第 38 卷 第 6 期
2019 年 11 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 38, No. 6
November, 2019

◇ 研究报告 ◇

小波包节点分段阈值降噪在水声监听中的应用*

赵 杰[1,2,3†] 杨 英[1,2,3] 惠 力[1,2,3] 王 志[1,2,3] 初士博[1,2,3] 刘茂科[1,2,3]

(1 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 济南 250353)

(2 山东省科学院海洋仪器仪表研究所 山东省海洋环境监测技术重点实验室 青岛 266061)

(3 国家海洋监测设备工程技术研究中心 青岛 266061)

摘要 水声目标信号在发送、传播过程中，易受到环境噪声、系统自噪声等影响，因此水声监听过程中目标信号会掺杂大量噪声信息。为提高获取目标信号的准确性和可靠性，降低噪声，在已有小波分析基础上，提出小波包节点相对能量判断最优分解层，最优分解层节点系数分段阈值处理重构方法，实现水声监听信号分频段去噪。将 0.1 kHz~8.4 kHz 实验数据按节点频率排序划分为 5 个强弱不同的频段信号实现消噪提取，结果表明该方法可将噪声信号与目标信号有效分离，与全局单一阈值相比，具有较好降噪能力。该方法打破了小波阈值去噪高频处理的局限性，提高了识别精度，改善了全局单一阈值去噪存在的短板，在鱼类分析识别、舰船监听、深海探测等方面具有一定的推广和应用价值。

关键词 小波包分析，最优分解层，水声监听信号，分段阈值去噪

中图法分类号: TB52+9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2019)06-1015-10

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.015

Wavelet packet node segmental threshold denoising for underwater acoustic monitoring

ZHAO Jie[1,2,3] YANG Ying[1,2,3] HUI Li[1,2,3] WANG Zhi[1,2,3] CHU Shibo[1,2,3] LIU Maoke[1,2,3]

(1 *Qilu University of Technology Shandong Academy of Sciences, Jinan* 250353, *China*)

(2 *Institute of oceanographic Instrmentation Shandong Academy of Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environmental Monitoring Techno1ogy, Qingdao* 266061, *China*)

(3 *National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao* 266061, *China*)

Abstract Underwater acoustic target signal is easy to be affected by environmental noise and system self-noise in the process of transmitting and receiving. The target signal will be doped with a lot of noise information in underwater acoustic monitoring. In order to reduce noise interference and improve the accuracy and reliability of acquiring target signal, the relative energy criterion of wavelet packet nodes is proposed based on the existing wavelet analysis. The target signals are de-noised and extracted respectively from 0.1 kHz to 8.4 kHz in the five frequency bands of the underwater acoustic monitoring experimental data. The results show that the noise band signal can be effectively separated from the target signal band by node segmentation threshold processing.

2019-01-16 收稿; 2019-07-01 定稿

*山东省自然科学基金资助项目 (ZR2018LD008), 国家重点研发计划重点专项 (2016YFC1400403), 青岛市市南区科技发展计划项目 (2016-2-012-ZH)

作者简介: 赵杰 (1983-), 男, 山东青岛人, 高级工程师, 研究方向: 信号处理技术。

† 通讯作者 E-mail: zhaojie83@126.com

Compared with the global single threshold wavelet method, it has good separation and noise reduction ability. This method breaks the limitation of wavelet threshold denoising in high frequency processing, improves the recognition accuracy, and effectively overcomes the shortcomings of global single threshold rule denoising. It has good popularization and application value in marine biology investigation, ship recognition, deep-sea exploration, etc.

Key words Wavelet packet analysis, Optimal decomposition layer, Underwater acoustic monitoring signal, Multi-segment threshold

0 引言

目前，水声监听在海洋生物调查研究、舰艇监听监测、深海勘探等方面需求量具大且应用前景十分广阔，其监听信号主要为宽带中低频信号和窄带高频信号，如鱼类的摩擦声频率一般在 100 Hz～8 kHz，鱼鳔发声多数在 75～100 Hz；舰船噪声谱主要集中在 1 kHz 以下；水声场测量、海洋地震测量、浅地层剖面测量等主要采用宽带中低频进行测量，频率范围在几百 Hz 到十几 kHz；侧扫声呐及地貌扫描声呐等采用窄带高频信号，频率范围在十几 kHz 到几百 kHz。在实际的水声探测、接收和识别过程中，海洋环境噪声信息会弱化相关声目标信号监听的准确度[1−2]，严重影响目标的后续识别与处理，特别是宽带中低频目标信号更容易掺杂大量复杂的噪声信息。因此，如何将目标信号与噪声有效分离与提取成为水声监听研究的重中之重。

传统的数字信号处理及去噪方法多数是以傅里叶变换为基础的，如司新新等[3]利用短时傅里叶变换进行时变和非平稳信号的处理和分析，姚家骏等[4]在地震波特征量分析中采用短时傅里叶变换，曲丽荣[5]选用合适的短时傅里叶窗口函数对信号频率特性分析。以上研究均以傅里叶变换为基础的传统数字信号去噪法属于全局变换，无法同时表征时频双域特性，只能反映信号整体特性，时域无法局部化，难以检测局部突变信号，去噪局限性较大。小波变换去噪方法具有良好的时频局部性、多分辨率、去相关性、快速算法和选基灵活等特点，与傅里叶变换去噪方法相比具有明显的优越性，成为国内外许多学者专家应用研究的去噪方法。Kalpana 等[6]对水声通信中提高信噪比的去噪技术进行研究，利用 Gabor 小波变换来实现去噪提高信噪比，并与香农小波进行了对比研究。Hill 等[7]使用双数复小波系数法实现图像噪声处理研究。普利达大学研究人员 Ghribi 等[8]提出用小波变换分解的双线性结构，通过双通道对称方法实现小波自适应去噪声。周建等[9]利用一种新的小波阈值去噪方法对振动信号进行去噪分析。张振凤等[10]利用改进阈值随实际分解层数而变化的方法进行去噪，通过信噪比和均方差的比较，该方法优于传统固定阈值、stein 无偏似然估计阈值、极大极小值的小波去噪方法。曹建华等[11]利用小波分析法对振动信号进行去噪处理，对去噪后信号进行功率谱密度分析。余本富等[12]基于自适应分解层数和阈值的小波去噪算法降低电能质量扰动信号中的噪声。李战明等[13]对小波分析中 4 种去噪方法分析比较，通过对比分析采用改进阈值函数提升小波变化阈值法用于心电信号去噪分析。以上小波变换的研究方法在阈值和阈值函数选取等方面具有较高的参考价值，但其主要针对频率变化缓慢和频带较窄的非平稳振动、心电等生物医学、图像处理等方面信号，不能同时兼顾低频和高频目标，无法实现宽频带信号分频段聚焦处理，因此，对频段变换范围较大的水声监听信号消噪及提取处理适应性较差。

水声信号属于非平稳、非线性时变信号，受噪声及混响等干扰的影响，探测获得的水声信号往往会存在很多突变的奇异点。小波变换具有多分辨和时频局部分析的能力，与短时傅里叶去噪法相比，能更好地去噪，小波和小波包降噪处理的核心是阈值和阈值函数的选取，常用的小波硬阈值和软阈值函数达到了一定的去噪效果，但硬阈值处理后的小波系数在正负阈值处不连续，软阈值可有效避免间断连续性较好，但小波系数较大时，系数绝对值与系数之间存在偏差，易造成高频信息损失，重构信号易产生误差。小波包分解系数按照不同的阈值规则能更有效去除噪声，然而不同频段的小波包分解系数对目标信号和噪声信号反映不同，用同一阈值和阈值规则对整个频段进行处理无法达到较为理想的效果。因此，本文采用小波包相对能量法进行最优分解层判别，考虑各个节点频段有用信息的比例，按照比例大小确定阈值准则及函数，进一步提高分辨率，优化高频信号分析，去噪提取结果更加精细

优化。利用小波包节点系数分段阈值处理的方法对监听获得的 100 Hz~50 kHz 范围内水下声音数据降噪处理分析，对不同频段范围内的水声信号进行提取，噪声信号分离，结果表明：该方法既可以对 1 kHz 上下范围内的较强信号进行降噪提取，也可对较高频率相对较弱的信号实现降噪分离。

1　小波包算法基本原理

小波包算法为最佳子带树结构 (Optimal subband tree structuring)，包括分解算法和重构算法。用子带树来表示小波包分解，利用多次迭代的小波转换对信号的低频和高频部分进行多层次划分，根据信号特征，自适应选择频带范围，分析信号细节部分。小波包克服了小波分析的高频分辨率低的缺点，对信号在全频带范围内进行正交分解，提高时-频分辨率 [14]。子带树结构图如图 1 所示。

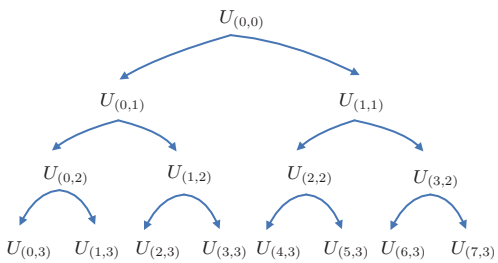

图 1　子带树结构

Fig. 1　Subband tree structure

将尺度空间 V_j 和小波子空间 W_j 统一用 $U(n,j)$ 新的子空间来表示：

$$\begin{cases} U(0,j)=V_j, \\ U(1,j)=W_j, \end{cases} \quad j\in\mathbf{Z}. \tag{1}$$

定义子空间 $U(n,j)$ 为函数 $U_n(t)$ 的闭包空间，$U_n(t)$ 是函数 $U_{2n}(t)$ 的闭包空间，令 $U_n(t)$ 满足双尺度方程：

$$\begin{cases} U_{2n}(t)=\sqrt{2}\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} h(k)U_n(2t-k), \\ U_{2n+1}(t)=\sqrt{2}\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} g(k)U_n(2t-k), \end{cases} \tag{2}$$

式 (2) 系数为多分辨率分析中的滤波器系数，满足正交关系，$g(k)=(-1)^k h(1-k)$。当 $n=0$，

$$\begin{cases} U_0(t)=\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} h(k)U_0(2t-k), \\ U_1(t)=\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} g(k)U_0(2t-k). \end{cases} \tag{3}$$

在多分辨率分析中，$U_0(t)$ 和 $U_1(t)$ 分别退化为尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波基函数 $\psi(t)$：

$$\begin{cases} \varphi(t)=\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} h(k)\varphi(2t-k), \\ \psi(t)=\sum\limits_{k\in\mathbf{Z}} g(k)\varphi(2t-k). \end{cases} \tag{4}$$

小波包变换的分解与合成中，存在由多种小波基组成的基底库，因此需要根据不同场合、不同信号并且在综合考虑小波基的正交性、紧支性、对称性等特性的基础上选择合适的小波基。从小波库中寻找使代价函数最小的小波包基，选择关键是代价函数 [15]。

$$E(s)=\sum_{i=1}^{i=\max} E(s_i), \tag{5}$$

式 (5) 中，s 代表信号，s_i 表示信号在小波包基上的分解系数。求出使代价函数最小的小波包序列，从而求出最优基。代价函数称为熵或平均信息量，代价函数自变量是信号在某个基向量组上分解系数，函数实部因变量即为代价。采用二叉树自下向上搜索最优小波包基，小波包基的选取是后续数据处理的关键。

1.1　小波包相对能量确定最优分解层数

小波包分解需要获得一个最优的分解层数。分解层数直接影响信号的去噪效果，分解层数过多对各层小波系数阈值处理过程中造成信息量丢失严重、信噪比下降、运算量增加。分解层数过少，信噪比提高不多，去噪效果不明显 [16]。原始信号和噪声信号的小波系数在不同层次有不同特性，原始信号的小波系数会随着分解层次增加而增大，噪声信号小波系数减小。

通过最优小波包中节点能量判断的方法确定小波包分解层数。根据最优小波基节点能量的大小，判断该节点有用信号能量大小。能量越高，表示该频段的有效成分越多，反之，噪声成分越多。据此，根据能量值判断有效成分，确定最优分解层数。

如图 1 所示，$U_{(i,j)}$ 表示第 j 层的第 i 个节点，每个节点系数表示某一频段内的信号特征，其中 $j=0,1,\cdots,n$，$i=0,1,\cdots,2j-1$。能量计算公式为 [17]

$$E_{(i,j)}=\int \left|U_{(i,j)}(t)\right|\mathrm{d}t=\left|s_{(i,j)}\right|^2, \tag{6}$$

式(6)中，$s_{(i,j)}$ 为 $U_{(i,j)}$ 节点的小波包系数。由此可得出每层分解后子带的相对能量公式为

$$k_{(i,j)}=\frac{E_{(i,j)}}{\sum\limits_{i=1}^{2^j-1}E_{(i,j)}},\tag{7}$$

其中，$k_{(i,j)}$ 为节点 i 在第 j 层的相对能量，代表有效成分的含量，对每层的节点相对能量 $k_{(i,j)}$ 由大到小进行排序，$k_{(i,j)}$ 的最大值记为 $C_{(1,j)}$，最小值记为 $C_{(n,j)}$，即 $C_{(1,j)}\geqslant C_{(2,j)}\geqslant\cdots\geqslant C_{(n,j)}$，其中 j 代表层数。首先对信号第一层分解相对能量进行初判：$C_{(1,1)}\geqslant 0.9$、$C_{(2,1)}<0.1$ 信号能量频段相对集中的情况，这种情况下对每层的 $k_{(2,j)}$ 进行对比，当第 j 层的 $C_{(2,j)}$ 大于第 $j-1$ 层 $C_{(2,j-1)}$ 时，将 $j-1$ 作为最优分解层数。

其他情况下，对信号逐层分解，将 $C_{(1,j)}$ 首次小于 0.2 的层数 j 进行记录，如果 $j>1$，最优分层数为 $m=(j-1)$；如果 $j=1$，最优分解层数为 1。

1.2 小波包分段阈值处理法

水声信号的频率范围比较广，不能简单地将低频段作为有用信息、高频段作为噪声信号处理，按小波相对能量法实现分段阈值降噪处理，该方法与单一阈值处理相比充分考虑信号频率段与噪声分布情况。针对不同的分解系数选取最合适的阈值函数和阈值 th，最大程度去除噪声，保留有效成分[18]。目前，常用的阈值估计方法主要有以下几种：

(1) 固定阈值估计法(sqtwolog)，在正态高斯噪声模型下，针对多维独立正态变量分布得出的结论。

$$\mathrm{th}=\sigma\sqrt{2\ln(N)}.\tag{8}$$

(2) 无偏似然阈值估计法(rigrsure)，小波分解系数的平方记为 λ，从小到大的顺序排列，即 $\lambda_1\leqslant\lambda_2\leqslant\cdots\leqslant\lambda_n$。设风险向量 $\boldsymbol{R}$，其元素为 r_i，

$$r_i=\left[N-2i+(N-i)\lambda_i+\sum_{k=1}\lambda_k\right]/N.\tag{9}$$

风险向量 $\boldsymbol{R}$ 的最小值 $r_{\min}$ 作为风险值，对应求出对应的 $\lambda_{\min}$，则阈值为

$$\mathrm{th}=\sigma\sqrt{\lambda_{\min}}.\tag{10}$$

(3) 启发式阈值法(heursure)，是前两种阈值的综合，设 S 为 N 个小波系数的平方和。令 $T=(S-N)/N$，$U=(\log_2(N))^{15}/\sqrt{N}$，

$$\mathrm{th}=\begin{cases}\sigma\sqrt{2\ln(N)}, & T\leqslant U,\\ \min\left(\sigma\sqrt{2\ln(N)},\sigma\sqrt{\lambda_{\min}}\right), & T>U.\end{cases}\tag{11}$$

(4) 极大极小阈值法(minimaxi)，也是固定阈值的一种，产生最小均方误差的极值。

$$\mathrm{th}=\begin{cases}0, & \text{其他},\\ \sigma(0.3936+0.1829\log_2^N), & N\geqslant 32.\end{cases}\tag{12}$$

以上各式中 $\sigma=\mathrm{MAD}/0.6745$ 为噪声标准方差，MAD 为各高频子带系数的中值；N 为信号长度。

如 1.1 节所述，若 $C_{(1,1)}\geqslant 0.9$、$C_{(2,1)}<0.1$ 信号能量频段相对集中，只对 $C_{(1,1)}\geqslant 0.9$ 进行小波去噪。其他情况下，信号最优分解层 m 上，节点相对能量 $k_{(i,j)}\geqslant 0.2$ 的节点系数采用无偏似然估计阈值估计方法；$k_{(i,j)}\geqslant 0.1$、$k_{(i,j)}<0.2$ 的节点系数采用极大极小阈值法；$k_{(i,j)}<0.1$ 的节点系数采用统一阈值法选择。多阈值准则选取表如 1 所示。

表 1 多阈值准则选取表

Table 1 Multiple threshold criteria selection table

$k_{(i,j)}>0.2$	$0.1<k_{(i,j)}\leqslant 0.2$	$k_{(i,j)}\leqslant 0.1$
rigrsure	heursure	sqtwolog

目前常用的阈值函数为硬阈值函数和软阈值函数。硬阈值将绝对值不大于阈值的元素置零，存在不连续现象，数学表达式为

$$y=\begin{cases}x, & |x|>\mathrm{th},\\ 0, & |x|\leqslant\mathrm{th}.\end{cases}\tag{13}$$

软阈值函数在式(13)的基础上实现连续点收缩为零，有效避免间断，连续性较好，但小波系数较大时，系数绝对值与系数之间存在偏差，易造成高频信息损失，重构信号易产生误差，其表达式为

$$y=\begin{cases}\mathrm{sign}(x)(x-\mathrm{th}), & |x|>\mathrm{th},\\ 0, & |x|\leqslant\mathrm{th}.\end{cases}\tag{14}$$

考虑到硬阈值和软阈值函数处理信号细节成分的局限性，利用文献[19]中的新型阈值函数，公式如下：

$$y=\begin{cases}x, & |x|\geqslant\mathrm{th},\\ \mathrm{sign}(x)\dfrac{\tanh(\mathrm{e}^{4|x|}-\mathrm{e}^{2\mathrm{th}})}{\mathrm{e}^{4\mathrm{th}}-\mathrm{e}^{2\mathrm{th}}}, & \dfrac{1}{2}\mathrm{th}<|x|<\mathrm{th},\\ 0, & |x|\leqslant\dfrac{1}{2}\mathrm{th},\end{cases}\tag{15}$$

式 (15) 中，x 表示小波包分解后的节点系数，y 为阈值函数处理后的小波节点系数，th 为选定的阈值。式 (14) 和式 (15) 中 $\mathrm{sign}(x)$ 为符号函数，当 $x > 0$，$\mathrm{sign}(x) = 1$；当 $x = 0$，$\mathrm{sign}(x) = 0$；当 $x < 0$，$\mathrm{sign}(x) = -1$。阈值函数处理结果对比如图 2、图 3 所示。

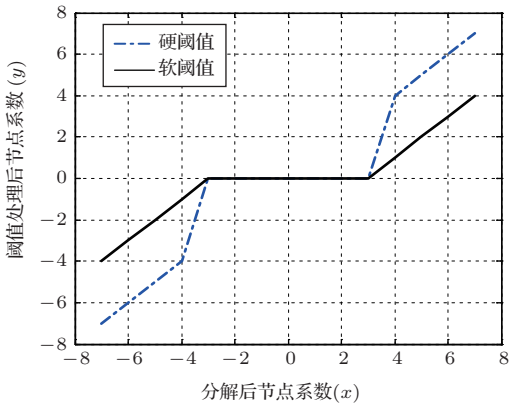

图 2　软、硬阈值函数结果对比

Fig. 2　Comparison of soft and hard threshold function results

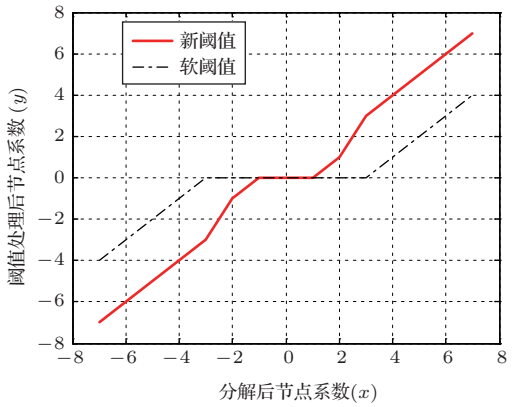

图 3　新、软阈值函数结果对比

Fig. 3 Comparison of new and soft threshold function results

2　监听水声信号去噪分析

监听水声信号来源于阿拉斯加费班克大学 Erin Pettit 和华盛顿大学 Jeff Nystuen 等在阿拉斯加州冰湾利用自主水听器 (被动水听器 (PAL)) 获得的被动水声记录 [20]，该海域的水深为 160 m，水听器的布放水深为 90 m。所有数据采样频率为 100 kHz，从 100 Hz~50 kHz 共分为 64 个频段，其中 100 Hz~3 kHz 的范围内的频率分辨率为 200 Hz，3 kHz~50 kHz 范围的为分辨率为 1 kHz。读取 2009 年某一时间段内的原始音频文件，其时频特性标度图如图 4 所示。

由图 4 的时-频域分布标度图可以看出原始水声监听信号频率随时间变化的强弱分布，本文的主要工作是对不同频段范围、不同强弱的信号进行消噪并且提取。将最原始水声监听信号按 db6 进行小波包分解计算，计算每层节点相对能量并由大到小排序 (每层节点仅排前四位)，如表 2 所示。根据每层节点相对能量的大小按照 1.1 节判别方法获得最优分解层数为 5 层。按小波包 5 层将水声信号分解，进行最优树结构和节点系数频率大小排序，分别如图 5 和图 6 所示。

表 2　节点相对能量排序表

Table 2　Nodes relative energy ranking table

层数	顺序			
	1	2	3	4
第一层	0.95	0.05	0.0	0.0
第二层	0.86	0.08	0.02	0.04
第三层	0.70	0.14	0.07	0.03
第四层	0.49	0.20	0.09	0.05
第五层	0.27	0.22	0.12	0.05
第六层	0.14	0.13	0.12	0.08

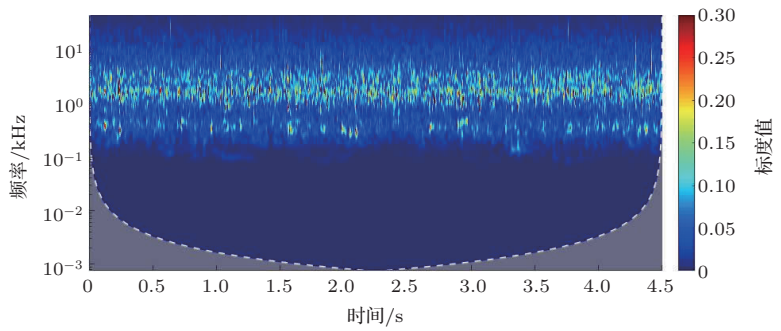

图 4　监听水声信号时-频分布标度图

Fig. 4　Time-frequency distribution scale diagram for monitoring underwater acoustic signals

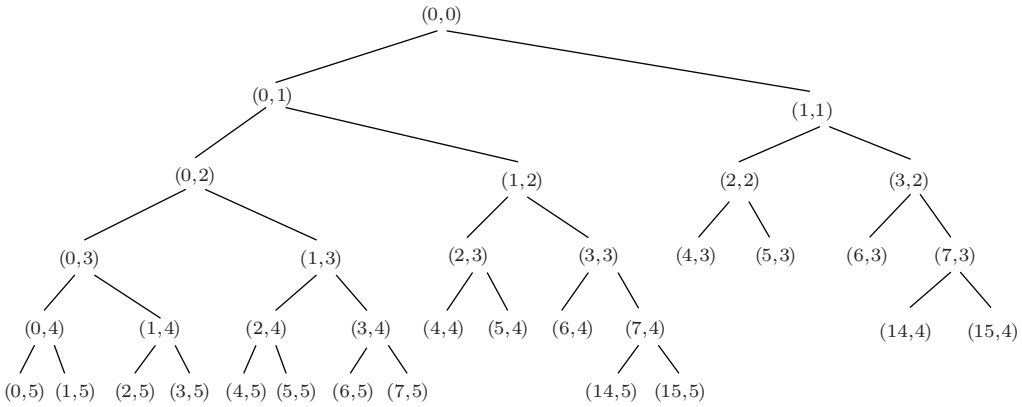

图5　最优树结构

Fig. 5　Optimal tree structure

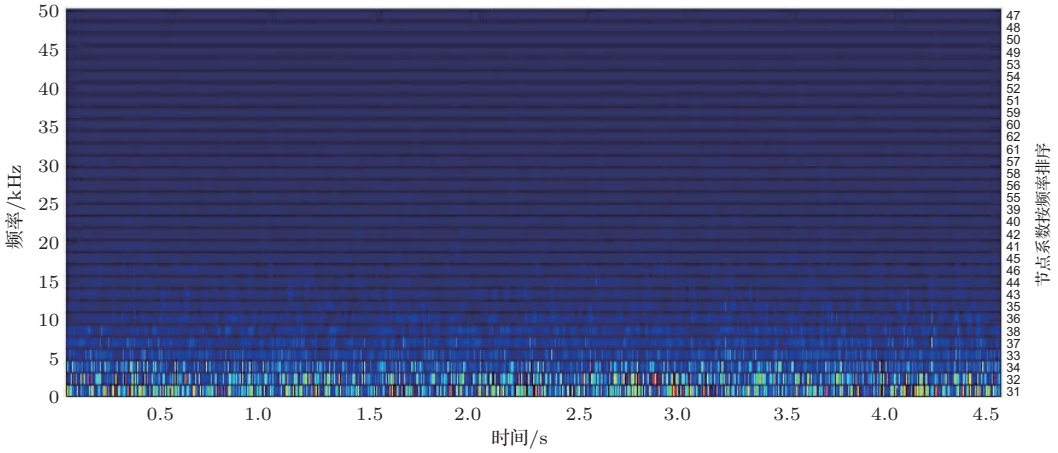

图6　节点系数频率排序图

Fig. 6　Node coefficient frequency sorting diagram

图6中横轴为时间，左边纵轴为频率大小顺序，右边纵轴为小波包分解第五层节点系数31–62按照频率顺序由下往上进行排序。由图6可看出监听水声信号频段主要分布在31、32、34三个节点上，频率范围在0~5 kHz。通过本文方法，首先对频段在节点31 处监听水声信号，频率范围大约在0.1 kHz~1.6 kHz，按照节点系数分频段阈值处理的方式实现消噪分离，处理后时-频域标度分布如图7所示。依此频段来进行本文方法与全局单一阈值对比，将小波包硬阈值、小波包软阈值在5层分解的基础上对信号进行消噪处理，获得的时-频域信号分布图，分别如图8和图9所示。由图7、图8和图9三幅图片对比可以看出，本文方法具有良好的优越性。

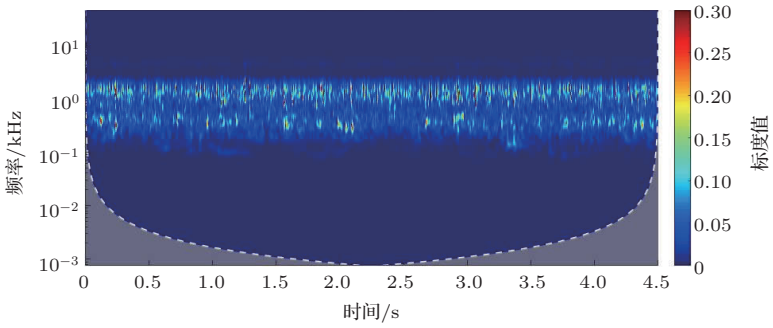

图7　分段阈值降噪信号时-频分布标度图

Fig. 7　Time-frequency distribution scale diagram of segmental threshold denoising signal

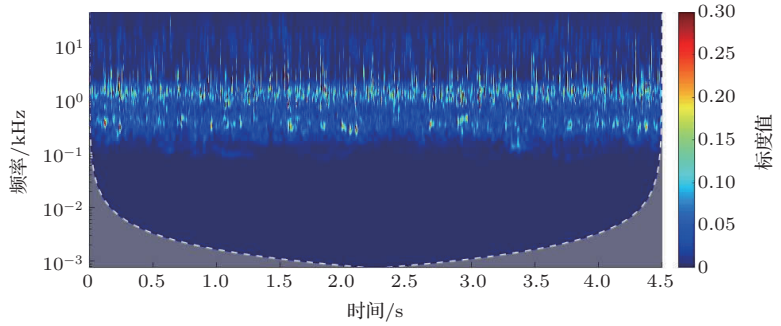

图 8　硬阈值降噪信号时-频分布标度图

Fig. 8　Time-frequency distribution scale diagram of hard threshold denoising signal

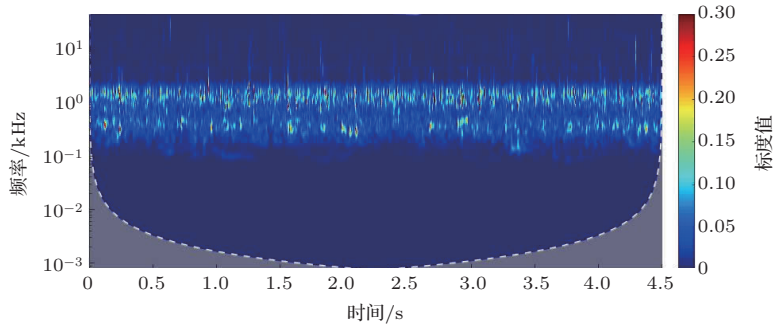

图 9　软阈值降噪信号时-频分布标度图

Fig. 9　Time-frequency distribution scale diagram of soft threshold denoising signal

图 7 为利用本文方法的消噪提取结果，信号提取结果较为理想，噪声基本消除。图 8 中为小波包硬阈值 5 层分解处理后的监听水声信号时-频域标度分布图，与图 4 原始信号相比，信号降噪较为明显，但依然存在噪声。图 9 为小波包软阈值降噪处理，与图 8 相比，噪声频率信号进一步减少，但降噪不够彻底，仍存在小部分噪声。小波包分段阈值降噪分离的关键在于在未知真实有效的水声信号前提下，节点系数按频率排序，节点系数频率由低到高、信号强度由强到弱的排序为 31、32、34、33、37，其频率范围大约在 0.1 kHz~1.6 kHz、1.7 kHz~3.3 kHz、3.4 kHz~5 kHz、5.1 kHz~6.7 kHz、6.8 kHz~8.4 kHz，按照本文方法对剩余 4 个节点频率信号进行提取，其消噪提取结果较为理想，结果如图 10~13 所示。由图 12、图 13 可以看出频率范围相对较高、信号强度较弱的节点 33、节点 37 的信号消噪提取亦可通过本文方法实现。

由于监听的真实水声信号未知，参照文献 [21] 平滑度指标、信噪比增益和峰值信噪比三种方法对监听水声信号进行去噪评价。三种方法的定义及公式表示如下：

(1) 平滑度指标是指去噪后的差分数的方差根和原始信号的差分数的方差根之比，记为 r，

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}[f'(n+1)-f'(n)]^2}{\sum_{i=1}^{n-1}[f(n+1)-f(n)]^2}, \tag{16}$$

其中，$f'(n)$ 为去噪后函数，$f(n)$ 为原始信号。

(2) 信噪比增益是指去噪后的信噪比和去噪前的信噪比的比值，记为 GSNR，

$$\mathrm{GSNR}=\mathrm{SNR_{dn}}/\mathrm{SNR_{n}}, \tag{17}$$

其中，$\mathrm{SNR_{dn}}$ 为去噪后信噪比，$\mathrm{SNR_{n}}$ 为原始信号信噪比。

(3) 峰值信噪比信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值，记为 PSNR，

$$\mathrm{PSNR}=10\lg\left(\frac{\max(f^2(n))}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f(n)-f'(n))^2}\right), \tag{18}$$

其中，$f'(n)$ 为去噪后函数，$f(n)$ 为原始信号。

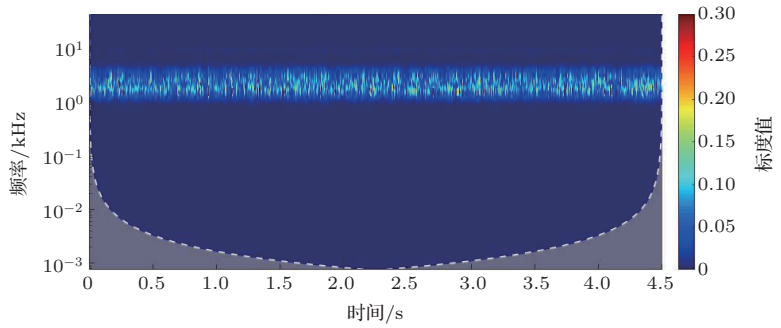

图 10　节点 32 频段降噪信号时 -频分布标度图

Fig. 10　Node 32 time-frequency distribution scale diagram of segmental threshold denoising signal

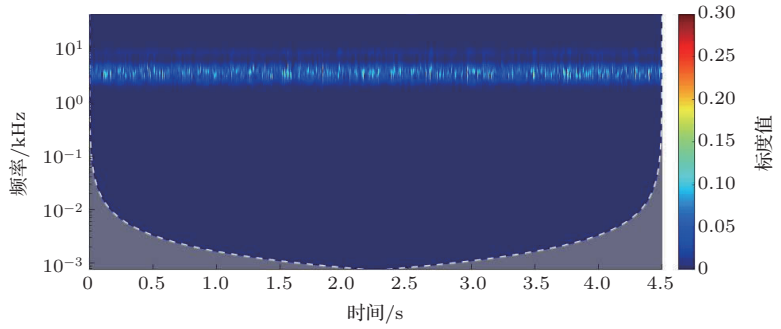

图 11　节点 34 频段降噪信号时 -频分布标度图

Fig. 11　Node 34 time-frequency distribution scale diagram of segmental threshold denoising signal

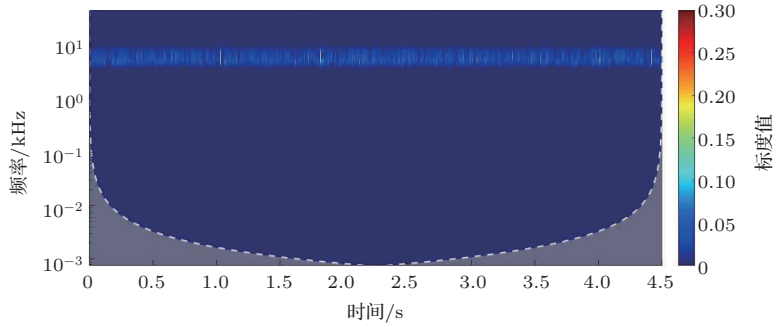

图 12　节点 33 频段降噪信号时 -频分布标度图

Fig. 12　Node 33 time-frequency distribution scale diagram of segmental threshold denoising signal

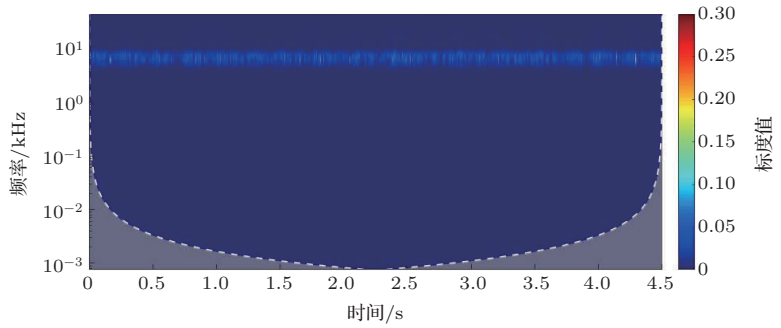

图 13　节点 37 降噪信号时 -频分布标度图

Fig. 13　Node 37 time-frequency distribution scale diagram of segmental threshold denoising signal

平滑度指标数值越小，信噪比增益和峰值信噪比越大，去噪效果越好。表3是采用上述三种方法分别对小波包硬阈值，小波包软阈值和小波包分段阈值的降噪处理结果进行去噪评价，由表3可以看出本文方法是可靠的。

表3　评价结果

Table 3　The evaluation results

指标	平滑度指标	信噪比增益	峰值信噪比
小波包硬阈值	0.9576	4.935	43.221
小波包软阈值	0.7854	5.156	49.562
小波包分段阈值	0.4256	5.932	54.543

3　结论

通过对水下监听信号的去噪分析可以得出本文方法的关键在于(1)按照每层小波包节点系数相对能量的变化确定小波包最优分解层数；(2)按相对能量法实现分频段阈值降噪处理。根据节点相对能量大小，判断该节点有用信号能量大小。能量越高，表示该频段的有效成分越多，反之，噪声成分越多。针对节点系数相对能量大小选取最合适的阈值函数和阈值th，最大程度去除噪声，保留有效成分。本文方法去噪效果优于传统小波、小波包全局单一阈值处理等方法，可在信号噪声的处理中进行广泛的推广和应用，特别在100 Hz～50 kHz频率范围内的水声监听信号降噪处理中具有重要参考价值。

参　考　文　献

[1] Klusek Z, Lisimenka A. Seasonal and diel variability of the underwater noise in the Baltic Sea[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139(4): 1537–1547.

[2] 宋国丽, 郭新毅, 马力, 等. 南海北部海洋环境噪声谱级空间差异性分析 [J]. 声学学报, 2018, 43(3): 307–314.
Song Guoli, Guo Xinyi, Ma Li, et al. Analysis of spatial difference of ocean ambient noise spectrum in the northern South China Sea[J]. Acta Acustica, 2018, 43(3): 307–314.

[3] 司新新, 李佳. 傅立叶变换在数字信号处理中的应用研究 [J]. 中国新通信, 2016, 18(14): 122.

[4] 姚家骏, 杨立明, 冯建刚. 常用时频分析方法在数字地震波特征量分析中的应用 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 105–110.
Yao Jiajun, Yang Liming, Feng Jiangang. Application of common time-frequency analysis methods in analyzing characteristic quantity of digital seismic wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2011, 33(2): 105–110.

[5] 曲丽荣. 短时傅立叶变换在数字信号处理中的应用 [J]. 科技资讯, 2007(27): 54–55.

[6] Kalpana G, Rajendran V, Murugan S S. Study of denoising techniques for SNR improvement for underwater acoustic communication[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2014, 13(3): 29–35.

[7] Hill P R, Achim A, Bull D R, et al. Dual-tree complex wavelet coefficient magnitude modelling using the bivariate Cauchy-Rayleigh distribution for image denoising[J]. Signal Processing, 2014, 105: 464–472.

[8] Ghribi K, Djendi M, Berkani D. A wavelet-based forward BSS algorithm for acoustic noise reduction and speech enhancement[J]. Applied Acoustics, 2016, 105: 55–66.

[9] 周建, 向北平, 倪磊, 等. 一种新的小波阈值去噪算法研究 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 1–5.
Zhou Jian, Xiang Beiping, Ni Lei, et al. Study of a new de-noising algorithm based on wavelet threshold[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(6): 1–5.

[10] 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 Zhenfeng, Wei Huan, Tan Bowen. An improved wavelet threshold denoising method[J]. Study on Optical Communications, 2018(2): 75–78.

[11] 曹建华, 杨超. 随机振动信号的小波去噪分析 [J]. 黄山学院学报, 2017, 19(5): 26–29.
Cao Jianhua, Yang Chao. Wavelet denoising analysis of acceleration signals of random vibration[J]. Journal of Huangshan University, 2017, 19(5): 26–29.

[12] 余本富, 王维博, 郑永康, 等. 基于自适应分解层数和阈值的小波去噪算法 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 126–129, 133.
Yu Benfu, Wang Weibo, Zheng Yongkang, et al. Wavelet de-noising algorithm based on adaptive decomposition number of layers and threshold[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(12): 126–129, 133.

[13] 李战明, 张晓东. 小波分析中4种去噪方法的分析比较 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(2): 12–17.
Li Zhanming, Zhang Xiaodong. The comparison of four kinds of methods of denoising based on wavelet analysis[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2015(2): 12–17.

[14] 钟孟春, 张春林, 李华, 等. 改进的小波包能量分段阈值降噪方法 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(5): 204–207.
Zhong Mengchun, Zhang Chunlin, Li Hua, et al. Improved de-noising method based on wavelet packet energy subsection threshold[J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(5): 204–207.

[15] 杜立志, 殷琨, 张晓培, 等. 基于最优小波包基的降噪方法及其应用 [J]. 工程地球物理学报, 2008(1): 25–29.
Du Lizhi, Yin Kun, Zhang Xiaopei, et al. The signal denoising algorithm based on optimization wavelet packet and its application[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008(1): 25–29.

[16] 谭文才, 张秋菊. 小波包多阈值去噪的一种改进方法 [J]. 江南大学学报 (自然科学版), 2012, 11(2): 178–181.
Tan Wencai, Zhang Qiuju. An improved de-noising method by wavelet packet multi-threshold[J]. Journal

of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2012, 11(2): 178–181.

[17] 史秋亮, 林江. 基于小波包分解与能量特征提取的相关分析法 [J]. 声学与电子工程, 2010(4): 18–20, 24.

[18] 章浙涛, 朱建军, 匡翠林, 等. 小波包多阈值去噪法及其在形变分析中的应用 [J]. 测绘学报, 2014, 43(1): 13–20.
Zhang Zhetao, Zhu Jianjun, Kuang Cuilin, et al. Multi-threshold wavelet packet de-noising method and its application in deformation analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(1): 13–20.

[19] Wang S, Zeng X. Robust underwater noise targets classification using auditory inspired time-frequency analysis[J]. Applied Acoustics, 2014, 78: 68–76.

[20] EOL data. Passive acoustic recording data from the Alaskan Beaufort Sea[EB/OL]. [2019–01–16]. https://data.eol.ucar.edu/dataset/106.437.

[21] 陶珂, 朱建军. 小波去噪质量评价方法的对比研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 128–133.
Tao Ke, Zhu Jianjun. A comparative study on validity assessment of wavelet de-noising[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(2): 128–133.

◇ 声学新闻和动态 ◇

2019年全国声学大会在深圳召开

9月21日至23日，2019年全国声学大会在深圳召开。本次大会由中国声学学会主办，中国科学院深圳先进技术研究院承办。中国声学学会理事长及副理事长出席了本次会议。应邀出席的嘉宾还有中国声学学会名誉理事长、中国工程院院士杨士莪教授，中国科学院深圳先进技术研究院党委书记杨建华，腾讯教育科技有限公司副总经理汤瑞宁，湖北腾创科技有限公司总经理肖承和湖北三峡腾创科技有限公司总经理万军等。大会以“迎七十国庆，奏时代和声”为主题，来自多所高等院校、科研院所和企业的近七百余名代表共聚一堂，深入交流研讨事关国家重大战略需求和经济社会发展的声学科学技术和前沿问题，共商声学科技发展大计。

大会开幕式由中国声学学会副理事长李琪主持，中国科学院深圳先进技术研究院党委书记杨建华与中国声学学会理事长张春华分别致开幕词。杨建华在致辞中说，中国科学院深圳先进技术研究院将把握粤港澳大湾区建设和深圳建设中国特色社会主义先行示范区的历史机遇，持续加大对声学领域的支持力度，把声学科学技术发展与国家经济社会发展等需求更加紧密结合起来，努力创新声学科学技术，为满足人民对美好生活的追求提供智力支持。理事长张春华在致辞中表示，中国声学学会作为科技群团组织，要不忘初心、牢记使命，按照中国科协工作部署，扎实推进学会改革，团结和动员全国声学科技工作者，听党话、跟党走，把实现国家发展目标变成我们的自觉行动，不断推进声学科技的创新繁荣，更好地服务国家经济社会发展。

随后举行了“魏荣爵奖”颁奖仪式。复旦大学他得安教授、南京大学刘晓峻教授荣获中国声学学会第二届“魏荣爵奖”。他得安教授主要从事医学超声领域的研究，取得的具有重要科学价值的成果充实和完善了声学基础理论及相关评价骨质的新方法、新技术，在国际医学超声及仪器系统研究领域，尤其是在骨超声领域具有较大国际影响，是医学超声领域具有建树的中青年科学家。刘晓峻教授主要从事声学人工材料与新原理声学功能器件、生物医学光声检测及相关声信号处理等方面的研究工作，研究成果在国际重要学术刊物Nature Materials、Physical Review Letter、Advanced Materials、Journal of the Acoustical Society of America等上发表论文300余篇，在该领域具有较大国际影响。

“魏荣爵奖”颁奖仪式后，中国声学学会青年工作委员会主任杨益新宣读了《关于江雪等10名同志入选中国声学学会第一届青年人才托举工程(2019–2021)项目的函》，并与副理事长谢菠荪一起为入选2019年中国声学学会青年人才托举工程项目的青年人才代表颁发证书。

中国声学学会与湖北三峡腾创科技有限公司就科普合作事宜举行了签字仪式。中国声学学会理事长张春华与三峡腾创总经理万军分别在合作协议上签字，启动国家级声学科学教育体验馆共建工作。

随后，中国科学院声学研究所王秀明研究员、西北工业大学杨坤德教授、厦门大学张宇教授和中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣研究员分别做了题为《储层声学及应用研究进展》、《深海水下声源定位的理论与技术》、《海豚声学原理与仿生》和《超声辐射力：理论、技术与应用》的报告，与参会代表就声学领域多项最新技术研究进行了交流。

本次大会共设置1个主会场和9个分论坛，分别题为新工科背景下的智能超声诊疗、声学超材料的理论与应用、大功率超声换能器、定量检测声学理论与方法、深海声学、声学教育、探索宁静之路、移动通信用微声学器件国产化问题和声学科普发展论坛。

会议内容除学术报告外，还包括第三届声学科普作品展、企业成果展。

2019年全国声学大会旨在持续打造我国声学界水平最高的综合年会，进一步展现中国声学学会在新时代的新气象、新作为，也将成为学会展示学科建设、科研水平和综合实力的重要窗口。在伟大的祖国70华诞即将来临之际，以学术交流这种特殊的方式庆祝祖国70岁生日。

(中国声学学会　　耿祎晗)