纤后，进入弯曲区域，同时布里渊背向散射光再从原路径返回到发端，实现对布里渊背向散射信号的测量。其中，尾端的单模光纤用于消除菲涅尔散射产生的干扰。

即当传输光信号增强或减弱时，布里渊背向散射信号也随之变大或变小。输入端采集到的布里渊背向散射光是沿原路径返回的光，所以在传输的光信号经过光纤弯曲部分后，实际获得的布里渊背向散射信号经过了两次衰减。则由公式(6)可知，接收到的布里渊背向散射信号如公式(7)所示：

$$P_{\mathrm{B}}=P_{\mathrm{B0}}\exp(-4\alpha_{\mathrm{c}}l) \tag{7}$$

式中，P_{B0}为无弯条件下布里渊背向散射光功率，P_{B}为弯曲衰减后的布里渊背向散射光功率。

1.2　实验验证

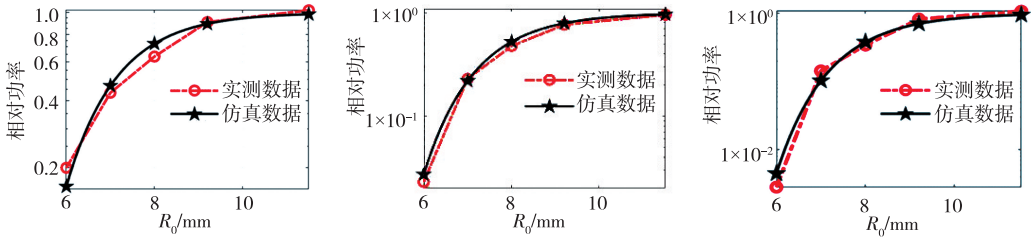
采用中电思仪6419A型光纤应变分布测试仪，对G.652D型SM色散非位移单模光纤中的布里渊谱进行采集。实验参数设置如下：入射光脉宽为10 ns，频率步长为2 MHz，扫描起始频率和结束频率分别为10.70 GHz和11.00 GHz，平均次数为2^{14}次，采样分辨率为0.1 m。

为探究相对功率与弯曲长度和弯曲半径之间的关系，设定以下实验：

(1)当弯曲半径变化时，弯曲长度不变：选取三组典型的弯曲长度分别为：0.5 m，1.0 m和2.0 m，每组弯曲长度下均选取典型的弯曲半径：6 mm，7 mm，8 mm，9.2 mm和11.5 mm。

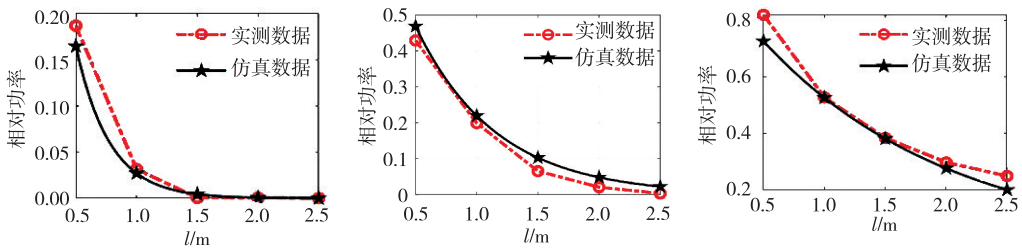
(2)当弯曲长度变化时，弯曲半径不变：选取三组典型的弯曲半径分别为：6 mm，7 mm和8 mm，每组弯曲半径下均选取典型的弯曲长度：0.5 m，1.0 m，1.5 m，2.0 m和2.5 m。

光纤参数：纤芯半径r_1=4.5 μm，包层半径r_2=62.5 μm，纤芯折射率n_1=1.468，包层折射率n_2=1.463。结合实验和公式(7)得到在不同弯曲半径和长度下，实验及理论算得的布里渊背向散射光功率衰减情况如图2和图3所示。其中，相对功率是指衰减后与衰减前布里渊背向散射功率的比值。



(a) 弯曲长度0.5 m　(b) 弯曲长度1.0 m　(c) 弯曲长度为1.5 m

图2　相对功率与弯曲半径之间的关系



(a) 弯曲半径6 mm　(b) 弯曲半径7 mm　(c) 弯曲半径8 mm

图3　相对功率与弯曲长度之间的关系

由图2可知，当弯曲长度恒定时，随着弯曲半径的不断增大，相对功率逐渐提高，即弯曲半径越大输出功率越大。当弯曲半径达到某一临界值后，相对功率趋于稳定，弯曲损耗不再是影响布里渊背向

散射功率的主要因素。由图3可知，当弯曲半径恒定时，随着弯曲长度的不断增加，相对功率随之降低，即弯曲长度越长，输出功率越小。

综合实测数据和仿真数据可以发现，二者相对功率的变化趋势基本相同，数值结果上也基本吻合。这反映了弯曲半径和长度同输出功率之间的关系，同时也证明了所建立的光纤弯曲对布里渊背向散射光功率影响模型能够较为准确地展示光纤弯曲损耗对布里渊背向散射功率的影响。

2 光纤弯曲对BOTDR测量误差的影响

2.1 相对功率与布里渊谱信噪比变化量的关系

为获得不同布里渊背向散射光功率下的信噪比，利用BOTDR对45 km的G.652D型SM色散非位移单模光纤进行测量。BOTDR实验设置如下：入射光脉冲宽度为250 ns，频率步长为5 MHz，扫描起始频率和结束频率分别为10.75 GHz和10.95 GHz，平均次数为2^{14}次，采样分辨率为4 m。根据每一距离点下采集到的布里渊谱，计算各距离点的布里渊背向散射光功率和布里渊谱的信噪比。其中，采用布里渊谱峰来代表布里渊背向散射光功率。为了更加清晰地观察相对功率与其信噪比之间的关系，对原始离散数据采用分段线性插值法进行处理，当无衰减时，信噪比为0 dB，以此为参考，得到相对功率对信噪比的影响如图4所示。

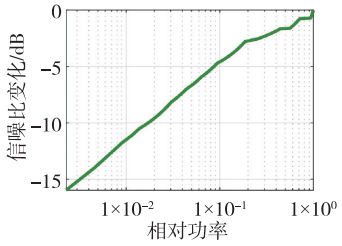


图4 信噪比与布里渊背向散射光功率的关系

由图4可知，随着布里渊背向散射光功率的不断减小，其信噪比逐渐降低，呈现出类指数函数的规律。这与文献[25]中的结论相一致，进而验证了实验结果的准确性。这种变化是由当布里渊散射光功率衰减时，布里渊谱的噪声功率并没有发生等比例的衰减而引起。

2.2 光纤弯曲对BOTDR测量误差的影响及验证

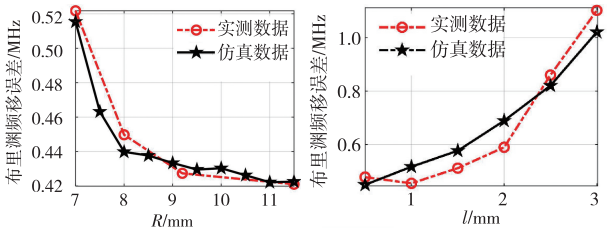
本研究提出一种研究光纤弯曲对BOTDR测量误差影响的方法：首先利用公式(7)可计算得到不同弯曲半径和长度下布里渊背向散射光功率的衰减程度，随后根据图4中布里渊背向散射光功率衰减程度计算出布里渊谱的信噪比，再利用布里渊谱模型数值生成不同信噪比下的含噪布里渊谱，通过拟合算法获得对应的布里渊频移，并用标准差以表征误差，最终获得光纤弯曲半径和弯曲长度与布里渊频移误差的关系。

具体而言，利用公式(8)[26]所示的伪Voigt模型数值生成含噪布里渊谱，噪声为高斯噪声，每一信噪比水平下生成20 000组布里渊谱。

$$g_{\mathrm{B}}(v)=g_{01}\frac{\left(\Delta v_{\mathrm{B}}/2\right)^{2}}{\left(v-v_{\mathrm{B}}\right)^{2}-\left(\Delta v_{\mathrm{B}}/2\right)^{2}}+g_{02}\exp\left[-4\ln 2\left(\frac{v-v_{\mathrm{B}}}{\Delta v_{\mathrm{B}}}\right)^{2}\right] \tag{8}$$

式中，g_{01}为布里渊散射的Lorentzian模增益峰值，g_{02}为Gaussian模增益峰值，v_{B}为布里渊频移，v为频率，Δv_{B}为布里渊增益谱的线宽。

实验参数与1.2节一致，实测得到当弯曲长度为1.0 m、弯曲半径为7 mm时，不同弯曲半径和长度下的布里渊频移误差，标注为“实测误差”。采用本文方法计算不同弯曲半径和长度下的布里渊频移误差，当弯曲长度和半径恒定时，研究弯曲半径和弯曲长度影响时其步长分别为0.5 mm和0.5 m，对每一仿真点下生成的20 000组结果求平均，得到的数据标注为“仿真误差”，如图5所示。



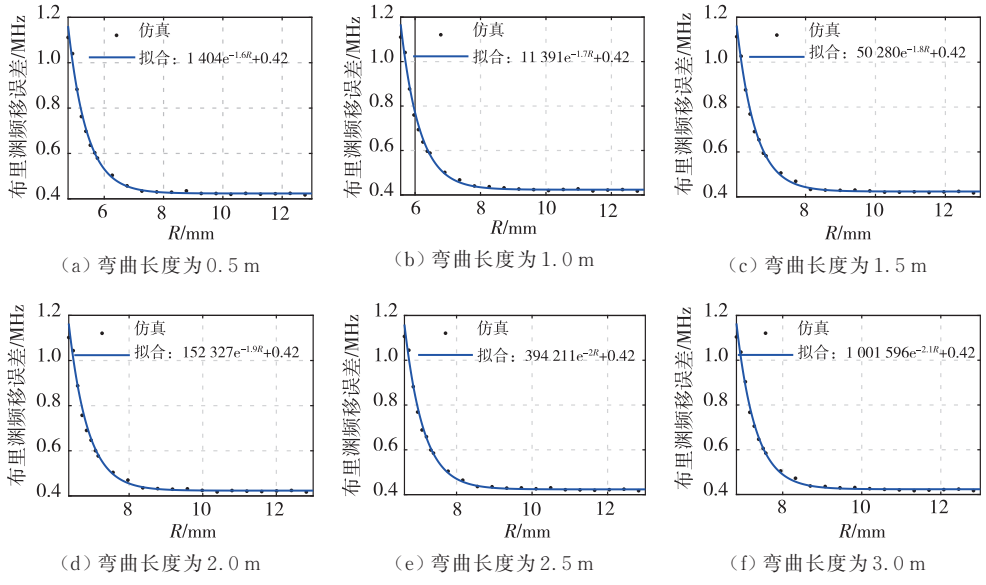
(a) 布里渊频移误差与弯曲半径的关系 (b) 布里渊频移误差与弯曲长度的关系

图5 弯曲长度和弯曲半径对布里渊频移误差的影响

可以看出，基于本文提出方法算得的布里渊频移误差与实验结果基本吻合，这验证了所提方法的可靠性。由图5(a)可知，当光纤弯曲长度恒定时，随着弯曲半径的增加，布里渊频移误差逐渐减小；由图5(b)可知，当弯曲半径恒定时，随着弯曲长度的增加，布里渊频移误差逐渐增大。

2.3　布里渊频移误差与弯曲半径、弯曲长度的关系

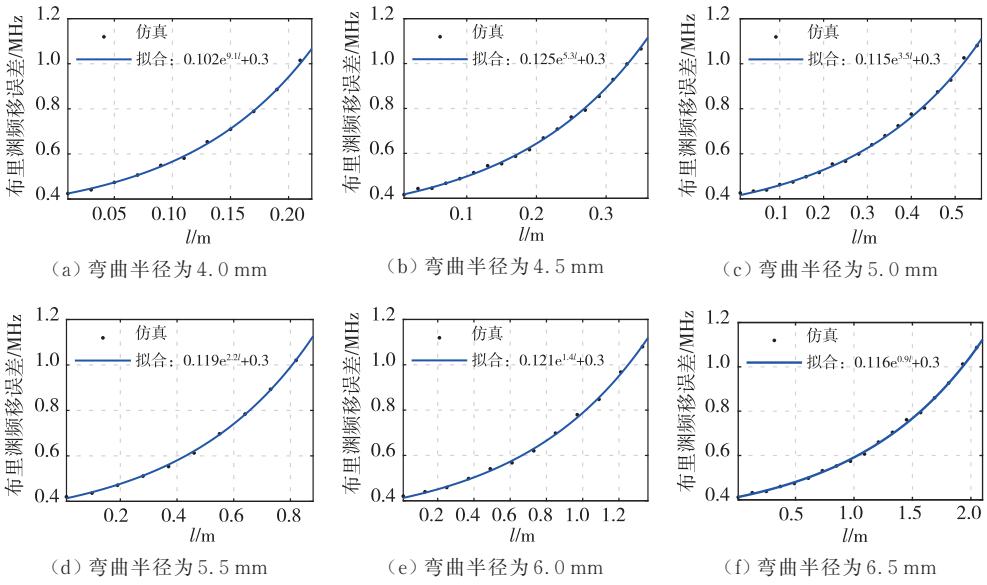
为系统探究弯曲半径与长度对布里渊频移误差的影响，本文基于所提方法，分别在固定弯曲长度和固定弯曲半径两种条件下，考察了另一参数变化对误差的影响规律。除了弯曲半径和弯曲长度的步长选择，相关参数与2.2节一致。为便于观察弯曲半径和长度变化对布里渊频移误差的影响，此处将通过拟合法对相应的布里渊频移误差进行拟合。不同弯曲半径和长度下算得的布里渊频移误差与对应的拟合结果分别如图6和图7所示。



（a）弯曲长度为0.5 m　（b）弯曲长度为1.0 m　（c）弯曲长度为1.5 m

（d）弯曲长度为2.0 m　（e）弯曲长度为2.5 m　（f）弯曲长度为3.0 m

图6　布里渊频移误差与弯曲半径的关系



（a）弯曲半径为4.0 mm　（b）弯曲半径为4.5 mm　（c）弯曲半径为5.0 mm

（d）弯曲半径为5.5 mm　（e）弯曲半径为6.0 mm　（f）弯曲半径为6.5 mm

图7　布里渊频移误差与弯曲长度的关系

由图6可知，随着弯曲半径的不断增大，布里渊频移误差逐渐减少，呈现类指数函数的规律。通过观察拟合后指数函数的指数项系数可知，弯曲长度越大，误差增加越快。在弯曲半径达到某一临界值后，整个系统的布里渊频移误差趋于稳定，即几乎不存在功率衰减，并且随弯曲长度增加临界值变大。同理，由图7可知，当光纤弯曲半径恒定时，随着弯曲长度的增加，布里渊频移误差呈现类指数函数的增加趋势，且弯曲半径越大，拟合得到指数函数的指数系数越小。这表明在增加同样弯曲长度

下,布里渊频移误差增加倍数越小,即这种增加趋势越慢。该结果揭示了弯曲半径与长度的变化会引起类指数形式的功率衰减,进而导致信噪比以同类规律下降,最终使得布里渊频移误差表现出显著的类指数型变化趋势。

3 结论

本文主要探究了当传感光纤宏弯时,BOTDR中布里渊频移误差的变化情况。首先,理论研究了不同弯曲半径和长度下布里渊背向散射光功率的衰减情况。随后,结合实验测量得到的不同衰减程度下布里渊谱的信噪比情况,提出一种研究光纤弯曲对BOTDR测量误差影响的方法,并进行了实验验证。进一步基于该方法研究了不同弯曲半径和长度下布里渊频移误差的变化规律。结果显示,随着弯曲半径的减小或弯曲长度的增大,布里渊频移误差均呈现出类指数函数规律的增大趋势。

参考文献:

[1] 赵航航,张明红,范 敏,等. 分布式光纤多参数融合传感系统研究[J]. 半导体光电,2024,45(6):1024-1030.
Zhao Hanghang, Zhang Minghong, Fan Min, et al. Research on distributed fiber optic multi-parameter fusion sensing system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(6): 1024-1030.

[2] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers [J]. Applied Optics, 1990, 29(15): 2219-2222.

[3] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(5): 107-108.

[4] Mizuno Y, Theodosiou A, Kalli K, et al. Distributed polymer optical fiber sensors: a review and outlook [J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1719.

[5] Li M, Xu T, Wang S, et al. Probe pulse design in Brillouin optical time-domain reflectometry [J]. IET Optoelectronics, 2022, 16(6): 238-252.

[6] 黄麟景,周 霄,樊昕昱,等. 多机理融合分布式光纤传感技术研究[J]. 光学学报,2024,44(1):153-164.
Huang Linjing, Zhou Xiao, Fan Xinyu, et al. Multi-mechanism distributed fiber-optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 153-164.

[7] 冯维一,刘礼华,张旭苹,等. 基于BOFDA的PE管道微弯变形检测方法[J]. 光通信技术,2020,44(12):33-36.
Feng Weiyi, Liu Lihua, Zhang Xuping, et al. Detection method of PE pipe microbending deformation based on BOFDA [J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(12): 33-36.

[8] 刘鑫煜,陈理平,陈玉明,等. 利用信号处理技术改善布里渊光时域反射仪空间分辨率研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(13):44-54.
Liu Xinyu, Chen Liping, Chen Yuming, et al. Progress on improving spatial resolution of Brillouin optical time domain reflectometer using signal processing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(13): 44-54.

[9] Sun Y, Shi B, Zhang D, et al. Internal deformation monitoring of slope based on BOTDR[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 9496285.

[10] 吕安强,魏 伦. 基于光纤传感技术的风机叶片故障检测技术研究进展[J]. 高压电器,2022,58(7):83-92.
Lyu Anqiang, Wei Lun. Research progress on fault detection technology of wind turbine blade based on fiber optic sensor [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 83-92.

[11] 莫巧灵,陈永辉. 最小二乘法用于BOTDR/BOTDA解调时误差的影响因素研究[J]. 光通信技术,2022,46(3):27-32.
Mo Qiaoling, Chen Yonghui. Research on the influence factors of error in BOTDR/BOTDA demodulation by least-squares method [J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(3): 27-32.

[12] 陈映恺,陈理平,郑永红,等. 提高布里渊光时域反射仪频移定位精度的二次寻峰算法[J]. 激光与光电子学进展,2024,61(15):1-10.
Chen Yingkai, Chen Liping, Zheng Yonghong, et al. Quadratic peak-seeking algorithm to improve the frequency shift positioning accuracy of Brillouin optical time domain reflectometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1-10.

[13] 徐 琳,李依丹,刘仪琳,等. 弯曲光纤内信号提取的仿真分析[J]. 光通信技术,2018,42(8):6-9.
Xu Lin, Li Yidan, Liu Yilin, et al. Simulation analysis of signal extraction in bending fiber[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(8): 6-9.

[14] 罗志会,王 舟. OTDR宏弯曲损耗测试的分析与应用[J]. 光通信技术,2009,33(12):55-57.
Luo Zhihui, Wang Zhou. The analysis and application of Marcobend loss test using OTDR[J]. Optical Communication Technology, 2009, 33(12): 55-57.

[15] 李 焰,吴 松,沈剑青. 光电话耦合夹钳的优化光路结构设计[J]. 光通信技术,2006,30(5):39-41.
Li Yan, Wu Song, Shen Jianqing. A optical structure optimized design of clip-on coupler [J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(5): 39-41.

[16] Marcatili E A J. Bends in optical dielectric guides[J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2103-2132.

[17] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 216.

[18] Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(12): 2957-2961.

[19] 郝素君, 游善红, 李晓东, 等. 单模光纤弯曲损耗的测量与分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(1): 12-15.
Hao Sujun, You Shanhong, Li Xiaodong, et al. Bend loss measurement and analysis of single-mode fibers[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2003(1): 12-15.

[20] 薛梦驰, 左琼华. 光纤微弯损耗的新测试方法仿真算法及验证[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 28-34.
Xue Mengchi, Zuo Qionghua. Simulation algorithms and verification for new test methods of microbending loss in optical fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 28-34.

[21] Lammens N, Kinet D, Chah K, et al. Residual strain monitoring of out-of-autoclave cured parts by use of polarization dependent loss measurements in embedded optical fiber Bragg gratings[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 52: 38-44.

[22] 李明昊, 程　琳, 李亚明, 等. U型缠绕式光纤弯曲损耗位移传感器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 94-101.
Li Minghao, Cheng Lin, Li Yaming, et al. Design of displacement sensor based on the bending loss of U-type wingding fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 94-101.

[23] Kwon I B. Distributed measurements of structures by fiber optic sensors[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2003, 7(6): 659-666.

[24] 孙云鹏, 舒　畅, 林海涛. 温度修正的单模光纤宏弯损耗特性理论分析[J]. 光通信研究, 2021(5): 50-56.
Sun Yunpeng, Shu Chang, Lin Haitao. Theoretical analysis of temperature-corrected single-mode fiber macro-bending loss characteristics[J]. Study on Optical Communications, 2021(5): 50-56.

[25] 郑　波. 高速率WDM系统光信噪比(OSNR)计算方法及软件实现[J]. 邮电设计技术, 2014(1): 60-66.
Zheng Bo. The calculation method of OSNR in high rate WDM system and software realization [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2014(1): 60-66.

[26] Bao X, Brown A, DeMerchant M, et al. Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10 ns) pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(8): 510-512.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，教授，主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究；

徐志钮(1979—)，男，博士，教授，主要从事分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断应用方面的研究。