

隧道超前地质预报中时频域去噪方法对比研究

王 伟¹, 刘孝卫²

¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

²北京思凯维科地球物理信息技术有限公司, 北京

收稿日期: 2022年11月1日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘 要

在隧道超前地质预报数据采集工作中, 常会出现空气振动波(声波噪音信号)的干扰, 表现为频率高、振幅大、到日晚, 并且与地震波反射波信号相互重叠。介绍了时频域短时傅里叶变换、小波变换和S变换, 这三种变换数学原理, 根据声波与反射波信号在时频域的特征差异性, 实现对声波压制, 提高反射波信噪比。通过实际数据对比分析了空气振动波对地震记录噪声干扰的机制, 利用三种时频域去噪方法对声波进行压制。结果表明, 因S变换的时频窗口随频率自适应调整, S变换在隧道超前地质预报中时变滤波效果更好。

关键词

隧道超前地质预报, 时频分析, 短时傅里叶变换, 小波变换, S变换

A Study on Time-Frequency Domain Denoising Methods in Tunnel Advance Geological Prediction

Wei Wang¹, Xiaowei Liu²

¹The State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic, Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Beijing Sikaiweike Geophysical Information Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Nov. 1st, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

The interference of air vibration wave (acoustic noise signal), which is characterized by high fre-

quency, large amplitude, late arrival, and overlapping with seismic reflection wave signal, often occurs in the data acquisition of tunnel advance geological prediction. This paper introduces the time-frequency methods to suppress sound noises which include short-time Fourier transform, wavelet transform and S-transform. The mathematical principles of these three transformations can suppress sound waves and improve the signal-to-noise ratio of reflected waves according to the difference in time-frequency characteristics between sound waves and reflected waves. The interference mechanism of air vibration wave to seismic record noise is analyzed through comparison of actual data, and three time-frequency domain denoising methods are used to suppress acoustic wave. The results show that the time-varying filtering effect of S transform is better in advance geological prediction of tunnel because the time-frequency window of S transform is adaptively adjusted with frequency.

Keywords

Tunnel Advance Geological Prediction, Time-Frequency Analysis, Short-Time Fourier Transform, Wavelet Transform, S-Transform

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在 seismic wave tunnel advance geological prediction data acquisition process, explosive air vibration wave will be received by seismic wave sensor, in seismic wave signal recording, air vibration wave will overlap with effective seismic wave signal, thus affecting the realness of advance prediction data processing results [1]. How to eliminate air vibration wave in advance prediction data processing process is to improve data signal-to-noise ratio and geological anomaly body accurate location important steps [2] [3] [4]. Through commonly used bandpass filtering processing, it is found that air vibration wave cannot be effectively eliminated in single frequency domain. Reflection seismic wave tunnel advance geological prediction very dependent on data processing, through data denoising, initial arrival picking, wavefield separation, reflection wave extraction, migration imaging etc. finally determine the position of reflection interface [5], so the identification of reflection wave is very important, and the appearance of sound wave just overlaps with seismic wave reflection signal, this will cause great trouble for seismic wave reflection wave extraction.

In reflection seismic wave tunnel advance geological prediction, the collected data can be regarded as non-stationary signal, and in the processing of non-stationary signal, time-frequency transform is a very important signal analysis method [6] [7]. Explosive sound wave caused detector interference in TSP data recording is more complex, air vibration wave speed is generally 344 m/s, and seismic wave average speed in earth's crust is 6200 m/s [8], advance prediction seismic wave speed is also generally above 1500 m/s [9], the two have time difference in waveform recording time, and their frequency bands also have differences, their main frequency is higher than seismic wave main frequency, frequency band overlaps with seismic wave frequency band, so it is difficult to eliminate through bandpass filtering. Sound wave interference to detector is air vibration wave entering detector protection sleeve, detector borehole forming tube-in-tube vibration and air vibration wave causing protection sleeve vibration, the two overlapping forming complex interference, interference wave does not have fixed slope of same axis, so it is difficult to remove through Radon transform, τ -p transform or FK transform [10] [11] [12] [13] [14]. In summary, time-frequency domain denoising method is more suitable for air vibration wave removal.

2. 时频域去噪方法原理

Time-frequency domain denoising method is to transform signal from time dimension to time-frequency dimension, for convenient noise removal with time and frequency related, commonly used time-frequency domain denoising methods are: short-time Fourier transform time-frequency domain denoising method, wavelet transform time-frequency domain denoising method, S transform time-frequency domain denoising method etc. [15] [16] [17]. Short-time Fourier transform is proposed by Gabor in 1946, a kind of time-frequency window Fourier transform

变换, 将信号进行等时间、小间隔的分段, 对每个小的时间间隔进行傅里叶变换, 用以对传统的傅里叶变换加入时间性[18] [19] [20]。小波变换是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一门新兴的应用数学分支, 近年有学者将小波变换引入到工程振动信号分析等领域中[21] [22] [23]。S 变换是 1996 年由地球物理学家 Stockwell 提出的一种给信号加特殊时窗的短时傅里叶变换表示法, 即 S 变换从短时傅里叶变换发展而来, 其窗口可随频率做适应性变化, Pinneger 等人将 S 变换应用于含噪声的非平稳信号处理[24] [25] [26] [27]。文章接下来会对短时傅里叶变换、小波变换及 S 变换这三种时频域提取算法进行详细介绍, 对比其在 TSP 数据处理中对空气振动波干扰的滤除效果, 通过对实际采集的 TSP 数据进行处理, 分析了短时傅里叶变换、小波变换以及 S 变换的时频分析特性, 与短时傅里叶变换、小波变换两种时频分析方法进行对比, 分析了 S 变换的特点。

2.1. 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换原理, 见图 1:

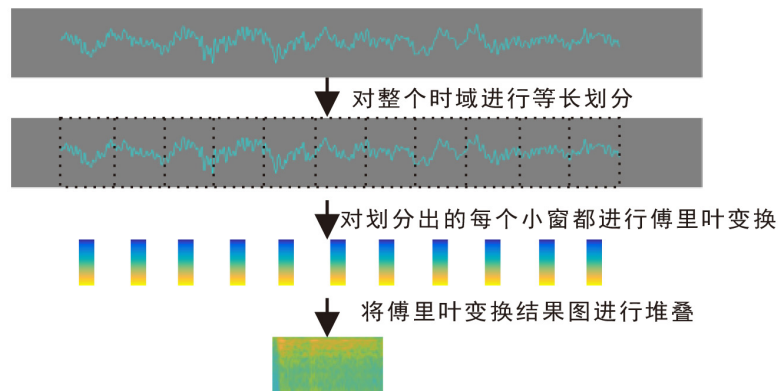


Figure 1. Theory of Short Time Fourier Transform
图 1. 短时傅里叶变换原理

$$\langle s(t), \psi(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^*(t) dt \quad (1)$$

式(1)中, t 表示时间, $s(t)$ 为时域信号, $\psi(t) = e^{-i2\pi ft}$, f 表示频率, $i = \sqrt{-1}$, “ \langle, \rangle ” 号表示内积, “ $*$ ” 号表示复共轭[28]。

根据复变函数欧拉公式 $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ [29], 傅里叶变换可表示为:

$$X(f) = FT\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

傅里叶逆变换可表示为:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (3)$$

短时傅里叶变换的表达式为:

$$S_F(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(\tau - t) e^{-i\omega t} d\tau \quad (4)$$

从定义式(4)可以看出, $h(t)$ 是一个“滑动的”窗口, 当 t 发生变化时, 它随着 t 的变化而沿着信号 $s(z)$ 滑动[30]。由此利用窗函数把整段信号先分解成一系列近似平稳的“小片段”, 再对每一个不同的“小片段”进行傅里叶变换得到对应的频谱, 这些频谱的总和即为信号的时频分布, 即“频谱图”, 其中, ω 为

角频率[31] [32]。短时傅里叶变换的逆变换表达式为:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_F(\tau, \omega) h(t-\tau) e^{i\omega\tau} d\tau d\omega \quad (5)$$

2.2. 小波变换

首先, 若函数 $\psi(t)$ 满足条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

且能保证能量单位化

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi_{a,b}(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (7)$$

称函数 $\psi(t)$ 为母小波或基小波。式(7)中, a 称为伸缩因子或尺度因子, 用来调整子波频率的覆盖范围; b 称为平移因子, 用来调整子波的时域位置[22]; 一般地:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0, b \in R \quad (8)$$

称为母小波 $\psi(t)$ 生成的连续小波函数, 它是依赖于参数 a, b 的小波基函数, 可表示一类由同一基本小波经过伸缩、平移后得到的函数族[31] [32]。

若 $\psi(t)$ 平方可积并且其傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足连续小波变换的允许性条件:

$$\int_0^{\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (9)$$

则信号 $s(t)$ 在尺度 a 、位置 b 的连续小波变换定义为:

$$W_s(a, b) = \langle s, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

这里,

$$\hat{\psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (11)$$

根据 Parseval 恒等式[33] [34]

$$\iint_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) W_h^*(a, b) \frac{da db}{a^2} = C_{\psi} \langle s, h \rangle \quad (12)$$

若母小波函数 $\psi(t)$ 满足公式(12), 那么有:

$$\int_0^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) W_h^*(a, b) db \right] \frac{da}{a^2} = \frac{1}{2} C_{\psi} \langle s, h \rangle \quad (13)$$

则连续小波变换的逆变换为:

$$s(t) = \frac{2}{C_{\psi}} \int_0^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) W_h^*(a, b) db \right] \frac{da}{a^2} \quad (14)$$

2.3. S 变换

在短时傅里叶变换中, 根据信号分析的不确定原理, 窗函数为高斯类函数时, 窗口面积达到最小[35]。

结合短时傅里叶变换公式, S 变换可表示为 $\left\langle s(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}}, e^{-i2\pi f t} \right\rangle$ 的内积形式[36], 即(图 2)

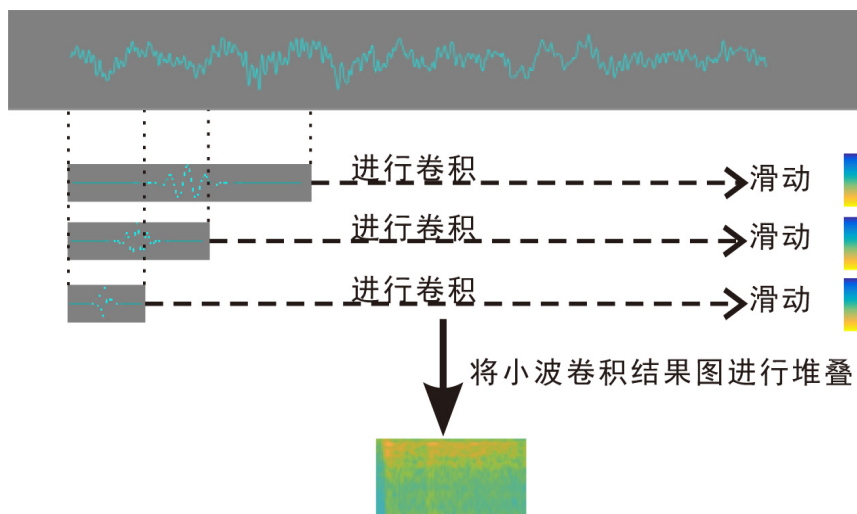


Figure 2. Schematic diagram of wavelet transform
图 2. 小波变换原理图

$$S_{ST}(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) e^{\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} d\tau \quad (15)$$

可以得出, S 变换与傅里叶变换之间有关系[37] [38]

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{ST}(t, f) dt &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i2\pi f t} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau - t, f) d\tau dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= TF(f) \end{aligned} \quad (16)$$

根据短时傅里叶变换在时频域的相互转化, 可得到 S 变换在频域的表达:

$$\begin{aligned} S_{ST}(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} FT(\gamma + f) H(\gamma) e^{i2\pi \gamma t} d\gamma \\ &= IFT[FT(\gamma + f) H(\gamma)] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, γ 与 f 是相同的意义, $H(\gamma)$ 表示 S 变换窗函数 $h(t)$ 的傅里叶变换[39]。由此可得出无损 S 变换逆变换(IST)的表达式为:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_{ST}(\tau, f) d\tau \right] e^{i2\pi f t} df \quad (18)$$

3. 实际数据处理与分析

TSP 原始数据见图 3(a), 从图中可知, 空气振动波的干扰非常强烈, 大部分的地震反射波信号被覆盖在空气振动波的干扰中, 该数据在 2020 年 9 月 25 日采集于兰张三四线铁路古浪段某隧道。在地震记录中声波干扰部分往往表现为干扰时间长、振幅大、时间长的特点[40], 而干扰波初至的连线刚好为 344 m/s, 这表明检波器在接收到空气振动波干扰的时候, 同时也接收了由空气振动波引起的其他干扰振动(图 3(b))。

对该隧道采集的 TSP 原始地震信号进行短时傅里叶变换、小波变换及 S 变换的时频域提取及声波去噪处理, 并进行结果分析及算法特点介绍。

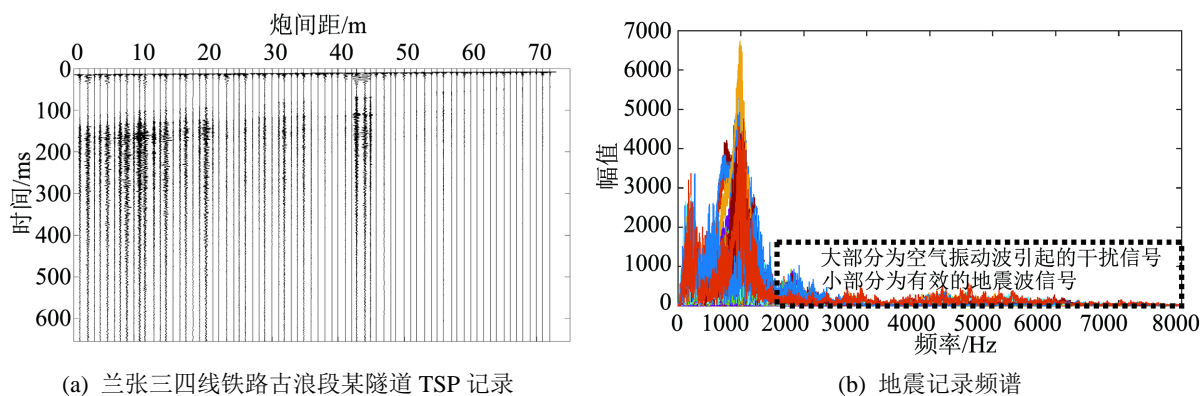


Figure 3. Seismic Record (a) and Spectrum (b) of Tunnel in Gulang of Lanzhang Railway
图 3. 兰张三四线铁路古浪段隧道地震记录(a)与频谱(b)

3.1. 短时傅里叶变换

对原始 TSP 数据进行短时傅里叶变换计算时, 需要提前指定参数, 根据信号的特点, 采用 Hamming 窗; 矩形窗的基波各振幅都比较尖, 其对应的频谱中频宽较宽且主频分散, 主要是矩形窗的主瓣较窄, 对频率高的数据部分有较好的分辨率, 但其旁瓣增益较高, 基波相邻谐波之间的干扰严重, 容易发生频率泄露, 而 Hamming 窗则无明显的频率泄露[41]。每个窗口的长度设为 300 个采样点; 每相邻两个窗口的重叠率为窗口长度的一半; 每个窗口的 FFT 采样点数为与窗口长度最接近的 2 的 N 次方的数, 参数指定完成后, 对数据进行短时傅里叶变换, 提取出时频域数据, 见图 4。

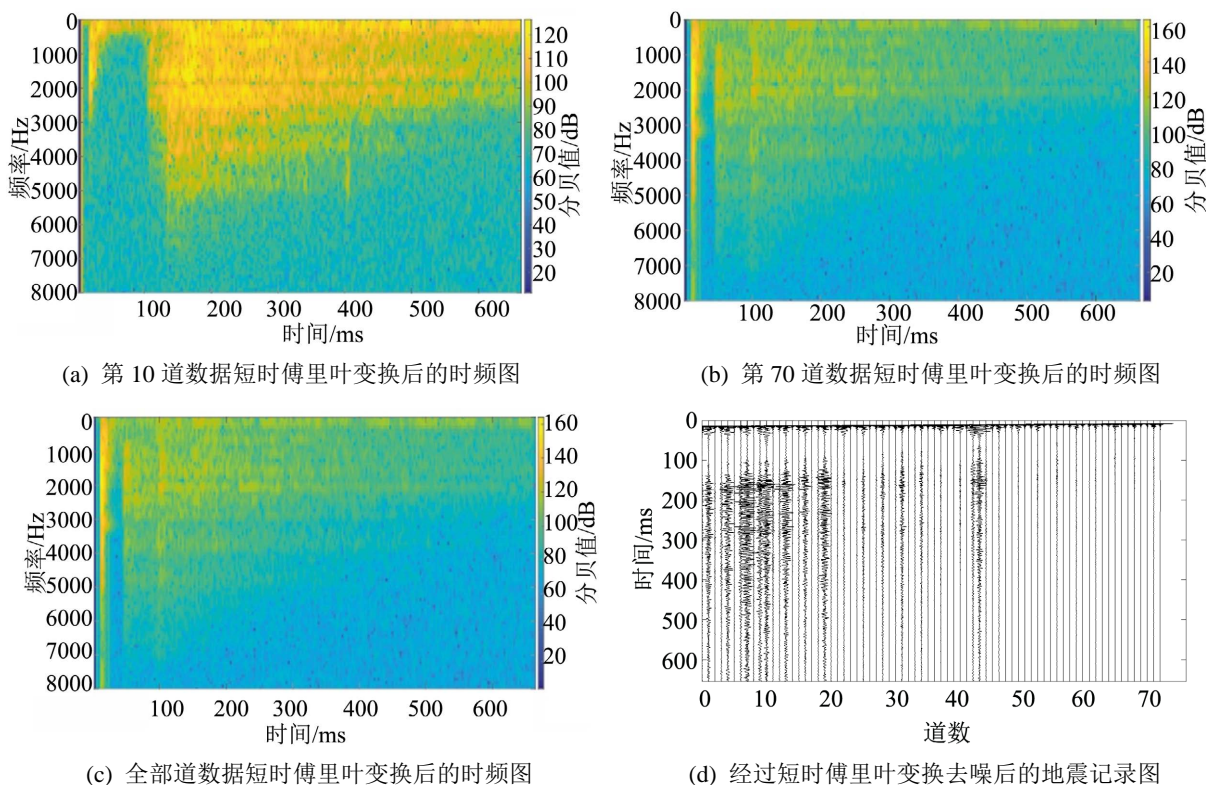


Figure 4. Time Spectrum and Seismic Record of Short time Fourier Transform
图 4. 短时傅里叶变换处理前后的地震记录图

通过原始地震信号图 3(a)可知: 第 10 道的声波干扰较强, 其对应的时频图见图 4(a); 第 70 道的声波干扰非常弱, 其对应的时频图见图 4(b); 对比图 4 中的(a)、(b)可以看出短时傅里叶变换时频分析的结果符合该原始地震信号声波干扰特征。对原始地震信号的全部道进行短时傅里叶变换时频分析结果见图 4(c), 对时间靠后的高频信号进行去除后, 在进行逆短时傅里叶变换可得到去噪后的地震信号见图 4(d), 初至地震波被有效的保留下来, 而声波干扰部分的高频信号被去除, 取得有较好的去噪效果。

短时傅里叶变换克服了傅里叶变换对非平稳信号分析时, 没有时间性的缺陷, 算法增加了窗函数后, 就实现了时间 - 频率分析, 算法简单实用, 降低了初学者研究时频分析算法时的门槛。

短时傅里叶变换不足之处在于, 对于局部变化较大的非平稳信号处理效果较差。短时傅里叶变换使用的窗函数是固定长度的, 计算时其形状就不再改变, 即分辨率也就确定了。如果要改变分辨率, 则需要重新选择窗函数, 不能兼顾频率与时间分辨率的需求。受到测不准原理的限制, 短时傅里叶变换窗函数的时间与频率分辨率不能同时达到最优[7]。

3.2. 小波变换

小波变换必须通过小波基的运算进行实现, 可以视为将短时傅里叶变换无限长的三角函数基换成了有限长的会衰减的小波基, 其能量有限, 都集中在某一点附近, 且积分的值为零[42]。通过公式(8)可知, 可以通过小波变换的尺度 a 得到频率, 通过平移量 b 得到时间, 故可提取出信号的时频谱。选用复的 morlet 小波基, 其带宽参数和中心频率取得越大, 时频图上反映的时频聚集性越好, 选择尺度为 512, 通过小波变换变换的时频分析可得的图 5。

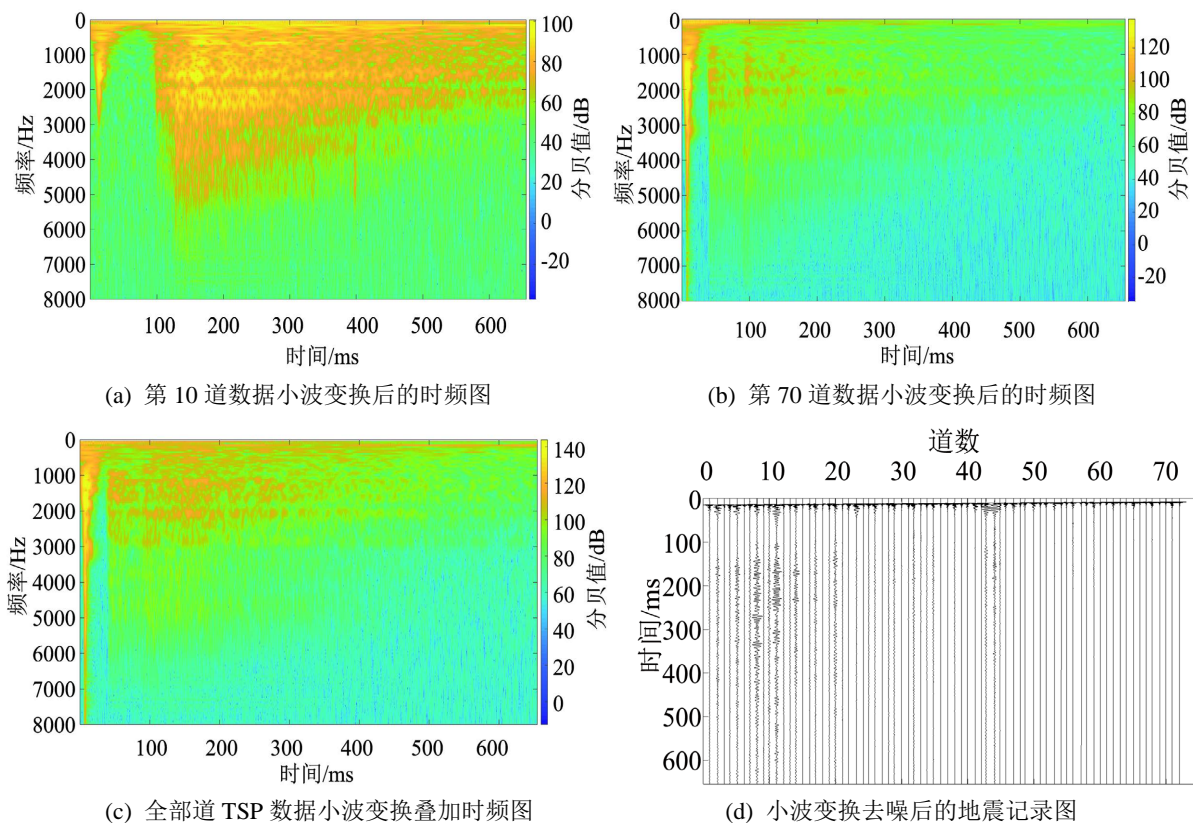


Figure 5. Time Spectrum and Seismic Record of Wavelet Transform

图 5. 小波变换处理前后的地震记录图

对比图 5 中的(a)、(b)可以看出小波变换时频分析的结果符合该原始地震信号声波干扰特征。对原始地震信号的全部道进行小波变换时频分析结果见图 5(c), 去除噪声信号后, 进行逆小波变换可得到图 5(d), 初至地震波被有效的保留下来, 而声波干扰部分的高频信号被去除, 取得有良好的声波去噪效果。

小波变换具有多分辨特性, 通过适当地选择尺度因子、平移因子及基本小波, 就可以使小波变换在时域和频域都具有较好的分辨能力[21]。小波变换的原理与傅里叶变换在无穷区间上对相互正交的三角函数信号和原信号分段进行积分的原理是类似的, 但小波基函数可根据信号特征构造, 这为信号和噪声的分离以及分频处理带来了很大的方便[22]。小波变换的缺点在于将时间信号分解到时间尺度域, 而非时频域, 尺度并不是真实的频率。除此之外, 小波变换的自适应性是建立在需要选定一个适合原始数据的小波基函数, 这两点可能会导致小波变换在作信号处理时得到较低的时频分辨率[23]。

3.3. S 变换

进行 S 变换计算时, 需要提前定义一个可进行伸缩与平移的高斯窗函数作为 S 变换的唯一基函数, 其余的计算步骤与短时傅里叶变换、小波变换中的一些步骤一致。通过对给定的实际 TSP 地震数据进行处理, 可以得到图 6 中(a)、(b)、(c)图, 去噪后的地震记录见图 6(d), 可知 S 变换拥有很好的时频提取效果及噪声去除效果。

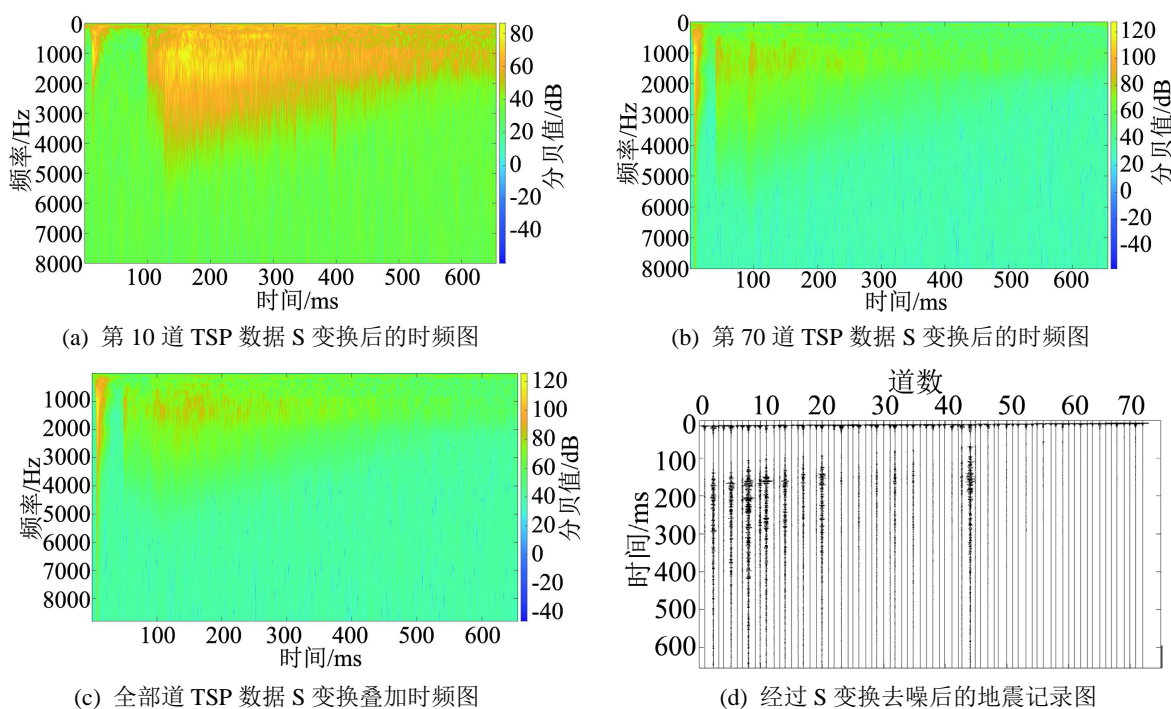


Figure 6. Time Spectrum and Seismic Record of S-transform
图 6. S 变换处理前后的地震记录图

S 变换算法是对小波变换的一种相位修正算法, 其分辨率可随信号的实际频率而变化, 且具有明确频率意义的。其缺点是当信号的频率较高时, S 变换的频宽窗口就比较大, 而时间窗口就比较小, 从而导致了频率分辨率较低而时间分辨率较高。

4. 结论

时频域去噪方法是处理地震反射波法隧道地质超前预报声波干扰的重要工具。该方法将信号分解到

时间-频率域, 突出了信号的频谱随时间的变化规律。通过对实际采集地震波数据对比分析, 结果表明, 时频域去噪三种方法中由于 S 变换的时频窗口随频率自适应调整, S 变换在隧道超前地质预报时滤波波中效果更具精度优势。

参考文献

- [1] 张杨, 杨君, 周黎明, 肖国强. TSP 在隧道工程施工中的常见干扰和对岩体裂隙水及软弱夹层等的预报研究[J]. 地球物理学进, 2018, 33(2): 892-899.
- [2] 朱海龙. 影响 TSP203 隧道超前地质预报系统探测准确度的因素研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 82-87.
- [3] 刘阳飞, 李天斌, 孟陆波, 贾金晓, 曹海洋. 提高 TSP 预报准确率及资料快速分析方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 159-166. <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.24>
- [4] 夏龙龙. 福厦高铁隧道超前地质预报 TSP 法应用效果及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020. <https://doi.org/10.27414/d.cnki.gxnju.2020.002012>
- [5] 何刚. TSP-203 系统在隧道超前地质预报中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [6] 陈颖频. 非平稳信号时频分析与地震频谱成像研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [7] 徐增光. 地震信号的时频分析方法研究及实际应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. <https://doi.org/10.27643/d.cnki.gsybu.2019.001388>
- [8] 卢造勋, 夏怀宽. 内蒙古东乌珠穆沁旗-辽宁东沟地质断面[J]. 地球物理学报, 1993(6): 765-772.
- [9] 韩锋. 运用 TSP-203plus 波速探析围岩类别存在的问题及解决方法[J]. 工程质量, 2011, 29(7): 62-64.
- [10] 查欣洁, 王伟, 高星. 拟 VSP 与克希霍夫偏移法在隧道超前预报中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 214-219.
- [11] 张霖斌, 何樵登, 方云峰. 频率波数域预测和减去法压制多次波[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002(1): 96-99. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2002.01.023>
- [12] 巩向博. 高精度 Radon 变换及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [13] 王朝令, 刘争平. τ -p 变换在隧道反射地震超前预报波场分离中应用的数值模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2216-2225.
- [14] 朱大虎. 基于 Radon 变换的高密点地震信号去噪方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [15] 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 1-2.
- [16] 刘彦萍. 时空二维时频峰值滤波方法压制地震勘探随机噪声的研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [17] 黄德峰, 张军华, 郭见乐, 冯德永, 刘立彬. 几种时频分析方法在地震信号中的应用对比[C]//2018 年中国地球科学联合学术年会论文集(二十九)——专题 59: 计算地球物理方法和应用、专题 60: 地热资源成因新理论与综合探测新技术. 北京: 中国地球物理学会, 2018: 23-24.
- [18] 林婷婷, 李玥, 高兴, 万玲. 基于改进短时傅里叶变换的磁共振随机噪声消减方法[J]. 物理学报, 2021, 70(16): 134-146.
- [19] 田琳, 胡津健. 稀疏短时傅里叶变换谱分解方法及应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2581-2587.
- [20] 戴前伟, 吴铠均, 张彬. 短时傅里叶变换在 GPR 数据解释中的应用[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1227-1231.
- [21] 赵玉宝. 小波变换在地震信号去噪中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [22] 段瑞敏. 基于小波变换的地震信号降噪技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地震研究所, 2016.
- [23] 杨丹, 李伟, 魏永梁, 宋斌. 双树复小波变换在川藏铁路拉林段某隧道超前地质预报中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1504-1511.
- [24] 孙静涛. 广义 S 变换和 Gabor 反褶积在隧道地质超前预报信号处理中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [25] 金标. 基于广义 S 变换极化分析的多波多分量超前成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2020. <https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.002150>
- [26] 魏学强. 地震信号的广义 S 变换时频分析[C]//2015 中国地球科学联合学术年会论文集(十)——专题 28 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题 29 盆地动力学与能源、专题 30 活动断层、地震构造与深部结构. 北京: 中国地球物理学会, 2015: 79-81.

- [27] 杨海涛, 朱仕军, 杨爱国, 常智, 彭才. S 变换时变滤波在去噪处理中的应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(6): 56-58+208.
- [28] 覃发兵, 徐振旺, 啜晓宇, 张小明, 郭乃川, 董玉文, 陈伟. 基于经验小波变换的地震资料噪声压制方法[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(5): 100-110.
- [29] 廖玉洁. 几种时频分析方法及其在油气地震勘探中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [30] 韩兵. 基于广义 S 变换的地震信号时频分析[J]. 内蒙古石油化工, 2016, 42(Z2): 57-60.
- [31] 魏学强, 袁洪克, 秦晶晶, 左莹. 广义 S 变换地震信号时频分析[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(4): 808-813.
- [32] 齐晶晶. 时频分析方法及其在地震信号谱分解中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. <https://doi.org/10.27643/d.cnki.gsybu.2018.001342>
- [33] 于腾. 基于改进小波变换的微地震信号噪声压制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [34] 李玲利, 王清东, 沈文渊, 朱良保. S 变换在面波去噪中的应用[J]. 地震学报, 2012, 34(6): 830-840+879.
- [35] 李刚. 基于 S 变换的地震信号相干噪声压制研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [36] 李振春, 刁瑞, 韩文功, 刘力辉. 线性时频分析方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4): 239-246+227.
- [37] 徐鑫, 张学强, 徐涛, 张晓敏. 小波变换在压制面波中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008(2): 196-200.
- [38] 周怀来. 基于小波变换的地震信号去噪方法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [39] 陈学华, 贺振华. 改进的 S 变换及在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005(4): 449-453. <https://doi.org/10.16337/j.1004-9037.2005.04.020>
- [40] 吕志强. 时变高截滤波在隧道地震波预报数据处理中的应用[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 24-28.
- [41] 白燕燕, 胡晓霞. 基于 MATLAB 的语音短时谱的分析[J]. 电子测试, 2019(18): 44-45. <https://doi.org/10.16520/j.cnki.1000-8519.2019.18.017>
- [42] 安蕴. 基于 MATLAB 的小波分析用于地震信号的去噪研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2012.