

文章编号:1001-1986(2007)01-0071-03

# 局部结构熵算法在地震数据不连续性检测中的应用

周艳辉,高静怀

(西安交通大学电子与信息工程学院,陕西 西安 710049)

**摘要:**自从相干地震数据体概念被提出以来,许多学者提出了不同的基于相干性检测地质结构不连续性的算法。例如,基于特征结构的相干算法,局部结构熵算法以及第二与第一特征值比值算法等。本文基于小波变换具有多尺度多分辨率分析的优点,提出了在特定的小波变换分频瞬时属性上,利用局部结构熵算法来检测地震数据的局部不连续性。实际地震资料检测结果表明,基于分频瞬时相位的局部结构熵算法更能有效地检测到地震数据的细微变化,对于油气藏的精细刻画有重要意义。

**关键词:**相干数据体;分频瞬时属性;局部结构熵(LSE);局部不连续性

**中图分类号:**P631.443    **文献标识码:**A

## Application of local structural entropy measure on the detection of discontinuity of seismic data

ZHOU Yan-hui, GAO Jing-huai

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Since the coherency cube was introduced, many researchers have proposed different local discontinuity measures, such as eigenstructure-based coherency estimates, local structural entropy measure and the ratio of the second and the first eigenvalue. Local structural entropy measure in frequency division is put forward to detect local discontinuities of seismic data, by the virtue of the instantaneous attributes based on wavelet transform. The results of the real data demonstrate the effectiveness of local structural entropy measure on the basis of instantaneous frequency in division on detecting small discontinuities, which is of importance to field description.

**Key words:** coherency cube; instantaneous attributes in frequency division; local structural entropy; local discontinuities

自从 Bahorich 和 Farmer<sup>[1]</sup>(1995)提出地震资料的相干数据体以来,许多学者从不同的角度出发,发展了一些利用地震数据相干性来检测不连续地质结构的算法。其检测结果对岩性不连续性(例如断层及裂缝)的分辨能力大大高于原始地震数据,从而增强了自动地质解释的能力,尤其是在时间剖面上对河道和断层等的解释。Bahorich 和 Farmer 提出的相干性测度,处理的是相邻 3 个地震道间的归一化互相关值。由于分析窗选用的地震道较少,受噪声的影响很大;另一方面,为了保证参与计算的地震道的零均值性,要求选用的时间采样点数必须足够的多,从而增加了计算量。后来,Marfurt<sup>[2]</sup>等人(1998)对 Bahorich 和 Farmer 的算法进行了改进,得到平衡剖面相干算法。该算法可以对任意多的地震道进行相干性描述,从而达到了抑制噪声的目的。但是,待分析地震道的增加意味着横向分辨率的降低和计算量

的增加。

1999 年, Gerszenkorn 和 Marfurt<sup>[3-4]</sup>又提出了一种基于特征结构的相干算法。实验表明,这种算法有更好的抗噪性能和有很好的横向分辨率,能较清楚的识别地层特征。不足之处在于,协方差矩阵特征值的计算增加了计算量。

Cohen 和 Coifman<sup>[5]</sup>等人从地层反射波波形不连续性的角度出发,于 2002 年提出了用于检测地质结构不连续性的局部结构熵算法。和以往的算法相比,这种算法具备很高的计算效率,又能较好的抑制噪声,在选择不同大小的分析单元后,可检测不同尺度下的不连续性。进一步,通过把由不同大小的分析单元(analysisi cube)所得到的局部结构熵组合起来,可以得到分辨率较高的结果。但对于细小的不连续性结构,局部结构熵算法的分辨率较低。

地下岩性变化可导致地震波形的变化,但这种

收稿日期:2006-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40174032);国家科技部“重大基础研究前期专项”资助

作者简介:周艳辉(1981—),女,河南偃师人,西安交通大学在读博士研究生,主要从事地震信号处理方法研究。

变化一般不太明显,尤其对深层反射资料,由于信噪比较低,直接利用地震资料检测岩性变化更为困难。本文拟把局部结构熵算法和分频瞬时属性有机地结合起来,以达到高精度的地层不连续性检测。

根据小波变换具有描述信号局部频率特征的优点,本文基于信号小波变换的分频瞬时属性,重点描述了特定分频段的局部结构熵算法。此算法无论在细小断层的刻画,还是在去除噪声干扰方面,都优于直接对地震记录的振幅作局部不连续性分析,这有助于三维地震数据体的精细解释。实际资料算例的结果也证实了算法的有效性。

## 1 基于分频瞬时属性<sup>[6]</sup>的局部结构熵算法

下面的分析单元,相关矩阵是在地震数据体以及地震数据的瞬时属性体上选取和计算的。

### 1.1 分析单元

实际计算中,分析单元的选择有很多种,可以是立方体、柱体等;分析单元的时窗(analysis window)可分为矩形、椭圆等。在时间方向上,具有较短时间持续期的地质结构特征,例如河道等,可选用少量的时间采样点;而处理有较长时间持续期的地质结构,例如断层、裂缝等不连续性结构,可使选取的地震道包含较多的时间点<sup>[1]</sup>。这里,选取分析单元的时窗为矩形时窗。在选定的分析时窗内,按道的顺序,将基于小波变换的瞬时属性值(瞬时相特征和瞬时相位)依次赋值给  $M = M_x M_y$  ( $M_x$  为 inline 方向测线数,  $M_y$  为 crossline 方向地震道数) 个列向量,每道包括  $N_t$  个时间采样点,占用一个列向量:

$$\begin{aligned} \{I_p^a | p = (i-1) * M_y + j, 1 \dots M\} = \\ [\theta(a, x_i, y_j, t - t_{(N_t-1)/2}) \theta(a, x_i, y_j, t - t_{(N_t+1)/2}) \dots \\ \theta(a, x_i, y_j, t) \dots \theta(a, x_i, y_j, t + t_{(N_t-1)/2})]^T, \\ (\theta(a, x_i, y_j, t - t_k) \text{ 简记为 } \theta_{ijk}^a). \end{aligned} \quad (1)$$

### 1.2 相关矩阵

分析窗内每一道均值  $\theta_{ij}^a = \frac{1}{N_t} \sum_{k=-(N_t-1)/2}^{(N_t-1)/2} \theta_{ijk}^a$ , 记  $I_p^a = [\theta_{ij1}^a - \theta_{ij}^a, \theta_{ij2}^a - \theta_{ij}^a, \dots, \theta_{ijN_t}^a - \theta_{ij}^a]$ , 对每一地震道零均值化;令分析矩阵  $A = [I_1^a \ I_2^a \dots \ I_M^a]$ , 则可得到协方差矩阵:

$$C = A^T A = \begin{bmatrix} (I_1^a)^T I_1^a & \dots & (I_1^a)^T I_M^a \\ \dots & (I_p^a)^T I_p^a & \dots \\ (I_M^a)^T I_1^a & \dots & (I_M^a)^T I_M^a \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中,  $\theta(a, x_i, y_j, t - t_k)$  表示测线号为  $x_i$ , 道号为  $y_j$ ,  $t_k$  时刻, 尺度因子为  $a$  时, 地震数据的分频瞬时

属性值;  $(I_p^a)^T$  表示  $I_p^a$  的转置;  $(I_p^a)^T I_q^a$  表示列向量  $I_p^a$  和  $I_q^a$  之间的互相关性, 也即列向量  $I_p^a$  所表示的地震道和  $I_q^a$  的地震道数据之间相关性强弱。

### 1.3 局部结构熵算法(LSE)

在信号处理领域,熵代表信号的一种不确定性。熵值越大,表明信号越随机,时间序列点之间的不相关性越强。在地震信号处理中,局部结构熵(Local Structural Entropy, 简记为 LSE)反映了道与道之间信号的不连续性(即不相关性)。基于分频瞬时属性的局部结构熵测度定义为:

$$\epsilon(a, x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{M-1}} \left( \frac{\text{tr} C}{\|C\|} - 1 \right) = \frac{1}{\sqrt{M-1}} \cdot \left( \frac{\sum_{p=1}^M (I_p^a)^T I_p^a}{\sqrt{\sum_{p,q=1}^M [(I_p^a)^T I_q^a]^2}} - 1 \right) = \frac{1}{\sqrt{M-1}} \frac{\sum_{k=1}^M \lambda_k}{\text{tr}[A^T A] - 1}, \quad (3)$$

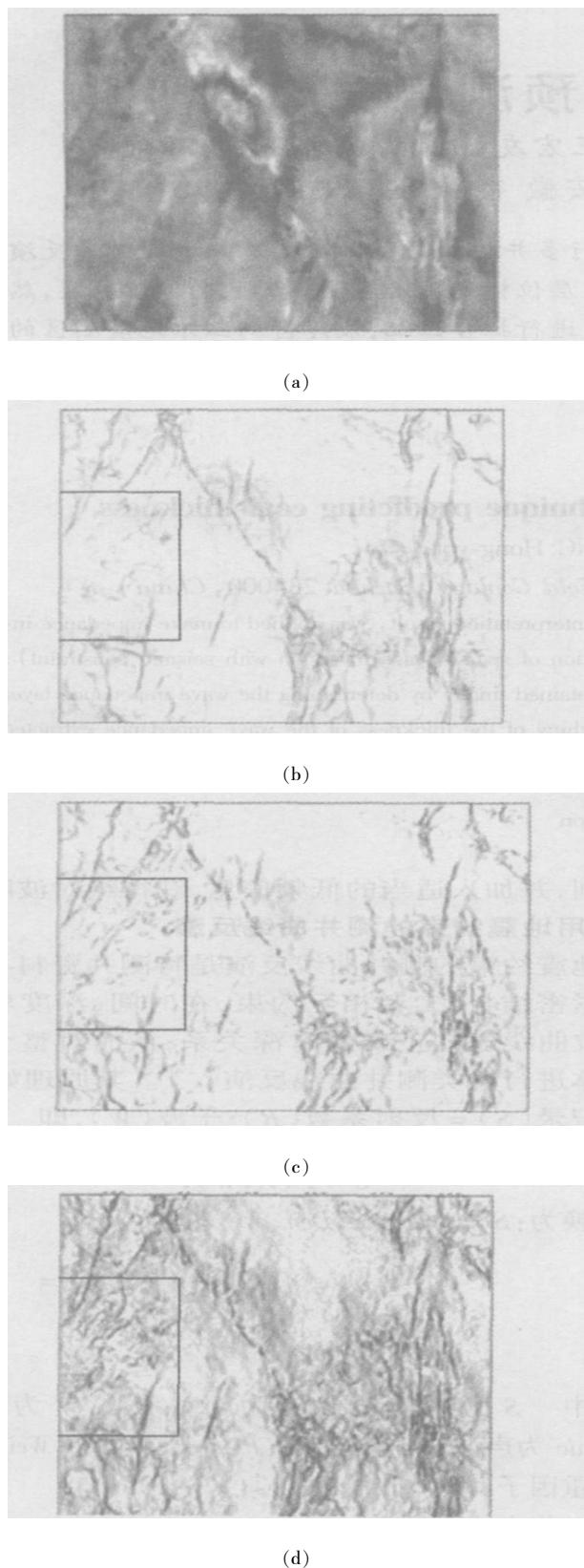
式中  $\|C\|$  表示矩阵的欧几里德范数(文中取 2 范数);  $\text{tr}(C)$  为矩阵的迹;  $\lambda_k (k=1, \dots, M)$  表示协方差矩阵  $C$  的第  $k$  个特征值 ( $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$ )。

$\epsilon(a, x, y, t)$  计算的是分析单元中间点的不相关测度大小。**a.** 若道与道之间的相关性很好,地层之间平滑变化,  $[(I_p^a)^T I_q^a]^2$  的值接近于  $[(I_p^a)^T I_p^a] \cdot [(I_q^a)^T I_q^a]$  的值,  $\text{tr} C$  逼近  $\|C\|$ ,  $\epsilon \rightarrow 0$ 。**b.** 断层或裂缝存在时,道与道之间的不连续性很强,则  $[(I_p^a)^T I_q^a]^2 \ll [(I_p^a)^T I_p^a] \cdot [(I_q^a)^T I_q^a]$ ,  $\text{tr} C$  逼近  $\sqrt{M} \|C\|$ ,  $\epsilon \rightarrow 1$ 。利用公式(3)即可计算出三维地震数据体中每一点的局部结构熵值,局部结构熵的值越大,不连续性越强。

不同的尺度因子  $a$ , 代表不同频率下的不连续性描述:  $a$  值较大时,对应的频率较低,检测结果突出地质结构中持续时间较长的不连续性结构,能显示出不连续结构的轮廓,可以更好的描述大的断层结构;  $a$  值较小时,突出高频成分,成像结果分辨率较高,不仅可以描述大的断层结构,而且能够清晰的显示微小的不连续性结构。实际地震数据处理中,可以根据地震数据体的特点和实际应用的需要,选择不同的  $a$  值<sup>[7-8]</sup>。这里具体考查  $a$  值较小,频率范围在 20~40 Hz 时,地震数据体的细微变化。

## 2 实际算例

利用局部结构熵算法检测三维地震数据体中的不连续性结构,一般来说,不需要观测垂直剖面,主要是在时间切片上观测地质结构的不连续性。图 1 是某油田一工区  $t=2201$  ms 的原始时间切片及利用基于特征结构的相干算法<sup>[4]</sup>, 基于地震数据体分

图1  $t=2 201 \text{ ms}$  时间切片Fig. 1 Horizontal slices at  $t=2 201 \text{ ms}$  through

a——原始地震数据体时间切片;

b——基于特征结构的相干体时间切片;

c——基于地震数据体分频相特征的局部结构熵值时间切片;

d——基于分频瞬时相位的局部结构熵值时间切片

频相特征和瞬时相位的局部结构熵算法对此工区进行不连续性检测, inline 和 crossline 方向上的间隔均为 25 m, 选择分析单元大小为 [3, 3, 45]。结果的时间切片采用灰度图显示, 颜色越深, 表明不连续性越强; 颜色越浅, 表明相干性越强, 地质结构变化较平缓。

对比图 1, 3 种算法均能较好的检测出地震数据体中的不连续性结构, 但基于分频瞬时相位的局部结构熵算法更能有效的显示出一些细微的不连续性结构(图中方框内), 这对细小断层及裂缝的刻画有着重要的意义。

### 3 结论

a. 基于特征结构的相干算法能够清晰地检测到三维地震数据体中大断层的分布情况, 而对于细小断层或裂缝的分辨率较低。

b. 基于小波多尺度分频瞬时相位的局部结构熵算法不仅能够检测到大的断层发育, 而且也能有效地显示细小断层及裂缝, 这对于油气的后期开采有重要的实际意义。

c. 局部结构熵算法可以对任意大小的分析窗进行不连续性的检测, 实际计算中选择的分析窗越大, 抗噪性越好, 但分辨率降低, 计算量增加。

另外, 文中算法并没有考虑沿不同的地震剖面倾角检测不连续性结构, 这可能会使成像结果没有达到尽可能高的分辨率, 对此问题有待于进一步讨论。

### 参考文献

- BAHORICH M S, FARMER S L. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features[J]. The Leading Edge, 1995, 14: 1053—1058.
- MARFURT K J, KIRLIN R L, FARMER S L, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm [J]. Geophysics, 1998, 63: 1150—1165.
- MARFURT K J, SUDHAKER V, GERSZTENKORN A, et al. Coherency calculations in the presence of structural dip [J]. Geophysics, 1999, 64: 104—111.
- GERSZTENKORN A, MARFURT K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping [J]. Geophysics, 1999, 64: 1468—1479.
- ISRAEL COHEN, RONALD R. COIFMAN. Local discontinuity measures for 3-D seismic data [J]. Geophysics, 2002, 67: 1933—1945.
- 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 小波变换与信号瞬时特征分析 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(6): 821—832.
- 王西文, 杨孔庆, 刘全新, 等. 基于小波变换的地震相干体算法的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(4): 328—331.
- 王西文, 杨孔庆, 周立宏, 等. 基于小波变换的地震相干体算法研究 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 847—853.