

非稳态地震稀疏反褶积

孙学凯^{*①} 孙赞东^① 谢会文^② 刘立峰^① 彭涛^{①③} 王永刚^①

(^①中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心,北京 102249; ^②中国石油塔里木油田公司,新疆库尔勒 841000; ^③成都理工大学,四川成都 610059)

孙学凯,孙赞东,谢会文,刘立峰,彭涛,王永刚. 非稳态地震稀疏反褶积. 石油地球物理勘探,2015,50(2):260-266.

摘要 尽管稀疏反褶积在一定程度上避免了白噪反射系数序列的假设,还可以带来相位上的改进与调整,但却忽略了由大地滤波作用所造成的地震信号非稳态特征。在融合非稳态反褶积与稀疏反褶积各自优势的基础上,本文提出了一种实现非稳态稀疏反褶积的技术思路,即利用非稳态反褶积在对数时一频域实现地震信号非稳态特征的分析与校正,在此基础上利用稀疏反褶积求解反射系数与地震子波。在实际应用中,以海上叠后地震资料为基础,利用基于柯西约束的非稳态稀疏反褶积分别在单一地震道、简单地层以及构造相对复杂储层段估算地震子波与反射系数,结果表明该方法能获得更加丰富的反射系数信息,增强了原本微弱的反射,改善了地震资料的横向连续性。

关键词 稀疏反褶积 Gabor 反褶积 非稳态 柯西约束

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.02.009

1 引言

最小相位子波与白噪反射系数序列是大多数地震反褶积方法的基本假设条件。然而,大量勘探实践发现,地下介质中传播的地震子波一般是混合相位的,而且地层反射系数也很少服从高斯白噪分布。这两个欠合理先验假设严重制约着反褶积结果的准确性和可信度。另外,地震信号具有典型的非稳态特征(即信号特征随时间而变化),这一点在现行反褶积研究体系中鲜有涉及。

在不作(或弱化)先验假设的情况下,仅利用地震记录本身计算地震子波和反射系数的过程是一个盲过程,即地震盲反褶积。如何通过盲反褶积估算地层的真实反射系数以及提取混合相位地震子波是地球物理界经久不衰的研究热点,研究手段从最初的最小熵反褶积^[1]与峰态反褶积^[2]已发展到现今的稀疏反褶积^[3,4]。尽管稀疏反褶积能够避免最小相位子波与白噪反射系数的假设,实现反射系数的有

效反演,但却无法处理地震信号的非稳态特征。受地层吸收衰减、多次波、透射损失等多方面因素的影响,地震记录具有典型的非稳态特征,具体表现为信号特征(如振幅、频率、相位等)随传播时间变化。以反演反射系数为目标的多数反褶积或反演方法以稳态处理为主,假定地震子波恒定不变,忽视了非稳态影响,造成深层分辨率提高受限,丢失重要反射系数信息,甚至误导后续解释^[5]。为此本文采用稀疏约束反褶积方法,探讨非稳态地震子波对反射系数求解结果的影响,并借助对数域的 Gabor 反褶积^[6,7]实现非稳态的量化与校正,快速准确地获取地下反射系数信息,用于精细储层预测。

2 稀疏约束反褶积基本原理

2.1 稀疏约束反褶积的数学实现

反褶积的本质是反射系数反演。稀疏反褶积借助贝叶斯稀疏反演的基本原理,通过误差最小二乘拟合和反射系数正则化约束构造目标函数,采用高

* 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地质楼 726 室,102249。Email: xksun_cup@163.com

本文于 2013 年 12 月 23 日收到,最终修改稿于 2014 年 12 月 24 日收到。

本研究受国家重点基础研究规划“973”项目(2011CB201103)与国家科技重大专项(2011ZX05004003)资助。

效循环迭代方案求解地震子波和反射系数。地震记录褶积模型的向量形式为

$$\mathbf{s} = \mathbf{C}_w \mathbf{r} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ 为观测地震数据; $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_M]^T$ 为反射系数序列; \mathbf{C}_w 对应 $N \times M$ 维的子波褶积矩阵; $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_n]^T$ 表示观测噪声。通常情况下假设观测噪声服从均值为零、方差为 σ_n^2 的正态分布。

大量研究与实践已证明,实际反射系数并不完全服从高斯分布。为此,地球物理工作者提出了许多针对性的反射系数模型,如 Huber 分布模型、p 范数分布模型、柯西分布模型、修正柯西分布模型等,并建立了相应的约束准则。其中,柯西分布具有较窄的峰值宽度,并且从峰值向两侧的过渡更加平缓,具有“长尾巴”分布特征。这种分布特性使得柯西约束在一定程度上能较好地保护弱反射信息,提高对弱反射体的敏感性。因此柯西分布可以在提高分辨率与增强弱反射信息之间取得较好的平衡^[8]。基于柯西稀疏约束目标函数的向量形式为

$$J_2 = \frac{1}{2\sigma_n^2} (\mathbf{C}_w \mathbf{r} - \mathbf{s})^T (\mathbf{C}_w \mathbf{r} - \mathbf{s}) + \frac{1}{2} \left\| \ln \left(1 + \frac{\text{diag}(\mathbf{r}) \mathbf{r}}{2\sigma_r^2} \right) \right\|_1 \quad (2)$$

相对应的正则化方程为

$$(\mathbf{C}_w^T \mathbf{C}_w + \mu \mathbf{Q}) \mathbf{r} = \mathbf{C}_w^T \mathbf{s} \quad (3)$$

\mathbf{Q} 为对角矩阵

$$\mathbf{Q} = \left[\frac{1}{1 + \frac{\text{diag}(\mathbf{r}) \mathbf{r}}{2\sigma_r^2}} \right] \quad (4)$$

式中: diag 表示将反射系数列向量转换成相应的对角矩阵; μ 为指定的经验参数。

柯西正则化方程(式(3))的左端系数含有待求

解参量 \mathbf{r} , 属于隐格式方程, 一般采用迭代法求解^[9], 基本步骤为:

(1) 计算初始反射系数序列(通常输入脉冲反褶积结果);

(2) 选择柯西约束条件所涉及的两个基本参数(即超参数) σ_r 与 σ_n ;

(3) 计算子波自相关矩阵 $\mathbf{C}_w^T \mathbf{C}_w$, μ 及对角矩阵 \mathbf{Q} , 并按照

$$\mathbf{r}^k = (\mathbf{C}_w^T \mathbf{C}_w + \mu \mathbf{Q}^{(k-1)})^{-1} \mathbf{C}_w^T \mathbf{s} \quad (5)$$

实现对正则化方程的迭代求解(k 为迭代次数);

(4) 在迭代终止条件方面, 大致有目标函数相对误差、匹配误差以及反射系数相对误差三种。

事实上, 迭代过程是提纯反射系数估计的过程, 鉴于此, 以反射系数相对误差为终止条件具有明确意义, 还能减少不必要的迭代, 这也是本文采用的迭代终止标准。

若地震子波与反射系数不相关(或弱相关), 则地震子波与反射系数可以通过松弛交替迭代法实现两者同步求解^[10]。利用褶积的对称形式, 地震子波的求解方程为

$$(\mathbf{C}_r^T \mathbf{C}_r) \mathbf{w} = \mathbf{C}_r^T \mathbf{s} \quad (6)$$

式中: \mathbf{C}_r 为相对应的反射系数褶积矩阵; \mathbf{w} 为子波矩阵。

2.2 模型测试

以简单反射系数模型测试稀疏反褶积的技术性能。该反射系数模型共有 15 个非零反射系数, 服从高斯分布, 最大绝对幅值差接近 29 倍。利用 30Hz 主频、50 个采样点长度的最小相位子波与之进行褶积, 并加入少量白噪声(3%) 得到模拟地震道(图 1)。稀疏反褶积所需的初始估计反射系数与地震子波由脉冲反褶积结果提供。

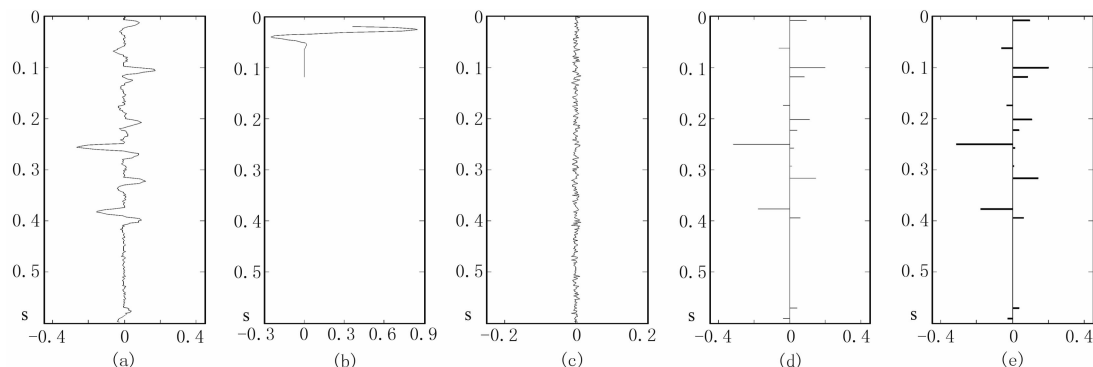


图 1 数值模型设计与稀疏反褶积结果

(a) 加噪地震道; (b) 子波; (c) 噪声(3%); (d) 反射系数模型; (e) 稀疏反褶积结果

利用迭代求解方法经过 26 次迭代后,反射系数的相对变换率小于设定容差 10^{-6} , 迭代终止, 获得图 1d 的反射系数模型。除极弱小的反射系数无法恢复之外, 稀疏反褶积结果与反射系数模型基本一致, 这说明在参数选择合理的情况下, 稀疏反褶积的迭代过程具有良好的收敛特性, 即使在初始反射系数与地震子波估计极不准确的情况下也能快速收敛, 并具有一定的抗噪能力。

3 非稳态稀疏反褶积

稀疏反褶积不仅能够避免白噪声反射系数的假设, 而且在一定程度上解决了地震子波最小相位的束缚。但是, 目前稀疏反褶积研究中以稳态研究手段为主, 忽视了地震信号固有的非稳态特征。所谓非稳态特征, 主要是指地震信号受大地滤波作用的影响, 其统计规律、振幅、频率以及相位等随时间变化而不同。在解决非稳态特征问题时, 地震信号处理中一般采用时变反褶积和反 Q 滤波, 但时变反褶积依赖于参数选择^[11,12], 而反 Q 滤波不仅需要事先获知 Q 值且稳定性不佳^[13~15]。相比之下, Margrave 等^[16,17]首次将非稳态效应融入褶积模型, 提出了非稳态褶积模型及其反褶积方法(称为 Gabor 反褶积或非稳态反褶积), 使得系统描述与解决非稳态特征问题成为可能。

3.1 非稳态反褶积原理

利用 Gabor 变换, 时-频域的非稳态褶积模型可以直观地表示为震源子波 $\hat{w}(f)$ 、吸收衰减 $\alpha(t, f)$ 与反射系数 $\hat{r}_g(t, f)$ 三项的乘积^[17], 即

$$\hat{s}_g(t, f) \approx \hat{w}(f)\alpha(t, f)\hat{r}_g(t, f) \quad (7)$$

式中 $\alpha(t, f)$ 是非稳态特征的数学体现, 该项源于吸收衰减, 但对于大地滤波的多种非稳态作用具有一定的普适性^[17,18]。若只考察幅值大小, 则得到动态褶积模型的普遍形式为

$$|\hat{s}_g(t, f)| \approx |\hat{w}(f)| |\alpha(t, f)| |\hat{r}_g(t, f)| \quad (8)$$

在上述基础上进行对数变换, 得到对数时-频域非稳态线性模型为

$$L_{s_g}(t, f) = -\frac{\pi}{Q}tf + [L_w(f) + L_{r_g}(t, f)] \quad (9)$$

式中 L 代表对其角标的对数运算。该线性方程斜率与品质因子 Q 紧密相关, 截距则反映震源子波和

反射系数的综合影响, 这为实现三者高质量分离创造了条件^[6]。与一般非稳态反褶积方法稍有不同, 实现校正非稳态特征在于量化并移除式(9)首项影响, 而保留震源子波和反射系数。

如图 2 所示, 对数域的非稳态影响由 $tf = \text{常数}$ 决定, 以双曲线为等值线。采取类似于常规双曲平滑的策略^[17], 将地震道的对数时-频谱进行双曲条带划分并统计每个条带均值, 而这些均值构成的曲线(称衰减曲线)实质上是对非稳态信息的量化。

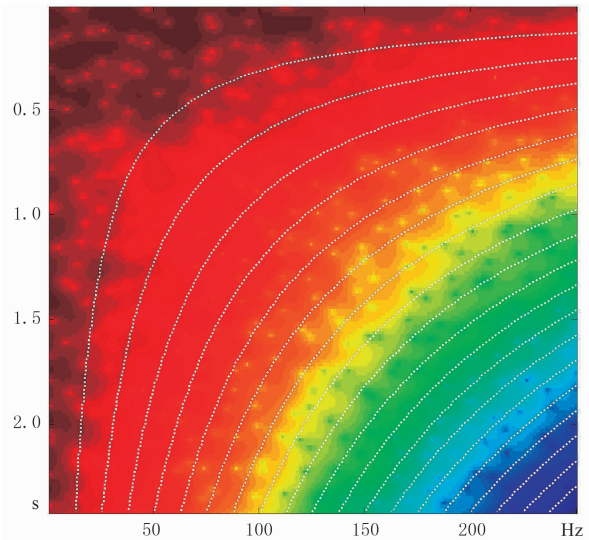


图 2 对数时-频域双曲条带划分(20 等分)示例

3.2 非稳态特征分析与校正

以海上叠后地震数据为例, 采用非稳态反褶积在对数时-频域分析地震道的吸收衰减特征并给予校正, 以此采用基于柯西约束准则的稀疏反褶积反演反射系数与地震子波。尽管此叠后地震数据经过精细处理^[19], 但是非稳态特征却依然存在。图 3b 为其中一道的 Gabor 时-频谱, 其浅部能量强、有效频带宽, 而深部能量弱、有效频带窄, 非稳态特征明显; 且对数域衰减曲线(图 3c)具有明显下降趋势, 直接指示了非稳态的存在。

利用对数域 Gabor 反褶积思路, 分段迭代分段线性校正非稳态影响^[7](图 3d、图 3e)。可以看出, 校正后地震道的有效频带得到拓宽, 深部能量实现了有效补偿, 衰减曲线基本校平, 非稳态特征得到有效校正。在时-频域幅值处理的基础上, 用最小相位假设获得相位处理结果, 并利用反 Gabor 变换将时-频域结果变换到时间域(图 4), 可见, 非稳态特征得到有效校正, 有效频带变宽(图 4c、图 4d)。

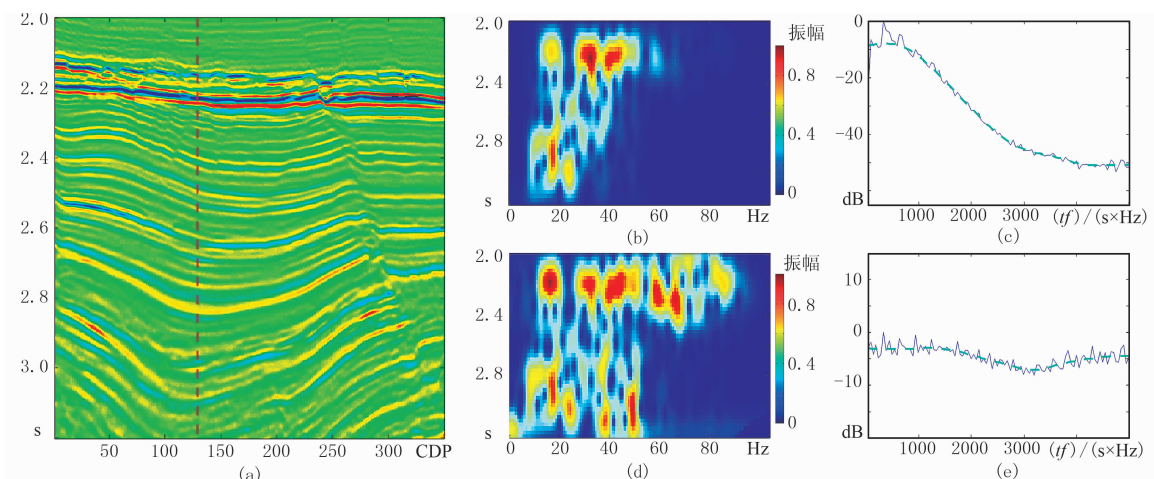


图 3 海上叠后地震数据非稳态特征分析与校正结果比较

(a)原始地震剖面; (b)实际地震道的原始时—频谱; (c)图 3b 的数据衰减曲线; (d)非稳态校正后的时—频谱; (e)图 3d 数据的衰减曲线

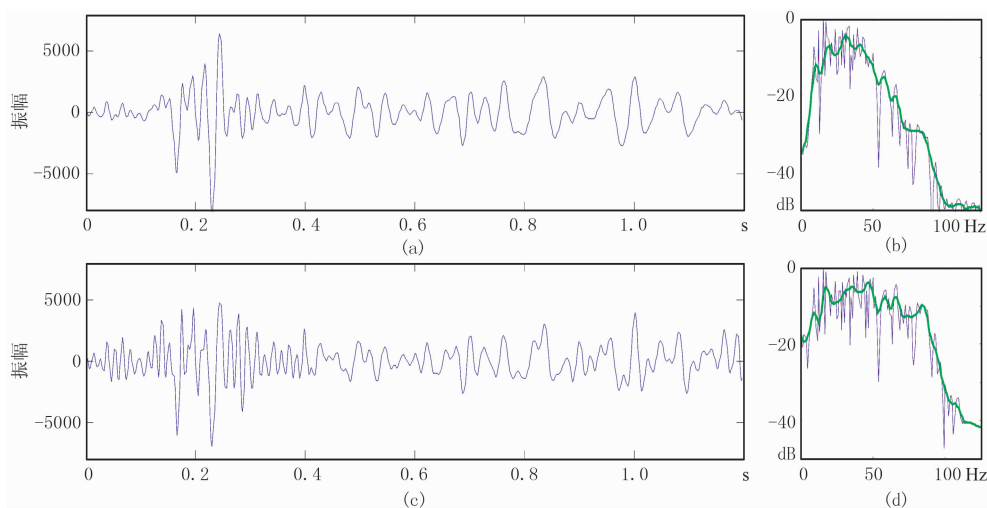


图 4 非稳态反褶积处理前后的时域结果及频谱对比

(a)原始地震道; (b)图 4a 数据的频谱; (c)非稳态反褶积; (d)图 4c 数据的频谱

3.3 非稳态稀疏反褶积单道测试

非稳态反褶积技术在分析并校正地震非稳态特征方面具有独特优势,但是最小相位与白噪声反射系数假设却限制了其技术的应用。因此,利用非稳态反褶积技术校正地震信号的非稳态特征后,配合使用稀疏反褶积,不仅能获得更加可靠的反射系数估计,还有望减小对反褶积技术中最小相位的不合理假设的依赖。

稀疏反褶积处理中的基本参数设置如下:设定地震子波长为 16 个采样点,以脉冲反褶积结果作为初始输入,假设地震道中存在 2% 的白噪声,通过测试确定反射系数的标准差,以柯西准则作为稀疏约束并根据反射系数相对误差小于 10^{-4} 作为终止迭代条件。图 5 左是以实测地震道直接进行稀疏反

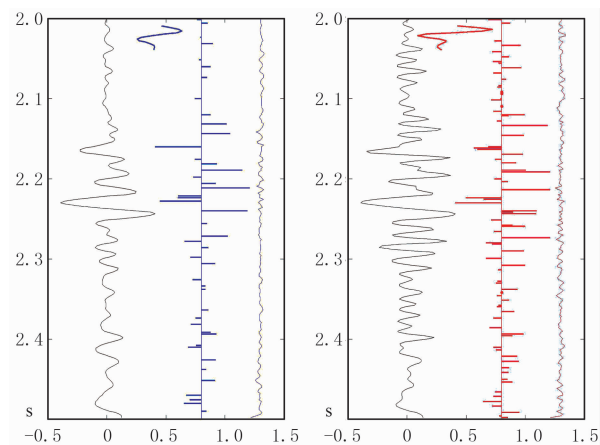


图 5 常规稀疏反褶积(左)与非稳态稀疏反褶积(右)单道测试结果

从左至右依次为:输入地震道,子波估计,反射系数估计以及移除的噪声

褶积结果,右图则为校正非稳态性之后的稀疏反褶积结果。在基本参数设置相同的情况下,非稳态稀疏反褶积获得了更丰富的反射系数估计,对弱小反射系数也实现了有效恢复。

4 应用实例

本文在 A 海域叠后地震资料中选取了两个具有代表性的地震剖面进行测试对比,其中第一个剖面整体情况相对简单,同相轴可连续追踪;而第二个剖面为生物礁储层段,礁体内部反射微弱,整体构造复杂。

4.1 简单地层

采用与上节相类似的参数选取准则,按照常规稀疏反褶积与非稳态稀疏反褶积两种流程,对地震子波与反射系数进行迭代求解,所得反射系数按照正负极性显示结果如图 6 所示。由图可见,该地层构造简单,稀疏反褶积过程相对稳定,子波估算结果横向差异较小。与常规稀疏反褶积方法对比,非稳

态稀疏反褶积极大地丰富了反射系数的估计结果,横向上更加连续,而且估算的地震子波大部分属于混合相位性质,因此反褶积结果也存在着相位的调整和优化。

4.2 生物礁储层

在处理具有复杂构造的地震资料时,横向差异大通常会导致地震子波估算结果变化大,造成反射系数具有横向条带效应。鉴于此,本文将估算的地震子波取平均作为固定子波(图 7a,图 7d),迭代估算反射系数,能够在一定程度上避免这种不稳定性(图 7c,图 7f)。

本例聚焦于礁体层段内(如图 7 中矩形区域)的反射系数描述,该层段内的反射系数估算结果按照正负极性对比如图 8 所示。常规稀疏反褶积原始地震剖面中模糊不清的反射信息清晰可见,礁体底部的调谐效应稳定地分解成三个反射系数轴(图中箭头处)。另外,经过非稳态校正之后的稀疏反褶积方法能进一步丰富礁体内部的反射系数成分,突出了原本微弱不连续的反射系数信息(图 8c、图 8d)。

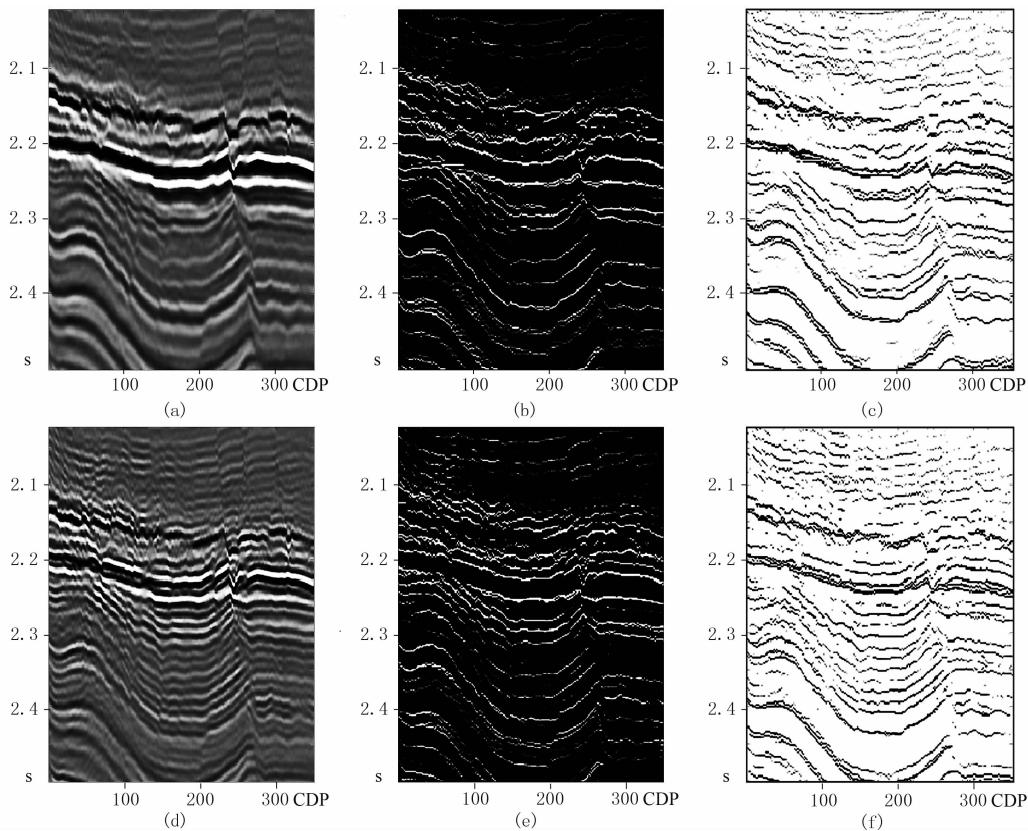


图 6 简单地层的稀疏反褶积结果

(a)常规地震剖面;(b)常规稀疏反褶积正极性反射系数剖面;(c)常规稀疏反褶积负极性反射系数剖面;(d)非稳态稀疏反褶积后地震剖面;(e)非稳态稀疏反褶积正极性反射系数剖面;(f)非稳态稀疏反褶积负极性反射系数剖面

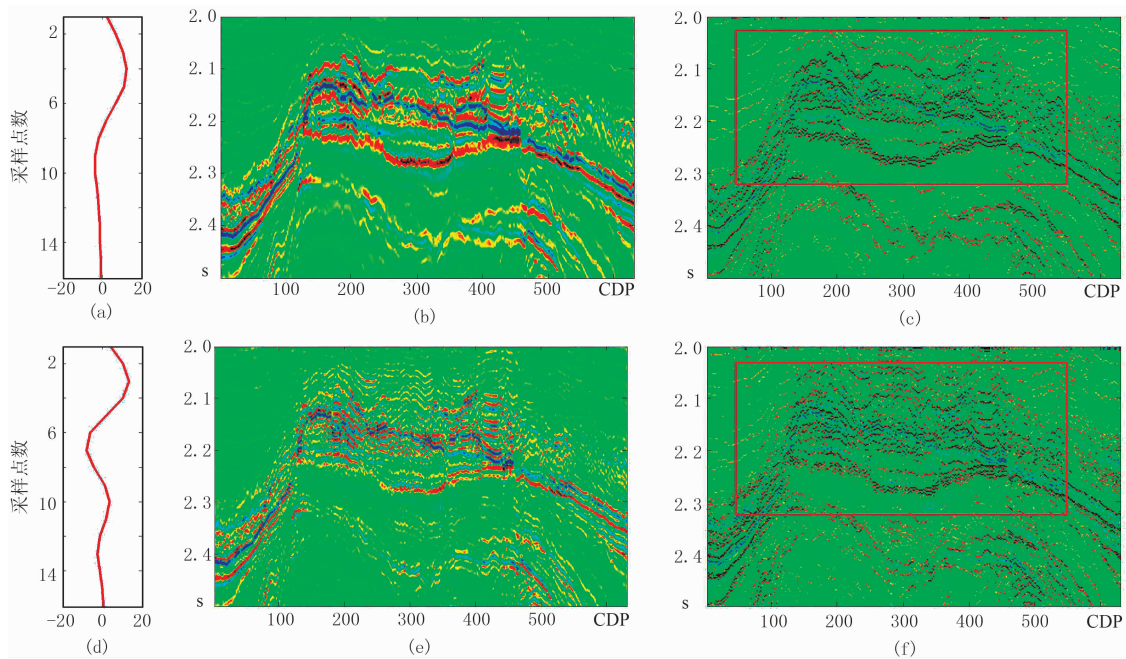


图 7 生物礁储层平均子波稀疏反褶积结果

(a)估算的子波; (b)常规地震剖面; (c)常规稀疏反褶积; (d)平均子波; (e)Gabor子波反褶积; (f)非稳态稀疏反褶积

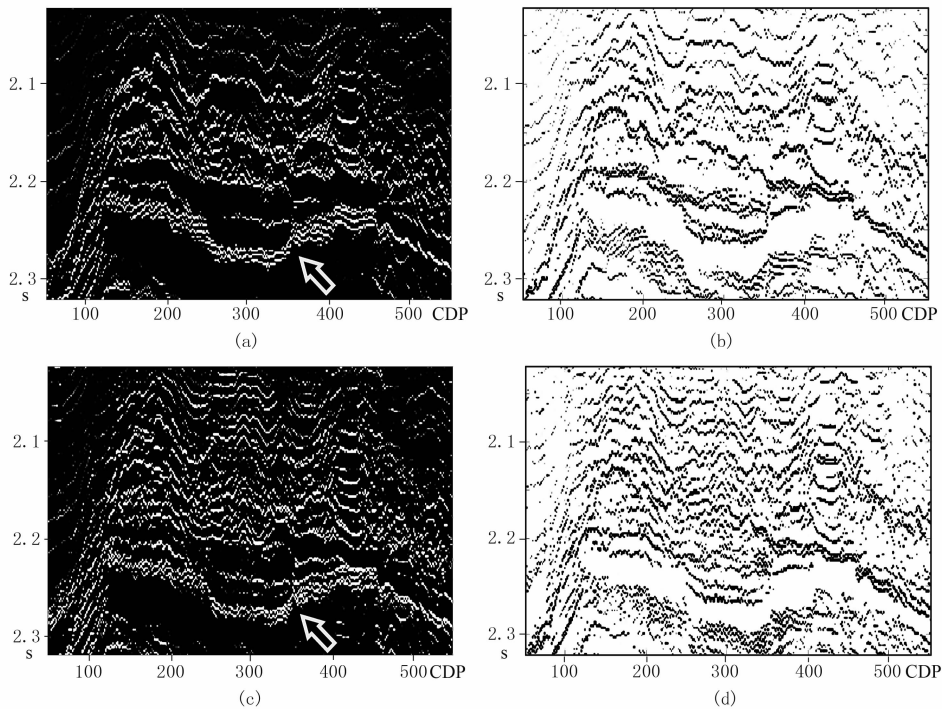


图 8 礁体层段内的常规稀疏反褶积(上)与非稳态稀疏反褶积(下)分极性剖面对比

(a)常规稀疏反褶积正极性反射系数剖面; (b)常规稀疏反褶积负极性反射系数剖面;
(c)非稳态稀疏反褶积正极性反射系数剖面; (d)非稳态稀疏反褶积负极性反射系数剖面

5 结束语

受多种大地滤波作用的影响,地震信号具有典

型的非稳态特征,这一事实在很大程度上限制了以稳态假设为根基的褶积方法解决实际问题的能力,使深层分辨率提高受限,丢失重要反射系数信息,误导后续解释。事实上,处理非稳态的最大难题在于

难以量化表述,缺少定量标准指导处理过程。鉴于吸收衰减性质是大地滤波作用的重要组成部分且对多种地球物理效应也具有一定概括性,本文以此为基础在对数时—频域分析各双曲条带的能量分配关系,以校正衰减曲线至基本平直为指导标准,平衡非稳态特征的影响,促使处理后的地震数据更符合稳态子波假设,使后续反演获得的反射系数更加真实丰富。

与非稳态反褶积相比,稀疏反褶积的优势在于能有效地避免反射系数白噪的假设,还可以带来相位的调整与改进。因此,利用非稳态反褶积平衡非稳态特征影响,而由稀疏反褶积分离反射系数与地震子波,可以取得优势互补、相得益彰的效果。客观地讲,地震子波估算精度对地震资料最终处理结果影响很大,而仅依靠地震数据及反射系数白噪化的假设,并采用线性迭代求解的做法通常难以获得准确可靠的地震子波估算结果,尤其在处理具有复杂构造的地震资料时,这种处理方法的稳定性会受到影响。另外,地震资料中的噪声也在很大程度上影响了非稳态稀疏反褶积的精度。因此,合理运用各种约束条件、提高子波估算精度、增强计算稳定性与抗噪性是非稳态稀疏反褶积方法的研究和发展方向。

参 考 文 献

- [1] Wiggins R. Minimum entropy deconvolution. *Geoprospection*, 1978, 16: 21-35.
- [2] Longbottom J, Walden A T, White R E. Principles and application of maximum kurtosis phase estimation. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(2): 115-138.
- [3] Velis D R. Stochastic sparse-spike deconvolution. *Geophysics*, 2008, 73(1): R1-R9.
- [4] Dondurur D. An approximation to sparse-spike reflectivity using the gold deconvolution method. *Pure and Applied Geophysics*, 2010, 167(10): 1233-1245.
- [5] Sun S Z, Bai Y, Wu S et al. Two promising approaches for amplitude-preserved resolution enhancement. *The Leading Edge*, 2012, 31(2): 206-210.
- [6] Sun X K, Sun S Z, Peng T et al. Gabor deconvolution: hyperbolic smoothing in logarithmic magnitude spectrum. *SEG Technical Program Expanded Abstract*, 2012, 31:.
- [7] Sun X K, Sun S Z, Zhou X Y et al. Gabor deconvolution based on hyperbolic smoothing in log spectra. *EAGE Technical Program Expanded Abstract*, 2013.
- [8] 张繁昌, 刘杰, 印兴耀等. 修正柯西约束地震盲反褶积方法. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(4): 391-396. Zhang Fanchang, Liu Jie, Yin Xingyao et al. Modified Cauchy-constrained seismic blind deconvolution. *OGP*, 2008, 43(4): 391-396.
- [9] Sacchi M D. Reweighting strategies in seismic deconvolution. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 651-656.
- [10] Canadas G. A mathematical framework for blind deconvolution inversion problems. *SEG Technical Program Expanded Abstract*, 2002, 21.
- [11] Griffiths L J, Smolka F R, Tremblay L D. Adaptive deconvolution: A new technique for processing time-varying seismic data. *Geophysics*, 1977, 42(4): 742-759.
- [12] Koehler F, Taner M T. The use of the conjugate-gradient algorithm in the computation of predictive deconvolution operators. *Geophysics*, 1985, 50(12): 2752-2758.
- [13] Bickel S H, Natarajan R R. Plane-wave Q deconvolution. *Geophysics*, 1985, 50(9): 1426-1439.
- [14] Hargreaves N D, Calvert A J. Inverse Q filtering by Fourier transform. *Geophysics*, 1991, 56(4): 519-527.
- [15] Wang Y. Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*, 2006, 71(3): V51-V60.
- [16] Margrave G F. Theory of nonstationary linear filtering in Fourier domain with application to time-variant filtering. *Geophysics*, 1998, 63(1): 244-259.
- [17] Margrave G F, Lamoureux M P, Henley D C. Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data. *Geophysics*, 2011, 76(3): W15-W30.
- [18] O'Doherty R F, Anstey N A. Reflections on amplitudes. *Geophysical Prospecting*, 1971, 19(3): 430-458.
- [19] Sun S Z, Yang H, Zhang Y et al. The application of amplitude-preserved processing and migration for carbonate reservoir prediction in the Tarim Basin, China. *Petroleum Science*, 2011, 8(4): 406-413.

(本文编辑:金文昱)

作 者 简 介



孙学凯 硕士,1987年生;2008年在中国矿业大学(徐州)获得地球物理学学士学位;2011年获中国矿业大学(徐州)固体地球物理学硕士学位。目前在中国石油大学(北京)攻读博士学位。研究方向主要包括地震资料处理和反演及高分辨率处理、各向异性偏

移、裂缝检测。