

张帅,杨润海,姜金钟,等. 2025. 基于 Jitter 采样的压缩感知地震勘探数据重构[J]. 地震研究, 48(1): 071–079, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0009.

Zhang S, Yang R H, Jiang J Z, et al. 2025. Compressed sensing seismic exploration data reconstruction based on Jitter sampling[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(1): 071–079, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0009.

基于 Jitter 采样的压缩感知地震勘探数据重构*

张 帅¹, 杨润海¹, 姜金钟¹, 张 演¹, 郑定昌¹, 邓月飞¹, 杨润萍², 王志豪¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 玉龙县地震局, 云南 玉龙 674100)

摘要: 受野外复杂环境影响, 地震勘探采集的地震数据往往不完整且有坏道。为提高原始地震数据的完整度, 基于压缩感知稀疏反演理论, 构建了一种基于 Jitter 采样的压缩感知地震勘探数据重构方法。从采样模型和采样信号频谱分析等方面详细对比 3 种采样方法的优缺点。通过合成地震数据测试, 从信噪比、均方根误差、互相关系数 3 个方面进行重建效果综合评价并应用于实际数据中。结果表明: 与传统随机采样方法相比, 基于 Jitter 采样方法重构前后的地震数据形态振幅一致性更强, 信噪比更高、误差更小、互相关系数更高。实际数据应用结果显示: 重构后的叠后地震成像数据同相轴清晰, 连续性更强, 振幅一致性强, 对噪声压制较好。这表明 Jitter 采样在保持随机性采样的同时, 可以有效控制采样间隔, 解决了采样点过于分散或者过于集中的问题, 更有利于数据的恢复。综上, Jitter 采样方法能够从稀疏不均匀数据中重建出密集规则化的地震数据, 可以为后续的高质量偏移成像、速度建模等研究提供完整地震数据支撑。

关键词: 压缩感知; Jitter 采样; 地震勘探; 数据重建

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)01-0071-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0009

0 引言

完整的地震勘探数据是深入认识地下介质速度结构和断层构造的重要前提, 受限于复杂的采集环境以及仪器工作条件, 检波器的空间采样往往出现不完整、不规则的缺失(曹静杰等, 2022)。但地震子波估计、多次波去除、偏移归位等对原始地震数据的完整度有很高的要求(唐刚, 杨慧珠, 2010)。因此, 地震数据的压缩和重建成为必须要解决的问题。为了得到连续完整的数据, 需要一种高精度非线性的插值方法对缺失数据进行插值重建(张帅等, 2021)。传统方法大都受到 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, 插值效果不佳(郭念民等, 2014)。

压缩感知理论于 2006 年被正式提出, 随着其理论模型不断被完善改进(Candes et al, 2006; Herrmann, Hennenfent, 2008), 已被成功应用于多个地震学和地球物理反演问题中(张帅等, 2022; 白兰淑等, 2022; Zhan et al, 2018)。即使是随机缺失的数据, 通过压缩感知理论也可以恢复出满足一定精度要求的完整数据(张华, 陈小宏, 2013; 刘璐等, 2021)。不同于传统的插值方法, 压缩感知理论是一种基于物理模型的稀疏反演方法, 提供了解决这一问题的新思路, 而合理的采样方法是其关键核心技术之一。传统的压缩感知重构算法采用的是单纯随机采样, 无法控制采样间隔, 容易造成某些关键信息的丢失, 也容易出现采样点聚集现象, 造成某些区域采样过密(唐刚, 2010)。基于改进的随机采样方法, 如 Jit-

* 收稿日期: 2024-07-31.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2023ZX02); 云南省地震局“压缩感知及稀疏反演理论研究”创新团队(CXTD202407); 云南省重点研发项目(202203AC100003); 国家自然科学基金(42104060).

第一作者简介: 张 帅(1990-), 工程师, 主要从事压缩感知方面的研究. E-mail: yn_zhangshuai@163.com.

ter 采样和泊松碟采样多是直接应用在不同的地震数据重构上 (张华, 陈小宏, 2013; 唐刚, 2010), 并没有与传统的采样方法进行对比分析, Jitter 采样方法的地震数据重构的效果与传统方法相比到底如何, 还需进一步的分析研究。

本文基于压缩感知理论, 构建了一种基于 Jitter 采样的压缩感知地震勘探数据重构方法, 从采样模型和采样信号频谱分析方面与传统的随机采样方法进行了详细地对比分析。通过对合成地震数据进行模拟测试, 综合分析重建前后, 模拟地震数据的信噪比、均方根误差、互相关系数的参数评价结果。最后选取实际地震浅层勘探数据验证本文方法的重构效果。

1 方法原理

1.1 压缩感知理论

根据压缩感知的理论原理 (Wang *et al*, 2011, 2012), 假设稀疏地震信号用 $y(p)$ 表示, 它的压缩重建模型表示为:

$$y(p) = \Psi\Phi[x(n)] \quad (1)$$

式中: $y(p)$ 表示通过测量矩阵得到的不完整的地震数据; p 是原始地震数据长度; Ψ 表示稀疏变换基; $x(n)$ 表示二维完整地震数据; $\Phi \in R(P \ll MN)$, 是根据缺失数据定义的单位测量随机矩阵, 其中 M 、 N 分别表示 Φ 二维矩阵的大小, P 表示 $y(p)$ 的大小。假设 O 为缺失数据在观测矩阵 Φ 的位置, 值为 0, I 为未缺失数据在观测矩阵 Φ 的位置, 值为 1 (Bai *et al*, 2020)。压缩感知理论指出, 如果

x 在变换域 Ψ 中是稀疏的。那么其变换系数为:

$$\alpha = \Psi x \quad (2)$$

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且与变换基 Ψ 不相关的 $M \times N$ 维的测量矩阵 Φ , 这里选用 Jitter 采样的随机矩阵来满足压缩感知理论对于随机投影矩阵的要求, 其详细的理论推导详见 1.2 节。对 α 进行观测得到观测数据:

$$y = \Phi\alpha \quad (3)$$

式 (3) 为反演当中常见的欠定方程组, 方程无数解, 但是 α 具有稀疏性, 我们可以通过不断增强 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如下 (Herrmann, Hennenfent, 2008):

$$\bar{\alpha} = \operatorname{argmin}_{\alpha} \frac{1}{2} \|y - \Phi\alpha\|_1 + \lambda \|\alpha\|_1 \quad (4)$$

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

图 1 展示了基于 L2 和 L1 范数的方程求解模型, 假设方程求解模型限制在 x 的一个 L-ball 中。L-ball 可理解为: 式 (3) 的解为模型向量 x 的 L2 范数所对应的圆在逐渐增大其半 $\|x\|_2$ 时与解平面 $ux=y$ 的交点 (如图 1a 所示的黑色交点), 很显然在绝大多数情况下, 其解的坐标数值为非零, 即解是非稀疏的。但对于式 (3) 模型的 L1 范数问题, 由于 $\|x\|_1$ 对应于四边形的面, 当逐渐增大 $\|x\|_1$ 四边形与解直线相交时所得到的交点, 即为

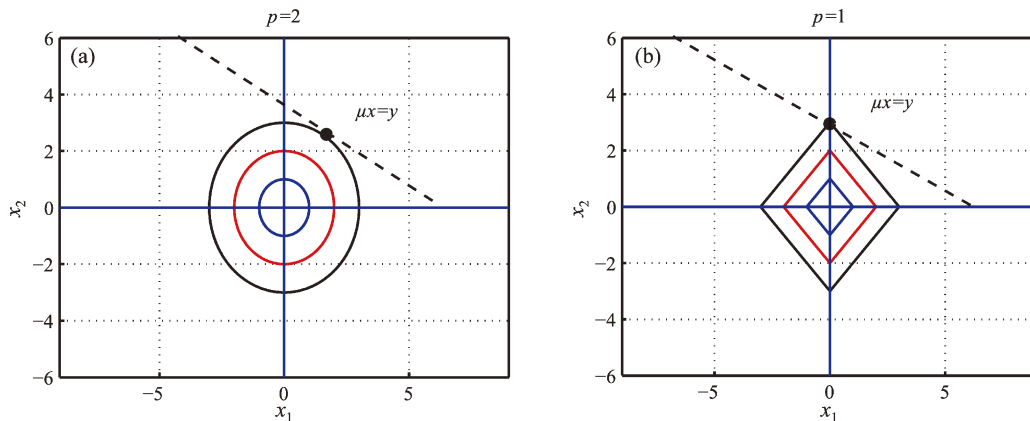


图 1 L2 范数 (a) 和 L1 范数 (b) 求解示意图 (p 表示范数) (修改自张帅等, 2022)

Fig. 1 Schematic diagram of solving L2 norm (a) and L1 norm (b) (modified from Zhang *et al*, 2022)

式 (3) 的解, 通常情况下交点即为四边形的顶点 (如图 1b 所示的黑色交点), 因为顶点仅有一个坐标是非零的, 从而所得的解是稀疏的。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 (张帅等, 2022)。直线与 norm ball 首次相交的地方就是最优解。与 L2 范数相比, L1 范数更有可能得到最优解, 使得 x 更具稀疏性 (姚华建, 2013)。基于 L1 范数的反演问题, 本文使用的重构算法是正交匹配追踪 (OMP) 进行迭代求解。通过式 (4) 估计出最佳系数值以后, 可以通过式 (2) 求出缺失地震数据 $y(n)$ 的最佳重构数据 $x(n)$ 。

1.2 Jitter 采样原理

Jitter 采样是一种用于信号处理和计算机图形学的技术, 通过在固定采样点附近随机扰动采样位置, 来减少系统化的误差和增加频谱的多样性, 根据其数学基础和统计特性, Jitter 采样的理论公式推导如下:

假设有一个信号 $x(t)$, 在均匀采样的情况下, 其采样点为 $t_n = nT$, 其中 T 是采样间隔。通过加入随机扰动 Δt_n , 得到 Jitter 采样点:

$$t'_n = nT + \Delta t_n \quad (5)$$

式中: Δt_n 是一个在 $[-J/2, J/2]$ 区间内均匀分布的随机变量, J 是最大 Jitter 量。对于一个离散时间信号 $x[n] = x(nT)$, 加入 Jitter 后的信号可以表示为:

$$x'[n] = x(nT + \Delta t_n) \quad (6)$$

Jitter 采样后信号引入的误差 $e[n]$ 可以表示为:

$$e[n] = x(nT + \Delta t_n) - x(nT) \quad (7)$$

对于小的 Δt_n , 我们可以使用泰勒展开式来近似:

$$e[n] \approx \Delta t_n x'(nT) \quad (8)$$

式中: $x'(nT)$ 是信号 $x(t)$ 在 $t = nT$ 处的一阶导数。

Jitter 采样后地震数据的信噪比影响通过误差方差来分析。假设 Δt_n 是零均值、方差为 σ_{Δ}^2 的随机变量, 误差的方差为:

$$\sigma_e^2 = \sigma_{\Delta}^2 E[x'(t)^2] \quad (9)$$

因此, 信噪比 SNR 可以表示为:

$$SNR = \frac{E[x(t)^2]}{\sigma_e^2} = \frac{E[x(t)^2]}{\sigma_{\Delta}^2 E[x'(t)^2]} \quad (10)$$

通过以上推导分析, 可以看出 Jitter 采样通过在固定采样点附近随机扰动采样位置 (图 2), 首先将待采集的区域划分成若干区域, 然后在每个子区域内都随机地强制采一个点, 由于每个子区域都有采样点, 这就保证了采样点不会离得太近, 使采样点分布更加均匀, 同时仍然保持随机, 可将假频转化成低幅度噪声, 使真实频率更容易检测 (张华, 陈小宏, 2013)。

2 采样方法

本文通过建立一个模型实例来说明不同采样方法的采样规则。规则欠采样一般按照 Nyquist - Shannon 采样定理的要求进行采样, 采样点的分布比较均匀且密集, 但是可以保证信号的信息不会丢失 (图 2a)。规则欠采样方法的采样点间隔相同、比较稀疏, 是以远低于采样定理规定的采样率对信号进行欠采样, 采样率降低, 容易造成信号混入假频 (图 2b)。较为常见的高斯随机采样方法, 其采样点分布比较随机, 有些采样点的分布比较密集, 有些采样点比较稀疏, 这种采样方式虽然可以避免混入假频, 但容易引入与频率相似的相干噪声, 且容易丢失信号细节信息 (Loris et al, 2007) (图 2c)。Jitter 采样的采样点比较均匀, 既可以以远低于采样定理要求的采样率进行欠采样, 又可以保证信号的信息不会丢失, 且假频均被转化成不相干的噪声, 且易于去除 (图 2d)。

为了更进一步验证 Jitter 采样方法的优点, 本文模拟了一组频率分别为 25 Hz、30 Hz 和 50 Hz 的地震信号, 按照不同采样方式进行采样, 并进行频谱分析, 如图 3a 所示。

标准的规则欠采样方式, 按照采样定理的要求, 进行 100% 的高频率采样, 可以采集到信号的完整信息, 并不会导致假频率混淆, 如图 3a 所示。分别对原始信号分别进行 50% 的规则欠采样、高斯随机采样、Jitter 随机采样, 其信号如图 3b ~ d 所示。

图 3e 是信号的真实频谱, 可以看到信号的频率被完全准确识别。而从规则欠采样后的信号的

频谱 (图 3f) 可以看出, 尽管真实频率被识别, 但出现了一些假频, 分别为 300 Hz、350 Hz 和 375 Hz, 而这些假频会被带入重建过程, 严重影响数据恢复质量 (张华等, 陈小宏, 2013)。而高斯随

机采样把假频转化成了低幅值的噪声, 真实频率也可以很容易被检测到, 但是随机噪声和部分真实频谱相互混叠在一起, 不容易分离, 如图 3g 所示。

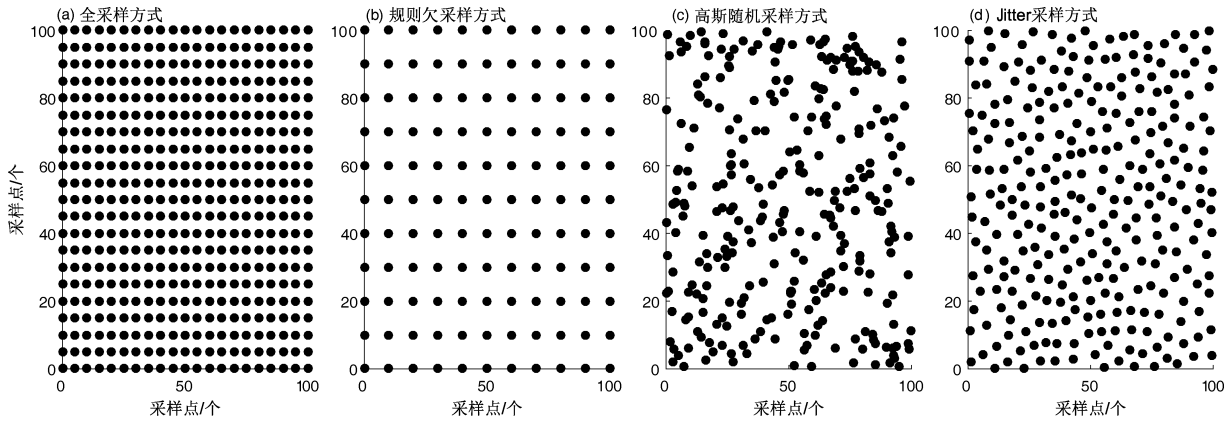


图 2 不同采样规则模型

Fig. 2 Models with different sampling rules

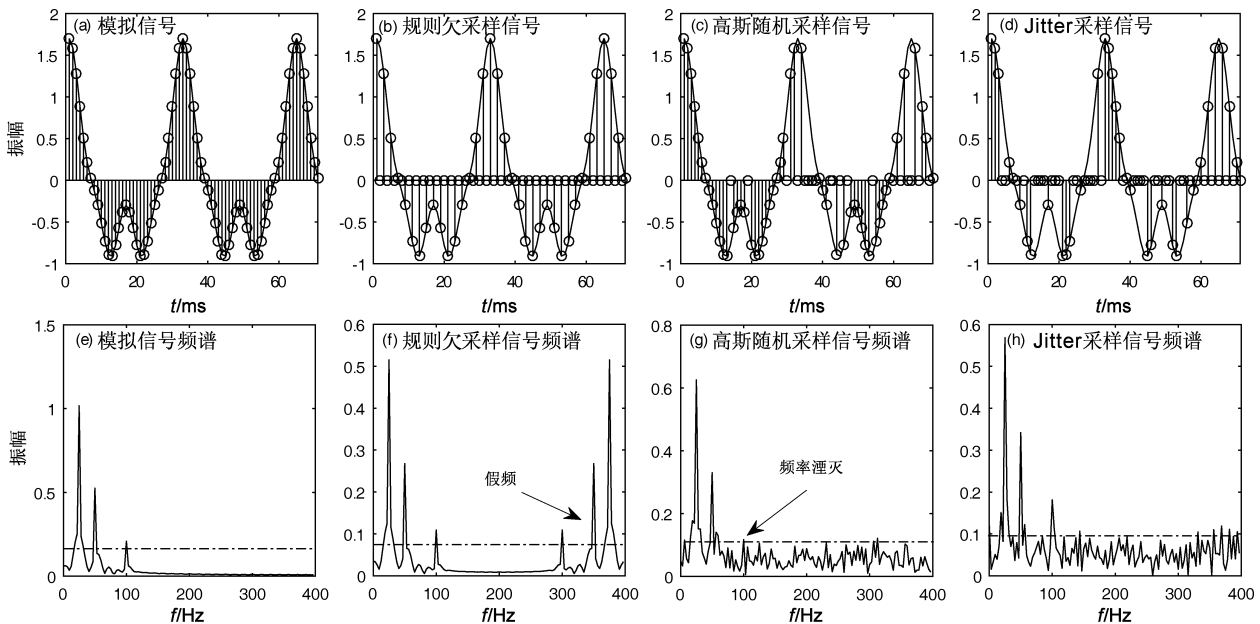


图 3 使用不同采样方法采样后的信号及频谱分析

Fig. 3 Signals by different sampling methods and their spectral analysis

Jitter 采样方法同样是一种随机采样方法, 不同于传统随机采样方式, 其对采样间隔可以进行较为灵活的控制, 如图 3d 所示。同时其具有蓝色噪声频谱特征, 蓝色噪声频谱特征是描述随机类型特征的一个统计模型 (Titova *et al.*, 2023), 其特点是在主要频率周围分布的其他频率值都非常小, 所以真值或者主频率就很容易被检测到 (唐刚, 2010)。蓝色噪声频谱具有明显的点扩散函数的特征, 有效降低

互相干扰噪声对主频率的影响, 更加有利于数据的恢复重建 (Bai *et al.*, 2020)。从图 3h 可以看出, 与高斯随机采样相比, Jitter 随机采样的主频特征可明显被识别, 且噪声得到明显地压制。

3 合成地震数据测试

为了验证基于 Jitter 采样的压缩感知地震勘探

数据重建效果, 本文进行合成地震数据测试, 如图 4 所示。已知一维理论地震数据长度为 1 000 个采样点, 信号带宽 20 ~ 80 Hz, 采样率 100 Hz, 且具有两个正弦周期, 如图 4a 所示。由于一维地震数据的压缩重建, 只利用到一个方向的信息, 实

际的应用相对比较有限。为了验证该方法在多维地震数据的应用效果, 提高多方向的地震数据重建效果, 按照正弦函数曲线对一维模拟信号进行不同时间延迟排列合成二维地震数据, 以模拟地震勘探中的中间放炮的单炮记录如图 4b、c 所示。

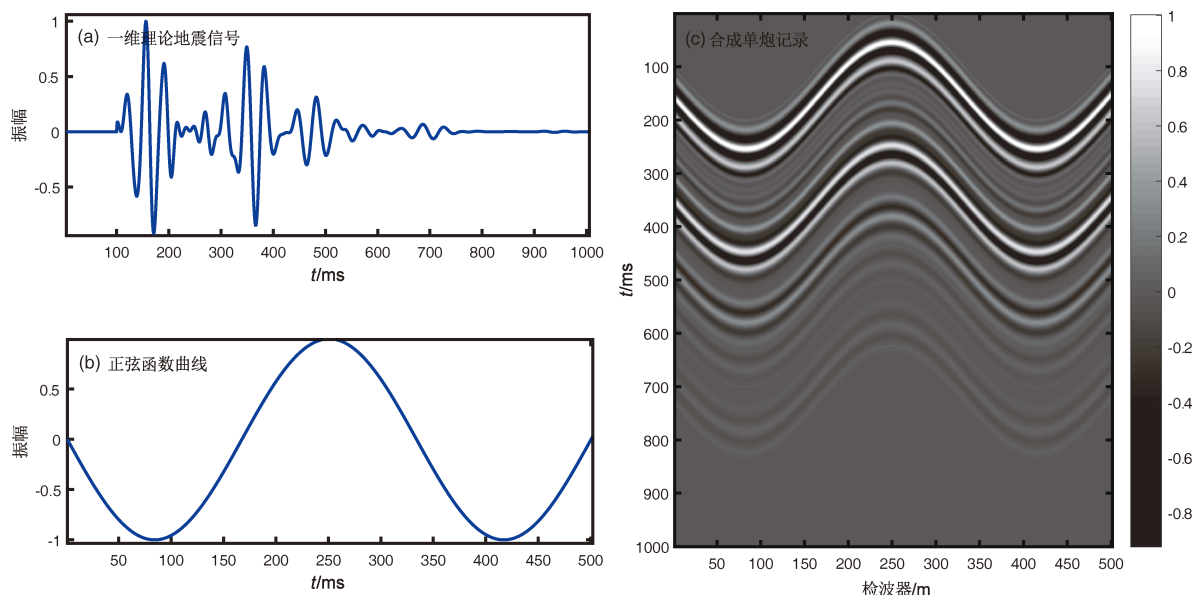


图 4 合成单炮地震数据

Fig. 4 Synthetic seismic data

首先对原始信号 (图 5a) 分别进行规则欠采样、高斯随机采样和 Jitter 采样。观测矩阵在采集到的位置设置为 1, 未采集到的位置设置为 0, 采样率均为 50% (图 5c、e、g)。对采样后的二维数据进行 $f-k$ 谱分析, 原始数据的 $f-k$ 谱比较光滑, 谱特征分布较为明显 (图 5b)。50% 的规则欠采样后的信号 $f-k$ 谱前后出现明显的假频, 且与真实的频谱较为一致, 几乎难以区分 (图 5d)。而高斯随机采样虽然克服了假频的干扰, 但是大量的相干噪声混淆在真实频率中, 传统的滤波方法可能无法有效去除 (图 5f)。Jitter 采样不但保证信号的真实频谱得到采集, 而且有效压制了不相干的噪声 (图 5h)。

在压缩感知理论框架下, 根据不同采样方法采集到的 50% 的观测数据, 基于正交匹配追踪算法对稀疏信号进行重建, 对重建后的地震数据与原始信号进行对比分析以及 $f-k$ 谱分析。

从重建信号与模拟信号及其 $f-k$ 谱 (图 6a、b) 的对比可以看出, 对于规则欠采样, 缺失部分的信号重建效果几乎不准确, 并带入了大量的假频信

息 (图 6c、d), 这种采样方式不可取。而高斯随机采样, 虽然可以恢复信号的主要信息特征, 但采样较为稀疏的部位, 信号恢复不够理想, $f-k$ 谱不光滑, 有较小的频谱泄漏 (图 6e、f)。而 Jitter 采样可以达到很好的重建效果, 重建后的信号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, $f-k$ 谱较为光滑, 无明显的频谱泄漏, 与原始信号的 $f-k$ 谱较为一致 (图 6g、h)。同时, Jitter 采样方法比高斯随机采样具有更强的压制噪声能力。

为了对重建效果进行综合评价, 从信噪比、均方根误差、互相关系数 3 个方面进行分析, 如图 7 所示。Jitter 采样重建后的信号信噪比高于高斯随机采样和规则欠采样, 均方根误差均低于两者, 并且随着采样率越低, 信号的缺失比例越高, 重建后的信号信噪比越低, 误差越大。当缺失比例达到 40% 以上时, 规则采样的信噪比大幅下降, 均方根误差大幅增加, 重建精度降低。而 Jitter 采样和高斯随机采样的缺失比例达到 70% 以上时, 信噪比和均方根误差才出现明显的变化,

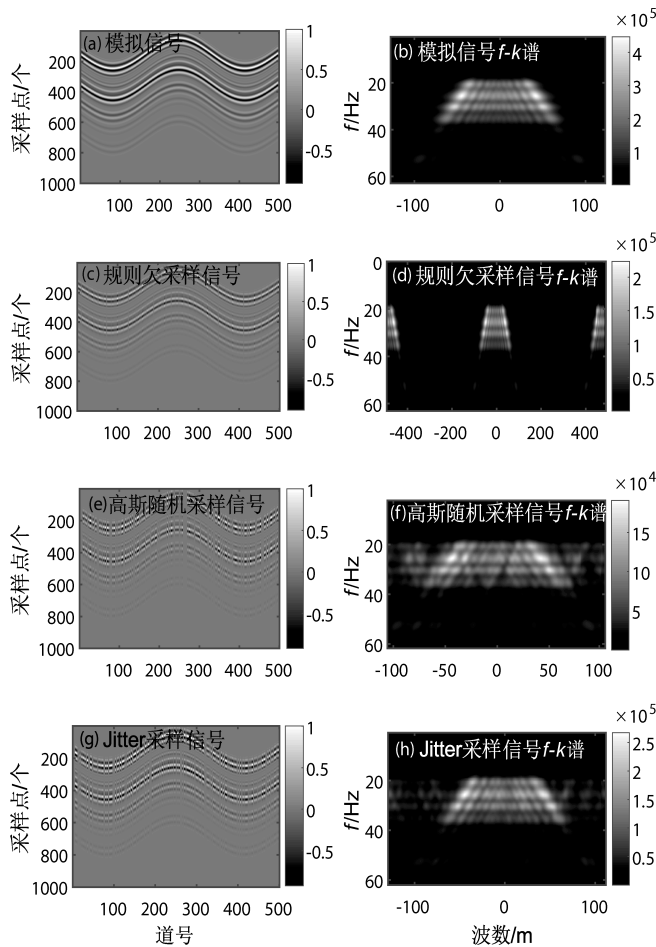


图 5 使用不同采样方式对模拟信号采样后的信号及其 $f-k$ 谱分析

Fig. 5 Signals of simulated signals by different sampling methods and their $f-k$ spectrum analysis

如图 7a、b 所示。当缺失比例为 50% 时, Jitter 采样和随机采样重建前后的信号互相关系数均高于 0.98, 重建精度较高。而规则采样互相关系数仅分散在 0.75 ~ 0.9, 多集中在 0.85, 如图 7c 所示。可见在即使信号缺失比例较高时, 本文的方法依然具有较好的重建效果。

4 实际应用

选取在野外开展的一次地震浅层勘探数据验证本文方法的重构效果, 如图 8a 所示。该叠加深度剖面有 500 个地震道, 每道有 1 000 采样点。首先基于高斯随机采样方式随机缺失 50% 实际叠加剖面数据, 如图 8b 所示。利用压缩感知稀疏反演重建算法对缺失数据进行压缩重建, 重建结果如图 8c 所示。

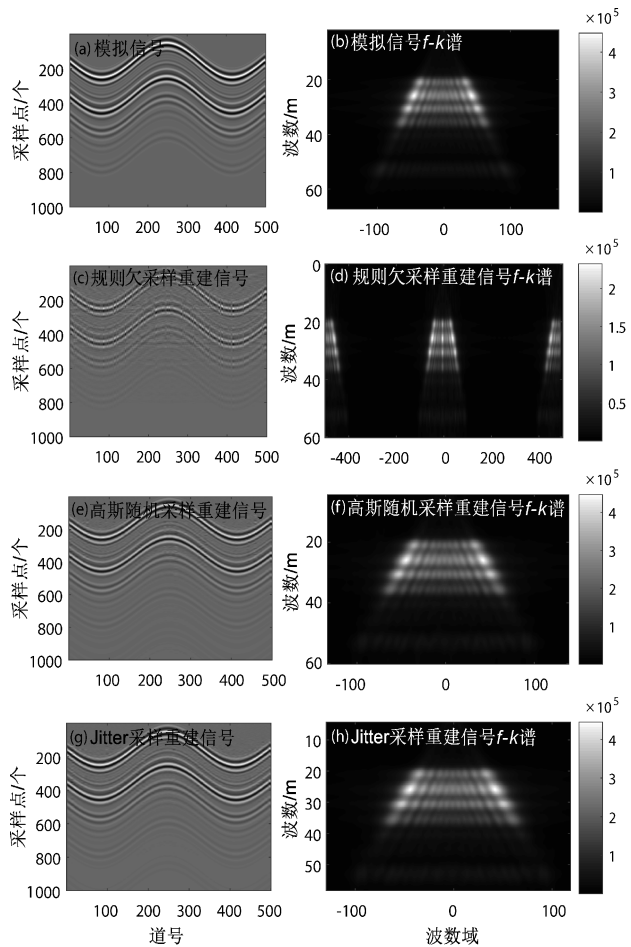


图 6 使用不同采样方式对地震数据进行重建后的信号及其 $f-k$ 谱分析

Fig. 6 Reconstruction results and $f-k$ spectrum analysis using different sampling methods

可以观察到基于高斯随机采样方式重建后的地震数据信噪比没有得到明显改善, 噪声和线性干扰依然较大, 深层同相轴的连续性没有得到明显改善。

基于 Jitter 采样方式, 对原始数据 (图 9a) 随机缺失 50% 实际叠加剖面数据, 如图 9b 所示。利用压缩感知稀疏反演重建算法对缺失数据进行压缩重建, 重建结果如图 9c 所示。本文方法重建后的地震数据信噪比更高, 剖面信息更加丰富, 深层同相轴的连续性增强, 视分辨率得到明显提高, 尤其是局部细节信息得到了很好的恢复。

同时, 本文方法重建后的地震数据, 同相轴的连续得到明显的增强, 高频段有效信号得到有效恢复。而且经过处理后的地震数据信噪比高、横向连续性好, 重构前后的误差较小、分布相对均匀。对随机的线性干扰也进行了很好地去除, 对同相轴的连续性和一致性恢复较好。

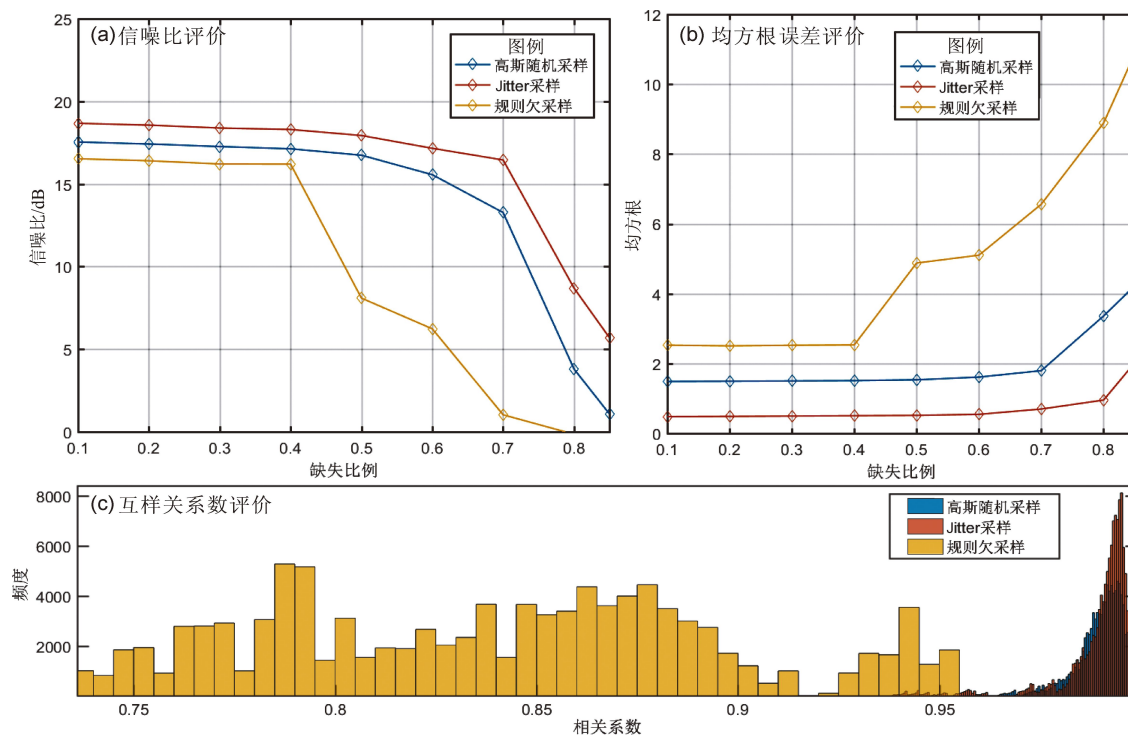


图7 重建效果评价分析结果

Fig. 7 Evaluation and analysis of reconstruction effectiveness

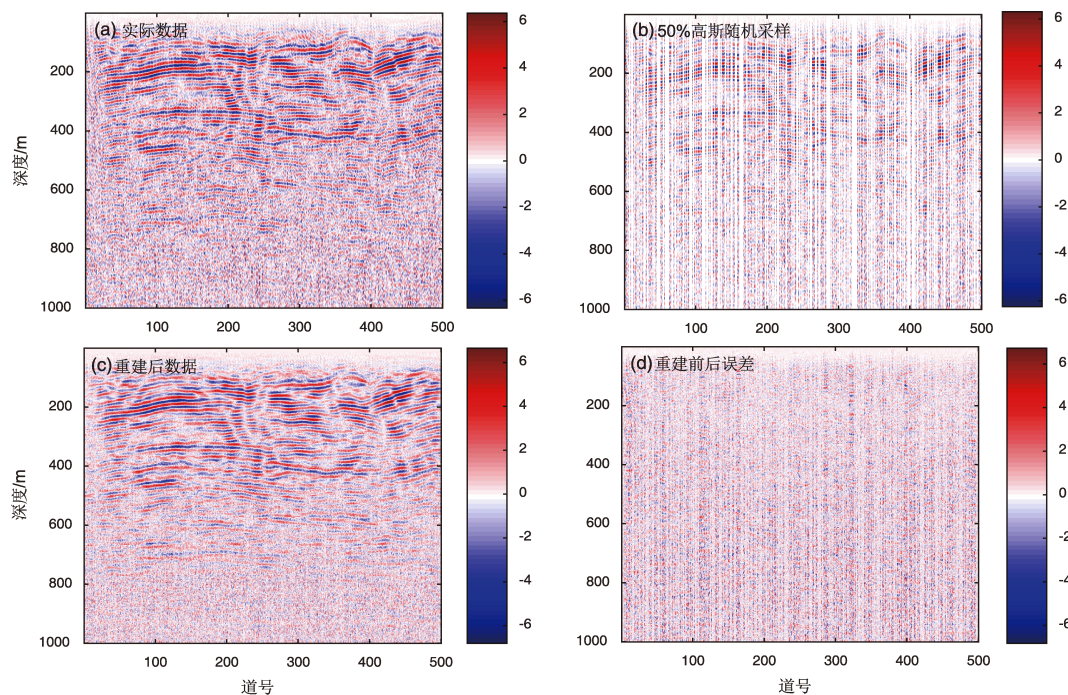


图8 50% 高斯随机采样重建前后地震数据对比

Fig. 8 Comparison before and after 50% Gaussian random sampling reconstruction

5 结论

本文基于压缩感知理论，构建了一种基于 Jit-

ter 采样的压缩感知地震勘探数据重建方法，并进行了合成地震数据和实际数据测试，主要得到以下结论：

(1) Jitter 采样的采样点比较均匀，既可以以

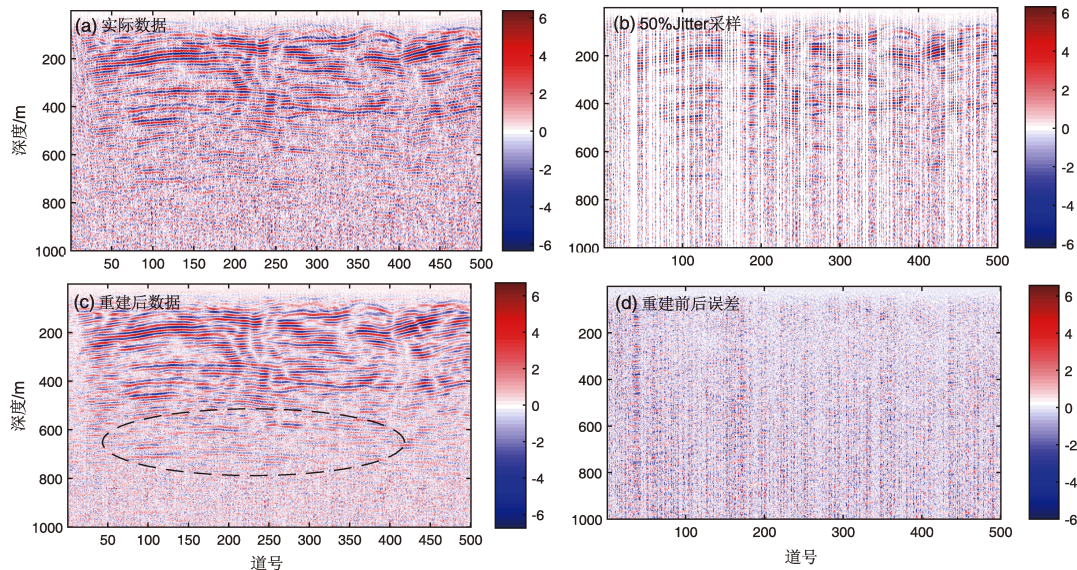


图9 50% Jitter 采样重建前后对比

Fig. 9 Comparison before and after 50% Jitter sampling reconstruction

远低于采样定理要求的采样率进行欠采样,又可以保证信号的信息不会丢失,且假频均被转化成不相干的噪声,易于去除。

(2) Jitter 采样重建后的信号与模拟信号的波形和振幅一致性仍较强,信噪比更高、误差小、互相关系数更高,相位恢复精度较高,获得较好的处理效果,同时, $f-k$ 谱较为光滑,无明显的频谱泄漏,与原始信号的 $f-k$ 谱较为一致。

(3) 本文方法处理后的地震数据信噪比更高,剖面信息更加丰富,深层同相轴的连续性增强,视分辨率得到明显提高,尤其是局部细节信息得到了很好的恢复。

参考文献:

- 白兰淑,吴庆举,张瑞青. 2022. 压缩感知高分辨率接收函数叠加成像及其应用[J]. 地球物理学报,65(11):4354-4368.
- Bai L S, Wu Q J, Zhang R Q. 2022. High-resolution receiver function imaging based on Compressive Sensing and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(11):4354-4368. (in Chinese)
- 曹静杰,肖金梅,朱跃飞,等. 2022. 一种基于压缩感知理论的浅层地震高效采集方法[J]. 地球物理学进展,37(5):1920-1932.
- Cao J J, Xiao J M, Zhu Y F, et al. 2022. Efficient shallow seismic acquisition method based on compressed sensing theory[J]. Progress in Geophysics, 37(5):1920-1932. (in Chinese)
- 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.
- Guo N M, Li H S, Feng X M, et al. 2014. Non sampling discrete wavelet transform pre stack seismic data reconstruction method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 49(3):508-516. (in Chinese)

刘璐,刘洋,刘财,等. 2021. 地震随机噪声压缩感知迭代压制方法[J]. 地球物理学报,64(12):4629-4643.

Liu L, Liu Y, Liu C, et al. 2021. Iterative seismic random noise suppression method based on compressive sensing[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12):4629-4643. (in Chinese)

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.

Tang G, Yang H Z. 2010. Seismic data compression and reconstruction based on Poisson Disk sampling[J]. Chinese Journal of geophysics, 53(9):2181-2188. (in Chinese)

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.

Tang G. 2010. Seismic data reconstruction and denoising based on compressive sensing and sparse representation[D]. Beijing: Tsinghua University. (in Chinese)

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.

Yao H J. 2013. Research on the rupture process of large earthquakes using compressive sensing method; methods and research progress[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 43(11):907-921. (in Chinese)

张华,陈小宏. 2013. 基于 Jitter 采样和曲波变换的三维地震数据重建[J]. 地球物理学报,56(5):1637-1649

Zhang H, Chen X H. 2013. 3D seismic data reconstruction based on Jitter sampling and curvelet transform[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(5):1637-1649. (in Chinese)

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.

Zhang S, Yang R H, Gao E G. 2021. Signal reconstruction method based on compressive sensing and its application in air gun source signal processing[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(2):322-330. (in Chinese)

- 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.
- Zhang S, Yang R H, Zhang Y, *et al.* 2022. A compressed sensing denoising method based on the curved wave domain and its application in reservoir air gun signals[J]. Journal of Seismological Research, 45(3): 441–451. (in Chinese)
- Bai L, Lu H, Liu Y. 2020. High-efficiency observations; compressive sensing and recovery of seismic waveform data[J]. Pure and Applied Geophysics, 177(1): 469–485.
- Candes E J, Romberg J, Tao T. 2006. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 52(2): 489–509.
- Herrmann F J, Hennenfent G. 2008. Non-parametric seismic data recovery with curvelet frames[J]. Geophysical Journal International, 173(1): 233–248.
- Loris I, Totet G, Daubechies I, *et al.* 2007. Tomographic inversion using L1 – norm regularization of wavelet coefficients [J]. Geophysical Journal International, 170(1): 359–270.
- Titova A, Wakin M B, Tura A C. 2023. Achieving robust compressive sensing seismic acquisition with a two – step sampling approach[J]. Sensors, 23(23): 9519.
- Wang Y, Cao J, Yang C. 2011. Recovery of seismic wavefields based on compressive sensing by an l1 – norm constrained trust region method and the piecewise random subsampling[J]. Geophysical Journal International, 187(1): 199–213.
- Wang Y, Yang C, Cao J. 2012. On tikhonov regularization and compressive sensing for seismic signal processing [J]. Mathematical models & methods in applied sciences, 22(2), doi: 10.1142/50218202511500084.
- Zhan Z, Li Q, Huang J. 2018. Application of wavefield compressive sensing in surface wave tomography[J]. Geophysical Journal International, 213(3): 1731–1743.

Compressed Sensing Seismic Exploration Data Reconstruction Based on Jitter Sampling

ZHANG Shuai¹, YANG Runhai¹, JIANG Jinzhong¹, ZHANG Yan¹, ZHENG Dingchang¹,
DENG Yuefei¹, YANG Runping², WANG Zhihao¹
(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)
(2. Yulong Earthquake Agency, Yulong 674100, Yunnan, China)

Abstract

In the process of seismic exploration data acquisition, due to the complex field environment, the collected seismic data are often incomplete and have bad traces, but the completeness of the original seismic data is prerequisite for seismic data processing and interpretation. Based on the theory of compressive sensing sparse inversion, we constructed a compressive sensing method to reconstruct seismic exploration data by Jitter sampling. Then we compared our proposed sampling with the Gaussian sampling method and the regular undersampling method from the aspects such as their sampling model, spectrum analysis of sampled signal. Further, we tested the synthetic seismic data and, aiming at root – mean – square error, signal to noise ratio, cross correlation coefficient, we made a comprehensive evaluation of the reconstruction effect of the three methods. Comparing the three sampling methods, we found that the original seismic data and the reconstructed data by Jitter method have better consistency in the form and the amplitude, higher signal to noise ratio, less error, and larger correlation coefficient. The practical application of the reconstructed seismic data by Jitter method proves that these data have cophasal axes, good continuity, good consistency in amplitudes, and good effect for noise suppression. This indicates that the Jitter sampling method is able to do random sampling and in the meantime control the sampling interval and in this way make the sampling points not too scattered nor too concentrated. This is helpful for data recovery. In conclusion, the Jitter sampling method is able to reconstruct the dense and regularized data from the original, sparse, and uneven seismic data, thus provides the complete seismic data for the follow – up migration imaging and velocity modeling.

Keywords: compressive sensing; the Jitter sampling; seismic exploration; data reconstruction