

基于局部相似度的非稳态相位校正方法

刘玉金^{*①} 李振春^① 郭 恺^②

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555; ^②中国石化石油物探技术研究院,江苏南京 210014)

刘玉金,李振春,郭恺. 基于局部相似度的非稳态相位校正方法. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 887~893

摘要 针对常规的常相位校正方法无法满足非稳态相位校正的精度要求,滑动时窗常相位校正方法虽然可以在一定程度上考虑相位的非稳态特性,但是其前提是相位变化分段平稳,因此该方法的精度有限,而且难以控制时窗大小,容易产生不稳定等问题。本文将相位估计看成最小二乘反演问题,在局部地震属性的框架下,根据最大方差模和相似系数的概念,利用零相位判别准则,实现了一种基于局部相似系数的非稳态相位校正方法。相对于滑动时窗常相位校正方法,本文方法精度更高、稳定性更好。理论模型和实际资料处理表明,本文方法可以有效实现信号的零相位化,改善叠加效果,提高地震资料的分辨率。

关键词 局部相似度 局部方差模 非稳态相位校正 最小二乘反演 局部地震属性

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

由于近地表低、降速带风化层的横向厚度和速度的变化,地震排列上炮点耦合、检波点耦合条件的差异等近地表因素,地下介质的非均一性和地下构造的复杂性等造成了地震子波相位随时间和空间变化^[1]。将地震子波校正到零相位,不仅可以改善叠加剖面的质量,而且能够有效提高资料的分辨率。因此,在常规地震数据处理中,相位校正方法研究一直受到人们的广泛关注。

Levy 等^[2]、Longbottom 等^[3] 和 White^[4] 在 Wiggins^[5,6] 的盲反褶积基础上,提出使输出地震数据非高斯性最强的常相位校正方法,相较 Wiggins 方法,这些方法自由参数少,算法更加稳定。为了考虑地震子波相位随时间变化的情况,Baan^[7] 采用滑动时窗方法对子波相位进行估计,但是该方法的有效前提是相位变化分段平稳。为了避免这一限制条件,Baan 等^[8,9] 进一步将相位估计看做一个最优化反演问题,利用局部方差模最大准则进行非稳态相位估计,从而提高相位估计的精度,改善相位校正的

稳定性。Baan 等^[10],Fomel^[11] 指出在缺少测井资料的情况下,可以采用地震道与其包络局部相似度最大的准则,估算非稳态数据子波的相位,该方法相对于局部方差模方法具有更大的动态范围,因此拾取的相位信息更加准确。周兴元^[12] 证明了常相位校正只是在不改变地震道包络的前提下改变子波的波形。白志信^[13] 基于常相位假设在频率域实现了最佳相位校正。陈必远等^[14] 针对子波相位受复杂因素的影响,提出了一种随时间、空间及频率变化的相位校正方法。郭向宇等^[15] 在分析已有各种子波处理方法优缺点的基础上,提出了一种新的估计混合相位子波相位的算法。李合群等^[16] 同时对相位和时差进行了局部调整。宋宗平等^[17] 在叠前道集中应用常相位校正技术,提高叠加剖面质量。国九英等^[18] 基于最大能量叠加法,提出一种地表一致性相位校正方法,采用迭代算法求取炮点、检波点的相位校正算子,对地震记录进行校正。高少武等^[19] 采用纯相位滤波器来逼近地表变化引起的相位变化,对地表一致性振幅处理和静校正处理后的地震数据进行了地表一致性相位校正。单联瑜等^[20] 提出一种新的相位校正判别准则,先用最大方差模方法对模

* 山东省青岛市中国石油大学工科楼 C 座地球科学与技术学院, 266555。Email: einsteinliu@126.com

本文于 2011 年 11 月 21 日收到,最终修改稿于 2012 年 9 月 7 日收到。

本项研究受国家 863 课题(2010AA0603223002)、国家科技重大专项课题(2011ZX05006-004)和中国石油大学(华东)优秀博士论文培育计划项目联合资助。

型的剩余相位进行校正,然后用解析法计算各道的相位校正角,从而实现精确的相位校正。

从以上讨论可以看出,前人的研究主要集中于常相位校正,当地震子波随时间和空间变化剧烈时,常相位校正方法无法得到正确的零相位子波。滑动时窗进行常相位校正虽然可以在一定程度上解决这一问题,但是由于受分段平稳条件的限制,估计出来的相位角不够准确,进行相位校正时容易出现不稳定现象。另外,滑动时窗方法的应用效果受时窗大小影响很大,而时窗的大小往往难以控制。为了解决这些问题,本文在局部地震属性^[21]的理论基础上,将各个时窗内的局部方差模和局部相似度计算看做整个地震剖面的最小二乘反演问题,利用零相位判别准则进行非稳态相位校正。最后通过理论模型和实际资料处理验证本文方法具有更高的精度和更好的稳定性。

2 方法原理

2.1 相位校正的基本原理

对地震数据应用一系列的常相位旋转,根据不同的判别准则,可以估计出数据的相位角。地震道 $x(t)$ 经过相位旋转后的表达式为

$$x_{\text{rot}}(t) = x(t)\cos\phi + H[x(t)]\sin\phi \quad (1)$$

式中: ϕ 为相位旋转角度,可以为常数,也可以随时间变化; $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换。采用不同的零相位判别准则,可以得到不同的相位校正方法,其中以最大方差模和相似系数准则比较常用。

最大方差模准则^[2~4,7]是指地震道经过相位旋转后方差模达到最大时对应的旋转角度为所求的相位角,该准则利用方差模来衡量地震道偏离高斯分布的程度,方差模越大,地震道的非高斯性越强,地震道的相位越接近于零相位。方差模的定义为

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i^4}{\left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right)^2} \quad (2)$$

式中 x_i 表示大小为 N 的时窗内地震振幅值,通过相位角扫描计算该时窗内的方差模,当方差模达到最大时所对应的相位角就是该时窗内子波的相位。

相似系数准则是指地震道经过相位旋转后与标准道的相似度达到最大时对应的旋转角度为所求的

相位角。标准道一般利用测井资料合成地震记录得到^[21]。当缺少测井资料时,可以选择地震道的包络作为标准道^[11]。如两个时间序列 a_i 和 b_i 的相似系数定义为

$$c[a, b] = \frac{\sum_{i=1}^N a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2 \sum_{i=1}^N b_i^2}} \quad (3)$$

而时间序列 a_i 和常数 1 的相似系数为

$$c[a, 1] = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N a_i^2}} \quad (4)$$

从式(2)和式(4)可以看出,方差模 κ 可以看做 x_i^2 和常数 1 相似度平方的倒数,也即

$$\kappa = \frac{1}{c[x_i^2, 1]^2} \quad (5)$$

当地震道经过相位旋转成为零相位信号时方差模达到最大,幅值的平方与常数信号的相关性达到最低,因此最大方差模准则可以与相似系数准则统一。本文利用相似系数的概念,运用零相位判别准则进行非稳态相位校正。从式(2)可以看出,用一个参数描述两个信号之间的相关性有一定的局限性,采用局部地震属性的思想,可以将式(3)中的相似系数改为随时间变化的函数,从而描述两个信号相似度的局部变化。

2.2 局部相似度

式(3)可以看做两个最小二乘反演问题解的乘积,即

$$c^2 = c_1 c_2 \quad (6)$$

$$c_1 = (\mathbf{a}^T \mathbf{a})^{-1} (\mathbf{a}^T \mathbf{b}) \quad (7)$$

$$c_2 = (\mathbf{b}^T \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{b}^T \mathbf{a}) \quad (8)$$

式中: \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 分别是信号 $a(t)$ 、 $b(t)$ 的向量表示; $\mathbf{x}^T \mathbf{y}$ 表示向量 \mathbf{x} 与 \mathbf{y} 点乘。由向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 的元素分别构造对角矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} ,对方程局部化后相当于对反演加入正则化条件,标量 c_1 和 c_2 变为向量 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 ,利用整型正则化,式(7)、式(8)表示成

$$\mathbf{c}_1 = [\lambda^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \lambda^2 \mathbf{I})]^{-1} \mathbf{S} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (9)$$

$$\mathbf{c}_2 = [\lambda^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}(\mathbf{B}^T \mathbf{B} - \lambda^2 \mathbf{I})]^{-1} \mathbf{S} \mathbf{B}^T \mathbf{a} \quad (10)$$

式中: \mathbf{S} 为平滑算子;向量 \mathbf{c}_1 和 \mathbf{c}_2 各元素对应相乘后得到随时间变化的局部相似度 \mathbf{c} 。关于整型正则化反演的具体细节可以参考文献[22]。利用相同的

思想,Fomel^[23]也定义了其他局部地震属性。

利用式(5)和局部相似度的思想,可以计算出地震数据的局部方差模或地震数据与其包络的局部相似度,分别应用最大方差模准则或最大相似系数准则,可实现对非稳态地震数据的相位估计。

2.3 非稳态相位校正方法

滑动时窗方法虽然可以在一定程度上解决相位随时间和空间变化的问题,但是受分段平稳假设条件的限制,无法对非稳态特征明显的地震数据进行准确的相位校正,而且时窗大小的选取十分困难,时窗太小会破坏相位校正判别准则中的统计学假设;时窗太大则会得到平稳变化的相位属性,与实际情况不符。本文提出的非稳态相位校正方法,只需要控制平滑算子的平滑半径就可以同时调整相位变化的局部性和稳定性,具有明显的优势。根据最大方差模准则和最大相似系数准则可以设计出两种不同的相位校正处理流程。

根据局部方差模进行非稳态相位校正的流程为:

- (1) 设定一定的相位角变化范围和变化间隔,对地震数据分别进行常相位校正;
- (2) 计算各相位角校正后信号的局部方差模;
- (3) 自动拾取局部方差模最大时对应的相位角,该角度即为该点处的局部相位;
- (4) 利用各点拾取的相位角进行相位旋转,即可得到非稳态相位校正后的结果。

根据局部相似系数进行非稳态相位校正的流程为:

- (1) 计算原信号的包络;
- (2) 设定一定的相位角变化范围和变化间隔,分别进行常相位校正;
- (3) 计算各相位角校正后的信号与原信号的包络之间的局部相似系数,并取该局部相似系数的倒数;
- (4) 自动拾取各点局部相似系数倒数最大时对应的相位角;
- (5) 将各点拾取的局部相位加上 90° ,则得到该点处的局部相位,对各点进行相位旋转,则得到非稳态相位校正后的结果。

基于局部相似系数的非稳态相位校正处理流程如图 1 所示。流程中计算局部相似系数的倒数的目的是为了得到动态范围更大的时变相位谱。

Fomel^[11]指出,相对于局部方差模相位估算方法,局部相似度方法具有更大的动态范围,更有利于正确拾取局部相位属性。因此本文将主要采用局部相似度方法进行非稳态相位校正,并与滑动时窗方法进行对比,以说明非稳态相位校正方法的优越性。

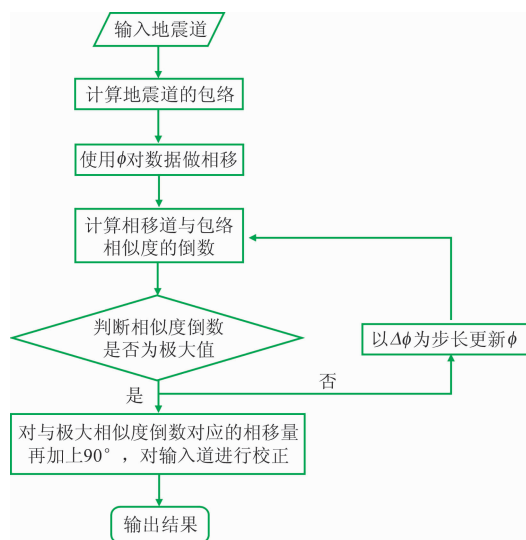


图 1 非稳态相位校正的处理流程图

3 数值试验

3.1 一维简单合成数据测试

为了验证非稳态相位校正处理流程的正确性,首先采用一维简单合成数据进行试算。原始地震道为 7 个零相位子波,对这 7 个零相位子波分别加入 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 线性递增的相移,得到合成后的地震数据如图 2a 所示。该地震道共 350 个采样点,采样间隔为 2ms,图 2a 中实线表示线性相移后的地震道,虚线表示该地震道的包络。分别采用滑动时窗法、局部方差模法和局部相似度法对该地震道进行相位校正。在图 2b~图 2d 中,原始地震道用虚线表示,相位校正结果用实线表示。首先采用大小为 0.09s 的时窗进行滑动时窗相位校正,为了避免相位角插值,采用逐点滑动时窗,校正结果如图 2b 实线所示。从图 2b 中可以看出,7 个子波都已校正到零相位,但是如箭头所示位置信号出现突变,相邻子波衔接处发生抖动。为了解决这一问题,分别采用局部方差模和局部相似度方法进行非稳态相位校正,校正结果如图 2c、图 2d 实线所示,从图中可以看出,非稳态相位校正方法比滑动时窗方法更加稳定,

校正结果变化更加连续自然。为了进一步说明这三种方法相位校正的精度,分别求出原始地震道与相位校正结果的差值,如图 2e 所示,图中蓝色、红色、粉红色分别表示滑动时窗方法、局部方差模方法、局部相似度方法各离散点相位校正的误差,可以看出,局部方差模和局部相似度方法更加稳定,精度更高。

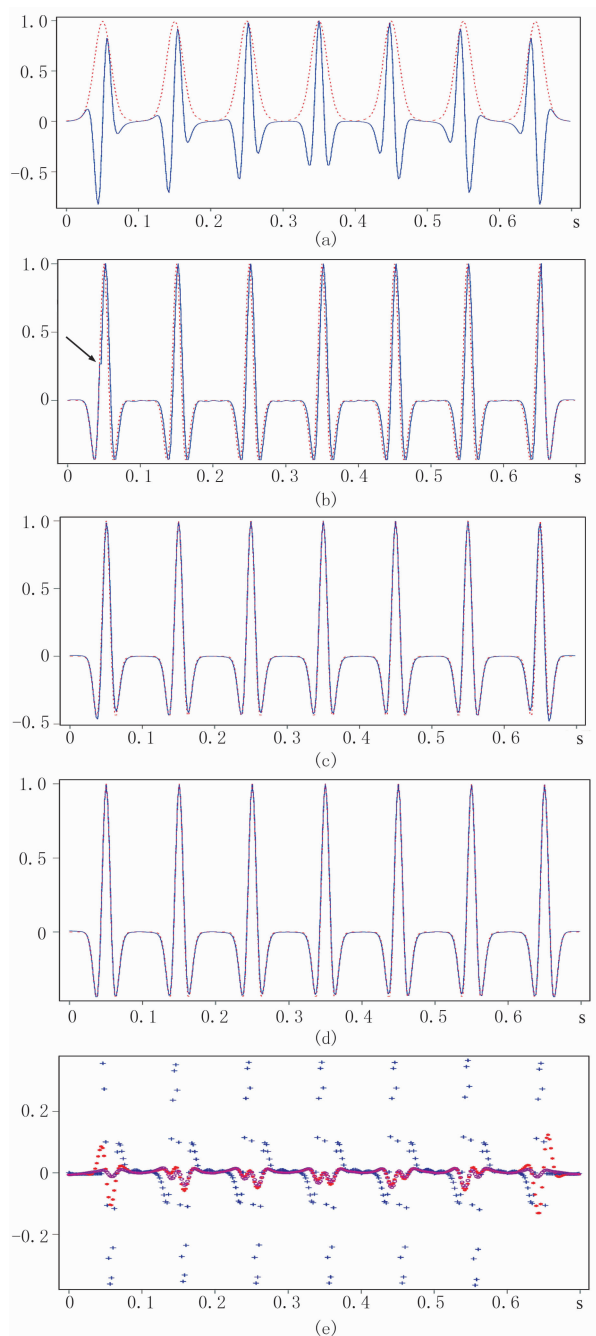


图 2 一维简单合成数据相位校正结果

(a) 相位线性变化的地震道; (b) 滑动时窗方法; (c) 局部方差模方法; (d) 局部相似度方法; (e) 三种相位校正方法的误差

另外,对比图 2c 和图 2d 可以看出,两种非稳态相位校正方法校正结果基本相同,但是在边界处局部相似度方法更加合理(图 2e),这是由于局部方差模法的动态变化范围更小,边界处相位拾取不准确导致的。为了说明这一问题,分别显示该地震道局部方差模和局部相似度的倒数随相位角的变化,如图 3a 和图 3b 所示,从图中可以看出,局部相似度方法波峰范围更小,波谷范围更大,更容易拾取极大值,因此更易于拾取正确的相位角信息,图中黑线表示拾取的相位角。

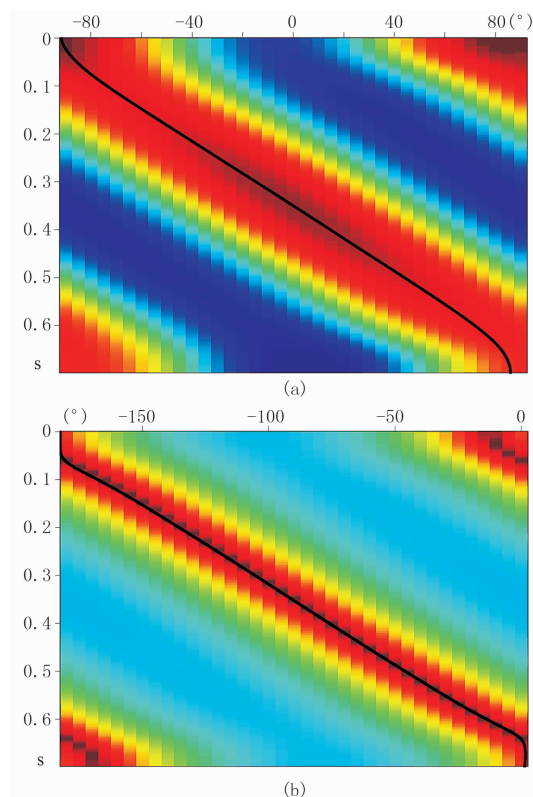


图 3 局部方差模(a)与局部相似度(b)的动态范围对比
黑线为拾取的相位,红色表示波峰,蓝色表示波谷

3.2 一维复杂合成数据测试

为了进一步验证本文相位校正处理流程对非稳态数据的适应性,采用一维复杂合成数据进行测试,该道数据来自文献[9],由实际反射系数序列和两个重叠的雷克子波褶积合成,两个子波的频率由零时刻的 30Hz 和 60Hz 线性变化到最终时刻的 15Hz 和 30Hz,相位由 -45° 线性变化到 $+45^\circ$ 。图 4a 中实线为合成的地震道,虚线为该地震道的包络,该道数据共有 1024 个采样点,采样间隔为 2ms。从图中可以看出,合成子波的振幅和相位变化复杂,非稳态特征非常明显。图 4b 为逐点滑动时窗方法相位校正

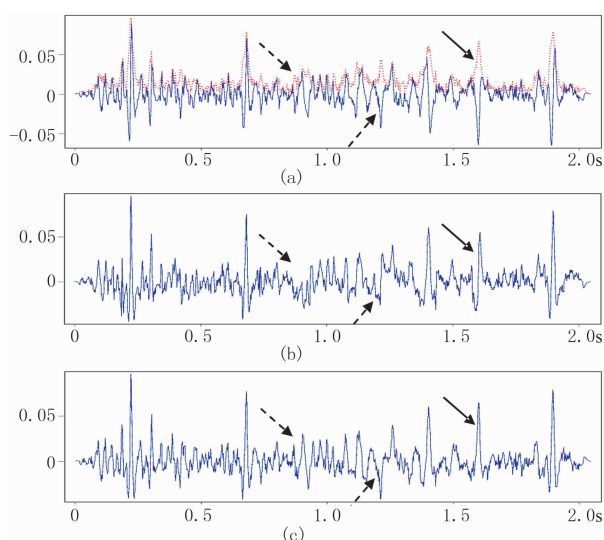


图 4 一维复杂合成数据相位校正结果
(a)输入地震道;(b)滑动时窗方法;(c)局部相似度方法

后的结果,时窗大小为 0.06s,从图中可以看出,虚线箭头所示位置改变了原有子波正确的相位信息,而实线箭头所示位置子波没有校正到零相位;图 4c 为局部相似度方法非稳态相位校正结果,从图中可以看出,虚线箭头所示位置没有改变子波的正确相位,而实线箭头所示位置子波校正到零相位,从而验证了非稳态相位校正方法可以更好地处理非稳态地震数据。

3.3 二维模型相位校正

为了验证二维非稳态相位校正算法的正确性和有效性,采用凹陷模型叠加剖面进行试算,该模型数据共有 361 个 CDP,750 个时间采样点,CDP 间隔为 15m,时间采样间隔为 4ms,如图 5a 所示。利用该模型的均方根速度场合成时一空变的相位场,如图 5b 所示,采用该相位场对原始数据进行相移,得

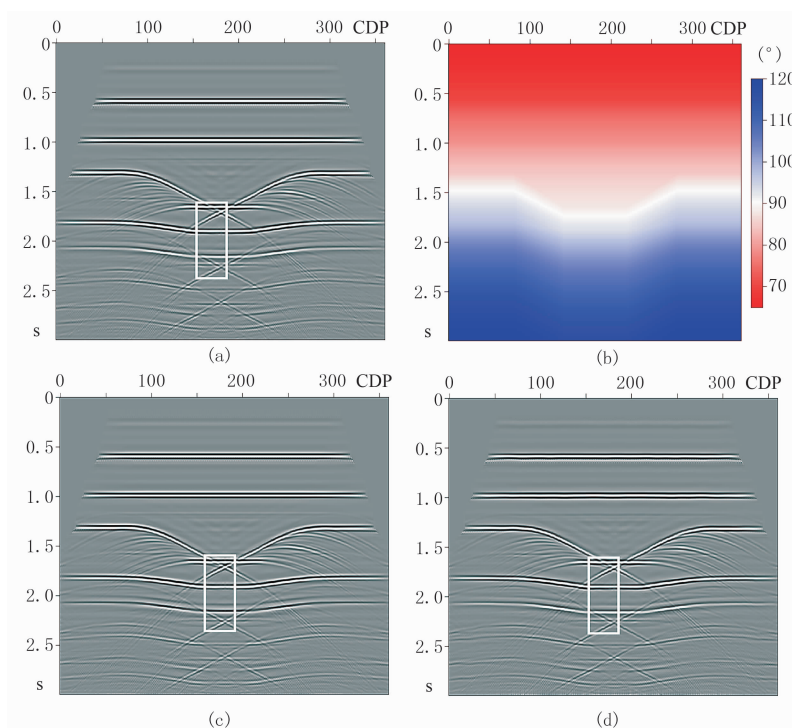


图 5 二维凹陷模型相位校正结果

(a)原始叠加剖面;(b)相位场;(c)采用图 b 所示相位场进行相移后的叠加剖面;(d)局部相似度非稳态相位校正剖面

到如图 5c 所示的叠加剖面,从图中可以看出,主要反射同相轴都变为非零相位,而且子波的相位随时间和空间变化。图 5d 为应用局部相似度方法进行非稳态相位校正的结果,从图中可以看出,各反射同相轴校回到零相位。分别对图 5a、图 5c、图 5d 方框内数据进行局部放大,如图 6 所示,从图中主要同相轴可以看出,相位校正后的结果与原始叠加剖面基

本相同,也就验证了二维非稳态相位校正算法的正确性。

3.4 二维实际资料相位校正

为了验证二维非稳态相位校正算法对二维实际资料的有效性,采用 A 探区一条二维叠前时间偏移剖面进行测试,该数据如图 7a 所示。采用局部相似度方法估算该数据的局部相位,如图 7c 所示,从图

中可以看出,该数据的相位随时间、空间变化明显,具有很强的非稳态性。利用估计出来的局部相位属性进行非稳态相位校正,校正结果如图 7b 所示。对比相位校正前、后主要反射同相轴可以看出,经过非稳态相位校正以后,非零相位同相轴校正到零相位。

对方框内数据进行局部放大,如图 8a、图 8b 所示,3.12s 处的强反射同相轴以及 3.35s 处的弱反射同相轴都校正到零相位,校正后的剖面同相轴连续性更好、分辨率更高,从而验证了本文方法对实际资料的适应性。

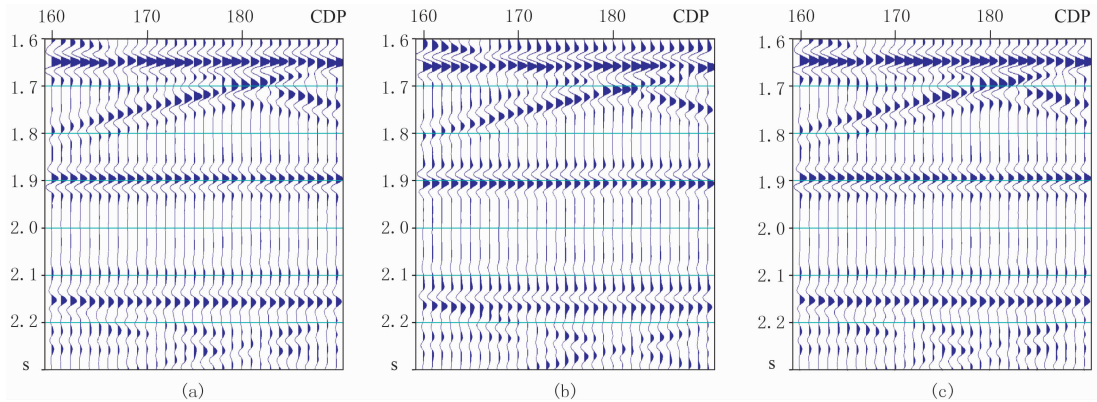


图 6 图 5 局部放大图

(a)原始叠加剖面;(b)相移后的叠加剖面;(c)局部相似度非稳态相位校正剖面

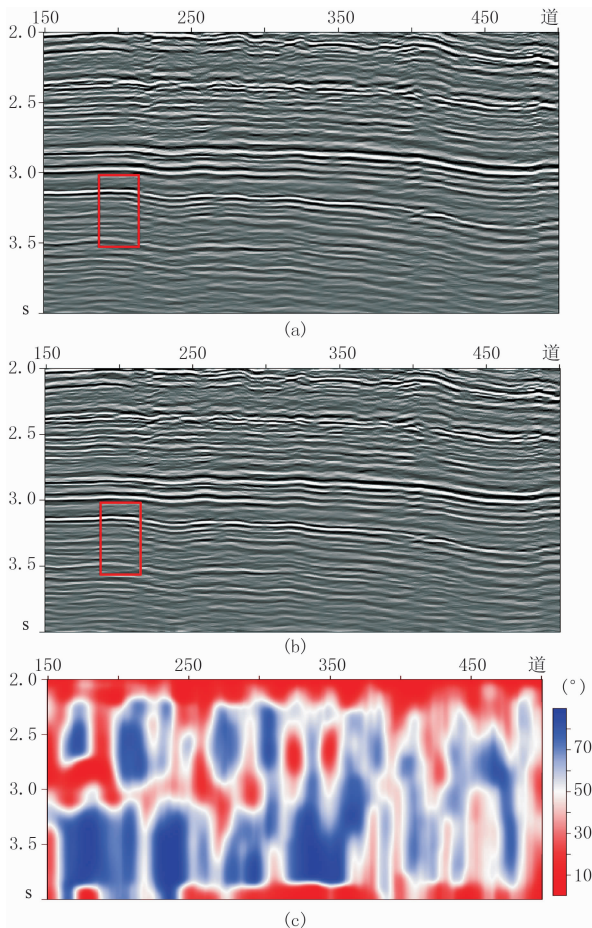


图 7 二维实际资料相位校正结果

(a)原始叠前时间偏移剖面;(b)局部相似度方法;
(c)局部相似度方法估计的局部相位信息

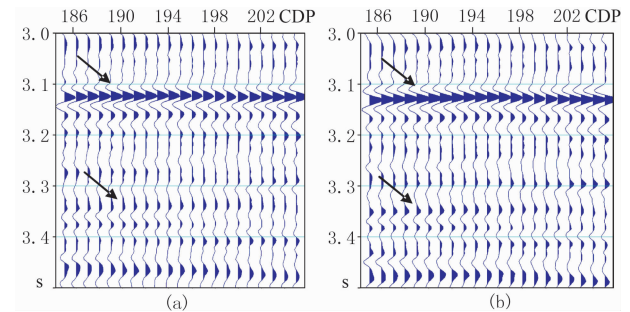


图 8 图 7 局部放大对比

(a)原始叠前时间偏移剖面;(b)局部相似度方法相位校正后的结果

4 结论

子波的零相位化是常规地震数据处理中一个非常重要的环节。本文给出基于局部相似度的非稳态相位校正公式及程序实现。从理论模型和实际资料处理结果可以得出如下主要结论:

(1) 基于滑动时窗的相位校正方法的前提是信号为分段平稳,对于强非稳态信号,不仅难以控制时窗大小,而且无法准确估计子波的相位,容易产生不稳定。

(2) 采用局部方差模方法和局部相似度方法拾取的局部相位考虑了子波相位的时变性,更接近实际情况;相对于滑动时窗方法,利用这两种方法估计的局部相位属性进行非稳态相位校正更加稳定

可靠。

(3)局部方差模方法利用不同相移量信号幅值的平方与常数信号之间的局部相似度,而局部相似度方法利用不同相移量信号与原始信号包络之间的局部相似度,局部相似度方法的动态变化范围更大,对信号的相移更为敏感,因此估计出来的局部相位更加准确,更有利于进行零相位校正。

(4)模型和实际资料相位校正处理结果表明,本文提出的非稳态相位校正方法可以有效地对子波进行零相位化,从而改善同相轴的连续性,提高地震数据的分辨率。

由于最大方差模准则有效的前提是假定反射系数序列符合随机超高斯分布,而最大相似度准则有效的前提是假定零相位子波与其包络的相似度最大,这些前提都有其固有缺陷,因此有必要进一步发展更加真实可靠的零相位判别准则,提高相位校正的精度,这对提高地震资料的信噪比和分辨率都有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李振春,王希萍,韩文功.地震数据处理中的相位校正技术综述.地球物理学进展,2008,23(3):768~774
Li Zhenchun, Wang Xiping, Han Wengong. Review of phase correction in seismic data processing. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(3): 768~774
- [2] Levy S and Oldenburg D W. Automatic phase correction of common-midpoint stacked data. *Geophysics*, 1987, 52(1):51~59
- [3] Longbottom J, Walden A T and White R E. Principles and application of maximum kurtosis phase estimation. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(2): 115~138
- [4] White R E. Maximum kurtosis phase correction. *Geophysical Journal International*, 1988, 95(2), 371~389
- [5] Wiggins R. Minimum entropy deconvolution. *Geoprospection*, 1978, 16(1): 21~35
- [6] Wiggins R. Entropy guided deconvolution. *Geophysics*, 1985, 50(12): 2720~2726
- [7] Baan M V D. Acoustic wave propagation in one-dimensional random media: The wave localization approach. *Geophysical Journal International*, 2001, 145(3): 631~646
- [8] Baan M V D. Time-varying wavelet estimation and deconvolution by kurtosis maximization. *Geophysics*, 2008, 73(2): V11~V18
- [9] Baan M V D and Fomel S. Nonstationary phase estimation using regularized local kurtosis maximization. *Geophysics*, 2009, 74(6):A75~A80
- [10] Baan M V D, Perz M and Fomel S. Nonstationary phase estimation for analysis of wavelet character. *EAGE Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, D020
- [11] Fomel S. Local similarity with the envelope as a seismic phase detector. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 1555~1559
- [12] 周兴元. 常相位校正. 石油地球物理勘探, 1989, 24(2):119~129
Zhou Xingyuan. Constant phase correction. *OGP*, 1989, 24(2): 119~129
- [13] 白志信. 子波剩余相位的校正. 中国煤田地质, 1996, 8(2):48~50
Bai Zhixin. Wavelet residual phase correction. *China Coal Geology*, 1996, 8(2):48~50
- [14] 陈必远等. 时空变分频常相位校正. 石油地球物理勘探, 1997, 32(增刊1):103~108
- [15] 郭向宇等. 混合相位子波的相位估算及校正. 石油地球物理勘探, 1998, 33(2):214~221
Guo Xiangyu et al. Estimation and correction of mixed phase wavelet phase. *OGP*, 1998, 33(2):214~221
- [16] 李合群,周兴元. 时差、常相位校正及加权叠加. 石油地球物理勘探, 2000, 35(4):415~418
Li Hequn, Zhou Xingyuan. Moveout and constant phase corrections along with weighted stacking. *OGP*, 2000, 35(4):415~418
- [17] 宋宗平等. 叠前常相位校正. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(2):69~70
Song Zongping et al. Prestack constant phase correction. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(2):69~70
- [18] 国九英,周兴元. 二维及三维地表一致性相位校正. 石油地球物理勘探, 1995, 30(3):345~350
Guo Jiuying, Zhou Xingyuan. Surface consistent phase correction in 2-D and 3-D domains. *OGP*, 1995, 30(3):345~350
- [19] 高少武等. 反射波地表一致性相位校正. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4):480~487
Gao Shaowu et al. Surface consistent phase correction for reflection wave. *OGP*, 2001, 36(4):480~487
- [20] 单联瑜等. 相位校正判别准则的改进及应用效果分析. 石油物探, 2008, 47(3):219~224
Shan Lianyu. Improvement of discriminate criteria for phase correction and its application effect. *GPP*, 2008, 47(3):219~224
- [21] 姚逢昌. 振幅谱补偿和相位校正. 石油物探, 1990, 29(1):46~57
Yao Fengchang. Amplitude spectra compensation and phase correction. *GPP*, 1990, 29(1):46~57
- [22] Fomel S. Shaping regularization in geophysical-estimation problems. *Geophysics*, 2007, 72(2):R29~R36
- [23] Fomel S. Local seismic attributes. *Geophysics*, 2007, 72(3):A29~A33

(本文编辑:金文昱)