

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208868

基于 EEMD—小波阈值的分布式测温系统的研究^{*}

黄健 宋树祥 杨军 黎标幸 周龙 徐隆 龙彪

(广西师范大学电子工程学院 桂林 541004)

摘要: 在分布式拉曼测温系统中,所包含的温度信息的反斯托克斯光比较微弱,容易被噪声掩盖,且传统的去噪方法容易滤除掉系统的原始特征,因此针对上述问题,本文采用 EEMD 结合小波阈值降噪的去噪方法,在保留信息原始特征的情况下,极大的提高系统的信噪比(SNR)和系统的测温精度。仿真证明,该算法在 1 dB 的噪声下,信噪比提高了 2.3 dB。实验结果表明,系统的测量精度提升了 76.11%。通过单独的小波阈值降噪处理,系统在测温光纤的熔接点的温度曲线是 1 °C 以上的波动范围,而通过该算法后,系统解调温度波动范围在 0.5 °C 左右,最后通过实验证明该算法不影响系统的空间分辨率。

关键词: 小波阈值;EEMD;分布式拉曼测温系统;去噪

中图分类号: TN713;TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on distributed temperature measurement system based on
EEMD-Wavelet threshold

Huang Jian Song Shuxiang Yang Jun Li Biaoxing Zhou Long Xu Long Long Biao

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In distributed Raman temperature measuring system, the temperature of the contained information of anti stokes light is weak, easily masked by noise, and the traditional denoising method is easy to filter to remove the original characteristics of the system, thus aiming at these problems, this paper USES the EEMD combined with wavelet threshold denoising method to reduce the noise of engine, under the condition of retain the original information feature, Greatly improve the system's signal to noise ratio (SNR) and temperature measurement accuracy. Simulation results show that the SNR of the algorithm is improved by 2.3 dB when the noise is 1 dB. Experimental results show that the measurement accuracy of the system is improved by 76.11%. Through a separate wavelet threshold de-noising process, the temperature curve of the fusion point of the optical fiber is more than 1 °C fluctuation range, and the demodulation temperature fluctuation range of the system is about 0.5 °C after the algorithm is adopted. Finally, the experiment proves that the algorithm does not affect the spatial resolution of the system.

Keywords: wavelet threshold;EEMD;distributed optical fiber temperature measurement system;denoising

0 引言

分布式光纤测温系统作为一种新型连续的测温传感系统,与标准的离散温度传感器相比,具有本质安全、抗电磁干扰、无缘、抗腐蚀以及体积小等特性,被广泛应用于航天、电力、石油、军事等领域^[1]。近年来,无论是通过提高空间和温度分辨率还是最大限度地延长探测长度,这种类型的系统一直是研究的热点,目的是提高系统的性能^[2]。拉曼散射的反斯托克斯光仅对温度敏感,可有效避免交叉敏感问题。因此基于拉曼原理的分布式光纤温度传感器得到广泛研究^[3-5]。

由于在分布式光纤拉曼测温系统(Raman optical time domain reflectometer,ROTDR)中,拉曼散射光十分微弱,比瑞利散射光弱约 30 dB,因此,拉曼后向散射信号容易被淹没在噪声中^[3]。而拉曼散射中包含温度信号的反斯托克斯光更加的微弱,所以为了提高 ROTDR 系统的性能,人们开发了许多算法来抑制信号中的噪声成分,提升系统的信噪比。最常用的算法是线性累加平均算法,其效果很明显,但是会增加系统的数据运算时间,而且当使用线性累加平均的次数的增加,其提升效果会慢慢减弱,但是运算时间会大幅增加,因此限制了系统在一些快速反应场合的应用^[6]。

收稿日期:2022-01-17

* 基金项目:广西师范大学重大科技成果转化培育项目(2020PY002)、桂林市重点研发计划项目(2020010329)资助

传统的时频域滤波方法在信号处理中起着重要的作用,韦坚等人使用卡尔曼滤波算法使得分布式拉曼测温系统的测温误差降到 1°C ,但由于此算法没有考虑到卡尔曼滤波算法是会改变信号的原始特征,从而影响系统的空间分辨率,而且空间分辨率是系统的一个重要性能指标^[7]。所以,在处理拉曼散射信号时,这些传统的时频域滤波方法并不总是保留信号的原始特征。拉曼散射产生的信号作为一个非平稳时变信号,最常见的滤波方法是通过使用小波降噪来达到去除高斯白噪声的目的^[1]。薛志平^[1]使用小波包算法进行去噪处理,在8 km的测温光纤上进行实验,不同温度的测量误差中位数小于 0.5°C ,但是小波以及小波包对信号进行降噪处理首先需要选择与信号相匹配的小波基,以此达到最好的分解效果,不具有自适应。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)是一种针对非平稳时变的自适应分解方法,此方法可以最大化的保留信号的原始特征,但是EMD存在严重的模态混叠和端点效应,为了解决这一问题,Huang等在EMD基础上又提出了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD),通过在分解过程中多次加入高斯白噪声来抑制模态混叠和端点效应^[8-9]。Pan等^[2]通过使用EEMD算法,将信噪比提高了8.8dB,在不损失任何细节的情况下,可在10 km时降低 3.2°C 的温度误差,但是系统的测温精度还有的上升空间。综上所述,本文提出使用EEMD结合小波阈值降噪的滤波算法^[3-9],在提升系统测温精度的同时,不改变系统的空间分辨率。

EEMD—小波阈值降噪算法的滤波过程是:EEMD将复杂的自发拉曼散射信号分解成频率从高到低的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),然后通过相关系数判定,在相关系数低的IMFs函数中使用小波阈值降噪算法。这样处理在保持信号细节的同时,去除噪声方面也取得了较好的效果。

1 原理分析

1.1 EEMD 原理分析

EEMD是一种噪声辅助数据分析方法,克服了EMD模态混叠的现象。模态混叠指的是模态分量不能按时间尺度分离,导致相近的特征尺度分布在不同的IMF分量中,难以辨认出相邻混叠的IMF波形,使EMD分解不能有效去除噪声^[10]。EEMD原理为:通过加入高斯白噪声信号,使得信号在多次分解后能够在不同尺度上保持连续,从而较好地改善模态混叠现象。以下简单介绍EEMD算法的基本原理。首先将噪声信号 $w(t)$ 加入到原始信号 $X(t)$ 后得到信号 $X'(t)$:

$$X'(t) = X(t) + w(t) \quad (1)$$

然后将 $X'(t)$ 信号进行EMD分解:

$$X'(t) = \sum_{j=1}^J c_{i,j}(t) + r_{i,j}(t) \quad (2)$$

式中: $c_{i,j}(t)$ 为第 i 次加入白噪声分解后得到的第 j 个IMF, $r_{i,j}(t)$ 是残余函数,代表信号的平均趋势, J 是IMF的数量。再重复上面两个步骤,每次分解加入幅值不同的白噪声信号,得到IMF的集合,过程如下:

$$c_{1,j}(t) \cdots c_{m,j}(t), j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

最后利用不相关序列的统计值为零的原理,将上述各IMF求平均值得到最终的IMF分量:

$$c_j(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M C_{i,j}(t) \quad (4)$$

式中: $c_j(t)$ 是EEMD分解的第 j 个IMF, $i=1, 2, \dots, M$, $j=1, 2, \dots, J$ 。

真实的IMF分量与原信号具有很好的相关性,而由于端点震荡引起的虚假IMF分量与原信号的相关性很差。因此,常用相关系数法将本征模式分量与原信号之间相关系数作为一个指标,来判断本征模式分量的真实分量和虚假分量,然后将虚假的分量剔除,最为残差的一部分^[11-12]。其相关系数的表达式为:

$$r_j = \frac{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})(c_j(t) - \bar{c}_j)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (y(t) - \bar{y})^2 \cdot \sum_{t=1}^N (c_j(t) - \bar{c}_j)^2}} \quad (5)$$

式中: r_j 为第 j 个IMF与原信号 $y(t)$ 的相关系数, $t=1, 2, \dots, N$ 为信号的采样点。设定以阈值 TH ,由相关系数的标准差 $TH = \text{std}(r_j)$ 得到,即:

$$TH = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_j - \bar{r})^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

若 $r_j > TH$,保留第 j 个IMF,否则剔除第 j 个IMF。

EEMD流程如图1所示。

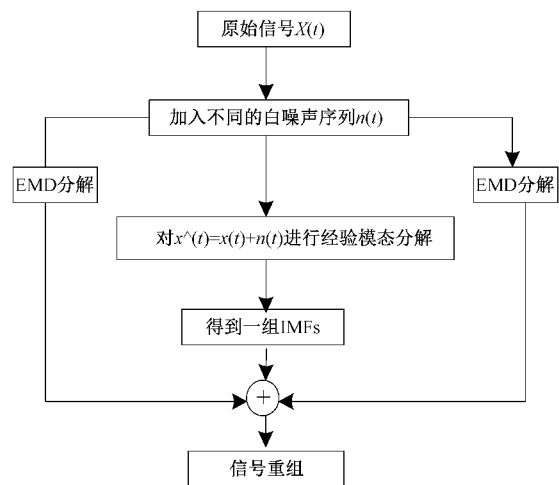


图1 EEMD算法流程

1.2 小波阈值去噪原理分析

小波阈值去噪的实质为抑制信号中无用部分、增强有用部分的过程。小波阈值去噪过程为:分解过程,即选定一种小波对信号进行 n 层小波分解;阈值处理过程,即对分解的各层系数进行阈值处理,获得估计小波系数;重构过程,据去

噪后的小波系数进行小波重构,获得去噪后的信号。影响小波阈值降噪效果的决定因素为小波基的选择与分解层数的选择,以及阈值和阈值函数的选择^[13-14]。其中常用的阈值函数分为软阈值函数和硬阈值函数,硬阈值函数表示为:

$$w_{thr} = \begin{cases} w, & |w| \geq thr \\ 0, & |w| < thr \end{cases} \quad (7)$$

式中:表示当小波系数的绝对值大于给定阈值时,小波系数不变;当小于阈值时,小波系数为 0。硬阈值可以相对更好的保留信号的局部特征。而软阈值函数的表达式为:

$$w_{thr} = \begin{cases} [\text{sgn}(w)](|w| - thr), & |w| \geq thr \\ 0, & |w| < thr \end{cases} \quad (8)$$

式中:表达的是当小波系数的绝对值大于给定的阈值时,小波系数减去阈值,当小于阈值时,小波系数等于零。软阈值函数处理的信号会更加平滑^[15]。

1.3 EEMD+小波阈值去噪原理分析

本文采用的是通过小波阈值结合 EEMD 的算法,结合两种算法的特点,对信号进行滤波降噪,很大程度上提升信号的信噪比。首先通过 EEMD 算法分解信号得到一组 IMF 分量,再通过计算 IMF 的相关系数去判定,相关系数高的 IMF 保留,相关系数低的 IMF 通过小波阈值降噪,最后重构信号。这样避免了在 EEMD 算法中被一刀切除的相关系数低的 IMF 分量,最大程度的保留了信号的局部细节,并且也能极大程度的降低信号中的噪声,提升信号的信噪比。其流程如图 2 所示。

2 仿真实验验证

为了验证本文所提出方法的效果,将对其进行仿真实验验证。仿真实验部分为:利用提出的方法对仿真信号进行去噪,与小波阈值去噪和 EEMD 方法去噪做对比,验证笔者提出方法的有效性。为进一步评价各种去噪方法的效

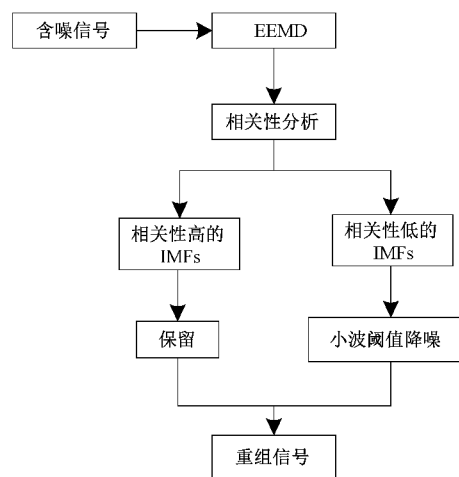


图 2 算法流程

果,采用均方根误差(MSE)和信噪比(SNR)两个参数来衡量。其仿真信号为: $X(t) = 4\sin(2\pi t) \times \sin(2\pi t) + 2\sin(10\pi t) + \sin(2\pi t)$, 通过 MATLAB 仿真对比其降噪效果。

首先在仿真信号中分别加入 1 dB 的随机噪声,分别采用常用的小波阈值降噪算法、EEMD 算法及 EEMD—小波阈值算法对其进行降噪仿真;然后小波阈值算法选择 db05 的小波基,分解层数选择为 5 层,阈值函数选择硬函数,EEMD 算法采用去除最前面两层高频 IMF 函数,EEMD 结合小波阈值算法中,相关系数设置为 0.45;为进一步验证改进小波阈值去噪的普适性,向仿真信号中分别加入 3 和 5 dB 的随机白噪声后进行去噪分析。由于噪声的随机性,通过多次实验求取均方差和信噪比的平均值,最后通过多次实验,比较均方根(MSE)和信噪比(SNR)。数据如表 1 所示。

表 1 加入不同噪声时各种去噪方法效果对比

去噪方法	1 db		3 db		5 db	
	SNR	MSE	SNR	MSE	SNR	MSE
小波阈值	24.242 2	0.162 6	22.700 7	0.205 7	23.021 4	0.198 2
EEMD	18.326 9	0.340 1	16.044 3	0.442 7	14.344 2	0.538 2
小波阈值+EEMD	26.567 5	0.136 4	23.199 0	0.194 2	23.327 2	0.191 3

数据表明,本文提出的小波阈值降噪结合 EEMD 的算法相较于单独的小波阈值降噪算法以及单独的 EEMD 算法,在信噪比(SNR)和均方根(MSE)方面上都有提升。

3 实验验证

3.1 系统结构图

实验系统框图如图 3 所示,在工控机控制下,采集模块发出一个电脉冲信号驱动激光器产生相应宽度和重复频率的激光脉冲信号,脉冲激光器采用脉冲调制激光器作为光源,波长为 1 550 nm,脉冲宽度为 10 ns,重复频率为

10 kHz,输出峰值功率为 10 mW,平均功率为 -30 dBm,经过 EDFA 放大后峰值功率为 10 W,平均功率为 0 dBm。脉冲光入射到 1 450/1 550/1 660 波分复用器的 1 550 nm 光端口,然后从 COM 口出射经参考光纤盒中的参考光纤后,输入 5 km 的多模传感测温光纤。后向拉曼散射光从 1 450/1 550/1 660 波分复用器输出到双通道 APD 及多级放大电路,双通道 APD 及多级放大电路将两路传感光信号进行光电转换并多级放大后,传给 FPGA 进行模数转换和数据采集,并进行两路数据的平均降噪处理,FPGA 包含 1 路脉冲信号,脉宽 10 ns,重频 10 kHz,2 路 AD 采集,

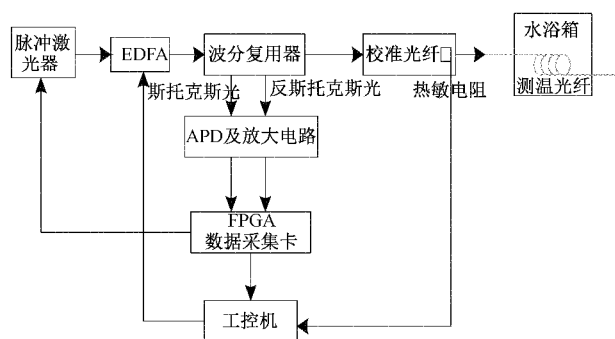


图 3 系统结构图

采样频率 100 MHz, 采样精度为 14 位, 采集长度 6 000 个

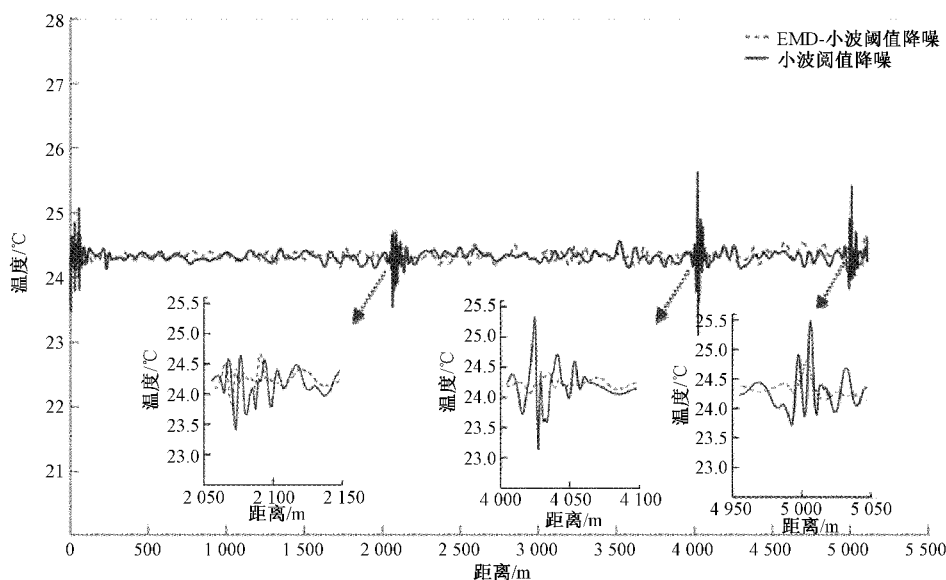


图 4 两种算法的温度曲线对比图

由图 4 可知,相较于小波阈值降噪算法,EEMD 结合小波阈值降噪算法对于测温光纤的熔接点的滤波后,解调出的温度曲线更加平滑且稳定。通过小波阈值降噪处理后,系统的解调温度是 1°C 左右的波动范围,而通过 EEMD 结合小波阈值降噪算法后,系统解调温度波动范围在 0.5°C 以内,说明降噪效果显著。为了进一步验证本文提出降噪算法的稳定性,在相同温度环境下,系统分别采用小波阈值降噪算法和本文提出的算法进行滤波降噪,解调出测温光纤的整体温度。温度数据一帧代表测温光纤的整体温度,通过对 200 帧数据的采集,对比两种滤波算法的均方根。其数据对比结果如表 2 所示。

为了进一步验证所提方法的优势及可靠性,为验证有参考光纤测点定标解调算法的表现,将大约在 0、2、4、5 km 处的 4 个测试点置于水浴箱中加热,将温度加热至 53°C ,

点,6 000 个点为一帧,10 000 帧做平均,最后形成一帧平均数据,然后发送到工控机。工控机对两路散射信号进行滤波解调,最后利用温度解调公式解调出温度^[1-3]。热敏电阻在参考光纤盒中探测参考光纤的温度,并把实时温度值传给工控机,测温光纤为 5 km 的多模光纤,分别在 0、2、4、5 km 处设置 4 个测试点,利用水浴箱来控制测试点的温度。

3.2 实验结果及分析

将测温光纤放在温度为 24°C 的环境温度下,然后通过对其进行温度测试。系统先后采用 EEMD 结合小波阈值算法和小波阈值算法对 FPGA 采集的散射信号进行滤波降噪,并解调出温度。两者的温度曲线如图 4 所示。

表 2 解调温度的均方根

去噪方法	最大值/ $^{\circ}\text{C}$	最小值/ $^{\circ}\text{C}$	均方根	均方根 提升率/%
小波阈值	25.635 0	23.095 5	0.105 8	68.45
小波阈值+EEMD	23.095 5	24.827 8	0.080 1	76.11

可以测出温度曲线。通过与原始数据进行对比,其温度曲线对比如图 5 所示。

通过与原始数据解调的温度曲线的对比,由上图可知,在 0 km 以及 5 km 处,EEMD 结合小波阈值降噪算法的降噪处理后,系统空间分辨率保持不变,说明此方法能够很好地保持信号的特征。值得一提的是,EEMD—小波阈值降噪方法在低信噪比或者高信噪比的信号中都表现良好。

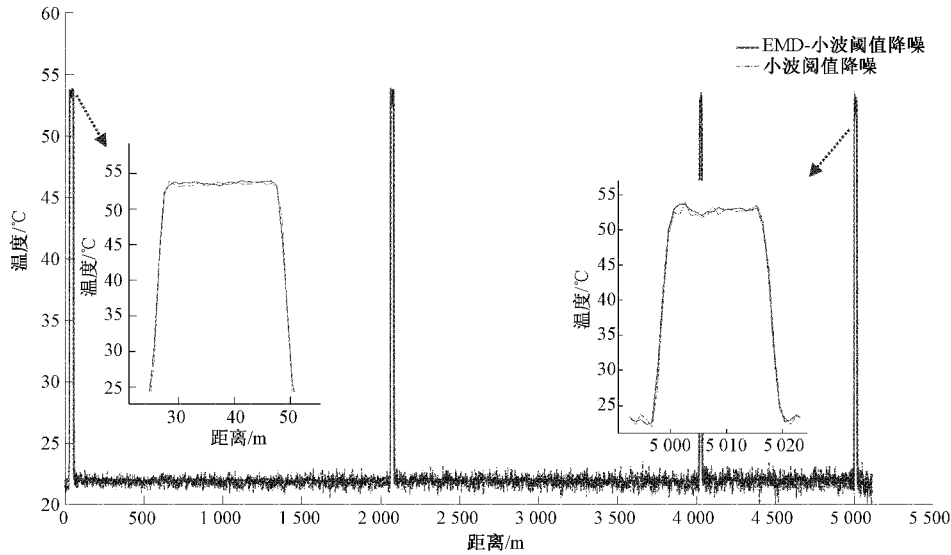


图 5 EEMD—小波阈值降噪算法解调的温度曲线

4 结 论

本文采用了一种基于 EEMD 结合小波阈值降噪的 ROTDR 系统去噪算法。我们在仿真和实验中验证了 EEMD—小波阈值去噪方法对 ROTDR 系统的好处。仿真结果表明,与传统算法相比,该算法在高噪声或者低噪声的情况下,都能够提高系统的信噪比,同时还减少了均方根,提高系统解调精度。通过实验表明,通过 EEMD 小波阈值去噪算法后,系统的测量精度提升了 76.11%,比单独的小波阈值降噪算法多提升了 7.66%。特别在光纤的熔接点,通过小波阈值降噪处理后,系统的解调温度是 1℃左右的波动范围,而通过 EEMD 结合小波阈值降噪算法后,系统解调温度波动范围在 0.5℃以内。并且使用 EEMD—小波阈值去噪算法可以较好地保留了系统的原始空间分辨率。

参考文献

- [1] 薛志平. 分布式光纤拉曼测温系统优化研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
- [2] PAN L, LIU K, JIANG J, et al. A de-noising algorithm based on EEMD in Raman-based distributed temperature sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 17(1): 134-138.
- [3] 李健. 高性能拉曼分布式光纤传感仪关键技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.
- [4] 王泽润,叶志浩,夏益辉,等. 分布式光纤测温系统分辨率影响因素研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12): 65-73.
- [5] 孙苗. 分布式光纤温度传感系统性能优化及火源定位方法研究[D]. 中国科学技术大学,2017.

- [6] 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.
- [7] 韦坚,王小军,梁财海,等. 基于卡尔曼滤波的分布式光纤 Raman 测温系统[J]. 光学技术,2016,42(3): 264-267.
- [8] 聂永红,程军圣,张亢,等. 基于 EMD 与响度的有源噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报,2012,33(4):801-808.
- [9] 赵越,赵英亮,王黎明,等. 基于 EEMD 的压力管道泄漏声源定位[J]. 国外电子测量技术,2021,40(7):128-132.
- [10] 李其建,徐海波. 改进 EMD 阈值小波滤波方法[J]. 机械科学与技术,2017,36(8):1175-1179.
- [11] 张培玲,李小真,崔帅华. 基于改进小波阈值-CEEMDAN 算法的 ECG 信号去噪研究[J]. 计算机工程与科学,2020,42(11):2067-2072.
- [12] 施杰,伍星,刘韬. 基于 MPDE-EEMD 及自适应共振解调的轴承故障特征提取方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(9):47-54.
- [13] 徐阳,罗明璋,李涛. 基于 CEEMDAN 和小波阈值的 ECG 去噪算法研究[J]. 现代电子技术,2018,41(7): 45-48,53.
- [14] 谷行,白清,王清琳,等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(1):25-31.
- [15] 孙伟,丁伟,李瑞豹,等. 基于小波降噪的 MEMS 惯导系统对准方法研究[J]. 传感技术学报,2015,28(6): 814-818.

作者简介

黄健,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术。

杨军(通信作者),高级工程师,主要研究方向为光纤传感技术。