

何思源, 李贵元, 刘华姣, 等. 最优小波基选择法在测震数据干扰处理中的研究与应用[J]. 华南地震, 2019, 39(3): 49–56. [HE Siyuan, LI Guiyuan, LIU Huajiao, et al. Application and Research of Optimal Wavelet Base Selection Method in Seismic Data Processing[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3): 49–56]

## 最优小波基选择法在测震数据干扰处理中的 研究与应用

何思源, 李贵元, 刘华姣, 董立杰  
(四川省地震局成都地震基准台, 四川 611730)

**摘要:** 选取成都地震台的测震数据作为研究样本, 将不同的小波基进行了以重构精度、相对 SNR 值以及去噪后频谱的分析结果为依据的筛选流程。结果显示: bior2.4 小波基重构精度最佳、去噪效果良好、更加完整地保留了样本的有效高频信号, 是适合成都地震台测震数据的最优小波基。将其应用于成都地震台的测震数据干扰处理, 波形去噪效果明显, 波形的信噪比得到明显提高, 对震级计算并无显著影响。

**关键词:** 小波基函数; 小波去噪; 干扰处理; 测震数据

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0049-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.007

## Application and Research of Optimal Wavelet Base Selection Method in Seismic Data Processing

HE Siyuan, LI Guiyuan, LIU Huajiao, DONG Lijie  
(Chengdu Seismic Standard Station, Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 611730, China)

**Abstract:** In this paper, the seismic data of Chengdu Seismic Station is selected as the research sample. The different wavelet bases are screened based on the reconstruction accuracy, the relative SNR and the spectrum analysis results after denoising. The results show that the wavelet base of bior2.4 has the smallest error, the best denoising effect and the more complete retention of the high frequency signal of the samples. It is the optimal wavelet base suitable for the seismic data of Chengdu Seismic Station. The results show that the waveform denoising effect is remarkable, the signal-to-noise ratio are improved obviously, and there is no significant influence on the magnitude calculation.

**Keywords:** Wavelet basis function; Wavelet denoising; Interference processing; Seismic data

收稿日期: 2019-02-19

课题项目: 中国地震局“三结合”课题(3JH-201901015)

作者简介: 何思源(1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事测震分析工作。

E-mail: 1184003037@qq.com.

0 前言

数字化的仪器极大的丰富了观测的信息量，同时人们又面临如何去处理分析使用这样庞大的数字化资料的问题。仪器在数据采集的时候，也会采集到很多的干扰信号，这些干扰严重影响了观测质量，需要加以排除<sup>[1]</sup>。成都地震台测震数据记录质量较差，2~4 Hz 频率范围的干扰已成为成都地震台测震资料中的固有干扰，2011 年开始出现且现今广泛存在于成都地震台 5.5 级及以下且震中距大于 20°的远震波形、4.5 级及以下的近震波形内<sup>[2]</sup>。同时，波形中还存在非固定频率的高频干扰。

在利用小波理论对信号进行分析和处理时，不同领域的学者对如何选取合适的小波基有不尽相同的看法，而且对同一信号选取不同的小波基进行处理时会有完全不同的结果<sup>[3]</sup>。本文从小波基的特性出发，以成都地震台测震数据作为样本进行研究，以重构精度、相对 SNR 值以及去噪后频谱的分析结果为依据，其中“重构精度”描述的是通过小波重构后的波形与原波形的误差，误差越小，精度越高。所筛选出的适合成都地震台测震数据的最优小波基将用于测震数据的小波去噪处理。

1 最优小波基的选取

1.1 小波基概述

由于不同的小波基有不同的特性，运用不同的小波基对同一信号进行分析也会得到不同的结果，针对信号中信息的需求不同，应当采用不同的小波基。在理论上，选择和构造一个小波函数要求其具有一定的平滑性、紧支集、对称性和消失矩阶数等。紧支集保证有优良的空间局部性质；对称性确保子波的滤波特性有线性相移，不会造成信号的失真；平滑性影响频率分辨率的高低；消失矩阶数反映能量的集中程度<sup>[4]</sup>。但是平滑性和紧支集是矛盾的，不能同时兼得，正交性和对称性也是如此；消失矩的大小决定了小波函数逼近光滑的能力，一般会优先考虑较高消失矩的小波函数，但也并非越大越好，随着消失矩的增加，支撑长度会变宽，运算量增加。因此，需要综合考虑，根据信号的特点，采取折衷的办法进行小波基选取<sup>[4-5]</sup>。表 1 为几种常用小波基及其性质，结合对平滑性、紧支集、对称性和消失矩阶数的综合考虑，选择了双正交小波—Biorthogonal (biorNr.Nd)小波、紧支集正交小波—Daubechies (dbN)小波、Coifmant(coifN)小波以及近似对称的紧支集双正交小波—SymletsA(symN)小波作为研究的对象。

表 1 几种常用小波基及其性质  
Table 1 Properties of several commonly used wavelet bases

	Haar	dbN	biorNr.Nd	coifN	symN	morl	mexh	Meyer
紧支撑正交	√	√		√	√			
紧支撑双正交			√					
对称	√		√			√	√	√
不对称		√						
近于对称				√	√			√
正交分解	√	√		√	√			√
双正交分解	√	√	√	√	√			√
精确重构	√	√	√	√	√			√
有限滤波器	√	√	√	√	√			
快速算法	√	√	√	√	√			
显式	√		样条小波			√	√	

1.2 相对 SNR 值

要解释相对 SNR 的定义,首先需要了解 SNR 的定义。

SNR 的定义为:

$$SNR=\frac{\text{纯信号}^2}{(\text{带噪信号}-\text{纯信号})^2}$$
 (1)

SNR 用于描述带噪信号的信噪比, SNR 的值越大,说明带噪信号越接近纯信号。因为直接找到地震数据的纯信号比较困难,所以我们将去噪后的信号假设为“纯信号”,将原始波形假设为“带噪信号”,则相对 SNR 描述的就是原始波形的信噪比。由于成都地震台的原始波形自身存在较大的干扰,可看作高噪水平。若是相对 SNR 值越大,则代表原始波形越接近去噪后的波形,说明去噪后的波形噪声依然较高,去噪效果不理想;若是相对 SNR 值越小,则代表原始波形越远离去噪后的波形,说明去噪后的波形噪声小,去噪效果明显。

因此,相对 SNR 的定义为:

$$\text{相对 SNR}=\frac{\text{小波去噪后波形}^2}{(\text{原始波形}-\text{小波去噪波形})^2}$$
 (2)

1.3 最优小波基的选取方法

成都地震台于 2012 年 1 月 8 日在仪器墩上加装了一套 JCZ-1T 型地震计,设计思路是替换已使用了 10 多年的 JCZ-1 型超宽频带地震计。JCZ-1T

型地震计是 JCZ-1 型地震计的改进型,为三分量一体机,带宽为 50Hz-DC<sup>[6]</sup>。所搭配的数据采集器为 EDAS-24IP 型,采样频率为 100。文中选择成都地震台 JCZ-1T 地震计记录的 2016 年 6 月 18 日 09 时 22 分的阿拉斯加 M4.7 级地震作为研究样本。首先将四种小波簇分别对地震信号进行不同层数的分解、重构,将重构后的信号与原始信号进行误差对比,以误差绝对值极大值、误差绝对值平均值作为第一次筛选的依据;然后将第一次筛选后的小波对实验样本进行去噪,并计算相对 SNR 值来判断去噪水平。相对 SNR 值、去噪后信号的频谱分析结果则作为第二次筛选的依据。

表 2 是 bior 小波簇经过第一次筛选后的结果。bior2.4 小波基的最大误差和平均误差在不同层数分解中均为最小。因此将 bior2.4 小波选择为最优小波基的备选小波。以同样的方法,可以从 db 小波簇、sym 小波簇和 coif 小波簇中分别选出最优小波基的备选小波:db4、sym5 和 coif3。值得注意的是,随着分解层数的增加,最大误差和误差平均值也是随之增大。分解层数过少会使得后期去噪效果较差,分解层数过大则会造成数据严重失真。因此需要结合信号的特性以及实际需求合理地选择分解层数。根据实验对比显示,成都地震台数据采用 4 层分解去噪效果最佳。表 3 列出了第一次筛选后的备选小波 4 层分解的误差,根据文中对“重构精度”的定义,即 bior2.4 小波的重构精确度最高,db4 小波重构精确度最差。

表 2 bior 小波簇误差结果  
Table 2 The result of bior wavelet cluster error

层数	误差类别	bior1.1	bior1.3	bior1.5	bior2.2	bior2.4	bior2.6
2 层	最大误差	2.729×10 <sup>-12</sup>	2.729×10 <sup>-12</sup>	2.729×10 <sup>-12</sup>	2.729×10 <sup>-12</sup>	2.729×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>
	平均误差	8.542×10 <sup>-13</sup>	8.535×10 <sup>-13</sup>	8.738×10 <sup>-13</sup>	1.094×10 <sup>-12</sup>	5.906×10 <sup>-13</sup>	6.083×10 <sup>-13</sup>
3 层	最大误差	3.638×10 <sup>-12</sup>	3.638×10 <sup>-12</sup>	4.093×10 <sup>-12</sup>	4.093×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>	4.093×10 <sup>-12</sup>
	平均误差	1.293×10 <sup>-12</sup>	1.307×10 <sup>-12</sup>	1.321×10 <sup>-12</sup>	1.669×10 <sup>-12</sup>	8.290×10 <sup>-13</sup>	8.719×10 <sup>-13</sup>
4 层	最大误差	4.548×10 <sup>-12</sup>	4.548×10 <sup>-12</sup>	5.002×10 <sup>-12</sup>	5.457×10 <sup>-12</sup>	4.093×10 <sup>-12</sup>	4.548×10 <sup>-12</sup>
	平均误差	1.764×10 <sup>-12</sup>	1.726×10 <sup>-12</sup>	1.733×10 <sup>-12</sup>	2.356×10 <sup>-12</sup>	1.092×10 <sup>-12</sup>	1.141×10 <sup>-12</sup>
5 层	最大误差	5.002×10 <sup>-12</sup>	5.918×10 <sup>-12</sup>	5.457×10 <sup>-12</sup>	5.912×10 <sup>-12</sup>	5.002×10 <sup>-12</sup>	5.002×10 <sup>-12</sup>
	平均误差	2.213×10 <sup>-12</sup>	2.167×10 <sup>-12</sup>	2.179×10 <sup>-12</sup>	2.915×10 <sup>-12</sup>	1.333×10 <sup>-12</sup>	1.402×10 <sup>-12</sup>
2 层	最大误差	3.638×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>	3.183×10 <sup>-12</sup>	5.571×10 <sup>-10</sup>
	平均误差	1.770×10 <sup>-12</sup>	9.519×10 <sup>-13</sup>	9.959×10 <sup>-12</sup>	1.087×10 <sup>-12</sup>	1.102×10 <sup>-12</sup>	8.834×10 <sup>-11</sup>

(转下表)

(接表 2)

层数	误差类别	bior3.1	bior3.3	bior3.5	bior3.7	bior3.9	bior4.4
3 层	最大误差	$5.002\times10^{-12}$	$3.638\times10^{-12}$	$4.092\times10^{-12}$	$4.548\times10^{-12}$	$4.548\times10^{-12}$	$1.068\times10^{-9}$
	平均误差	$2.566\times10^{-12}$	$1.385\times10^{-12}$	$1.466\times10^{-12}$	$1.606\times10^{-12}$	$1.622\times10^{-12}$	$1.713\times10^{-10}$
4 层	最大误差	$6.367\times10^{-12}$	$4.548\times10^{-12}$	$4.548\times10^{-12}$	$5.457\times10^{-12}$	$5.457\times10^{-12}$	$1.383\times10^{-9}$
	平均误差	$3.386\times10^{-12}$	$1.903\times10^{-12}$	$1.978\times10^{-12}$	$2.162\times10^{-12}$	$2.148\times10^{-12}$	$2.556\times10^{-10}$
5 层	最大误差	$7.276\times10^{-12}$	$5.457\times10^{-12}$	$5.457\times10^{-12}$	$6.367\times10^{-12}$	$6.821\times10^{-12}$	$1.772\times10^{-9}$
	平均误差	$4.204\times10^{-12}$	$2.366\times10^{-12}$	$2.444\times10^{-12}$	$2.666\times10^{-12}$	$2.693\times10^{-12}$	$3.161\times10^{-10}$

表 3 四种小波误差对比

Table 3 Four kinds of wavelet error comparison

误差类别	bior2.4	db4	coif3	sym5
最大误差	$4.093\times10^{-12}$	$1.806\times10^{-9}$	$7.749\times10^{-10}$	$2.506\times10^{-10}$
平均误差	$1.092\times10^{-13}$	$3.338\times10^{-10}$	$1.339\times10^{-10}$	$4.082\times10^{-11}$

为了进行下一步的筛选，首先采用四种小波对样本数据分别进行小波去噪，去噪方法为软阈值去噪，分解层数为 4 层，并对结果进行 FFT 变换、相对 SNR 计算。根据图 1 中去噪后波形与原始波形对比，可知四种小波的去噪效果明显，压制了干扰而突出了地震事件的信号。由频谱对比结果(图 2)可知，四种小波在去噪的同时，均在 8~12 Hz 保留了一段高频信号，其中 bior2.4 小波和 db4 小波所保留的该频率范围的幅值较大，其次是 sym5 小波，coif3 小波所保留的 8~12 Hz 频率范围的幅值最小。为了解释 8~12 Hz 频率范围所表示的内容，文中作出两个假设：

(A) 8~12 Hz 内的频段均属于高频干扰。

(B) 8~12 Hz 内的频段包含了有效高频信息。

若是假设 A 成立，那么保留了 8~12 Hz 频段最小幅值的 coif3 小波的去噪效果应为最佳，而保留了 8~12 Hz 频段更高幅值的 bior2.4 小波、db4 小波的去噪效果应为最差；若是假设 B 成立，那么结果与假设 A 相反。

由文中对于相对 SNR 值的定义，可知“相对 SNR 值越小，则代表原始波形越远离去噪后的波形，说明去噪后的波形噪声小，去噪效果明显”。表 4 中 bior2.4 小波、db4 小波去噪后的相对 SNR 值小于 sym5 小波和 coif3 小波，而 coif3 小波的相对 SNR 值为最大。即 bior2.4 小波、db4 小波的去噪效果优于 sym5 小波和 coif3 小波，且 coif3 小波的去噪效果在四种小波中为最差。即所假设 B 是

成立的，证明了 8~12 Hz 内的频段包含了有效高频信息，并非均为高频干扰。因此，结合总的筛选结果(表 5)，可知 coif3、sym5 由于三项结果并不理想，可以优先排除；db4 小波“相对 SNR 值”这项的结果最好，但“重构精度”项的结果却最差；bior2.4 小波“重构精度”、“保留有效高频”这两项的结果均为最好，在“相对 SNR 值”这项与 db4 小波的差值仅有 0.02。因此，经过综合对比，选择 bior2.4 小波作为适用于成都地震台测震数据的最优小波基。

1.4 震级的对比分析

最优小波基 bior2.4 虽然能有效地改善波形质量，但对于震级的影响是否显著？为了解答这个疑问，文中采用 bior2.4 小波对成都地震台 JCZ-1T 记录的 10 个受干扰较严重的地震事件波形进行去噪处理，随后运用时间域数字滤波法将处理前后的波形仿真 W.A 并进行震级的测量，得到去噪处理前后的震级对比结果(表 6)，震级均保留一位小数。根据刘克骧的结论，时间域数字滤波法在计算震级参数时产生的差异不明显，如果保留小数后一位，得到的震级相同<sup>[7]</sup>。根据表 6 可知，10 个地震中仅有 2 个近震在去噪后的震级存在误差，且误差为 0.1。这说明在去噪改善波形质量时，不会对震级造成显著的影响，同时验证了最优小波基选择法的适用性。

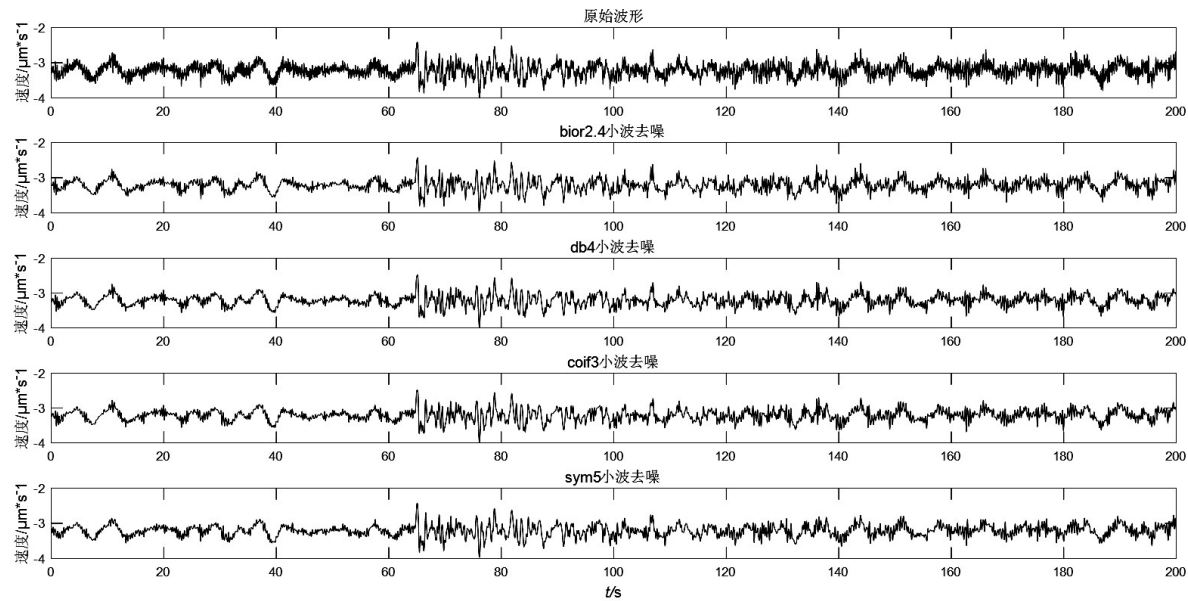


图1 小波去噪后与原始波形对比

Fig.1 Comparison of wavelet denoising waveform and original waveform

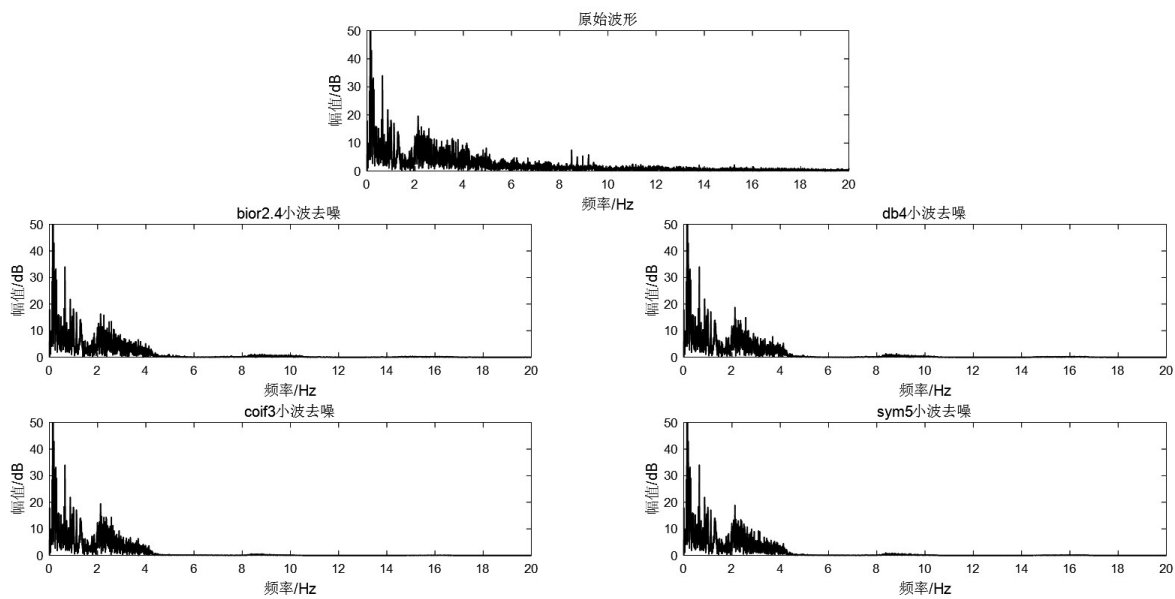


图2 FFT变换结果

Fig.2 Results chart of FFT

表4 四种小波相对 SNR 值

Table 4 The relative SNR values of four kinds of wavelet

小波名称	bior2.4	db4	coif3	sym5
相对 SNR 值	6.398	6.378	6.512	6.439

表5 筛选结果对比

Table 5 Comparison of screening results

筛选项目	bior2.4	db4	coif3	sym5
重构精度	最好	最差	较差	较好
保留有效高频	好	好	最差	较差
相对 SNR 值	较小	最小	最大	较大

表 6 震级对比  
Table 6 Magnitude comparison

序号	发震时刻	震中	震级单位	单台震级	去噪后震级
1	2016-07-27 19:59:03	四川平武	$M_L$	2.6	2.5
2	2017-04-29 22:20:43	四川宜宾市珙县	$M_L$	4.2	4.2
3	2017-05-18 20:45:08	四川绵阳市北川县	$M_L$	4.2	4.1
4	2017-10-03 19:17:46	广西百色市靖西市	$M_L$	4.5	4.5
5	2017-12-07 21:07:54	四川甘孜州炉霍县	$M_L$	3.4	3.4
6	2017-12-19 18:58:36	四川凉山州会东县	$M_L$	3.5	3.5
7	2018-02-07 07:11:43	台湾花莲县附近	$m_b$	4.2	4.2
8	2018-02-22 15:19:27	印度尼西亚苏门答腊岛	$m_b$	4.9	4.9
9	2018-02-24 16:35:42	日本本州东海岸	$m_b$	4.7	4.7
10	2018-02-24 19:02:22	菲律宾群岛	$m_b$	4.4	4.4

2 干扰处理中的实例应用

为了进一步研究最优小波基 bior2.4 在成都地震台测震数据的实际干扰处理中的应用效果，我们选取了成都地震台 JCZ-1T 记录的 2017 年 11 月 4 日 07 点 34 分发生于台湾花莲县的地震(M4.7)作为干扰处理的实例。为了凸显此方法在实际干扰处理中的效果，文中将同时采用 MSDP 软件提供的滤波功能进行对比。MSDP 软件目前提供的滤波方法为低通滤波器(0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz)、高通滤波器(0.25 Hz、0.5 Hz、1 Hz、2 Hz)和带通滤波器。由于文中的原始波形夹杂了高频干扰以及成都地震台测震数据中普遍存在的 2~4 Hz 频率范围的干扰<sup>[9]</sup>，则选择低通滤波器和带通滤波器进行处理。低通滤波器只有四个频率的选择，0.5 Hz 过小且 10 Hz 过大，因此选择 1 Hz 和 5 Hz 较为合适。带通滤波器的截止频率不易判断准确，为了避免造成有效信息的流失，故将低频段选择为 0 Hz。高频段由于需要避开 2~4 Hz 频率范围的干扰，故选择为 2 Hz。针对成都地震台测震资料干扰情况，文中提出采用最优小波基(bior2.4 小波)去噪与 2~4 Hz 带阻滤波器相组合的处理方法。两种方法对台湾花莲县的地震(M4.7)垂直分向的处理结果如图 3 所示。

通过分析两种方法的处理结果，可知经过 1.0 Hz 低通滤波后的波形损失了过多的波形细节，失真较为严重；经过 5.0 Hz 低通滤波后的波形涵盖了 2~4 Hz 频率范围的干扰，使得去噪效果不佳；经过 0~2 Hz 带通滤波后的波形去噪效果明显，有效压制了高频干扰且未产生严重失真；组合处理

法的效果同样十分理想，并且高频干扰的压制效果比带通滤波的结果更好，这在 0~30 s 处尤为突出，波形的连续性和平滑性方面表现也更佳。对比结果表明：文中的组合处理法更具有优越性。

为了研究此方法在近震的应用效果，文中选取了成都地震台 JCZ-1T 记录的 2017 年 12 月 10 日 08 点 14 分发生于九寨沟的近震作为处理实例，结果如图 4 所示。经过最优小波基(bior2.4 小波)去噪及 2~4 Hz 带阻滤波后，波形垂直分向上原本被干扰所掩盖的初至震相变得清晰可辨，三分向的高频干扰得到了有效的压制，背景噪声与地震事件波形具有更高的分辨率，波形的信噪比得到了明显的提升。

3 结语

根据上述的研究结果，可得出下列结论：

文中以成都地震台的测震数据作为研究样本，将不同的小波基进行了以重构精度、相对 SNR 值以及去噪后的频谱分析结果为依据的筛选流程，并对筛选结果进行分析与对比。结果显示：bior2.4 小波重构精度最佳、去噪效果明显、更加完整地保留了样本的有效高频信号，在近震和远震的干扰处理实际应用中发挥了重要的作用，产生了理想的效果。bior2.4 小波是适合成都台测震数据的最优小波基。

最优小波基 bior2.4 去噪改善波形质量时，不会对震级计算造成显著的影响。

最优小波基选择法可以结合其它滤波方法进行合理地组合使用，能够产生更好的去噪效果

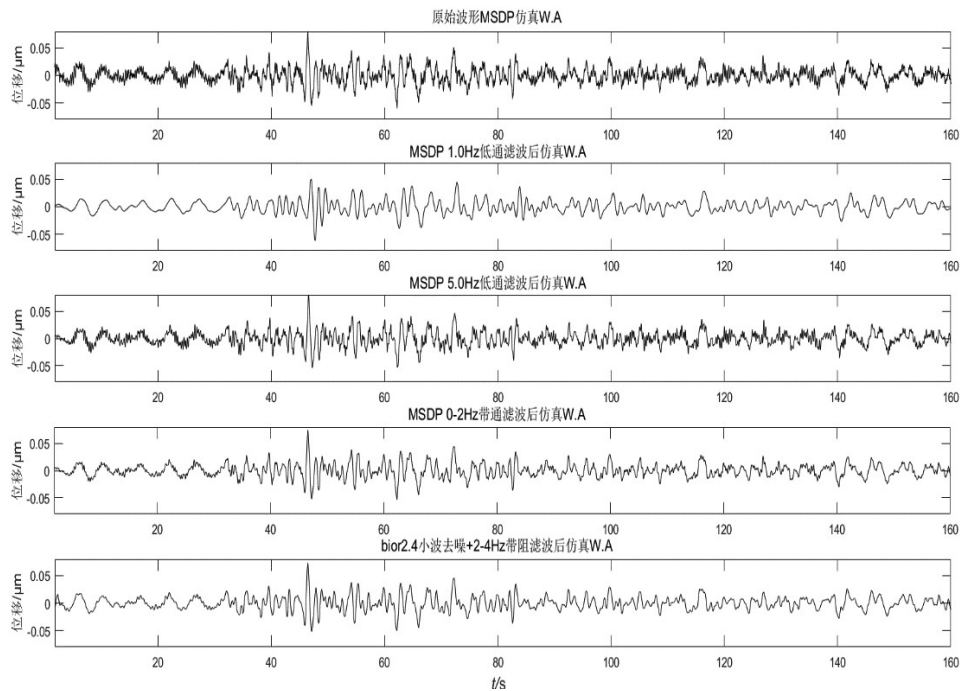
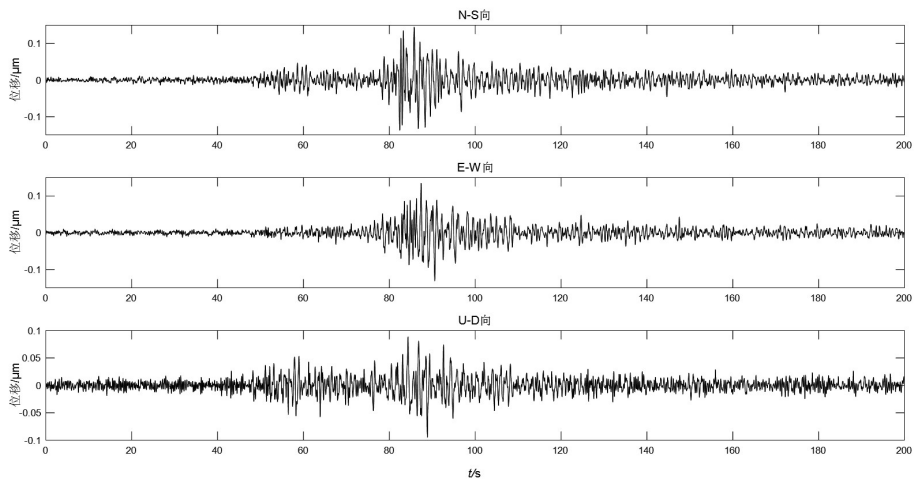
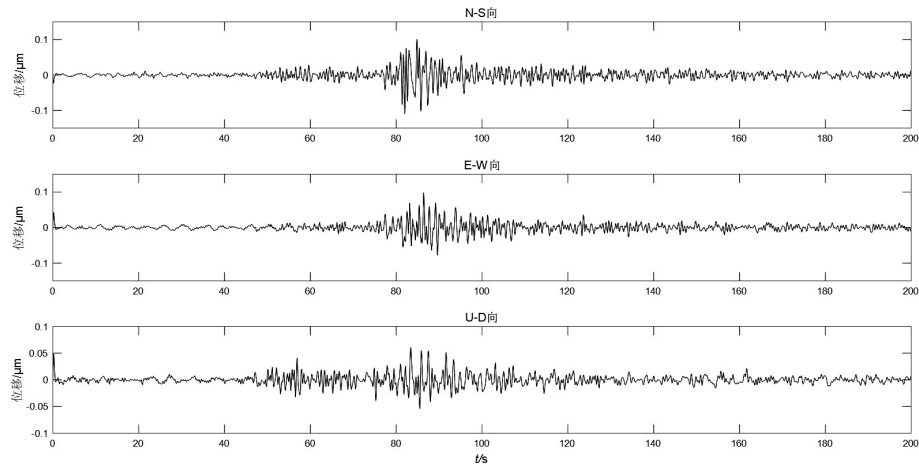


图 3 MSDP 滤波功能与组合处理法的处理结果

Fig.3 The processing results of MSDP filter function and combination processing method



(a)原始波形 MSDP 仿真 W.A



(b)bior2.4 小波去噪及带阻滤波后仿真 W.A

图 4 九寨沟地震原始波形仿真 W.A 和去噪后波形仿真 W.A

Fig.4 The simulate W.A of original waveform and denoised waveform of Jiuzhaigou earthquake

成都地震台通过最优小波基选择法得到的最优小波基——bior2.4 小波, 根据台站测震数据干扰情况, 使用 bior2.4 小波去噪组合带阻滤波的方式进行干扰处理, 得到了理想的效果, 这种组合方法相比 MSDP 软件的滤波功能在成都地震台测震数据干扰处理中更具有优越性。

最优小波基选择法在成都地震台测震数据实际的干扰处理中得到了良好的应用, 这为其它受干扰严重、测震资料记录质量不佳的台站提供了有价值的参考。

本方法只在成都地震台的测震资料中进行了应用, 存在一定局限性。在今后的工作中, 将会利用更多的资料研究方法的适用性, 同时, 应不断对波形分析、干扰处理的方法进行更新与改进, 以应对未来将会出现的不同类型的干扰。

#### 参考文献:

- [1] 曾庆堂, 起卫罗, 马志刚等. MATLAB 消除腾冲台数字地震记录中干扰波的应用[J]. 华南地震, 2014, 34(1): 59-61.
- [2] 何思源, 李贵元. 关于成都地震台测震资料中 2~4 Hz 干扰频率范围的研究[J]. 内陆地震, 2019, 33(1): 82-84.
- [3] 张华, 陈小宏, 杨海燕等. 地震信号去噪的最优小波基选取方法[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1): 71-73.
- [4] 李媛媛. 小波变换去除面波的方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [5] 高玉宝, 查代奉, 江金龙. 一种新的最优小波基选择准则及其应用[J]. 通信技术, 2008, 41(11): 185-187.
- [6] 田文德, 叶剑庆, 胡俊明. 成都地震台 JCZ-1 与 JCZ-1T 甚宽频带地震仪对比观测分析[J]. 地震研究, 2013, 36(3): 372-373.
- [7] 刘克骧. 时间域数字滤波法地震仿真记录的 Matlab 实现[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(3): 131-132.