

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104403

# 电能质量信号的非均匀子带分解小波去噪\*

董慧芬 陈蒙

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

**摘要:**针对频谱范围广泛的电能信号去噪问题,为了在去噪时保留电能信号中的高频谐波分量,采用控制子带个数和带宽的方法,提出一种基于功率谱特征判决器控制的非均匀子带分解小波去噪算法。其主要特点是采用信号功率谱幅度分割的方法,对小波包变换子带进行非均匀分解,动态调整小波包去噪结构,优化小波包去噪系数选择,从而在去除高频电磁噪声的同时保留高频谐波。使用该方法对多电飞机自耦变压整流器(ATRU)电能信号进行去噪,对应不同信号能够实现自适应非均匀子带分解,合理保留信号谐波成分。实验结果表明,该算法在滤除电磁干扰噪声的同时有效信号高频特征保留量为89.21%,获得了更好的去噪效果。

**关键词:**功率谱;小波包变换;非均匀子带;自适应滤波

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Wavelet de-noising of power quality signal based on non-uniform subband decomposition

Dong Huifen Chen Meng

(College of Electronics Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of denoising power signals with a wide spectrum range, an adaptive wavelet packet de-noising algorithm based on the decider of power spectrum characteristics was proposed to dynamically adjust the number and bandwidth of subband, reasonably preserve the effective high-frequency components of the signal. The main feature of this method is to achieve non-uniform decomposition by using power spectrum amplitude segmentation. The coefficient selection of wavelet packet de-noising is optimized, which improves the adaptability of the denoising algorithm. This method was used to denoise the power signals of the multi-electric aircraft ATRU test platform, and the utility of adaptive non-uniform subband decomposition was achieved. Experimental results show that the algorithm can effectively retain 89.21% high-frequency details of the signal and obtain a better denoising effect.

**Keywords:** power spectrum; wavelet packet transform; non-uniform subband; adaptive filtering

## 0 引言

使用传感器进行实际电能数据采集时,宽频白噪声和低频有色噪声等电磁噪声导致数据的失真。可以采用数字滤波的方法去噪。对于宽频带监测信号去噪问题,常用的方法有小波去噪和小波包去噪<sup>[1]</sup>。这两种方法又称为子带分解算法,子带分解算法常用于噪声消除、系统辨识与均衡等方面<sup>[2-3]</sup>。子带分解方法分为均匀子带分解和非均匀子带分解两种,非均匀子带分解算法对信号

的适应性更好。小波去噪分解的子带是非均匀形式的,但是子带分解形式是固定的。在低信噪比的情况下,小波去噪效果更好。但小波去噪会将信号的高频细节大量去除,容易丢失有价值的信号特征。小波包去噪进行了均匀的子带分割,相应的保留更多细节信号。但是计算复杂度提高,信号重构速度减慢<sup>[4]</sup>。对于统计特性未知或者时变的信号,固定的子带分解和均匀形式的子带分解往往不能对信号进行准确分析。为了解决上述问题,将非均匀子带分解的思想应用到小波去噪算法之中。

收稿日期: 2021-06-08 Received Date: 2021-06-08

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51377161)、中国民航大学实验技术创新基金(2020CXJJ87)项目资助

子带分解是为了将信号处理过程移至子带中进行,从而避免直接进行大型计算,以便对信号进行准确的阈值估计<sup>[5]</sup>。文献[6-7]提出基于信号功率谱幅度分割的非均匀子带分解方法,将功率谱幅度进行等分,对应子带出现非均匀的分解,忽略了功率谱反映信号特征问题。文献[8]提出对信号功率谱估计实现非均匀子带分解的方法。考虑到信号边界可能存在高能量频谱分量,控制子带频谱幅度变换的范围,实现子带的非均匀分解。该算法在重构子带时步骤复杂。在电能信号数据分析时,需要有效地区分高频谐波信号和高频噪声信号。不能在消除高频噪声的同时消除高频谐波信号。即在保证去噪算法收敛速度的同时,保证去噪的准确度。文献[6-8]的非均匀子带分解都是以提高算法速度为标准,没有考虑保留信号的高频特征问题。

信号的功率谱分布与信号能量直接对应,因此采用功率谱极值定位的方法对子带进行非均匀分解,为自适应保留电能信号高频谐波成分提供了解决思路。本文提出一种基于信号功率谱特征进行非均匀子带分解小波去噪的思路。对于给定信号,根据信号功率谱极值分布情况对子带进行裁剪。相比于固定形式的子带分解去噪,针对信号特征进行子带定位,实现自适应信号处理。在小波包分解的基础上进行子带重构,降低了算法的复杂程度和计算量。

### 1 正交小波变换去噪

正交小波变换去噪的原理如图 1 所示。采集  $n$  时刻的处理信号  $s(n)$ , 该信号可以表示为有效信号  $f(n)$  和干扰信号  $e(n)$  的叠加。

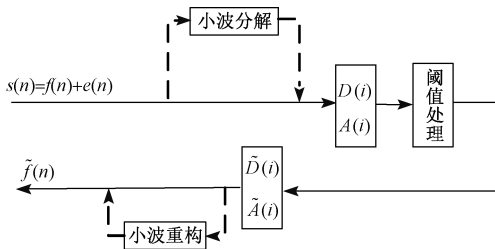


图 1 正交小波变换去噪原理

Fig. 1 Schematic diagram of orthogonal wavelet transform denoising

$D(i)$  和  $A(i)$  分别为小波分解后的信号低频近似系数和高频细节系数。小波变换去噪通过采用自适应阈值选择算法对分解之后的小波系数进行阈值量化处理,对  $e(n)$  进行抑制。将处理后得到的系数  $\tilde{D}(i)$  和  $\tilde{A}(i)$  进行重构,得到  $\tilde{f}(n)$ , 从而提高信号的信

噪比。

正交小波变换具有划分频带的功能,可以在频域内对信号进行正交分割<sup>[9-10]</sup>。通过正交分割,去除了原始信号的相关性,提取信号的特征和细节。如图 2 所示,为马拉特(Mallat)算法的小波分解。对信号  $A$  进行了  $N$  层的小波分解。

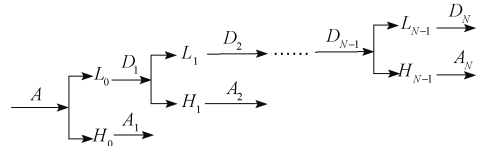


图 2 小波分解结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavelet decomposition

分解公式为式(1):

$$WT(S) = A_0 = \begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 L_0 \\ M \\ H_{N-1} L_{N-2} L L_1 L_2 \\ L_{N-1} L_{N-2} L L_1 L_2 \end{bmatrix} \times A \quad (1)$$

$WT(S)$  表示对信号  $S$  进行了小波分解,  $H_i$  为第  $i$  层小波变换的共轭正交高通滤波器系数矩阵,  $L_i$  为第  $i$  层小波变换的共轭正交低通滤波器系数矩阵。小波变换没有生成精细的频谱分辨,采用小波包的分解方法弥补了这一缺陷,其本质是将第  $i$  层的高频信号通过正交滤波器分解成了第  $i + 1$  层的低频和高频信号,见式(2)、(3)所示。 $n$  为子带排列的序号, $k$  为高频子带个数, $l$  为由高频子带分解的下一层低频和高频子带个数。

$$\sum_l D_l^{i+1,2n+1} = \sum_k L_k A_k^{i,n} \quad (2)$$

$$\sum_l A_l^{i+1,2n+2} = \sum_k H_k A_k^{i,n} \quad (3)$$

式(4)为计算每层的系数降噪所需的固定阈值  $T$ :

$$T = \sqrt{2 \log(m)} \quad (4)$$

其中,  $m$  为信号长度。

根据不同的信号,可以对固定阈值  $T$  进行自适应选择<sup>[11]</sup>。根据噪声与信号自相关特性,在不同频段选择不同的阈值准则,如 rigrsure 准则、sqtwolog 准则和 heursure 准则等<sup>[12-15]</sup>。得到去噪阈值后,由式(5)对各层系数进行阈值量化,得到  $\tilde{D}(i)$  和  $\tilde{A}(i)$ , 代入式(6),求得降噪处理后的信号  $\tilde{f}(n)$ 。

$$s(x) = \begin{cases} \text{sign}(x) (|x| - T) & |x| > T \\ 0 & |x| \leq T \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{D}_k^{i,n} = \sum_l [L_l \tilde{D}_l^{i+1,2n+1} + H_l \tilde{A}_l^{i+1,2n+2}] \quad (6)$$

## 2 非均匀子带自适应滤波

### 2.1 基于功率谱特征的判决器设计

目前,采用非均匀子带分解的目的是为了降低分析信号自相关矩阵的特征值扩散度。考虑到信号功率谱幅度的变化范围与其自相关矩阵的特征扩散有直接关系<sup>[16-12]</sup>,基于信号功率谱幅度分布特征,实现了非均匀子带分割。由于信号的功率谱分布直观显示了信号能量分布,如果设计的非均匀子带正交小波滤波器能够使子带精确对应信号分布,则既可以保留小波包去噪的高分辨率,同时减少计算的工作量。因此提出基于功率谱幅度特征的判决器结构,如图3所示,主要由均匀子带滤波器组、功率谱估计、子带定位、子带裁剪等模块组成。

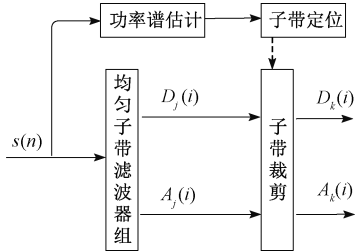


图3 子带裁剪判决器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of subband cutting decider

对信号  $s(n)$  进行小波包分解,其中的低通和高通滤波器构成均匀子带滤波器组,得到  $2^j$  个带宽相同的变换系数。对信号进行功率谱估计,得到信号功率随频率变化的分布特征。标记功率谱曲线上峰值的位置,以着重分析功率占比高的频率分量为原则,确定保留的小波树叶节点。对小波包的树结构进行“剪枝”,得到非均匀分布的子带。

基于功率谱幅度分割的子带“裁剪”算法步骤如下。

步骤1:对输入信号  $s(n)$  进行功率谱估计,得到信号功率谱  $\phi_x(w)$  和其最大值  $\text{Max}[\phi_x(w)]$ 。

步骤2:选择合适的小波基,对输入信号  $s(n)$  进行小波包分解,确定小波包分解的层数  $N$  和总体子带数量。由于每一层的低频系数和高频系数均等分为下一层的低频和高频系数。为方便计算,计算总体子带数量时,统计每层子带数量总和。子带全集  $U$  则为子带序号:

$$U = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ \dots \ 2 \cdot (1 - 2^N)] \quad (7)$$

步骤3:求  $\phi_x(w) \geq Z$  的峰值对应频率点  $w$ ,对需要细致分割的子带进行定位。根据频率点  $w$  对应频域范围的子带序号生成子集  $U_z$ 。  $Z$  的计算公式如式(8)所示,该公式可以自适应的估计当前信号中有效信号幅值与分解层数的关系。小波包分解的层数越多,对纳入保留范围的子带功率谱幅值要求越低。即信号分析频域范围增加时,降低对高频信号能量要求,从而对高次谐波出现频

域进行有效子带保留。

$$Z = \text{Max}[\phi_x(w)]/2^{2N} \quad (8)$$

步骤4:用全集  $U$  与子集  $U_z$  计算差集。对小波包的树结构进行“剪枝”操作,保留序号的子带将其上一层子带分割,没有保留序号的子带向上一层子带合并。便形成非均匀形式的子带频域分布。

### 2.2 非均匀子带分解小波去噪整体结构

为了能够针对信号特征进行自适应的正交小波变换去噪操作,基于功率谱幅度分割的非均匀子带算法,设计一种非均匀子带分解的正交小波变换自适应滤波算法,如图4所示。根据信号分析的频域范围确定小波包分解层数后,该算法先将输入的全频带信号  $s(n)$  分割成带宽相同的子带信号。基于信号功率谱幅值特征,确定要保留的近似变换系数和细节变换系数,生成子带裁剪的功率谱特征判决器,以判决器为依据进行小波包分解树结构的“剪枝”操作。统计精简后保留的子带,对子带进行自适应阈值估计,求得每个子带对应的阈值  $T$ 。在对子带系数进行阈值量化处理后,利用得到的小波系数  $\tilde{D}(i)$  和  $\tilde{A}(i)$  重构输出信号  $\tilde{f}(n)$ 。

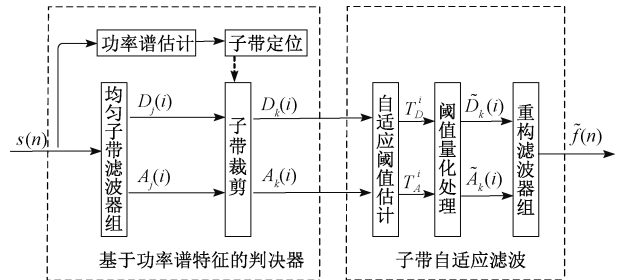


图4 基于功率谱特征判决器的自适应滤波结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of adaptive denoising algorithm based on the decider of power spectrum characteristics

进行小波包分解,要根据处理信号的特征进行分解尺度和小波基的选择。对于连续性好的宽频带信号,高阶的Db小波和Sym小波是常用的去噪小波基。高阶的Db小波具有良好的频带划分效果,但会显著增加计算量。因此,本算法采用具有紧支集并且有良好连续性和对称性的Sym8小波基。小波分解尺度由分析信号频域范围自适应选择。经过判决器的裁剪,生成非均匀形式的子带分布。其中,功率谱能量密集区域对应窄频子带,功率谱能量稀疏区域对应宽频子带。便实现了自适应去噪精度和算法收敛速度的提升。

结合子带“裁剪”判决器模块,该自适应滤波算法整体步骤如下。

步骤1:对监测信号  $s(n)$  进行功率谱估计,确定有效频域和小波包分解层数。

步骤2:采用合适的小波基进行信号的小波包分解。

步骤3:根据信号功率谱特征生成自适应剪枝操作

的判决器。

步骤 4:以判决器作为依据,对小波包的树结构进行“剪枝”操作,形成非均匀形式的子带频域分布。

步骤 5:对生成的非均匀子带进行阈值估计和阈值处理。

步骤 6:根据阈值处理后的小波系数  $\tilde{D}(i)$  和  $\tilde{A}(i)$  重构输出信号  $\tilde{f}(n)$ 。

### 3 实验分析与验证

在多电飞机自耦变压整流器(ATRU)模拟实验平台上,采集其工作监测信号。采集环境中存在着嘈杂的电磁噪声,且 ATRU 的输出电压有高次谐波和直流畸变信号。在保留电压信号真实特征的对环境噪声进行滤除,根据监测信号分析 ATRU 的工作情况。首先,分别对 ATRU 变压器内部的交流电压和 ATRU 输出直流电压信号进行滤波处理。验证该滤波算法的自适应性。滤波器参数为 4 层小波包分解、Sym8 小波基、无偏似然阈值估计、硬阈值处理。

#### 1) ATRU 内部交流电压信号去噪分析

对 ATRU 的交流电信号进行去噪,分析频域范围为 10 000 Hz。信号功率谱如图 5 所示,自适应非均匀子带分解如图 6 所示,信号的去噪结果如图 7 所示,去噪过程数据如表 1 所示。

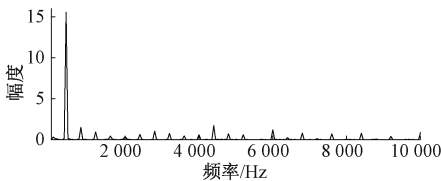


图 5 ATRU 交流电压信号频谱图

Fig. 5 Spectrogram of ATRU AC voltage signal

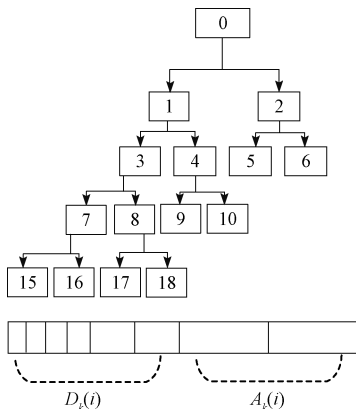


图 6 ATRU 交流电压信号非均匀子带分解

Fig. 6 Non-uniform subband decomposition of ATRU AC voltage signal

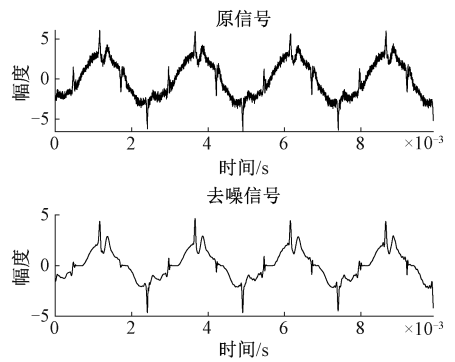


图 7 ATRU 交流电压信号去噪

Fig. 7 ATRU AC voltage signal denoising

表 1 ATRU 交流电压信号去噪数据

Table 1 Denoising process data of ATRU AC voltage signal

重构信号	1/2	1/4	1/8	1/16	有效频域/Hz	高频保留/%
低频近似	0	0	2	4	4 400	43.48
高频细节	0	2	0	0		

由图 6 可见,在低频近似系数部分进行了详细的子带分解,高频细节信号只分解了一次。说明此信号在分析频域的高频部分有效信号占比较低,该结果与图 5 频谱图显示一致,验证了算法的自适应性,因此着重分析基频附近的子带。表 1 的数据表明,根据信号的功率谱分布,有效信号频域最大到 4 400 Hz,占分析频域的 1/2。对比图 7 原信号和滤波信号,叠加在有效信号上的高频噪声得到有效去除,有效信号细节特征更加清晰。在信号滤波的结果显示上,保留了低频的畸变特征信号,对高频的电磁噪声进行了滤除。因此仅保留了高频信号 43.48% 的分量。

#### 2) ATRU 输出直流电压信号去噪分析

对 ATRU 输出直流电压信号进行去噪,分析频域范围为 12 000 Hz。信号功率谱如图 8 所示,自适应非均匀子带分解如图 9 所示,信号的去噪结果如图 10 所示,去噪过程数据如表 2 所示。

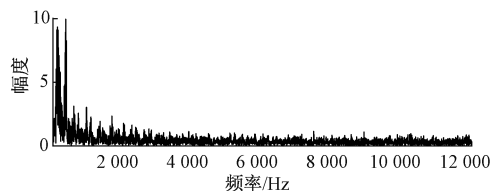


图 8 ATRU 输出直流电压信号频谱图

Fig. 8 Spectrogram of ATRU DC voltage signal



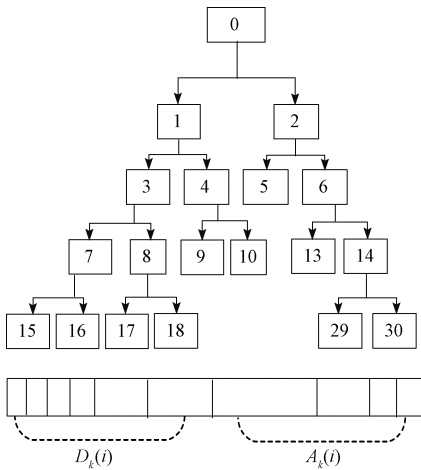


图9 ATRU 直流电压信号非均匀子带分解  
Fig. 9 Non-uniform subband decomposition of ATRU DC voltage signal

3) 去噪算法对比分析

ATRU 输出直流电压本身具有较多的谐波信号。这些信号作为 ATRU 输出的评价指标具有重要的意义,因此在滤波过程中,为了最大程度的保留谐波信号,要对信号的高频部分进行细致的分解,以保证在滤除掉环境噪声的同时,对高次谐波信号进行保留。

通过式(9)对高频有效信号的保留程度进行计算。

$$E = \left(\frac{f_a}{e_a}\right) \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $f_a$  为有效高频信号幅值的均值。  $e_a$  为测量信号中高频部分的估计均值,根据电能信号理论频率值,将测量信号通过高频滤波器滤波,得到该测量信号的高频部分估计信号。  $E$  表示在去噪后,保留的有效高频信号占整体信号中高频部分的百分比。使用小波去噪算法对 ATRU 输出直流电压信号进行滤波处理。小波去噪算法子带分解如图 11 所示,去噪过程数据如表 3 所示。两种去噪算法对比结果如图 12 所示。

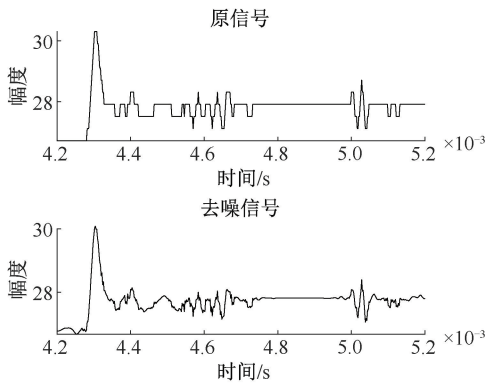


图 10 ATRU 直流电压信号去噪  
Fig. 10 ATRU DC voltage signal denoising

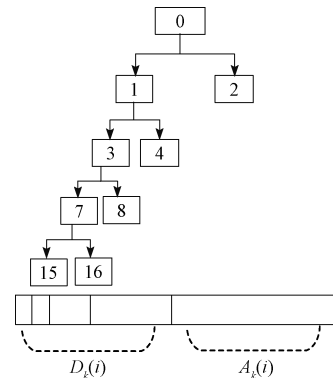


图 11 ATRU 直流电压信号小波去噪子带分解  
Fig. 11 Wavelet denoising subband decomposition of ATRU DC voltage signal

表 2 ATRU 输出直流电压信号去噪数据

Table 2 Denoising process data of ATRU DC voltage signal

重构信号	1/2	1/4	1/8	1/16	有效频域/Hz	高频保留/%
低频近似	0	0	2	4		
高频细节	0	1	1	2	10 264	89.21

表 3 ATRU 输出直流电压信号小波去噪数据

Table 3 Wavelet denoising data of ATRU DC voltage signal

重构信号	1/2	1/4	1/8	1/16	有效频域/Hz	高频保留/%
低频近似	0	1	1	2		
高频细节	1	0	0	0	10 264	64.43

由图 9 可见,对直流电压信号同样在低频近似系数部分进行了细致的分解,但在分析频域的高频细节信号部分也保留了较窄的子带。说明 ATRU 输出电压信号在高频区也存在能表示信号特征的系数。表 2 的数据表明,信号功率谱中有效成分频域最大到 10 264 Hz。因此,在处理 ATRU 监测信号时,也要注意对高频系数的分析。对比图 10 原信号和滤波信号,信号滤波结果则显示为既保留了低频的细节特征也相应的保留了高频的谐波信号。

小波去噪算法采用固定形式的非均匀子带分解,尽管得到的输出曲线更加平滑,但是高频谐波数据没有得到有效保留。造成这种现象是因为小波去噪算法每级子带分解只进行了低频近似信号的切分,高频部分的子带过宽<sup>[21-22]</sup>。对不同的电能信号进行小波去噪、小波包去噪和非均匀子带分解的自适应去噪。信噪比(signal-noise ratio, SNR)如表 4 所示。

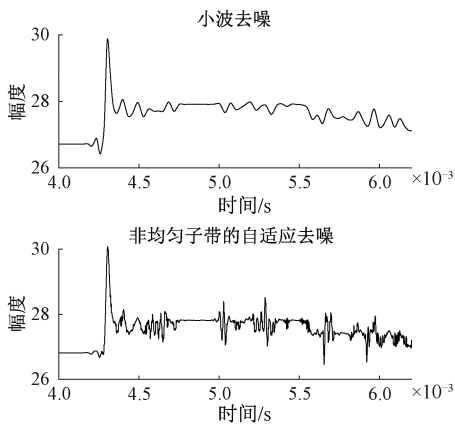


图 12 两种算法的去噪结果

Fig. 12 Denoising results of two algorithms

表 4 ATRU 电能信号的不同方法去噪信噪比

Table 4 SNR of different methods of ATRU power signal

信噪比/dB	小波去噪	小波包去噪	非均匀子带去噪
交流电压 1	31.315	37.134	37.931
交流电压 2	14.807	15.588	18.361
直流电压 1	10.114	11.708	11.552
直流电压 2	14.259	16.453	16.384

由表 4 可见,通过与信号的功率谱进行对应的子带分割,得到的有效信号能量更多,噪声信号能量减少。因此本文方法在减少计算量的同时得到了更优的去噪效果。

表 5 ATRU 电能信号的不同方法高频部分保留

Table 5 High frequency coefficient retention of different methods of ATRU power signal

高频保留	小波去噪/%	小波包去噪/%	非均匀子带去噪/%
交流电压 1	23.74	24.00	33.45
交流电压 2	33.33	30.60	43.48
直流电压 1	64.43	52.42	89.21
直流电压 2	65.24	52.68	88.83

如表 5 可见,当小波去噪的子带分解对应信号能量分布时,信号中高频谐波在去噪之后得到了有效的保留,电能质量分析更接近实际情况。本文提出的算法根据信号功率谱分布与信号能量直接对应的关系,在高频谐波出现频域自适应地进行细致子带分割。如图 9 所示,在高频近似系数部分进行了 3 次分解,并且趋向于细致分解高频子带区域。通过式(9)计算,小波去噪算法高频有效信号保留量为 64.43%,而非均匀子带自适应算法高频有效信号保留量为 89.21%。因此基于功率谱特征判决器实现的非均匀子带分解小波去噪算法更适用于对频

带范围广泛的测量信号进行去噪。

## 4 结 论

通过对正交小波去噪方法的详细分析,借鉴基于功率谱的非均匀子带自适应滤波算法,提出一种基于功率谱特征对小波包去噪进行优化的非均匀子带分解小波去噪算法。给出了基于功率谱特征的判决器结构和算法步骤,确定了判决器参数。最后进行实际去噪实验,通过对多电飞机 ATRU 不同电能信号的去噪处理,验证了该算法的自适应性。通过与小波去噪算法对比,验证了该算法在高频区域的去噪准确性。

## 参考文献

- [1] 张振凤, 威欢, 谭博文. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. 光通信研究, 2018(2): 75-78.  
ZHANG ZH F, WEI H, TAN B W. An improved wavelet threshold denoising method [J]. Study on Optical Communications, 2018(2): 75-78.
- [2] CHEN G, LI Q, LI D. Main frequency band of blastvibration signal based on wavelet packet transform[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019: 569-585.
- [3] ZHENG, ZONG S. Robust set-membership normalized subband adaptive filtering algorithms and their application to acoustic echo cancellation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers, 2017, 8: 2098-2111.
- [4] 蔡宇, 洪纓, 原建平, 等. 语音系统中的子带自适应回声消除技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 9-14.  
CAI Y, HONG Y, YUAN J P, et al. Subband adaptive echo cancellation technique in speech system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 9-14.
- [5] YANG F, WU M, JI P, et al. An improved multiband-structured subband adaptive filter algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10): 647-650.
- [6] 张炜, 戴旭初, 许小东. 基于非均匀子带分解的宽带线性盲均衡器[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 758-765.  
ZHANG W, DAI X CH, XU X D. A wideband blind linear equalizer based on non-uniform subband decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 758-765.
- [7] XU X, ZHANG W, DAI X. Powerspectrum based non-uniform sbband adptie filtering[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(2): 112-118, 123.

- [ 8 ] 马令坤,戴志美. 基于信号功率谱密度分布的动态非均匀子带分解方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(9): 2501-2504.
- MA L K, DAI ZH M. New method for dynamic non-uniform subband decomposition based on distribution of power spectral density [ J ]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(9) : 2501-2504.
- [ 9 ] 阎妍,行鸿彦. 基于小波包多阈值处理的海杂波去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 172-178.
- YAN Y, XING H Y. Sea clutter de-noising based on wavelet packet multi-threshold method [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8) : 172-178.
- [ 10 ] 辛元明,谭峰,田芳明. 基于小波变换的植物电信号降噪方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 190-196.
- XIN Y M, TAN F, TIAN F M. Research on denoising method of plant electrical signal based on wavelet transform. [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12) : 190-196.
- [ 11 ] ZHANG S, WEI X. Subband adaptive filtering algorithm over functional link neural network [ C ]. 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2019:1-4.
- [ 12 ] XAVIER P P S, HADDAD D B, PETRAGLIA M R. On the performance analysis of normalized subband adaptive filtering algorithm with sparse subfilters [ J ]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2020, 39(11) : 5830-5847.
- [ 13 ] CHEER J, DALEY S. An investigation of delayless subband adaptive filtering for multi-input multi-output active noise control applications [ J ]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2016, 25(2) : 359-373.
- [ 14 ] 牛宏侠,张肇鑫,宁正,等. 基于小波变换的阈值自适应寻优去噪方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 33-36.
- NIU H X, ZHANG ZH X, NING ZH, et al. Threshold self-adaptive optimizing de-noising method based on wavelet transform [ J ]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2) : 33-36.
- [ 15 ] 张绘娟,张达敏,闫威,等. 基于改进阈值函数的小波变换图像去噪算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(5):1545-1548,1552.
- ZHANG H J, ZHANG D M, YAN W, et al. Wavelet transform image denoising algorithm based on improved threshold function [ J ]. Application Research of Computers, 2020, 37(5) : 1545-1548, 1552.
- [ 16 ] 何乐,丰鑫,吴华明,等. 直线型光纤 Sagnac 干涉仪声传感器及其去噪方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9):70-77.
- HE L, FENG X, WU H M, et al. Research on acoustic sensor based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its de-noising method [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9) : 70-77.
- [ 17 ] 付伟. 基于自适应阈值的高压电缆局部放电信号降噪研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11) : 138-141.
- FU W. Research on noise reduction of partial discharge signal of high voltage cable based on improved threshold function [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11) : 138-141.
- [ 18 ] 贾亚超,李国龙,何坤,等. 基于灰色准则与 EEMD 的滚刀振动信号降噪方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7) : 187-194.
- JIA Y CH, LI G L, HE K, et al. Denoising method for vibration signal of hob based on grey criterion and EEMD [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7) : 187-194.
- [ 19 ] SHI J, NI J. Diffusion sign subband adaptive filtering algorithm with enlarged cooperation and its variant [ J ]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2017, 36(4) : 1714-1724.
- [ 20 ] LONG G, LIM T C. A new robust delayless subband adaptive filtering algorithm with variable step sizes for active control of broadband noise [ J ]. Applied Acoustics, 2021, 176: 107858.
- [ 21 ] 杨帆,王鹏,张宁超,等. 一种基于小波变换的改进滤波算法及其在光谱去噪方面的应用[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8) : 98-104.
- YANG F, WANG P, ZHANG N CH, et al. Improved filtering algorithm based on wavelet transform and its application in spectral denoising [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(8) : 98-104.
- [ 22 ] 谢丽娟,路锋,王旭,等. 一种用于信号去噪的小波阈值去噪算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4) : 32-36.
- XIE L J, LU F, WANG X, et al. Wavelet threshold denoising algorithm for signal denoising [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(4) : 32-36.

### 作者简介



董慧芬, 1992 年于河北工学院获得学士学位, 2002 年于河北工业大学获得硕士学位, 2006 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为电力电子、智能检测及控制等。

E-mail: hfdong@cauc.edu.cn

**Dong Huifen** received her B. Sc. degree from Heibei University of Technology in 1992, M. Sc. degree from Heibei University of Technology in 2002, and Ph. D. degree from Beihang University in 2006. Now she is an associate professor in

Civil Aviation University of China. Her main research interests include power electronics, intelligent detection and control etc.



陈蒙(通信作者), 2019 年于河北工业大学获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为电能质量监测等。

E-mail: 1206892169@qq.com

**Chen Meng** (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Heibei University of Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Civil Aviation University of China. His main research interests include power quality monitoring etc.