

# 光学学报

## 基于全变分辅助的相敏光时域反射技术

李钊<sup>1,2</sup>, 秦增光<sup>1,2\*</sup>, 刘兆军<sup>1,2</sup>, 徐演平<sup>3</sup>, 丛振华<sup>1,2</sup>, 渠帅<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

<sup>2</sup> 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>3</sup> 山东大学激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237

**摘要** 采用了一种基于全变分(TV)算法的信号处理方法,用于相敏光学时域反射( $\varphi$ -OTDR)系统中消除时域噪声和提高信噪比(SNR)。通过将瑞利散射曲线转换成二维灰度图像,获取了瑞利散射曲线的强度和位置信息。TV算法通过梯度下降方法可以有效地平滑时域噪声并提取有用信息。实验结果表明,在长度为 3.5 km 的传感光纤上,采用 TV 算法可以有效地实现 300 Hz 振动信号的分布式测量,振动位置的 SNR 可以达到 10.13 dB。在此基础上,进一步验证了 TV 算法对宽带振动信号的检测能力,成功实现了频率范围为 300 Hz~1 kHz 的宽带扰动信号识别。表明了 TV 算法在  $\varphi$ -OTDR 系统中可以有效地提取振动信息。

**关键词** 光纤传感; 相敏光时域反射; 全变分算法; 去噪算法; 信噪比

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1706001

## Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry Assisted by Total Variation Techniques

Li Zhao<sup>1,2</sup>, Qin Zengguang<sup>1,2\*</sup>, Liu Zhaojun<sup>1,2</sup>, Xu Yanping<sup>3</sup>, Cong Zhenhua<sup>1,2</sup>, Qu Shuai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Laser and Infrared System Integration Technology, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

**Abstract** In this paper, the signal processing method based on the total variation (TV) algorithm is used to eliminate time domain noise and improve the signal-to-noise ratio (SNR) in the phase-sensitive optical time domain reflection ( $\varphi$ -OTDR) system. Intensity and position information of the Rayleigh backscattering traces can be processed by converting the traces into a two-dimensional gray image. The TV algorithm can smooth the time domain noise and extract the useful information efficiently via the gradient descent method. Experimental results verify that on the sensing fiber with the length of 3.5 km, the TV algorithm can effectively realize the distributed measurement of 300 Hz vibration signal, and the SNR of the vibration position can realize 10.13 dB. In addition, we further verify the ability of the TV algorithm to detect wideband vibration signals, and successfully realize the wideband disturbance signal recognition in the frequency range of 300 Hz~1 kHz. It is shown that the TV algorithm can extract vibration information effectively in  $\varphi$ -OTDR system.

**Key words** optical fiber sensing; phase-sensitive optical time domain reflectometry; total variation algorithm; denoising algorithm; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 200.4560; 200.4740

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-03-05; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(62075117)、教育部联合基金(6141A02022430)、山东省重点研发计划(2019JMRH0111)、山东省自然科学基金(ZR2019MF039)

通信作者: \*qinzengguang@sdu.edu.cn

## 1 引言

近年来,分布式光纤传感技术以其具有抗电磁干扰、抗恶劣环境、高灵敏度、低成本等优点,受到了国内外研究者的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。分布式光纤传感系统主要通过监测光纤内的散射效应来获取外界环境信息,主要包括布里渊散射<sup>[5-7]</sup>、拉曼散射<sup>[8-9]</sup>和瑞利散射<sup>[10-13]</sup>。其中,基于瑞利散射的相敏光时域反射( $\varphi$ -OTDR)分布式光纤传感技术已经广泛应用于边界安全、民用基础设施健康监测、管线断点定位和入侵检测等领域<sup>[14-15]</sup>。

对于  $\varphi$ -OTDR 系统而言,通过测量光纤折射率变化引起的后向瑞利散射光的强度变化来检测外界振动事件。将窄线宽激光源的光脉冲注入到传感光纤中,在一个脉冲持续时间内从多个散射中心散射的光的干涉效应导致在后向瑞利散射迹线中出现锯齿状,通过分析沿传感光纤的瑞利后向散射轨迹的强度变化,可以实现真正的分布式测量<sup>[16]</sup>。然而,由于瑞利散射光信号较弱且容易受到外界及系统噪声的影响,采集到的瑞利散射信号包括噪声信息及外界振动信息,直接观察瑞利散射曲线一般无法得到正确的振动位置。因此,有效地去除背景噪声从而获取振动信号位置信息对扩展  $\varphi$ -OTDR 系统的应用具有非常重要的研究意义。近年来,已经报道了许多识别振动信号位置的相关研究。其中,具有代表性的是采用滑动平均和滑动差分方法来提高定位信号的信噪比<sup>[17]</sup>。小波去噪方法已被证实能够提高分布式光纤振动传感系统的振动信号的检测率与空间分辨率<sup>[18]</sup>。小波去噪在  $\varphi$ -OTDR 系统中进行振动信号检测时,在 1 km 的传感光纤上实现了频率响应为 20 Hz~8 kHz,空间分辨率为 0.5 m 的分布式光纤传感系统,但这种方法主要依赖于小波变换的基本功能,需要复杂的参数优化<sup>[19]</sup>。

上述方法主要是通过减少一维原始数据的随机噪声来提高系统性能,在不利用原始数据二维(2D)域中包含的冗余和相关性的情况下,可以获取  $\varphi$ -OTDR 系统中的振动信息。考虑  $\varphi$ -OTDR 系统获取的数据包含二维时间和位置信息结构,因此,可以通过二维方式处理原始数据从而获取振动位置信息<sup>[20-21]</sup>。

本文采用并演示了一种基于全变分算法的二维图像处理方法,以消除  $\varphi$ -OTDR 系统中的时域噪声。瑞利散射轨迹被视为 2D 图像处理,通过采用梯度下降法,可以精确地检测振动位置并提高系统

信噪比。实验结果表明,与  $\varphi$ -OTDR 系统中的其他去噪方法相比,全变分算法能够展现出较好的去噪性能。

## 2 全变分去噪原理

全变分算法的基本原理主要是基于欧拉-拉格朗日乘数约束和梯度下降法来实现噪声的最小化<sup>[22-25]</sup>。在  $\varphi$ -OTDR 系统中,可以将实验数据视为 2D 图像或矩阵,其中行向量表示  $\varphi$ -OTDR 瑞利散射信号的位置信息,列向量表示光强度的变化。假设  $m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})$  和  $x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})$  分别为有噪声和无噪声的原始信号, $y(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})$  为零均值且标准差为  $\sigma$  的随机噪声。则原始信号可写成

$$m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) = x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) + y(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}), \quad (1)$$

式中,  $\boldsymbol{\beta}$  和  $\mathbf{z}$  分别表示  $\varphi$ -OTDR 瑞利散射信号的位置信息和光强度变化。由于没有噪声的信号的全变分明显小于有噪声下的全变分,因此,将全变分优化到最小可以消除随机噪声信号。因此,在  $\varphi$ -OTDR 系统中,全变分去噪可看成最小化问题

$$\text{Min}\{T_v[x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})]\} = \int_{\epsilon} \sqrt{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})|^2} d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z} = \int_{\epsilon} \sqrt{x_{\beta}^2 + x_z^2} d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z}, \quad (2)$$

式中,  $\text{Min}$  表示求解全变分值的最小值,  $T_v$  表示全变分过程,  $\nabla$  为梯度运算符号,  $\epsilon$  表示信号域,  $(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) \in \epsilon$ ,  $x_{\beta}$ 、 $x_z$  表示信号  $x$  对  $\boldsymbol{\beta}$ 、 $\mathbf{z}$  的一阶偏导数。根据(1)式,全变分最小值  $\text{Min}\{T_v[x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})]\}$  可写成

$$\int_{\epsilon} x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z} = \int_{\epsilon} m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \int_{\epsilon} [x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) - m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})]^2 d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z} = \sigma^2, \quad (4)$$

(3)式表明噪声  $y(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})$  具有零均值。(4)式表示噪声  $y(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})$  的标准差为  $\sigma$ , 为正值,则全变分去噪问题可以表示为

$$\text{Min}\{T_v[x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})]\} = \frac{\lambda}{2} \int_{\epsilon} [x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) - m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})]^2 d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z} + \int_{\epsilon} \sqrt{x_{\beta}^2 + x_z^2} d\boldsymbol{\beta} d\mathbf{z}, \quad (5)$$

式中:右边第一项主要保留原始信号的特征;右边第二项表示正则化项; $\lambda$  为规整参数,通常用于描述函数的平滑度,它在平衡去噪中起着重要作用。欧拉-拉格朗日方程可以写成

$$\lambda [x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z}) - m(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})] - \nabla \left[ \frac{\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})}{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{z})|} \right] = 0, \quad (6)$$

式中,  $\nabla \left[ \frac{\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})}{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})|} \right]$  称为扩散项,  $\frac{1}{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})|}$  表示扩散系数。图像边缘的扩散系数较小, 因此沿边缘的扩散较弱。因此, 可以保留边缘。在图像的平滑区域, 可以通过较大的扩散系数消除噪声。

在  $\varphi$ -OTDR 系统中, 可以将实验数据处理成由瑞利散射组成的灰度图像。  $x_{i,j}$  用于表示信号  $x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})$  在像素点  $\beta_i = ih$  和  $z_j = jh$  处的灰度值。其中  $i, j = 0, 1, \dots, N, Nh = L, L$  表示信号长度,  $h$  是空间步长,  $N$  为正整数。  $x(\beta_i, z_j, t_n)$  表示第  $n$  次迭代, 可以称为  $x_{i,j}^n$ , 其中  $t_n = n \times \Delta t$ , 表示  $n$  次迭代总时长,  $\Delta t$  是一次迭代时间步长。在全变分算法中, 使用梯度下降法实现去噪, 扩散项可以表示为

$$\nabla \left[ \frac{\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})}{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})|} \right] = \frac{x_z^2 x_{\beta\beta} - 2x_{\beta z} x_z x_{\beta z} + x_{\beta}^2 x_{zz}}{x_{\beta}^2 + x_z^2}, \quad (7)$$

式中,  $x_{\beta\beta}, x_{\beta z}, x_{zz}$  表示信号  $x$  对  $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z}$  的二阶偏导数。为了实现快速去噪, 可以用差商代替偏导数

$$(x_{\beta})_{i,j}^n = x_{i+1,j}^n - x_{i-1,j}^n, \quad (8)$$

$$(x_z)_{i,j}^n = x_{i,j+1}^n - x_{i,j-1}^n, \quad (9)$$

$$(x_{\beta\beta})_{i,j}^n = x_{i+1,j}^n - 2x_{i,j}^n + x_{i-1,j}^n, \quad (10)$$

$$(x_{zz})_{i,j}^n = x_{i,j+1}^n - 2x_{i,j}^n + x_{i,j-1}^n, \quad (11)$$

$$(x_{\beta z})_{i,j}^n = x_{i+1,j+1}^n - x_{i-1,j+1}^n - x_{i+1,j-1}^n + x_{i-1,j-1}^n, \quad (12)$$

根据(6)~(12)式, 可以获得  $\varphi$ -OTDR 中离散信号的迭代方程

$$x_{i,j}^{n+1} = x_{i,j}^n - \lambda \Delta t (x_{i,j}^n - x_{i,j}^0) + \Delta t \left\{ \nabla \left[ \frac{\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})}{|\nabla x(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{z})|} \right] \right\}, \quad (13)$$

式中,  $n$  表示迭代数, 通过多次迭代后可以得到去噪信号。

### 3 实验装置及结果

$\varphi$ -OTDR 系统实验装置图如图 1 所示。光源 (laser) 为 RIO 公司窄线宽激光光源, 波长为 1550 nm, 线宽为 3 kHz, 其最大输出功率为 10 mW。光源发出的连续光经光隔离器 (ISO) 进入声光调制器 (AOM, Gooch & Housego) 调制成脉冲光, 任意函数发生器 (AFG, Tektronix AFG 31000 SERIES) 提供重复频率为 10 kHz、脉冲宽度为 50 ns 的脉冲方波信号; 再经过掺铒光纤放大器 (EDFA, 厦门彼格科技有限公司) 进行光放大, EDFA 内置滤波器, 有效滤除放大器自发辐射噪声 (ASE), 放大后的光脉冲信号经过环形器

(circulator) 进入 3.5 km 的传感光纤。后向瑞利散射光被另一个 EDFA 放大并由光电探测器 (PD, Thorlabs PDB450C-AC) 探测, 同时经高速示波器 (Oscilloscope, Tektronix MSO64) 采集。最后, 用 MATLAB 编写了振动测试的计算机程序, 并对振动位置信息进行了测量。

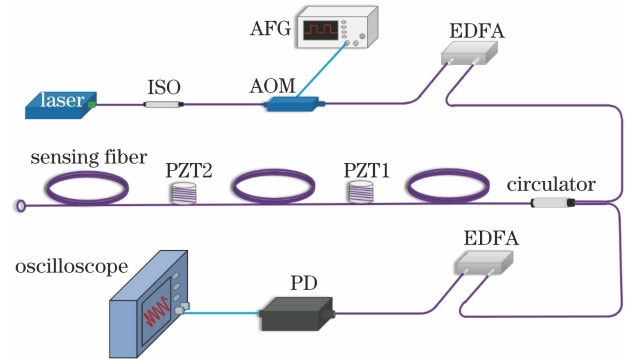


图 1  $\varphi$ -OTDR 实验装置

Fig. 1 Experimental setup of  $\varphi$ -OTDR system

在实验中, 两个压电陶瓷环 (PZT) 分别沿传感光纤放置在 1100 m 和 1300 m 处作为振动源, 传感光纤紧密缠绕在其表面。PZT 由另一个函数发生器驱动。首先对 PZT1 施加频率为 300 Hz 的振动信号, 对 PZT2 不施加振动信号。其中脉冲重复频率设置为 10 kHz, 并用高速示波器采集 1000 根后向瑞利散射信号, 所用采样率为 100 MHz。图 2(a) 给出了通过后向瑞利散射信号构造的灰度图像。在 1100 m 的振动位置附近观察到像素值的明显变化。然而, 通过对整个光纤沿线直接观察容易造成错误定位。因此, 为了寻找正确的振动位置, 通过全变分算法来抑制随机噪声。图 2(b)~图 2(d) 展示了在不同迭代次数后获得的具有位置信息的灰度图像, 可以通过去噪的灰度图像中的一条亮线轻松识别振动位置。

然后, 研究了迭代次数对去噪性能的影响, 图 3 给出了原始瑞利散射曲线和经过不同迭代次数后获得的位置信息。在图 3(a) 中, 仅根据原始数据很难识别振动。为了比较去噪效果, 用信噪比  $R_{SN}$  量化去噪性能, 其定义为

$$R_{SN} = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{V_{\text{signal}}}{X_{\text{RMS}}(V_{\text{noise}})} \right], \quad (14)$$

式中,  $V_{\text{signal}}$  和  $X_{\text{RMS}}(V_{\text{noise}})$  分别是信号的振幅和背景噪声的均方根,  $V_{\text{noise}}$  表示噪声的振幅。在图 3(b) 中,  $V_{\text{signal}} = 255, X_{\text{RMS}}(V_{\text{noise}}) = 25.18$ , 这里空间宽度取 20 m。因此当迭代次数为 10 时, 位置信息的  $R_{SN}$  为 10.05 dB。在图 3(c) 中,  $R_{SN}$  当迭代次数为

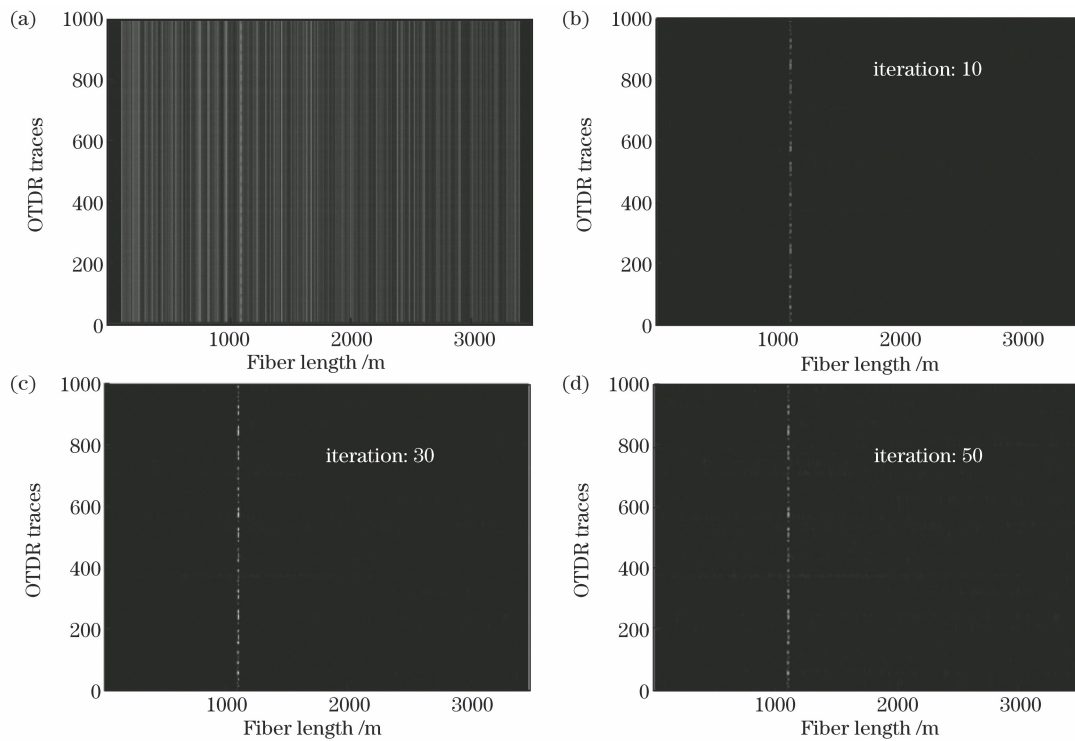


图 2 原始信号的灰度转化及迭代运算。(a)瑞利曲线构造的原始灰度图像;迭代不同次数去噪后的振动位置灰度图像,(b)迭代 10 次,(c)迭代 30 次,(d)迭代 50 次

Fig. 2 Gray scale transformation and iterative operation of original signal. (a) Original gray image constructed via consecutive Rayleigh curves; denoised gray images with single bright line indicating position information obtained after different iteration times, (b) 10 iteration times, (c) 30 iteration times, (d) 50 iteration times

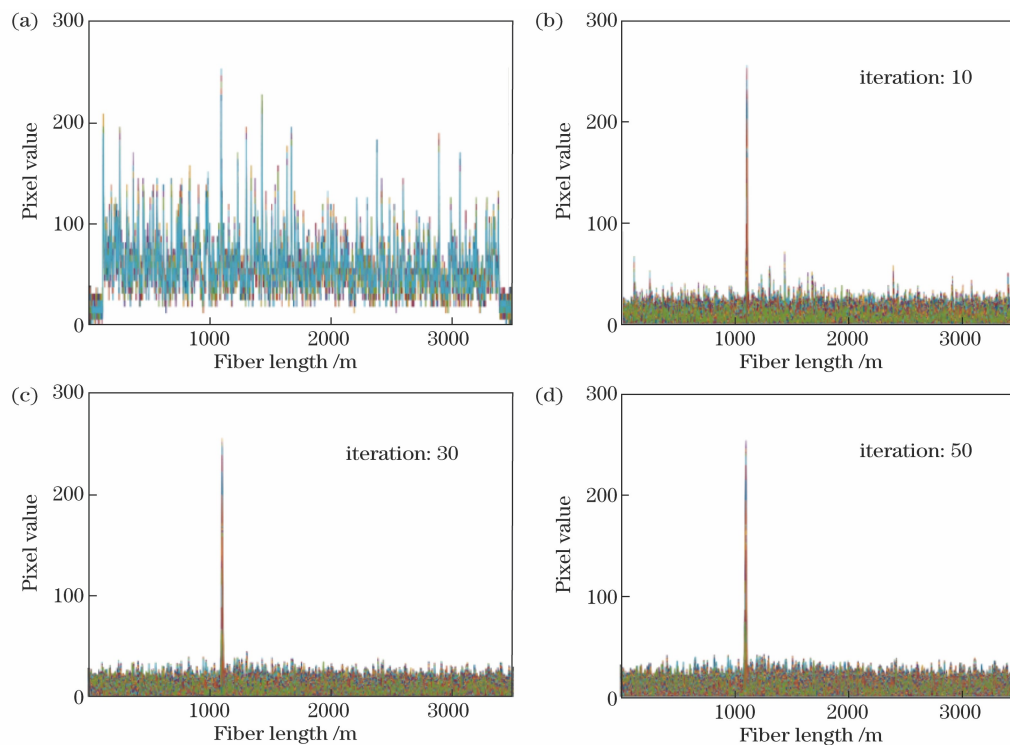


图 3 原始信号与迭代不同次数的定位情况。(a) 原始后向瑞利散射轨迹;迭代不同次数后得到的位置信息,(b)迭代 10 次,(c)迭代 30 次,(d) 迭代 50 次

Fig. 3 Location of original signal and after different iteration times. (a) Original Rayleigh backscattering traces; position information obtained after different iteration times, (b) 10 iteration times, (c) 30 iteration times, (d) 50 iteration times



30 时,位置信息的数量增加到 10.13 dB。根据图 3 (d),随着迭代次数增加到 50,位置信息的  $R_{SN}$  为 9.70 dB,这是由于迭代次数的增加在消除噪声的同时也会造成振动信息的丢失。

为了分析全变分去噪算法的可行性,将其与滑动平均和滑动差分算法<sup>[12]</sup>、非局部均值法<sup>[15]</sup>进行了比较。图 4 给出了通过三种不同方法进行去噪的

结果。在图 4(a)中,通过滑动平均和滑动差分得到的位置信息的  $R_{SN}$  为 7.78 dB。在图 4(b)中,采用非局部均值法时,位置信息的  $R_{SN}$  为 7.77 dB。在图 4(c)中,当迭代次数为 30 时,基于全变分算法的位置信息的  $R_{SN}$  高达 10.13 dB。因此,全变分算法可以有效地应用于  $\varphi$ -OTDR 系统获取振动位置信息。

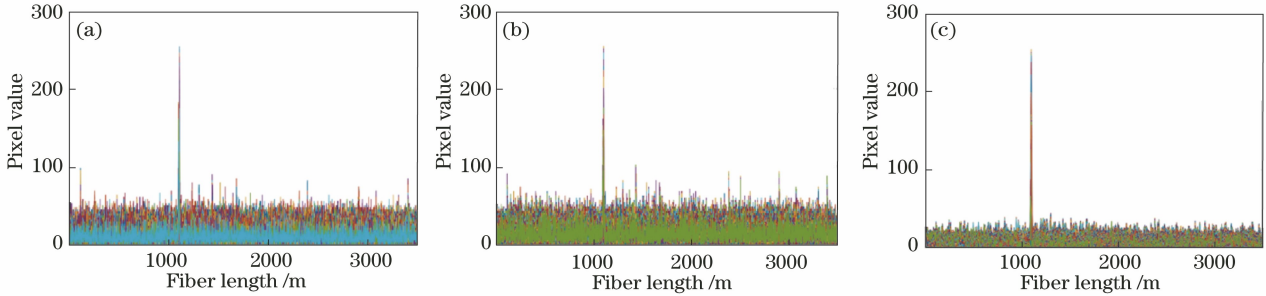


图 4 不同去噪方法处理 300 Hz 的检测结果。(a)滑动平均和滑动差分法;(b)非局部均值法;(c)全变分算法

Fig. 4 Vibration detection of 300 Hz processed by different denoising methods. (a) Moving average and moving differential method; (b) nonlocal mean method; (c) total variation algorithm

在  $\varphi$ -OTDR 系统中,空间分辨率也是表征系统性能的一个重要参数。系统的理论空间分辨率是由脉冲宽度决定的,可用  $S = T \times c / (2n_c)$  表示,其中  $T$  为光脉冲宽度, $c$  为真空中的光速, $n_c$  是光纤纤芯的有效折射率。在实验中使用脉冲宽度为 50 ns,对应理论空间分辨率为 5 m。在图 5 中,给出了滑动平均

和滑动差分法、非局部平均法和全变分算法的空间分辨率,定义为上升沿的 10%~90% 对应的光纤长度。其中滑动平均和滑动差分法对应 6 m 的空间分辨率,非局部均值法对应 6 m 的空间分辨率,全变分算法对应 5.5 m 的空间分辨率。可以看出,全变分算法得到的空间分辨率相对另外两种对比算法要好。

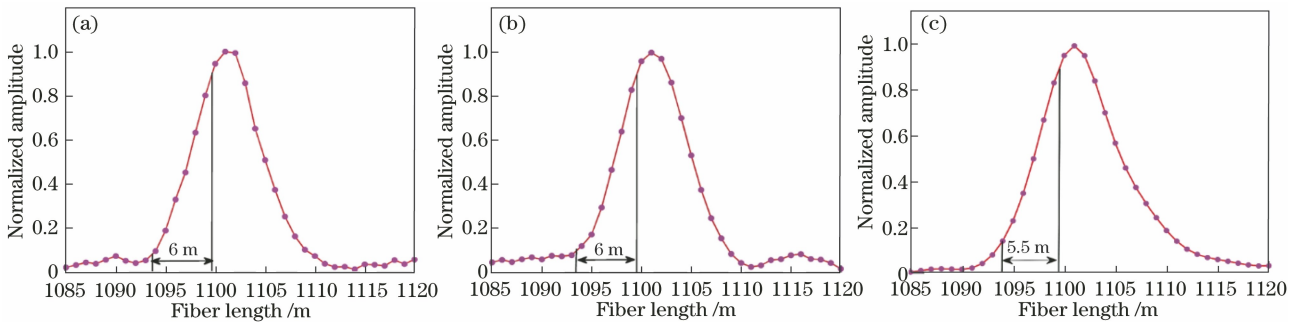


图 5 三种方法对应的空间分辨率。(a)滑动平均和滑动差分法;(b)非局部均值法;(c)全变分算法

Fig. 5 Spatial resolution of the three methods. (a) Moving average and moving differential method; (b) nonlocal mean method; (c) total variation method

图 6 显示了通过在振动位置应用傅里叶变换得出的振动事件的功率谱。振动位置的频率为 300 Hz,与施加到 PZT1 的振动信号一致。

此外,为了验证全变分算法具有多点检测的能力,将频率为 300 Hz 的振动信号应用于 PZT1,频率为 500 Hz 的振动信号应用于 PZT2。使用滑动平均和滑动差分法、非局部均值法与全变分算法同时测量的结果如图 7 所示。与振动位置相对应,图中在 1100 m 和 1300 m 处有两个明显的峰值。与其他两种方法相比,全变分算法显著提高了振动

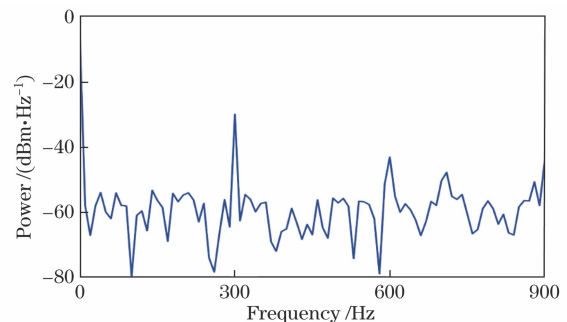


图 6 PZT1 处振动事件的频率信息

Fig. 6 Frequency information of the vibration event at PZT1

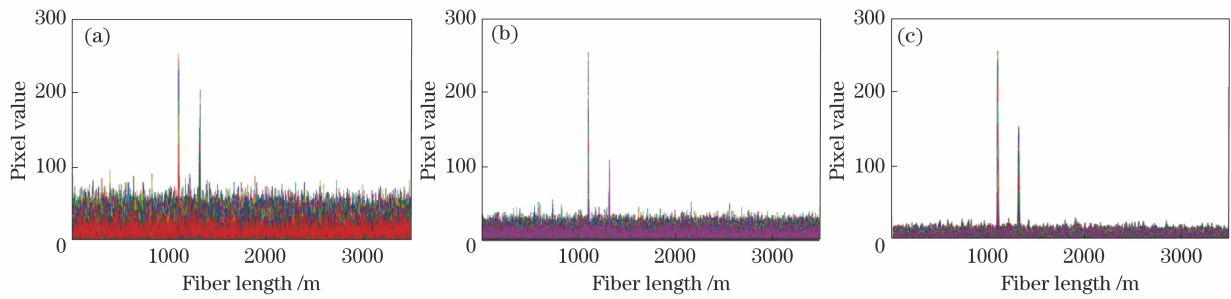


图 7 不同检测方法得到的 PZT1 和 PZT2 的振动位置信息。(a)滑动平均和滑动差分法;(b)非局部均值法;(c)全变分算法  
Fig. 7 Location information for detection of two PZTs' vibrations by different methods. (a) Moving average and moving differential method; (b) nonlocal mean method; (c) total variation algorithm

位置信息的信噪比。同时,全变分算法也具有在实际应用中测量多个振动位置的能力。

图 8 通过应用傅里叶变换分别给出了振动位置处 300 Hz 和 500 Hz 振动事件的功率谱,这与施加到 PZT1 和 PZT2 的振动信号一致。

最后,由于在实际场合中振动频率具有一定的随机性和多样性等特点,为了验证全变分算法对多频扰动信号的适应性,进行了多频扰动信号的实验测量。

在 1000 m 位置处给出了一个 300 Hz~1 kHz 的宽带扰动信号,并通过全变分算法对信号进行振动定位及频谱分析,得到的结果如图 9 所示。从图 9(a)可以看出,在 1000 m 位置处有一个明显的峰值,这与实际振动位置相对应,可见全变分算法也能够准确定位宽频的振动信号。图 9(b)显示了振动位置处扰动信号的频率信息,与施加的振动信号一致。由此可见,该方法同样能够适用多频扰动信号的测量。

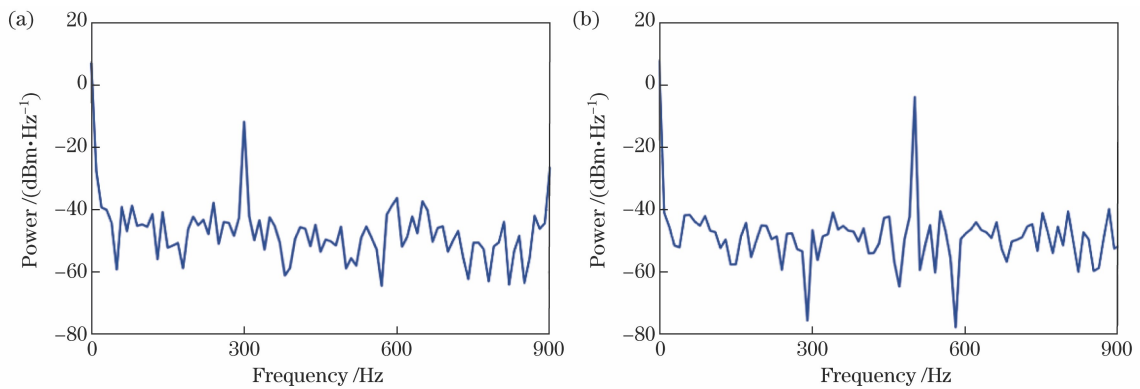


图 8 振动事件频率信息。(a) PZT1;(b) PZT2

Fig. 8 Frequency information for the vibration events. (a) PZT1; (b) PZT2

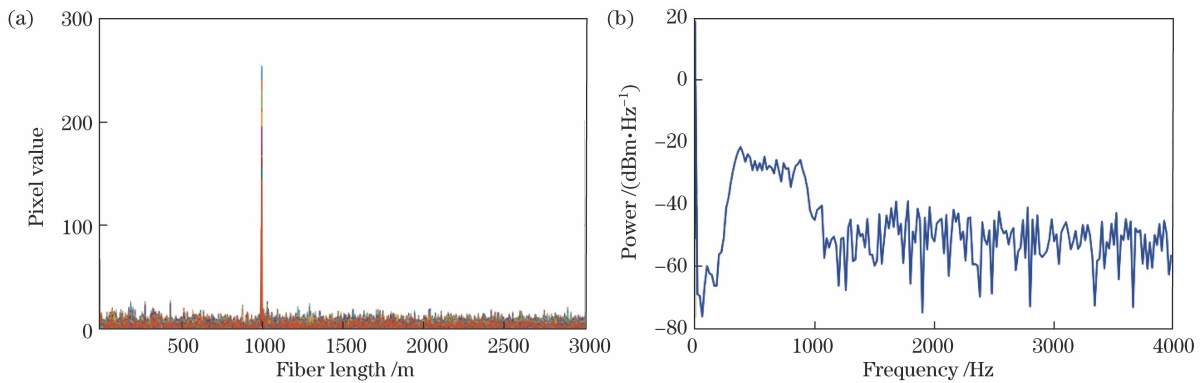


图 9 全变分算法对宽带信号的处理结果。(a)振动定位信息;(b)宽带信号频谱信息

Fig. 9 Results of total variation algorithm for wideband signal processing. (a) Location information of vibration; (b) information of wideband signal spectral

## 4 结 论

在  $\varphi$ -OTDR 系统中采用了一种基于全变分算法的 2D 去噪算法, 基于欧拉-拉格朗日乘数约束和梯度下降法, 以实现噪声的最小化。使用不同的迭代次数和去噪方法研究振动位置处的 SNR。与其他已知的去噪技术相比, 该方法具有更好的去噪性能, 该技术在 3.5 km 长的传感光纤中检测到 300 Hz 的振动事件。同时检验了全变分算法对宽带振动信号的探测能力, 其可以检测到 300 Hz ~ 1 kHz 的宽频带的扰动信号。与两种常规方法相比, 该方法具有更大的潜力和优越性, 可应用于分布式光纤传感系统。

## 参 考 文 献

- [1] Lou X T, Feng Y B, Chen C, et al. Multi-point spectroscopic gas sensing based on coherent FMCW interferometry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 9014-9026.
- [2] Masoudi A, Newson T P. Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 011501.
- [3] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.
- [4] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104002.  
盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的  $\Phi$ -OTDR 实时信号处理系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104002.
- [5] Dong Y K, Ba D X, Jiang T F, et al. High-spatial-resolution fast BOTDA for dynamic strain measurement based on differential double-pulse and second-order sideband of modulation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 2600407.
- [6] Peled Y, Motil A, Yaron L, et al. Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 19845-19854.
- [7] Song M P, Bao C, Qiu C, et al. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 650-654.
- [8] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over >100 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [9] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ $\Phi$ -OTDR[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 976.
- [10] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [11] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [12] Feng K B, Song M P, Xia Q L, et al. High-resolution distributed optical-fiber sensing technology based on direct-detecting coherent optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0106002.  
冯凯滨, 宋牟平, 夏俏兰, 等. 基于直接检测相干光时域反射计的高分辨率分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0106002.
- [13] Li L C, Lu B, Wang X, et al. Internally modulated chirped pulse based direct detection type  $\varphi$ -OTDR system with high signal-to-noise ratio and low cost[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806003.  
李鲁川, 卢斌, 王校, 等. 基于内调制啁啾脉冲的高信噪比低成本直接探测型  $\varphi$ -OTDR 系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0806003.
- [14] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity  $\Phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [15] Ren M Q, Lu P, Chen L, et al. Theoretical and experimental analysis of  $\Phi$ -OTDR based on polarization diversity detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 697-700.
- [16] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [17] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [18] Cui H L, Liu Y, Yu M, et al. Application of wavelet

- denoising in distributed optical fiber interferometric vibration detection and location system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 71-76.
- 崔洪亮, 刘野, 于森, 等. 小波降噪在分布式光纤干涉振动检测及定位系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z): 71-76.
- [19] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.
- [20] Zhu T, Xiao X H, He Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in  $\varphi$ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [21] 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.
- [22] Bai Y J, Liu Y, Zhang Q, et al. Image denoising via an improved non-local total variation model[J]. *The Journal of Engineering*, 2018, 2018(8): 745-752.
- [23] Zhou D B, Li G, Wang D J, et al. Method of destriping stripe noise of aerial images based on total variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1128003.
- 周达标, 李刚, 王德江, 等. 基于全变分的航空图像条带噪声消除方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1128003.
- [24] Zhang H Y, Peng Q C. Adaptive image denoising model based on total variation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3): 50-53.
- 张红英, 彭启琮. 全变分自适应图像去噪模型[J]. *光电工程*, 2006, 33(3): 50-53.
- [25] Liu W, Wu C S, Xu T. Adaptive total variation model for image denoising with fast solving algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(12): 4797-4800.
- 刘文, 吴传生, 许田. 自适应全变分图像去噪模型及其快速求解[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(12): 4797-4800.