

基于改进压缩感知技术的 Φ -OTDR 系统研究

程亚楠¹ 万生鹏^{1,2} 吕伟龙¹ 张治胜¹ 万东辉¹ 喻俊松²

(1. 南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室 南昌 330063;

2. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要:研究了一种基于改进压缩感知技术的相敏光学时域反射计(phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)系统。对于压缩感知技术,信号稀疏度 K 直接影响信号恢复的质量。为了提高信号恢复的质量,应该获得更接近原始信号的真实稀疏性度 K 。因此,提出了一种基于硬阈值的信号稀疏度 K 的计算方法,同时,采用结合收缩阈值的重构方法,尽可能保留信号的有效成分。实验结果表明,振动频率为 1 kHz 的正弦振动信号在 5.6 km 的距离处被成功地重建。与常用的硬阈值压缩传感技术、移动平均去噪技术和 Sym8 小波去噪技术相比,所提出的压缩感知技术的信噪比分别提高了 3.55、13.2 和 8.02 dB。

关键词:相敏感光时域反射计;压缩感知;稀疏度;光纤传感器;信号重构

中图分类号: TN247;TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Phase sensitive OTDR system based on improved compressed sensing technology

Cheng Ya'nan¹ Wan Shengpeng^{1,2} Lv Weilong¹ Zhang Zhisheng¹ Wan Donghui¹ Yu Junsong²

(1. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Optoelectric Sensing Technology and Application, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: A phase sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) system based on improved compressed sensing technology is studied. For compressed sensing technology, signal sparsity K directly affects the quality of signal recovery. In order to improve the quality of signal recovery, K value that is closer to the real sparsity of the original signal should be obtained. Therefore, a method of calculating signal sparsity K based on hard threshold is proposed in this paper. At the same time, the reconstruction method combined with contraction threshold is used to preserve the effective components of the signal as much as possible. The experimental results show that the sinusoidal vibration signal with vibration frequency of 1 kHz is reconstructed successfully at a distance of 5.6 km. Compared with the common hard threshold compression sensing technology, moving average denoising technology and Sym8 wavelet denoising technology, the SNR of compressed sensing technology in this paper is improved by 3.55, 13.2 and 8.02 dB, respectively.

Keywords: phase sensitive optical time domain reflectometer; compressed sensing; sparsity; optical fiber sensor; signal reconstruction

0 引言

分布式光纤传感技术已成为光纤传感的重点研究方向之一^[1-3]。相敏光学时域反射计(phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)系统通过测量后向

瑞利散射光的相位变化来实现对扰动信号的传感, Φ -OTDR 凭借其优异的频率响应特性,已成为分布式光纤传感的重要方向之一^[4],并在周界安全^[5]、油气管道安全监测^[6]、大型结构健康监测^[7]等方面具有重要应用。

对于 Φ -OTDR 系统,信号相对较弱,系统容易受到环

境噪声、电路噪声和光源噪声的影响,因此 Φ -OTDR 系统的信噪比较低。为了提高信噪比,研究人员已经提出了各种去噪的方法^[8-10]。随着分布式光纤传感系统性能指标的不断提高,系统在单位时间内获得的传感节点数量和传感数据量将显著增加。巨大的数据量给后续的数据存储、实时传输和处理带来巨大压力。因此,对于分布式光纤传感系统来说,数据压缩具有重要意义。

压缩感知技术可以通过稀疏处理来压缩数据^[11]。同时,利用噪声信号不存在稀疏域的特性,重构后的信号可以达到较好的去噪效果。作为一种可以打破奈奎斯特采样定理限制的算法,压缩感知技术已广泛应用于各个领域^[12-15]。基于压缩感知的稀疏重构去噪已广泛应用于信号和图像的去噪^[16-18]。

近年来,压缩感知技术在分布式光纤传感中的应用也引起了广泛关注。Zhou 等^[19]提出了一种基于压缩感知技术的布里渊光学时域分析方法。布里渊频谱在其离散余弦变换域具有稀疏表示的形式,通过正交匹配追踪(Orthogonal matching pursuit, OMP)算法可以在少量测量值的情况下以高概率成功将信号恢复,该研究表明,对于扫描间隔为 1 MHz 的分布式布里渊光纤传感系统,采用压缩感知后所需的频率采集量仅为传统系统的 30%。Qu 等^[20]提出了一种基于压缩感知技术的光频域反射计(optical frequency domain reflectometer, OFDR)振动传感系统的多频率亚奈奎斯特采样方法。该方法能够以亚奈奎斯特采样方式改善 OFDR 系统的频率响应范围,重建更高频率的稀疏振动信号,为扩展分布式振动传感系统的频率响应范围提供了一种新的思路。Qu 等^[21]利用压缩感知对瑞利散射信号进行压缩,引入阈值规则确定稀疏性,利用 OMP 算法实现信号重构,提高了信号的信噪比,并压缩了数据。

本文研究了基于压缩感知原理的 Φ -OTDR 系统。后向瑞利散射原始信号通过稀疏矩阵进行压缩,利用噪声不存在稀疏域的特性,提出了一种计算信号稀疏度 K 的新方法,重构信号具有良好的去噪效果,提高了信噪比。

1 理论分析及系统设计

1.1 Φ -OTDR 系统原理

当传感光纤某区域发生扰动时,由于热光效应和弹光效应,该区域内光纤的折射率、密度及散射点之间的距离将发生变化,光场相位随传播距离不再线性变化,从而引起该区域内后向瑞利散射光的相位发生变化,进而导致后向瑞利散射光功率将随之发生变化。通过解调后向瑞利散射光的相位和功率变化,即可获取扰动信息^[22]。

Φ -OTDR 系统的后向瑞利散射模型如图 1 所示,假定有 N 个后向瑞利散射点在 ΔL 长度的光纤上,它们偏振相同且独立,那么这 N 个后向瑞利散射点组成的矢量和为:

$$r e^{j\phi} = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\varphi_i} \quad (1)$$

式中: r 为振幅向量和; ϕ 为相位向量和; a_i 为第 i 个点的振幅; φ_i 为第 i 个点的相位。 r 和 ϕ 的概率密度函数表示为:

$$P(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r > 0 \quad (2)$$

$$P(\phi) = \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi < \phi < \pi \quad (3)$$

式中: σ^2 为常数。 r 和 ϕ 满足了均匀分布和瑞利分布,若脉宽为 $N\Delta L$,那么后向瑞利散射点的干涉场记为:

$$E_s(N\Delta L) = E_0 \sum_N p_i r_i e^{j(\varphi_i + \theta_i)} e^{-a_i \Delta L} \quad (4)$$

式中: p_i 和 r_i 分别表示第 i 个后向瑞利散射点的偏振态和反射率; φ_i 是第 i 个后向瑞利散射点的初始相位; θ_i 表示外界振动造成第 i 个后向瑞利散射点改变的相位。

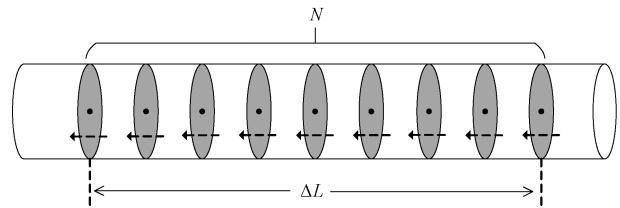


图 1 Φ -OTDR 系统的后向瑞利散射模型

图 2 所示为 Φ -OTDR 系统结构示意图,由激光器发出的光经过脉冲调制器形成相同频率的脉冲光,经过掺铒光纤放大器对光信号进行放大后流向环形器后进入光纤中,由光产生的后向瑞利散射光通过环形器,使用光电探测器接收,转换为电信号,使用采集卡采集信号,最后把数据导入到计算机,调制解调出所需要的物理特征量。

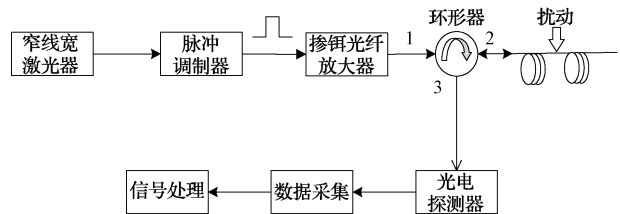


图 2 Φ -OTDR 系统结构示意图

将 Φ -OTDR 不同时刻的后向瑞利散射光干涉光强曲线做差,差值曲线上光干涉信号发生剧烈变化的位置,就对应发生扰动的位置,计算方法如下:

$$z = c \Delta t / 2n \quad (5)$$

式中: z 表示扰动发生的位置; c 表示真空中的光速; n 表示光纤中的折射率; Δt 表示系统发出脉冲与探测器接收到后向瑞利散射信号之间的时间差。

1.2 压缩感知处理信号过程

在压缩感知技术中,一个给定有限长度的一维离散时间信号 \mathbf{X} 可以视为在 \mathbf{R}^N 空间的 $N \times 1$ 向量。通过稀疏变换后,信号 \mathbf{X} 可以表示成 $N \times N$ 的稀疏矩阵和 $N \times 1$ 的稀疏系数的乘积。信号可以表示为:

$$X = \Psi S \tag{6}$$

式中： Ψ 和 S 分别表示为稀疏矩阵和稀疏系数。稀疏矩阵中的每一列都是稀疏域的一组标准正交基。 S 和 X 是同一信号的等价表示， X 是信号的时域表示，而 S 是信号在稀疏矩阵中的表示。当 S 中元素只有 K 个非零元素时，称信号在 Ψ 内是 K 阶稀疏的。如果 S 中的非零数远小于 N ，则信号是可以压缩的。利用与稀疏矩阵无关的观测矩阵对信号 X 进行线性变换，得到观测向量 Y 。然后利用最优解的方法对观测向量进行高概率的重构，表示如下：

$$Y = \Phi X = \Phi \Psi S = \Theta S \tag{7}$$

式中： Y 为一个 $K \times 1$ 大小的矩阵，代表了压缩后的信号； Φ 为 $K \times N$ 大小的观测矩阵，对应采样过程，把高维信号 X 投射到低维空间； Θ 为传感矩阵，大小为 $K \times N$ 。由此，信号 X 可以通过 Y 进行传输和存储^[23]。最后利用重构算法对信号进行重构，得到重构信号 X 。

信号 X 在某个空间存在稀疏性是实现压缩感知技术的首要条件，但是在实际应用中，不存在完全稀疏的信号，由此只能通过稀疏变换来近似的满足稀疏性的条件，即经过稀疏变换以后，只有 K 个元素的值要远远大于剩余的其他元素的值，且 $K \ll N$ 。目前，应用于压缩感知原理中常见的稀疏矩阵有离散正弦变换矩阵，离散余弦变换矩阵，离散傅里叶变换矩阵，离散小波变换矩阵，冗余字典等。

2005年，Candès等^[24]提出了等距约束性条件(restricted isometry property, RIP)，RIP条件能够评估一个矩阵能否作为观测矩阵应用于压缩感知技术，其描述为：

$$1 - \epsilon \leq \frac{\|\Theta v\|_2}{\|v\|_2} \leq 1 + \epsilon \tag{8}$$

式中： $0 < \epsilon < 1$ ； v 是任意的 K 阶稀疏的信号； $\|\cdot\|_2$ 表示求解2-范数。实际应用中，通过式(8)来判断一个矩阵能否作为观测矩阵是比较繁琐的，于是，Baraniuk^[23]又证明了RIP的等价条件是观测矩阵和稀疏矩阵不相关。相关性的定义为：

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{n} \max_{1 \leq k, j \leq n} (\Phi, \Psi) \tag{9}$$

其中， μ 的范围为 $\mu(\Phi, \Psi) \in [1, \sqrt{n}]$ ， μ 越小， Φ 和 Ψ 越不相关。

目前，高斯随机矩阵、伯努利矩阵、部分傅里叶变换矩阵和部分哈达玛矩阵等都被证明满足RIP条件。压缩感知处理信号过程如图3所示。

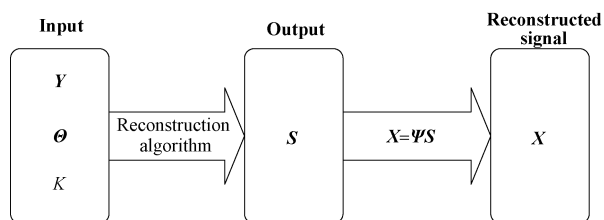


图3 压缩感知处理信号过程

2 实验及结果分析

系统结构如图4所示。窄线宽激光器(NLL)发出的光经过隔离器(ISO)后进入声光调制器(AOM)被调制成脉冲光，脉冲光经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后，通过光环行器进入传感光纤。携带干扰信号的后向瑞利散射信号从环形器进入非平衡马赫曾德尔干涉仪。为了实现相位解调，采用了由3 dB耦合器和3×3耦合器组成的非平衡马赫曾德尔干涉仪。来自3×3耦合器的任意两个光信号进入各自的光电探测器，然后通过数据采集卡(data acquisition, DAQ)传输到计算机。

NLL线宽小于3 kHz，输出功率为50 mW，工作波长为1 550 nm。AOM的输出脉宽为50 ns，重复频率为10 kHz。压电陶瓷(piezoelectric, PZT)被放置在总长为9 km传感光纤的5.6 km处。

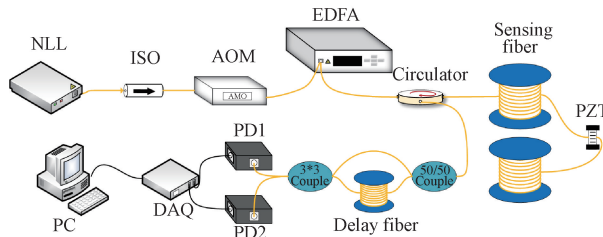


图4 基于3×3耦合器 Φ -OTDR系统结构

在PZT上施加频率为1 kHz、振幅为2 V的余弦振动信号，得到沿光纤的原始瑞利散射曲线，将数据归一化后得到瑞利后向散射曲线组成的位置信息如图5所示。

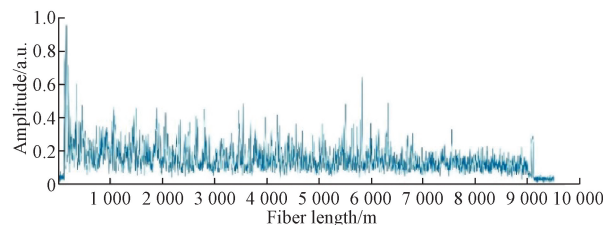


图5 瑞利后向散射曲线组成的位置信息

对于任何信号，总可以找到一个域使该信号在这个域中表现稀疏，而噪声不具备这个特性。因此，通过压缩再还原的方式可以在保留信号的同时丢失大部分的噪声分量，从而达到较好的去噪效果，进而还原光纤上的振动信号。

利用高斯随机矩阵 Φ 作为观测矩阵、离散傅里叶变换矩阵 Ψ 为稀疏矩阵，当观测矩阵和稀疏矩阵确定之后，重构结果的好坏与稀疏度 K 有着直接关系， K 值越接近信号真实的稀疏度，重构信号则越接近原始的振动信号。

通常情况下，采取一种阈值法来得到一个近似的 K 值^[25-26]，阈值定义如下：

$$T = \sigma \sqrt{2 \lg N} / 2 \tag{10}$$

式中： σ 指的是噪声的标准差； N 指的是信号的长度。当采用离散傅里叶矩阵将信号转换到傅里叶域中，元素大于阈值 T 的个数记作 K 值。压缩感知信号重构通常采用贪婪迭代算法，可以将压缩后的信号恢复为携带有用信息的信号。OMP^[27]属于贪婪迭代算法的一种，这种算法可以用于信号的重构，该类算法的基本原则是通过迭代寻找稀疏向量的支撑集，利用信号与原子字典之间的联系测量原子，并且使用受限支撑最小二乘估计来还原信号。将上述得到的 K 值代入到 OMP 算法中，就得到重构的结果。

但是这种阈值法所求出的 K 与信号实际的稀疏度存在偏差，用此 K 值作为稀疏度来重构信号往往效果一般。于是本文提出了一种 K 值的新计算方法，其步骤如下。

1) 求出阈值 T ，将信号 \mathbf{X} 转换到傅里叶域中，元素大于阈值 T 的个数记作 K_0 ；

2) $K_s = [K_0 - 250, K_0 + 250]$ 代入 OMP 算法进行循环，求得 $\hat{\mathbf{S}}$ ；

3) 求出 $\hat{\mathbf{S}}$ 的离散傅里叶逆变换矩阵 $\hat{\mathbf{S}}^{-1}$ ，信号 \mathbf{X} 的转置 \mathbf{X}^T 减去 $\hat{\mathbf{S}}^{-1}$ 并求出其结果的 2-范数，即 $\|\mathbf{X}^T - \hat{\mathbf{S}}^{-1}\|_2$ ；

4) 求出 $\|\mathbf{X}^T - \hat{\mathbf{S}}^{-1}\|_2$ 最小值时的 K_s ，则 $K = K_s$ 。

另外，本文结合了收缩阈值重构算法，以尽可能多的保留信号分量。将利用上述方法求得的 K 值代入 OMP 算法中，得到重构结果，并且将多迭代两次，多出来的部分乘以一个收缩系数，将这两部分求和，认为是最终的去噪结果。定义如下：

$$\hat{\mathbf{S}} = \hat{\mathbf{S}}_1 + \eta \cdot \hat{\mathbf{S}}_2 = \text{OMP}(\mathbf{Y}, \boldsymbol{\Theta}, K) + \eta \text{OMP}(\mathbf{Y}, \boldsymbol{\Theta}, K^*) \quad (11)$$

式中： η 表示收缩系数，这里取 0.05； $K^* = 2$ ，为多迭代的次数。至此，压缩感知去噪的过程原理如图 6 所示。

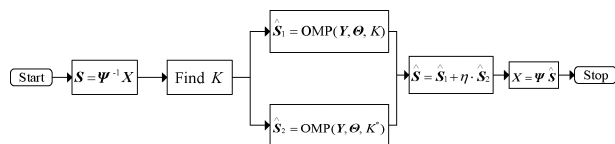


图 6 压缩感知去噪过程

将原始信号作为信号 \mathbf{X} 代入采用硬阈值法求 K 的压缩感知算法，以及代入本文提出的改进方法求 K 且结合收缩阈值重构的压缩感知算法，得到的位置信息分别如图 7 和 8 所示。

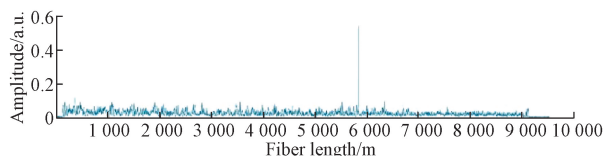


图 7 硬阈值求 K 的压缩感知去噪后的位置信息

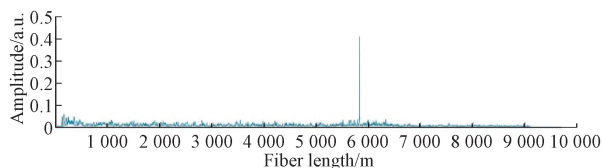


图 8 改进方法求 K 结合收缩阈值重构的压缩感知去噪后的位置信息

基于硬阈值求 K 方法的压缩感知信噪比为 13.14 dB，本文提出方法的信噪比为 16.69 dB。同时，还研究了移动平均去噪和 Sym8 小波去噪。去噪效果分别如图 9 和 10 所示。

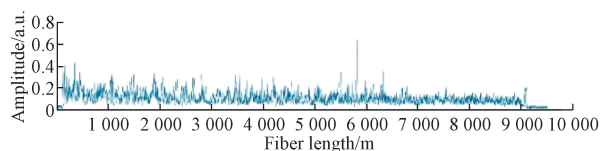


图 9 移动平均去噪的位置信息

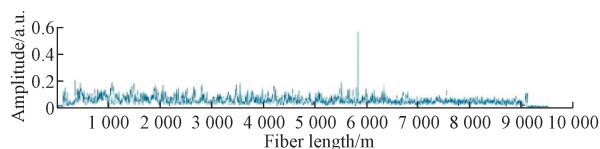


图 10 Sym8 小波去噪的位置信息

根据基于 3×3 耦合器的无源零差相位解调技术，恢复的振动信号时域波形如图 11 所示。恢复信号的频谱信息如图 12 所示，可以看出振动信号分量的频率峰值远大于其他高次谐波分量，扰动信号的频率为 1 kHz，与 PZT 产生的振动信号一致。

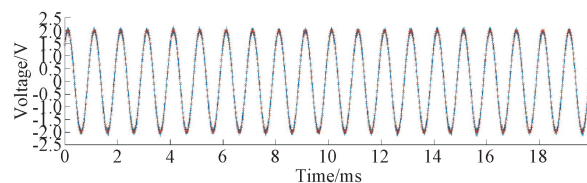


图 11 还原出的信号(—)和实际信号(×)

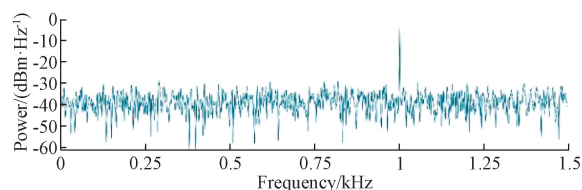


图 12 扰动信号频谱

实验表明，在硬阈值计算粗糙稀疏度的基础上，本文方法可以得到更接近信号真实稀疏度的 K 值，并结合收

缩阈值重构方法对恢复的信号进行优化。恢复后的数据可以检测到长 9 km 光纤上 1 kHz 的振动事件。与基于硬阈值的稀疏性 K 值相比,信噪比提高了 3.55 dB。

3 结论

本文根据压缩感知的特点提出了一种优化 K 值的计算方法。实验表明,在采用硬阈值求出一个大致稀疏度的基础上,通过本文的计算方法可以求得更接近信号真实稀疏度的 K 值,并且结合一种收缩阈值的重构方式进行了重构信号的优化,重构所得到的数据可以明显检测出在 9 km 的光纤长度上 1 kHz 振动事件,信噪比达到 16.69 dB,与基于硬阈值的稀疏性 K 值相比,信噪比提高了 3.55 dB。

参考文献

- [1] LI J, WANG Y, WANG P, et al. Pattern recognition for distributed optical fiber vibration sensing: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10): 11983-11998.
- [2] LIU S, SHAO L, YU F H, et al. Quantitative demodulation of distributed low-frequency vibration based on phase-shifted dual-pulse phase-sensitive OTDR with direct detection [J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 10096-10109.
- [3] BAO X, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [4] TEJEDOR J, MACIAS-GUARASA J, MARTINS H F, et al. Real field deployment of a smart fiber-optic surveillance system for pipeline integrity threat detection: Architectural issues and blind field test results [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 36(4): 1052-1062.
- [5] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等.基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J].*电子测量与仪器学报*,2020,34(9):153-159.
- [6] PENG F, WU H, JIA X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [7] FILOGRANO M L, RIZIOTIS C, KANDYLA M. A low-cost phase-OTDR system for structural health monitoring: Design and instrumentation [J]. *Instruments*, 2019, 3(3): 46.
- [8] 管彦周,万生鹏,程亚楠,等.基于移动方差平均算法的相位敏感光时域反射计去噪算法研究[J].*仪器仪表学报*,2022,43(10):233-240.
- [9] MA Q, GAO X, GAO Y, et al. A study on noise reduction of Φ -OTDR system based on VSS-NLMS algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7648-7656.
- [10] CHEN W, MA X, MA Q, et al. Denoising method of the Φ -OTDR system based on EMD-PCC [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(10): 12113-12118.
- [11] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [12] CANDES E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies? [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [13] CANDÈS E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on information theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [14] CANDES E, ROMBERG J. Sparsity and incoherence in compressive sampling [J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969.
- [15] CANDÈS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [16] ELAD M, AHARON M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(12): 3736-3745.
- [17] PROTTER M, ELAD M. Image sequence denoising via sparse and redundant representations [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 18(1): 27-35.
- [18] ZHU L, ZHU Y, MAO H, et al. A new method for sparse signal denoising based on compressed sensing[C]. *Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*. IEEE, 2009, 1: 35-38.
- [19] ZHOU D P, PENG W, CHEN L, et al. Brillouin optical time-domain analysis via compressed sensing [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5496-5499.
- [20] QU S, QIN Z, XU Y, et al. Distributed sparse signal sensing based on compressive sensing OFDR [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3288-3291.
- [21] QU S, CHANG J, CONG Z, et al. Data compression and SNR enhancement with compressive sensing method in phase-sensitive OTDR [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 97-103.
- [22] MARIE T F B, BIN Y, DEZHI H, et al. Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on Φ -OTDR: A

- review [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16428-16442.
- [23] BARANIUK R G. Compressive sensing [lecture notes] [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [24] CANDÈS E J, TAO T. Decoding by linear programming [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [25] STANKOVIĆ S, OROVIĆ I, STANKOVIĆ L. An automated signal reconstruction method based on analysis of compressive sensed signals in noisy environment [J]. Signal Processing, 2014, 104: 43-50.
- [26] BAJČETA M, RADEVIĆ M. A method for signal denoising based on the compressive sensing reconstruction[C]. 2015 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2015: 311-314.
- [27] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from

random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.

作者简介

- 程亚楠, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。
E-mail: 446893027@qq.com
- 万生鹏, 博士, 教授, 主要研究方向为光纤传感器。
E-mail: sp_wan@163.com
- 吕纬龙, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。
E-mail: 1659888093@qq.com
- 张治胜, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。
E-mail: 1932612997@qq.com
- 万东辉, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。
E-mail: 1015713990@qq.com
- 喻俊松, 博士, 讲师, 主要研究方向为光纤传感器和结构健康监测。
E-mail: 70940@nchu.edu.cn