

高精度广义 KL 变换波场分离与去噪

刘保童¹, 朱光明²

(1. 西安科技大学 地质与环境工程系, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] KL 滤波是地震数据处理中的重要方法技术之一。针对在实际中如何有效地应用好 KL 变换的问题, 结合有效波同相轴高精度拾取和排齐技术, 采用奇异值分解(SVD)算法实现 KL 变换, 使 KL 滤波适用于任意弯曲同相轴的分离与消除。理论模型计算和实际资料处理试验表明, 使用该方法能有效地分离相干噪声和随机噪声, 提高地震记录的信噪比, 简单实用, 便于操作。

[关键词] 波场分离; 去噪; 相干噪声; 奇异值分解; 静态时移; KL 变换

[中图分类号] P631.4⁺43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)03-0059-04

[作者简介] 刘保童(1965-), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 从事信号处理及数理方法教学与研究。

1 概述

在地震勘探数据处理中, 如何分离不同类型的波场, 提取有效信号, 压制相干噪声和随机噪声, 是由来已久长期要解决的问题。为此, 人们已提出了许多方法, 如 F-K 滤波、中值滤波、Radon 变换、KL 滤波、阵列滤波、递归滤波、等值切片滤波、聚束滤波、小波时分分频等等。不同方法各有其特点, 而每种方法的正确而有效的使用, 都必须具备一定的条件。

Hemon C H 和 Mace D^[1] 于 1978 年首次创造性地将遥测多谱资料处理中经常使用的 KL 变换引入地震资料处理中, 用以提高信噪比。Jones^[2, 3] 综合了 Ulrych, Levy, Oldenburg 以及他本人的工作, 于 1987 年对用 KL 变换提高地震记录的信噪比进行了全面、系统的介绍。文献[4~7] 也对 KL 滤波的原理和方法做了比较详细的阐述。至此, 地震记录 KL 滤波的原理和方法体系已基本完善。

在利用 KL 变换处理实际资料时, 要针对资料的具体特点灵活应用, 有时需做一些相关处理加以改进。例如, 按照 Jones^[2] 提出的方法, 对倾斜相干噪声, 应先按一定的道间时差排齐同相轴, 然后再

进行 KL 变换, 这称为倾斜 KL。若资料在空间和时间上都变化较大, 则应分区分块进行倾斜 KL 来适应时空变情况^[8, 9]; 文献[10] 介绍的倾角扫描叠加 KL 变换等方法, 旨在增强 KL 变换的适用性, 其主要思想是线性时差校正和道间窗口滑动; 文献[11] 指出, 当信噪比 <1 时, 可先对记录波场按自身振幅加权(二次波场), 然后进行 KL 或倾斜 KL。

KL 变换滤波依据的是多道信号之间的相干性差异, 以中心化的相关矩(协方差)这一统计特性为理论依据, 在变换域通过主分量的选择以达到滤波目的^[12]。应用 KL 变换进行滤波时, 输入记录中的不同信号, 或信号与噪声在水平方向的相干性必须要有一定的差异(以协方差来度量), 差异越大, 滤波效果越好, 反之, 差异越小, 则效果越差。因此, 静态时移校正排齐某一(组)同相轴, 是同相轴倾斜和弯曲时必须要做的前期工作, 但问题是如何做。笔者认为, 倾斜 KL、分区分块以适应时空变情况的 KL 都是按线性时差校正来拉平某一倾角的同相轴, 对于弯曲同相轴, 也是用直线段来代替曲线弧, 精度太低, 尤其在曲率较大处(图 1)^[13]。若要满足一定的精度要求, 分区应足够小, 而分区内所包含的道数太少时, 去噪效果不好。这说明, 要达到明显的去噪效果, 必然要降低精度。

在工作中, 用高精度初至拾取和排齐来拉平某一(组)同相轴, 避免了用直线代替曲线引起的误差, 同时, 采用奇异值分解(SVD)算法实现, 又提高了特

[收稿日期] 2004 09 30

[基金项目] 国家 863 项目(2001AA602018-4, 5)

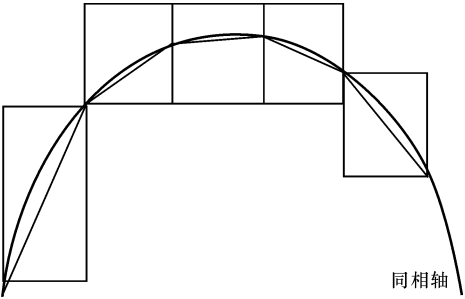


图 1 slant KL 误差分析
Fig. 1 slant KL error analysis

征值数值计算的精度, 因此是一种高精度的方法, 适用于任意弯曲变化的同相轴, 具有广义性。

2 KL 变换与奇异值分解

设有地震道集 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 为道号, $j = 1, 2, \dots, n$ 为样点号, 均值为 0。协方差矩阵 $C_X = E[XX^T]$, C_X 是半正定的实对称矩阵, 使用谱分解有

$$C_X = U\Lambda U^T$$

式中: $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$; $\lambda_i (i = 1, \dots, m)$ 为 C_X 的特征值; $U = (u_i)_{m \times m}$, 它的列 u_i 为 λ_i 对应的特征向量。则

KL 变换 $Y = U^T X$

KL 展开 $X = UY$

奇异值分解(SVD)是现代数值分析(尤其是数值线性代数)最基本和最重要的工具之一。利用矩阵的奇异值分解也可求得正交投影矩阵 U , 从而进行 KL 变换。

矩阵 X 的并向量奇异值分解为

$$X = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T$$

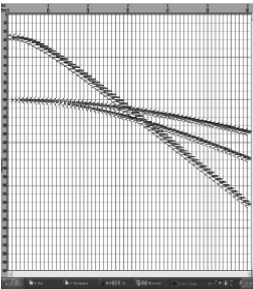


图 2 人工合成记录
Fig. 2 Synthetic data without random noise

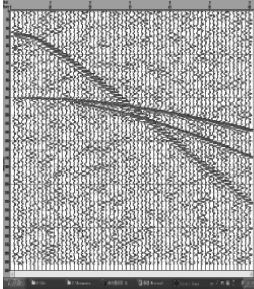


图 3 加上高斯噪声
Fig. 3 Synthetic data with random noise

式中: $r = \text{rank}(X)$ 。由于 $\text{Cond}(C_X) = [\text{Cond}(X)]^2$, C_X 的病态程度显著增大, 因此, 求 C_X 的特征值的精度将会比直接求 X 的奇异值低得多。所以, 不是去求 λ_i , 而是直接求得原矩阵 X 的奇异值 σ_i , 再利用 $\lambda_i = \sigma_i^2$, $C_X \lambda_i = u \lambda_i$ 求得变换矩阵 U 。

3 高精度广义 KL 变换的实现步骤

设地震道集 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, m 道, n 点。

- (1) 高精度拾取某一同相轴的波至时间 $t_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 。
- (2) 对 x_i 静态时移从而排齐同相轴, 得 X' 。
- (3) 对 X' 进行奇异值分解, 得到正交投影向量矩阵 $U = (u_i)$ 及奇异值 $\sigma_i (i = 1, \dots, r)$ 。
- (4) 投影, $Y = U^T X'$ 。
- (5) 根据数据处理的任务和目的确定主分量的通带, 得 Y' 。
- (6) 重建, $X'' = UY'$ 。
- (7) X'' 反排齐得处理结果 X''' 。

4 合成记录试验

4.1 模型 1

图 2 是合成的含有弯曲相干噪声的理论地震记录, 图 3 是图 2 加上高斯随机噪声(均值 $\mu = 0.0$, 方差 $\sigma = 10.0$) 的记录, 相干噪声和有效一次波均是弯曲的, 图 4 是用本文方法分离出的有效波, 图 5 是分离出的相干干扰和随机噪声, 效果理想。

4.2 模型 2

图 6 是合成的一个井间地震 CSP 道集, 图 7 是直达波排齐显示, 图 8 是去掉第一主分量滤除直达波后的结果, 下行的反射波并未消去, 除去前两个

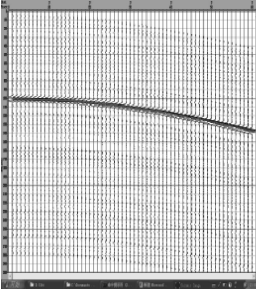


图 4 提取的有效信号
fig. 4 Extracted signal

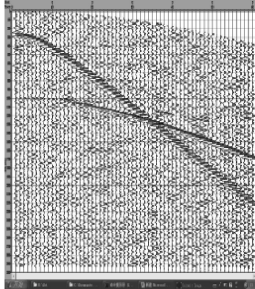


图 5 分离出相干和随机噪声
Fig. 5 Separated coherent and random noise

主分量后, 多次波不但没消去, 有效信号反而因能量损失而畸变(图 9)。如何消除残余的下行波呢? 正确的做法是, 将上行波排齐(图 10), 此时特征值曲线如图 11, 按 90% 能量重建并反排齐后的结果为图 12, 显然, 成功地压制了下行波, 分离出了有效的一次反射波, 得到了满意的结果。如果是将下行波排齐(图 13), 此时的特征值曲线如图 14, 滤波后的结果如图 15, 显然, 效果不好, 这是因为残余的下行波能量较弱, 排齐并不能使其相干性和上行波有明显差异。

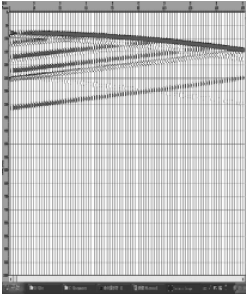


图 6 一个合成井间 CSP 道集
Fig. 6 A synthetic CSP trace gather of cross hole

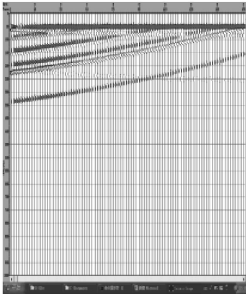
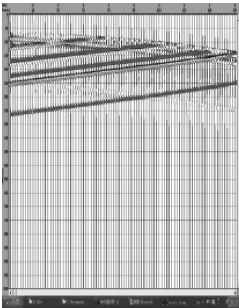


图 7 直达波排齐
Fig. 7 Flattened first arrival



8 滤除第一主分量输出
Fig. 8 Reconstruction of removing the first primary component

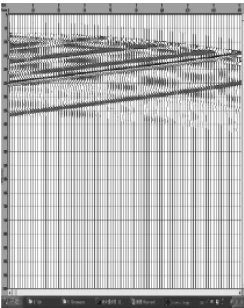


图 9 滤除第二主分量输出
Fig. 9 Reconstruction of removing the first two primary components

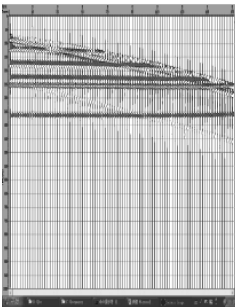


图 10 正确的排法
Fig. 10 Correct flattening way

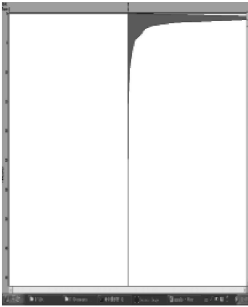


图 11 好的特征值分布
Fig. 11 Appropriate distribution of eigenvalue

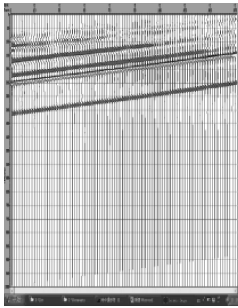


图 12 好的结果
Fig. 12 Good result

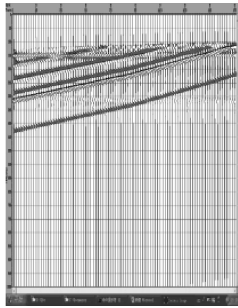


图 13 不正确排法
Fig. 13 Incorrect flattening way

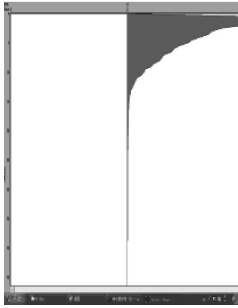


图 14 不好特征值分布
Fig. 14 Not appropriate distribution of eigenvalue

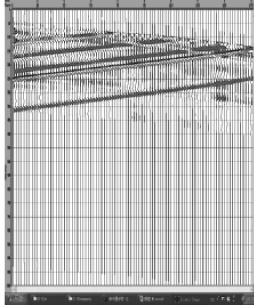


图 15 不好结果
Fig. 15 Not good result

5 实际应用效果

图 16 是一实际 VSP 记录, 处理任务是:

- (1) 消除下行相干噪声, 分离上行反射波。
- (2) 压制随机干扰, 提高信噪比。

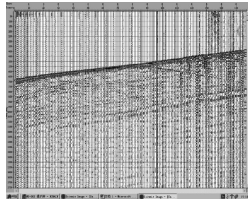
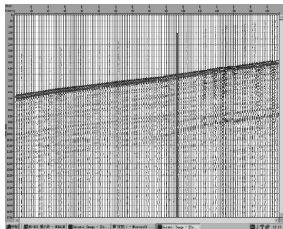


图 16 某地区一口井的实测 VSP 记录
Fig. 16 A real VSP data in some well

用本方法进行处理, 图 17 是分离出的下行波, 图 18 是消除下行波和随机噪声后得到的上行反射波。达到了预期的目的, 取得了理想的效果。



17 消除的下行波记录
ig. 17 Down going wave field to be removed

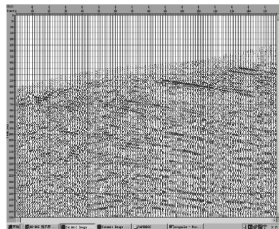


图 18 经分离去噪后的上行波
Fig. 18 Up going reflection wave

6 结语

通过高精度初至拾取和排齐处理,使 KL 变换可以处理任意弯曲形状的同相轴,大大地提高了 KL 变换的精度和适应性。这种方法简单实用,便于操作。

[参 考 文 献]

[1] Hemon C H, Mace D. Use of the Karhunen Loeve transformation in seismic data processing[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26: 600 ~ 626.

[2] Jones I F, Levy S. Signal to noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the Karhunen Loeve transform[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35: 12 ~ 32.

[3] Sergio L M Freire, Tad J Ulrych. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling[J]. Geophysics, 1988, 53(6): 778 ~ 785.

[4] Jian Y, Jing yu Y. Generalized K L transform based com

bined feature extraction[J]. Pattern Recognition, 2002, 35: 295 ~ 297.

[5] 傅才芳, 罗国安. 应用 KL 滤波提高地震记录的信噪比[J]. 石油地球物理勘探, 1986, 21(5): 486 ~ 493.

[6] 熊翥. 地震数据数字处理应用技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.

[7] 张贤达. 信号处理中的线性代数[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

[8] 张广智, 印兴耀, 吴国忱, 等. 一种提高 KL 变换速度和精度的方法[J]. 石油物探, 1997, 36(增刊): 112 ~ 115.

[9] 蔡仲华, 国建凤. 应用时空变 KL 滤波消除叠后地震记录相干噪声[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(增刊): 53 ~ 58.

[10] 付燕, 赵荣椿. 应用时-空变倾角扫描叠加 KL 变换提高地震资料信噪比[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(4): 303 ~ 307.

[11] 杨文采. 非线性 KL 滤波及其在反射地震资料处理中的应用[J]. 石油物探, 1996, 35(2): 17 ~ 26.

[12] 吴建华, 刘贵忠. 基于小波变换域上的 KL 变换的地震信号去噪方法[J]. 信号处理, 1997, 13(4): 298 ~ 305.

[13] 朱光明 李庆春 王玉贵. 21 世纪全球油气资源形势和海上多波地震技术展望[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(1): 1 ~ 8.

Wave field separation and de noising using generalized high precision KL transform

LIU Bao tong¹, ZH U Guang ming²

(1. Department of Geology and Environment Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract KL filtering is one of the important techniques in seismic data processing. Aimed at the issue how to make use of KL transform effectively in practice, this paper introduced the approach of high precision event picking and alignment, implemented KLT via SVD algorithm, which makes KL filtering fit for separation and removing of arbitrarily curving event. The results of synthetic seismograms and real data indicate that the method can separate coherent and random noise effectively, enhance signal to noise ratio of seismic section. It is simple and practical.

Key words wave field separation; de noising; coherent noise; SVD; static time shift ; KL transform

[英文审定: 李庆春]