

Distributed Optical Fiber Temperature Measurement System Assisted By Rayleigh Scattering *

YAN Jianfeng¹, LIU Xianglian^{1*}, WU Beisong¹, WANG Yu^{1,2}, BAI Qing^{1,2}, JIN Baoquan¹
(1.Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;
2.Shanxi Transportation Technology Research&Development Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030600, China)

Abstract: In order to improve the performance of the single mode fiber based distributed optical fiber Raman temperature measurement system based on the Rayleigh scattering signal and anti-Stokes signal intensity ratio of duplex demodulation scheme, a Rayleigh scattering assisted distributed optical fiber temperature measuring system is designed, and on the basis of the cumulative average denoising algorithm, using the wavelet threshold de-noising algorithm, the system performance is effectively improved. The experimental results show that the temperature measurement accuracy of the system can reach ± 1.0 °C on 10.5 km single-mode fiber, and the multi-point heating experiment is realized, which can meet the needs of practical engineering applications.

Key words: distributed optical fiber sensing; rayleigh demodulation; cumulative average; wavelet threshold denoising
EEACC: 7230; 7230E **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2024.02.023

瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统 *

闫剑锋¹, 刘香莲^{1*}, 武北松¹, 王宇^{1,2}, 白清^{1,2}, 靳宝全¹
(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, 山西太原 030024;
2.山西省交通科技研发有限公司, 山西太原 030600)

摘要: 为了提高基于单模光纤的分布式光纤拉曼测温系统的传感性能, 基于后向瑞利散射信号与反斯托克斯信号强度比值的二路解调方案, 设计了一种瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统, 并在累加平均去噪算法的基础上, 采用小波阈值降噪算法, 有效提高了系统性能。实验结果表明, 在 10.5 km 的单模光纤上, 系统的测温精度可达 ± 1.0 °C, 并实现了多点升温实验, 能够满足实际工程应用的需求。

关键词: 分布式光纤测温; 瑞利散射; 累加平均; 小波阈值降噪;

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2024)02-0360-05

分布式光纤拉曼测温 (ROTDR) 系统利用光纤的拉曼光谱温度效应^[1], 采集光纤中的拉曼散射光信息, 解调得到空间温度场的实时信息。结合光时域反射 (OTDR) 技术, 依据光纤中光的传播速度与后向光回波时间来定位^[2], 实现光纤链路温度场的实时监测, 具有本征安全、传输距离远、响应速度快、灵敏度高优点^[3], 已广泛应用于化工^[4]、煤炭工业^[5]、核工业^[6]、管道运输业^[7] 等工业温度安全监测领域。2007 年, 煤炭科学研究总院赵玉明等^[8] 确定了利用反斯托克斯拉曼散射光功率曲线解调瑞利散射光功率曲线的表达式, 为分布式光纤测温系统提供了参考。2009 年, 清华大学张磊等^[9] 提出在基于单模光纤的分布式拉曼测温系统中采用可变脉宽

光源, 可满足不同环境下对温度和精度的不同需求。2011 年, Soto 等^[10] 利用脉冲编码技术实现在单模光纤上的远程分布式测温。2012 年重庆大学宁枫等^[11] 提出一种线性修正算法, 优化了基于单模光纤的分布式测温系统的空间分辨率及测量时间。上述研究工作为分布式光纤测温系统在单模光纤中的优化作出了重要贡献。

目前在基于单模光纤的 ROTDR 系统中采用的二路解调方案通常需要同时采集后向光中斯托克斯和反斯托克斯光强信号来解调温度信息^[12], 由于单模光纤有效模场面积较小, 使得其受激拉曼散射阈值很低, 系统的输入光功率不能过高。在这种解调方案中, 斯托克斯光强信号弱, 采集较为困难, 影响

项目来源: 山西省自然科学基金项目 (201901D211072); 山西省科技创新人才团队专项项目 (201805D131003)

收稿日期: 2023-09-14 **修改日期:** 2023-11-25

系统的传感性能。为了解决上述问题,设计了一种瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统。采用后向瑞利散射光和反斯托克斯光强度比值的双路解调方案来解调温度信息,并在累加平均去噪算法的基础上,进一步提出利用小波阈值降噪算法,提高了系统的测温精度。

1 理论分析

传统的分布式光纤测温系统解调方案是以斯托克斯光为参考信号,但斯托克斯光光强弱,影响系统测温精度的提升,而后向瑞利散射光的光强是斯托克斯散射光的 10^3 倍且对温度不敏感,研究表明^[13],以后向瑞利散射光作为参考信号的双路解调方案,平均测温灵敏度能达到 $1.065\%/^{\circ}\text{C}$ 。而以斯托克斯光作为参考信号的双路解调方案,平均测温灵敏度仅为 $0.862\%/^{\circ}\text{C}$ 。利用其替代斯托克斯散射光可以有效提高系统信噪比。因此本系统选择后向瑞利散射信号作为参考信号,反斯托克斯光作为探测信号的双路解调方案,利用两者的光强比值与温度的对应关系实现对温度信息的解调,可以使系统更加稳定,灵敏度和测温精度也会更高。后向散射光光谱如图 1 所示。

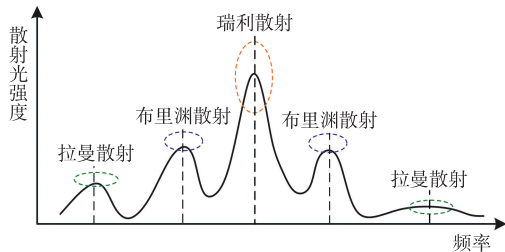


图 1 后向散射光光谱图

当脉冲光沿着光纤向前传播时^[14],每个激光脉冲产生的斯托克斯拉曼散射光、反斯托克斯拉曼散射光和后向瑞利散射光的光通量分别可表示为:

$$\Phi_s = K_s S V_s^4 \varphi_e \exp[-(a_o + a_s)L] B_s(T) \quad (1)$$

$$\Phi_a = K_a S V_a^4 \varphi_e \exp[-(a_o + a_a)L] B_a(T) \quad (2)$$

$$\Phi_r = K_r S V_o^4 \varphi_e \exp(-2a_o L) \quad (3)$$

下标 o 代表入射光,下标 s 代表斯托克斯拉曼散射光,下标 a 代表反斯托克斯拉曼散射光,下标 r 代表后向瑞利散射光, S 为散射截面, K_s 、 K_a 、 K_r 分别代表与光纤散射截面相关系数, V_s 、 V_a 、 V_o 分别代表散射光子的频率, a_s 、 a_a 、 a_o 分别代表光纤中光的平均传播损耗, L 为测温光纤待测区域的长度 L 处,其中 $B_s(T)$ 、 $B_a(T)$ 是温度解调函数:

$$B_s(T) = \left[1 - \exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$B_a(T) = \left[\exp\left(\frac{-h\Delta\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: h 代表普朗克常数, k 代表玻尔兹曼常数, $\Delta\nu$ 代表 Raman 频移量, T 为热力学待测温度。

反斯托克斯拉曼散射光和瑞利散射光的光通量比值可表示为:

$$\frac{\Phi_a(T)}{\Phi_r(T)} = \frac{K_a V_a^4}{K_r V_o^4} \exp\left[\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1\right] \exp[-(a_a - a_o)L] \quad (6)$$

在测量前得到光纤标定温度 T_0 ,根据式(6)推导可得待测温度 T :

$$T = \frac{1}{\frac{k}{h\Delta\nu} \left(\ln \left\{ \frac{\Phi_r(T)/\Phi_a(T)}{\Phi_r(T_0)/\Phi_a(T_0)} \exp\left[\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_0}\right) - 1\right] \right\} + 1 \right)} \quad (7)$$

利用光时域反射原理^[15],即计算激光脉冲在传感光纤内传播所用的时间来实现温度的定位:

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (8)$$

式中: t 代表从发出的脉冲光到接收到后向散射光信号的时间间隔, c 代表光速, n 代表光纤纤芯的折射率。

2 系统整体设计

2.1 系统硬件设计

系统的硬件结构如图 2 所示,其主要由光路部分和电路部分两部分构成。其中,光路部分由 ASE 宽带光源、声光调制器(AOM)、掺铒光纤放大器(EDFA)、波分复用器(WDM)、环形器(CIR)和单模光纤构成,电路部分由 FPGA 高速数据采集卡、任意波形发生器(AWG)、雪崩光电探测器(APD)、上位机构成。

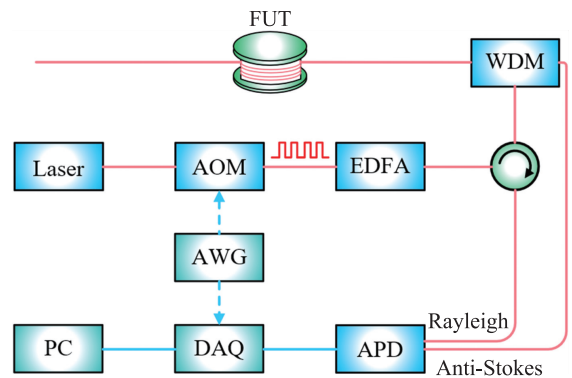


图 2 系统硬件结构图

实验中采用的传感光纤为 10.5 km 的长飞 G652D 单模光纤。首先,ASE 宽带光源发出 1 550 nm 波长的连续光,经 AWG 驱动的 AOM 调制

成具有固定脉宽和重复频率的脉冲光。调制后的脉冲光通过 EDFA 放大后,再进入 CIR,最后通过 WDM 进入到单模光纤中。探测脉冲光注入单模光纤后会与光纤介质作用,在探测脉冲光沿光纤轴线向前传播时,光纤链路上各点产生的反斯托克斯散射光和瑞利散射光向后传播,通过 WDM 中的滤光片滤波后从 1 450 nm 端口传出,得到反斯托克斯散射光。通过 CIR 得到后向瑞利散射光。两者均经 APD 进行光电转换,转换后得到的双路电信号被 FPGA 高速数据采集卡采集并进行 A/D 转换和累加平均运算。FPGA 高速数据采集卡由 AWG 输出的同步触发信号进行触发以保证数据的同步采集。最后采集卡将经过处理后的数据上传至上位机,并由上位机对数据进行解调和显示。

2.2 系统算法设计

在对信号处理的过程中,本系统在累加平均去噪算法^[16]的基础上,采用了小波阈值降噪算法^[17]。本系统噪声主要是高斯白噪声,采用累加平均去噪算法可以滤除微弱信号中的大部分噪声,其原理是根据信号的周期性、相关性及噪声的随机非相关性的特点,来改善系统信噪比^[18]。系统采集到的信号主要由噪声信号和有用信号两部分组成,被测信号为:

$$f(t) = y(t) + n(t) \quad (9)$$

式中: $y(t)$ 为有用信号, $n(t)$ 为噪声信号,系统信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{y(t)}{n(t)} \quad (10)$$

有用信号通过 N 次累加后为 $Ny(t)$,噪声为随机噪声信号,经过 N 次累加后其值为 $\sqrt{N}n(t)$ 。累加平均后的系统信噪比变为:

$$\text{SNR}' = \frac{Ny(t)}{\sqrt{N}n(t)} \quad (11)$$

$$\frac{\text{SNR}}{\text{SNR}'} = \sqrt{N} \quad (12)$$

从式(12)中可以看出,采集到的信号经过累加平均 N 次后,系统信噪比提升了 \sqrt{N} 倍,有效去除了高斯白噪声。但信噪比并不会随着累加次数的增加而一直提高,当累加次数达到一定程度后,信噪比改善的效果就会减弱。

因此本系统采用小波阈值降噪算法对信号作进一步处理。小波阈值降噪算法将信号通过小波变换后,由信号产生的小波系数会包含信号重要信息,有用信号经小波分解后小波系数较大,噪声信号小波系数较小。通过选取阈值,将较大的小波系数保留,视为有用信号,反之较小的小波系数进行置零处理,

视为噪声信号。最终将信号重构,获得去噪后的信号。具体实现如下:

①小波分解:选取恰当的小波基函数,采取小波变换把信号分解为 N 层。

②阈值处理:求得各层小波系数相对的阈值,而后对各层的信号进行阈值处理,软阈值虽然连续性好,但存在固定偏差,影响信号重构。而硬阈值可以较好保留信号特征,因此本系统算法采用硬阈值去噪^[19]。硬阈值去噪表达式为:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \omega & |\omega| > \lambda \\ 0 & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω 为原始的小波系数, λ 为阈值, $\varphi(\omega)$ 为阈值降噪后的小波系数。

③小波重构:对经过硬阈值去噪后的各层小波系数进行逆变换,获得降噪处理后的信号。

3 实验结果及分析

本实验选用的是 10.5 km 的单模光纤,分别连接到传统的分布式光纤测温系统和瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统中,并均置于室温 22.0 °C 下。累加平均次数参数设置为 30 000 次,实验结果如图 3 所示,其中图 3(a)曲线为传统的分布式光纤测温系统的测温结果,图 3(b)曲线为瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统的测温结果,可以明显看出本文提出的瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统的测温精度高于传统的分布式光纤测温系统。

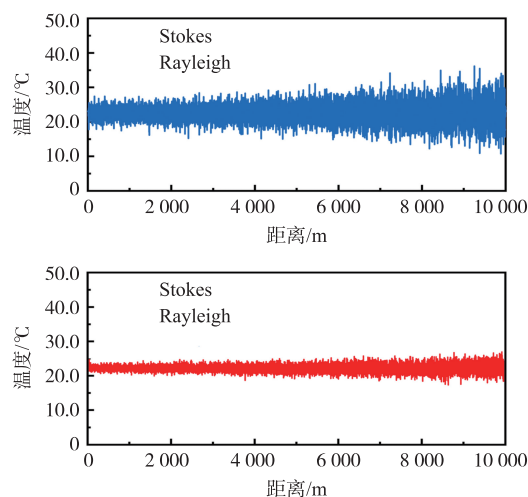


图 3 测温效果对比图

将瑞利散射辅助的分布式光纤测温系统置于室温 22.0 °C 下,实验仍选用 10.5 km 单模光纤,并分别设置累加平均次数为 10 000、20 000、30 000,实验结果如图 4 所示。

从图 4 的实验结果中可以得到,20 000 次累加平均次数相比 10 000 次累加平均次数的测温精度提高

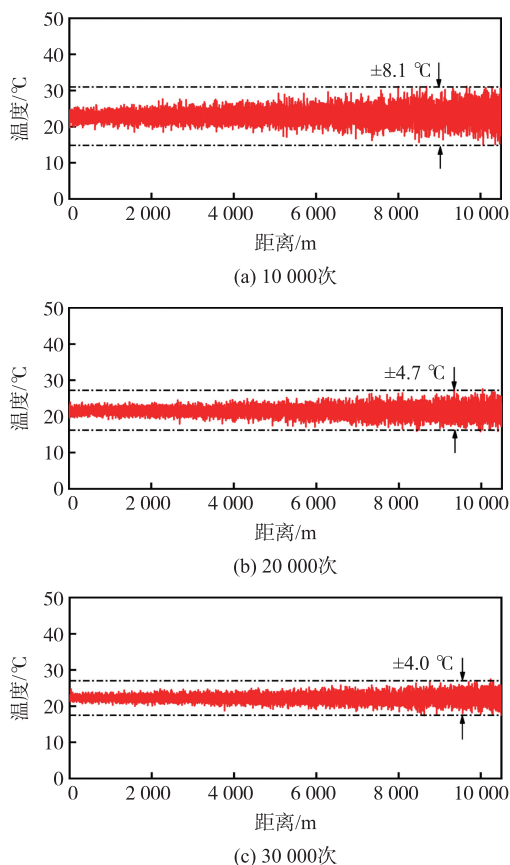


图 4 系统测温精度(算法去噪前)

到 $\pm 4.7\text{ }^\circ\text{C}$, 30 000 次累加平均次数相比 20 000 次累加平均次数的测温精度提高到 $\pm 4.0\text{ }^\circ\text{C}$, 从图 4 可以看出随着累加平均次数的增加, 系统测温精度的提升效果逐渐减弱。为了进一步提高系统的测温精度, 本系统采用小波阈值降噪算法作进一步处理。

图 5 是累加平均次数为 30 000 次并经小波阈值降噪后的实验结果图, 对实验数据分析可得, 温度曲线的标准差为 0.21, 极差为 $2.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。即在 10.5 km 传感范围内, 测温精度为 $\pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。可以看出本系统采用的小波阈值降噪算法可以有效提升系统测温性能。

然后对系统温度变化响应能力进行测试, 首先在 10.5 km 单模光纤的尾部绕制一段光纤环, 并将光纤环放入 $40.0\text{ }^\circ\text{C}$ 的高精度水浴槽中进行测温实验。实验结果如图 6 所示, 从中可以看到明显的升温效果, 证明本系统温度变化响应能力良好。

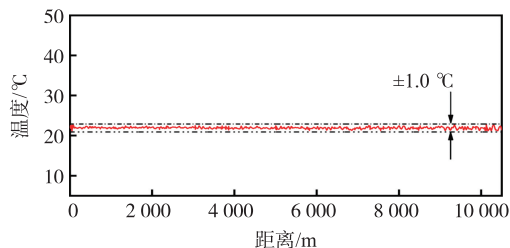


图 5 系统测温精度(算法去噪后)

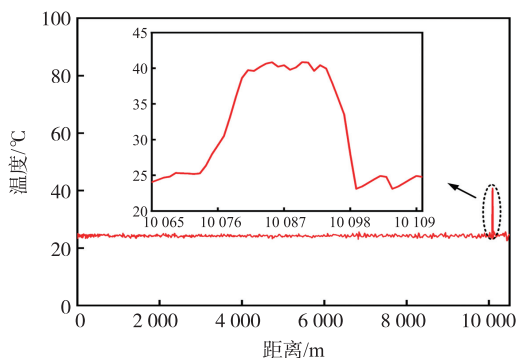


图 6 系统升温实验

然后对系统多点温度变化响应能力进一步测试。在 1 068 m、5 208 m 和 10 066 m 位置处各取一段探测光纤, 均置于 $50.0\text{ }^\circ\text{C}$ 高精度水浴槽中, 在同样的实验环境下进行水浴升温实验, 实验结果如图 7 所示。三处位置的温度变化与高精度水浴槽设定值大致相同, 从图 7 中可以看出有三个明显的峰, 对应三处升温点, 说明了系统具有良好多点响应能力, 能够实现分布式测温。

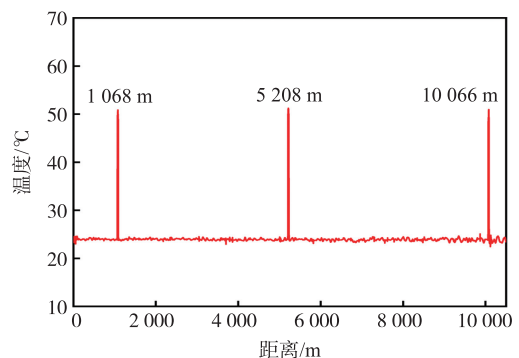


图 7 系统三点升温实验

然后对系统测温性能进行测试, 仍选用该段光纤, 将光纤 10 075 m 处的一段探测光纤放入到高精度水浴槽中, 从 $25.0\text{ }^\circ\text{C}$ 开始, 以 $10.0\text{ }^\circ\text{C}$ 为阶梯, 进行升温实验。在同样实验条件下, 进行 6 次持续升温实验, 实验结果如图 8 所示。根据图 8 实验结果可得到, 在 10.5 km 传感范围内, 本系统对不同温度变化均可做出响应, 各梯度温度均与预期结果相符。

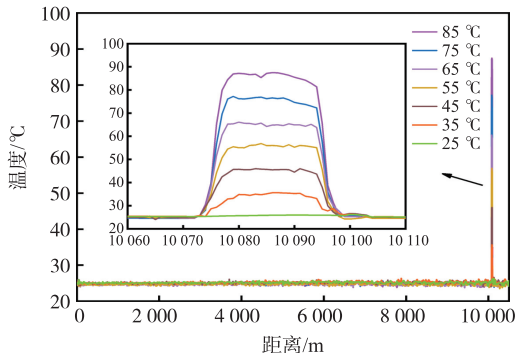


图 8 系统测温范围实验

4 结论

为了提升分布式光纤拉曼测温系统在单模光纤中的传感性能,采用后向瑞利散射信号与反斯托克斯信号强度比值的双路解调方案。在累加平均算法的基础上,进一步采用小波阈值降噪算法有效提升了系统传感性能。实验结果表明,选取 10.5 km 单模光纤进行实验,系统的测温精度为 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,在一定的温度范围内,本系统能够对温度变化做出响应,并能够实现分布式测温,满足实际应用的需求。本文的研究结果可以为分布式光纤拉曼测温系统研究提供参考。

参考文献:

- [1] Hartog A H, Leach A P, Gold M P. Distributed Temperature Sensing in Solid-Core Fibres[J]. Electronics Letters, 1985, 21(23): 1061-1062.
- [2] 张在宣,王剑锋,刘红林,等. 30km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统[J]. 光电子.激光,2004,15(10): 1174-1177.
- [3] 廖延彪,苑立波,田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报,2018,38(3): 10-28.
- [4] 吴硕,张汝山,涂勤昌,等. 分布式光纤测温系统及其在化工园区的应用[J]. 化工自动化及仪表,2014,41(10): 1162-1165,1172.
- [5] 单亚,马艳娟,付华,等. 分布式光纤测温系统在煤矿火灾监测中的应用[J]. 传感技术学报,2014,27(5): 704-708.
- [6] 冯玉辉,高超. 光纤测温技术在核电主变压器的应用及建议[J]. 电气时代,2022(2): 51-54.
- [7] 佟敬阔,靳宝全,王东,等. 面向管道安全监测的 ROTDR 分布式光纤测温系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 158-162.
- [8] 赵玉明,李长忠,翟延忠,等. 基于拉曼散射分布式光纤测温系统的理论分析[J]. 计量学报,2007,28(z1): 15-18.
- [9] 张磊,冯雪,张巍,等. 基于变脉宽光源的分布式光纤拉曼温度传感器研究[J]. 光子学报,2009,38(10): 2584-2587.
- [10] Soto M A, Nannipieri T, Signorini A, et al. Raman-Based Distributed Temperature Sensor with 1 m Spatial Resolution over 26 km SMF Using Low-Repetition-Rate Cyclic Pulse Coding[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2557-2559.
- [11] 宁枫,朱永,崔海军,等. 一种提高分布式光纤测温系统空间分辨率的线性修正算法[J]. 光子学报,2012, 41(4): 408-413.
- [12] 何巍巍,刘艳玲,李军,等. 基于拉曼散射的分布式光纤传感测温系统研究及应用[J]. 钻采工艺,2019,42(3): 72-75, 10.
- [13] 张在宣,刘天夫,张步新,等. 激光拉曼型分布光纤温度传感器系统[J]. 光学学报,1995,15(11): 1585-1589.
- [14] 王剑锋,刘红林,张淑琴,等. 基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(4): 865-871.
- [15] 汪建科,何俊发,王红霞,等. 分布式光纤温度传感器的研究现状与发展趋势[J]. 光机电信息,2005(7): 19-24.
- [16] 刘恒,喻俊松,万生鹏,等. 基于 FPGA 的分布式拉曼光纤传感系统[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(5): 133-142.
- [17] 刘磊,于淼,杨瑞娟,等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. 中国激光,2013,40(6): 225-229.
- [18] 陈瑞麟,万生鹏,贾鹏,等. 基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统[J]. 应用光学,2018,39(4): 590-594.
- [19] 徐伟,张帅,王克家. 拉曼光谱预处理中几种小波去噪方法的分析[J]. 应用科技,2009,36(11): 27-31.



闫剑锋(1996—),男,山西运城人,现就读于太原理工大学电子信息专业硕士研究生三年级,主要研究方向为光纤传感,18235278396@163.com;



刘香莲(1979—),女,2013年西安交通大学及西安光学精密机械研究所联合培养获得博士学位,现为太原理工大学副教授,主要研究方向为保密通信,高速密钥的产生及应用,liuxianglian@tyut.edu.cn。