

## 无线探空仪回波信号的变分模态分解与降噪研究\*

李俊<sup>1</sup>, 黄开明<sup>2</sup>, 帅晶<sup>1</sup>

(1. 湖北经济学院 信息与通信工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉大学 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 无线电探空仪探测风场数据存在着大量强烈的非线性非平稳的噪声, 采用一种结合变分模态分解的自适应和多尺度小波降噪的方法, 对南极洲 Syowa 站点 2019 年 1 月的无线电探空仪风场数据进行了特征提取和降噪处理。首先利用变分模态分解法对信号进行模态分解, 然后利用相关系数法确定属于信号成分的模式分量, 再利用小波分析法对剩余模式中的有效成分和噪声做了进一步的分离, 通过对全部的有效成分进行合并重构, 实现信号的特征提取和降噪处理。仿真实验和实际信号的处理结果都表明, 该方法对于无线电探空仪风场信号中的非平稳非线性噪声具有良好的抑制作用, 与传统方法相比, 具有更好的特征提取和降噪能力。

**关键词:** 无线电探空仪; 变分模态分解; 小波包分析; 降噪

中图分类号: TN911

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200818

中文引用格式: 李俊, 黄开明, 帅晶. 无线探空仪回波信号的变分模态分解与降噪研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 103-106, 110.

英文引用格式: Li Jun, Huang Kaiming, Shuai Jing. Study on variational mode decomposition and noise reduction of signal of radiosonde[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 103-106, 110.

### Study on variational mode decomposition and noise reduction of signal of radiosonde

Li Jun<sup>1</sup>, Huang Kaiming<sup>2</sup>, Shuai Jing<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** There are a lot of strong non-linear and non-stationary noises in the wind field data detected by radiosonde. In this paper, an adaptive and multi-scale wavelet denoising method combined with variational modal decomposition is used to extract features and denoise the wind field data of radiosonde at Syowa station in Antarctica in January 2019. Firstly, the signal is decomposed by the Variational Mode Decomposition, then modes related to the signal components are determined by the correlation coefficient method, and then the effective components and noise in the remaining modes are further separated by the wavelet analysis method. By merging and reconstructing all the effective components, the signal feature extraction and noise reduction are realized. Simulation experiments and real signal processing results show that this method has a good suppression effect on non-stationary nonlinear noise in radiosonde wind field signals, and has better feature extraction and noise reduction capabilities than traditional methods.

**Key words:** radiosonde; variational mode decomposition; wavelet analysis; noise reduction

### 0 引言

无线电探空仪是对流层、平流层进行大气探测的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>, 可以综合获得大气压强、风场、温度、湿度等信息, 具备探测实时性强、时间空间分辨率较高等特点<sup>[3]</sup>。目前世界各地运行着的庞大而完整的全球探测网, 源源不断地积累的海量数据, 不断促进着人们对与全球气候变化趋势、大气气象动力学过程以及局地大气暂态结构等活动的理解<sup>[4-5]</sup>。

然而实际的探测数据中往往夹杂着大量的随机噪声, 特别是在风场数据中, 存在着强烈的非线性非平稳稳定噪声, 有时甚至几乎能将信号淹没<sup>[6]</sup>, 这些噪声的存在也影响着后续科学研究的真实可靠性。

针对非平稳非线性噪声的存在, 科学家们陆续发明了短时傅里叶变换、小波变换、主成分分析、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)等一系列手段<sup>[7-9]</sup>。然而这些方法也各有优缺点, 小波变换在时域和频域都具有较好的表现, 然而存在着基函数的选取问题, 无法自适应地处理信号<sup>[10]</sup>; EMD 方法可以按照信号本身的特

\* 基金项目: 国家自然科学基金(41974176); 湖北省教育厅科学研究计划资助项目(B2019114, Q20192201)

# 计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

点对于复杂的原始信号进行分解,得到若干个尺度不一样的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),可以分析信号的瞬时幅值、瞬时频率等实时特征,然而却容易引起模态混叠、边界效应等问题,目前还缺乏良好的理论性论证,计算效率也有待于进一步提高<sup>[11]</sup>。

变分模态分解法(Variational Mode Decomposition, VMD)于2014年被首次提出,这种方法把信号 IMF 分量的获取过程转移到变分框架内进行,能够更好地实现复杂信号的准确分离,同时也具备较好的抗噪声干扰能力,在模态混叠和边界效应的处理上都有着更好的表现<sup>[12]</sup>。近年来, VMD 方法也在许多领域内取得了很好的效果<sup>[13-14]</sup>。

鉴于 VMD 算法在自适应信号处理方面的优点,本文结合相关系数比值、小波包信号分解等方法的优点,先利用 VMD 方法对信号进行分解,然后计算各个模态分量与原始信号的相关性,从而获得相关模态和非相关模态,在此基础上对于非相关模态进行小波分析和提取,提取其中的有用信息,最后将全部有用的信息进行重构实现去噪。仿真信号和实际信号的分析,都验证了这种方法应用于无线电探空仪风回波信号特征提取的可靠性,具有良好的降噪和信号分离能力。

## 1 信号提取的基本原理与方法

待处理信号可以由式(1)表示:

$$f(t)=f_0(t)+e(t) \quad (1)$$

其中,  $f(t)$  为观察到的待处理信号,由原始有效信号  $f_0(t)$  以及额外的高斯白噪声  $e(t)$  所构成,噪声信号被预期尽可能地分离。

### 1.1 VMD 基本原理

VMD 采用了维纳滤波的思想来消除观测信号中的高斯白噪声,为了解决可能存在的不适定问题,通常用 Tikhonov 正则化来解决,在此条件下构造方程如下:

$$\min_f \{ ||f-f_0||_2^2 + \alpha ||\partial_t f||_2^2 \} \quad (2)$$

其中,  $\partial_t$  代表函数对时间  $t$  的偏导数运算,  $\alpha$  为引入的惩罚因子。VMD 方法假定原始信号  $f$  可以分解成  $K$  个 IMF 分量,每个模态分量具有独立的频率中心以及带宽。在分解过程中通过迭代搜寻变分模型最优解的方式来确定每个分量,从而能够自适应地实现信号各分量的有效分离,具体步骤为:

(1)通过 Hilbert 变换计算与每一个模态相关的解析信号,并把信号变成单边谱;

(2)通过加入指数函数因子调整各自估计的中心频率,将每一个模态的频谱搬移到基带上;

(3)转换为变分框架下求解,带宽的估计使用了解调信号的梯度二范数的平方,通过该函数的不断优化可以实现类似 EMD 分解的分解结果。

为保证更严格的实现约束条件,可以进一步引入二次惩罚项和拉格朗日乘子,此时约束问题变为增广拉格朗日函数的求极值问题<sup>[12]</sup>。原本求最小值的问题被转变

成通过迭代地寻找局部最优解的方法来寻找上述增广拉格朗日函数的极值问题。在频域下进行整理公式,利用交替方向乘子法迭代搜索求得约束变分模型的最优解,经过若干次迭代,停止搜索时即可求得相应的模态分量和中心频率。

### 1.2 最优 $K$ 值的确定

利用 VMD 方法对离散时间信号进行分解时,模态个数  $K$  的选取非常关键<sup>[15]</sup>,当  $K$  与信号中有用的频率分量个数相等时分解效果较好,  $K$  值较小时可能会出现信号分解不充分,  $K$  值过大则容易产生过分解。为了获得最佳的  $K$  值,有效地分解信号,剔除虚假分量,可以采用样本熵、中心频率比以及相关系数相结合方法来进行  $K$  值的确定<sup>[16]</sup>。信号有效成分的样本熵值较小,噪声分量的熵值通常较大,相邻分量的样本熵之间存在着显著差异。当信号出现过分解时, VMD 分量的中心频率接近,因此可以选择中心频率比作为过分解的指标,本文选取了 0.9 作为过分解的判定标准。互相关函数可以用来描述任意两个信号之间相关程度,通过计算各模态分量与原始信号之间的相关性,可以判定各模态分量中含有有效信息与否。比值过小的模态分量会被认为是随机噪声或虚假分量予以剔除,通常选择 0.1 作为判定阈值标准。

### 1.3 非相关模态处理

目前的 VMD 方法降噪往往采用了局部重构法,即直接将非相关模态全部成分视为噪声,并进行抛弃;然而在实际的分析中,却发现这些被认定是噪声的模态分量也包含着一定的有效信息成分<sup>[17]</sup>。为了进一步提高信噪比,提取出有用的信息,本文对噪声模态分量也采用了三层的小波分析法进行了进一步的分解,并采用阈值法对于进行降噪处理<sup>[18]</sup>,从噪声分量中进一步提取有用的信息,最后将有效模态分量和噪声模态分量中提取的信号进行叠加重构,从而得到降噪之后的信号<sup>[19]</sup>。

## 2 仿真信号分析

本文对于仿真信号和实际的无线电探空仪观测数据进行了 VMD 分析和降噪处理,并将分析结果与低通滤波、EMD 方法进行了对比,验证了该方法对于强非线性不稳定噪声的去除能力。

根据大气观测数据的特点,采用表达式设计的仿真信号,选择信号采样间隔为 5 Hz,采样点数为 4 001。仿真信号中加入了信噪比为 15 dB 的高斯白噪声,仿真信号的理论值和加噪声后的波形如图 1 所示。

$$\begin{cases} x_1=2\cos(2\pi t/\lambda_1)e^{-(t-t_0)^2/2\sigma_1^2} \\ x_2=1.5\cos(2\pi t/\lambda_2)e^{-(t-t_0)^2/2\sigma_2^2} \\ x_3=a(t-t_3)^3+b(t-t_2)^2+c(t-t_1)+d \\ \eta=\text{noise} \\ x=x_1+x_2+x_3+\eta \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\lambda_1=40$ ,  $t_0=200$ ,  $\sigma_1=400$ ,  $\lambda_2=200$ ,  $t_{20}=400$ ,  $\sigma_2=480$ ,

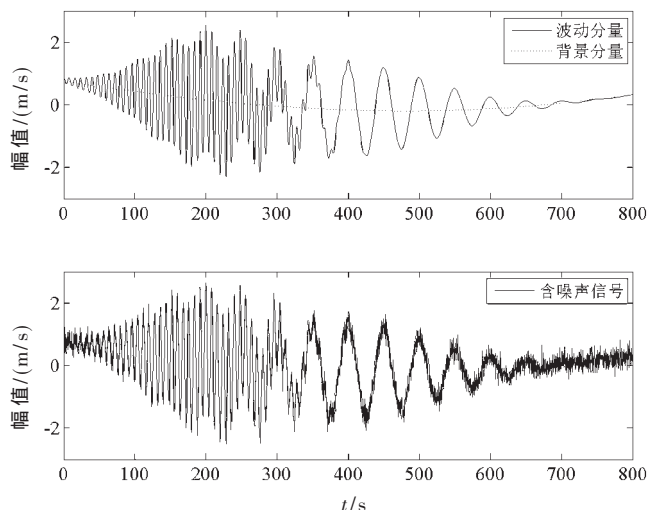


图1 仿真信号理论值与加噪声后的信号

$t_1=0, t_2=650, t_3=200, a=0.89 \times 10^{-11}, b=0.15 \times 10^{-6}, c=0.2 \times 10^{-3}, d=-0.8$ 。

图1中,仿真信号理论值由波包扰动 $x_1, x_2$ 和三次多项式背景项 $x_3$ 组合而成, $x_1$ 和 $x_2$ 在空间区域上有较多的重叠,多项式背景和波包的选取模拟了实际大气中可能存在的波活动现象,这些不同尺度的波包结构存在于同一空间区域相互独立,又相互影响。

图2为信号进行VMD变分模式分解后的各模态分量,图2(a)为模态的时域波形,图2(b)为对应的频谱分布,图中第一行为原始信号时域和频域图形。可以看出,信号在时域和频域都较好地实现了模态分离,而且较好地避免了模态间干扰。

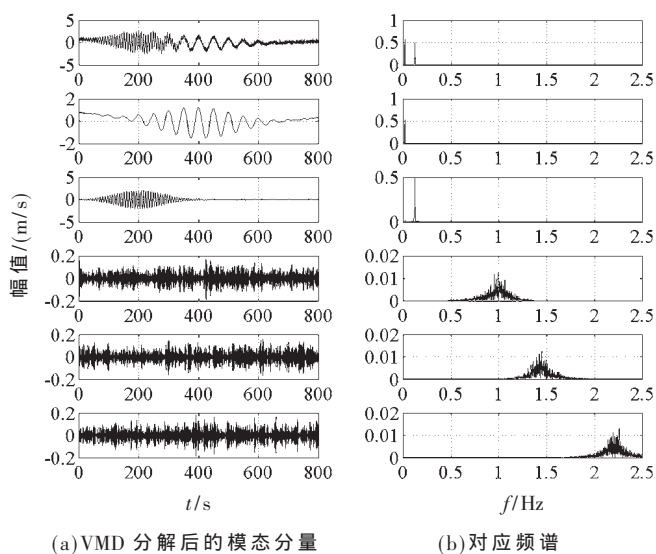


图2 信号VMD分解后的各模态时域及频谱分布

为了实现信号的提取,采用前文提及的方法实现的信号的噪声滤除,重构结果如图3所示。从图中可以看出,重构的信号和原信号的变化趋势比较一致,波形比较光滑流畅,高斯白噪声被很好地抑制,信号信噪比

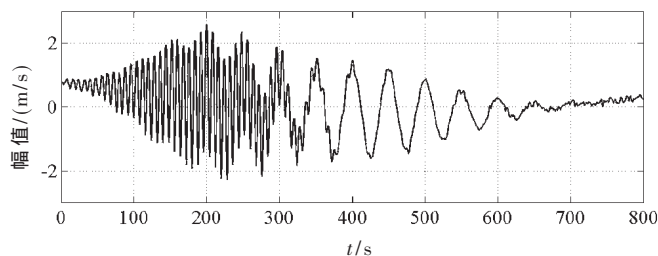


图3 VMD方法重构的信号

得到很好的增强。滤波后的信号既保留了原始信号中的背景变化趋势和波包结构特征,又去除了大量的毛刺结构,在约300s两个波包重叠的区域。重构的信号也波形清晰,信号还原效果良好。

为了定量地验证该算法特征提取和降噪的可靠性,本文将VMD的结果和其他两种方法(低通滤波、EMD)降噪的结果进行了对比,比较的性能参数包括降噪后的信号和理论值之间的自相关系数 $R$ 、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、信噪比(Signal Noise Ratio, SNR),对比的结果如表1所示。从表1中可以看出,原始信号经VMD方法降噪后的结果相关度最高,即波形最接近于理想仿真信号。而且VMD方法获得的SNR达到了24.19 dB,在原基础上提高了10.54 dB,远高于EMD方法提升的5.84 dB,这也充分证明了VMD具有最佳的滤波降噪效果。

表1 仿真信号不同方法的降噪性能比较

指标	去噪前	低通滤波	EMD	VMD
$R$	0.978 9	0.927 5	0.994 4	0.998 1
RMSE	0.031 3	0.015 6	0.008 2	0.002 8
SNR	13.646 3	16.676	19.484 8	24.188

### 3 无线电探空仪测风数据降噪分析

#### 3.1 数据来源

无线电探空仪经常用来探测大气的参数。本文利用了全球气候观测系统参考高空站网(GCOS Reference Upper-Air Network)研究中心的垂直高分辨率无线点探空仪的数据,数据来源于位于南极洲大陆的Syowa站点(东经39.58°,南纬69.01°),探空气球一般每天在当地的0点和中午12点各发射一次。随着气球的上升,每秒会采集一次气象参数数据(包括水平风速、气压、温度、相对湿度等),一般气球上升的速度低空为1~2 m/s,高空5 m/s左右。这些数据常用来进行大气的波活动的分析。图4为该站点于2019年1月获得的一组观测数据,从左到右分别为纬向风、经向风、温度随垂直高度的分布。从图中可以看出纬向风和经向风随高度分布变化更加剧烈,存在着很多毛刺,对比温度的垂直分布就可以看出,这些急剧的变化并不是由于大气本身的小尺度活动(如湍流等)引起的,而是由于观测本身的误差带来的,数据中携带着很多的非线性噪声,在进行进一步的科学

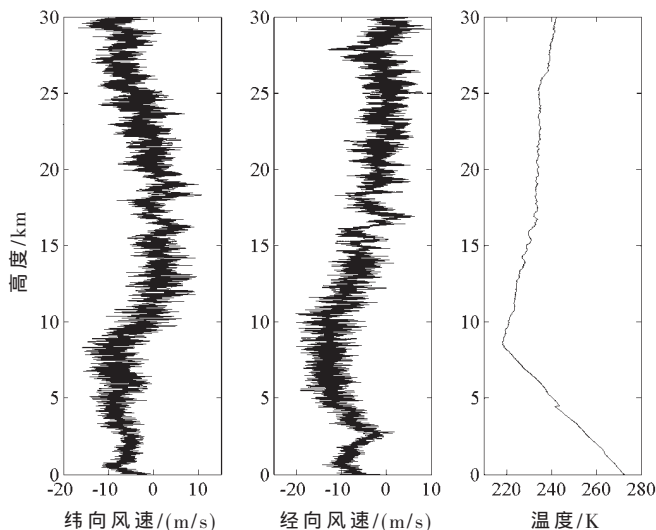


图4 纬向风、经向风、温度随垂直高度的分布

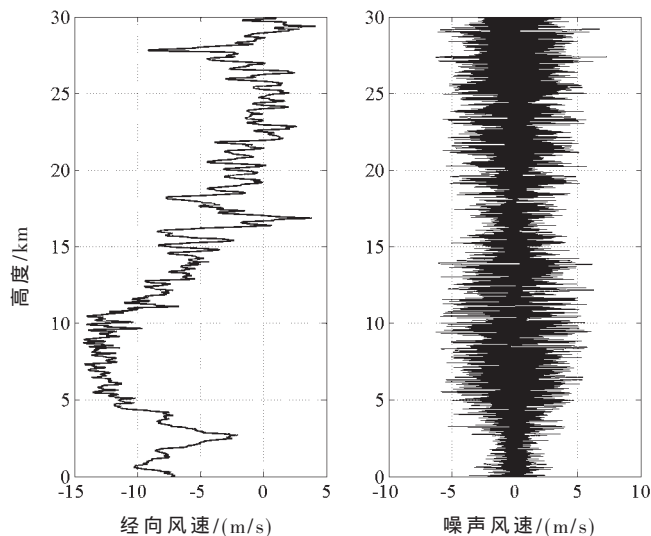


图6 降噪处理后的经向风和噪声的垂直高度分布

研究和数据分析之前应先把这些噪声尽量滤除掉。

### 3.2 实测结果

以图4的观测数据为例,本文采用VMD方法对于数据进行了分析和降噪处理,结果如图5、图6所示,图5为纬向风分离后的信号与噪声,图6为经向风分离后的信号与噪声。从图中可以看出,纬向风和经向风都存在着非常强烈的白噪声,不同高度上噪声幅度普遍达到5 m/s左右。去除噪声后的纬向风和经向风的垂直分布既消除了大量的毛刺结构,波形变动比较平滑,同时也保留了整体的变化趋势以及局部的波形细节,可以看出垂直分布上存在着不同空间尺度的波结构,降噪效果良好,为进一步的科学研究提供了良好的保障。

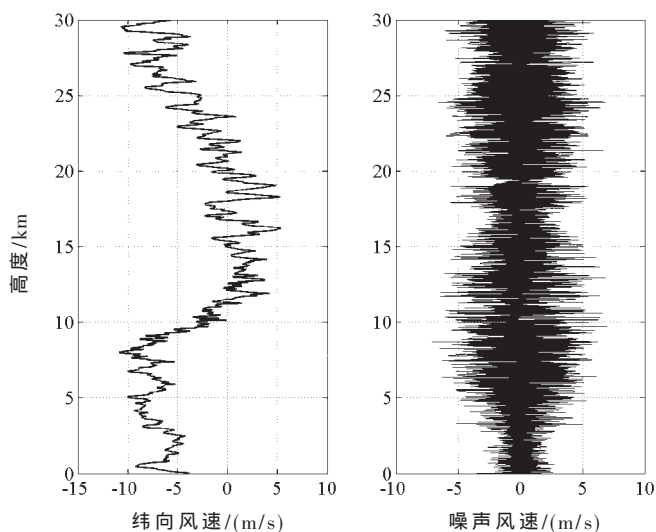


图5 降噪处理后的纬向风和噪声的垂直高度分布

## 4 结论

本文利用相关系数法确定VMD方法的模态分量,结合小波分解对于信号进行进一步的提取,从剩余模态中

进一步实现信号与噪声的分离。通过仿真信号和实际的无线电探空仪观测的数据进行分析和处理,实验表明,该方法较好地提取了信号有效分量,在信号的还原度和剧烈的非线性噪声去除方面都具有优于传统方法的优点,能够有效提升信号的信噪比。实验结果也证实了VMD方法用于探空仪风场观测数据的有效性和可靠性,该方法可以在全球无线电探空仪观测网站中信号提取方面推广和应用,并为后续科学研究提供可靠样本数据。

### 参考文献

- [1] VINCENT R A, JOAN ALEXANDER M. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: an observational study of seasonal and interannual variability[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D14): 17971-17982.
- [2] ZHANG S D, YI F, HUANG C M, et al. High vertical resolution analyses of gravity waves and turbulence at a midlatitude station[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D2): 1-15.
- [3] DIRKSEN R J, SOMMER M, IMMELER F J, et al. Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the vaisala RS92 radiosonde[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(12): 4463-4490.
- [4] HUANG K, YANG Z X, WANG R, et al. A statistical study of inertia gravity waves in the lower stratosphere over the arctic region based on radiosonde observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2018, 123(10): 4958-4976.
- [5] 杨遵勋, 黄开明, 王睿, 等. 北极地区低平流层惯性重力波的观测研究[J]. 地球物理学报, 2019, 62(8): 2793-2805.
- [6] IMMELER F J, DYKEMA J, GARDINER T, et al. Reference quality upper-air measurements: guidance for developing GRUAN data products[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(5): 1217-1231.

(下转第110页)

# 计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

## 6 结论

本文针对系统样本少、组成复杂的特点,提出了一种灰色 RBF 神经网络的效能评估方法,在建立了层次化评估指标体系的基础上,建立了系统的灰色模型和 RBF 神经网络模型,然后把两种模型串联结合,形成一种灰色 RBF 神经网络评估方法。通过仿真验证了该灰色 RBF 神经网络的评估精度要远远高于单一模型的评估精度,这可以表明该灰色 RBF 神经网络评估模型可以很好地对组成复杂、功能多样、样本少的系统进行综合效能评估。

### 参考文献

- [1] 郭齐胜,张磊.武器装备系统效能评估方法研究综述[J].计算机仿真,2013,30(8):1-4.
- [2] 卢紫毅,范建华.基于层次分析法的战术通信网络效能评估[J].现代电子技术,2011,34(1):57-60.
- [3] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1992.
- [4] Zheng Chengli, Wu Wenzhe, Xie Wanli, et al. Forecasting the hydroelectricity consumption of China by using a novel unbiased nonlinear grey Bernoulli model[J]. Journal of Cleaner of Cleaner Production, 2021, 278(1): 123903.
- [5] 卫泽,王永斌,金善来,等.AHP 灰色效能评估模型在 Link16 数据链中的应用研究[J].计算机与数字工程,2012,40(6):33-35.
- [6] 陈强,陈长兴,陈婷,等.基于灰色层次分析法-BP 神经

网络的数据链系统效能评估[J].弹箭与制导学报,2016,36(3):109-113,116.

- [7] 魏海坤.神经网络结构设计的理论与方法[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [8] 马艳芳,周冰.RBF 神经网络的研究与应用[J].电路知识与技术:学术交流,2009(5):7224-7225,7232.
- [9] 白炜,鞠儒生,邱晓刚.基于 RBF 神经网络的作战效能评估方法[J].系统仿真学报,2008(23):6391-6393.
- [10] 欧立铭,徐晓刚,王斌.RBF 神经网络的 C~4ISR 系统效能评估[J].火力与指挥控制,2011,36(10):9-10,14.
- [11] Li Xia, Jin Xin, Guo Pan. Research on forecasting model of daily discharge in karst area based on mea grey neural network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549(2): 022087.
- [12] 丁亚非,李文生,徐跃.灰色层次聚类法在通信对抗装备效能评估中的应用[J].火力与指挥控制,2011,36(1):103-107.

(收稿日期:2020-10-14)

### 作者简介:

刘俊卿(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:信息与通信系统。

刘进(1962-),男,硕士,研究员,主要研究方向:信息与通信系统。

肖龙忠(1982-),男,硕士,工程师,主要研究方向:信息与通信系统。

(上接第 106 页)

- [7] 王文波,张晓东,汪祥莉.基于独立成分分析和经验模态分解的混沌信号降噪[J].物理学报,2013,62(5):27-34.
- [8] 刘备,董胡,钱盛友.基于经验模态分解与小波分析的超声信号降噪方法[J].测试技术学报,2018,32(5):422-428.
- [9] 戴婷,张榆锋,章克信,等.经验模态分解及其模态混叠消除的研究进展[J].电子技术应用,2019,45(3):7-12.
- [10] 赵杰,杨俊贤,惠力,等.水声监听信号特征频段提取方法研究[J].电子技术应用,2020,46(2):84-91.
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] KONSTANTIN D, DOMINIQUE Z. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [13] 许子非,岳敏楠,李春.优化递归变分模态分解及其在非线形信号处理中的应用[J].物理学报,2019,68(23):292-305.
- [14] 何群,杜硕,王煜文,等.基于变分模态分解与深度信念

网络的运动想象分类识别研究[J].计量学报,2020,41(1):90-99.

- [15] 熊鑫,李亦佳,陈竹安.基于变分模态分解的爆破振动信号去噪方法研究[J].现代矿业,2019,35(8):215-217.
- [16] 罗亦泳,姚宜斌,黄城,等.基于改进 VMD 的变形特征提取与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(4):612-619.
- [17] 徐帆,常建华,刘秉刚,等.基于 VMD 的激光雷达回波信号去噪方法研究[J].激光与红外,2018,48(11):1443-1448.
- [18] 朱建军,章浙涛,匡翠林,等.一种可靠的小波去噪质量评价指标[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(5):688-694.
- [19] 靳行,林建辉.基于 VMD 的噪声信号去噪源分离[J].噪声与振动控制,2020,40(2):167-173.

(收稿日期:2020-08-05)

### 作者简介:

李俊(1981-),男,博士,讲师,主要研究方向:大气探测、信号与信息处理。

黄开明(1969-),男,博士,教授,主要研究方向:中高层大气、遥感探测。

帅晶(1986-),女,博士,讲师,主要研究方向:空间信号与信息处理。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所