

基于压缩感知的 Dreamlet 域数据重构方法及应用

王新全*^① 耿瑜^② Ru-Shan Wu^② 宋鹏鹏^①

(^①中国石油集团东方地球物理公司吐哈物探处,新疆哈密 839009; ^②美国加州大学圣塔克鲁兹分校, Santa Cruz U. S CA95060)

王新全,耿瑜, Ru-Shan Wu, 宋鹏鹏. 基于压缩感知的 Dreamlet 域数据重构方法及应用. 石油地球物理勘探, 2015, 50(3): 399-404.

摘要 随着压缩感知(CS)理论的完善,逐步发展形成了基于该理论的新的信号处理技术。近年来,在石油地震勘探领域,基于该理论的随机稀疏数据采样、数据重构及规则化和稀疏采样观测系统优化设计等方面的研究取得了重要进展。本文在 Ru-Shan Wu 博士等提出的 Dreamlet 域数据重构技术基础上,针对实际地震数据在时间和空间上剧烈变化以及存在较强干扰背景情况,通过优化重构参数和流程,对随机稀疏采样的模拟和真实地震数据进行了重构和对比分析。模拟和实际数据应用显示,该技术是一种高效和高质量的地震数据重构方法。

关键词 压缩感知 数据重构 Dreamlet 域 随机采样 稀疏数据

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.03.002

1 引言

压缩感知简称 CS(Compressive Sensing)^[1],是对采样率不足信号或可压缩信号进行数据重构的理论基础,压缩感知与信号的稀疏重构已成信号处理领域中一个新的研究方向。Candes 等^[2]提出了基于压缩感知理论的信号恢复技术,随着该理论不断完善,其在石油地震勘探领域的应用也引起人们的密切关注。近年来,国外石油公司和科研院所稀疏数据采样、地震数据重构、数据规则化和稀疏采样观测系统优化设计等方面的研究取得了积极进展, Herrmann^[3]提出了基于 Curvelet 变换的稀疏数据重构方法, Wu 等^[4,5]提出了 Dreamlet 域地震成像和数据重构方法, Herrmann 等^[6]又提出了基于 Curvelet 变换的地震数据处理方法,上述方法都是基于压缩感知理论实现的。Li 等^[7]和 Mosher 等^[8]提出了插值压缩感知数据重构方法(ICS)和非均匀采样观测系统优化设计方法(NUOS),并在海上和陆上开展了工业化试验,取得了较好的效果。

在国内,随着石油勘探的不断深入,地震勘探面临着以下问题:①数据规则化问题,随着勘探向地表复杂区延伸,许多地区地震作业难以进行,如大量的炮检点缺失或不能正点布设,造成地震数据缺失或不规则,影响地震成像质量;②随着勘探向精细化方向发展,方法与投入矛盾日益突出,制约着勘探的进一步深入;③在地表条件复杂地区,作业进入的安全风险和隐患进一步加大。针对上述问题,本文在 Ru-Shan Wu 等提出的 Dreamlet 域数据重构方法基础上,针对实际地震数据在时间和空间上剧烈变化以及存在较强背景干扰情况下,通过优化重构参数和流程,对随机稀疏采样的模拟地震数据和真实地震数据进行了重构,并分析了其应用效果。

2 方法原理

2.1 压缩感知原理

设 y 为野外观测到的稀疏采样信号,长度为 M , r 为需要重构的充分采样信号,长度为 $N(M < N)$, c 是高斯白噪声,通过大小为 $M \times N$ 的感知矩阵 A , y 与 r 的关系可由下式表示

* 新疆哈密市石油基地吐哈物探处, 839009。Email: wangxinquan@cnpc.com.cn

本文于 2014 年 5 月 16 日收到,最终修改稿于 2015 年 3 月 30 日收到。

$$y = Ar + c \quad (1)$$

由于式(1)方程组的未知数个数 N 大于方程个数 M , 无法直接求解, 因此不能直接恢复需要重构的充分采样信号。假设在某一转换域 D 中, r 可通过系数 s 表示, 记为 $r = Ds$, 若满足 $D^* \cdot D = I$, 则变换 $r = Ds$ 中 s 是稀疏的, 可将式(1)写为

$$y = Bs + c \quad (2)$$

其中 $B = AD$, B 是行数为 M 、列数为系数个数的矩阵。根据压缩感知理论, 通过求解 l_1 范数规则化问题获得系数 s , 优化问题模型如式(3)所示

$$\min \|s\|_1 \text{ 满足 } \|Bs - y\|_2 < \epsilon \quad (3)$$

这样, 稀疏的原始数据 y 通过重构关系 $y = Bs + c$ 和优化模型可获得重构系数 s , 对 s 进行反变换, 则可求解 r 。

2.2 Dreamlet 域地震数据描述

2.2.1 Dreamlet 定义

重构地震数据时, 必须找到一个转换域 D , 它能稀疏地表示地震数据。Wu 等^[9] 提出了 Dreamlet 概念, Dreamlet 定义为在观测平面上时间—频率原子 Drumbeat 和空间—波数原子 Beamlet 的张量积, 这里 Drumbeat 原子和 Beamlet 原子都由 Gabor 标架构成, 即

$$d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}(x, t) = g_{i\bar{\omega}}(t) b_{x\bar{\xi}}(x) \quad (4)$$

其中: $g_{i\bar{\omega}}(t) = W(t - \bar{t})e^{-i\bar{\omega}t}$ 为 Drumbeat 原子, $W(t)$ 是高斯窗函数, \bar{t} 是高斯窗的中心时间; $b_{x\bar{\xi}}(x) = B(x - \bar{x})e^{i\bar{\xi}x}$ 为 Beamlet 原子, $B(x)$ 是高斯窗函数, \bar{x} 是高斯窗的中心位置。

这里 $\bar{t}, \bar{\omega}, \bar{x}, \bar{\xi}$ 分别是局部时间、频率、空间和波数, 式(4)可写成

$$d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}(x, t) = W(t - \bar{t})B(x - \bar{x})e^{-i(\bar{\omega}t - \bar{\xi}x)} \quad (5)$$

因此, 在一个观测平面上, $d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}(x, t)$ 是一个物理子波, 满足波动理论, 观测平面可以是地表, 也可以是地表向下延拓到某一深度的平面。

2.2.2 Dreamlet 域波场分解与重构

根据 Dreamlet 的定义, 一个地震波场 $u(t, x)$ 可由相位空间原子(Dreamlet 原子)的叠加来表示, 即

$$u(x, t) = \sum_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}} \langle u(x, t), d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}^{\%}(x, t) \rangle d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}(x, t) \quad (6)$$

其中: $d_{i\bar{\omega}x\bar{\xi}}^{\%}(x, t)$ 是 Dreamlet 原子的对偶原子。这样, 一个在时间—空间域的地震波场被分解成由局部时间—频率—空间—波数表示的波场。按照这种

方法, 时空原子结构能够有效地描述地震数据, 且在 Dreamlet 域可以产生高稀疏化的数据。

2.2.3 实现方法

(1)对地震数据分别在时间方向和空间方向上开多个连续的高斯窗, 对每个加了高斯窗的数据进行傅里叶变换, 构建 Dreamlet 变换系数矩阵 D ;

(2)利用稀疏的地震数据, 构建一个稀疏矩阵 A , 其列数为整个数据的大小(时间样点 \times 空间样点), 行数是稀疏采样后的数据大小(时间样点 \times 稀疏采样的空间样点);

(3)根据式(3)所示的压缩感知优化模型, 通过多次迭代求出重构系数 s ;

(4)由 Dreamlet 反变换求出要重构的数据 r , 即 $r = D^{-1}s$, 实现方法如图 1 所示。

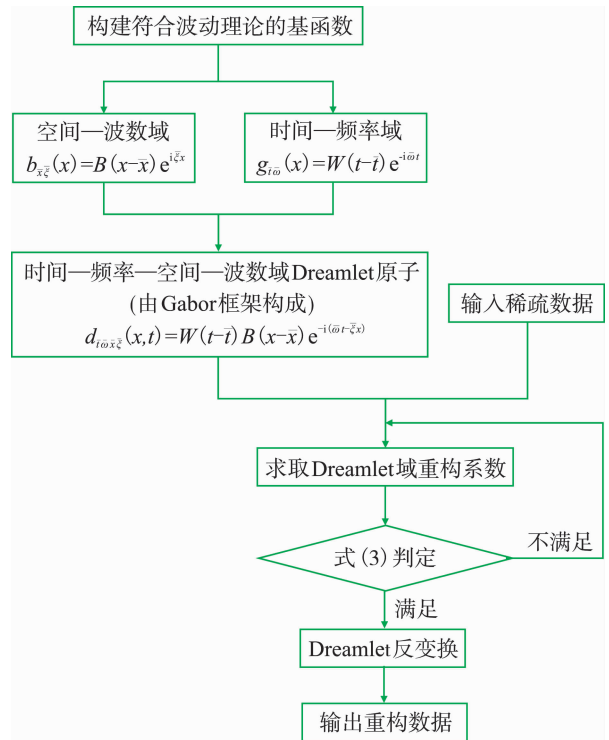


图 1 Dreamlet 方法数据重构流程图

3 应用效果

3.1 地震数值模拟效果

根据中国西部某山地实际地质条件建立地质模型, 正演得到如图 2a 所示的模拟地震记录。从图 2a 所示的模拟记录上看, 由于地质条件复杂, 地震同相轴存在严重的扭曲现象, 并且散射噪声发

育;图 2b 是对图 2a 所示数据随机抽掉 50% 接收道后的炮集记录,图 2c 和图 2d 分别是应用 Dreamlet 和 Curvelet 变换方法对图 2b 所示的数据进行重构的炮集记录。根据 Wu 等^[5]提出的重构质量判定标准,在相同的实验参数条件下,图 2b 所示的随机抽样后数据信噪比为 6.0409,图 2c 所示的 Dreamlet 方法重构数据信噪比为 13.8244,是 Curvelet 方法重构数据信噪比(6.7832)的两倍多。从图中可以看出,这两种方法均能较好地丢失的数据重构出来并保持现有数据的正确性,包括有效信号和散射噪声。相比之下, Curvelet 方法重构的记录在

同相轴扭曲较大的部位严重失真,并且重构时引入的噪声更为严重。图 3 是原始模拟数据和 Dreamlet 与 Curvelet 方法重构前后数据的频谱绝对值图。从图 3b 可以看出,随机抽稀后数据的频谱存在较严重的随机噪声,应用 Dreamlet 和 Curvelet 方法数据重构后,随机噪声得到很好的压制(如图 3c 和图 3d 所示)。相比之下,前者对随机噪声的压制效果更好,对比原始数据的频谱图(图 3a),图 3c 结果更逼近图 3a,同时,也可以准确地重构出规则噪声,表明 Dreamlet 方法对丢失数据重构的精度更高,包括信号和噪声。

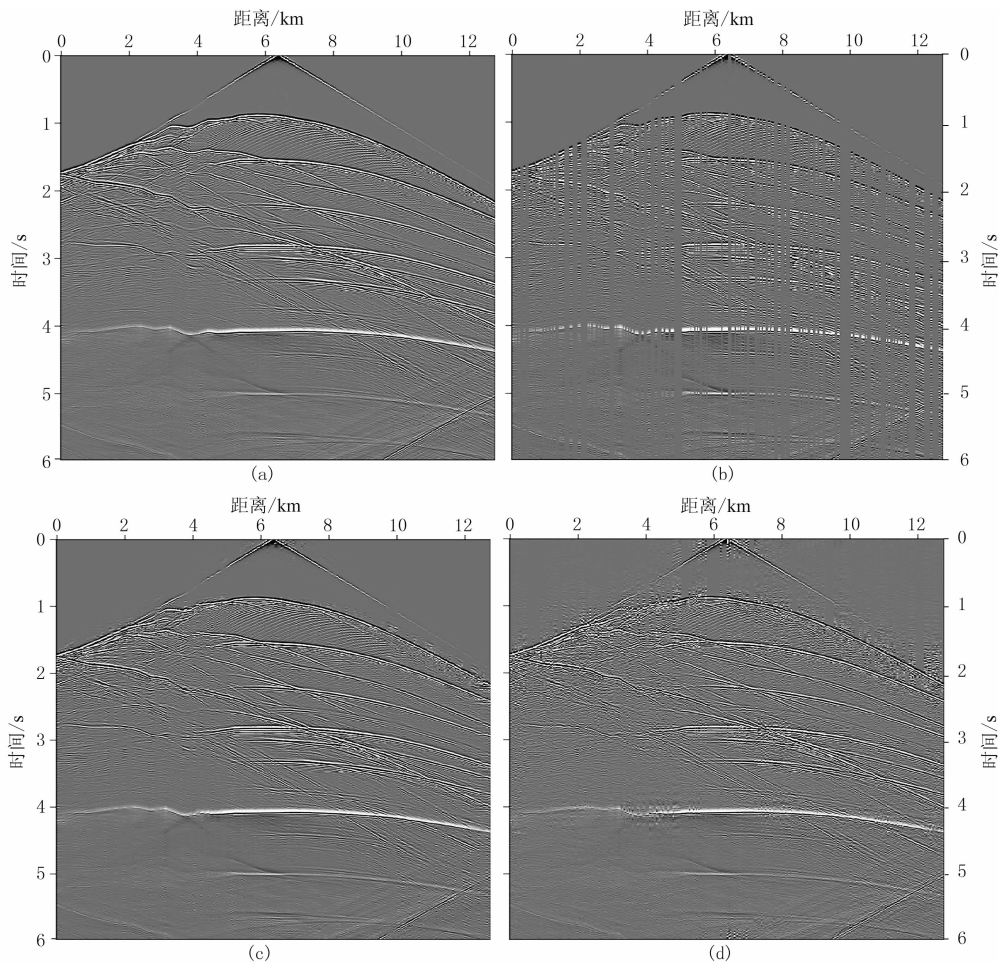


图 2 在数值模拟炮集记录上 Dreamlet 与 Curvelet 变换重构效果对比

(a) 模拟炮集记录; (b) 随机抽掉 50% 接收道后记录; (c) 应用 Dreamlet 方法重构后记录; (d) 应用 Curvelet 方法重构后记录

3.2 重构效率分析

在模拟数据重构过程中,笔者统计分析了相同实验参数条件下 Dreamlet 和 Curvelet 方法的重构效率,前者使用时间为 4837.9s,后者使用时间为 22890.5s,后者是前者的 4.7 倍。图 4 为 Dreamlet 和 Curvelet 方法的重构效率统计曲线。从图中可

见, Dreamlet 变换方法重构效率远高于 Curvelet 变换方法,前者重构残差收敛快,只需迭代 200 次,而后者则需要迭代 1500 次,如图 4a 所示; Dreamlet 方法完成重构系数所需的迭代次数也少,图 4b 显示,在迭代 800 次后,重构系数变化趋于稳定,而 Curvelet 方法则需要迭代 4500 次。

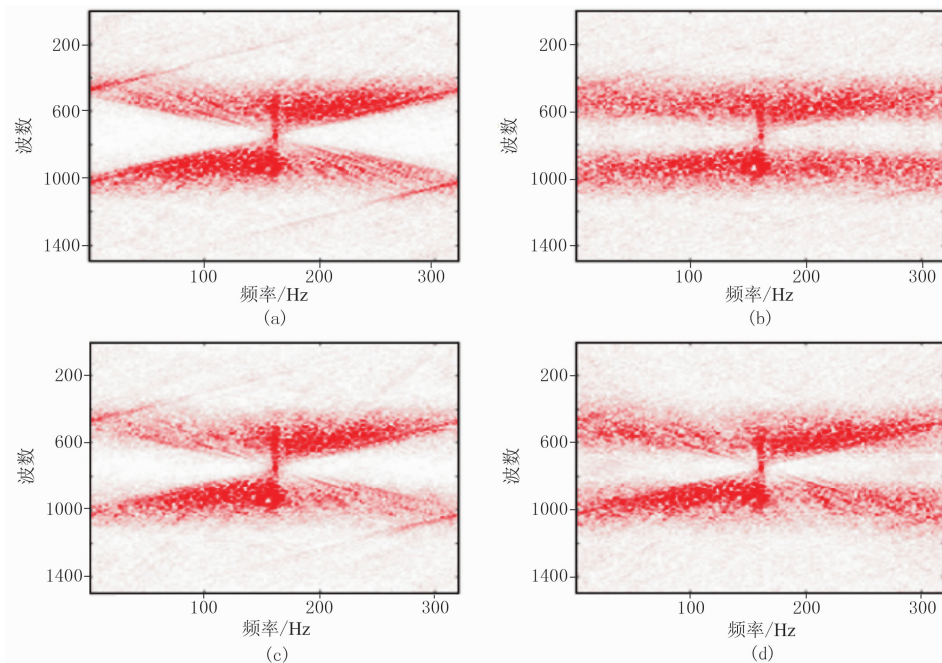


图3 不同数据频谱的绝对值图

(a)原始数据; (b)随机采样后的数据; (c)Dreamlet 变换重构后的数据; (d)Curvelet 变换重构后的数据

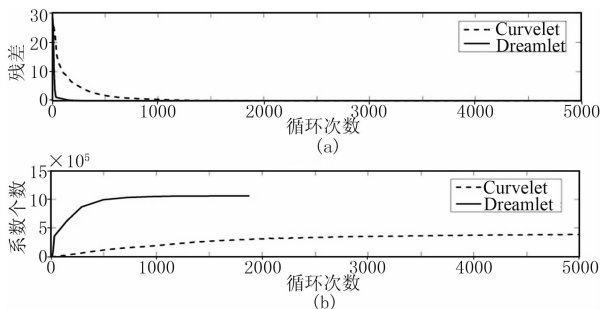


图4 Dreamlet 和 Curvelet 方法的重构效率统计曲线

(a)重构残差随循环次数变化曲线; (b)重构系数个数随循环次数变化曲线

3.3 实际地震数据应用效果

笔者利用中国西部某盆地 PTG 地区的二维地震数据,对原始炮集数据随机抽掉 50%接收道后,生成随机采样稀疏数据,在此数据上分析 Dreamlet 方法的重构效果。该数据的野外采集参数为:炸药震源激发、道距为 50m、炮距为 100m、75 次覆盖。图 5 为实际地震炮集数据重构效果对比。该原始数据的信噪比较低,时间和空间方向上能量变化大,面波和浅层折射等干扰波发育,如图 5a 所示。在数据重构前,首先对强能量噪声进行衰减,并在时间域上对原始数据进行能量补偿,并记下补偿系数,重构完成后根据补偿系数对重构后数据进行还原,以确保实现保幅重构。从图 5b 所示的重构炮集记录看,

由于实际数据在时间域能量差异大,被重构的数据与原始数据在振幅值上存在一定差异,但它是系统差异,不会影响重构数据的质量和成像效果。另外,由于炮点附近的噪声能量强,重构时引进了新的重构噪声,从而影响了浅层信噪比,而中深层有效信号和规则干扰均得到准确重构;图 5c 和图 5d 分别是被抽掉的原始接收道和被重构的接收道,二者位置完全相同,被重构的数据除炮点附近有一定的噪声外,其他位置与被抽掉的原始数据基本相当。

图 6 为实际二维地震数据重构剖面效果对比。从图 6a 所示的原始数据叠加剖面看,浅层能量较弱,信噪比较低,而中、深层能量和信噪比较高;图 6b 是随机抽掉 50%接收道后的稀疏数据叠加剖面,该剖面浅、中、深层资料信噪比明显低于原始剖面;图 6c 是经过重构后的全部数据叠加剖面,除浅层信噪比较原始叠加剖面有所降低外,其余部分与原始剖面相当(图 6a),但整体上高于重构前的稀疏数据叠加剖面(图 6b);图 6d 和图 6e 分别是被抽掉数据和对应的被重构数据叠加剖面,其接收道位置和数量完全相同,覆盖次数只是原始剖面的一半,整体上剖面信噪比明显低于原始剖面,特别是浅层,由于在数据重构过程中近炮点数据引进了重构噪声,致使图 6e 所示的重构数据剖面浅层信噪比有所降低,但中、深层信噪比与图 6d 所示的被抽掉数据的

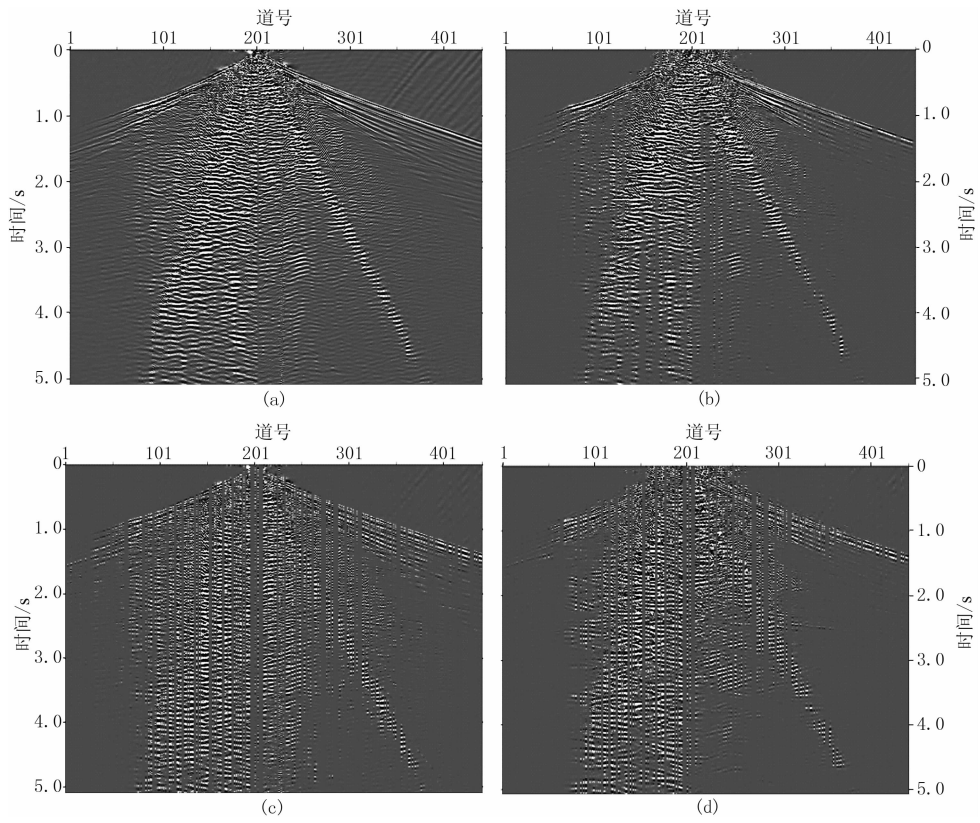


图 5 实际地震炮集数据重构效果对比

(a)原始炮集数据; (b)重构的全部数据; (c)被抽掉的接收道数据; (d)被重构的接收道数据

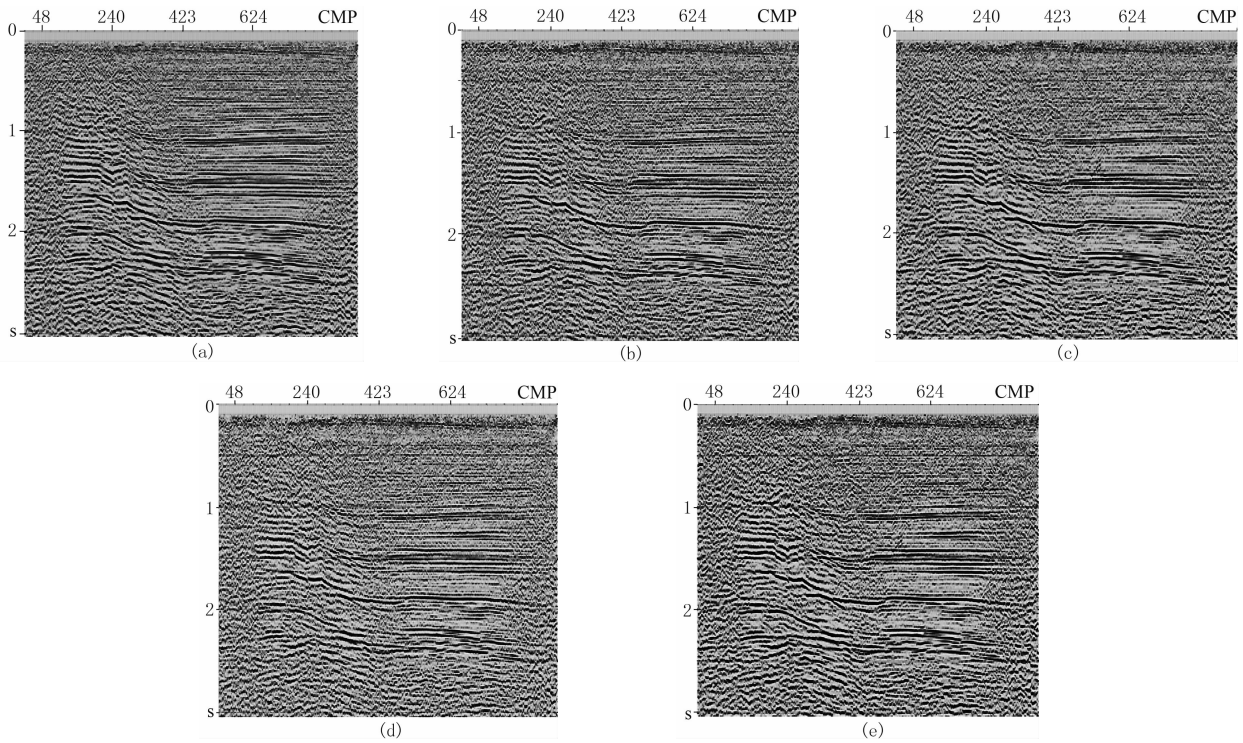


图 6 实际二维地震数据重构剖面效果对比

(a)原始数据叠加剖面(75次覆盖); (b)随机抽掉 50%接收道后的稀疏数据叠加剖面(37次覆盖); (c)对图(b)数据重构后的叠加剖面(75次覆盖); (d)被抽掉数据的叠加剖面(37次覆盖); (e)被重构数据的叠加剖面(37次覆盖)。(d)和(e)的接收道位置和数量完全相同

叠加剖面相当。

4 结论与应用展望

通过上述模拟和实际地震数据应用分析,可以得到如下认识。

(1)文中方法在数据重构过程中遵循波动理论,符合波的传播规律,因此数据重构精度更高。

(2)在重构过程中,方法本身并不引进噪声,但对时间和空间上能量变化大的原始数据,受迭代次数和效率限制,对弱信号的重构不彻底,重构中可能会带来不同程度的噪声,因此,重构前应对原始数据适当地进行能量均衡,降低强弱信号的能量差异。

(3)对背景干扰较强的稀疏数据,重构前应对强能量干扰进行适当衰减,降低对弱信号的重构影响,以提高数据重构精度和效率。

该方法在稀疏数据域可以较准确地重构缺失数据,随着石油勘探的不断深入,在以下几个领域将有广阔的应用前景。

(1)大面积障碍物区对缺失炮检点的数据重构。在这些地区的炮检点布设中,由于障碍物的影响,大量的炮检点缺失或不能正点布设,造成资料的不完整和地震数据的不规则,应用该技术,可以将缺失的炮检点数据进行重构或将不规则的数据规则化。

(2)非均匀观测系统优化设计。通过野外设计稀疏的不规则观测网格代替传统的规则网格,应用该技术,在室内重构出规则、充分采样数据,对解决当前所面临的高密度技术应用与成本之间的矛盾、增加信号频宽和降低勘探成本提供了一条新的技术思路。例如,在塔里木大沙漠区,由于沙丘的剧烈起伏,制约了可控震源高效采集技术的应用,也制约了高密度三维勘探技术的推广,针对塔里木大沙漠区的地表特点,设计不规则的观测系统,把炮点布设在可控震源可通行的沙漠低洼处和沙丘起伏较小的沙丘上,实现可控震源高效采集,应用该技术在室内对不规则数据重构成规则数据,实现可控震源高效采集技术和高密度三维勘探技术在大沙漠区的应用。

(3)数据规则化处理。对不同观测网格的多个数据体进行连片处理时,通过该技术重构数据,形成一个规则网格数据体。

本文是作者在美国加州大学圣塔克鲁兹分校模拟与成像实验室做访问学者期间由谢小碧博士指导完成的。在该论文的形成过程中,得到了闫蕊、罗静蕊、Amy Kornberg女士以及东方地球物理公司李培明先生和同济大学杨锴先生的帮助,在此一并感谢!

参考文献

- [1] Donoho D L. Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Candes E J, Romberg J K et al. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(8): 1207-1223.
- [3] Herrmann F J. Randomized sampling and sparsity: Getting more information from fewer samples. Geophysics, 2010, 75(6): WB173-WB187.
- [4] Ru-Shan Wu, Wu Bangyu, Geng Yu. Imaging in compressed domain using dreamlets. CPS/SEG Beijing International Geophysical Conference & Exposition Expanded Abstracts, 2009, ID57.
- [5] Ru-Shan Wu, Geng Yu, Ye Lingling. Preliminary study on Dreamlet based compressive sensing data recovery. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 32: 3585-3589.
- [6] Herrmann F J, Wang D L et al. Curvelet-based seismic data processing: A multiscale and nonlinear approach. Geophysics, 2008, 73(1): A1-A5.
- [7] Li Chengbo, Mosher C C, Kaplan S T. Interpolated compressive sensing for seismic data reconstruction. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012, 31: 1-6.
- [8] Mosher C C, Kaplan S T, Janiszewski F D. Non-uniform optimal sampling for seismic survey design. EA-GE Copenhagen Meeting Expanded Abstracts, 2012, X034.
- [9] Ru-Shan Wu, Geng Yu, Wu Bangyu. Physical wavelet defined on an observation plane and the Dreamlet. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30: 3835-3839.

(本文编辑:刘英)

作者简介



王新全 高级工程师,1970年生;1993年毕业于西南石油学院勘察地球物理专业,获学士学位;2009年获中国石油大学(华东)地质工程硕士学位;现任中国石油集团东方地球物理公司吐哈物探处总工程师,从事地震数据采集方法研究和技术管理工作。