2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2026-2037
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

曹静杰,王雨琦,王金总.2026.基于压缩感知理论的实用化地震勘探采集设计.地球物理学进展,41(5):2026-2037,doi:10.6038/pg2026JJ0411.
CAO JingJie, WANG YuQi, WANG JinZong. 2026. Practical seismic exploration acquisition design based on compressed sensing theory. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2026-2037,doi:10.6038/pg2026JJ0411.

基于压缩感知理论的实用化地震勘探采集设计

Practical seismic exploration acquisition design based on compressed sensing theory

曹静杰[1,2,3],王雨琦[2],王金总[2]
CAO JingJie[1,2,3], WANG YuQi[2], WANG JinZong[2]

1. 西安石油大学,地球科学与工程学院,西安 710065
2. 河北地质大学,自然资源部京津冀城市群地下空间智能探测与装备重点实验室,石家庄 050031
3. 陕西省油气成藏地质学重点实验室,西安 710065
1. *School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an* 710065, *China*
2. *Key Laboratory of Intelligent Detection and Equipment for Underground Space of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, Ministry of Natural Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang* 050031, *China*
3. *Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an* 710065, *China*

摘 要 地震数据采集是地震勘探的重要基础,由于其占据地震勘探成本的大部分,所以地震采集技术的优化对于整个地震勘探流程具有重要意义.受 Nyquist 采样定理限制,传统的采集方法对采样率要求较高,采集不能灵活适应实际环境,勘探成本较大.压缩感知理论被引入到地震勘探中已经有十多年,基于该理论的地震数据采集方法可以随机布设检波器,减少工作时长,节约成本,提高地震勘探的效率.现有的基于压缩感知的采集设计方法,无法保证每一炮采集的地震道数一致,影响重建效果.本文提出了一种两步采样方法克服每炮数据采样道数不一致问题.该方法的第一步使用规则采样来生成固定采样位置,控制相邻检波器采样间隔,第二步设置随机采样填充至固定方案内部,增强采样的随机性,并按照保持每炮采集道数一致的方式产生后续采样方案.数据实验表明,两步法采集重

Abstract Seismic data acquisition serves as a critical foundation for seismic exploration. Since it accounts for the majority of the costs in seismic exploration, the optimization of acquisition technology is of great significance to the entire seismic exploration workflow. Constrained by the Nyquist sampling theorem, traditional acquisition methods require high sampling rates, lack flexibility in adapting to actual field conditions, and incur substantial exploration costs. Compressed sensing theory has been introduced into seismic exploration for more than a decade. Acquisition methods based on this theory allow for random deployment of receivers, reduce operational time, lower costs, and improve the efficiency of seismic exploration. However, existing compressed sensing based acquisition design methods cannot guarantee a consistent number of traces per shot, which adversely affects reconstruction quality. This paper proposes a two-step sampling method to overcome the inconsistency in the number of sampled traces per shot. The first step employs regular sampling to generate fixed sampling positions and control the spacing between adjacent receivers. The second

收稿日期 2025-12-03; **修回日期** 2026-05-19. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 国家自然科学基金项目"面向城市地质灾害的瑞利波多阶频散曲线物理信息约束智能反演"(42674238)、国家自然科学基金项目"面向城市地质的三维地震勘探压缩感知采集设计与数据重建研究"(41974166)、2026 年河北省在读研究生创新能力培养资助项目"改进雪融化算法及其在频散曲线反演中的应用"(CXZZSS2026132)、河北地质大学学生科研项目资助(KAY202506)、河北省高校基本科研业务费和河北地质大学科技创新团队项目"地震信号处理与应用团队"(KJCXTD202106)联合资助.
第一作者简介 曹静杰,男,1982 年生,教授,博士生导师,主要研究方向为地球物理反演理论与算法和地球物理信号处理.
E-mail: cao18601861@163.com

建结果信噪比比随机采样和分段随机采样平均值更高,因此该方法在地震勘探中具有应用价值.

关键词　数据采集;压缩感知;规则采样;随机采样

中图分类号　P631

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026JJ0411

CSTR:32085.14.pg2026JJ0411

step introduces random sampling to fill the gaps within the fixed scheme, enhancing the randomness of sampling, and subsequently generates sampling schemes that maintain a consistent number of traces per shot. Data experiments demonstrate that the reconstruction results from the two-step acquisition method achieve a higher signal-to-noise ratio compared to those from random sampling and piece-wise random sampling on average. Therefore, this method holds practical application value in seismic exploration.

Keywords　Data acquisition; Compressed sensing; Regular sampling; Random sampling

0　引　言

地震勘探在工程地质勘察、矿产资源探测和城市地下空间开发等领域具有重要应用价值.传统地震采集方法通常基于奈奎斯特采样定理,该定理要求地震数据道间距相等,在空间上呈规则分布,且采样频率至少为信号最高频率的两倍.该类方法属于高密度采样策略,通过密集的空间采样以避免信号混叠,但导致数据量庞大、采集灵活性低,显著增加了野外作业的时间与经济成本.随着压缩感知理论(Compressed Sensing)的提出,一类能够突破传统采样限制的新型数据采集与重建方法逐渐发展起来.该理论指出,若信号在某个变换域中具有稀疏性,则可通过远低于奈奎斯特采样率的观测数据实现信号的准确重建,为地震数据采集提供了新的技术路线.地震信号作为具有一定频率和相位的波形,本身具有可压缩性,符合压缩感知理论的应用前提(董烈乾等,2025).

压缩感知理论已经被应用于地震数据高效采集方法的研究(曹静杰等,2012;陈生昌等,2015;王汉闯等,2016;门哲等,2019).自 2006 年压缩感知理论被正式提出以来(Candes and Romberg,2005,2006;Candes *et al*.,2006a, b;Donoho,2006),Candes 和 Wakin(2008)率先提出了基于该理论的高斯随机采样(完全随机采样).Herrmann 及其合作者最早将压缩感知引入地震数据采集,并提出 Jittered 采样方法(Hennenfent and Herrmann,2008;Herrmann *et al*.,2008).唐刚较早开展了压缩感知采样研究,提出了泊松碟采样方法(唐刚和杨慧珠,2010).Wang 等(2011)提出了分段随机采样,该方法能够控制最大采样间隔并保持采样随机性.Jamali-Rad 等(2016)利用组合数论中的差集概念构建压缩感知采样方案,从数学角度论证了差集作为压缩感知采样方案的潜力.Oghenekohw 等(2017)在时移地震中采用压缩感知理论,通过不同的炮点分布进行信号采集,提高了采集效率.王汉闯等(2016)从数学物理角度论证地震信号的稀疏性,对比分析了泊松碟采样、Jittered 采样和分段随机采样,发现分段随机采样更易实现且具有更优的频谱特性.吕公河等(2018)基于贪心序贯序列设计了非规则观测系统,首次在中国西部沙漠地区实现地震数据的压缩感知采集.Titova 等(2019,2023)提出了一种新型采样方法,并系统分析了其性能,具有较强的创新性.舒国旭等(2018)在 TFT 工区基于压缩感知的数据采集与重建,验证了方法的有效性.张帅等(2025)通过研究证明 Jittered 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,可以为后续的偏移成像、速度建模等研究提供完整地震数据支撑.黄昱丞等(2025)提出一种优化的边缘保持分段随机欠采样方法,结合不同抽稀比例参数条件下的 Gram 矩阵分析、正演模拟数据对比与松辽盆地砂岩型铀矿地震数据实际应用效果表明,该优化欠采样方法具有最佳的综合性能.倪宇东等(2024)从地震波场的带限性与空间不确定性出发,提出了多采样率地震勘探技术(MrSET),在成本与道密度相同的前提下,该技术相比规则采样能够更有效地实现弱能量信号的充分采样与高精度成像.

现有的采样方法主要从控制随机性方面进行考虑,没有重点关注每一炮随机采样的采样道数是否均衡,对于滚动接收的多炮采集时不能保证每一炮的采样道数一致,会造成每个单炮重建的信噪比不均衡,影响后续地震数据处理和解释的效果.为克服该缺点,本文提出一种用于两步采样方法:首先通过规则采样预设一些固定的采样位置;随后在固定采样点之间进行随机填充以增强采样的随机性,并按一定规律扩展采样方案.该方法在实现全排列采集的同时,保留了分段随机采样的特点,并且保障每一炮的采集道数一致,可灵活控制采样段数与每段样

本数、保持随机性、约束采样间隔,并保留边缘数据.基于自主模拟和开源的 Marmousi 模拟数据的压缩感知采集与重建实验表明,所提出的两步采样方法在重建结果稳定性与信噪比方面均优于对比方法,验证了该压缩感知采样策略在地震勘探中的可行性与有效性.

1 理论

1.1 现有压缩感知采样方法

地震勘探检波器和炮点的布置一般是按照一定的规则在地表等间隔的布置,如果满足 Nyquist 采样定理的要求,规则采样并不会导致频率混淆,能够保证采样的数据经过处理后正确的反映地下的空间结构.然而由于采集成本的限制,按照采样定理进行规则采集会造成野外采集成本巨大,使得地震勘探工作难以实施,因此一般的情况下虽然是规则的布置炮点和检波点,但是仍然会产生采样假频,数据处理时需要采用加密处理.

压缩感知理论提出后引起了野外采集方法的变革,该理论支持随机采样方法,不要求炮点和检波点规则布置,可以进行随机欠采样方法,在实际勘探过程中依照测线随机安置检波器.该采样方式具有较强的随机性,对于傅里叶域中的稀疏信号,受限等距性质保证了使用随机采样能成功重建地震数据(Foucart and Rauhut,2013).但随机采样有时会产生较大间隔,当这些间隔大于稀疏变换(例如 curvelet 变换)的某个尺度时,重建结果中原始数据关键信息会有一定损失,零空间特性(NSP)在理论上证明了应该对于信号大量缺失的情况进行限制(Titova *et al.*,2019).

Hennenfent 在地震勘探中引进了 Jittered 采样方法(Hennenfent and Herrmann,2008),Jittered 采样首先等间隔的选取采样点,然后以这些点为中心随机的抖动选取采样点.Jittered 采样能够控制采样间隔而且具有随机性,可以将假频转化成低幅度噪声,但是该采样方法缺乏灵活性,只能取完整采样的整数分之一,不能满足对于采样率的精确需求.

泊松碟采样首先需要在采样区域内随机生成一个点,将该点作为起点,以一定的半径为范围,生成一个圆形区域,然后从该圆形区域外随机生成一个点,如果该点与已采样点之间的距离大于等于半径,则将该点加入到点集中,否则将该点舍弃.这个过程不断重复,直到点数达到预设数量或者无法再生成新的点.泊松碟采样算法具有较好的均匀性和随机性,但是不能满足对于采样率的精确需求.

曹静杰等在 2011 年首次提出了分段随机采样的思想,该采样方法首先将待处理区域划分为若干个子区间,然后在子区间内根据采样率的需求随机选取采样个数,能够保持随机性、控制采样间隔和灵活划分段数,因此能够改进数据重构的效果.王汉闯等(2016)对比分析了泊松碟采样、jittered 采样和分段随机采样,发现分段随机采样方法具有更为优越的"蓝色噪声"频谱分布特征,特别适合具有稀疏性先验信息的信号的采样,具有更好的灵活性.分段随机采样能控制采样间隔的大小,但无法一直保持边缘数据的采集,边缘采样点的缺失会降低重建结果(曹静杰等,2022).边缘保持的分段随机采样能够在分段随机采样的基础上保持全排列接收时边缘数据的采集,一定程度提高地震数据的重建的效果,但当检波器数量不支撑全排列接收而采用分段滚动排列接收时会失去该采样的边缘保持性质.图 1 为上述几种压缩感知采样方法的对比图.

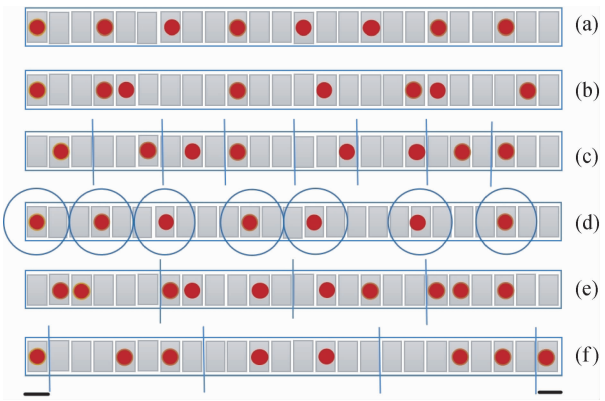


图 1 采样方法对比示意图

(a)规则采样;(b)随机采样;(c)Jittered 采样;(d)泊松碟欠采样;(e)分段随机采样;(f)边缘保持的分段随机采样.其中红点代表实际采样点,灰色框代表剩余样点.

Fig. 1 Comparison diagram of sampling methods

(a) Regular sampling; (b) Random sampling; (c) Jittered sampling; (d) Poisson disk undersampling; (e) Piecewise random sampling; (f) Piecewise random sampling with edge preservation. Among them, the red dots represent the actual sampling points, and the gray boxes represent the remaining sampling points.

1.2 两步法采样

一般的压缩感知采样方法主要从保持采样随机性和控制最大采样间隔的角度去研究采样方式,但是存在针对滚动采集的地震数据,无法保证每一炮的接受道数一致的问题,这样会造成重建的信噪比不均衡,影响地震数据处理和解释的效果.针对滚动

排列采集方式,本文提出一种两步采样方法,该方法将固定位置检波器采样与固定位置间隔内的随机采样相结合,能够保证每一炮的采集道数一致,有利于后续地震数据重建和处理.具体流程如下:

(1)确定第一炮的采样点(对应每炮的接收点)中的固定采样点数量 N 及其间隔 K,并据此布设固定采样点(图 2 中红色点表示固定位置采样点).

(2)随后在每一炮的采样范围内,剔除已选固定采样点后,从剩余位置中随机抽取 n 个采样点(绿色点表示随机采样点),将固定采样点与随机采样点合并,构成第一炮的采样方式 C_1,其总采样数为 $N+n$.

(3)在炮点推移的过程中,将第一炮采样序列中的首个固定采样点移至末尾,以此生成第二组固定采样点.

(4)判断第一炮中第一个间隔 J1 内的随机采样点数量 α_1,并在第二炮最后一个间隔 G1 内随机生成 α_1 个采样点,最终形成第二炮的采样方式 C_2,其中分段排列总采样数仍然为 $N+n$.

以此类推可以产生多个炮的采样方式,该采样策略可在每炮采样点中保持规则与随机采样相结合的特征,并且每一炮采样点数量能够保持一致($N+n$),有助于提高重建结果的稳定性.具有良好的扩展性与适应性.设分段滚动接收共完成了 L 次,则全部采样点(全排列)总点数 γ 为:

$$\gamma = N + L + \sum_{1}^{L} \alpha \ , \tag{1}$$

其中 N 表示第一段排列固定采样点数,K 表示采样间隔,α_L 为第 L 个固定间隔内的随机采样点数.

设每段排列的采样率为 θ,两步法采样可保证则 θ 恒定不变,于是有:

$$\theta = \frac{N+n}{(N-1)\cdot K+1} \times 100\% \ , \tag{2}$$

设全排列的采样率为 δ,全部待采样位点共有 η,则有:

$$\delta = \frac{\gamma}{\eta} \times 100\% = \frac{N + L + \sum_{1}^{L} \alpha}{K \cdot (N + L - 1) + 1} \times 100\% \ . \tag{3}$$

当计算总采样率时,通常可以舍弃最后一个固定点位,则更容易满足对采样率的精确需求,这也是两步法采样相比较其他压缩感知采样所具有的优势.

两步采样法通过四个核心参数生成检波器接收排列:每炮的固定间隔 K,固定采样点数量 N,以及炮内随机采样点数量 n,总滚动次数 L.固定间隔 K 用于限制最大采样间隔,从而减少因间隔过大导致的数据缺失问题,K 值通常不宜设置过小(一般要求 $K\geqslant 3$),否则固定采样点过于密集,将使随机采样点数量相对减少,容易引发与规则欠采样类似的相干假频现象.两步采样法能有效克服随机采样中间隔过大的缺点,在保持较高随机性的同时,允许灵活设定固定采样间隔.如果固定间隔 K 等于炮点移动的道数,该方法能保持对边缘道的采集,更加有利于地震数据重建,边缘数据对重建质量具有重要影响(曹静杰等,2022).

两步法采样的实现通过 matlab 软件编程完成,其中四个核心参数固定间隔 K、固定采样点数 N、随机采样点数及 n 总滚动次数 L 的设定依据主要由以下内容构成:固定间隔通过限制连续道集缺失而实现采样方法的零空间特性.固定间隔 K 越小,采集样本越规则,不符合采样随机性的特点,当 $K\leqslant 3$ 时,一段由 N 和 n 组成的排列 C 中 N 的占比要接近甚至高于 n,这样不利于采样随机性的实现,且频谱图易出现相干假频,所以要求 $K\geqslant 3$ 来避免上述问题的出现.在固定间隔 K 已确定的情况下,固定采样点数 N 可以控制一段排列的长度,设定不同的 N 值可以满足对排列长度的需求.N 与 n 的数量比例决定了全排列或分段接收中规则点与随机点的占比关系.例如当固定间隔为 5 时,设定固定采样点数为 5,则第一段排列长度为 $(5-1)\times 5+1=21$ 道,设定随机采样点数为 6 个,则前 20 道中采样总点数为 10 道,采样率则等于固定和随机采样点数加和除以道数,等于 50%.继续延长排列中的固定采样点,增加四段排列长度至总排列长度为 101 道,固定采样点数为 21 个,随机采样点数为 $5\times 6=30$ 个,取前一百道作为实验样点,总排列采样率保持与分段排列采样率相等,等于 $50/100=50\%$.其中 L 的数量大小决定总排列的长度,可根据实际情况自行调节其幅值.根据对规则采样与随机采样的研究(Candes and Wakin,2008),通常期望随机采样点占比较高,同时以较低比例的规则采样个数避免出现间隔过大的问题.对于实验及实际操作中对采样率的要求不同的问题,使用两步法采样时应该通过设计合适的固定及随机采样点数,使之符合对采样率的精准需求.相较于之前出现的几种压缩感知采样方法,两步法采样在采样率的精确设定方面的确具有明显的优越性及实用性.

尽管两步法采样设定了随机采样点数来满足采集随机性的要求,但是在实验过程中仍然发现由于固定间隔采样点的存在易出现互相干假频的情况.这是两步法采样的一个缺陷,也是在实际应用时的难点,通过加大固定间隔的条件,可减轻该方法在实验以及实际操作时的局限性,尽可能的满足采样方法的完整性与准确性.

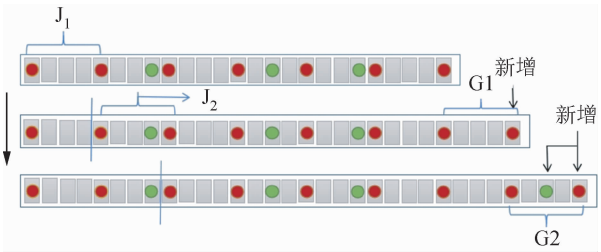


图 2 两步法采样流程

间隔 K 为 4,固定采样点 N 为 7,随机采样点 n 为 3.

Fig. 2 Two step sampling process

The interval K is 4, the fixed sampling point N is 7, and the random sampling point number n is 3.

2 数值实验

2.1 Tessral 正演数据重建实验

为了验证两步法采样的性能,首先建立速度模型并且正演地震反射波数据,使用随机采样、分段随机采样和两步法采样分别对模拟的地震数据进行采样,并采用 MSSA 方法重建.

本文使用 Tesseral 软件建立一个速度模型并且正演,采用的地震数据如图 3a 所示,共 200 道,时间采样率为 1 ms,时间方向采样点数为 1101,即采样时间为 1.1 s.对该炮数据用随机采样、分段随机采样和两步法采样分别进行缺失 40%、50%、60% 道数的采集.图 3b、c、d 为原始数据与三种采样方法缺失 50% 之后的数据.

原始数据的 F-K 谱(图 4a)的主频的振幅与相位信息完整无假频及噪声;50% 规则欠采样的 F-K 谱(图 4b)的主频上的元素幅值降低,产生了振幅具有一致性的频率泄漏,有较大幅值的互相干假频.随机欠采样、分段随机采样和间隔为 5 的两步采样的

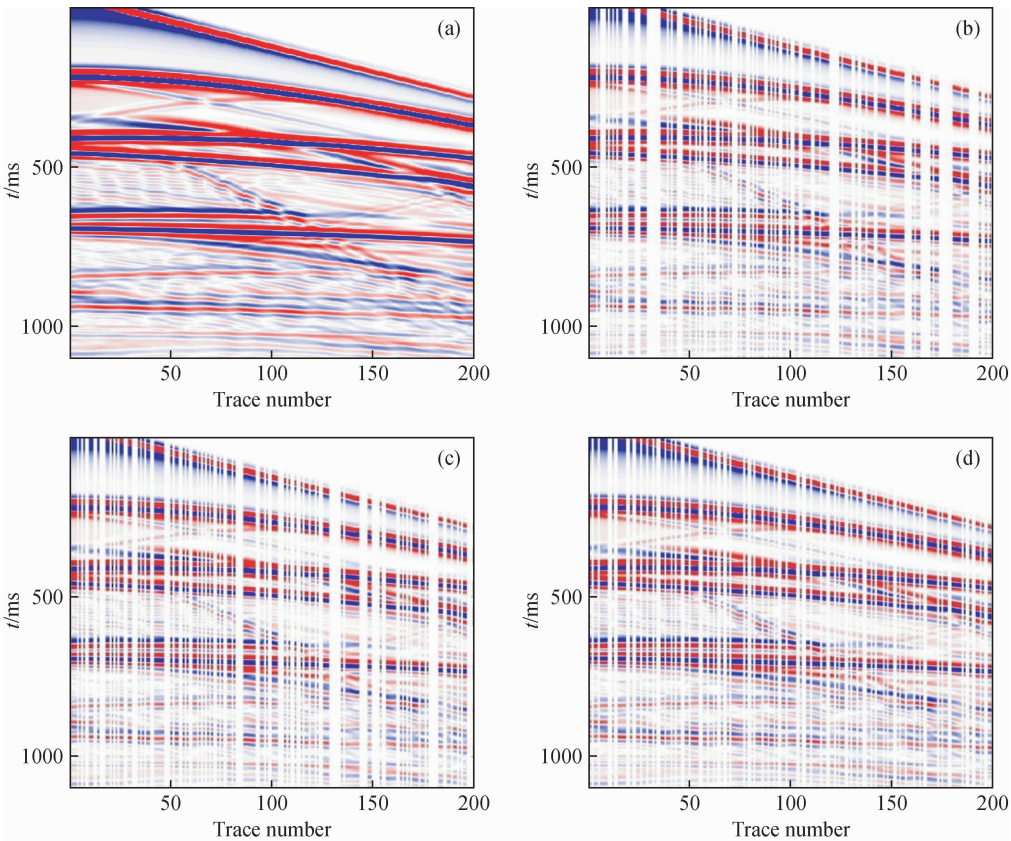


图 3 原始数据与三种采样方法缺失 50% 数据

(a)原始数据;(b)随机采样;(c)分段随机采样;(d)两步采样.

Fig. 3 50% missing data between raw data and three sampling methods

(a) Raw data; (b) Random sampling; (c) Piecewise random sampling; (d) Two step sampling.

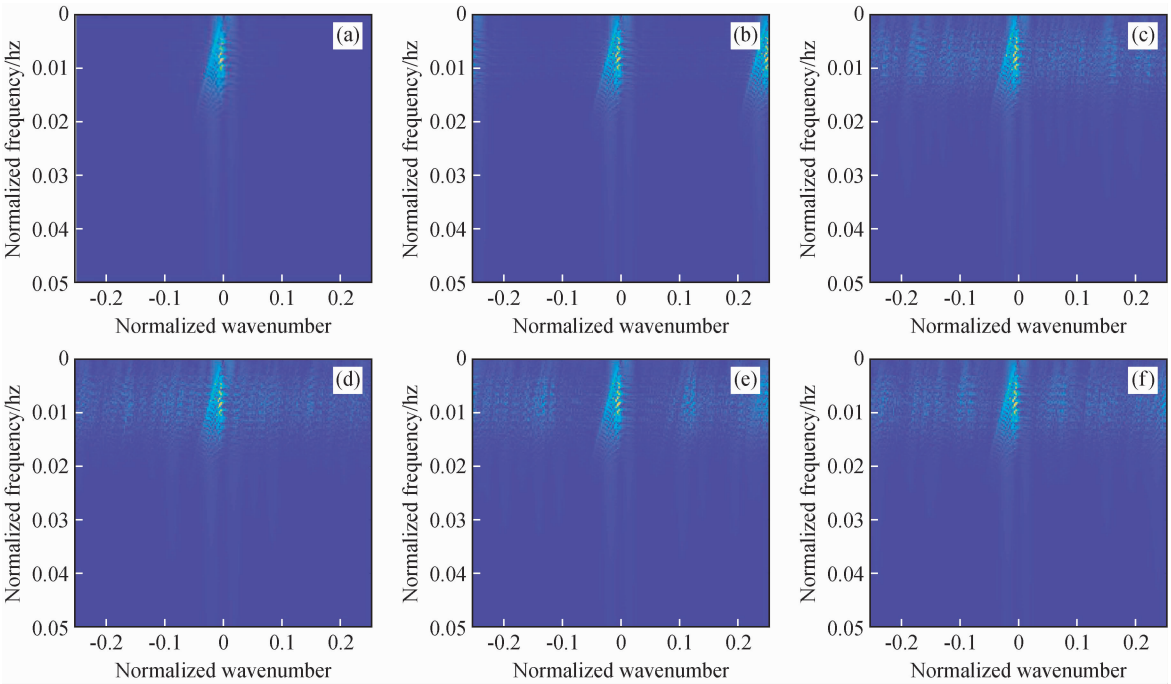


图 4　不同采样方法的 *F-K* 频谱对比

(a)完全采样;(b)规则欠采样;(c)随机欠采样;(d)分段随机采样;(e)固定间隔为 4 的两步采样;(f)间隔为 5 的两步采样.

Fig. 4　Comparison of *F-K* spectral using different sampling methods

(a) Complete sampling; (b) Regular sampling; (c) Random undersampling; (d) Piecewise random sampling; (e) Two step sampling with a fixed interval of 4; (f) Two step sampling with an interval of 5.

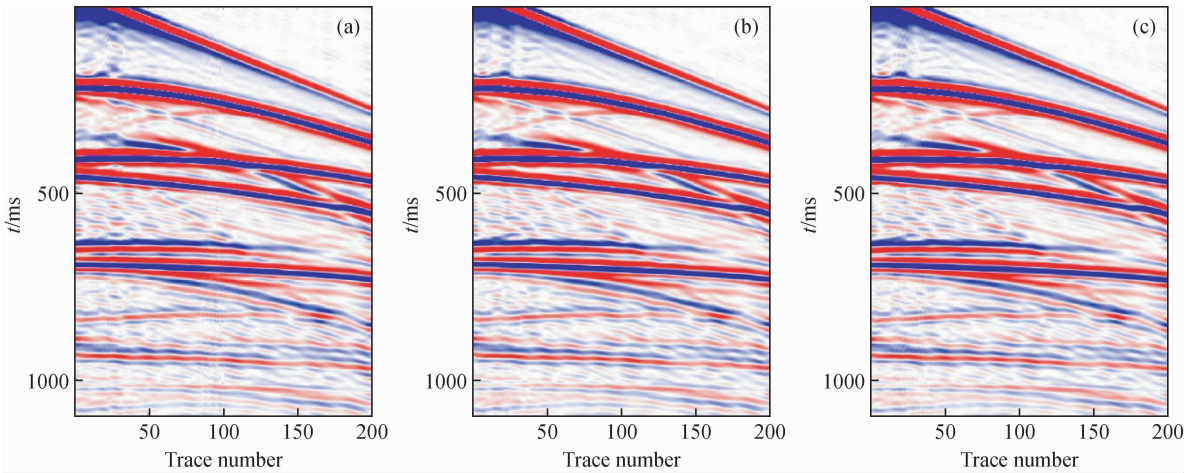


图 5　50% 采样率下三组采样数据重建结果

(a) 随机采样;(b)分段随机采样;(c)两步采样.

Fig. 5　Reconstruction results of three sets of sampled data at a 50% sampling rate

(a) Random sampling; (b) Piecewise random sampling; (c) Two step sampling.

F-K 谱分别如图 4c、d、f 所示,假频被转化为低幅值随机噪声,泄漏频率成分的分布具有一定的随机性.随机采样由于间隔无法被限制,泄漏的频率幅值较大,而其他两种随机且均匀的采样方法(图 4d、f)相较于完全随机采样在这方面则表现更好,更易于有用信号与噪声的分离及重建处理.由此可知,分段随机采样与两步采样方法具有更少的频率泄露,是具有稀疏性先验信息的信号的采样方式,两步采样还突破了分段随机采样难以满足精确采样率的限制,具有更好的灵活性,且可以保持分段接收的边缘数据.

图 5 为 50% 采样率下原始数据与三种采样方

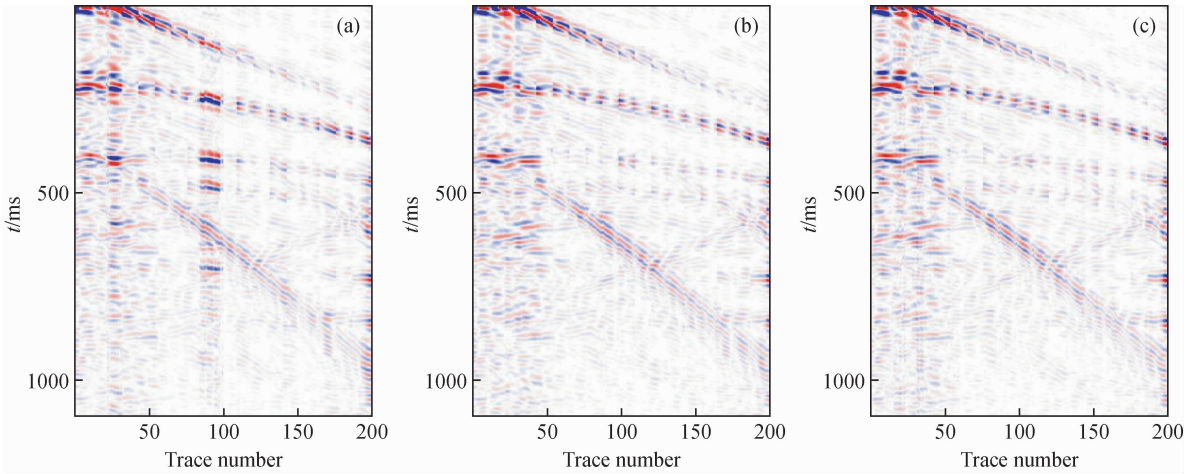


图 6 三组 50% 采样率的采样数据的重建结果与原始数据之间的残差

(a)随机采样;(b)分段随机采样;(c)两步采样.

Fig. 6 The residual between the reconstruction results of three sets of sampling data with a 50% sampling rate and the original data

(a) Random sampling; (b) Piecewise random sampling; (c) Two step sampling.

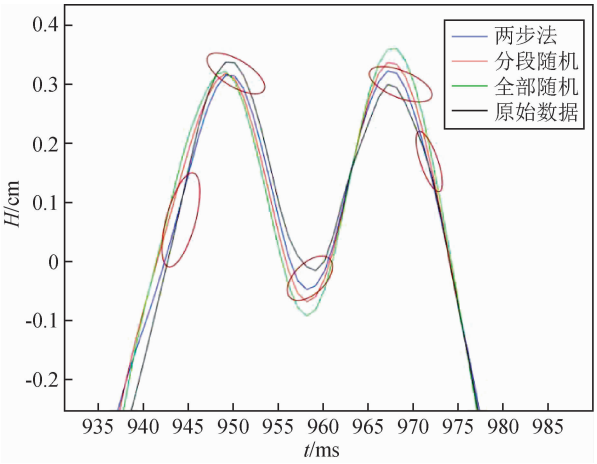


图 7 第 26 道原始数据与重建数据对比

Fig. 7 Comparison of the 26th trace original and reconstructed data

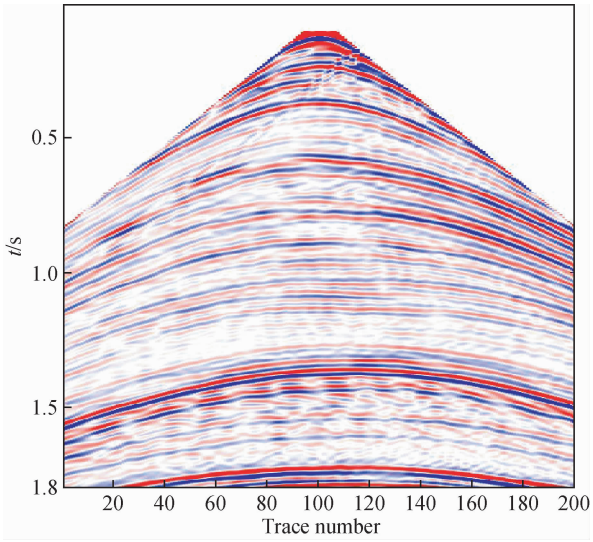


图 8 Marmousi 模拟数据

Fig. 8 Marmousi model data

法重建结果,其中图 5a 为随机采样重建结果,信噪比为 14.7503 dB;图 5b 为分段随机采样重建结果,信噪比为 18.6136 dB;图 5c 为两步法采样重建结果,信噪比为 19.3961 dB. 从重建结果可以看出,两步法采样的重建信噪比高于分段随机采样和随机采样. 图 6 为原始数据与 50% 采样率下三种采样方法重建结果的残差,可以看出两步法采样的残差更小.

我们选取缺失的第 26 单道数据进行重建结果的比较. 为了明显起见,只显示了第 26 道的一部分进行放大,如图 7 所示,其中黑色线为真实地震道,绿色线为随机采样的重建结果,红色线为分段随机采样的重建结果,蓝色线为两步法采样的重建结果. 由图中红色椭圆框标出的可以看出,两步法采样重建的单道结果与原始数据单道更为接近.

对数据进行 30% 采样、40% 采样和 50% 采样的实验,每个采样方法都进行了 50 次计算,重建结果的平均信噪比见表 1. 以 30% 的采样为例,随机采样的重建结果的平均信噪比 9.3651 dB;对该数据进行 50 次分成 10 段的分段随机采样的重建结果的平均

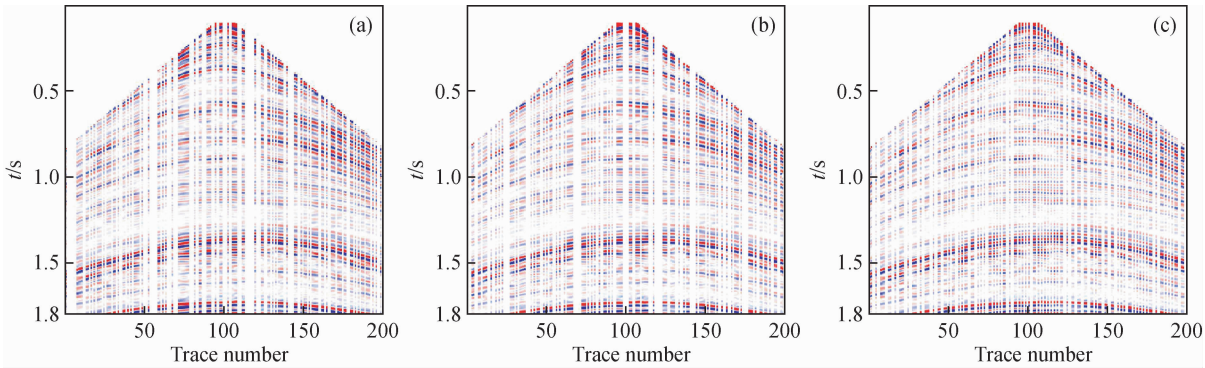


图 9　三种采样方法缺失 50% 数据

(a)随机采样;(b)分段随机采样;(c)两步法采样.

Fig. 9　Three sampling methods missing 50% of data

(a) Random sampling; (b) Piecewise random sampling; (c) Two step sampling.

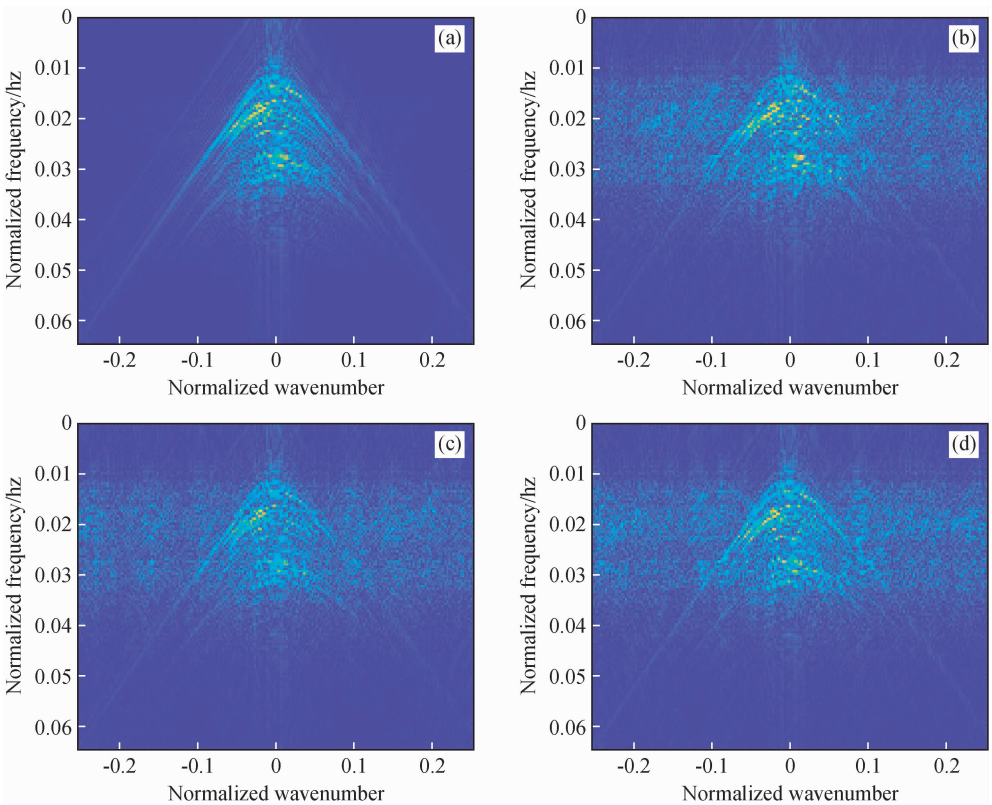


图 10　原始数据与三种采样方法 *F-K* 频谱

(a)原始数据;(b)随机采样;(c);分段随机采样;(d)两步法采样.

Fig. 10　*F-K* spectra of raw data and three sampling methods

(a) Raw data; (b) Random sampling; (c) Piecewise random sampling; (d) Two step sampling.

信噪比为 12.1243 dB,该实验中每段的长度为 20,每段随机采样 6 个点,总的采样点数为 60. 对该数据进行 50 次固定间隔为 5 的两步法采样的重建结果的平均信噪比为 14.8533 dB. 由表 1 可以看出,分段随机采样的重建质量比随机采样的高,两步法采样比分段随机采样有进一步提升. 当采样率低时(如 30%),三种采样方式的信噪比差异相较于采样率较高(50%)时有所增大. 总体而言,两步法采样的

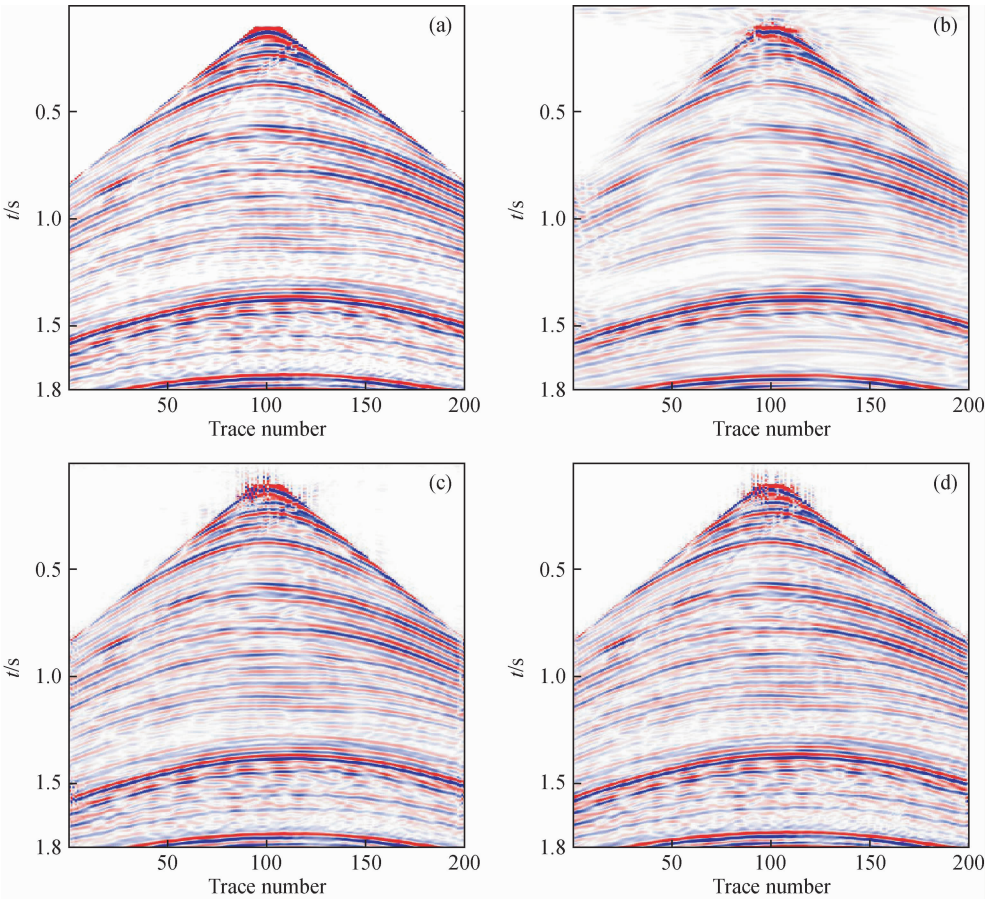


图 11 原始数据和 50% 采样率的三种采样重建结果

(a)原始数据;(b)随机采样;(c)分段随机采样;(d)两步法采样.

Fig. 11 Raw data three sampling reconstruction results with an 50% sampling rate

(a) Raw data; (b) Random sampling; (c) Piecewise random sampling; (d) Two step sampling.

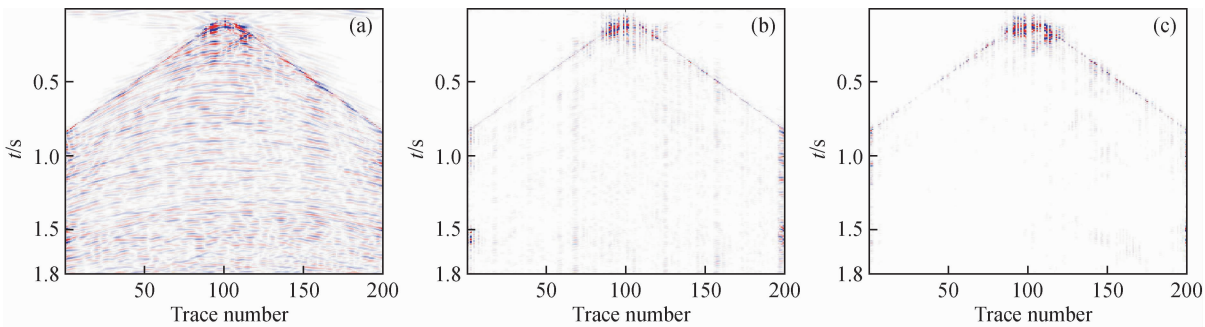


图 12 三组采样的重建结果与原始数据间的残差

(a)随机采样;(b)分段随机采样;(c)两步法采样.

Fig. 12 Residual between the reconstructed results of three sets of sampling and the original data

(a) Random sampling; (b) Piecewise random sampling; (c) Two step sampling.

重建结果优于随机采样和分段随机采样的重建效果,且更加适合低采样率的情形.两步法采样方式的规则采样的间隔随着采样比例的变化而变化,采样比例越低固定间隔则越大;当采样比例上升时,可以根据对随机性的需求划定规则采样与随机采样之间的数量关系.

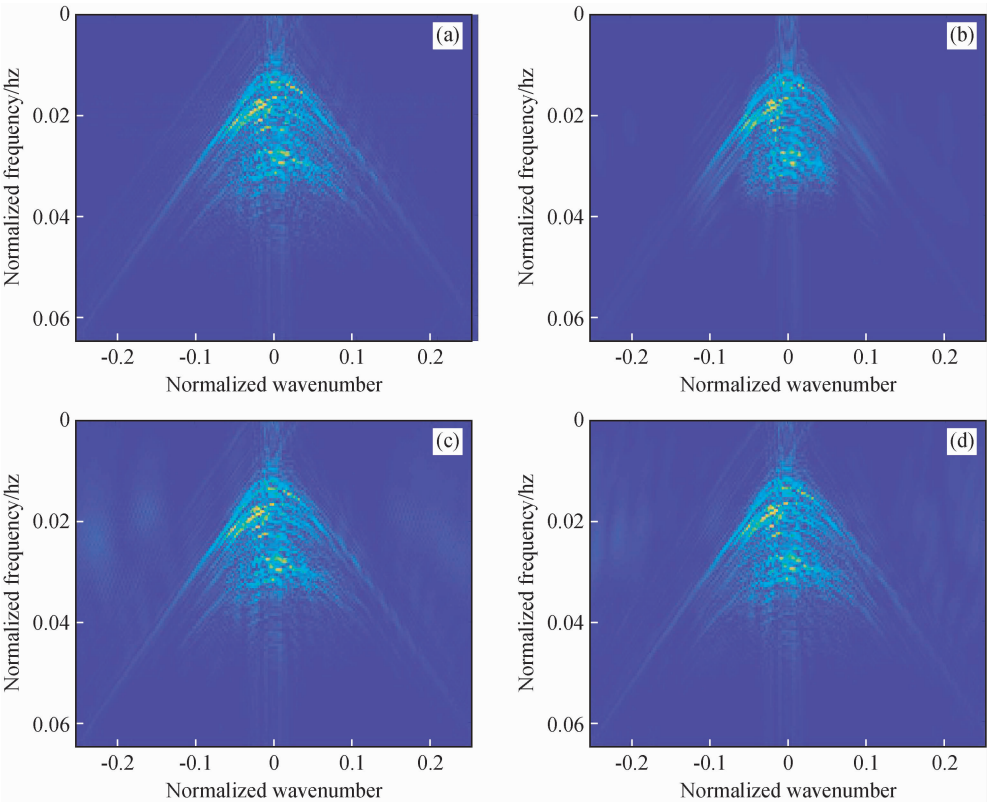


图 13　原始数据与三组采样数据重建结果的 *F-K* 频谱图

(a)原始数据;(b)随机采样;(c)分段随机采样;(d)两步法采样.

Fig. 13　*F-K* spectrum of reconstruction results for three sets of sampled data and raw data

(a) Raw data; (b) Random sampling; (c) Piecewise random sampling; (d) Two step sampling.

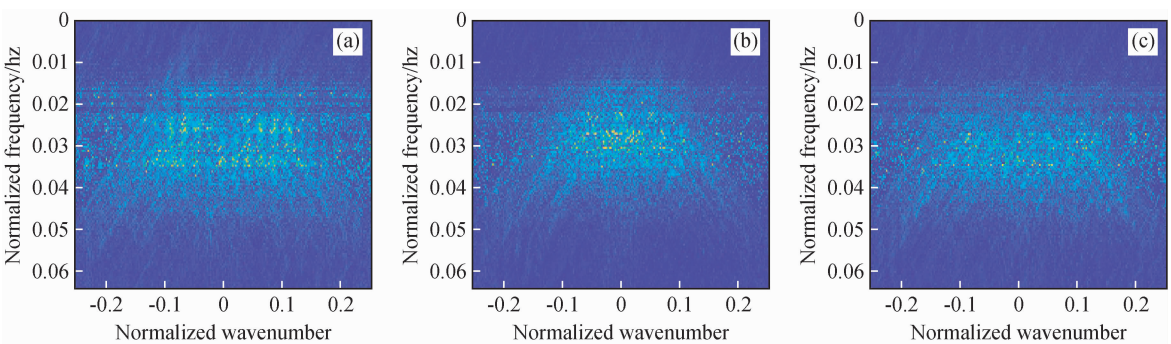


图 14　三组采样的重建结果残差的 *F-K* 频谱图

(a)随机采样;(b)分段随机采样;(c)两步法采样.

Fig. 14　*F-K* spectrum of the residual of the reconstructed results of three sets of sampling

(a) Random sampling; (b) Piecewise random sampling; (c) Two step sampling.

表 1　三种采样方法重建后信噪比比较

Table 1　Comparison of signal-to-noise ratio after reconstruction using three sampling strategies

采样比例/%	随机采样/dB	分段随机采样(10 段)/dB	两步采样($K=5$)/dB
30	9.3651	12.1243	14.8533
40	14.8331	17.4205	19.4942
50	18.8069	19.8047	20.4701

2.2　Marmousi 模型数据实验

图 8 为一个 Marmousi 模型的一炮模拟数据,共 201 道,每道 600 个采样点,采样间隔为 0.003 s,每道采样时间为 1.8 s. 图 9 为三种采样方法缺失 50% 之后的数据. 从图中可以看出两步法对于连续间隔限制的更好. 图 10 为该模拟数据与随机采样、分段随机采样、两步法采样($K=5$)在 50% 采样率下的

F-K 频谱图.三种采样都有不相干的噪声分布,其中两步法采样频谱在主频段左侧斜线下方细小条带状频率保留较为完整,有利于后续重构.

图 11 为原始数据和三组 50% 采样率的数据的重建结果,其中随机采样重建结果信噪比为 7.3437 dB,分段随机采样为 8.4759 dB,两步法采样为 9.2993 dB.图 12 为与图 11 对应的三组采样的重建结果与原始数据之间的残差,其中两步法的残差更小,说明重建结果与原始数据更接近.

图 13 为原始数据与三组采样数据重建结果的 *F-K* 频谱,其中两步法的重建结果的频谱特征在细节上与原始数据频谱更为接近.图 14 为三组采样的重建结果与原始数据之间的残差的 *F-K* 频谱.随机采样的重建数据残差的频谱中残余能量较多;两步采样的重建数据的残余能量较少.

对不同采样方法在 40%、50%、60% 采样率下的数据进行各 50 次的重建测试,并计算平均信噪比,结果如表 2 所示.在不同采样率下的的两步法重建结果信噪比相对于其他采样数据的重建结果信噪比有 0.6~2 dB 的提升,具有明显的优越性.在实验过程中发现决定欠采样方法好坏的重要因素是连续缺失道的数量和在一段区域内部总的缺失道比例.如果一个压缩感知采样系统内出现连续多道缺失或在某一区域内缺失道数比例过大,对于重建数据的质量伤害影响则十分严重,而两步法在这两个重要因素上有比其他压缩感知采样方法更好的表现.

表 2 三种采样方法重建结果信噪比

Table 2 Signal-to-noise ratio of reconstruction with three sampling strategies

采样率/%	随机采样/dB	分段随机采样/dB	两步法/dB
40	5.1066	5.646	5.7058
50	7.7078	8.3288	9.0497
60	10.4452	11.9217	12.726

3 结 论

本文基于压缩感知理论提出一种两步法采样方法,该方法具备良好的随机性特征,可灵活设置固定采样间隔,有效抑制连续空道集的产生,有效兼顾了全排列与分段接收模式,并在滚动采集中始终保持边缘数据的采集,同时确保各接收段道数一致,有利于后续数据处理与重建.为验证该方法的有效性,本文基于自建的模拟数据和 Marmousi 模拟数据,在不同采样策略下进行了系统对比实验.结果表明在相同采样率条件下,两步法在缺失地震道恢复和重建信噪比稳定性方面均优于对比的压缩感知采样方法;经多次重复实验,该方法的平均重建信噪比高于对比方法,展现出良好的鲁棒性和一致性.两步法采样相对于其他压缩感知采样方法的一个突出优势是能够保证每炮采样点数一致,因此能够保障重建结果变化不大,对于后续地震数据处理和解释更具优越性.因此,两步法采样不仅能够提升地震数据重建质量,还具有较强的实用性和推广价值,在压缩感知地震采集及浅层勘探领域中具备良好的应用前景.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Candes E J, Romberg J K. 2005. Signal recovery from random projections. //Proceedings Volume 5674, Computational Imaging III. San Jose, California, United States: SPIE, 76-86.

Candes E J, Romberg J. 2006. Quantitative robust uncertainty principles and optimally sparse decompositions. Foundations of Computational Mathematics, 6(2): 227-254.

Candes E J, Romberg J K, Tao T. 2006a. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements. Communications on Pure and Applied Mathematics, 59(8): 1207-1223.

Candes E J, Romberg J, Tao T. 2006b. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. IEEE Transactions on Information Theory, 52(2): 489-509.

Candes E J, Wakin M B. 2008. An introduction to compressive sampling. IEEE Signal Processing Magazine, 25(2): 21-30.

Cao J J, Wang Y F, Yang C C. 2012. Seismic data restoration based on compressive sensing using the regularization and zero-norm sparse optimization. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(2): 596-607, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.022.

Cao J J, Xiao J M, Zhu Y F, *et al*. 2022. Efficient shallow seismic acquisition method based on compressed sensing theory. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(5): 1920-1932, doi: 10.6038/pg2022FF0443.

Chen S C, Chen G X, Wang H C. 2015. The preliminary study on high efficient acquisition of geophysical data with sparsity constraints. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 54(1): 24-35.

Donoho D L. 2006. Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, 52(4): 1289-1306.

Dong L Q, Zhou H, Sang Y Y, *et al*. 2025. Seismic data regularization and interpolation approach based on compressive sensing principle. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(1): 276-284, doi: 10.6038/pg2025HH0428.

Foucart S, Rauhut H. 2013. A Mathematical Introduction to Compressive Sensing. New York: Birkhäuser.

Hennenfent G, Herrmann F J. 2008. Simply denoise: wavefield reconstruction via jittered undersampling. Geophysics, 73(3):

V19-V28.

Herrmann F J, Wang D L, Hennenfent G, *et al*. 2008. Curvelet-based seismic data processing: A multiscale and nonlinear approach. Geophysics, 73(1): A1-A5.

Huang Y C, Wu Q B, Kong L Y, *et al*. 2025. Optimized random subsampling and data reconstruction in seismic exploration of sandstone-type uranium deposits based on compressed sensing. World Nuclear Geoscience (in Chinese), 42(2): 317-328.

Jamali-Rad H, Kuvshinov B, Tang Z, *et al*. 2016. Deterministically subsampled acquisition geometries for optimal reconstruction. //78th EAGE Conference and Exhibition 2016. European Association of Geoscientists & Engineers, 1-5.

Lü G H, Di Z X, Huo S D, *et al*. 2018. Seismic data acquisition based on compressive sensing. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(6): 831-841.

Ni Y D, Jiang F H, Zou X F, *et al*. 2024. Discussion on multirate seismic exploration technique (MrSET). Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(3): 1169-1180, doi: 10.6038/cjg2023Q0896.

Oghenekohwo F, Wason H, Esser E, *et al*. 2017. Low-cost time-lapse seismic with distributed compressive sensing — part 1: exploiting common information among the vintages. Geophysics, 82(3): P1-P13.

Shu G X, Lü G H, Lü Y, *et al*. 2018. Seismic data reconstruction based on compressive sensing. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 57(4): 549-554.

Tang G, Yang H Z. 2010. Seismic data compression and reconstruction based on Poisson Disk sampling. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53(9): 2181-2188, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.018.

Titova A, Wakin M B, Tura A. 2019. Mutual coherence in compressive sensing seismic acquisition. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. SEG, 122-126.

Titova A, Wakin M B, Tura A C. 2023. Achieving robust compressive sensing seismic acquisition with a two-step sampling approach. Sensors, 23(23): 9519, doi: 10.3390/s23239519.

Wang H C, Tao C H, Chen S C, *et al*. 2016. Study on highly efficient seismic data acquisition method and theory based on sparsity constraint. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(11): 4246-4265, doi: 10.6038/cjg20161126.

Wang Y F, Cao J J, Yang C C. 2011. Recovery of seismic wavefields based on compressive sensing by an l_1-norm constrained trust region method and the piecewise random subsampling. Geophysical Journal International, 187(1): 199-213.

Zhang S, Yang R H, Jiang J Z, *et al*. 2025. Compressed sensing seismic exploration data reconstruction based on Jitter sampling. Journal of Seismological Research (in Chinese), 48(1): 71-79.

附中文参考文献

曹静杰, 王彦飞, 杨长春. 2012. 地震数据压缩重构的正则化与零范数稀疏最优化方法. 地球物理学报, 55(2): 596-607, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.022.

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. 地球物理学进展, 37(5): 1920-1932, doi: 10.6038/pg2022FF0443.

陈生昌, 陈国新, 王汉闯. 2015. 稀疏性约束的地球物理数据高效采集方法初步研究. 石油物探, 54(1): 24-35.

董烈乾, 周恒, 桑运云,等. 2025. 基于压缩感知的地震数据同时规则化和插值方法. 地球物理学进展, 40(1): 276-284,doi: 10.6038/pg2025HH0428.

黄昱丞, 吴曲波, 孔丽云, 等. 2025. 基于压缩感知的砂岩型铀矿地震勘探优化随机欠采样与数据重建. 世界核地质科学, 42(2): 317-328.

吕公河, 邸志欣, 霍守东, 等. 2018. 基于压缩感知的地震数据采集实践. 石油物探, 57(6): 831-841.

门哲, 宁宏晓, 李伟波, 等. 2019. 基于压缩感知的随机采样与稀疏性约束采样重构效果对比. //中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 中国石油学会2019年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油东方地球物理公司, 1148-1151.

倪宇东, 姜福豪, 邹雪峰, 等. 2024. 多采样率地震勘探技术(MrSET)探讨. 地球物理学报, 67(3): 1169-1180, doi: 10.6038/cjg2023Q0896.

舒国旭, 吕公河, 吕尧, 等. 2018. 基于压缩感知的地震数据重建. 石油物探, 57(4): 549-554.

唐刚, 杨慧珠. 2010. 基于泊松碟采样的地震数据压缩重建. 地球物理学报, 53(9): 2181-2188, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.018.

王汉闯, 陶春辉, 陈生昌, 等. 2016. 基于稀疏约束的地震数据高效采集方法理论研究. 地球物理学报, 59(11): 4246-4265, doi: 10.6038/cjg20161126.

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. 地震研究, 48(1): 71-79.