

陆艳洪, 陆文凯, 翟正军. 一种边缘保持的地震数据插值方法. 地球物理学报, 2012, 55(3): 991-997, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 029.

Lu Y H, Lu W K, Zhai Z J. An edge-preserving seismic data interpolation method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 991-997, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 029.

一种边缘保持的地震数据插值方法

陆艳洪¹, 陆文凯^{2*}, 翟正军¹

1 西北工业大学计算机学院, 西安 710072

2 清华大学自动化系智能技术与系统国家重点实验室 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

摘 要 在地震数据处理中, 地震数据插值方法常常用来解决地震数据空间采样率低和不规则的问题. 本文提出了一种基于边缘保持滤波器的地震数据插值方法. 在该方法中, 对于一个 1D 信号, 逐点滑动一个处理窗口, 将信号分成多个信号片段. 对于某一个待恢复的缺失采样点, 存在多个包含(或邻近)该采样点的信号片段可以用来估计它. 采用多项式来拟合这些信号片段, 并选择拟合误差最小的信号片段估计此缺失采样点, 达到边缘保持的目的. 对于 2D 地震信号, 先沿不同方向扫描抽取 1D 信号, 然后采用上述 1D 边缘保持插值算法分别进行处理, 得到沿不同方向的插值结果. 对于任一待插值采样点, 选取对应拟合误差最小的方向的插值结果作为最后输出的 2D 数据的插值结果. 理论模型和实际资料的处理结果表明, 所提方法具有保边缘、抗假频及能够进行不规则数据重建等特点, 既能有效的实现不规则地震数据的重建, 又能很好的保持原有数据的边缘特征.

关键词 插值, 不规则地震数据, 边缘保持, 最小拟合误差, 抗假频

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 029

中图分类号 P631

收稿日期 2010-09-17, 2012-01-17 收修定稿

An edge-preserving seismic data interpolation method

LU Yan-Hong¹, LU Wen-Kai^{2*}, ZHAI Zheng-Jun¹

1 Northwest Polytechnical University, Computer Institute, Xi'an 710072, China

2 State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In seismic processing, the problems of low or irregular space sampling are solved by seismic interpolation techniques. In this paper, we propose an edge-preserving seismic interpolation method. For a 1D signal, many signal segments are extracted by a processing window sliding along the signal sequence. For one missing data sample, there are a lot of signal segments, including or closing to it, which can be used to recover it. These signal segments are approximated by polynomials, in order to preserve the edges, the one with the minimum fitting error is used to estimate the missing data sample. For 2D seismic data, a lot of 1D signals are extracted along a specified direction firstly, and then an interpolation result is obtained by applying above 1D edge-preserving interpolation method on all these 1D signals. For one possible direction, one interpolation result is achieved. For one missing data sample in this 2D data,

基金项目 国家高技术研究发展计划(863)(2006AA09A102-10)和国家科技重大专项课题(2011ZX05023-005-007, 2011ZX05004-003)资助.

作者简介 陆艳洪, 女, 1972 年生, 西北工业大学讲师, 现主要从事信号处理方面的研究. E-mail: yanhonglu@nwpu.edu.cn

*** 通讯作者** 陆文凯, 男, 1969 年生, 清华大学自动化系研究员, 主要从事地震信号处理研究. E-mail: lwkmf@mail.tsinghua.edu.cn

among the above interpolation results, the one with the minimum fitting error is selected as the final output. Applications with synthetic and real data sets show that the proposed method is edge-preserving, anti-aliasing, and can be used to reconstruct irregular seismic data effectively.

Keywords Interpolation, Irregular seismic data, Edge-preserving, Minimum fitting error, Anti-aliasing

1 引言

在地震勘探过程中,由于工作量的限制及施工条件的影响,使得地震数据沿空间方向不规则或出现稀疏采样现象,造成地震数据的道缺失、坏道或空间假频。地震数据的插值重建已成为地震勘探资料处理中最重要的问题之一。

目前,人们已提出多种地震数据的重建方法,如:基于非均匀 Fourier 变换的数据重建方法^[1-3],是基于数学变换理论实现对不规则带限地震数据的规则化重建,不抗假频,不适合处理含有空间假频的地震数据;基于预测滤波的插值重建法^[4-6],是根据地震道的低频信息提取高频数据的插值算子,能消除空间假频现象,但只能处理均匀采样的地震数据,不能用于不规则采样的地震数据的重建;基于多步自回归预测滤波的不规则地震数据抗假频重建方法^[7-8],在实现不规则地震数据重建的同时,还能抗假频;还有基于数据变换的地震数据重建,如:Fourier 变换^[9-16],Radon 变换^[17-18],曲波变换^[19],SVD 分解法^[20]等。

上述的地震数据重建方法主要考虑存有假频的数据或是不规则的采样数据的重建,对存有断层的地震数据在重建时如何保持其边缘特性考虑得较少。本文将边缘保持滤波方法^[21]进行推广,提出一种边缘保持的插值重建方法。文章首先给出了地震数据边缘保持插值方法的理论;其次,通过对理论模型和实际资料的处理结果进行分析比较,说明该方法的优点;最后,给出了相关结论。

2 基本原理

2.1 一维信号的边缘保持插值

假定 $y(i), i = 1, \dots, N$ 为待插值的一维信号,对应的空间坐标为 $x(i), i = 1, \dots, N$ 。对于某一个待恢复的缺失采样点,存在多个包含(或邻近)它的信号片段用以估计。在本文提出的边缘保持插值算法中,首先采用多项式来拟合这些信号片段,然后选

取拟合误差最小的信号片段来估计此缺失采样点,达到边缘保持的目的。设处理窗口长度为 L ,即每个信号片段包含 L 个已知信号采样点。对某待插值的采样点,其空间坐标为 z ,设其后边最近的已知采样点为第 I 个,共有 $L-1$ 个信号片段包含采样点,并且,其前、后各有一个邻近的信号片段。在这 $L+1$ 个信号片段中,第 l 个信号片段所包含的信号数据为

$$[y(I-L+l-1), \dots, y(I+l-2)] \quad l = 1, \dots, L+1. \quad (1)$$

对于第 l 个信号片段,通过 m 阶多项式来实现该信号片段的数据拟合,公式如下:

$$[y(I-L+l+j-2)] = p(j, l, I) + e(j, l, I) \quad j = 1, \dots, L, \quad (2)$$

其中, $p(j, l, I)$ 为 m 阶多项式($m < L$), $e(j, l, I)$ 为拟合误差信号。 $p(j, l, I)$ 定义如下:

$$p(j, l, I) = \sum_{k=0}^m a_k(l, I) (x(I-L+l+j-2))^k, \quad j = 1, \dots, L, \quad (3)$$

式中, $a_k(l, I), k = 0, \dots, m$ 为 m 阶多项式系数。

公式(3)可以写为如下的向量矩阵形式:

$$p_{l,I} = C a_{l,I}, \quad (4)$$

式中,

$$p_{l,I} = [p(l, j, I); j = 1, \dots, L]^T, \\ a_{l,I} = [a_0(l, I), a_1(l, I), \dots, a_m(l, I)]^T, \\ C = \begin{bmatrix} 1 & x(I-L+l-1) & \dots & (x(I-L+l-1))^m \\ 1 & x(I-L+l) & \dots & (x(I-L+l))^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x(I+l-2) & \dots & (x(I+l-2))^m \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为了求得多项式系数,需要优化如下目标函数,即最小化拟合误差:

$$E_{l,I} = \| p_{l,I} - y_{l,I} \|_2^2, \quad (6)$$

式中, $y_{l,I} = [y(I-L+j+l-2); j = 1, \dots, L]^T$ 。

采用最小二乘法,得到多项式系数如下:

$$a_{l,I} = (C^T C)^{-1} C^T y_{l,I}. \quad (7)$$

根据式(7)获得的多项式系数,即可以得到对应第 l 个信号片段的拟合误差 $E_{l,I}$ 。对所有的 $L+1$ 个信号片段,可以获得 $L+1$ 个拟合误差,其中对应最

小拟合误差的信号片段被用来估计空间坐标为 z 的待插值采样点,估计值如下:

$$v_z = \sum_{k=0}^m a_k(l, I)(z)^k, \quad j = 1, \dots, L, \quad (8)$$

重复上述处理过程,直到估计出所有待插值的缺失采样点。

2.2 二维信号的边缘保持插值

对于一个 N 道,每道包含 M 个采样点的 2D 地震数据 $u(i, j)$, ($i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N$), 其每道对应的空间坐标为 $x(i)$, $i = 1, \dots, N$. 对于空间坐标为 z 的缺失地震道上的第 I 个采样点,记为待插值点 d ,按照 $n = I + (x(i) - z)/v$ (v 为地震波的传播速度)线性抽取包含该点的 1D 信号,抽取的 1D 信号可表示为

$$y(i, v) = u([n], i), \quad (i = 1, \dots, N), \quad (9)$$

式中, $[n]$ 为 n 取整后的值。

通过式(9)获得 1D 信号后,再通过上一节给出的一维信号的边缘保持插值方法对其进行处理,记待插值点 d 的 1D 插值结果为 $s(d, v)$,其对应的拟合误差为 $E(d, v)$. 通常,地震波的传播速度总是在一定范围之内,记传播速度的范围为 V . 以一定的速度步长,扫描速度范围 V . 对某一速度(即某一倾角方向),抽取对应的 1D 信号,并利用一维信号边缘保持插值方法进行插值. 完成所有倾角方向处理后,按照如下规则得到待插值点 d 的插值结果:

$$\hat{s}(d) = s(d, v_A), \quad (10)$$

式中的 v_A 通过以下原则选取:

$$v_A = \operatorname{argmin}_{v \in V} \{E(d, v)\}. \quad (11)$$

3 处理实例

为了检验本方法的有效性,将其用来处理了人工合成的 1D 信号、2D 数据和实际地震数据. 在 2D 数据处理实验中,为了说明本文方法具有保边缘、抗假频、不规则数据插值重建的特性,选择了规则空间采样的人工合成地震数据、实际地震数据及不规则空间采样的实际地震数据. 并在规则空间采样数据的插值实验中与 $f-x$ 预测滤波插值方法进行了分析比较。

3.1 1D 人工合成信号插值

图 1 给出了一个人工合成的 1D 信号处理实例来说明基于边缘保持插值方法的优点. 在这个实验中,边缘保持插值方法被用来从不规则数据中重建出原始信号. 原始信号如图 1a 所示;图 1b 为图 1a 所示的信号剔除偶数点及第 51 和第 53 点后形成的不规则信号,用来实验所提出的插值方法;图 1c 为利用边缘保持插值方法处理的结果,该方法中,取多项式的阶数为 1,窗口长度为 4;图 1d 为利用线性插值处理的结果. 根据实验结果来看,本文提出的方法比线性插值方法能更好的保持信号的边缘(断点)特性。

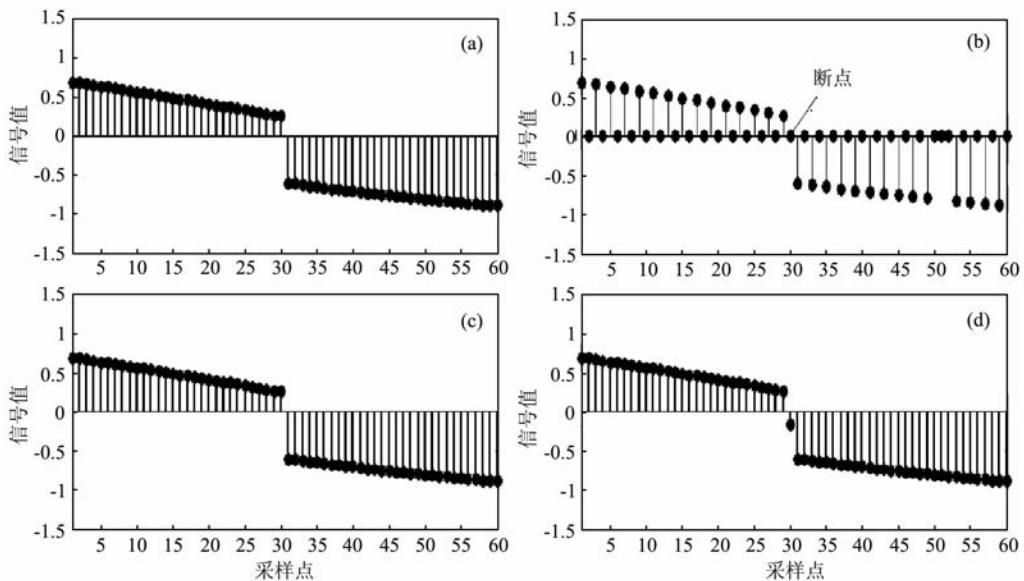


图 1 1D 人工合成数据实验

(a) 人工合成信号; (b) 不规则抽取后信号; (c) 本文方法处理结果; (d) 线性插值处理结果。

Fig. 1 A 1D synthetic signal test

(a) Original signal; (b) Irregular signal extracted; (c) The result obtained by the proposed method;

(d) The result obtained by linear interpolation method.

需要指出的是,虽然本文提出的方法重建信号后能保持信号的边缘特性,但是如果待插值的采样点处于断点(如图 1b 第 30 个采样点)处,由于所提出方法不能判断该点是位于断点的前边还是后边,其插值结果可能会有误.如果这种插值错误存在,则断点的空间位置会发生一个空间采样点的位移,但不会模糊断层.如果断层有一定的宽度,则这个断层由两个边缘组成,在这种情况下,每个边缘的空间位置可能会发生一个空间采样点的位移.

3.2 2D 人工合成数据插值

为验证本文方法对 2D 数据处理的有效性,首

先对人工合成的二维数据进行实验.采用扫描直线在相邻两道的时差定义扫描方向,设扫描直线在左边道的时间采样点为 K ,扫描方向为 Q ,则扫描直线在右边道的时间采样点为 $K+Q$.在实验中,选取了 7 个扫描方向为: $[-3 -2 -1 0 1 2 3]$,其单位是时间采样点,边缘保持处理窗口长度为 5,多项式拟合阶数为 1.

人工合成的 2D 数据如图 2a 所示,共合成 80 道地震记录,道间距为 12.5 m,每道包含 256 个采样点,时间采样间隔为 4 ms.数据包含 2 个同相轴,且存在断层.图 2b 为去掉偶数道后形成的规则降采样

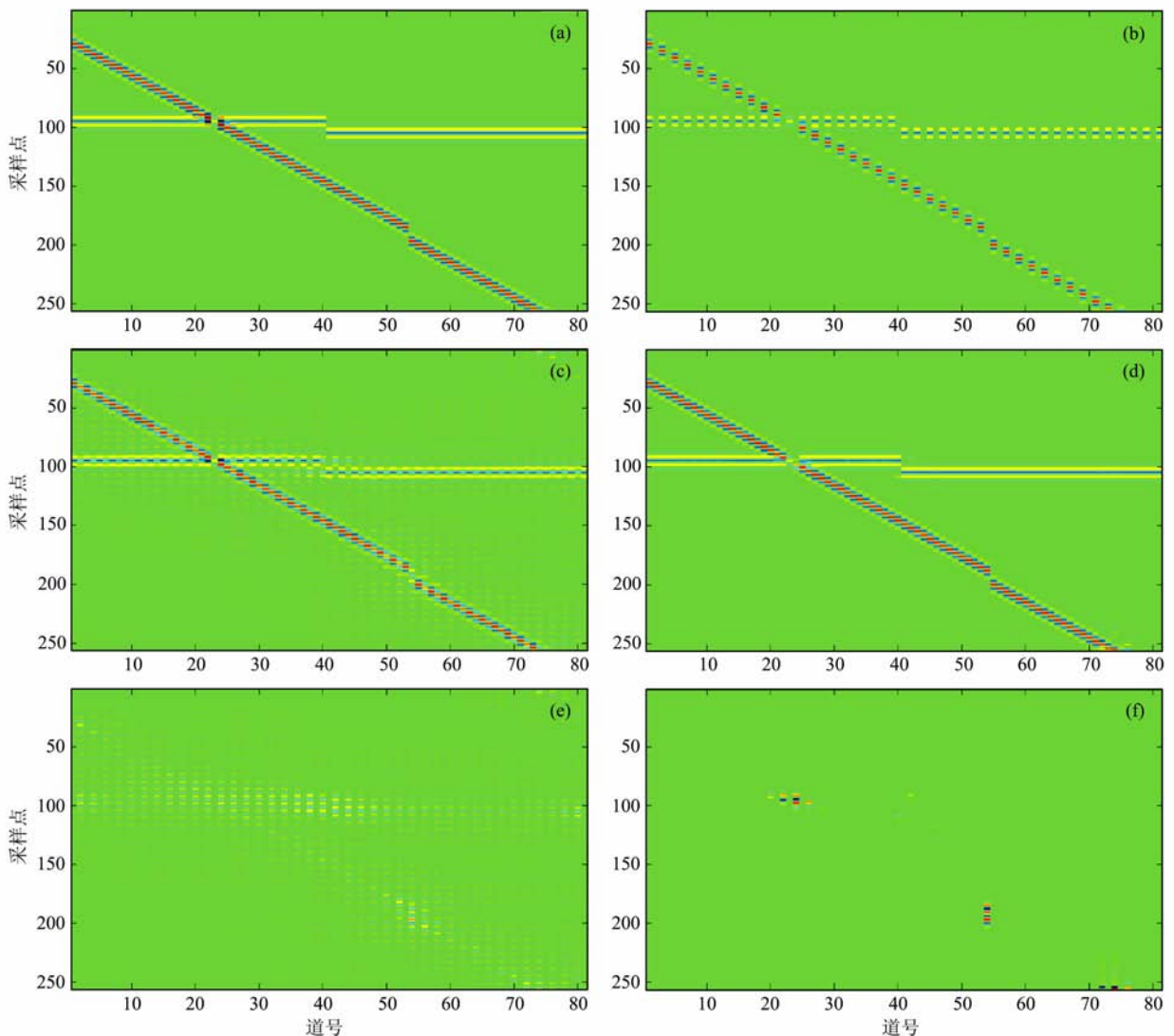


图 2 人工合成 2D 数据实验

(a) 人工合成数据; (b) 规则降采样后数据; (c) $f-x$ 方法插值结果; (d) 本文方法插值结果;

(e) $f-x$ 方法结果与真实数据之差; (f) 本文方法结果与真实数据之差.

Fig. 2 2D synthetic data test

(a) Original data; (b) Regularly down-sampled data; (c) The result obtained by $f-x$ method; (d) The result obtained by the proposed method; (e) The error between the true data and the result obtained by $f-x$ method; (f) The error between the true data and the result obtained by the proposed method.

的地震数据,用来实验所提出的插值方法.图 2c 给出了 $f-x$ 方法插值结果.本文所提方法插值结果显示在图 2d 中. $f-x$ 方法处理结果与真实数据的差如图 2e 所示,而本文所提方法处理结果与原始数据的差如图 2f 所示.

图 3(a—d)分别对应显示了对应图 2(a—d)中数据的 $f-k$ 谱.

对于规则数据的插值恢复,通过本文提出的方法和 $f-x$ 方法处理结果的对比,可以看出:

(1)本文提出的方法首先沿不同方向扫描抽取 1D 信号,采用上述 1D 边缘保持插值算法分别进行处理,得到沿不同方向的插值结果.对于任一待插值采样点,选取对应拟拟合误差最小的方向的插值结果作为最后输出的 2D 数据的插值结果.与 $f-x$ 预测滤波插值方法相比,能更好的保持信号的边缘特性.

(2)比较图 3a、3c、3d,可以发现, $f-x$ 预测滤波插值方法与本文提出的方法都可以有效地消除空间假象,但本文提出的方法所恢复的数据效果更好.

3.3 实际资料数据处理结果分析

在理论分析的基础上,将该方法应用于二维的

实际地震数据插值.用于处理的实际资料信号如图 4a 所示,该信号的地震道数为 95,道间距为 12.5 m,每道的采样点数为 500,时间采样间隔为 2 ms.

图 4b 为图 4a 所示的数据剔除偶数道后形成的规则地震数据,本文所提方法对规则地震数据插值处理后的结果如图 4c 所示, $f-x$ 预测滤波插值方法对规则地震数据插值处理后的结果如图 4d 所示.

图 4e 为图 4a 所示的数据剔除偶数道、第 15 道、第 40~46 道后形成的不规则地震数据.本文所提方法对不规则地震数据插值处理后的结果如图 4f 所示,本文所提方法对不规则地震数据插值与真实数据差如图 4g 所示.

在实验中,我们选取了 14 个扫描方向为 $[-9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4]$,单位是时间采样点,边缘保持处理窗口长度为 5,多项式拟合阶数为 1.

从图 4 中可以看出,本文所提的方法可以实现不规则地震数据的插值,在对规则地震数据的插值重建时,本文所提的方法比 $f-x$ 插值后能更好的保持数据的边缘特性.

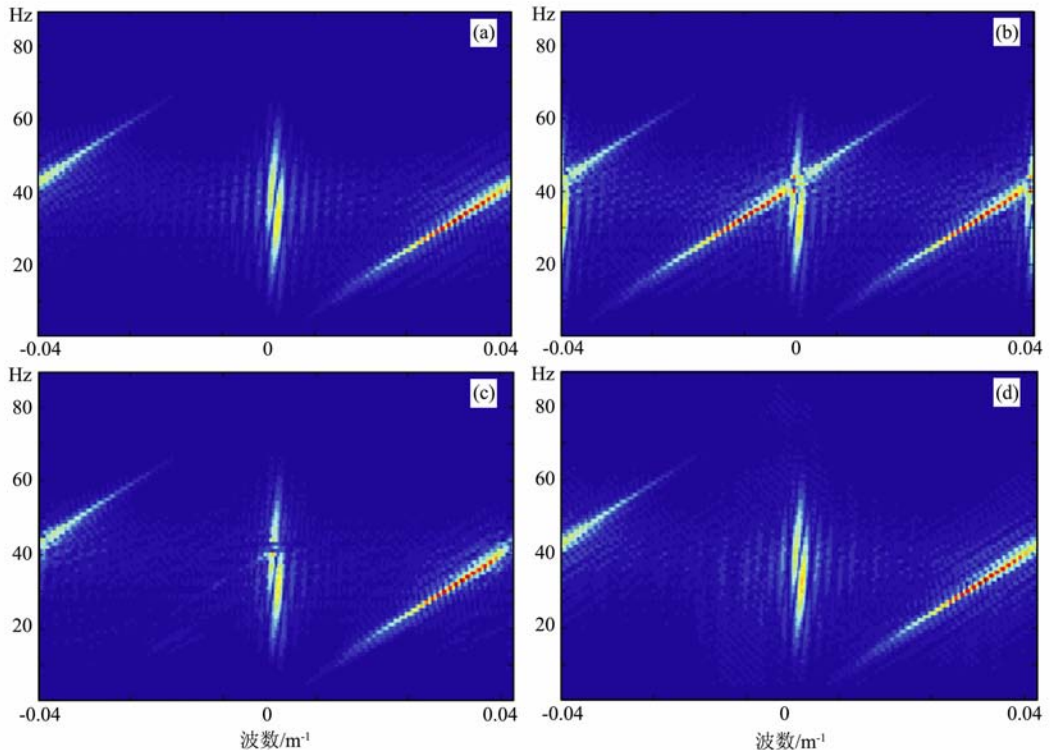


图 3 对应图 2(a—d)中数据的 $f-k$ 谱

(a)人工合成数据;(b)规则降采样后数据;(c) $f-x$ 方法插值结果;(d)本文方法插值结果.

Fig. 3 The $f-k$ spectra of the data shown in Figs. 2(a—d).

(a) Original data; (b) Regular down-sampled data; (c) The result obtained by $f-x$ method;

(d) The result obtained by the proposed method.

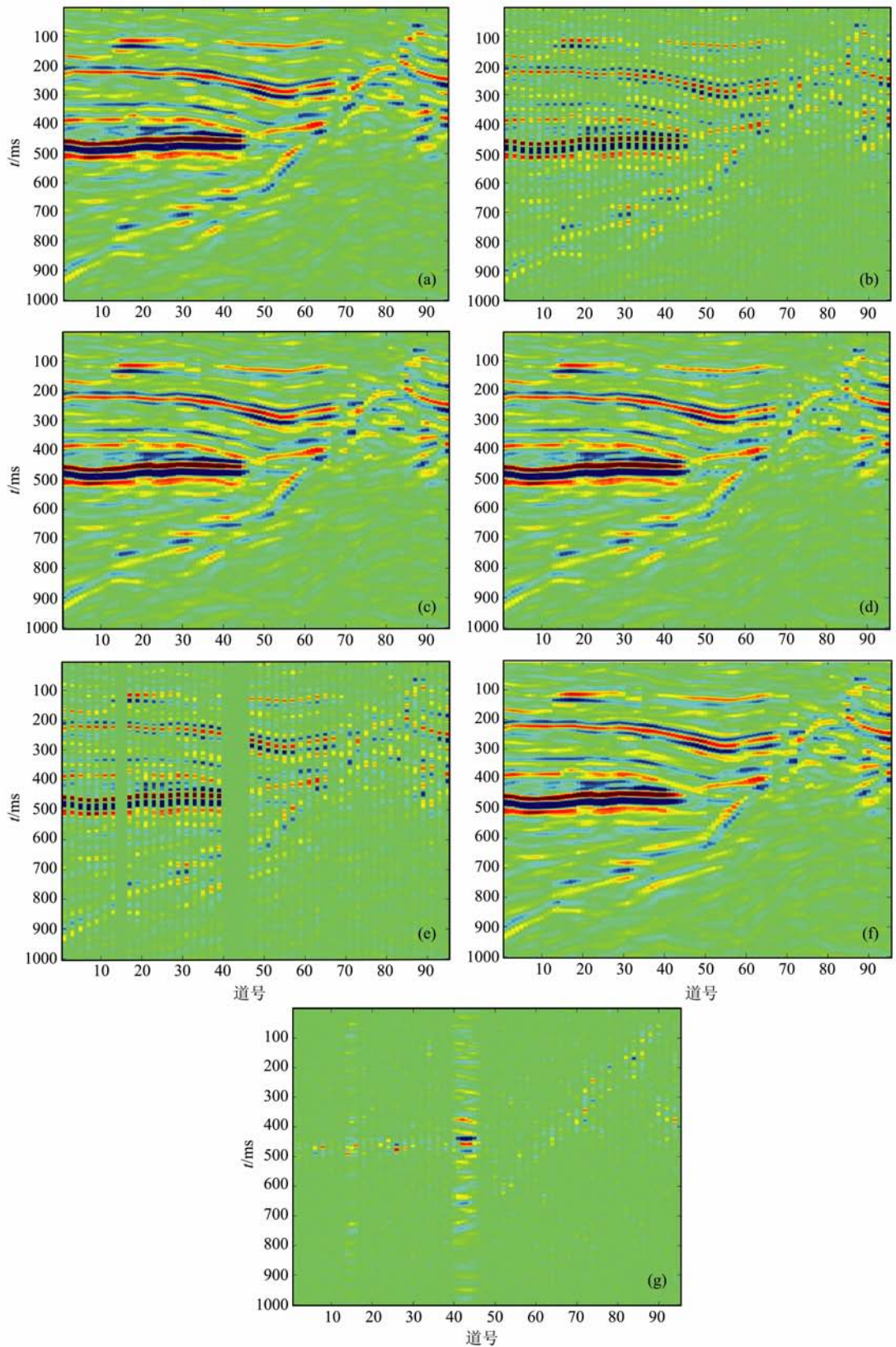


图4 实际资料处理实验

(a) 真实数据; (b) 规则抽取后数据; (c) 本文所提方法处理结果; (d) $f-x$ 规则数据插值结果; (e) 不规则抽取后数据; (f) 本文所提方法不规则数据插值结果; (g) 插值结果与真实数据之差.

Fig. 4 A real-field data test

(a) True data; (b) Regular data extracted; (c) The result of regular data obtained by the proposed method; (d) The result of regular data obtained by $f-x$ method; (e) Irregular data extracted; (f) The result obtained by the proposed method; (g) The error between the true data and the result obtained by the proposed method.

4 结 论

本文提出了一种基于边缘保持的不规则地震数据的插值方法. 对于 1D 信号中的某一个待恢复的采样点, 采用多个包含(或邻近)该点的信号片段, 通过多项式拟合的方法来估计它, 并选择拟合误差最小的信号片段的估计值作为其插值结果, 达到边缘保持的目的. 对于 2D 地震数据, 首先通过不同方向扫描, 抽取 1D 信号进行边缘保持插值处理, 然后选取对应拟合误差最小的方向的插值结果作为最后输出的 2D 数据的插值结果. 相较 $f-x$ 插值方法而言, 所提不仅能实现不规则地震数据的抗假频重建, 尤其对于具有断层的地震数据, 插值重建后的数据依然能很好的保持其边缘特性.

参考文献(References)

- [1] Zwartjes P M, Sacchi M D. Fourier reconstruction of non-uniformly sampled, aliased seismic data. *Geophysics*, 2007, 72(1): V21-V32.
- [2] Liu B, Sacchi M D. Minimum weighted norm interpolation of seismic records. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1560-1568.
- [3] 孟小红, 郭良辉, 张致付等. 基于非均匀快速傅立叶变换的最小二乘反演地震数据重建. *地球物理学报*, 2008, 51(1): 235-241.
Meng X H, Guo L H, Zhang Z F, et al. Reconstruction of seismic data with least squares inversion based on nonuniform fast Fourier transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(1): 235-241.
- [4] Spitz S. Seismic trace interpolation in the $f-x$ domain. *Geophysics*, 1991, 56(6): 785-794.
- [5] Naghizadeh M, Sacchi M D. Multistep autoregressive reconstruction of seismic records. *Geophysics*, 2007, 72(6): V111-V118.
- [6] Naghizadeh M, Sacchi M. $F-x$ adaptive seismic-trace interpolation. *Geophysics*, 2009, 74(1): V9-V16.
- [7] 高建军, 陈小宏, 李景叶等. 不规则地震数据的抗假频重建方法. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(3): 326-331.
Gao J J, Chen X H, Li J Y, et al. Studies on anti-aliasing reconstruction method for irregular seismic data. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2010, 45(3): 326-331.
- [8] 刘喜武, 刘洪, 刘彬. 反假频非均匀地震数据重建方法研究. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 299-305.
- Liu X W, Liu H, Liu B. A study on algorithm for reconstruct of de-alias uneven seismic data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 299-305.
- [9] Duijindam A J W, Schonewille M A, Hindriks C O H. Reconstruction of band-limited signals, irregularly sampled along one spatial direction. *Geophysics*, 1999, 64(2): 524-538.
- [10] Naghizadeh M, Sacchi M. On sampling functions and Fourier reconstruction methods. *Geophysics*, 2010, 75(6): WB137-WB151.
- [11] 国九英, 周兴元. $F-K$ 域等道距内插. *石油地球物理勘探*, 1996, 31(2): 211-218.
Guo J Y, Zhou X Y, Yu S P. Iso-interval trace interpolation in $F-K$ domain. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1996, 31(2): 211-218.
- [12] Abma R, Kabir N. Comparisons of interpolation methods. *The Leading Edge*, 2005, 24(10): 984-989.
- [13] Naghizadeh M, Innanen K. Seismic data interpolation using a fast generalized Fourier transform. *Geophysics*, 2011, 76(1): V1-V10.
- [14] Dev A, McMechan G. Spatial antialias filtering in the slowness-frequency domain. *Geophysics*, 2009, 74(2): V35-V42.
- [15] Gulunay N. Seismic trace interpolation in the Fourier transform domain. *Geophysics*, 2003, 68(1): 355-369.
- [16] Abma R, Kabir N. 3D interpolation of irregular data with a POCS algorithm. *Geophysics*, 2006, 71(6): E91-E97.
- [17] Trad D, Ulrych T, Sacchi M. Accurate interpolation with high-resolution time-variant Radon transforms. *Geophysics*, 2002, 67(2): 644-656.
- [18] Darce G. Spatial interpolation using a fast parabolic transform. 60th SEG, Expanded Abstracts, 1990: 1647-1650.
- [19] Hennenfent G, and Herrmann F. Simply denoise: Wavefield reconstruct via jittered undersampling. *Geophysics*, 2008, 73(3): V19-V28.
- [20] 陆文凯, 李衍达. 利用 SVD 分解法对任意道距内插. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(4): 582-588.
Lu W K, Li Y D. Any-interval trace interpolation using SVD method. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 1997, 32(4): 582-588.
- [21] Lu Y H, Lu W K. Edge-preserving polynomial fitting method to suppress random seismic noise. *Geophysics*, 2009, 74(4): V69-V73.

(本文编辑 汪海英)