

张帅,杨润海,张演,等. 2022. 一种基于曲波域的压缩感知降噪方法及其在水库气枪信号中的应用[J]. 地震研究, 45(3):441-451, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0044.

Zhang S, Yang R H, Zhang Y, et al. 2022. Application of a compressive sensing denoising method based on curve wave domain to airgun signals in reservoirs[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3):441-451, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0044.

一种基于曲波域的压缩感知降噪方法及其在水库气枪信号中的应用*

张帅¹, 杨润海^{✉1}, 张演¹, 张惠菊², 姚远¹, 沈娅宏¹, 李平¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 开远市地震局, 云南 开远 661699)

摘要: 针对气枪主动源信号的特点, 构建了一种基于曲波域的压缩感知降噪方法, 并将其应用于气枪主动源信号处理。介绍了将新发展的压缩感知理论与曲波域全变差技术相结合的降噪方法的原理和处理流程。通过数值模拟, 将该方法与传统方法的处理效果进行了对比评价, 降噪后的波速测量结果与模拟信号基本一致。将该方法应用到实际的气枪主动源的数据处理中。结果表明: 该方法在去除随机噪声的同时, 也压制了相干干扰现象。

关键词: 气枪源信号; 降噪; 压缩感知; 曲波变换; 全变差

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)03-441-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0044

0 引言

利用地震波研究地球内部介质变化依赖于重复性震源, 使用天然重复震源进行介质变化测量的时间、空间分辨率及精度都受到一定程度的限制, 而大部分人工震源监测研究主要集中于浅层地壳(王宝善等, 2016)。近年来, 利用气枪重复震源研究地球深浅部结构和介质变化成为一种有效手段。大容量气枪震源与其它震源相比, 有着激发性能高、低频成分丰富、可重复性好、绿色环保、安全效能高等特点(Wang et al, 2016, 2020; Chen et al, 2017; 陈颢等, 2007; 王伟涛等, 2017), 应用前景十分广阔。

在气枪源探测过程中, 地震波速变化测量本质是要解决数字信号处理的时延估计问题, 其中信噪比是影响信号波速测量精度的关键(杨润海

等, 2020; 蒋生森等, 2017)。而实际地震记录信号由于存在随机干扰和能量衰减, 具有一定的非平稳性, 同时气枪震源能量有限, 传播距离较远时信号信噪比低, 甚至难以辨认(向涯等, 2019; 李孝宾等, 2017; 徐逸鹤等, 2016)。在波速变化的计算过程中, 为了提高信噪比, 通常会对信号进行滤波和叠加等处理(刘自凤等, 2015; 叶泵等, 2017; 谭俊卿等, 2020; Xiang et al, 2019), 但由于部分台站距离太远, 有效信号往往湮灭在噪声之中, 利用传统降噪方法处理后的信号信噪比仍然较低, 导致波速变化的计算结果误差较大, 甚至不能反映真实的介质变化情况。因此, 运用新的降噪方法压制噪声, 仍是提高地震资料信噪比和增强信号测量精度的主要途径。

曲波变换是一种能够对信号进行最优稀疏化变换的方法, 它是通过基函数与信号的内积来实现信号的稀疏表示(Candes, Donoho, 1999; Can-

* 收稿日期: 2021-07-06.

基金项目: 云南省地震局青年基金(2018k09)、国家自然科学基金(41574059、41174043)和云南省地震局“地震机理与孕震环境研究”创新团队联合资助。

第一作者简介: 张帅(1990-), 工程师, 主要从事数字地震学方面的研究. E-mail: yn_zhangshuai@163.com.

✉ 通讯作者简介: 杨润海(1965-), 正高级工程师, 主要从事地震学方面的研究. E-mail: runhaiyang@163.com.

des et al, 2005), 具有多分辨率特性、时频局部性、多方向性等优点, 克服了小波变换表示边缘、轮廓等高维奇异时的局限 (Herrmann, Hennenfent, 2008; 仝中飞等, 2008)。由于有效信号通过曲波变换后的曲波系数是稀疏的, 而噪声信号是随机信号, 在曲波域中的系数表现为非稀疏性。有效信号受到噪声影响时, 在曲波域中的稀疏性降低。传统的曲波降噪方法是通过设定软硬阈值进行滤波, 大于设定阈值的系数保留, 小于阈值的去除, 但如果阈值设置过大, 在连续处容易造成不光滑的伪影或者伪吉布斯现象, 而阈值设置过小, 噪声压制能力减弱, 将会严重影响信号的降噪效果 (刘磊等, 2011, 王文波等, 2006), 因此在曲波域中引入全变差技术通过调整域中大小系数, 再进行阈值滤波, 可以使原始信号的主要特征得到保持 (唐刚, 杨慧朱, 2010)。

为了重建曲波域中由于阈值的设定导致系数过度缺失, 造成信号关键细节随机丢失的问题, 本文引入压缩感知理论。压缩感知理论是由 Candes 等 (2006) 正式提出 (Hennenfent, Herrmann, 2008), 随着近几年的不断发展, 已经成功应用于多个地震学和地球物理反演问题中 (张帅等, 2021; 唐刚, 2010; 姚华建, 2013; Yao *et al*, 2011)。压缩感知数据重建过程涉及稀疏变换、采样方法 (测量矩阵) 和重构算法, 大部分研究都是基于这 3 个方面开展 (Yin *et al*, 2014)。传统地震数据重建方法大都受 Nyquist 采样理论的限制, 对于不满足采样定理的超稀疏地震数据, 重建效果不佳 (郭念民等, 2014)。而压缩感知理论表明: 即使是随机缺失的数据, 也可以恢复出满足一定精度要求的完整数据 (唐刚, 杨慧朱, 2010; 孔丽云等, 2012, 白兰淑等, 2010)。因此利用压缩感知信号重建方法, 可以解决因阈值选取不当导致信号曲波域中重要系数缺失的问题, 最大程度地重构出有效信号的系数。

如上所述, 综合两种方法的优势, 本文构建了一种基于离散曲波变换的压缩感知方法, 将曲波域中的阈值滤波和全变差技术与压缩感知正交匹配重构算法 (OMP) 的稀疏促进策略充分结合起来, 对有效信号和噪声信号进行有效分离, 从而实现信号的高效降噪目的。

1 研究方法原理

1.1 曲波变换

信号的稀疏表示至关重要, 离散余弦变换、小波变换、曲波变换等都能稀疏表征信号, 因此常常被用作压缩感知的稀疏变换基。曲波变换具有各向异性和多尺度、多方向的诸多优点, 较其它 2 种方法稀疏效果更好 (Herrmann, Hennenfent, 2008), 是地震数据稀疏表达最有效的方法之一, 用离散曲波变换来稀疏表征地震信号的方法原理如下:

假定输入信号为 $f[t_1, t_2]$, 其中 $t_1 \geq 0$, $t_2 < n$, $t_1 < t_2$, 基于 wrapping 算法核心思想: 围绕原点包裹, 对任意区域映射到原点的仿射区域 (杨连刚等, 2019), 其具体变换流程如下:

①将 $f[t_1, t_2]$ 通过二维的傅立叶变换和 FFT 域采样得到表达式为:

$$\hat{f}[n_1, n_2] \quad (n_1 \geq -n/2, n_2 < n/2) \quad (1)$$

②每个尺度 j 和角度 l 与窗函数作用后得到:

$$\tilde{U}_{j,l}[n_1, n_2] \hat{f}[n_1, n_2] \quad (2)$$

③对于每一个大小为 $L_1 \times L_2$ 的窗数据, 围绕其原点, 可得:

$$\tilde{f}_{j,l}[n_1, n_2] = W(U_{j,l} \tilde{f})[n_1, n_2] \quad (0 \leq n_1 < L_1, 0 \leq n_2 < L_2) \quad (3)$$

④对每个 $\tilde{f}_{j,l}[n_1, n_2]$ 做二维傅立叶逆变换得到曲波域的系数表示为:

$$c^D(i, j, k) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 < n} \tilde{f}_{j,l}[n_1, n_2] \varphi_{j,l,k}^D[t_1, t_2] \quad (4)$$

式中: $\varphi_{j,l,k}^D$ 表示离散波形。

⑤取软硬阈值如下:

$$c^D = \begin{cases} k - \sigma & (k \geq \sigma) \\ 0 & (|k| \leq \sigma) \\ k + \sigma & (k \leq -\sigma) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 是阈值。

1.2 压缩感知理论

压缩感知理论核心思想是如果信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的，用一个与变换基不相关的观测矩阵将高维信号投影到低维空间上，然后通过重构算法就可以从低维信号重构出原始高维信号 (Candes *et al.*, 2005)。

假设气枪信号为 $y(n)$ ，其重构问题可以通过以下的模型进行表示：

$$y(n) = R \text{vec}[x(n)] \quad (6)$$

式中： $y(n)$ 表示通过测量矩阵得到的不完整的地震数据； vec 表示二维的向量化算子； $x(n)$ 表示二维完整地震数据； $R \in R_{P \times MN}$ ($P \ll MN$)，是根据缺失数据定义的单位测量随机矩阵，假设 O 为缺失数据位置， $R = 0$ ； I 为未缺失位置数据的位置， $R = 1$ (Kong, Yu, 2012)。在定义测量矩阵时， R 必须是随机测量矩阵，根据压缩感知理论，如果 \tilde{x} 在某一个变换域 Ψ 中是稀疏的，其变换系数为：

$$\alpha = \Psi^T \tilde{x} \quad (7)$$

式中： α 是 Ψ 的等价或者稀疏表示。

根据缺失的位置设计一个平稳的、变换基 Ψ 不相关的 $M \times N$ 维的测量矩阵 ϕ ，这里选用一个服从 $Z(0, 1/Z)$ 、正态分布、大小为 $M \times N$ 高斯随机矩阵来满足压缩感知理论对于随机投影矩阵的要求。对 α 进行观测得到观测数据为：

$$y = \phi \alpha = \phi \Psi^T x \quad (8)$$

式 (8) 为欠定方程组，有多个方程解，但 α 具有稀疏性，可以通过不断促进 α 的稀疏性进行反演求解。这就为实现缺失数据的精确重构成为可能。其中的稀疏促进策略 (Herrmann, Hennenfent, 2008) 如下：

$$\tilde{\alpha} = \underset{\alpha}{\text{argmin}} \frac{1}{2} \|y - \phi \alpha\|^2 (1 + \lambda \|\alpha\|_1) \quad (9)$$

式中： $\tilde{\alpha}$ 是 α 的估计值， $\|\alpha\|_1 = \sum_{i=1}^N \|\alpha_i\|$ ； λ 是阈值参数。

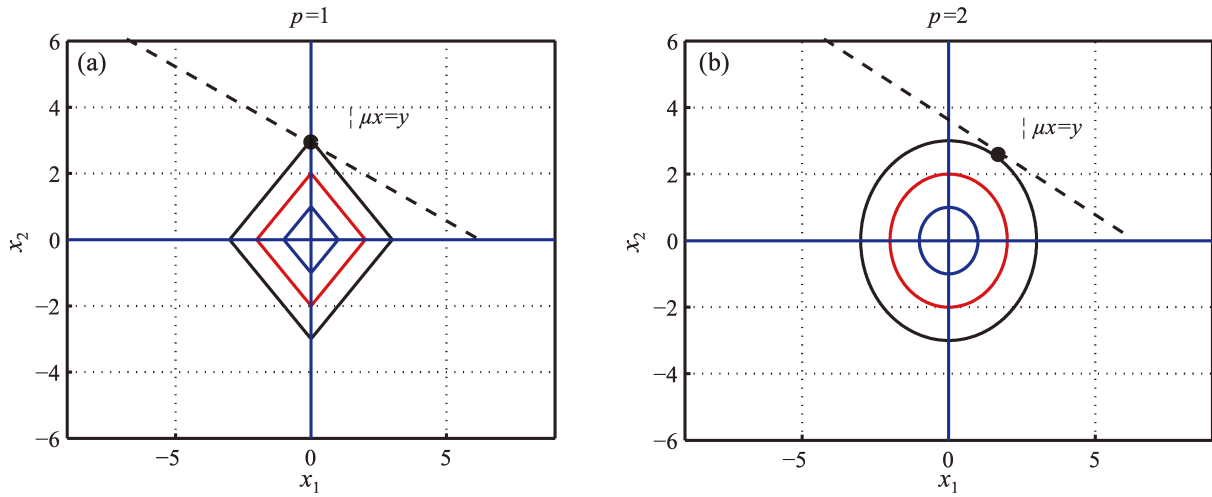


图1 L_1 范数 (a) 和 L_2 范数 (b) 求解示意图 (p 表示范数)

Fig. 1 Schematic diagram of solving L_1 norm (a) and L_2 norm (b)

模型空间限制在 x 的一个 L -ball 中。在 (x_1, x_2) 平面上可以画出目标函数直线，而约束条件则成为平面上大小不断变化的一个 norm ball。直线与 norm ball 首次相交的地方就是最优解。与 L_2 范数相比， L_1 范数更有可能得到值为 0 的解 (图 1)，使得 x 更具稀疏性 (姚华建, 2013)。

本文利用 L_1 范数求解得到 $\tilde{\alpha}$ ，通过不断促进 α 的稀疏性来得到 $\tilde{\alpha}$ 的最佳估计值。 $\|\alpha\|_1 = \sum_{i=1}^n |\alpha_i|$ 是 α 的 L_1 范数，利用“0-范数”意义下的优化问题求解 α 的精确或者近似逼近 $\tilde{\alpha}$ 。通过式 (9) 估计出最佳系数值以后，可以通过 $\alpha = \Psi^T \tilde{x}$ 求出缺失地震数据 $y(n)$ 的最佳重构数据 \tilde{x} 。

1.3 基于曲波域全变差的压缩感知降噪策略

气枪信号可以表征为 $y(n) = r + n$, 其中, r 代表有效信号, n 表示为噪声信号。基于曲波域的阈值滤波方法 (CSCT), 域中小系数容易被过度去除, 缺失信号关键细节信息, 并且不连续的区域常会出现震荡的伪影现象 (唐刚, 杨慧朱, 2010), 影响数据的降噪资料。因此, 需要首先利用压缩感知重建策略对因阈值滤波导致缺失的系数进行重建, 解决信号稀疏特征的连续性问题, 再通过全变差最小化技术对重建后的系数进行调整 (Newark, 1998; 沈维燕, 2006), 达到联合降噪的目的。

利用全变差最小技术对重建的曲波系数进行调整主要有两种方式: 一种是调整大于设定阈值的系数:

$$c^{D_{n+1}} = c^{D_n} - t^n p_{\geq}(g_{TV}(c^D)) \quad (10)$$

另一种是调整小于阈值设定的系数:

$$c^{D_{n+1}} = c^{D_n} - t^n p_{<}(g_{TV}(c^D)) \quad (11)$$

式中: $p_{<}$ 表示在小于设定阈值的曲波系数空间上的投影; p_{\geq} 表示在大于设定阈值的曲波系数空间上的投影; 设置最大迭代次数 N 和初始值, $n = 1$ 。 $g_{TV}(c^D)$ 通过以下过程求解。

假设 Ω 是 R^N 中的有限子集, 曲波域中系数 c^D 的全变差定义为:

$$TV(c^D) = \int_{\Omega} |Dc^D| = \sup_{v \in V} \int_{\Omega} (-c^D \operatorname{div} \cdot v) dx \quad (12)$$

其中

$$V = \{v \in C_0^1(\Omega)^N : |v(x)| \leq 1\} (\forall x \in \Omega) \quad (13)$$

对上式进行分部积分得到系数函数的全变差为:

$$TV(c^D | |\nabla c^D| dx) \quad (14)$$

式中: Ω 为图像 c^D 的支撑区间; $x \in \Omega$ 为图像的坐标向量。

基于全变差的降噪方法可通过最小化 $E(c^D)$ 来实现:

$$E(c^D) = \int_{\Omega} |c^D - c_0^D|^2 dx + \lambda TV(c^D) \quad (15)$$

式中: λ 是拉格朗日常数, 控制惩罚项的权重; 目标函数 $E(c^D)$ 是 c^D 的凸函数, 其存在的一阶充分必要条件是 $\nabla E(c^D) = 0$, 因此, 其对应的拉格朗日方程是

$$\operatorname{div} \left(\frac{\nabla c^D}{|\nabla c^D|} \right) - \lambda (c^D - c_0^D) = 0 \quad (16)$$

假设其满足 Neumann 边界条件, 可通过投影梯度算法进行求解:

$$c^{D_{n+1}} = c^{D_n} - t(g_{TV}(c^D)) \quad (17)$$

式中: 初始值可设为 $c^{D_1} = c_0^D$; $t \geq 0$ 表示迭代步长; $g_{TV}(c^D)$ 表示全变差函数的次梯度。

$$g_{TV}(c^D) = (2c_{i,j}^D - c_{i+1,j}^D) \times [(c_{i,j+1}^D - c_{i,j}^D)^2 + (c_{i+1,j}^D - c_{i,j}^D)^2 + \beta^2]^{-1/2} + (c_{i,j}^D - c_{i-1,j}^D) \times [(c_{i,j}^D - c_{i-1,j}^D)^2 + (c_{i-1,j}^D - c_{i,j}^D)^2 + \beta^2]^{-1/2} + (c_{i,j}^D - c_{i,j-1}^D) \times [(c_{i+1,j-1}^D - c_{i,j-1}^D)^2 + (c_{i,j}^D - c_{i,j-1}^D)^2 + \beta^2]^{-1/2} \quad (18)$$

式中: $\beta > 0$ 为一个很小的正值, 以解决全变差函数在某些点的不可微性, 取步长

$$t_n = 1/\sqrt{n} \quad (19)$$

式中: $n = n + 1$, 判断 n 是否接近 N , 如果是迭代结束, 否则继续求解次梯度。

基于曲波域的压缩感知降噪方法具体的流程如图 2 所示。

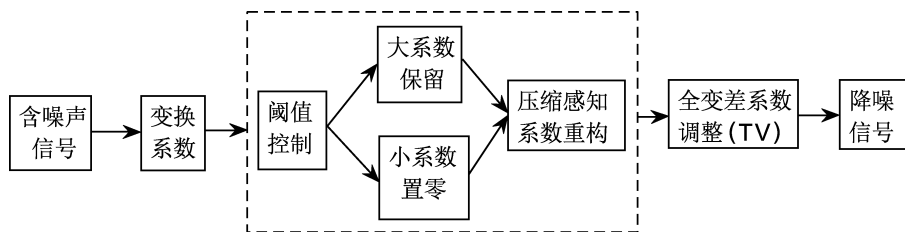


图 2 基于曲波域的压缩感知降噪方法流程图

Fig. 2 The compress sensing denoising method based on curve wave domain

2 数值模拟

为了验证方法的有效性, 利用信噪比值 R_{sn} 及均方根误差 M_{se} 来衡量气枪信号的降噪效果:

$$R_{sn} = 10 \lg \frac{\|X\|_2^2}{\|\bar{X} - X\|_2^2} \quad (20)$$

式中: X 为模拟气枪信号; \bar{X} 为降噪后的气枪信号。

$$M_{se} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (21)$$

式中: X_i 为模拟气枪信号; \bar{X} 为降噪后的气枪信号。

2.1 气枪信号数值模拟

基于曲波域全变差的压缩感知降噪方法对低信噪比的气枪信号实现了高效稳定的降噪效果。为了验证该方法应用于气枪信号降噪的处理效果, 其中, 已知的理论一维信号长度为 1 400 个采样点, 信号带宽 2 ~ 8 Hz, 采样率 100 Hz, 且具有两

个正弦周期 (向涯等, 2019)。在每道信号上随机加入 6 dB 高斯白噪声, 再从 100 道中随机选择其中的 9 道按照线性递增的方式再次加入不同比例的随机噪声, 噪声最高信号信噪比达到 -15 dB, 如图 3a 所示, 从图中可以看出, 加入噪声的 9 道信号相对原始信号已经基本看不出有效信号。

按照本文方法的处理流程, 对加噪声信号进行降噪处理, 在参数的选择过程中, 其对曲波域阈值的选择综合对比了 3 种阈值 (硬阈值、软阈值、软硬阈值结合) 的降噪效果, 其中软硬阈值结合的降噪效果较好, 折衷系数选择 0.001, 能够最大限度保留信号的细节信息。在对曲波域系数进行压缩重建过程中, 信号的缺失率不能低于 30%, 否则信号不能得到有效恢复。迭代次数选择也尤为重要, 次数较大会引入随机噪声, 较小对信号的细节信号恢复效果较差, 综合尝试后认为选择迭代 6 次较为合适。处理结果如图 3b 所示, 从图中可以看到, 即使信噪比很低的信号, 随机噪声都能得到很好地压制, 与模拟信号的波形和振幅一致性仍较强, 相位恢复精度较高, 获得较好的处理效果。

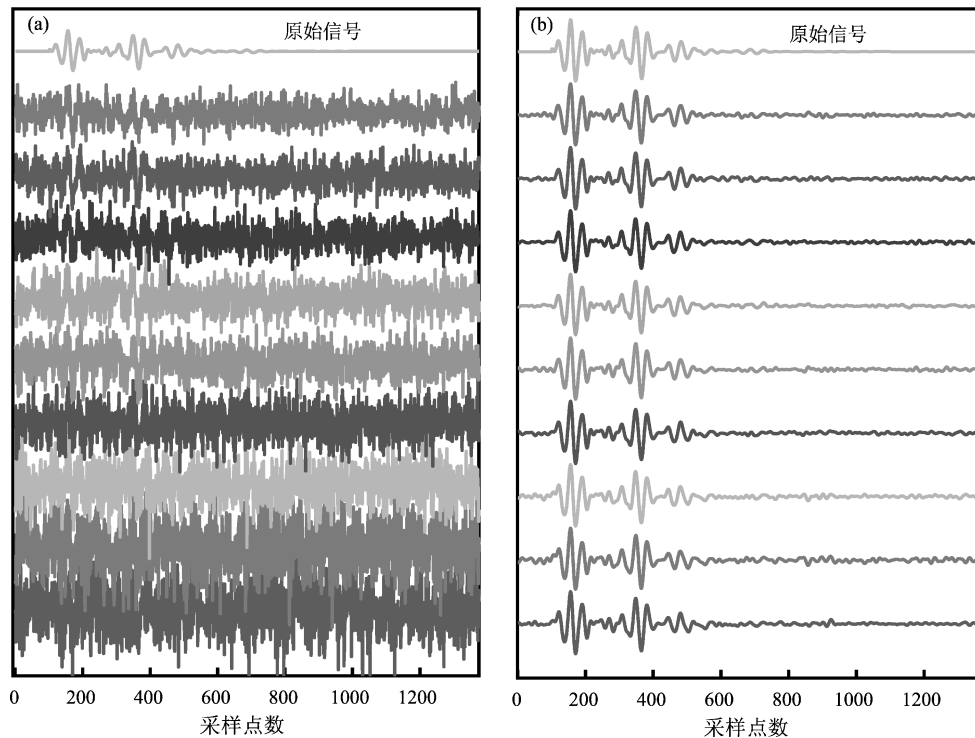


图3 模拟信号加载不同比例噪声 (a) 以及本文方法降噪结果 (b)

Fig. 3 The original signal loaded with different proportions of noise (a), and the noise reduction by the method in this paper (b)

为了进一步验证该方法的可行性和优势,本文引入带通滤波(BDF)、小波变换滤波(DWTF)、S变换模板滤波(STTF),分别对加噪声信号进行处理,过程如下:用带通滤波对信号进行2~8 Hz带通滤波。小波变换滤波利用小波函数对信号进行小波3层分解后,其中阈值统一取1,进行阈值滤波。S变换模板滤波对信号进行叠加后,变换到时频域中,通过设定时频域区间的阈值窗口得到滤波模板,利用滤波模板再对信号进行滤波。4种方法的处理结果如图4所示,选择其中一道进行处理效果评价(图5)。

如图5所示,通过对4种方法处理结果的信噪比SNR和均方根误差MSE可以看出,随着噪声比例越高,传统的几种方法处理后的信号SNR越低,均方根误差MSE越高。而本文的方法对不同比例的噪声信号降噪效果明显高于其它方法,即使信噪比很低也能达到很好的效果,并且稳定性更强。从单一道的处理效果(表1)来看,BDF方法可以将高频成分去除,但是与有效信号频率相近的噪声依然存在。用DWTF方法处理后虽然有效信号得到加强,但是高频成分随机噪声依然存在,STTF方法虽然克服了前两者的缺点,但是部分相位没有得到有效恢复,造成细节缺失,而本文的方法不仅很好地压制了随机噪声,而且恢复了对相位细节。

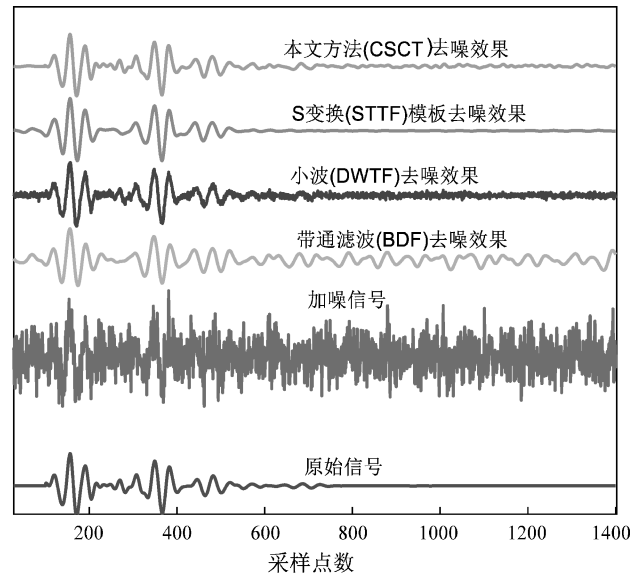


图4 不同滤波方法与本文方法处理效果对比
Fig. 4 Comparison of processing effects between various filtering methods and the method in this paper

表1 不同滤波降噪方法的处理结果对比评价

Tab. 1 Comparison and evaluation of processing results of different filtering and noise reduction methods

方法	信噪比/dB	误差	互相关系数
CSCT	6.682 6	0.092 5	0.999 6
STTF	6.231 3	0.102 5	0.988 4
DWTF	5.773 7	0.112 7	0.939 6
BDF	3.742 6	0.129 7	0.926 3

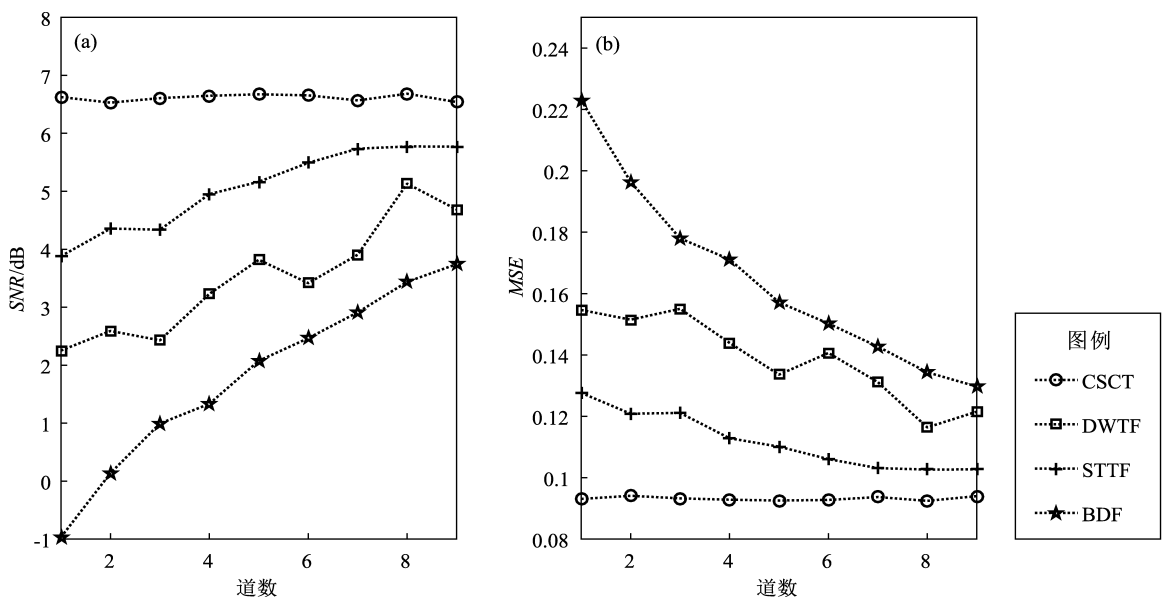


图5 不同滤波降噪方法处理结果的信噪比(a)和均方根误差对比(b)

Fig. 5 Comparison of the results of SNR (a) and MSE (b) by different filtering and noise reduction methods

2.2 波速测量精度评价

为了进一步验证本文方法在波速测量中的高效稳定性,由已知一维气枪信号利用移动窗口压缩-拉伸法 (Meier *et al*, 2010; 刘志坤, 2010) 生成波速变化率不超过 $\pm 5\%$ 的 100 道二维模拟信号 (图 6a)。在每道信号上随机加入 6 dB 高斯白噪声,再随机从 100 道中选择其中的 9 道按照线性递增的方式再次加入不同比例的随机噪声

(同 2.1 节),如图 6b 所示。按照上述的处理流程分别对加噪声信号进行降噪处理,对含噪信号进行 2 ~ 8 Hz 带通滤波。利用小波函数对信号进行小波 3 层分解后,阈值统一取 2,进行小波阈值滤波。对信号所有道进行叠加后,变换到时频域中,通过设定频域区间的阈值窗口,得到滤波模板,从而达到利用叠加信号进行模板滤波的目的。

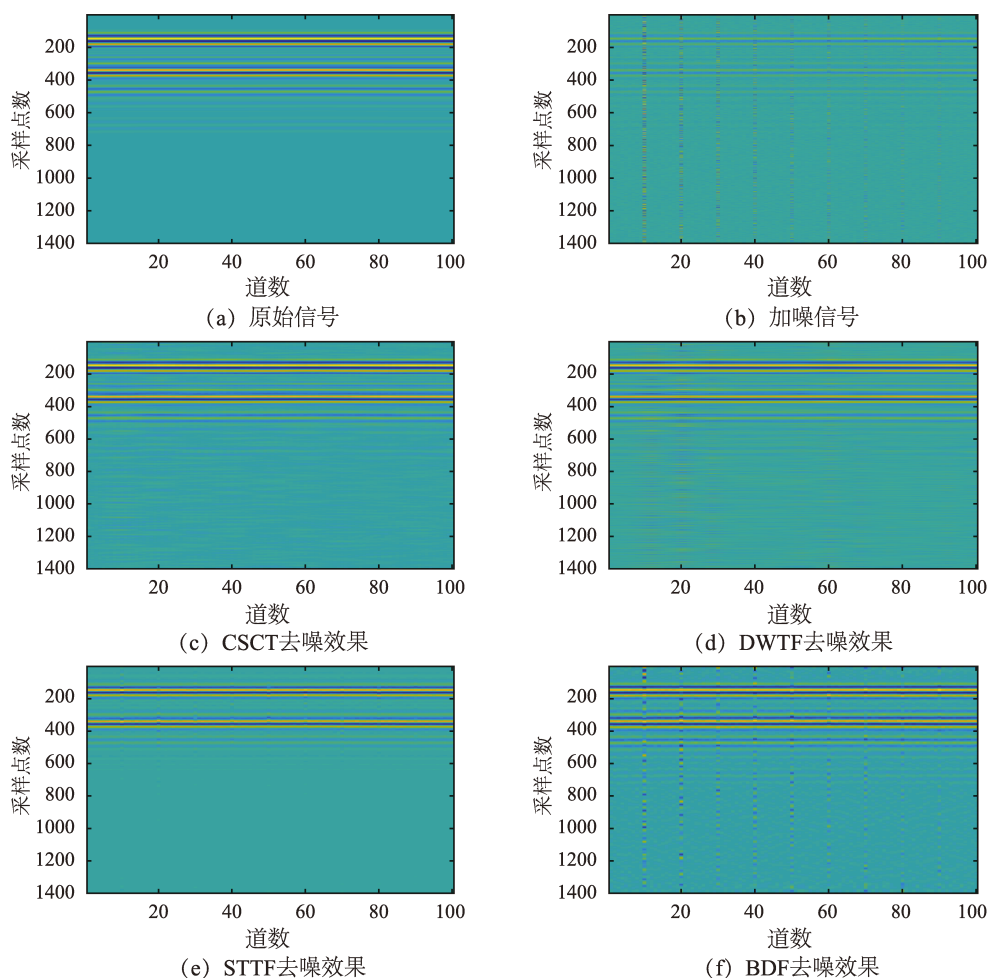


图 6 使用不同滤波降噪方法对二维波速变化率的模拟信号处理后的降噪结果对比

Fig. 6 Comparison of noise reduction results of analog signals with two-dimensional wave velocity change rate by different filtering and noise reduction methods

由图 6c 可以看出,本文方法不仅可以很好地压制随机噪声,也去除了随机的线性干扰;DWTF 虽然恢复了有效信号的大部分能量,但是对高频成分的噪声压制力较弱 (图 6d);STTF 方法对随机噪声的压制力较强,但是由于模板阈值的选取存在一定的误差,导致对信号细节的恢复较差,并且对加入的较强随机线性干扰的压制能力较弱,

一些线性干扰依然存在 (图 6e);BDF 方法只能对固定频段的噪声进行压制,高频噪声和线性干扰依然存在 (图 6f)。

为进一步验证本文方法的稳定性和高效性,对上述几种降噪方法处理后的信号进行波速测量精度评价,如图 7 所示。

从图 7 可以看到,利用本文方法降噪后测量的

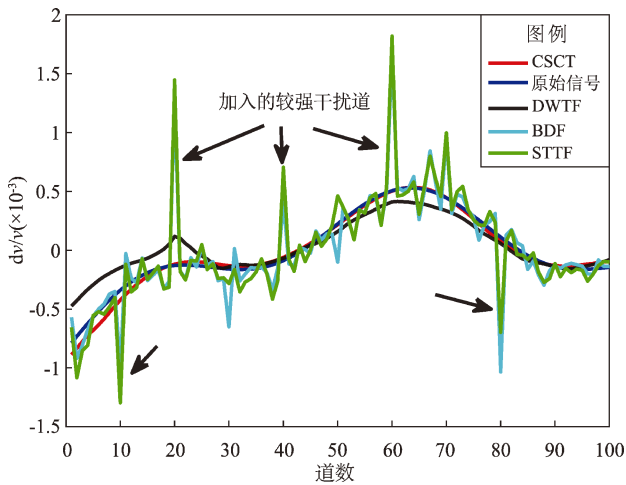


图7 不同滤波降噪方法处理后波速测量结果

Fig. 7 Wave speed measurement results after processing by different filtering and noise reduction methods

信号波速变化率与模拟信号（蓝线）的量级一致，波速变化曲线基本一致，且拟合度较高。用 DWTF 方法处理后测量的信号波速变化率虽然与模拟信号的趋势一致，但是依然存在一定的误差，并且在较强的线性干扰处存在突变，用 BDF 方法处理后测量的信号波速变化率由于对随机噪声和线性干扰压制较弱，导致波速测量的精度严重不足，并且在较强的线性干扰处存在突变量。

3 实际气枪信号处理

云南宾川气枪主动源区域（ $25.4^{\circ} \sim 26.4^{\circ} \text{N}$ ，

$99.8^{\circ} \sim 101.2^{\circ} \text{E}$ ）位于由红河断裂、剑川—丽江断裂和程海断裂围成的三角形块体内，该区主体在大理—丽江活断层系（王彬等，2016），是由正断和左旋走滑断裂构成的“Z”型张扭性复合变形带，包括丽江—大理断裂带和程海—宾川断裂带，一系列近 SN 向与 NW 向的断裂在此交汇叠加（张云鹏等，2020）。近年来，随着宾川主动源的建成，研究区内不仅建有 40 多个主动源流动地震观测台阵，还有多个固定地震观测台站，台站密度明显提高，并积累了大量地震观测资料，为开展相关科学研究提供了良好的数据保障和基础（Wang *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2019）。但是震中距大于 20 km 台站的记录信号信噪比普遍较低（陈蒙，2014；向涯等，2017）。虽然可以利用气枪信号的高度重复性的特点通过信号叠加提高信号的信噪比，但是提高单次激发气枪信号的信噪比，不仅可以提高气枪激发信号的利用效率，而且对提高介质波速时空变化测量精度具有重要意义。

本文选取距离气枪发射源 81 km 的 53251 台站的信号，先对信号去均值、去趋势等处理，然后再利用本文的方法对信号进行降噪处理。实际气枪数据采样率为 100 Hz，由于距离较远，随机噪声干扰较多，尤其是信号受到很多线性干扰的影响，使得数据信噪比较低（图 8a）。本文利用不同滤波方法对实际气枪信号进行降噪（图 8b ~ e）。

从图 8b 可以看出 BDF 方法只能对固定频段的噪声进行压制，高频噪声和线性干扰依然存在。

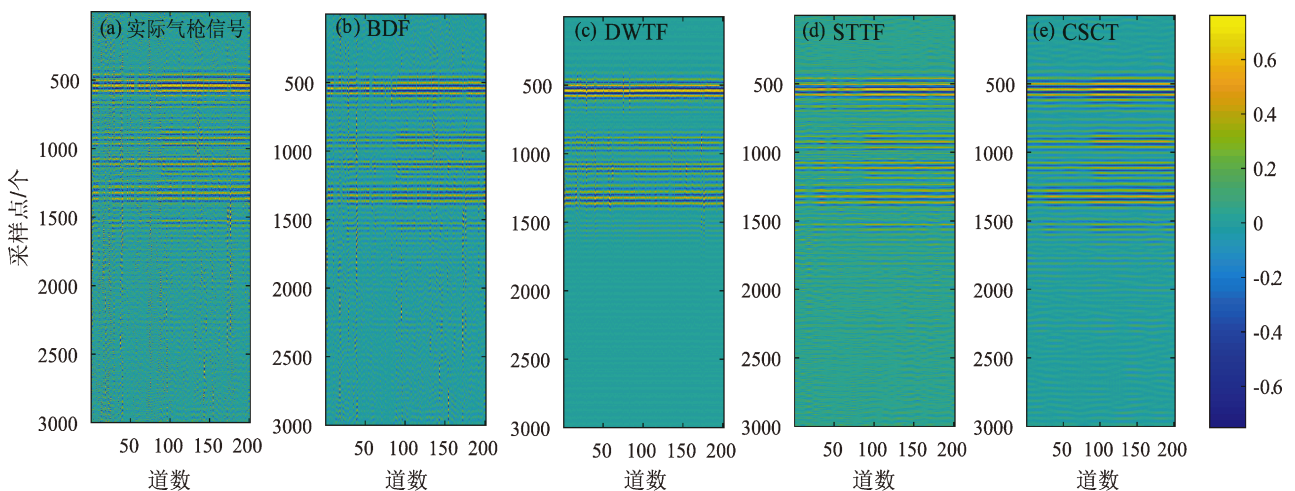


图8 不同滤波降噪方法对实际气枪信号的处理效果对比

Fig. 8 Comparison of processing effects of different filtering and noise reduction methods on airgun source signals

DWTF 方法虽然恢复了有效信号的大部分能量,但是线性干扰依然存在,对高频成分的噪声压制力较弱(图 8c)。STTF 方法对随机噪声的压制力较强,但是由于模板阈值选取的不稳定,部分有效信号能量没有恢复,并且对加入的较强随机线性干扰的压制能力较弱,一些线性干扰依然存在(图 8d)。本文滤波方法不仅可以很好的压制随机噪声,也很好地去除了随机的线性干扰,对同相轴的连续性和一致性恢复较好(图 8e)。

为了更加清晰地对比多种方法降噪效果,本文对上述实际气枪信号进行 1 500 次叠加,并进行 2~7 Hz 带通滤波,选择其中一道气枪信号进行对比分析,并将处理后的信号与叠加信号进行互相关分析,结果如图 9 所示。

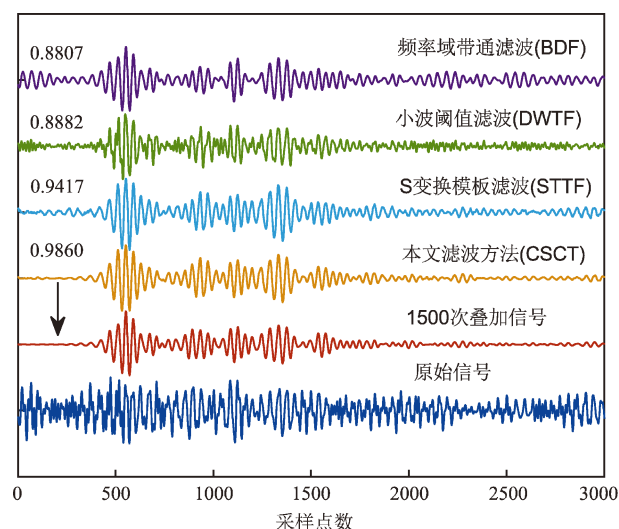


图9 不同滤波降噪方法处理结果与叠加信号对比评价

Fig. 9 Comparison and evaluation of processing results of different filtering noise reduction methods and superimposed signals

由图 9 可见,经 BDF 方法处理后高频成分被去除,但是与有效信号频率相近的噪声依然存在,互相关系数仅为 0.880 7。经 DWTF 方法处理后虽然有效信号得到加强,恢复了信号的大部分能量,但是高频成分随机噪声依然存在,互相关系数为 0.888 2,STTF 方法虽然克服了前两者的缺点,互相关系数达到 0.941 7,但是部分相位没有得到有效恢复,造成细节缺失。而本文的滤波方法处理后互相关系数达到 0.986 0,不仅很好地压制了随机噪声,而且恢复了相位细节,取得了较好的降噪效果。

4 结论

本文根据气枪信号的特点,构建了一种基于离散曲波变换的压缩感知方法,将曲波域中的阈值滤波和全变差技术与压缩感知正交匹配重构算法的稀疏促进策略充分结合起来,并详细介绍了该方法的基本原理和处理流程,通过不断验证,实现了对信噪比较低气枪信号高效的降噪处理,主要得到以下结论:

(1) 相较于传统的几种滤波方法,本文构建的滤波方法具有明显的降噪优势,即使信噪比很低的信号,随机噪声都能得到很好地压制,稳定性较好,也可以有效去除线性干扰,与模拟信号和叠加信号相比,其波形和振幅一致性恢复较好,相位恢复精度较高,获得比较好的处理效果。

(2) 信号的信噪比对波速测量的精度影响较大,相较于其它滤波方法降噪后的波速测量结果,利用本文方法降噪后测量的信号波速变化率,与模拟信号相比,两者量级一致,波速变化曲线基本一致,且拟合度较高。

(3) 在曲波域系数的重构过程中,重构算法和迭代次数对系数的重构精度有一定的影响,尝试不同的重构算法有利于获得更好的重构结果,尽可能恢复信号的更多细节信息。

参考文献:

- 白兰淑,刘伊克,卢回忆,等. 2014. 基于压缩感知的 Curvelet 域联合迭代地震数据重建[J]. 地球物理学报,57(9):2937-2945.
- 陈蒙. 2014. 利用水库大容量非调制气枪阵列进行区域尺度地下结构探测和监测[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 陈颢,张先康,丘学林,等. 2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法[J]. 科学通报,52(11):1317-1321.
- 郭念民,李海山,冯雪梅,等. 2014. 非抽样离散小波变换叠前地震数据重建方法[J]. 石油地球物理勘探,49(3):508-516.
- 蒋生森,王宝善,张云鹏,等. 2017. 噪声对气枪信号叠加效果的影响及自动数据筛选方法[J]. 地震研究,40(4):534-542.
- 孔丽云,于四伟,程琳,等. 2012. 压缩感知技术在地震数据重建中的应用[J]. 地震学报,34(5):659-666.
- 李孝宾,陈佳,高琼,等. 2017. 利用噪声功率谱密度的统计特征评价台站对主动源信号的接收效能[J]. 地震研究,40(4):572-580.
- 刘磊,刘振,张军华. 2011. 曲波阈值法地震弱信号识别及去噪方法研究[J]. 地球物理学进展,26(4):1415-1422.
- 刘志坤. 2010. 利用背景噪声研究汶川地震震源区及周边地壳介质

- 地震波速度变化[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 刘自凤,苏有锦,王宝善,等. 2015. 宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J]. 地震研究,38(4):591–597.
- 沈维燕. 2006. 基于 Contourlets 和全变差的一种图像去噪方法的研究[D]. 南京:南京理工大学.
- 谭俊卿,杨润海,向涯,等. 2020. 匹配滤波和曲波去噪相结合的气枪主动源弱信号提取[J]. 地震研究,43(4):701–710.
- 唐刚,杨慧珠. 2010. 基于泊松碟采样的地震数据压缩重建[J]. 地球物理学报,53(9):2181–2188.
- 唐刚. 2010. 基于压缩感知和稀疏表示的地震数据重建与去噪[D]. 北京:清华大学.
- 全中飞,王德利,刘冰. 2008. 基于 Curvelet 变换阈值法的地震数据去噪方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),38(S1):48–52.
- 王宝善,葛洪魁,王彬,等. 2016. 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,32(2):168–179.
- 王彬,李孝宾,刘自凤,等. 2016. 宾川地震信号发射台的震源系统、观测系统和观测结果[J]. 中国地震,32(2):193–201.
- 王伟涛,王宝善,蒋生森,等. 2017. 利用气枪震源探测大陆浅部的地震学研究回顾与展望[J]. 地震研究,40(4):514–5123.
- 王文波,羿旭明,费浦生. 2006. 基于曲波系数相关性的去噪算法[J]. 光电子·激光,17(12):1519–1523.
- 向涯,王彬,杨润海,等. 2017. 气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究[J]. 地震研究,40(4):605–612.
- 向涯,杨润海,王彬,等. 2019. 利用二次相关时延检测方法提升气枪信号时延估计精度的研究[J]. 地震研究,42(1):72–79.
- 徐逸鹤,王宝善,王伟涛. 2016. 利用固定台站分析长江激发气枪信号特征[J]. 中国地震,32(2):282–294.
- 杨连刚,李凌云,杨玉梅,等. 2019. 一种基于压缩感知的随机噪声压制方法[J]. 煤田地质与勘探,47(4):165–171.
- 杨润海,谭俊卿,向涯,等. 2020. 基于改进的线性调频 Z 变换的高精度地震波速干涉测量[J]. 地震研究,43(1):4–12.
- 姚华建. 2013. 用压缩感知方法研究大地震的破裂过程——方法与研究进展[J]. 中国科学技术大学学报,43(11):907–921.
- 叶泵,杨军,李孝宾. 2017. 利用主动源研究宾川地区地壳各向异性[J]. 地震研究,40(4):565–571.
- 张帅,杨润海,高尔根. 2021. 基于压缩感知的信号重建方法及在气枪震源信号处理中的应用[J]. 地震工程学报,43(2):322–330.
- 张云鹏,王宝善,林国庆,等. 2020. 利用密集台阵近震层析成像研究云南宾川上地壳速度结构[J]. 地球物理学报,63(9):3292–3306.
- Candes E J, Demanet L, Donoho D L, *et al.* 2005. Fast discrete curvelet transforms[J]. Multiscale Modeling and Simulation,5:861–899.
- Candes E J, Donoho D L. 1999. Curvelet – a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[M]. Curves and Surfaces Fitting, Saint – Malo: Vanderbilt University Press, 105–120.
- Candes E, Romberg J, Tao T. 2006. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics,59(8):1207–1223.
- Chen Y, Wang B S, Yao H J. 2017. Seismic airgun exploration of continental crust structures[J]. Science China Earth Sciences,60(10):1739–1751.
- Hennenfent G, Herrmann F J. 2008. Simply denoise: wavefield reconstruction via jittered undersampling[J]. Geophysics,73(3):19–28.
- Herrmann F J, Hennenfent G. 2008. Non – parametric seismic data recovery with curvelet frames[J]. Geophysics Int,173(1):233–248.
- Jiang J Z, Yang R H, Wang B, *et al.* 2019. Assessing short – term clock errors and drifts of temporary seismic networks using the active airgun source in Binchuan, Yunnan [J]. Seismological Research Letters,90(6):2165–2174.
- Kong L Y, Yu S W. 2012. Application of compressive sensing to seismic data reconstruction [J]. Acta Seismologica Sinica, 34 (5): 659–666.
- Meier U, Shapiro N M, Brenguier F. 2010. Detecting seasonal variations in seismic velocities within Los Angeles basin from correlations of ambient seismic noise [J]. Geophysical Journal International, 181 (2): 985–996.
- Newark O S. 1998. Denoising with higher order derivatives of bounded variation and an application to parameter estimation[J]. Computing, 60(1):1–27.
- Wang B S, Li X B, Liu Z F, *et al.* 2016. The source and observation system of Binchuan Earthquake Signal Transmitting Seismic Station and its preliminary observation results[J]. Earthquake Research in China,30(3):316–325.
- Wang B, Yang W, Wang W, *et al.* 2020. Diurnal and semidiurnal P- and S-wave velocity changes measured using an airgun source[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,125(1):e2019JB018218.
- Xiang Y, Yang R H, Wang B, *et al.* 2019. Study on the influence of airgun excitation conditions on airgun signals and travel time variation measurements [J]. Earthquake Research in China, 33 (2): 336–353.
- Yao H, Gerstoft P, Shearer P M, *et al.* 2011. Compressive sensing of the Tohoku – Oki M_w 9.0 Earthquake: Frequency – dependent rupture modes[J]. Geophysics Res Lett,38(20):L20310.
- Yin H P, Li J X, Chai Y, *et al.* 2014. A survey on distributed compressed sensing: Theory and applications[J]. Frontiers of Computer Science, 8(6):893–894.

Application of a Compressive Sensing Denoising Method Based on Curve Wave Domain to Airgun Signals in Reservoirs

ZHANG Shuai¹, YANG Runhai¹, ZHANG Yan¹, ZHANG Huiju², YAO Yuan¹, SHEN Yahong¹, LI Ping¹

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Kaiyuan Earthquake Agency, Kaiyuan 661699, Yunnan, China*)

Abstract

Improving the signal-to-noise ratio of the active source of airgun is an important prerequisite to accurately characterize the variation of underground media and underground structures. Aiming at the characteristics of the active source of airgun, this paper constructs a denoising method, the Compress Sensing Curvelet Transform (CSCT) based on the curve wave domain and applies it to the active source of airgun. The principle and workflow of this method, which combines the latest compressed sensing theory with the technology of total variation with curve wave domain, are highlighted. Through numerical simulation, the performance of this method is evaluated and compared with the performance of the traditional methods. And the method is applied to the data processing of the active source of the airgun. While removing random noise, the method also suppresses the coherent interference. Finally, the applicable conditions of this method in processing the airgun signals are summarized, and the potential applications of this method to the data processing of the active source of airgun is further discussed.

Keywords: airgun source signals; noise reduction; compressed sensing; curvelet transform; total variation