

文章编号:1001-1986(2006)02-0070-03

去假频高分辨率 $\tau-p$ 变换法波场分离

刘保童^{1,2}, 朱光明¹

- (1. 西安科技大学地质与环境工程系, 陕西 西安 710054;
2. 天水师范学院数理与信息学院, 甘肃 天水 741000)

摘要: $\tau-p$ 变换是消除相干噪声、波场分离的重要方法之一, 但常规 $\tau-p$ 变换存在算子假频和端点效应, 分辨率太低, 无法直接使用。本文提出一种新的非迭代高分辨率 $\tau-p$ 变换方法, 可同时压制假频和端点效应, 提高了变换域的分辨率。通过理论模型记录与实际资料的试验表明了该方法的有效性。

关键词: $\tau-p$ 变换; 算子假频; 端点效应; 波场分离; 相干噪声

中图分类号:P631.443 文献标识码:A

De-aliasing high resolution $\tau-p$ transform and its application to wave fields separation

LIU Baotong, ZHU Guangming

- (1. Dept. of Geology and Environment Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Mathematics and Information, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

Abstract: The $\tau-p$ transform is one of the important techniques to eliminate coherent noises and separate wave fields, but the operator aliasing artifacts and edge effect artifacts affect its resolution, therefore the conventional $\tau-p$ transform can't be used simply. This paper presents a new non-iteration high-resolution $\tau-p$ transform procedure which can suppress aliasing artifacts and edge effect artifacts simultaneously and improve resolution. The results show that the new procedure is effective by processing the synthetic seismogram and real data.

Key words: $\tau-p$ transform; operator aliasing; edge effect; wave fields separation; coherent noises

1 引言

$\tau-p$ 变换法去噪或波场分离寄希望于在变换域中信号与噪声或不同类型的波彼此能够分离。理论上来说, $\tau-p$ 变换把时一空域($t-x$ 域)中的直线映射为截距时间一慢度域($\tau-p$ 域)中的点, 然而, 在实际数值计算实现中, 在变换域往往会出现能量发散而不聚焦, 使去噪或波场分离效果不好。其原因有两个: 算子假频和端点效应, 它们有时被称为离散 Radon 变换的缺陷^[1]。有限的采样空间会引起假频干扰, 而有限的空间排列孔径(观测窗)产生端点效应。端点效应本质上是一种截断效应, 它降低了变换域的分辨率。近年来人们提高 Radon 变换分辨率的常用方法是稀疏反演法^[2~4], 这需要迭代处理。笔者在这里提出了一种新的非迭代的反演解, 可同时压制假频和端点效应, 有效地提高变换分辨率。

2 常规 $\tau-p$ 变换数值计算时存在的问题

常规 $\tau-p$ 变换的频率域离散形式为^[1,5,6]:

$$\text{正变换: } \mathbf{M} = \mathbf{G}^H \mathbf{D}, \quad (1)$$

$$\text{反变换: } \mathbf{D} = \mathbf{G} \mathbf{M}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{G} = (\exp(-i\omega_n p_j x_k))_{K \times J}$;

$\mathbf{D}(x_k, \omega_n)$ 为输入记录的傅氏变换;

$\mathbf{M}(\omega_n, p_j)$ 为 $\tau-p$ 谱的傅氏变换;

$n=1, 2, \dots, N$, N 为总的频率样点数;

$j=1, 2, \dots, J$, J 为 $\tau-p$ 谱中 p 的总个数;

$k=1, 2, \dots, K$, K 为输入地震记录的总道数。

为避免假频, p 的最大扫描 p_{\max} 值应满足采样定理的要求, 并且对每一频率成分, 在变换过程中, 所有的求和轨迹在相邻两道上所引起的时差应该控制在一个周期之内(相对于真实同相轴)。设真实同相轴的斜率为 p_0 , 则抗假频条件是:

$$|p_{\max} - p_0| \leq \frac{1}{f_{\max} \Delta x}, \quad (3)$$

式中 f_{\max} 为信号中的最高频率成分。

而采样间隔 Δp 应满足^[7]:

$$\Delta p \leq \frac{1}{f_{\max} (x_{\max} - x_{\min})}. \quad (4)$$

若按照上述要求选择 p 的扫描范围和采样值, 即可消除假频。但由于在一张地震记录上不同的同相轴斜率可能相差较大(即 p_0 值相差较大), 给扫描范围的选择带来困难。实际上, p 的扫描范围的选

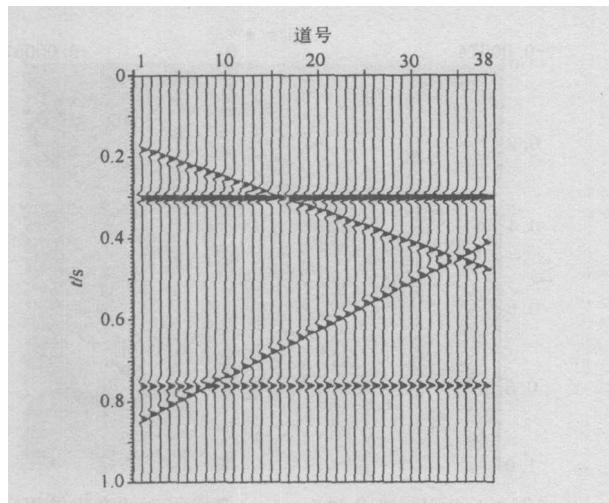
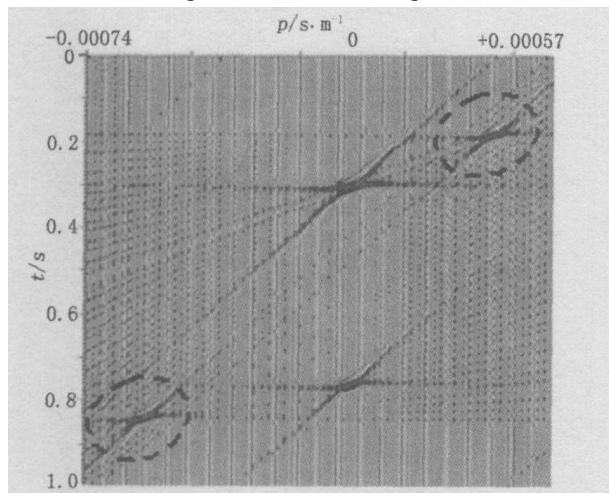


图 1 合成地震记录

Fig. 1 A synthetic seismogram

图 2 根据图 1 的 $\tau-p$ 谱Fig. 2 $\tau-p$ spectrum of seismogram showing in Fig. 1

择要使记录中所有同相轴变换后的像全部落在其中,这样往往出现假频,应设法予以压制。通常压制假频和端点效应的方法有时窗法、相似系数法、滤波法等。

图 1 是一个合成地震记录,共 38 道,最小炮检距 0 m,最大炮检距 740 m,道间距 20 m。根据对记录中同相轴的最大斜率和最小斜率的初步估算可知,大约取 p 的扫描范围为 $[-0.00074, +0.00057]$,即可使变换结果中包含了所有同相轴的像(图 1 的记录中同相轴的最小斜率大约为 -0.00058 ,最大斜率大约为 $+0.0004$)。图 2 是常规 $\tau-p$ 变换的 $\tau-p$ 谱($\Delta p=0.0000015$),由于具有算子假频和端点效应,分辨率太低,倾斜相干噪声与水平同相轴在谱上未完全分离。因此,难以通过对谱的切除处理来滤除干扰。(切除范围大会伤及有效波,范围小则去噪不彻底)例如,若按图 2 中虚线所圈定的区域切除,则会输出如图 3 所示的滤波效果。

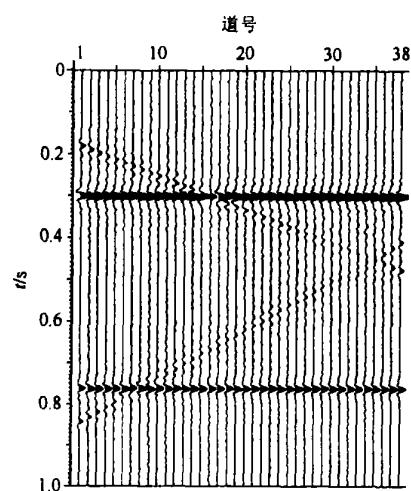


图 3 根据图 2 的滤波结果

Fig. 3 Filtered result with the data on Fig. 2

3 去假频高分辨率 $\tau-p$ 变换

为提高变换分辨率,可先定义反变换,然后导出正变换^[2,5]。反变换(2)式一般是一个约束的欠定最小平方问题,因此,按照广义最小平方理论^[8],可给出(2)式的一个频率域约束最小平方反演解:

$$\mathbf{M}(\omega_n) = \mathbf{WG}^H (\mathbf{GWG}^H + \lambda^2 I)^{-1} \mathbf{D}(\omega_n), \quad (5)$$

式中 ω_n 为第 n 个角频率成分;

$\mathbf{D}(\omega_n) = (D(x_1, \omega_n), D(x_2, \omega_n), \dots, D(x_k, \omega_n))^T$, 为要变换的单色波场;

$\mathbf{M}(\omega_n) = (M(\omega_n, p_1), M(\omega_n, p_2), \dots, M(\omega_n, p_J))^T$, 为反演得到的变换结果;

$\mathbf{G}(\omega_n)$ 为(2)式中的变换矩阵;

$\mathbf{W}(\omega_n)$ 是一个实对角正定约束矩阵,其对角元素为:

$$w_{jj}(\omega_n) = \| \mathbf{M}(\omega_{n-1}, p_j) \|, \quad (6) \\ (j=1, 2, \dots, J).$$

这种非迭代的直接处理方法是将输入记录的 $\tau-p$ 变换当作一个约束的地球物理反问题来求解,通过求解方程式(2)所表示的线性方程组,以得到高分辨率 $\tau-p$ 变换图像。(5)式中的 $(\mathbf{GWG}^H + \lambda^2 I)^{-1}$ 相当于一个反褶积算子,提高了变换的分辨率。式中采用约束矩阵 \mathbf{W} 的物理意义在于利用低频处的反演解对高频处的反演解进行约束,从而达到去假频的目的。这是因为在低频处变换矩阵 \mathbf{G}^H 不具有假频缺点(图 4),因此在低频处的变换结果可用来约束在高频处的变换结果。类似的特点被用于地震道插值^[9]。

图 5 是采用该方法对图 1 中的记录变换后得到的 $\tau-p$ 谱, p 的扫描范围和采样间隔与图 2 相同,

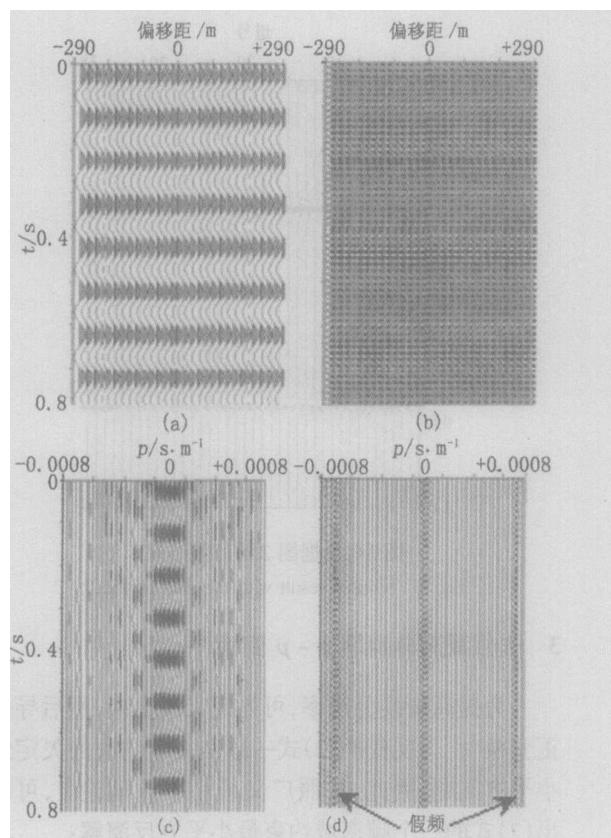


图 4 在低频处变换矩阵 G^H 不具有假频缺点的示例

Fig. 4 At low frequency, transform matrix G^H do not suffer from aliasing
 a —— 低频 CMP 道集, 10 Hz; b —— 高频 CMP 道集, 70 Hz;
 c —— 记录(a)用(1)式变换的结果; d —— 记录(b)用(1)式变换的结果

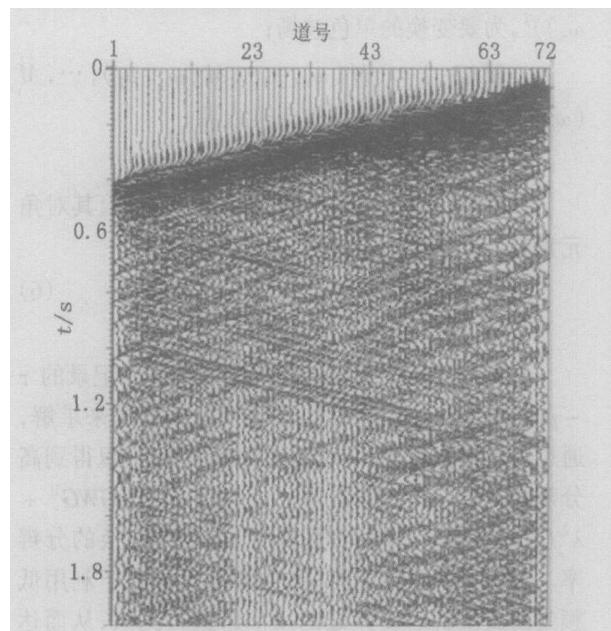


图 7 一个实际 VSP 记录

Fig. 7 A real VSP seismogram

但假频和端点效应同时得到了压制, 分辨率显著提高。采用与图 2 中类似的切除处理, 滤波后的输出如图 6 所示, 由于分辨率高, 在变换域中同相轴聚焦好, 干扰波去除彻底且有效波并未损伤。

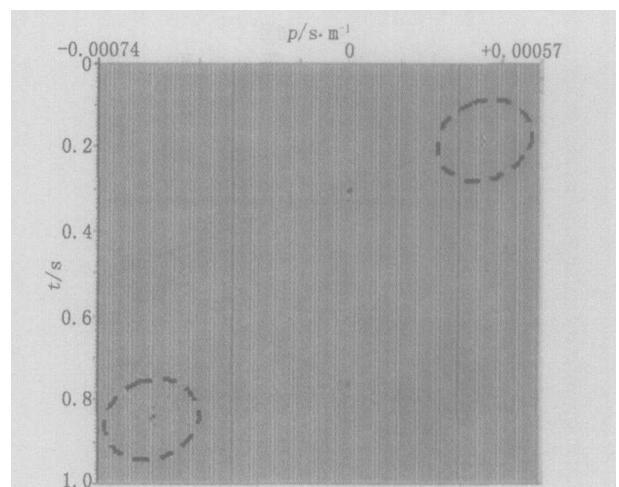


图 5 去假频高分辨率 $\tau-p$ 变换得到的变换结果
 Fig. 5 The result of transform obtained with the new procedure

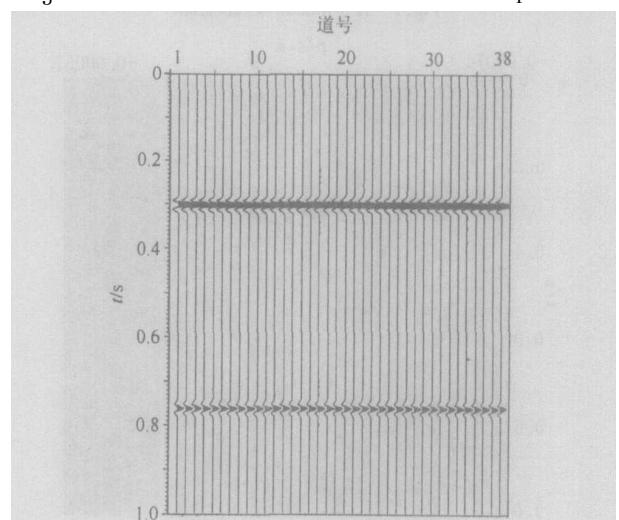


图 6 根据图 5 的滤波结果
 Fig. 6 Filtered data based on Fig. 5

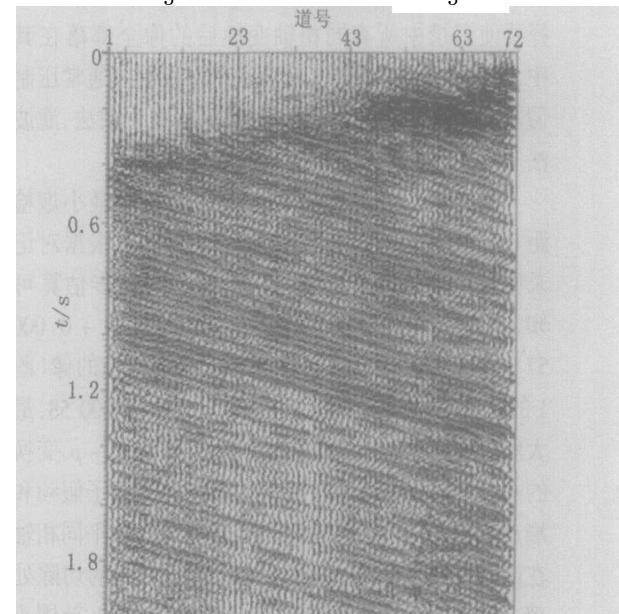


图 8 由图 7 分离出的上行波
 Fig. 8 Separated upgoing wave

文章编号: 1001-1986(2006)02-0073-04

利用高密度电阻率法监测地下介质污染问题的数值模拟

余京洋 (中国地质大学研究生院, 北京 100083)

摘要: 对地下介质不同污染模式的电性分布特征, 给出了不同的地电模型。针对不同的地电模型, 利用 2.5 维有限元正演模拟的方法计算出了不同监测装置形式下的异常分布特征, 并给出了针对不同污染模式的最优监测装置形式和异常分析方法。同时模拟分析了对于不同污染程度监测的可行性。

关键词: 地下介质污染模式; 高密度电阻率法; 监测

中图分类号: P631.34 **文献标识码:** A

Numerical simulation in monitoring of ground-medium contamination with high density resistivity method

YU Jing-yang (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper gives the electric models of different ground-medium contamination on the basis of many ground-medium contamination examples. Calculated by 2.5D finite element method (FEM), it gives the abnormal resistivity characters of different ground-medium contamination when monitoring with different arrays. By analyzing, the paper confirmed the best array to monitoring different ground-medium contamination. This text also analyzes the feasibility to monitoring different contamination degree of ground-medium by FEM and gives the data processing methods which can improve the resolution of the apparent resistivity section.

Key words: model of different ground-medium contamination; HDR; monitoring

1 引言

近年来, 利用地球物理方法对地下介质污染监测的实例和研究越来越多。地下介质(土壤、地下水)被渗滤液污染后, 其物理性质特别是导电性质随之发生变化^[1~3]。根据这种物理性质的改变, 利用电阻率法等地球物理方法来进行有机物或无机物污

染土壤和地下水问题的调查正在成为热点问题, 并取得了良好的效果^[4~8]。

从目前应用的情况来看, 基于高密度电阻率技术的二维电阻率法得到广泛应用。但现实中地下介质的污染方式各不相同, 而不同的污染模式根据其污染区和未污染区的电性差异可归纳为不同的地电模型。针对不同的地电模型, 利用高密度电阻率法

收稿日期: 2005-06-08

作者简介: 余京洋(1972—), 男, 河南方城人, 工程师, 中国地质大学研究生院在读博士, 从事矿产普查与勘探研究工作。

4 实际资料处理效果

图7是一个实际的VSP记录, 用该方法进行 $\tau-p$ 滤波分离出的上行反射波见图8。

5 结束语

普通 $\tau-p$ 变换存在严重的端点效应和假频, 而去假频高分辨率 $\tau-p$ 变换方法可同时压制假频和端点效应, 大大提高变换分辨率, 使 $\tau-p$ 变换可用于去噪或波场分离处理。该方法对线性或近似线性的相干噪声可得到好的去噪效果, 对非线性的情况不能简单地直接应用, 还应做相关的工作。对地面多次波压制与纵横波分离问题, 通过改变时差曲线, 该方法可容易地推广为抛物线 Radon 变换($\tau-q$ 变换); 当同相轴形态复杂时可以分区分块, 在分区窗口内使用文中的方法。

参考文献

- [1] Marfurt K J, Schneider R V, Mueller M C. Pitfalls of using conventional and discrete Radon transforms on poorly sampled data[J]. Geophysics, 1996, 61(5): 1467—1482.
- [2] Sacchi M D, Ulych T J. High resolution velocity gathers and offset-space reconstruction[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1169—1177.
- [3] Daniel Trad, Tadeusz Ulych, Mauricio Sacchi. Latest views of the sparse Radon transform. Geophysics, 2003, 68(1): 386—399.
- [4] Cary P W. The simplest discrete Radon transform[A]. SEG. 68th Ann Internat Mtg, Expanded Abstracts[C]. Houston: SEG, 1998. 1999—2002.
- [5] Zhou B zh, Stewart A G. Linear and parabolic $\tau-p$ transforms revisited[J]. Geophysics, 1994, 59(7): 1133—1149.
- [6] Foster D J, Mosher C C. Suppression of multiple reflections using the Radon transform[J]. Geophysics, 1992, 57(3): 386—395.
- [7] Turner G. Aliasing in the $\tau-p$ transform and the removal of spatially aliased coherent noise[J]. Geophysics, 1990, 55(11): 1496—1503.
- [8] Tarantola A. Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation[M]. Elsevier Science Publ., 1987.
- [9] Spitz S. Seismic trace interpolation in the F-X domain[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 785—794.