

# Kuwahara 滤波在布里渊光时域分析传感图像去噪中的应用

孟彦杰, 查剑锋

中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 针对布里渊光时域分析(BOTDA)传感图像中信息在空域的相似性,利用 Kuwahara 滤波对传感图像去噪,根据滤波窗口内相邻像素之间的相关性恢复中心元素值。研究表明,Kuwahara 滤波的窗口长度设置应小于并接近理论空间分辨率。利用该方法对不同信噪比的 BOTDA 传感图像进行去噪处理,信噪比平均提高 6.7 dB,布里渊频移误差平均减小 0.58 MHz,空间分辨率保持不变。该方法在不增加 BOTDA 传感器硬件设备的情况下提高了传感器性能,可用于高分辨率、中长距离传感数据的处理,同时也可用于其他类型的分布式光纤传感系统。

**关键词** 光纤光学; 传感器; 图像处理; 受激布里渊散射; 布里渊光时域分析技术; Kuwahara 滤波

中图分类号 TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070607

## Application of Kuwahara Filter in Brillouin Optical Time-Domain Analysis Sensing Image Denoising

Meng Yanjie, Zha Jianfeng

School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract** According to the similarity of information in Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) sensing image in spatial domain, Kuwahara filtering method for sensing image denoising is proposed. The central element value can be restored according to the correlation among adjacent pixels in filtering window. The results show that the window size of Kuwahara filter should approach to the theoretical value of spatial resolution. The proposed method can make an average signal noise ratio (SNR) improvement of 6.7 dB and Brillouin frequency shift (BFS) error decrease of 0.58 MHz for BOTDA sensing images in different SNRs, without distorting spatial resolution. The method improves the performance of the sensor without increasing the BOTDA sensor hardware, so it has the potential application to high-resolution, long distance sensing and the other types of distributed optical fiber sensors.

**Key words** fiber optics; sensors; image processing; stimulated Brillouin scattering; Brillouin optical time-domain analysis; Kuwahara filter

**OCIS codes** 060.2310; 130.6010; 100.2000; 200.4560; 290.5830; 290.5900

## 1 引言

分布式光纤传感器(DOFS)利用光纤中的瑞利散射<sup>[1-2]</sup>、拉曼散射<sup>[3-4]</sup>和布里渊散射<sup>[5-7]</sup>进行分布式传感,具有高精度、高空间分辨率和超长距离传感等特点,被广泛应用于结构健康监测、环境监测、通信

和岩土工程等领域<sup>[8-9]</sup>。

空间分辨率、传感距离和测量时间是 DOFS 的重要性能参数<sup>[9]</sup>。为进一步提高传感器性能,分布式拉曼放大技术<sup>[10]</sup>、差分脉冲技术<sup>[11]</sup>、编码脉冲技术<sup>[12]</sup>、预抽运脉冲方法<sup>[13]</sup>和暗脉冲技术<sup>[14]</sup>等被应用于 DOFS。这些技术虽可提高 DOFS 的空间分辨

收稿日期: 2018-01-26; 收到修改稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(41641036,51504241)

作者简介: 孟彦杰(1994—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 17327361240@163.com

导师简介: 查剑锋(1982—),男,博士,副教授,主要从事变形监测方面的研究。

E-mail: zhajianfeng@cumt.edu.cn(通信联系人)

率,增强信噪比(SNR),但需配置相应的硬件系统。2016年,Soto等<sup>[15]</sup>利用图像处理技术对光纤传感数据进行去噪,在不影响空间分辨率的前提下大幅提高了信噪比,且无需增加额外的硬件设备。该技术已被应用于基于相位敏感光时域反射传感技术( $\varphi$ -OTDR)<sup>[16]</sup>传感器、基于布里渊光时域反射技术(BOTDR)<sup>[17]</sup>传感器和基于布里渊光时域分析技术(BOTDA)<sup>[15]</sup>传感器等的信号处理。目前,非局部均值算法(NLM)和二维小波去噪法(WD)是提高BOTDA传感信号信噪比的两种图像处理算法<sup>[15]</sup>。NLM作为一种空域去噪法,通过设置合适的相似窗口、搜索窗口和平滑控制参数,在50 km的传感距离上实现了信噪比的进一步提高;WD作为一种变换域去噪方法,在同样的条件下实现了信噪比的提高。Kuwahara滤波作为一种空域去噪方法,可以平滑噪声并保留图像的细节特征,原理简单且参

数易确定,已应用于地震图像的增强方面<sup>[18-19]</sup>。

利用Kuwahara滤波对BOTDA传感图像进行处理,可提高BOTDA传感信号信噪比并减小布里渊频移(BFS)误差。Kuwahara滤波算法仅需确定滤波窗口的大小,简单且易实现。在提高信噪比的同时,合适的窗口大小不会对布里渊增益谱(BGS)产生扭曲。实验验证了不同信噪比条件下Kuwahara滤波的有效性,并对窗口大小的选择进行了讨论和分析。

## 2 Kuwahara 滤波

Kuwahara滤波是一种具有双重滤波特性的算法,一方面可以有效地滤波去噪,另一方面能保留图像矩阵的细节特征。Kuwahara滤波将 $3 \times 3$ 大小的滤波窗口分成4个部分,中心元素用黑色标出,子窗口 $\theta_k$ 用斜划线标出,其中 $k \in \{1, 2, 3\}$ ,如图1所示。

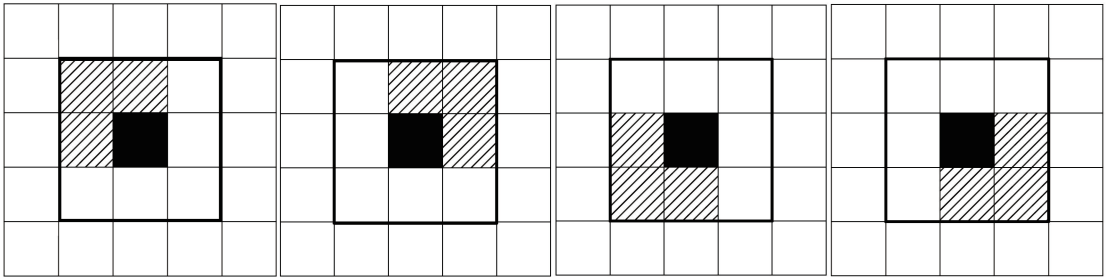


图1 Kuwahara滤波窗口分块

Fig. 1 Block segmentation of Kuwahara filter window

假设方形滤波窗口大小为 $(2n+1) \times (2n+1)$ ,中心元素为 $(x_0, y_0)$ ,子窗口 $\theta_k$ 大小为 $(n+1) \times (n+1)$ 。分别计算每个子窗口的局部均值 $m_k$ 和标准差 $\delta_k$ :

$$m_k = \frac{1}{(n+1) \times (n+1)} \sum_{(x,y) \in \theta_k} f(x,y), \quad (1)$$

$$\delta_k^2 = \frac{1}{(n+1) \times (n+1)} \sum_{(x,y) \in \theta_k} [f(x,y) - m_k]^2, \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 为图像矩阵元素值。

针对中心元素 $(x_0, y_0)$ ,Kuwahara算子输出为

$$\xi(x_0, y_0) = \sum_{k=0}^3 m_k \times \omega_k, \quad (3)$$

$$\omega_k = \begin{cases} 1, & \delta_k = \min_k \{\delta_k\} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

Kuwahara滤波器的输出值为4个邻接子窗口中方差最小的窗口均值,能够很好地保留图像矩阵的边缘和角点<sup>[20]</sup>。

## 3 实验装置

BOTDA传感器实验装置如图2所示。分布式反馈激光器的光被耦合器分成两个部分:一部分光由调制器(EOM 1)产生双边带信号,经可变光衰减器(VOA)控制探测光的功率后,利用光隔离器避免反向传播信号的干扰,然后探测光入射到待测光纤(FUT)中,光纤末端的一部分放置在恒温水箱中;另一部分光由另一调制器(EOM 2)产生抽运脉冲光,经掺铒光纤放大器(EDFA)提升到所需的功率后,经扰偏器(PS)以降低偏振效应对所得功率曲线波动的影响。探测光先后经过环形器和光栅滤波器(FBG),由光电探测器检测其功率,利用采集系统(DA)采集信号,然后重构待测光纤的布里渊增益谱。

抽运光和连续光在单模光纤(SMF)中对向传输,产生受激布里渊散射,当光纤受温度和应变的影响发生变化时,布里渊频移发生改变。通过扫频测

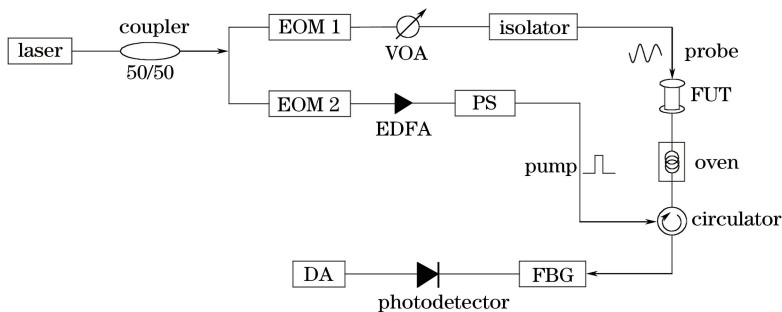


图2 BOTDA 传感器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of BOTDA sensor

量可以得到光纤沿线点  $z$  的布里渊增益谱。当脉冲宽度不小于 10 ns 时,增益谱满足以布里渊频移为中心的洛伦兹(Lorentz)曲线,扫描频率为  $\nu$  时的增益为<sup>[21]</sup>

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\nu_B - \nu)^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (5)$$

式中: $\nu_B$  为布里渊频移; $\Gamma_B$  为布里渊散射谱的半峰全宽; $g_0$  为布里渊散射峰值增益。

BOTDA 传感器通过不断改变扫描频率  $\nu$ , 可得光纤环路中每一点的布里渊增益矩阵  $\mathbf{G}(\nu, z)$ 。将扫描频率  $\nu$  和点位  $z$  作为空间坐标,增益值作为灰度值,可得光纤的传感图像<sup>[22]</sup>,从而可以进一步利用 Kuwahara 滤波进行处理。

## 4 实验结果与分析

实验利用 BOTDA 传感器对长度为 9.4 km 的单模光纤(型号为 SMF28e)进行测量,将约 3 m 长的光纤置于恒温箱(温度设置为 70°C)中,其余部分

置于室温(25 °C)下。设置脉冲宽度为 10 ns,其理论空间分辨率为 1 m,空间采样间隔为 0.16 m,频率扫描范围为 10779.52 ~ 10929.28 MHz,步长为 1.28 MHz。测量得到光纤环路的布里渊增益图像,然后利用 Kuwahara 滤波进行图像处理,并采用 Levenberg-Marquardt 算法对布里渊增益谱进行洛伦兹拟合。

### 4.1 去噪效果评价

为验证 Kuwahara 滤波的有效性,利用窗口大小为  $5 \times 5$ (窗口长度为 0.8 m)的滤波对平均次数为 90 次的传感图像进行处理,整段光纤环路的信噪比和布里渊频移误差如图 3 所示。信噪比  $R_{SN}$  的计算公式表示为<sup>[23]</sup>

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{g_B}{\sigma}, \quad (6)$$

式中: $\sigma$  为布里渊增益谱拟合的残差值。结果表明, Kuwahara 滤波能够有效提高信噪比并降低布里渊频移误差。

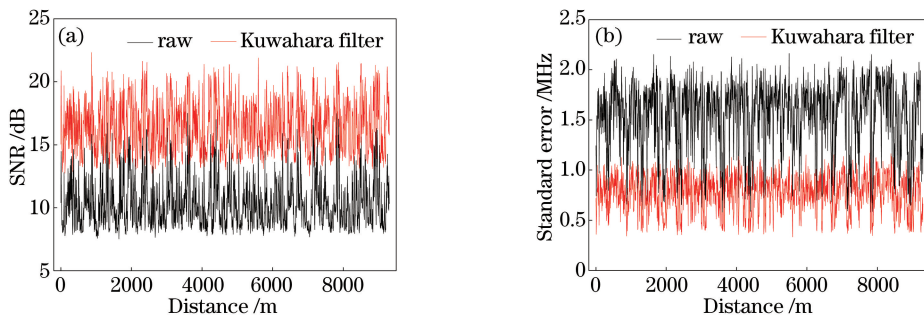


图3 BOTDA 传感器性能。(a)信噪比;(b)布里渊频移误差

Fig. 3 Performance of BOTDA sensor. (a) SNR; (b) standard error of BFS

随着在光纤中传播距离的增加脉冲光呈指数衰减,因此选择光纤末端点位( $z = 9.3$  km)的布里渊增益谱进行分析,原始及滤波后布里渊增益谱如图 4 所示。利用 Kuwahara 滤波对传感数据进行处理后,信噪比由 8.8 dB 提高到 14.2 dB。采用 Levenberg-Marquardt 算法进行洛伦兹拟合,布里

渊频移误差由 1.63 MHz 降低到 0.88 MHz,相关系数由 0.66 提高到 0.87。如采用智能算法<sup>[24-25]</sup>或者互相关技术<sup>[26]</sup>,布里渊频移的误差可进一步降低。

### 4.2 不同信噪比下的去噪效果

滤波去噪效果的优劣与原始图像的信噪比水平有关<sup>[27]</sup>。为验证 Kuwahara 滤波的效果,在不同信

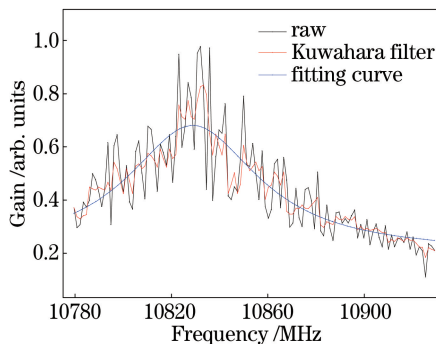


图4 布里渊增益谱

Fig. 4 Brillouin gain spectrum

噪比条件下利用窗口大小为  $5 \times 5$  的滤波对不同平均次数下测量得到的传感图像进行处理,原始图像信噪比变化范围为 8.7 dB~16.9 dB。光纤  $z =$

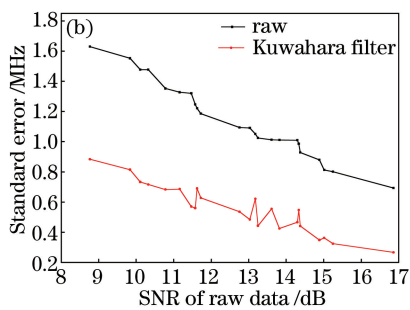
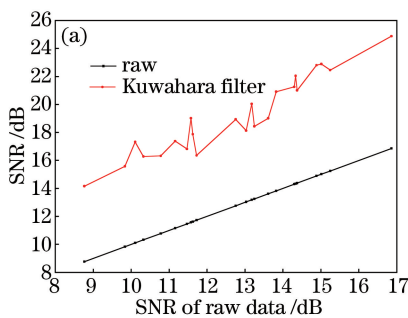


图5 (a)滤波后信噪比;(b)滤波后布里渊频移误差

Fig. 5 (a) SNR of filtered data; (b) standard error of BFS of filtered data

表1 滤波后信噪比和布里渊频移误差改善值

Table 1 Improvement of SNR and reduction of standard error of BFS

SNR of raw data /dB	Improvement of SNR /dB	Reduction of standard error of BFS /MHz
8.8	5.4	0.75
10.1	7.2	0.74
10.8	5.5	0.67
11.6	7.4	0.69
12.8	6.2	0.56
13.6	5.4	0.46
13.8	7.0	0.59
14.3	7.0	0.54
14.9	7.9	0.53
15.2	7.2	0.48
16.9	8.0	0.43

### 4.3 滤波窗口的选择

Kuwahara 滤波作为一种空域降噪方法,利用了滤波窗口内像素间的相关性<sup>[28]</sup>。滤波窗口的大小决定了对应长度的光纤信息在空间上的相互叠加<sup>[27]</sup>,当窗口内信息差异较大时,布里渊增益谱将

9.3 km处点位信噪比和布里渊频移误差变化如图5所示。在不同的信噪比水平下,Kuwahara 滤波处理提高了信噪比并降低了布里渊频移误差。具体数据见表1,传感数据经过滤波后,信噪比平均提高 6.7 dB,布里渊频移误差平均减小 0.58 MHz。

以被测信号在过渡段的 10%~90% 上升时间所对应的空间长度为空间分辨率<sup>[9]</sup>,将平均 10000 次得到的布里渊频移分布作为参考曲线,计算得到实际测量的空间分辨率为 1.05 m;当平均次数为 90 次,信噪比为 8.8 dB 时,滤波后的空间分辨率约为 1.08 m,并未对参考分辨率 1 m 产生严重扭曲。同样地,随着信噪比的提高,滤波后依旧可以很好地保持 1 m 的空间分辨率。Kuwahara 滤波未对空间分辨率产生影响,如图6所示。

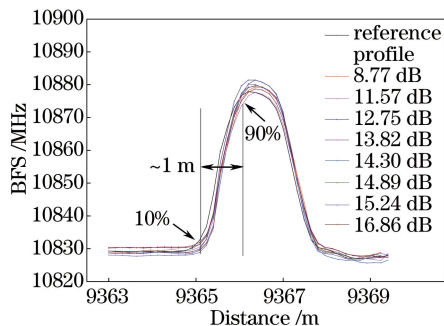


图6 光纤末端布里渊频移分布

产生扭曲,对空间分辨率造成影响<sup>[15]</sup>。为选择合适大小的滤波窗口,分别将滤波窗口大小设置为  $5 \times 5$ 、 $7 \times 7$ 、 $9 \times 9$ 、 $11 \times 11$ 、 $13 \times 13$ 、 $15 \times 15$ ,对平均次数为 90 次的传感图像进行处理。光纤末端包含了置于室温下的 I 段、II 段、恒温箱内的 III 段和连接到跳线并处于室温下的 IV 段,其布里渊频移分布如图7所示。对于室温下的光纤 I 段,利用不同窗口大小的滤波对传感图像进行处理后,频移分布未产生扭曲;对于过渡 II 段,随着窗口的增大,频移分布发生拓宽,降低了空间分辨率;对于光纤 III 段,当窗口大于



7×7 时,窗口长度大于空间分辨率( $7 \times 0.16 \text{ m} > 1 \text{ m}$ ),布里渊增益谱产生扭曲;对于光纤 IV 段,由于接近熔接的跳线部分,布里渊频移分布同样产生扭曲。光纤 II、III 和 IV 部分产生扭曲的主要原因是滤波窗口中包含了大于空间分辨率的点的信息,会对传感信号产生扭曲。因此,选择长度接近空间分辨率的滤波窗口最为合适。

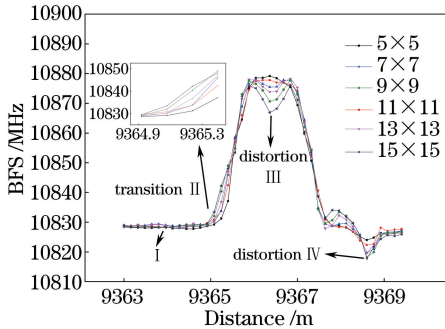


图 7 不同滤波窗口处理后的布里渊频移分布  
Fig. 7 BFS profile of terminal fiber filtered by various window sizes

#### 4.4 不同滤波方法效果比较

为评价 Kuwahara 滤波的去噪效果,利用 NLM 和 WD 对平均次数 90 次时的传感图像进行去噪。NLM 的参数如下:相似窗口为  $6 \times 6$ ,相似窗口为  $13 \times 13$ ,平滑控制参数为 10 倍噪声;WD 的参数如下:小波变换函数为 sym7,变换尺度为 5,采用硬阈值处理<sup>[15]</sup>。分别利用 Kuwahara 滤波、NLM 和 WD 三种方法对传感图像进行处理,实验数据处理平台为 Intel® Core™ i7-6700 @ 3.4 GHz,安装内存(RAM)16.0 GB,处理软件为 MATLAB 2016a。计算得到三种方法的光纤加热段布里渊频移分布,如图 8 所示。Kuwahara 滤波可较好地保持空间分辨率不变,但在靠近跳线时产生扭曲;NLM 和 WD 两种方法都对空间分辨率产生扭曲,滤波后空间分辨率分别为 1.79 m 和 1.54 m。

为进一步对三种方法的去噪效果进行比较,取  $z = 9.3 \text{ km}$  处的布里渊增益谱进行分析,结果如表 2 所示。Kuwahara 滤波较其他两种方法可进一步提高信噪比,并降低布里渊频移误差。对于 9.4 km 长的光纤,有 58040 个空间采样点和 118 个频域采样点,图像矩阵大小为  $58040 \times 118$ ,WD 直接采用 MATLAB 软件中的小波工具箱,具有较短的计算时长;而 Kuwahara 滤波的计算时间为 NLM 的一半。因 Kuwahara 滤波中仅有一个参数可以确定,故其参数的确定较 NLM 和 WD 更为简单。

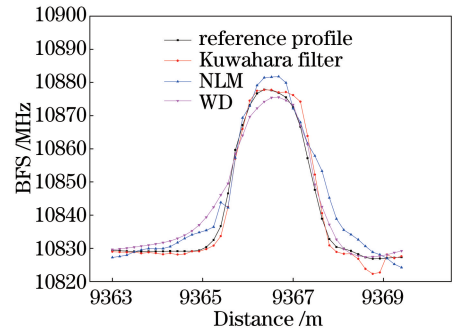


图 8 不同滤波方法下布里渊频移分布的比较  
Fig. 8 Comparison of BFS distributions under different filtering methods

表 2 不同滤波方法对布里渊增益谱的去噪效果比较  
Table 2 Comparison of denoising effects of Brillouin gain spectra under different filtering methods

Method	Amplification of SNR /dB	Decrease of BFS standard error /MHz	Processing time /s
NLM	5.2	0.44	61.6
WD	5.6	0.39	6.5
Kuwahara	6.4	0.58	32.5

## 5 结 论

利用 Kuwahara 滤波对 BOTDA 传感图像进行处理,当窗口大小合适时,可在不影响空间分辨率的情况下提高信噪比,降低布里渊频移误差。实验结果表明,Kuwahara 滤波的窗口长度应小于并接近理论空间分辨率,在不同的信噪比水平下,滤波后信噪比平均提高 6.7 dB,布里渊频移误差平均减小 0.58 MHz。该方法可在不增加 BOTDA 传感器硬件设备的情况下提高传感器性能,可用于高分辨率、中长距离传感数据的处理,同时也可用于其他类型的分布式光纤传感系统。

## 参 考 文 献

- [1] Barnoski M K, Rourke M D, Jensen S M, *et al.* Optical time domain reflectometer [J]. Applied Optics, 1977, 16(9): 2375-2379.
- [2] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [3] Farahani M A, Gogolla T. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(8):

- 1379-1391.
- [4] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W, *et al.* Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector [J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(13): 569-570.
- [5] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [6] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [7] 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.
- [8] Lopez-Higuera J M, Rodriguez C L, Quintela I A, *et al.* Fiber optic sensors in structural health monitoring [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 587-608.
- [9] Bao X, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [10] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(6): 1321-1324.
- [11] Voskoboinik A, Zhang Z Y, Almainan A, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA using simultaneous frequency domain interrogation [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations*. San Jose, California United States, 2013, CTh4H: CTh4H.5.
- [12] Soto M A, Taki M, Bolognini G, *et al.* Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using Simplex codes and optical pre-amplification[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6860-6869.
- [13] Kishida K, Li C H, Nishiguchi K. Pulse pre-pump method for cm-order spatial resolution of BOTDA [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5855: 559-562.
- [14] Brown A W, Colpitts B G, Brown K. Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1501-1503.
- [15] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10870.
- [16] He H, Shao L, Li H, *et al.* SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 1-10.
- [17] Soto G, Fontbona J, Cortez R, *et al.* An online two-stage adaptive algorithm for strain profile estimation from noisy and abruptly changing BOTDR data and application to underground mines[J]. *Measurement*, 2016, 92: 340-351.
- [18] Yan Z, Gu H M, Cai C G. Seismic image enhancement based on anisotropic diffusion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(3): 390-394. 严哲, 顾汉明, 蔡成国. 基于各向异性扩散滤波的地震图像增强处理[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(3): 390-394.
- [19] Li G M, Feng L. Image processing the enhancement of the seismic fault of method and its application[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(5): 2138-2143. 李光明, 冯磊. 基于图像信息的地震断层增强方法及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(5): 2138-2143.
- [20] Bartyzel K. Adaptive Kuwahara filter [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2016, 10(4): 663-670.
- [21] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 3rd Ed. San Diego: Academic Press, 2001: 195-211.
- [22] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying Brillouin distributed fibre sensors using image processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96342D.
- [23] Azad A K, Khan F N, Alarashi W H, *et al.* Temperature extraction in Brillouin optical time-domain analysis sensors using principal component analysis based pattern recognition [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16534-16549.
- [24] Zhang Y J, Xu J R, Fu X H. Method of Brillouin scattering spectrum character extraction based on genetic algorithm and quantum-behaved particle swarm optimization hybrid algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0205002. 张燕君, 徐金睿, 付兴虎. 基于 GA-QPSO 混合算法的 Brillouin 散射谱特征提取方法 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0205002.
- [25] Liu Y, Fu G W, Zhang Y J, *et al.* A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed

- sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0206002.
- 刘银, 付广伟, 张燕君, 等. 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0206002.
- [26] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106011
- 尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. 基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106011.
- [27] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490-530.
- [28] Papari G, Petkov N, Campisi P. Artistic edge and corner enhancing smoothing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(10): 2449-2462.