

高阶高分辨率 Radon 变换地震数据重建方法

薛亚茹*^① 唐欢欢^{①②} 陈小宏^①

①中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

②中国科学院测量与地球物理研究所计算与勘探地球物理研究中心,湖北武汉 430077)

薛亚茹,唐欢欢,陈小宏. 高阶高分辨率 Radon 变换地震数据重建方法. 石油地球物理勘探,2014,49(1):95-100,131.

摘要 地震数据缺失会影响处理和解释结果。本文基于 Radon 变换地震数据重建并结合地震波同相轴横向连续性,提出高阶高分辨率 Radon 变换地震数据重建方法。该方法将正交多项式变换和 Radon 变换结合,通过正交多项式变换拟合地震波振幅随炮检距变化特性,改进了传统 Radon 变换只考虑地震道叠加特性的缺陷,增加了振幅变化的斜率和曲率信息,保留了地震波 AVO 特性,有利于地震波振幅信息在横向变化情况下缺失地震数据的重建。理论模型和实际数据处理结果表明,该方法可以克服空间假频,实现缺失道数据重建,并保留振幅 AVO 信息。

关键词 高阶高分辨 Radon 变换 正交多项式变换 AVO 数据重建

中图分类号:P631 文献标识码:A

1 引言

不规则地震数据会使数据后续处理产生噪声,降低信噪比,进而影响多道处理技术的应用。基于 Fourier 变换的数据重建是一种常用的方法,此方法利用不完全数据反演出完全数据的 Fourier 系数,再通过 Fourier 反变换得到重建数据。由于该方法要求数据在空间上是带限信号,且涉及不适定问题求解,因此需要引入正则化系数^[1,2]。由于待重建信号数据有时会出现空间假频现象,Spitz^[3]、Naghizadeh 等^[4]、Schonewille 等^[5]提出选取稀疏频谱模型解决假频问题。他们假设每一频率上的空间信号是由有限个复合谐波组成,因此基于 Fourier 变换的数据重建更适用于线性同相轴。

基于 Hampson^[6]提出的抛物 Radon 变换,Kabir 等^[7]利用 Radon 反变换填补缺失地震道数据;Sacchi 等^[8]利用高分辨率 Radon 变换对近炮检距地震数据外推获得较好的效果,但只适用于弯曲同相轴的地震数据重建。Radon 变换数据重建的基

本原理是利用抛物 Radon 变换获得地震数据同相轴的曲率信息,再通过反变换填补缺失数据信息。目前大部分研究都致力于消除假频^[9]以及提高分辨率。Herrmann 等^[10]提出了一种压制假频和实现稳定数据重建的建议。Sacchi 等^[11]提出用压缩曲率参数提高 Radon 分辨率的方法,该方法可以重建接收点以外的数据。Greedy Radon 变换^[12]是另一种稀疏 Radon 变换,它的基本思想与反假频 Fourier 变换^[13,14]类似,通过寻找同相轴主要曲率参数,获得高分辨率的 Radon 参数。但是当振幅随炮检距变化时,这些方法的分辨率都会降低。Wang 等^[15]结合 Greedy Radon 变换与局部 Radon 变换两种方法,简化积分路径与振幅偏差,取得较好的数据重建效果。Wang^[16]将地震数据分解为两个 Radon 剖面,一个是常规 Radon 剖面,另一个表征同相轴极性剖面,该方法比稀疏 Radon 变换更好地保存了 AVO 信息,取得了较好的重建效果。

以上数据重建方法通过提高 Radon 变换分辨率填补缺失数据,但是分辨率越高,比如某一同相轴只用一个曲率参数描述时,其反变换是振幅不变的

*北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,102249。Email: xueyaru@cup.edu.cn

本文于 2012 年 10 月 16 日收到,最终修改稿于 2013 年 12 月 11 日收到。

本研究受国家自然科学基金项目(41204095 和 41004056)、中国石油大学(北京)基础学科研究基金项目(JCXX-2011-08)和教育部留学回国人员科研启动基金联合资助。

同相轴,丢失了振幅变化信息,因此如何保留同相轴振幅变化信息是地震数据重建需要解决的问题。地震数据中同相轴振幅沿着空间方向是平滑的, Johasen 等^[17]提出用正交多项式变换表征其振幅变化信息。在正交多项式变换谱中,数据大部分能量集中在前几个正交多项式系数处,因而可以去除高阶系数以提高信噪比^[18]。但是正交多项式变换只能用于同相轴是水平的情况,当数据没有经过正常时差校正时,这个正交多项式的振幅谱将失去其物理意义。

Radon 变换可以分辨不同同相轴的曲率,但是它不能很好描述振幅变化情况,因为它只包含了振幅叠加信息而不包括其变化的信息。正交多项式变换包含了 AVO 信息,但是没有曲率参数。本文将两者结合提出高阶高分辨率 Radon 变换,将 Radon 变换扩展到高阶,使其包含了振幅变化信息。利用该方法对 AVO 数据进行重建,可以得到比高分辨率 Radon 变换数据重建更为精确的结果。

2 方法原理及实现

2.1 正交多项式变换原理

地震数据 $d(t, x)$ 在某时刻的振幅变化可以用正交多项式拟合^[17],即

$$d(t, x) = \sum_{j=0}^N c(t, j) p_j(x) \quad (1)$$

其中 $p_j(x)$ 是 j 阶代数多项式, $\{p_j(x), j=0, 1, \dots, N\}$ 是由 $N+1$ 个炮检距坐标 x 确定的单位正交多项式集,且满足

$$p_i(x) p_j(x) = \delta_{ij} \quad (2)$$

式中: δ_{ij} 为脉冲函数; $c(t, j)$ 表示 t 时刻振幅随炮检距变化的 j 阶正交多项式的分解系数,称之为正交多项式系数谱。利用最小二乘法可求得系数

$$c(t, j) = \sum_{i=0}^N d(t, x_i) p_j(x_i) \quad (3)$$

在正交多项式系数谱中

$$c(t, 0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^N d(t, x_i) \quad (4)$$

它正比于水平方向地震道振幅的叠加; $c(t, 1)$ 和 $c(t, 2)$ 分别代表水平方向同相轴振幅的斜率和曲率信息。前几阶正交多项式系数包含了振幅的主要能量信息,滤除高阶系数不但较好地压制噪声而且能

保留 AVO 信息。

正交多项式拟合是实现数据插值常用的一种方法。假设在炮检距 $[a, b]$ 间的数据缺失,在缺失炮检距坐标处构造完备正交多项式集 $\{p_j(x), j=0, 1, \dots, N\}$, 构成缺失数据的完备正交多项式空间,通过正交多项式变换获得缺失数据的正交多项式谱 $c(t, j)$, 该谱描述了同相轴振幅随着炮检距变化的多项式特性。根据该特性,可以在新的炮检距坐标 $\{\hat{x}_i, i=0, 1, \dots, N\}$ 处实现数据的插值

$$\hat{d}(t, \hat{x}) = \sum_{j=0}^N c(t, j) p_j(\hat{x}) \quad (5)$$

利用该方法也可以外推零炮检距地震道信息^[19]。

需要注意的是正交多项式变换的变换空间是由单位正交多项式构成,根据 Pasval 定理,正交多项式谱能量等于地震数据能量

$$\sum_{i=0}^N d^2(t, x_i) = \sum_{j=0}^N c^2(t, j) \quad (6)$$

2.2 高阶 Radon 变换

Radon 变换根据积分路径不同,可以分为线性 Radon 变换、抛物 Radon 变换和双曲 Radon 变换。本文以抛物 Radon 变换为例,给出高阶抛物 Radon 变换的数学模型及物理解释,同理可推导出高阶线性和双曲 Radon 变换。

抛物 Radon 变换是沿着抛物线轨迹对地震道振幅的求和运算,即

$$m(\tau, q) = \sum_{i=0}^N d(t = \tau + qx_i^2, x_i) \quad (7)$$

其实质是对不同曲率同相轴振幅的叠加运算,当 $q=0$ 时

$$m(\tau, 0) = \sum_{i=0}^N d(t = \tau, x_i) \quad (8)$$

与式(4)只相差一个比例因子。因此可以看出抛物 Radon 变换是沿不同曲率的抛物路径对地震数据叠加,获得了数据的叠加特性;正交多项式变换沿水平方向对地震道数据进行正交多项式变换,获得了地震道振幅的叠加,斜率和曲率等多项式特性,可以较好地描述振幅的变化特性。将 Radon 变换的方向特性和正交多项式变换的振幅描述优势结合,可以得到高阶 Radon 变换

$$m_j(\tau, q) = \sum_{i=0}^N d(t = \tau + qx_i^2, x_i) p_j(x_i) \quad (9)$$

式(9)表明, $m_j(\tau, q)$ 描述了在时刻 τ 沿曲率 q 的抛

物路径上地震数据振幅的第 j 阶正交多项式分解系数,从而实现地震数据任意时刻沿不同曲率路径的正交多项式变换。而 $m_0(\tau, q)$ 表示沿不同曲率路径对地震道的叠加,与常规 Radon 变换仅有一个比例因子之差; $m_1(\tau, q)$ 得到的是不同曲率地震道的平均梯度,称之为梯度剖面;同理 $m_2(\tau, q)$ 描述了地震道的曲率特性,称之为曲率剖面。依次类推,可以获得其他更高阶的多项式特性剖面。

2.3 高阶高分辨 Radon 变换地震数据重建

高阶抛物 Radon 变换的物理意义明确,而且 $\{p_j(x), j=0, 1, \dots, N\}$ 是一组正交多项式,因此由式(9)可得到高阶 Radon 变换的反变换形式

$$d(t, x) = \sum_q \sum_j m_j(\tau = t - qx^2, q) p_j(x) \quad (10)$$

式(10)表明,高阶 Radon 变换将地震数据表征为正交多项式的线性组合,不同阶 Radon 剖面表明不同阶多项式的加权重。

通常地震道振幅的变换信息可以用较少的前几阶系数表征^[17],尤其前三个系数是 AVO 分析的重要依据,因此文中只考虑信息最重要的前三阶 Radon 变换,用矩阵形式表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= \mathbf{L}_0 \mathbf{m}_0 + \mathbf{L}_1 \mathbf{m}_1 + \mathbf{L}_2 \mathbf{m}_2 \\ &= (\mathbf{L}_0 \quad \mathbf{L}_1 \quad \mathbf{L}_2) \begin{pmatrix} \mathbf{m}_0 \\ \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{Lm} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{L}_0, \mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$ 分别为叠加算子(与 Radon 变换中算子一样)、梯度算子和曲率算子。与 Radon 变换相比,式(11)将 Radon 变换进行了延拓,补充了振幅的高阶多项式特性,有利于保留同相轴的真振幅。

高阶 Radon 变换是一个欠定问题, Radon 参数多于已知数据,本文采用稀疏反演^[8,20]方法,获得高分辨率的高阶 Radon 变换,从而有利于实现数据内插与外推。构造代价函数

$$\mathbf{J}(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d} - \mathbf{Lm})\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{W}_m \mathbf{m}\|_2^2 \quad (12)$$

式中: \mathbf{W}_d 是数据加权对角矩阵,反映数据的标准方差; \mathbf{W}_m 是模型加权对角矩阵,对不同的模型施以适当的加权可以获得稀疏模型参数。通常

$$[\mathbf{W}_m]_{ii} = \frac{1}{\sqrt{|m_i|}} \quad (13)$$

利用最小二乘加权迭代法求解代价函数式(12),在每一次迭代过程中,能量较大的 $|m_i|^2$ 参数被保留下来,而能量较小的参数被压制,从而获得高分辨率

Radon 参数。

在阶 Radon 变换中,数据被分解成三个 Radon 子剖面 $\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$,分别表征了同相轴的不同特性,如果仍然采用上述方法反演,不同 Radon 子剖面的模型加权矩阵不同,将会破坏同一同相轴不同 $\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ 的比例关系,使得 $\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ 失去其物理意义,因此对不同 Radon 子剖面应采用统一的模型加权矩阵。本文利用 Radon 域能量分布特性确定模型加权矩阵。由式(6)可以推导出 Radon 域数据的能量 $E(\tau, q)$ 与子 Radon 剖面的关系为

$$E(\tau, q) = \sum_{j=0}^2 m_j^2(\tau, q) \quad (14)$$

式中 $E(\tau, q)$ 反映了 τ 时刻,沿曲率 q 方向数据的能量分布。依据不同时刻同相轴能量随 Radon 参数的分布特性,获得模型加权矩阵

$$[\mathbf{W}_m]_{ii} = \frac{1}{\sqrt{E_i}} \quad (15)$$

E_i 表示某时刻第 i 个 Radon 参数的能量。经过该加权矩阵约束,能量大的同相轴曲率参数被保留下来,而能量小的曲率参数会被压制。用上述加权矩阵代替高分辨率 Radon 变换的加权矩阵,可获得高阶高分辨率 Radon 变换,并保证了各阶 Radon 子剖面的相对振幅关系。

高阶高分辨率 Radon 变换包含了同相轴的叠加信息和振幅变化的各阶多项式特性,与多项式变换同理,依赖于这些信息可以实现缺失数据的重建及外推。

3 理论模型与实际资料处理试验

3.1 理论模型

为验证本文方法的有效性,设计两个理论模型。其一如图 1a 所示,该地震记录由主频为 40 Hz 的 Ricker 子波合成,包含 51 道,道间距为 10m,每道 250 个采样点,采样间隔为 4ms,最小视速度为 1300m/s,三个同相轴分别表示出不同的振幅变化特性。图 1b 为缺失 1~10 道近炮检距数据的模型;高分辨率 Radon 变换(high resolution Radon transform, HR)方法和高阶高分辨率 Radon 变换(high order high resolution Radon transform, HOHR)方法重建结果分别如图 1c 和图 1d 所示,可以看出 HOHR 方法重建结果更接近真实数据。图 1e 和图 1f 为 HR 方法

和 HOHR 方法重建结果与原始模型的误差剖面,从误差剖面也可以看出 HOHR 方法重建效果更为精确,说明 HOHR 方法可以更好地实现数据外推,并恢复数据的 AVO 特性。

第二个理论模型是规则缺失模型。原始数据如图 2a 所示,每隔两道缺失一道获得缺失数据如图 2c 所示。图 2b 和图 2d 分别是原始数据和缺失数据的 $f-k$ 谱,可以看出缺失后数据出现假频。对该模型数据用 HR 和 HOHR 方法分别进行重建,结果如图 2e 和图 2g 所示,同相轴振幅变化特性均得到较好恢复。对比两种方法的 $f-k$ 谱(图 2f 和图 2h),可以看出,重建后假频被很好地压制,但是

HOHR 方法更好地保持了数据的能量变化。

3.2 实际资料处理试验

图 3a 为墨西哥湾一条实际二维叠前单炮地震资料隔道抽样结果,共 50 道,每道 500 个采样点,采样间隔为 4ms。HR 和 HOHR 方法重建结果分别如图 3b 和图 3c 所示。可以看出 HOHR 方法重建出的地震同相轴振幅变化特性更为清晰,解决了当振幅随炮检距变化时地震数据重建分辨率降低问题。图 3d 和图 3e 分别为 HR 方法和 HOHR 方法重建结果与实际数据的误差剖面,对比可以看出,HOHR 方法较好地保留了地震数据能量变化,而 HR 方法残留了较多的能量。

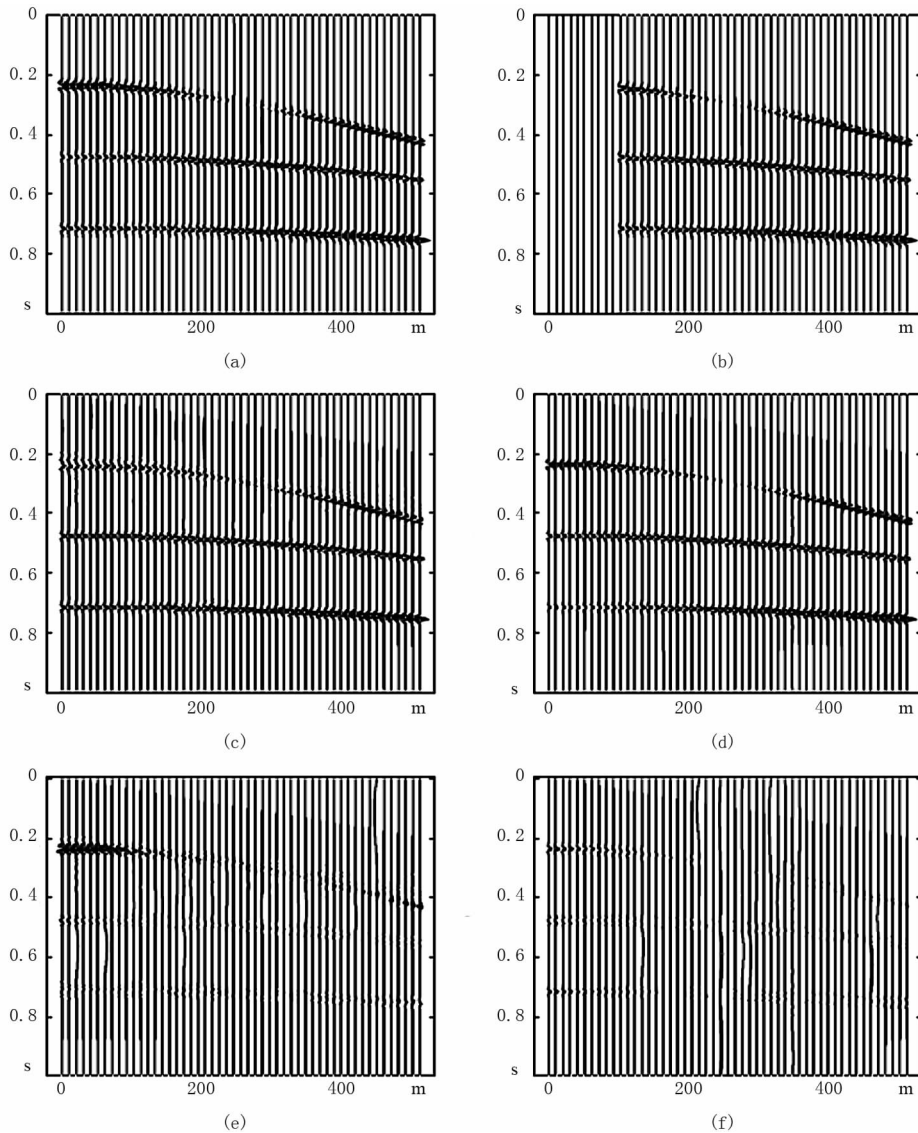


图 1 近炮检距数据缺失模型

(a)原始地震数据;(b)近炮检距缺失数据;(c)HR方法重建结果;(d)HOHR方法重建结果;
(e)HR方法误差剖面;(f)HOHR方法误差剖面

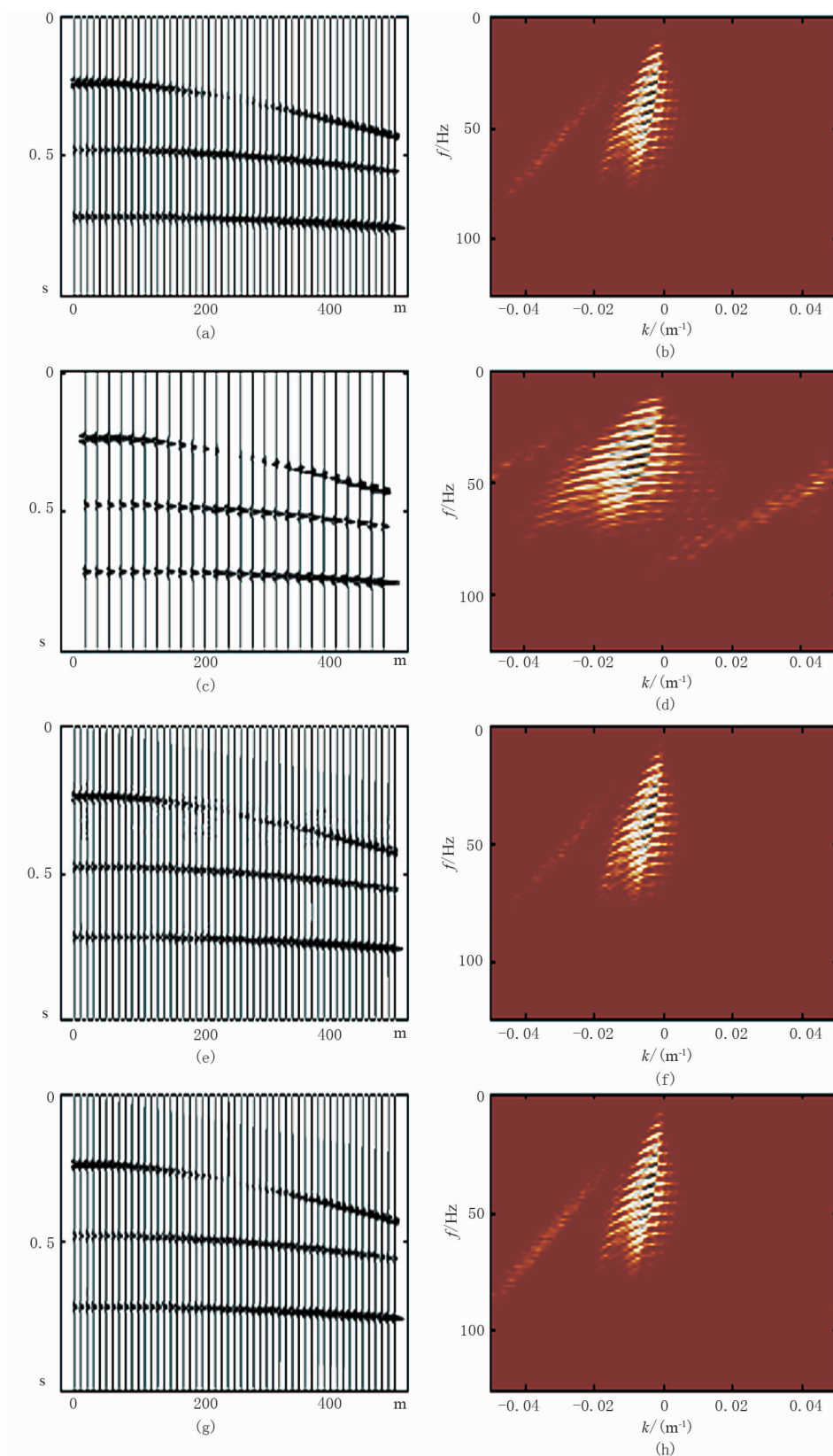


图 2 规则缺失数据模型

(a)原始地震数据; (b)图 a 数据的 $f-k$ 谱; (c)规则缺失地震数据; (d)图 c 数据的 $f-k$ 谱; (e)HR 方法重建结果; (f)图 e 数据的 $f-k$ 谱; (g)HOHR 方法重建结果; (h)图 g 数据的 $f-k$ 谱

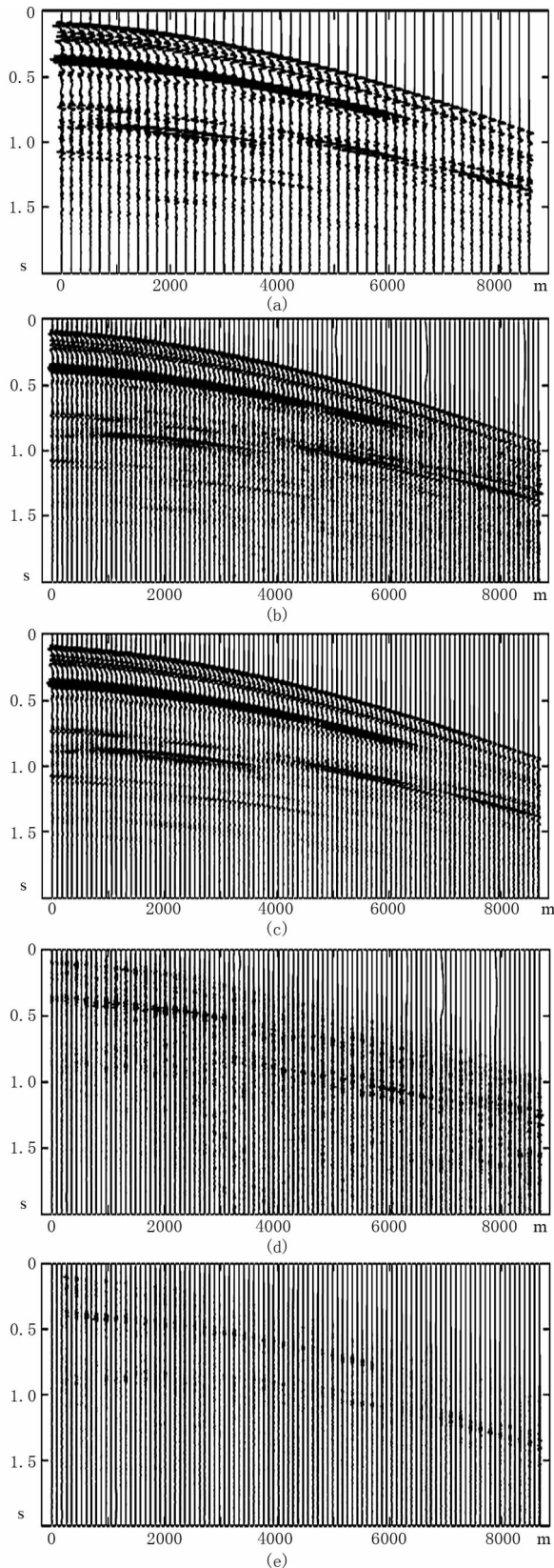


图3 实际资料处理结果

(a)原始不规则地震记录;(b)HR重建结果;(c)HOHR重建结果;
(d)HR方法误差剖面;(e)HOHR方法误差剖面

4 结论

本文将 Radon 变换和正交多项式变换相结合,提出高阶高分辨率 Radon 变换方法,实现缺失地震数据反演重建。常规 Radon 变换数据重建方法适用于地震数据沿着炮检距方向振幅变化较小的情况,高阶 Radon 变换考虑了振幅的横向变化特性,有利于保留真振幅,对 AVO 数据进行重建可以取得较好的效果。

高阶 Radon 变换模型参数规模由多项式的阶数决定,是常规 Radon 变换的若干倍,因此计算量较大。由于正交多项式变换空间是完备正交空间,完全可以表征同相轴 AVO 特性,Radon 参数仅表示其曲率参数,因此 Radon 参数不需满足采样定理。只提取主要的 Radon 参数将会大大压缩反演空间,提高计算效率。

参考文献

- [1] Duijndam A J W, Schonewille M, Hindriks K. Reconstruction of seismic signals,irregularly sampled along on spatial coordinate. *Geophysics*,1999,64(2): 24-38.
- [2] Liu B,Sacchi M D. Minimum DFT weighted norm interpolation of seismic data using FFT. *CSEG Geophysics Expanded Abstract*,2002,18-23.
- [3] Spitz S. Seismic trace interpolation in the f-x domain. *Geophysics*,1991,56(6):785-794.
- [4] Naghizadeh M,Sacchi D. Sampling considerations for band-limited Fourier reconstruction of aliased seismic data. *71st EAGE Conference & Exhibition*,2009, P242.
- [5] Schonewille M,Klaedtke A,Vigner A. Anti-aliasing, anti-leakage Fourier transform. *71st EAGE Conference & Exhibition*,2009.
- [6] Hampson D. Inverse velocity stacking for multiple elimination. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*,1986,22(1):44-45.
- [7] Kabir M M N,Verschuur D J. Restoration of missing offsets by parabolic Radon transform. *Geophysical Prospecting*,1995,43(3):347-368.
- [8] Sacchi M D,Ulrych T J. Improving resolution of Radon operators using a model re-weighted least squares procedure. *Journal of Seismic Exploration*,1995, 4(4):315-328.
- [9] 张红梅,刘洪.基于稀疏离散 τ - p 变换的叠后地震道内插. *石油地球物理勘探*,2006,41(3):281-285.
Zhang Hongmei, Liu Hong. Interpolation of post-stack seismic traces based on sparse discrete τ - p transform. *OGP*,2006,41(3):281-285.

(下转第 131 页)

$$\begin{aligned}
D_t[\sigma_{xx}^s]_{i,j+k-1}^n &= c_{11} D_x^{2N} [u_x^s]_{i,j+k-1}^n + c_{13} D_z^{2N} [u_z^s]_{i,j+k-1}^n \\
&= c_{11} D_x^{2N} [u_x^s]_{i,j+k-1}^n + \frac{c_{13}}{h} \left\{ \sum_{l=N-k+1}^N [\alpha_{2(N-l)+1}^k (\bar{u}_z^1)_{i,j-1+k+l}^n + \alpha_{2(N-l+1)}^k (u_z^2)_{i,j-\frac{3}{2}+k+l}^n] + \right. \\
&\quad \left. \alpha_{2k+1}^k (\bar{u}_z^1)_{i,j-1+N}^n + \sum_{l=1}^{N-k} \alpha_{2k+l+1}^k (u_z^s)_{i,j-\frac{3}{2}+k+l}^n + \sum_{l=1}^N \alpha_{N+1+k+l}^k (u_z^s)_{i,j-\frac{1}{2}+k-l}^n \right\} \\
D_t[\sigma_{zz}^s]_{i,j+k-1}^n &= c_{13} D_x^{2N} [u_x^s]_{i,j+k-1}^n + c_{33} D_z^{2N} [u_z^s]_{i,j+k-1}^n \\
&= c_{13} D_x^{2N} [u_x^s]_{i,j+k-1}^n + \frac{c_{33}}{h} \left\{ \sum_{l=N-k+1}^N [\alpha_{2(N-l)+1}^k (\bar{u}_z^1)_{i,j-1+k+l}^n + \alpha_{2(N-l+1)}^k (u_z^2)_{i,j-\frac{3}{2}+k+l}^n] + \right. \\
&\quad \left. \alpha_{2k+1}^k (\bar{u}_z^1)_{i,j-1+N}^n + \sum_{l=1}^{N-k} \alpha_{2k+l+1}^k (u_z^s)_{i,j-\frac{3}{2}+k+l}^n + \sum_{l=1}^N \alpha_{N+1+k+l}^k (u_z^s)_{i,j-\frac{1}{2}+k-l}^n \right\} \\
D_t[\sigma_{xz}^1]_{i,j+k-1}^n &= c_{55} D_x^{2N} [u_x^1]_{i,j+k-1}^n + c_{55} D_z^{2N} [u_z^2]_{i,j+k-1}^n \\
&= c_{55} D_x^{2N} [u_x^1]_{i,j+k-1}^n + \frac{c_{55}}{h} \left[\sum_{l=1}^N \beta_{N-l+1}^{k+1} (u_x^2)_{i,j-\frac{3}{2}+k+l}^n + \sum_{l=1}^h \beta_{N+l}^{k+1} (u_x^2)_{i,j-\frac{1}{2}+k-l}^n + \sum_{l=k+1}^{N+1} \beta_{N+1}^{k+1} (\bar{u}_x^s)_{i,j+k-l}^n \right] \\
(\sigma_{xx}^1)_{i,j+k-1}^{n+\frac{1}{2}} &= 0.5(\sigma_{xx}^s)_{i,j+k-1}^{n+\frac{1}{2}} \\
(\sigma_{zz}^1)_{i,j+k-1}^{n+\frac{1}{2}} &= 0.5(\sigma_{zz}^s)_{i,j+k-1}^{n+\frac{1}{2}} \quad k = 1, 2, \dots, N-1
\end{aligned} \tag{A-4}$$

(上接第 100 页)

- [10] Herrmann P, Mojesky T, Magesan M. Amplitude preserving Radon demultiple: Beyond sampling and aperture limitations. Nat Conv Abstracts, Can Soc Expl Geophys, 1999, 73-74.
- [11] Sacchi M, Ulrych T. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. Geophysics, 1995, 60(4):1169-1177.
- [12] Wang J, Mark Ng, Mike P. Fast high-resolution Radon transforms by greedy least-squares method. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 3128-3132.
- [13] 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 Xiwu, Liu Hong and Liu Bin. A study on algorithm for reconstruction of de-alias uneven seismic data. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2):299-305.
- [14] 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研究. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3):326-331. Gao Jianjun, Chen Xiaohong, Li Jingye et al. Study on anti-alias reconstruction of irregularly sampled seismic data. OGP, 2010, 45(3):326-331.
- [15] Wang J, Mark N and Mike P. Seismic data interpolation by greedy local Radon transform. Geophysics, 2010, 75(6):WB225-WB234.
- [16] Wang B. AVO-preserving sparse parabolic Radon transform. 73rd EAGE Conference & Exhibition, 2011, G013.
- [17] Johasen T A, Bruland L and Lutro J. Tracking the amplitude versus offset by using orthogonal polynomials. Geophysical Prospecting, 1995, 43(2): 245-261.
- [18] Xue Yaru and Chen Xiaohong. Random noise attenuation based on orthogonal polynomials transform. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28:3377-3380.
- [19] 薛亚茹, 陆文凯, 陈小宏等. 基于正交多项式的高精度零炮检距地震道拟合. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2):213-216. Xue Yaru, Lu Wenkai, Chen Xiaohong et al. High-precision zero-offset seismic trace fitting based on orthogonal polynomials. OGP, 2008, 43(2):213-216.
- [20] Trade D, Ulrich T and Sacchi M. The latest view of sparse Radon transform. Geophysics, 2003, 68(1): 386-399.

(本文编辑:宜明理)

作者简介



薛亚茹 副教授, 1972 年生; 1994 年获华中师范大学信息技术专业学士学位; 2001 年获兰州大学通信与信息系统工程专业硕士学位; 2009 年获中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士学位; 现在中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院从事信号处理方面的教学与科研工作, 主要研究方向为地震多次波压制和数据重建。