

董明荣,符力耘,杨军,等.MCZT 在气枪震源信号频谱分析中的应用[J].地震工程学报,2020,42(3):646-652.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.646
DONG Mingrong,FU Liyun,YANG Jun,et al.Application of the Modified Chirp-Z Transform in Spectrum Analysis of Air-gun Seismic Source Signals[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):646-652.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.646

MCZT 在气枪震源信号频谱分析中的应用

董明荣^{1,2,4}, 符力耘^{1,2,3}, 杨 军⁵, 李孝宾⁵, 叶 泵⁵,
张 艳^{1,2}, 魏 伟^{1,2}, 卢晓林⁴

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院地球与行星物理院重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029; 3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

4. 楚雄州地震局, 云南 楚雄 675000; 5. 中国地震局滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000)

摘要: 气枪震源信号是短时非平稳信号,采用频谱细化算法能提高频谱分析的准确性。首先进行了改进线性调频 Z 变换(MCZT)和 FFT 两种频谱分析算法的误差仿真计算,然后进行气枪震源的水下子波信号和地震波信号的对比计算。结果表明 MCZT 计算误差较小、计算时间较少,能有效提高气枪震源信号频率和幅度特征提取的准确性,是气枪震源信号频谱特征分析的一个有效方法。

关键词: 气枪震源;水下子波;地震波;频谱细化;改进线性调频 Z 变换(MCZT)

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0646-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.646

Application of the Modified Chirp-Z Transform in Spectrum Analysis of Air-gun Seismic Source Signals

DONG Mingrong^{1,2,4}, FU Liyun^{1,2,3}, YANG Jun⁵, LI Xiaobin⁵, YE Beng⁵,
ZHANG Yan^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, LU Xiaolin⁴

(1.Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2.Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3.School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China;

4.Earthquake Agency of Chuxiong Prefecture, Chuxiong 675000, Yunnan, China;

5.Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, China Earthquake Administration, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract: The air-gun seismic source signal is a kind of short-time non-stationary signal, and the spectral zoom algorithm can improve the accuracy of the spectral analysis of such signals. In this study, the error simulation calculations of the two spectral analysis algorithms of a modified chirp-Z transform (MCZT) and fast Fourier transform (FFT) were carried out. Second, the underwater wavelet signal and seismic wave signal of the air-gun seismic source were calculated and compared. The results show that the MCZT algorithm has a smaller error and its computation time is less than that of the FFT. It can effectively improve the extraction accuracy of the frequency and amplitude feature of air-gun seismic source signals. This indicates that the MCZT algorithm is an effective method to analyze

收稿日期:2018-04-12

基金项目:中国地震局地震科技星火计划项目(XH17031SX);云南省陈颙院士工作站(2014IC007)

第一作者简介:董明荣(1977-),男,副研究员,博士后,主要主要从事物理学、主动源探测等方面的研究。E-mail:dongmr@126.com。

the spectrum characteristics of air-gun seismic source signals.

Keywords: air-gun seismic source; underwater wavelet; seismic wave; spectrum zoom; modified chirp-Z transform (MCZT)

0 引言

以气枪震源为主动源的区域尺度精细地下结构和介质变化成像技术研究已经取得了重要进展^[1-2],也开展了气枪震源实验信号的一些处理分析工作^[3-6]和气枪震源的数值模拟工作^[7-8]。

气枪震源激发产生的水下压力波信号和陆地的地震信号都是非整周期的短时非平稳信号,需要研究频谱分析方法的计算误差,采用计算误差较小的频谱分析算法进行气枪震源信号的计算,提高提取信号频率和幅度特征数据的准确性。频谱细化分析是一种重要的频谱分析手段,已经应用于超声成像^[9]、声反馈抑制^[10]、电力谐波分析^[11]、地震信号处理^[12]、电位测量^[13]等方面,气枪震源信号的频谱细化分析还未见报道。

常见的频谱细化分析方法有基于复调制的 Zoom-FFT 法、Chirp-z 变换等,这些频谱细化分析算法的适用性各有不同^[14]。改进线性调频 Z 变换(modified chirp Z transform,简称 MCZT)是一个频谱细化的有效方法,计算精度高、计算快。本文针对气枪震源信号的特性对 MCZT 频谱细化算法的计算误差进行仿真分析,然后计算了典型气枪震源实验信号的频谱,为主动源实验信号的频率和幅度特征提取和分析提供参考。

1 MCZT 频谱分析原理

MCZT 及逆变换 IMCZT 的定义式分别为:

$$X(k) = \text{MCZT}x((n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N_1} kn\right), \quad k=0,1,\dots,N-1 \tag{1}$$

$$x'(n) = \text{IMCZT}(X(k)) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp\left(j \frac{2\pi}{N_1} kn\right), \quad k=0,1,\dots,N-1 \tag{2}$$

IMCZT 的计算相当于 MCZT 计算的共轭, $x'(n) \neq x(n)$ 。

式(1)用 N 点序列 $x(n)$ 计算 N 点频谱 $X(k)$,是 CZT(Chirp-z Tranform) 的一个特例。频谱分辨率由 N_1 决定, $\Delta f = fs/N_1$ 。当取 $N_1 = fs$ 时,频谱分辨率是 1 Hz, N_1 的选择不受 N 的限制。采用 MCZT 计算频谱,可以得到平滑的谱。

MCZT 的计算过程如下^[15]:

① 计算权函数:

$$h_0(n) = \exp\left(\frac{j\pi n^2}{N_1}\right), n=0,1,\dots,N-1 \tag{3}$$

② 由 $h_0(n)$ 构造 $h_1(n)$ 和 $w(n)$:

$$h_1(n) = \begin{cases} \exp\left(\frac{j\pi}{N_1}\right), & n=0 \\ \exp\left[\frac{j\pi (N-n)^2}{N_1}\right], & n=1,2,\dots,N-1 \end{cases} \tag{4}$$

$$w(n) = \exp\left(-j \frac{\pi n^2}{N_1}\right), n=0,1,\dots,N-1 \tag{5}$$

③ 将 $h_0(n)$ 和 $h_1(n)$ 合并成

$$h(n) = \begin{cases} h_0(n), & n \in (0, N-1) \\ h_1(n-N), & n \in (N, 2N-1) \end{cases} \tag{6}$$

④ 加权函数、补零和计算频谱

$$x_w(n) = \begin{cases} x(n) \exp\left(-j \frac{\pi n^2}{N_1}\right), & n \in (0, N-1) \\ 0, & n \in (N, 2N-1) \end{cases} \tag{7}$$

$$g_1(k) = \sum_{n=0}^{2N-1} x_w(n) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{2N}\right) \tag{8}$$

$$g_2(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_0(n) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{2N}\right) + \sum_{n=N}^{2N-1} h_1(n-N) \exp\left(-j \frac{2\pi kn}{2N}\right) \tag{9}$$

$$g(n) = \sum_{k=0}^{2N-1} [g_1(k) g_2(k)] \exp\left(j \frac{2\pi kn}{2N}\right) \quad n=0,1,\dots,2N-1 \tag{10}$$

⑤ 截取

$$X(k) = g(k) \exp\left(-j \frac{\pi K^2}{N_1}\right), k=0,1,\dots,N-1 \tag{11}$$

2 典型信号的频谱分析仿真

为了分析 MCZT 算法的计算准确性,与 FFT 进行了计算正弦波仿真信号频谱的对比分析。为叙述方便,设仿真信号的幅度单位为 Pa,设频率计算误差为仿真信号频率与频谱计算得到的谱峰频率差值的绝对值,设幅度计算误差为仿真信号幅度与频谱计算得到的谱峰幅度差值的绝对值。

(1) 单频信号频谱分析

以气枪震源气泡脉动主要能量的频率所在的 5~10 Hz 为仿真的信号频率范围。对频率 5 Hz、

幅度 2.21 Pa、采样率为 100 kHz、信号长度 1 s 的正弦仿真信号的频谱计算结果如图 1 所示,FFT 和 MCZT 的频率计算误差分别为 1 Hz 和 0.03 Hz、幅度计算误差都为 0。还进行了幅度 2.21 Pa、频率 6.66 Hz 的仿真信号频谱计算,结果如图 2 所示。类似的,5 个典型频率成分信号的频谱计算误差列于表 1。可看出两种频谱分析算法对 5 Hz、6 Hz、10 Hz 这 3 个整周期采样的信号的幅度计算误差为 0,FFT 算法对于整周期和非整周期信号的频率计算误差都不小于 1 Hz,而 MCZT 算法对于整周期和非整周期信号的频率和幅度的计算误差都不大于

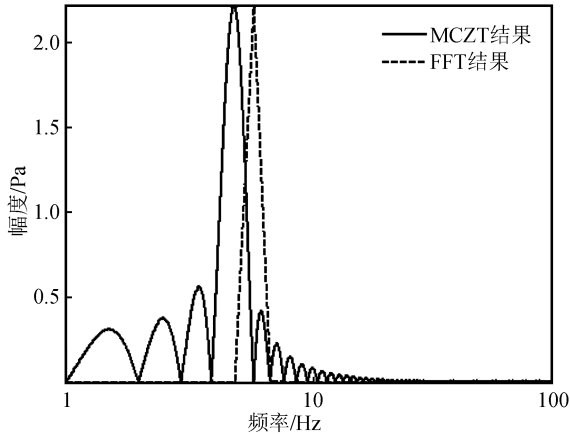


图 1 5 Hz 信号的频谱
Fig.1 Spectrum of the 5 Hz signal

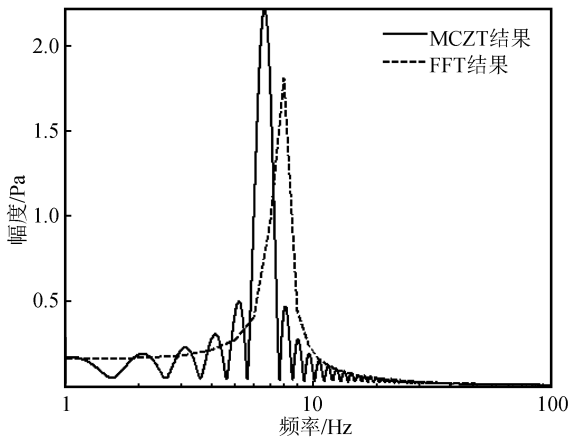


图 2 6.66 Hz 信号的频谱
Fig.2 Spectrum of the 6.66 Hz signal

表 1 5 种信号的频谱计算误差

Table 1	Spectrum calculation error of the five signals				
	5 Hz	6 Hz	6.66 Hz	8.88 Hz	10 Hz
FFT 频率误差/Hz	1	1	1.34	1.12	1
MCZT 频率误差/Hz	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02
FFT 幅度误差/Pa	0	0	0.42	0.04	0
MCZT 幅度误差/Pa	0	0	0.02	0.02	0

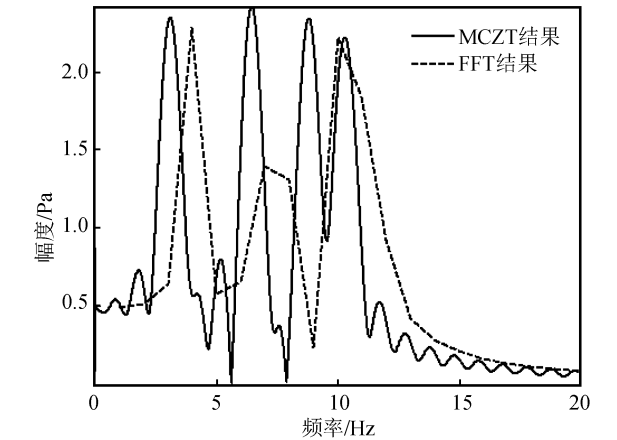


图 3 5 种频率成分信号频谱
Fig.3 Spectrum of the five signals

0.03 Hz。因此,可看出 MCZT 算法频谱分析准确性明显优于 FFT 算法。

(2) 多频信号频谱分析

对 3.2 Hz、6.6 Hz、8.8 Hz、10.3 Hz 这 5 个频率的多频信号进行频谱分析,采样率为 100 kHz、信号长度为 1 s,幅度都是 2.21 Pa,FFT 的频谱分辨率是 1 Hz,MCZT 的频谱分辨率是 0.000 2 Hz。从图 3 的频谱计算结果可看出,MCZT 可以计算出被 FFT 丢失的 6.6 Hz 的谱峰,而且频率准确性比 FFT 高很多。具体计算误差列于表 2,表内圆括号内的幅度计算误差单位为 dB(声压级)。由表 2 可看出 FFT 对 6.6 Hz 和 8.8 Hz 的频率成分的幅度计算误差超过了 4 dB,MCZT 的 5 个频率的幅度计算误差最大为 0.78 dB。

在频谱分析计算耗时方面,i7-6500U 2.60 GHz 处理器、8GB 内存的计算机,FFT 的计算时间是 1.01 s,MCZT 的计算时间是 0.12 s。显然,采用 MCZT 计算细化的频谱,相对于 FFT 是减少计算时间的。

表 2 多频信号的频谱计算误差

	频率计算误差/Hz				幅度计算误差/dB			
	3.2	6.6	8.8	10.3	3.2	6.6	8.8	10.3
FFT	0.8	0.4	0.8	0.3	0.08 (0.29)	0.82 (4.02)	0.90 (4.55)	0.01 (0.04)
MCZT	0.08	0.12	0.04	0.02	0.14 (0.52)	0.21 (0.78)	0.13 (0.50)	0.01 (0.05)

3 扫频和变幅度的频谱分析仿真

3.1 5~8 Hz 扫频仿真

整周期信号的频谱分析具有误差较小的优点,但实际信号处理过程的频率成分往往超过一个、目标频率有可能随时间发生变化,难以实现整周期的频谱分析。因此,需要分析非整周期频谱分析的误差情况。

气枪震源水下气泡脉动产生的水下的子波信号和地震信号具有基频和多次谐波,其基频是 1~10 Hz 范围的低频信号。仿真信号采样率设为 100 kHz,选取 5~8 Hz 范围进行扫频的频谱分析仿真,这个范围包含了 5~6 Hz、6~7 Hz 和 7~8 Hz 3 个非整周期的频率成分。仿真的信号长度为 1 s,5~8 Hz 范围内依次分析间隔 0.01 Hz 的频率成分,MCZT 的最高频率设为 500 Hz。

图 4 和图 5 为 FFT 和 MCZT 频谱的频率和幅度误差,图中的幅度百分比误差为幅度误差与幅度实际值的比值的百分数。可以看出 FFT 和 MCZT

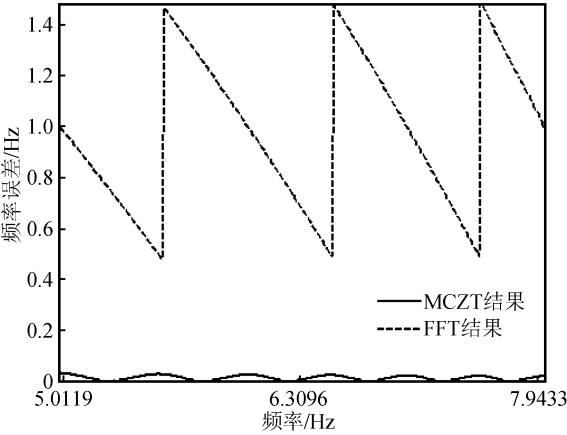


图 4 5~8 Hz 扫频的频率误差

Fig.4 Frequency error of the 5-8 Hz frequency sweep

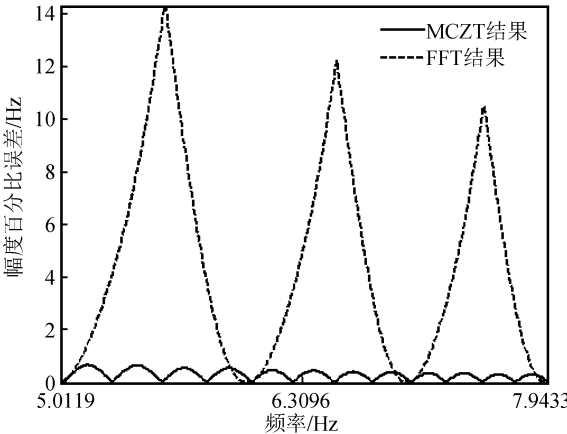


图 5 5~8 Hz 范围扫频的幅度误差

Fig.5 Amplitude error of the 5-8 Hz frequency sweep

频谱的频率和幅度误差都存在周期性,FFT 的误差的周期大约与整周期频率的周期相同。在包含 3 个非整周期的 5~8 Hz 范围,FFT 的误差大约有 3 次波峰波谷的变化。MCZT 的误差周期比 FFT 的短,即在 FFT 的一个误差周期内 MCZT 有多个误差周期。FFT 的频率误差最大约 1.5 Hz,幅度误差最大约 1.3 dB、幅度百分比误差最大约 14%;MCZT 的频率误差最大约 0.03 Hz,幅度误差最大约 0.06 dB、幅度百分比误差最大约 0.6%。

3.2 2~497 Hz 和 2.8~497.8 Hz 扫频仿真

气枪震源水下的子波信号主要能量的频率成分大约是从几 Hz 到几百 Hz,因此,对频率为 2~500 Hz 范围进行频谱仿真计算。为了分析整周期和非整周期的情况,分别对 2~497 Hz 和 2.8~497.8 Hz 两个频率范围进行扫频,频率间隔都设置为 5 Hz。采样率为 100 kHz、信号长度 1 s,MCZT 的最高频率设为 500 Hz。

2~497 Hz 范围间隔 5 Hz 扫频计算的频率都是整周期采样的,所以 FFT 和 MCZT 的幅度误差都为 0,仅对频率误差进行分析。计算结果表明 FFT 的频率误差恒定为 1 Hz。图 6 是 MCZT 的频率误差计算结果,可看出 MCZT 的频率误差在 2 Hz 时最大、约 0.07 Hz,随着频率增大误差在减小,70 Hz 以上的频率计算误差几乎为 0。

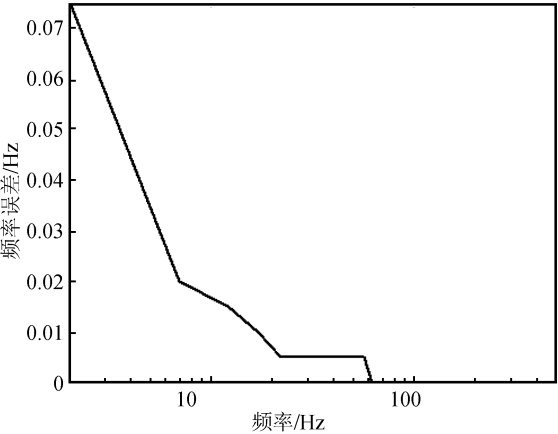


图 6 2~497 Hz 范围 MCZT 扫频的频率误差

Fig.6 Frequency error of the 2-497 Hz frequency sweep with MCZT

2.8~497.8 Hz 范围间隔 5 Hz 扫频计算的频率都是非整周期采样的。计算结果表明 FFT 的频率误差恒定为 1.2 Hz。图 7 是 MCZT 的频率误差计算结果,可看出 MCZT 的频率误差在 2.8 Hz 时最大、约 0.005 Hz,随着频率增大误差在减小,8 Hz 以上的频率计算误差几乎为 0。图 8 是幅度误差计算结果,可看出随着频率的增大,FFT 和 MCZT 的幅

度计算误差在减小,FFT 在 2.8 Hz 时幅度误差约 0.37 dB、4.2%,MCZT 在 2.8 Hz 时幅度误差约 0.12 dB、1.4%,FFT 约从 200 Hz 起幅度误差为 0,MCZT 约从 30 Hz 起幅度误差为 0。

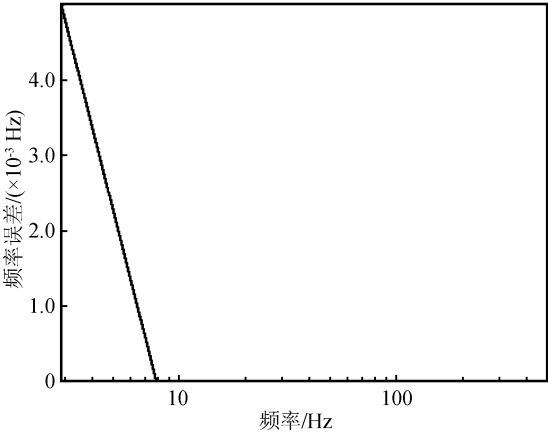


图 7 2.8~497.8 Hz 范围 MCZT 扫频的频率误差
Fig.7 Frequency error of the 2.8—497.8 Hz frequency sweep with MCZT

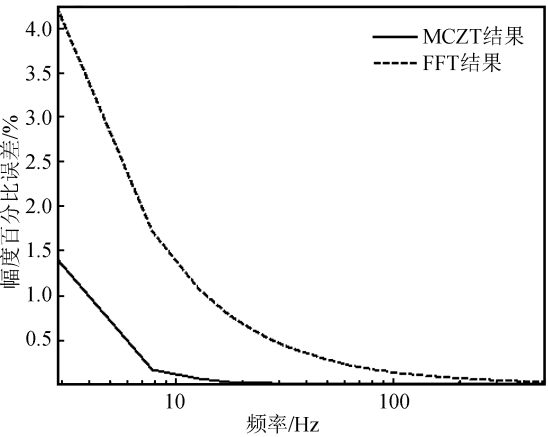


图 8 2.8~497.8 Hz 范围扫频的幅度误差
Fig.8 Amplitude error of the 2.8—497.8 Hz frequency sweep

3.3 1~20 000 Pa 变幅度频谱分析仿真

气枪震源水下子波信号气泡脉动的能量最大是万 Pa 量级,因此,对 1~20 000 Pa 幅度范围进行频谱仿真计算。采样率为 100 kHz、信号长度 1 s,频率设为 5.52 Hz,MCZT 的最高频率设为 500 Hz。计算结果表明随信号幅度的增大,FFT 和 MCZT 的频率误差和幅度误差都是恒定的,FFT 的频率误差是 0.48 Hz、幅度误差是 3.86 dB、35.9%,MCZT 的频率误差是 0.025 Hz、幅度误差是 0.02 dB、0.2%。

4 气枪震源信号频谱分析实例

图 9 是气枪震源正上方 4 m 处的 B&K8105 水

听器记录的水下子波信号及其频谱分析结果。计算信号时间长度 1 s,包含了气枪震源子波的冲击波和气泡脉动波,最高 10 000 Hz 的频谱是 FFT 算法计算的,最高 30 Hz 的频谱是 MCZT 算法计算的,显然 FFT 的频率分辨率比 MCZT 的低、谱峰幅度比 MCZT 的小,频谱曲线没有 MCZT 的光滑连续。因

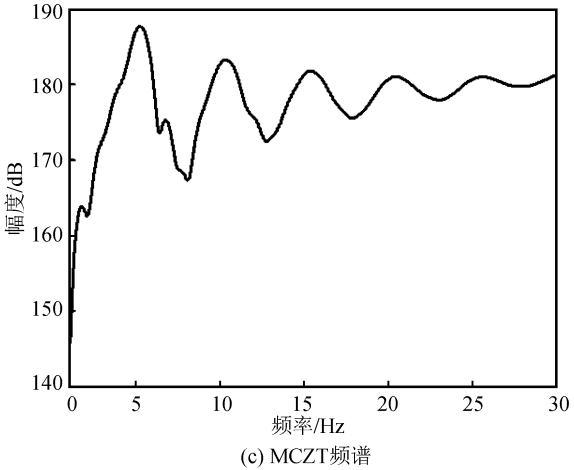
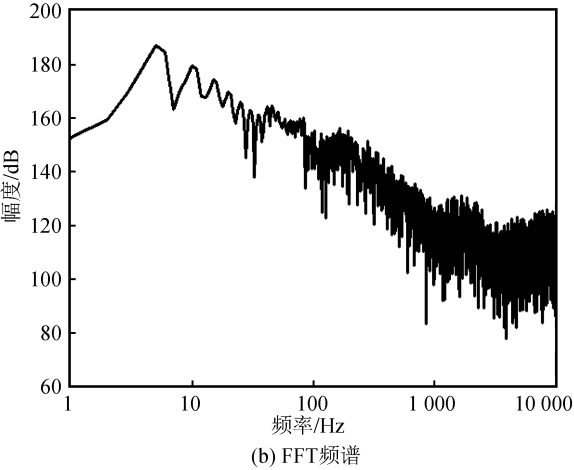
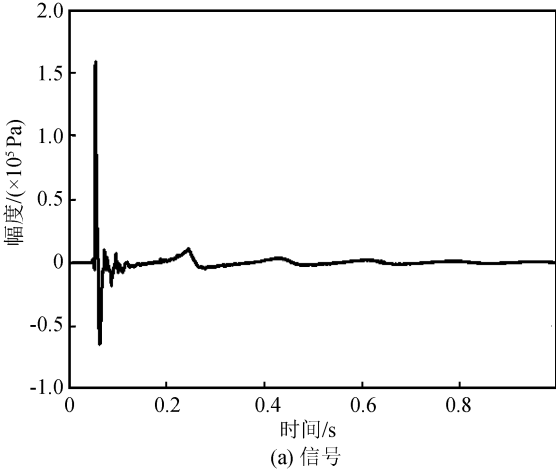
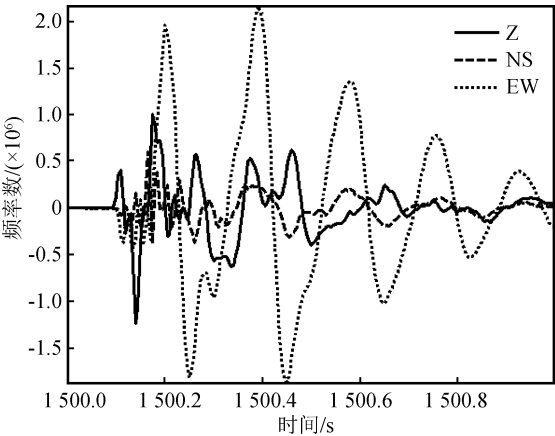


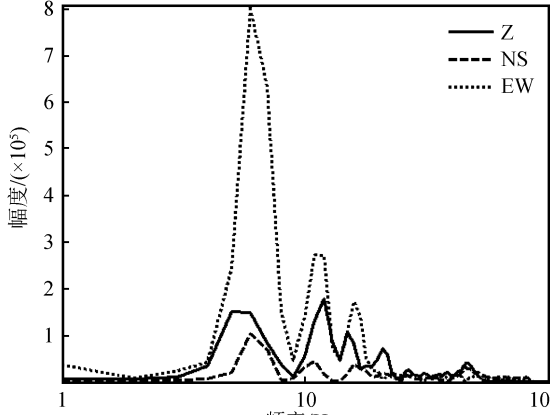
图 9 气枪震源水下子波信号和频谱
Fig.9 Signal and spectrum of the underwater wavelet of the air-gun seismic source

此,FFT 频谱适用于粗略分析大频率范围的频谱特征,MCZT 频谱用于精细分析低频的频谱特征,比如提取目标频率成分的幅度。

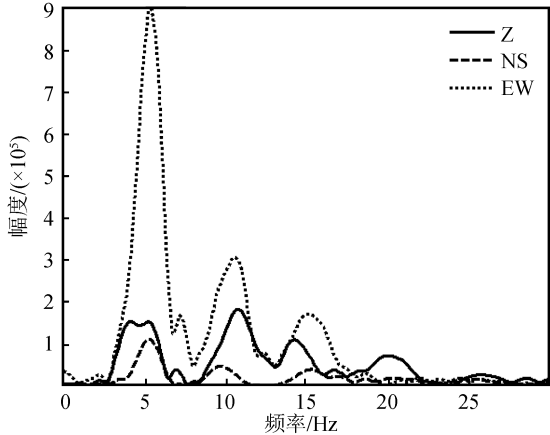
图 10 为气枪震源激发的地震波信号及其频谱。计算结果。可看出 MCZT 频谱比 FFT 频谱的幅度更准确、频谱曲线更光滑连续、基频和谐波的频率数值更准确。



(a) 信号



(b) FFT 频谱



(c) MCZT 频谱

图 10 气枪震源地震信号和频谱

5 小结

本文根据气枪震源信号的频率和幅度特性,通过仿真对比分析了 MCZT 和 FFT 两种频谱分析算法的频率和幅度的计算误差,表明 MCZT 算法对气枪震源低频信号的频谱分析误差较小、计算耗时较少。进行了气枪震源水卜子波和地震信号实例的频谱分析计算,计算结果表明 MCZT 频谱计算结果的频率和幅度较准确、频谱曲线较光滑连续。因此,采用 MCZT 算法进行气枪震源信号的频谱分析可以提高分析结果的准确性。

致谢:本研究使用了云南宾川地震信号发射台的气枪激发记录资料,在此表示衷心感谢。

参考文献(References)

[1] 陈颢,朱日祥.设立“地下明灯研究计划”的建议[J].地球科学进展,2005,20(5):485-489.
CHEN Yong,ZHU Rixiang.Proposed Project of “Underground Bright Lump”[J].Advances in Earth Science,2005,20(5):485-489.

[2] 王宝善,葛洪魁,王彬,等.利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J].中国地震,2016,32(2):168-179.
WANG Baoshan,GE Hongkui,WANG Bin,et al.Practices and Advances in Exploring the Subsurface Structure and Its Temporal Evolution with Repeatable Artificial Sources[J].Earthquake Research in China,2016,32(2):168-179.

[3] 林建民,王宝善,葛洪魁,等.大容量气枪震源子波激发特性分析[J].地球物理学报,2010,53(2):342-349.
LIN Jianmin,WANG Baoshan,GE Hongkui,et al.Characters of Large Volume Air-gun Source Excitation[J].Chinese Journal of Geophysics,2010,53(2):342-349.

[4] LANDRØ M,AMUNDSEN L.Is it Optimal to Tow Air Guns Shallow to Enhance Low Frequencies? [J].Geophysics,2014,79(3):A13-A18.

[5] 武安绪,叶泵,李红,等.气枪震源弱信号提取的可靠性初步分析[J].中国地震,2016,32(2):319-330.
WU Anxu,YE Beng,LI Hong,et al.The Preliminary Analysis of Reliability on Weak Signal Extraction for Air-gun Source Surveys[J].Earthquake Research in China,2016,32(2):319-330.

[6] 夏季.大容量气枪震源特性研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2017.

XIA Ji.Study on the Characteristics of Large Volume Air-gun Source[D].Harbin:Institute of Engineering Mechanics,CEA,2017.

[7] KING J R C,ZIOLKOWSKI A M,RUFFERT M.Boundary

Fig.10 Seismic signal and spectrum of the air-gun seismic source

Conditions for Simulations of Oscillating Bubbles Using the Non-Linear Acoustic Approximation[J].Journal of Computational Physics,2015,284:273-290.

[8] 董明荣,符力耘,杜广源,等.气枪震源近场气泡脉动效应的三维模拟[J].中国地震,2016,32(2):261-269.

DONG Mingrong, FU Liyun, DU Guangyuan, et al. The 3D Simulation of near Field Effect for the Air Bubble Pulsation of the Air-gun Seismic Sources[J].Earthquake Research in China,2016,32(2):261-269.

[9] 乔喜梅,成思.频谱细化技术在井周超声成像下井仪中的应用[J].石油仪器,2012(2):13-14,17,6.

QIAO Ximei, CHENG Si. Application of Frequency Spectrum Refinement in Circumferential Acoustic Scanning Tool[J].Petroleum Instruments,2012(2):13-14,17,6.

[10] 向志军.ZOOM FFT 频谱细化分析方法在声反馈抑制中的应用[J].电声技术,2013,37(7):57-60.

XIANG Zhijun. ZOOM FFT Refinement Spectrum Analysis Method for Acoustic Feedback Suppression[J].Audio Engineering,2013,37(7):57-60.

[11] 付波,邢鑫,程琼,等.频谱细化在电力谐波分析仪中的应用[J].计算机与数字工程,2013,41(8):1350-1353.

FU Bo, XING Xin, CHENG Qiong, et al. Application of a Power Harmonic Analyzer Based on Zoom-FFT[J].Computer and Digital Engineering,2013,41(8):1350-1353.

[12] 杨永侠,田广平.地震信号的复调制细化方法的频谱分析[J].西安工业大学学报,2013,33(2):168-172.

YANG Yongxia, TIAN Guangping. Analysis of Seismic Signal Spectrum Based on ZFFT[J].Journal of Xi'an Technological University,2013,33(2):168-172.

[13] 刘伟,张珊珊,John C Thomas,等.基于频谱细化算法的电泳光散射 Zeta 电位测量方法[J].光学学报,2017,37(2):292-298.

LIU Wei, ZHANG Shanshan, JOHN C Thomas, et al. Zeta Potential Measurement Method of Electrophoretic Light Scattering Based on Chirp Z-Transform[J].Acta Optica Sinica,2017,37(2):284-290.

[14] 赵宏强.频谱细化算法分析[J].四川兵工学报,2013,34(5):105-109,112.

ZHAO Hongqiang. Analysis of Spectrum Zoom Algorithms[J].Journal of Sichuan Ordnance,2013,34(5):105-109,112.

[15] 杨亦春,马驰州,李晓东,等.相关峰细化的精确时延估计快速算法研究[J].声学学报,2003,28(2):159-166.

YANG Yichun, MA Chizhou, LI Xiaodong, et al. Algorithm Study of Fast and Accurate Time-Delay Estimation with Fine Interpolation of Correlation Peak[J].Acta Acustica,2003,28(2):159-166.