

巩向博, 韩立国, 李洪建. 2014. 各向异性 Radon 变换及其在多次波压制中的应用. 地球物理学报, 57(9): 2928-2936, doi: 10.6038/cjg20140918.

Gong X B, Han L G, Li H J. 2014. Anisotropic Radon transform and its application to demultiple. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(9): 2928-2936, doi: 10.6038/cjg20140918.

各向异性 Radon 变换及其在多次波压制中的应用

巩向博, 韩立国, 李洪建

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要 即使采用分辨率很高的双曲 Radon 变换, 对速度各向异性发育介质及长偏移距情况下的地震数据, 其 Radon 域内能量仍不收敛. 为了克服此难题, 我们在 Radon 变换的积分路径中考虑了非双曲走时的影响, 通过引入非双曲时差公式中的各向异性非椭圆率 η 参数, 可以准确描述出长偏移距条件下来自同一层位的时距曲线, 并推导了由偏移距、慢度、非椭圆率三参数控制的积分曲线正反变换公式, 我们称之为各向异性 Radon 变换. 离散化求解时, 各向异性 Radon 变换是时变的, 频率域快速算法已不适用, 本文采用了最优相似系数加权 Gauss-Seidel 迭代算法, 保持其计算精度的同时也有较高的计算效率. 将此方法应用在模型数据以及实际长偏移距海上地震数据的多次波压制处理中, 收到了较好的处理效果.

关键词 各向异性; Radon 变换; 长偏移距; 多次波压制

doi: 10.6038/cjg20140918

中图分类号 P631

收稿日期 2014-01-02, 2014-07-31 收修定稿

Anisotropic Radon transform and its application to demultiple

GONG Xiang-Bo, HAN Li-Guo, LI Hong-Jian

Geo-Exploration Science and Technology Institute, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract For the seismic data acquired in the anisotropic medium and with large offset, although we use the high-resolution hyperbolic Radon transform, the energy of the Radon domain is still not convergent. In order to overcome this problem, the influence of the anisotropic factor is considered in the integral path of Radon transform. By introducing the anisotropic anellipticity parameters η from non-hyperbolic moveout formula, the travel-time curve can be accurately described in the horizontal layer for large offset. We derive the integral equation of forward and inverse Radon transform with three parameters, which are the offset, the slowness and the anellipticity. For time-varying of anisotropic Radon transform, the fast algorithm in the frequency domain is not applicable in the process of discretization. This paper adopt the optimal semblance weighted Gauss-Seidel iterative algorithm which not only keeps the high resolution but also has the high calculation efficiency. In the examples of the anisotropic model and real marine seismic data with large offset, this method shows the effective and efficient application to demultiple.

Keywords Anisotropy; Radon transform; Large offset; Demultiple

1 引言

Radon 变换在地震数据处理中有着广泛的应用,诸如多次波衰减(Wang, 2003; Schonewille and Aaron, 2007; 熊登, 2009)、噪声压制(巩向博等, 2009)、波场分离(曾有良等, 2007; 冯暄等, 2011)、数据重建(王维红等, 2006; 王维红等, 2007)、速度频散分析(潘冬明等, 2010)、偏移成像(黄新武等, 2004)等. 根据研究问题的特点和需要, Radon 变换可以派生出灵活多样的形式, 根据积分路径的不同产生多种变换方式, 如线性 Radon 变换(τ - p 变换)、抛物 Radon 变换、双曲 Radon 变换、多项式 Radon 变换(牛滨华等, 2001)等. 根据物理场的不同, 可以选择合理的变换方法, 以达到最佳解决问题的途径.

Radon 域内信号与噪声能量越集中, 其信噪分离能力越好. 对于水平均匀层状介质来说, 常规 Radon 变换中, 双曲 Radon 变换分辨率最高, 在海上多次波压制中也有较多的应用. 但真实地下介质是各向异性的, 在不同方向上, 波场的传播特征、能量的分配是不同的, 常见的水平各向同性介质(VTI)下, 反射波同相轴已经不是双曲线, 而是与各向异性参数相关的非双曲同相轴; 另外, 对于长偏移距地震数据, 即使地下为各向同性水平层状均匀介质, 随着偏移距的增大, 反射同相轴也呈现非双曲线形态. 在这两种情况下, 双曲 Radon 变换已经不能保证反射波能量非常收敛, 对于后续的信号与噪声的分离有时就无能为力.

为克服上述难题, 我们在 Radon 变换的积分路径上考虑了非双曲走时影响, 引入各向异性介质中非椭圆率 η 参数, 积分路径由原先的偏移距、慢度两参数控制改为由偏移距、慢度、非椭圆率三参数控制, 新的变换公式可以精确刻画 VTI 介质以及长偏移距下地震数据的走时路径, 沿此路径进行 Radon 正反变换, 我们称之为各向异性 Radon 变换(Gong et al., 2013). 各向异性和长偏移距引起的非双曲现象数学表达相同而物理意义不同, 故名称可理解为“各向异性介质条件下的 Radon 变换”, 也可理解为“各向异性参数控制下的 Radon 变换”.

离散求解各向异性 Radon 变换与双曲 Radon 变换类似, 由于其时变特征, 频率分量不能解耦, 若直接在时间域采用 Sacchi 的策略, 利用 Radon 变换的稀疏解来提高 Radon 变换域分辨率方法, 其算子矩阵过大会导致计算量剧增, 使其实用性大为降低

(Beylkin, 1987; Sacchi and Ulrych, 1995; Trad et al., 2002). Ng 和 Rerz 提出的 Gauss-Seidel 方案为时变积分路径提供了极好的思路(Ng and Perz, 2004; Wang et al., 2010). 这种方法对符合积分路径的能量强加权累加, 然而不符合积分路径的能量弱加弱化, 通过几次迭代累加后, 获得时间域分辨率极高的结果. 我们在此算法基础上加入各向异性的相似系数加权函数, 突出最大各向异性相似系数下的积分路径能量, 使用前次变换结果作为先验信息, 避免采用共轭梯度算法的多次迭代计算, 正反离散变换并未花费很大的计算量, 同时得到很高的时空分辨率.

对于深层陡倾角的成像来说, 长偏移距的地震信息十分关键. 针对此问题, 本文提出各向异性 Radon 变换, 并对模型地震数据与长偏移距海上地震数据的多次波衰减进行处理, 计算表明此方法有着很高的分辨率, 可以有效的压制多次波, 并具有较高的计算效率.

2 各向异性 Radon 变换

2.1 非双曲时差公式

任意水平层状介质模型反射波走时方程可由级数展开, 得到的方程是层厚、层速度、偏移距 2 阶、4 阶、6 阶等有关的复杂函数. 当偏移距较小时(即排列长度小于反射界面深度), 可忽略偏移距四阶及其更高项, 从而简化为双曲线方程. 但对于 VTI 介质以及较大偏移距的地震数据, 其走时方程并不能用简单双曲线方程表示.

对于非双曲时距曲线的逼近, 我们并未采用精度最高的 VTI 方程, 因为精度虽高但其复杂性大大增加, 增加了求解的难度, 权衡计算结果的精度与效率, 我们采用了 Alkhalifah 提出的非双曲时差公式, 其偏移距最高 4 阶, 射线慢度参数 2 阶, 并引入各向异性参数 η , 以逼近 VTI 介质及长偏移距下的准确走时.

Alkhalifah 等提出了非双曲线时差公式为(Alkhalifah and Tsvankin, 1995)

$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{\text{nmo}}^2} - \frac{2\eta x^4}{V_{\text{nmo}}^2 [t_0^2 V_{\text{nmo}}^2 + (1 + 2\eta)x^2]}, \quad (1)$$

实验表明, 上式在长偏移距与弱各向异性条件下具有较高的精度, 因此适于在实际资料处理中应用. 其中, x 为偏移距, t_0 为垂直旅行时间, V_{nmo} 为动校正速度, η 为各向异性参数, 也称为非椭圆率, 公式为

$$\eta = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{\text{hor}}^2}{V_{\text{nmo}}^2} - 1 \right) = \frac{\epsilon - \delta}{1 + 2\delta}, \quad (2)$$

其中 ϵ 和 δ 为两个各向异性参数. 对于 VTI 介质,

$$\epsilon \equiv \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}}, \quad \delta \equiv \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})}, C_{ij}$$

是弹性系数 ($i, j = 1, 2, \dots, 6$).

2.2 各向异性 Radon 变换

常规线性离散 Radon 正变换公式可定义为

$$u(\tau, p) = \sum_{n=1}^{N_x} d(t = \tau + px_n, x_n), \quad (3)$$

其中, p 为慢度, 即速度倒数. 将公式(3)线性积分路径替换为公式(1)描述的非双曲线时差积分路径, 可以定义各向异性 Radon 变换 (非双曲 Radon 变换) 正变换公式为

$$u(\tau, p) = \sum_{n=1}^{N_x} d \left(t = \sqrt{\tau^2 + x_n^2 p^2 - \frac{2\eta x_n^4 p^4}{[\tau^2 + (1 + 2\eta)x_n^2 p^2]}}, x_n \right), \quad (4)$$

将 $t = \sqrt{\tau^2 + x_n^2 p^2 - \frac{2\eta x_n^4 p^4}{[\tau^2 + (1 + 2\eta)x_n^2 p^2]}}$ 重新整理, 写成 τ 关于 t 的形式, 得到各向异性 Radon 反变换公式为

$$d'(t, x) = \sum_{i=1}^{N_p} u(\tau = \sqrt{\sqrt{a^2 + b} - a}, p_i), \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= [(1 + \eta)x^2 p_i^2 - t^2/2], \\ b &= (1 + 2\eta)t^2 x^2 p_i^2 - x^4 p_i^4. \end{aligned} \quad (6)$$

各向异性 Radon 正反变换形式上虽复杂, 但究其本变换过程还是沿曲线进行积分, $t-x$ 域的一条曲线对应 Radon 域内的一个点, t 仍对应截距时间 τ , 变换曲线由常规 Radon 变换的偏移距、慢度两参数控制, 转变为偏移距、慢度、非椭圆率 η 三参数控制. 而增加 η 参数后离散计算矩阵维数、大小未变, 时间域求解时, 计算量与双曲 Radon 变换相当, 而非双曲积分路径的精度由高阶偏移距与 η 参数控制.

2.3 各向异性 Radon 变换离散求解

基于反演理论的 Radon 变换, 先定义反变换, 从反变换导出正变换, 可以在 Radon 域内得到分辨率更高的结果. 各向异性 Radon 反变换公式(5)离散化, 写成矩阵形式 $d' = \mathbf{L}m$, 其中算子 \mathbf{L} 为各向异性 Radon 反变换算子, 即公式(4)定义的积分路径, 其物理意义将 Radon 域内的一个点变换到时空域内由 x, p, η 控制的一条曲线. Radon 正变换算子为

\mathbf{L}^T , 其物理意义将 $t-x$ 域内由 x, p, η 控制的曲线变为 Radon 域内的一个点. 采用最小二乘反演求解, 并加入权系数矩阵 \mathbf{W}_m 提高求解的分辨率, 得到公式为

$$m = (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \mathbf{W}_m)^{-1} \mathbf{L}^T d. \quad (7)$$

需要指出的是, 各向异性 Radon 变换的 η 参数并不是变量, 每个时刻 t 仅对应一个独立 η 参数, 其值的准确性关系到各向异性 Radon 变换的精度. 理论模型中的各向异性参数是已知的, 对于实际地震数据来说一般选择速度和非椭圆率双参数速度分析时, 需要最佳动校正速度下的 η 值 (Abbad et al., 2009). 故我们在进行各向异性 Radon 变换之前, 首先要估计 η 值, 通过双谱速度分析, 得到动校正速度的同时也给出 η 参数. 这是各向异性 Radon 变换不同于普通 Radon 变换的特殊之处.

加入控制非双曲积分路径的各向异性参数 η , Radon 正反变换算子由两参数控制变为三参数控制. 从形式上看, 各向异性 Radon 变换要比常规 Radon 变换要复杂很多, 实际上它和时变 Radon 变换计算过程一致, 算子矩阵的维数均与常规 Radon 变换相同.

2.4 最优相似系数加权 Gauss-Seidel 迭代算法

为了得到高分辨率的变换结果, 我们采用相似系数加权的 Radon 变换, 其相似系数加权函数定义为

$$S(\tau, p) = \frac{\sum_t \left[\sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} F(x, t, \eta) \right]^2}{M \sum_l \sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} F^2(x, t, \eta)}, \quad (8)$$

其中, M 是变换道数, 振幅 $F(x, t, \eta)$ 以及振幅的平方 $F^2(x, t, \eta)$ 是沿着公式(1)非双曲走时曲线的积分路径, l 为子波的时窗, 其函数值只依赖于数据的模型, 和输入数据的振幅大小无关, 且范围在 0 到 1 之间, 代表了从最差到最好符合轨迹的程度. 这样, 相似系数加权的各向异性 Radon 变换为

$$u(\tau, p) = S(\tau, p) \sum_{n=1}^{N_x} d \left(t = \sqrt{\tau^2 + x_n^2 p^2 - \frac{2\eta x_n^4 p^4}{[\tau^2 + (1 + 2\eta)x_n^2 p^2]}}, x_n \right). \quad (9)$$

由于公式(7)中算子 \mathbf{L} 与其逆算子 \mathbf{L}^T 并不是时变的, 不能在频率域求解, 基于 Sacchi 贝叶斯原理的高分辨率求解, 往往采用共轭梯度算法实现, 需要进行多次稀疏约束迭代, 共轭梯度算法本身还需多次迭代以进行最优化反演求解, 未压缩前的算子

矩阵维数为 $(nt \times nx) \times (n\tau \times np)$, 计算量会随着数据增大成倍增长, 计算效率很低。

为了更具有实用性, 节约计算量, 我们从公式 (9) 出发, 采用最优相似系数加权 Gauss-Seidel 迭代算法的各向异性 Radon 变换, 此算法利用以前的变换作为先验信息, 按照相似系数加权函数计算值大小对离散 p 值进行排序, 最显著能量的 p 值积分首先计算, 当次 p 轨迹计算后相应的减掉 $t-x$ 域内积分路径的能量, 当前的变换结果可以成为新 p 轨迹估计的初步结果, 随着 p 轨迹路径积分, $t-x$ 域内能量不断衰减, 直到所有 p 值计算完毕. 此算法偏重计算最初 p 轨迹的积分路径能量, 确保初始最显著的 p 轨迹参与叠加计算, 因此它会包含这个路径中最强的能量, 故得到能量收敛的 Radon 域变换结果. 这样仅用几次迭代过程就可以得到 Radon 域内很高的分辨率, 并且计算量会大为节约。

基于 Gauss-Seidel 迭代方式的相似系数加权各向异性 Radon 变换流程如图 1 所示, 在各向异性 Radon 变换时, 相似系数加权函数将由非双曲线时

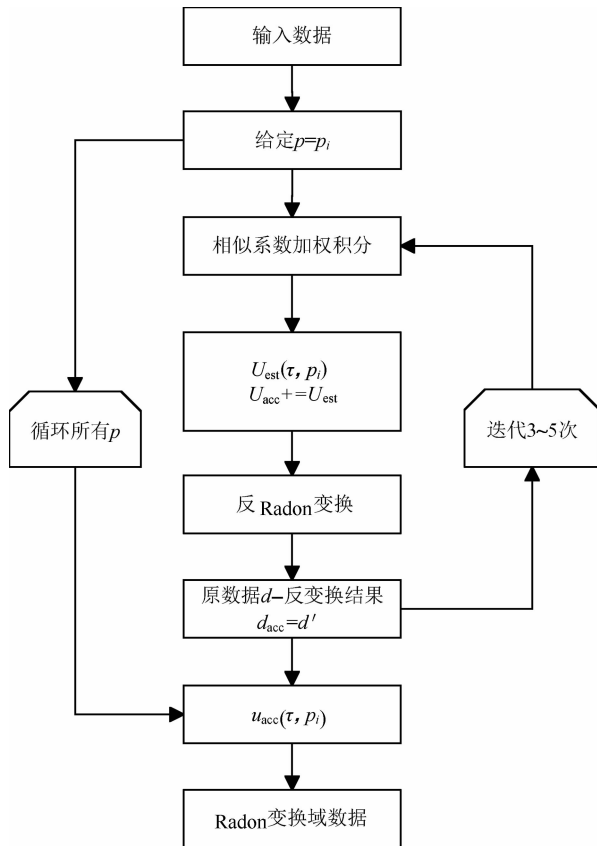


图 1 相似系数加权 Gauss-Seidel 迭代算法的 Radon 变换流程图

Fig. 1 Flowchart of the anisotropic Radon transform with semblance weighting Gauss-Seidel algorithm

差曲线 $t(t'_0, p, \eta, x)$ 定义, 即按公式 (9) 计算, 变换流程可分三个步骤进行:

(1) 计算当前慢度 p_i 相似系数加权函数, 计算当前慢度积分的 Radon 域内结果 $u_{est}(\tau, p_i)$, 并将每次慢度积分结果累加到 $u_{acc}(\tau, p_i)$ 之中;

(2) 将 $u_{acc}(\tau, p_i)$ 做反变换得到 d_{acc} , 原数据 d 减掉 d_{acc} 得到 d' , 以 d' 为输入数据, 按照步骤 (1) 累加相似系数加权 p_i 积分路径能量, 通常 3~5 次迭代就可以使 $t-x$ 域剩余能量降到可接受的水平, 即计算完成一次慢度 p_i 积分;

(3) 按照步 (1) 和步 (2) 的过程, 循环所有慢度 p 的积分, 并累加能量至 $u_{acc}(\tau, p_i)$, 构成 Radon 变换域最终结果。

3 实例计算

3.1 各向异性介质模型

建立如下的各向异性介质模型, 模型参数如表 1 所示, 模拟数据为 200 道数据, 偏移距范围为 0~4000 m, 分别用抛物、双曲与各向异性 Radon 变换进行正变换, 得到的 Radon 域内数据如图 2, 图 2a 为 VTI 介质单炮记录, 其中一次波的零偏移距 t_0 分别为 0.4 s、0.64 s、0.86 s, 多次波零偏移距 t_0 为 0.8 s、1.2 s、1.28 s、1.72 s、1.92 s; 图 2b 为抛物 Radon 正变换结果, 非双曲走时的同相轴经抛物 Radon 变换之后, 能量并不收敛, 有明显的拖尾现象; 图 2c 为双曲 Radon 正变换结果, Radon 域内能量已经收敛较好, 但仔细观察细节, 能量团仍不集中, 能量最强的中心位置两侧有一定的能量延伸; 图 2d 为各向异性 Radon 正变换结果, 从图中可看到, 经各向异性 Radon 正变换后, 变换域内能量收敛几乎与模拟时的子波相同, 结果有着极高的分辨率, 设置图 2d 白线所示的切除线, 白线之上为一次波能量, 之下为多次波能量; 图 2e 为在各向异性 Radon 域内切除多次波后反变换结果, 得到的一次波的记录; 图 2f 为在各向异性 Radon 域内切除一次波后反变换结果, 得到的多次波的记录, 可见通过各向异性 Radon 变换, 多次波与一次波可明显分离, 且原道集同相轴的振幅保持很好. 对比抛物、双曲与各向异性 Radon 变换的计算效率, 环境为 Intel Core2, 主频 2 GHz, Intel C++ Compiler XE 12.1.2.278 并行编译器, 三者计算时间分别为 1.2 s、8.5 s、9.1 s, 可见各向异性 Radon 变换计算量与双曲 Radon 变换相当, 采用相似系数加权的 Gauss-Seidel 迭代算

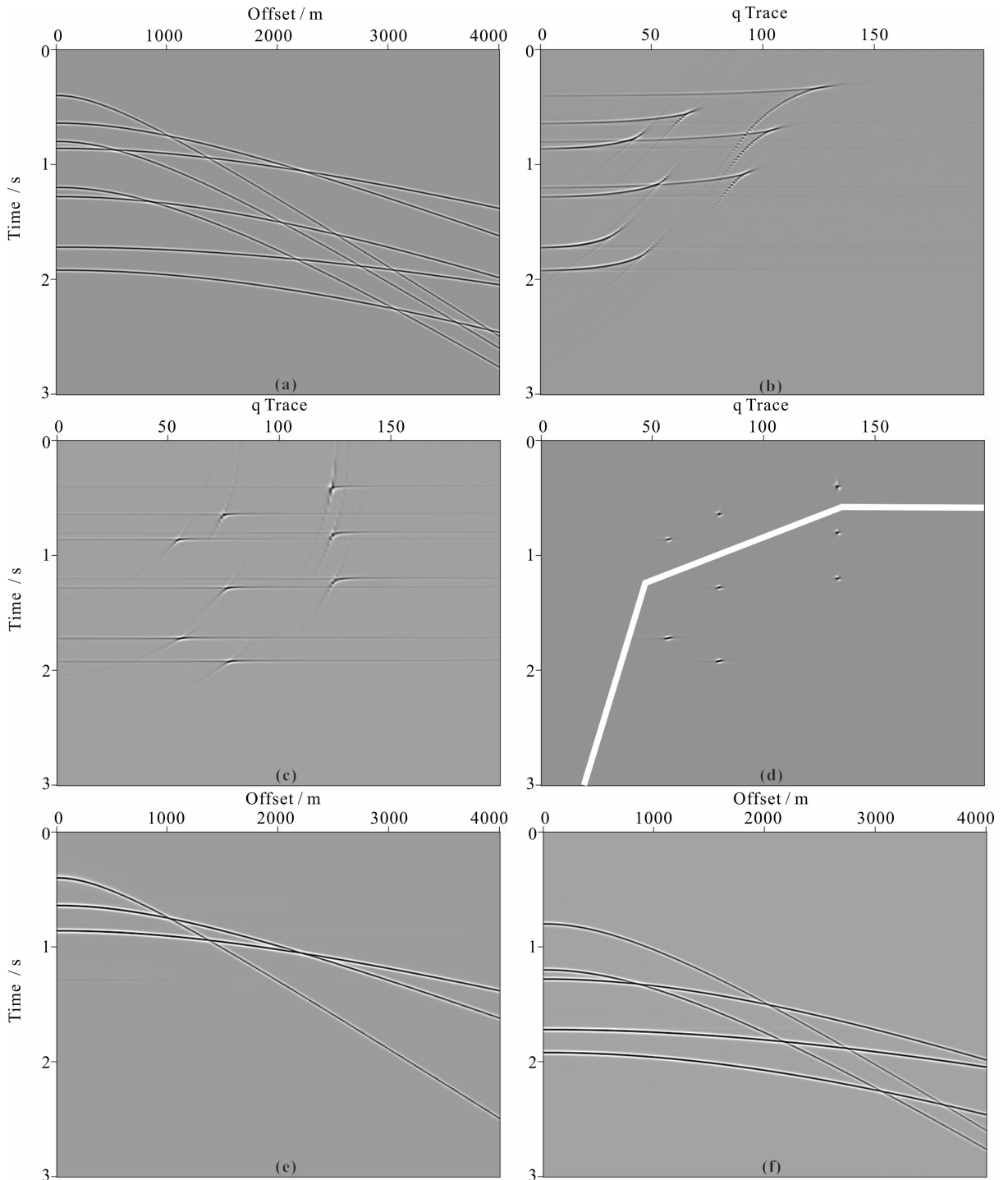


图 2 各向异性介质模型 Radon 域结果

(a) VTI 介质模型数值模拟记录; (b) 抛物 Radon 正变换结果; (c) 双曲 Radon 正变换结果;
(d) 各向异性 Radon 正变换结果; (e) 分离的一次波道集; (f) 分离的多次波道集。

Fig. 2 Results of Radon domain of the anisotropic model

(a) Simulated data of the VTI model; (b) Result of parabolic radon transform; (c) Result of hyperbolic radon transform;
(d) Result of anisotropic radon transform; (e) Primary gather; (f) Multiples gather.

法计算效率较高。

由于 Radon 变换非正交性, 其正反变换过程存在振幅损失, 但基于 2.3 节的最小二乘反演算法可较好地恢复原信号。本文对比了模型数据在抛物、双

曲与各向异性 Radon 正反变换的数据振幅特征, 并通过式(10)计算振幅失真度, 公式为

$$E_c = \left| \frac{\mathbf{L}_c \mathbf{m} - \mathbf{d}}{\mathbf{d}} \right| \times 100\%, \quad (10)$$

其中, E_c 为振幅失真度, d 为模型数据, L_c 为反变换算子矩阵, m 为正变换域数据. 通过数值计算, 三种变换失真度分别为 0.83%, 1.22%, 1.26%, 可见各向异性 Radon 变换与其余两种变换基本一致, 均保持了较高的信号保真度.

表 1 各向异性模型参数表格

Table 1 Parameters of the anisotropic model

| 序号 | Thickness(m) | v_p (m/s) | ϵ | δ | γ | η |
|----|--------------|-------------|------------|----------|----------|--------|
| 1 | 300 | 1500 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.083 |
| 2 | 300 | 2500 | 0.15 | 0.25 | 0.0 | -0.067 |
| 3 | 385 | 3500 | 0.3 | -0.1 | 0.0 | 0.5 |

3.2 海上数据处理实例

以海上长偏移距地震数据为例进行各向异性 Radon 变换的应用. 图 4a 为海上地震数据, 采样率为 2 ms, 采样长度为 12 s, 其最大偏移距可达 8287 m, 浅层的反射走时已不能用双曲时距曲线表示, 尤其当偏移距深度比大于 1 时. 从图中可以看出, 在 3 s

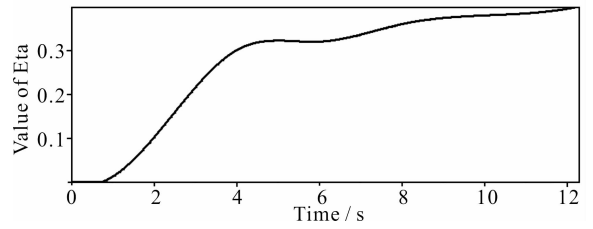
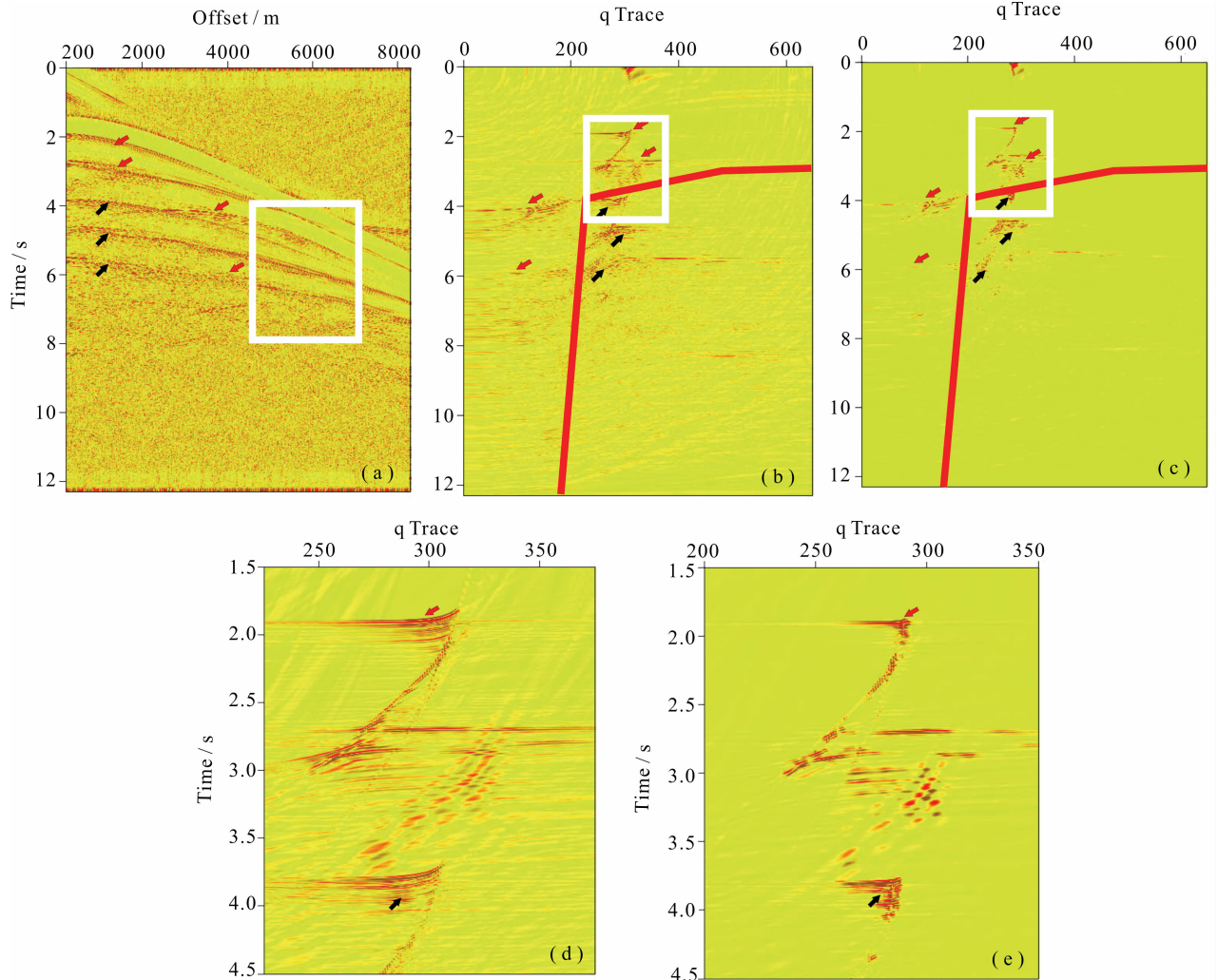


图 3 双参数速度分析得到的 η 参数曲线

Fig. 3 Curve of η by dual-parameter velocity analysis and interpolation

以下的反射波能量基本上已经被多次波能量所淹没, 若不进行多次波压制, 深层的地下构造无法还原. 图中用红色箭头标识一次波, 黑色箭头标识多次波.

各向异性 Radon 变换时, 首先对当前道集进行双参数速度分析, 同时给出动校正速度与 η 参数, 每个拾取能量团(走时同相轴叠加)对应一对动校正速度与 η 参数, 即 η 参数个数与拾取的同相轴个数相同, 我们将 η 参数沿时间方向进行线性插值, 这样在



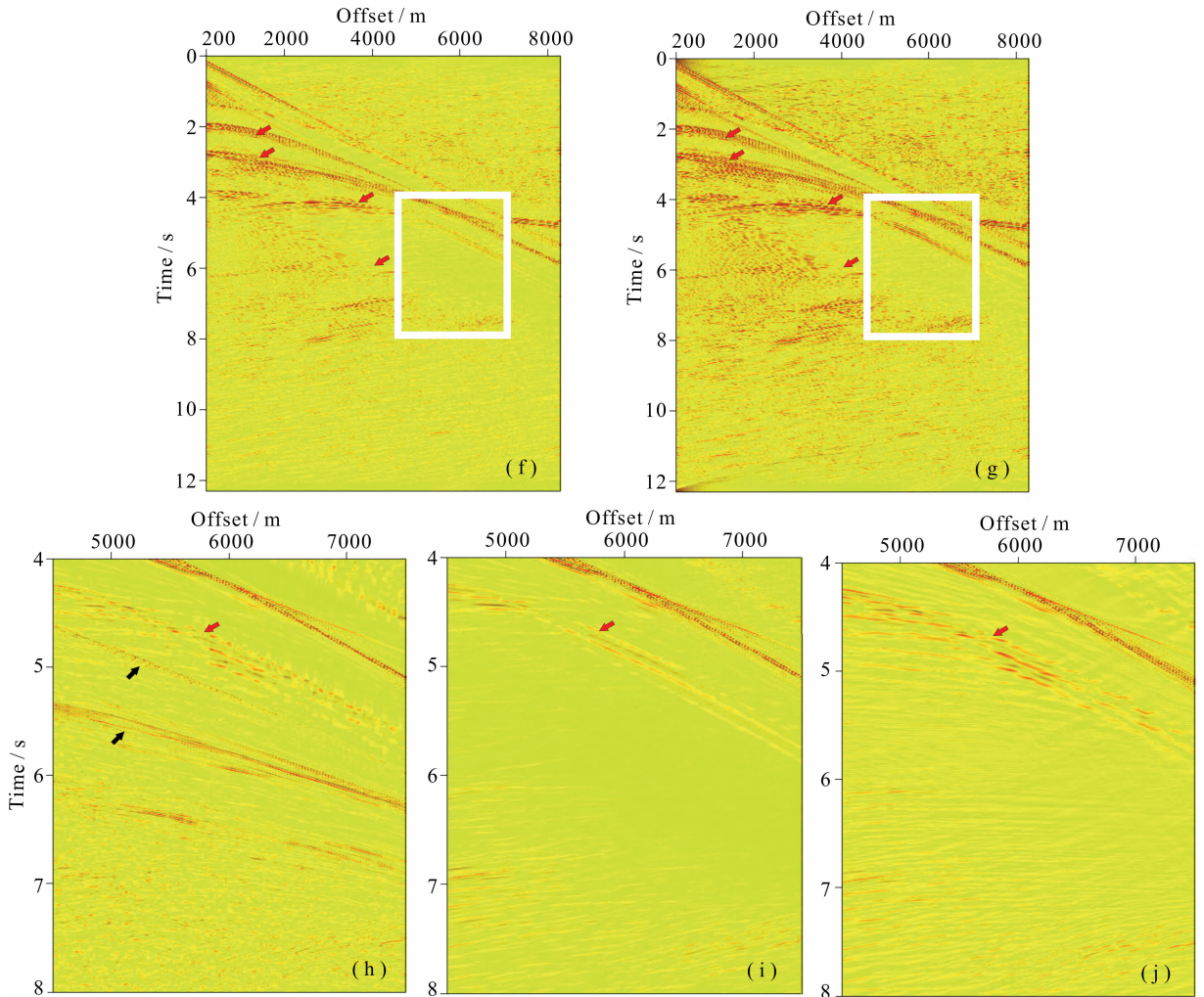


图4 海上长偏移距数据多次波压制实例

(a)海上原始记录,最大偏移距可达8287 m;(b)双曲Radon正变换结果;(c)各向异性Radon正变换结果及切除线;(d)(b)图白框所示范围细节放大图;(e)(c)图白框所示范围细节放大图;(f)双曲Radon变换压制多次波后的一次波数据;(g)各向异性Radon变换压制多次波后的一次波数据;(h)(a)图白框所示范围细节放大图;(i)(f)图白框所示范围细节放大图;(j)(g)图白框所示范围细节放大图。

Fig. 4 Demultiple example of large offset marine data

(a) Original gather with the maximum offset of 8287m;(b) Result of hyperbolic radon transform;(c) Result of anisotropic radon transform and cutting line;(d) Zoom of the white frame of (b);(e) Zoom of the white frame of (c);(f) Primary reflection after demultiple of hyperbolic radon transform;(g) Primary reflection after demultiple of anisotropic radon transform;(h) Zoom of the white frame of (a);(i) Zoom in on the white frame of (f);(j) Zoom of the white frame of (g).

每个离散时间采样上均对应一个 η 数值.图3为当前道集进行双参数速度分析并插值后的 η 参数曲线.需注意的是, η 参数的正确性对于各向异性Radon变换分辨率影响较大,不准的 η 参数导致非双曲走时路径与实际不符,难以达到反射波能量的累加聚焦,导致有效信号不易从多次波能量中进行分离.为了保证 η 参数的准确,在压制多次波的过程中,我们进行多次双参数速度谱扫描,最终得到准确的 η 参数.

本文对比常规双曲Radon变换与各向异性Radon变换,其Radon域内变换结果分别如图4b

和图4c,由于采用了非双曲相似系数加权的高分辨率Gauss-Seidel迭代算法(2.4节),各向异性Radon域内有效波与多次波能量相比于常规双曲Radon变换聚焦更好并已得到了有效的分离,见红色箭头所示的一次波与黑色箭头所示的多次波,将图4b和图4c中白框所示范围放大得到图4d和图4e,细节上对比各向异性Radon域比常规双曲Radon变换能量更为集中,便于设置切除线.设置如图4b和图4c所示的切除线,将切除线下方多次波的能量进行切除,反Radon变换后的结果如图4f和图4g,与原数据相比,多次波能量压制的很好,大偏移距处一次

波的信号并未损失,变换后的地震剖面的信噪比得到了较大的提高.图 4h、4i、4j 分别对应图 4a、4f、4g 中白框所示的细节放大图,观测道集波场的细节,双曲 Radon 变换与各向异性 Radon 变换均对多次波有较好的衰减,而后者对一次波能量有更好的保护.

图 5 是压制多次波前后的速度谱分析图,图 5a

是原始记录的速度谱,1500 m/s 速度附近沿时间轴多次波的能量团十分明显,表现为速度相同时间等倍数一串相似的能量团;图 5b 是各向异性 Radon 变换衰减掉多次波后一次波的速度谱,图 5a 中时间大于 4 s 多次波的低速度能量团已经消失,在高速范围出现速度谱能量团,也就是说深层的高速反射同相轴经过多次波压制后可以得到分辨.

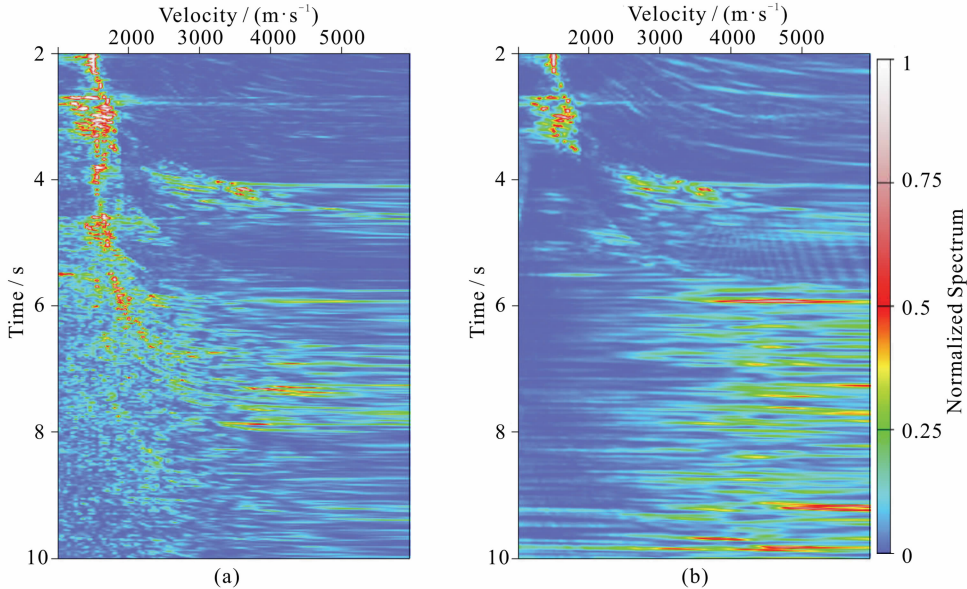


图 5 压制多次波前后速度谱分析图

(a)原始记录的速度谱;(b)各向异性 Radon 变换衰减多次波后速度谱.

Fig. 5 Comparison of velocity spectra

(a) Velocity spectrum of original gather;(b) Velocity spectrum of primary after anisotropic Radon transform demultiple.

4 结论

在 Radon 变换积分路径中加入各向异性参数后,得到由偏移距、慢度、非椭圆率三参数控制的积分曲线,即各向异性 Radon 变换.本文推导了各向异性 Radon 变换的正反公式,并采用了最优相似系数加权的 Gauss-Seidel 迭代算法进行了高分辨率的求解,避免了时间域稀疏脉冲迭代反演中的大矩阵运算,保持很高的精度的同时,提高了计算效率.

各向异性 Radon 变换处理前,需进行双参数的速度扫描,以选择最佳的非椭圆率 η 值,离散计算每个 t 时刻需对应一个 η 值,其值的选择对于 Radon 域内的分辨率影响较大,应选择最佳动校正速度下的 η 值.

长偏移距的海上地震数据在各向异性 Radon 变换后,其 Radon 域内分辨率明显提高,即使有较小时差存在,有效反射信号与多次反射波能量也可

以很好的分离,保留了大偏移距的有效反射信息,对于地下深层陡倾角的成像提供了保幅的预处理数据体.

References

- Abbad B, Ursin B, Rappin D. 2009. Automatic nonhyperbolic velocity analysis. *Geophysics*, 74(2): U1-U12.
- Alkhalifah T, Tsvankin I. 1995. Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 60(5): 1550-1566.
- Beylkin G. 1987. Discrete radon transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(2): 162-712.
- Feng X, Zhang X W, Liu C, et al. 2011. Separating P-P and P-SV wave by parabolic Radon transform with multiple coherence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(2): 304-309, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.005.
- Gong X B, Han L G, Wang E L, et al. 2009. Denoising via high resolution Radon transform. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 39(1): 152-157.
- Gong X B, Lv Q T, Han L G. 2013. Anisotropic Radon transform.

- // 75th EAGE Conference & Exhibition Extended Abstracts.
- Huang X W, Wu L, Song W. 2004. 3D Pre-Stack depth migration with radon projection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47(2): 321-326.
- Ng M, Perz M. 2004. High resolution Radon transform in the $t-x$ domain using "intelligent" prioritization of the Gauss-Seidel estimation sequence. // 74th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts, 2160-2163.
- Niu B H, Sun C Y, Zhang Z J, et al. 2001. Polynomial Radon transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 44(2): 263-271.
- Pan D M, Hu M S, Cui R F, et al. 2010. Dispersion analysis of Rayleigh surface waves and application based on Radon transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(11): 2760-2766, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.025.
- Sacchi M D, Ulrych T J. 1995. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, 60(4): 1169-1177.
- Schonewille M A, Aaron P A. 2007. Applications of time-domain high-resolution Radon demultiple. // 77th Ann. Internat Mtg., SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2565-2569.
- Trad D O, Ulrych T J, Sacchi M D. 2002. Accurate interpolation with high-resolution time-variant Radon transforms. *Geophysics*, 67(2): 644-656.
- Wang J F, Ng M, Perz M. 2010. Seismic data interpolation by greedy local Radon transform. *Geophysics*, 75(6): WB225-WB234.
- Wang W H, Shou H, Liu H, et al. 2006. High resolution $\tau\rho$ transform in linear events wavefield separation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(1): 74-78.
- Wang W H, Pei J Y, Zhang J F. 2007. Prestack seismic data reconstruction using weighted parabolic Radon transform. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(3): 851-859.
- Wang Y H. 2003. Multiple attenuation: Coping with the spatial truncation effect in the Radon transform domain. *Geophysical Prospecting*, 51(1): 75-87.
- Xiong D, Zhao W, Zhang J F. 2009. Hybrid-domain high-resolution parabolic Radon transform and its application to demultiple. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(4): 1068-1077.
- Zeng Y L, Le Y S, Shan Q T, et al. 2007. VSP wavefield separation based on high-resolution Radon transformation. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 46(2): 115-119, 173.

附中文参考文献

- 冯珣, 张先武, 刘财等. 2011. 带有多道相关的抛物线 Radon 变换法分离 P-P、P-SV 波. 地球物理学报, 54(2): 304-309, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.005.
- 巩向博, 韩立国, 王恩利等. 2009. 压制噪声的高分辨率 Radon 变换法. 吉林大学学报(地球科学版), 39(1): 152-157.
- 黄新武, 吴律, 宋炜. 2004. 拉东投影法三维叠前深度偏移. 地球物理学报, 47(2): 321-326.
- 牛滨华, 孙春岩, 张中杰等. 2001. 多项式 Radon 变换. 地球物理学报, 44(2): 263-271.
- 潘冬明, 胡明顺, 崔若飞等. 2010. 基于拉东变换的瑞雷面波频散分析与应用. 地球物理学报, 53(11): 2760-2766, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.025.
- 王维红, 首皓, 刘洪等. 2006. 线性同相轴波场分离的高分辨率 $\tau\rho$ 变换法. 地球物理学进展, 21(1): 74-78.
- 王维红, 裴江云, 张剑锋. 2007. 加权抛物线 Radon 变换叠前地震数据重建. 地球物理学报, 50(3): 851-859.
- 熊登, 赵伟, 张剑锋. 2009. 混合域高分辨率抛物 Radon 变换及在衰减多次波中的应用. 地球物理学报, 52(4): 1068-1077.
- 曾有良, 乐友善, 单启铜等. 2007. 基于高分辨率 Radon 变换的 VSP 波场分离方法. 石油物探, 46(2): 115-119, 173.

(本文编辑 张正峰)