

匹配追踪谱反演处理技术在精细地震解释中的应用

刘建辉,明 君,彭 刚

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘 要:受地震资料分辨能力的限制,薄储层、微小断层等小尺度地质体刻画始终是困扰油田精细勘探与开发的难题之一。基于匹配追踪算法的频谱分解反演技术为提高地震综合解释精度提供了一条新的途径。该技术在高精度频谱分解基础上不依赖于先验模型及解释层位等约束,基于叠后地震数据体可直接反演并得到地震反射系数序列。该数据体具备很高的分辨能力,作为基础数据在地层层序细节刻画、薄储层及小断层等微小地质目标识别等方面具有明显优势。该技术在渤海数个油田中进行应用并取得较好效果,具有广阔的应用前景。

关键词:匹配追踪;谱反演;反射系数;薄层识别;小断层刻画

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.11009

随着油气勘探开发程度的不断深入,地震资料的分辨能力越来越难满足目前油田研究的精度要求。为了满足地质目标识别的需要,改善地震基础数据的质量,提高地震数据的分辨率成为薄层识别等精细地震解释所必不可少的技术手段。云美厚、丁伟等^[1-3]认为要提高地震的分辨率必须改善地震子波本身的特性,如子波压缩、提高主频、扩展有效频带宽度等;凌云研究组^[4,5]认为在叠前通过相对保持振幅、频率、相位和波形的高分辨率数据处理,通过地震属性分析可以获得 $<1/4$ 地震波长的薄层信息;李曙光等^[6]对常用的几种提高地震分辨率的方法(小波变换分频重构、广义S变换、反Q滤波)原理及实际应用效果进行了对比分析。

近年来,基于频谱分解的谱反演技术为提高地震数据分辨率及精细地震解释提供了一条新的

研究方法和思路^[7,8]。谱分解的技术核心是地震信号的时频分析技术,能否精细刻画地震信号的时频特征往往受到分频算法的影响。傅立叶变换得到的振幅谱或相位谱反映的是地震信号的平均信息而得不到局部的信息;短时傅立叶变换的时频分辨率受到窗函数的限制,给实际应用带来一定困难;小波变换是一种多尺度的方法,可对不同频率用不同尺度进行分析,带来的是尺度与频率之间的关系难以掌控;Mallat等^[9]提出的匹配追踪分解算法具有自适应的分解特点,不依赖时窗和追踪路径,因此能够得到精度较高的时频分辨能力,可以更加准确的刻画地震信号时频特征。Portnaguine、Chopra 和 Castagna 等^[10-13]在匹配追踪算法基础上进行一定改进,应用到频谱分解处理当中,利用频谱资料和谱反演目标函数通过相应的反演算法便可直接反演出分辨率很高的反射系数序列,在薄层识别、小断裂刻画及层序边界识别等方面具有一定的优势。

收稿日期:2018-04-15

作者简介:刘建辉(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事地震资料储层预测与综合解释工作。E-mail: liujh8@cnooc.com.cn

1 技术原理

1.1 匹配追踪原理

匹配追踪是一种贪婪算法,其在每一步迭代中选择最适应信号的近似部分波形,核心思想是将信号表示为一系列与信号局部结构特征最佳匹配的时频原子的线性组合^[9]。

地震信号的稀疏表达式如下:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n k_i m(t - t_i, p_i, \theta_i) + g f^{(n)}(t) \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为带限地震信号;

$g f^{(n)}(t)$ 是匹配后残余信号;

n 是迭代的原子个数,通过设置阈值来判断迭代终止条件,进而确定迭代原子个数。原子是通过 4 个参数 t_i (延时)、 p_i (主频)、 k_i (相关系数)、 θ_i (相位) 来控制。

给定原子库 $E = \{m_j, j=1, 2, \dots, J\}$, 且满足 $\|m_j\| = 1$, 这些向量可扩展成 N 维 Hilbert 空间。对于任意信号 $f(t)$, 从 E 中寻找与其最佳匹配的原子 m_{j_r} 。满足如下匹配条件:

$$|\langle f, m_{j_r} \rangle| = \sup_{j \in E} |\langle f, m_j \rangle| \quad (2)$$

其中: $\langle \dots \rangle$ 表示内积,用 $g f^{(1)}(t)$ 表示投影值和信号的差值,即第 1 次迭代的残余信号,由此信号可以表示成:

$$f(t) = \langle f, m_{j_0} \rangle m_{j_0} + g f^{(1)}(t) \quad (3)$$

初始状态下, $g f^{(0)}(t) = f(t)$ 。显然 m_{j_0} 和 $g f^{(1)}(t)$ 是正交的,可得:

$$\|g f^{(0)}(t)\|^2 = |\langle f, m_{j_0} \rangle|^2 + \|g f^{(1)}(t)\|^2 \quad (4)$$

逐次迭代逼近,必然使得残差 $g f(t)$ 的能量最小化,使投影 $|\langle f, m_{j_0} \rangle|$ 极大化。

经过 n 次迭代后, $g f^{(n)}(t) = k_n m_n + g f^{(n+1)}(t)$, $k_n = \frac{|\langle g f^{(n)}, m_{j_n} \rangle|}{\|m_{j_n}\|^2}$, 信号被分解为:

$$f(t) = \sum_{r=0}^{n-1} \langle g f^{(r)}(t), m_{j_r} \rangle m_{j_r} + g f^{(n)}(t) \quad (5)$$

利用公式(5)即可对地震信号进行匹配追踪谱分解,通过不断迭代寻找最佳匹配,当残差降到低于预定阈值即可结束。匹配追踪谱分解具有优

越的自适应特征,采用具有良好时间、频率分辨率的 Cabor 型时—频原子对地震信号不断寻找最佳匹配,真实准确的对地震信号进行时频分解,减少了频谱中交叉项的干扰,获得高精度的时频数据体。将匹配追踪谱分解获得的高精度时频数据应用到谱反演目标函数中作为输入,可以大大提高谱反演求解反射系数的精度。

1.2 谱反演原理

谱反演技术是在地震信号频谱分解基础上发展起来的一种提高薄层成像精度的反演技术。该方法不需要先验地质模型约束,无需层位和井的约束,利用时频分析获取地震中的局部频谱信息,然后基于反射系数奇偶分解原理,在频率域构建目标函数,通过求解直接得到反射系数体,其分辨率远远高于原始地震数据,可在精细地震解释工作中可发挥巨大作用。

Tirado 在对 widess 楔状模型进行分辨率极限研究时发现,对任意一个信号的反射系数序列 $r(t)$ 可分解为奇部 $r_o(t)$ 和偶部 $r_e(t)$, 前者为一对值相等但极性相反的反射系数序列(与 wdiess 模型相似),后者为一对极性相同的反射系数序列,奇分量具有奇对称性,偶分量具有偶对称性^[10-13]。

$$r(t) = r_o(t) + r_e(t)$$

$$r_o(t) = [r(t) - r(-t)]/2 \quad (6)$$

$$r_e(t) = [r(t) + r(-t)]/2$$

根据理论分析,信号的奇分量能削弱薄层的识别能力,而应用少量的偶分量就可以提高薄层的分辨能力。基于反射系数奇偶分解原理和地震记录褶积理论,在多层模型情况下,经过复杂推导,在频率域建立谱反演目标函数表达式^[9-12]:

$$G(r_o, r_e, t, T) = \int_{f_l}^{f_H} [\alpha_e \{ \text{Re}[S(t, f)/W(t, f)] - \int_{-t_w}^{t_w} r_e(t) \cos[\pi f T(t)] dt \} + \alpha_o \{ \text{Im}[S(t, f)/W(t, f)] - \int_{-t_w}^{t_w} r_o(t) \sin[\pi f T(t)] dt \}] df \quad (7)$$

式中: $S(t, f)$ 、 $W(t, f)$ 分别为应用匹配追踪谱分解得到的地震记录振幅谱和子波的振幅谱;

$\text{Re}[\dots]$ 为频谱实部;

$\text{Im}[\dots]$ 为频谱虚部;

$r_e(t)$ 、 $r_o(t)$ 分别为反射系数偶分量和奇分量;

α_e 、 α_o 为反射系数偶分量和奇分量所占比重,用来调节噪音和分辨率,当 α_e/α_o 值越高时,反射率就越接近 Widess 模型,分辨率截止值变为 $\lambda/8$;

f_l 、 f_H 分别为低频截止值和低频截止值;

t_w 为反演半时窗长度。

谱反演的实质是在频谱分解的基础上,通过反演方法使频率域目标函数达到极小而得到反射系数,与时间域褶积残差目标函数相比,频率域中求解具有更好的收敛性和约束性,可以有效减少反演多解性。方程的求解可采用最小二乘法等模拟退火算法等随机反演方法^[14,15],这里不做详细阐述。

影响谱反演效果的主要因素为地震数据信噪比和初始子波。当地震资料信噪比较高时,反演可以提取更多有效频带内的信息,提高反演效果的准确性,因此在实际应用时应首先进行相应的去噪处理,保证地震资料具备较高的信噪比,以增强反演效果的稳定性;而初始子波的准确性也直接影响反演结果,应在合理的地震时窗内从地震数据中提取到较为准确的子波,这是谱反演取得良好效果的关键。另外,根据实际处理地震数据的时窗范围选择合适的采样率,可以有效节约计算时间,提高计算效率。

2 实际应用

在叠后地震数据上应用基于匹配追踪的谱反演技术可直接得到反射系数,该数据具有很高的分辨能力,可直接用于储层横向变化分析、层序界面识别等工作。为了更直观的应用于实际生产之中,常对反射系数进行处理,如通过颜色反演得到相对阻抗进行薄储层的预测,或与宽频地震子波褶积得到高分辨率的地震数据进行精细属性解释等。本文分别从薄储层识别及小断层精细刻画两个方面展示基于匹配追踪的谱反演处理技术在油田综合解释中的实际应用效果。

2.1 薄储层识别实例

渤海 A 油田薄储层识别应用。已钻井 A1 在

新近系明下段钻遇多套砂岩储层,其中包含 4 套油层(图 1 中箭头所示,井上曲线为 Gamma),厚度在 8~15 m 不等,油层之间发育有厚度 5~6 m 的泥岩隔夹层。受地震分辨率的限制及地震反射调谐的影响,现有地震资料及基于该资料的反演结果(图 2)均无法对油层及泥岩隔夹层进行准确刻画。而谱反演处理后得到的反射系数剖面(图 3)与井上实钻储层顶底对应较好,基于反射系数得到的波阻抗剖面(图 4)上,4 套油层及泥岩隔夹层均得到较好的刻画,对后续开发井轨迹设计提供了可靠的依据。

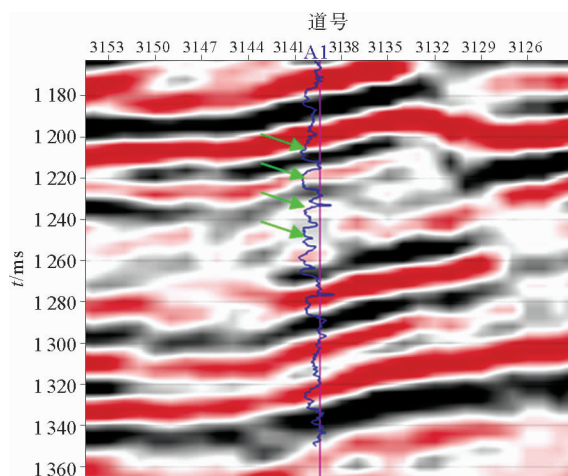


图 1 原始地震剖面

Fig. 1 Original seismic data

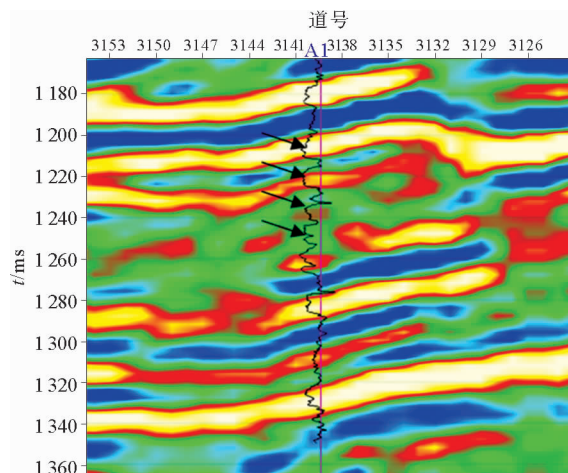


图 2 原始地震反演波阻抗剖面

Fig. 2 Inverted impedance with original seismic data

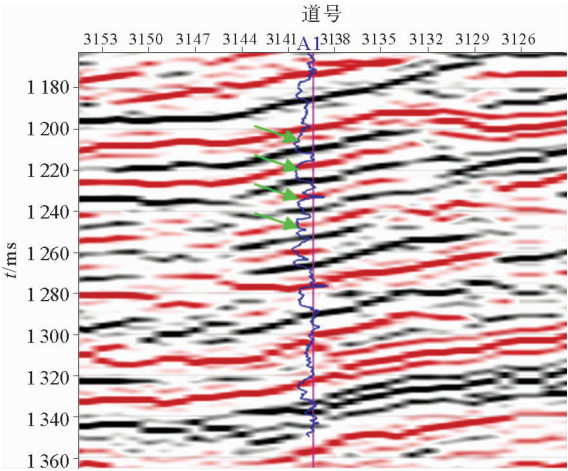


图 3 谱反演反射系数剖面
Fig. 3 Reflection coefficients profile

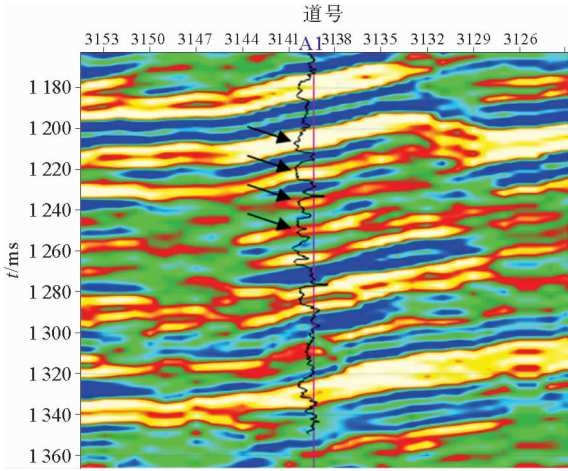
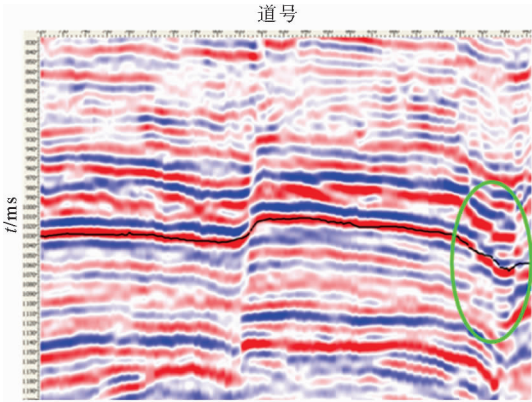


图 4 谱反演波阻抗剖面
Fig. 4 Impedance profile from spectral inversion

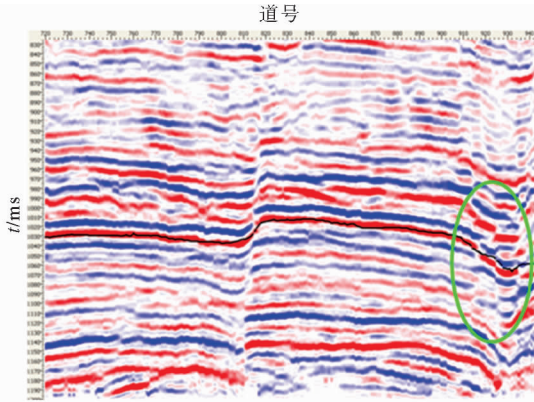
2.2 小断层精细刻画实例

渤海某探区 B 构造小断层精细刻画应用。原始地震剖面(图 5a)绿色圆圈处,能够模糊的看出小断层的存在,谱反演得到的宽频地震剖面,频带宽度得到一定拓展,纵横向分辨能力得到一定提高。从宽频地震剖面(图 5b)中可见 3 条小断

层的断点变得更加清晰,易于进行精细解释;同时对原始数据和宽频数据以同样的参数求取相干体,并沿同一层位提取平面属性图(图 6),基于宽频数据的平面断层形态变得更加清晰,特别是圆圈处小断层的展布刻画十分清楚,给地震精细解释提供了可靠依据。



(a) 原始地震剖面



(b) 谱反演宽频地震剖面

图 5 地震剖面对比
Fig. 5 Comparison of seismic section

3 结论

基于匹配追踪的谱反演技术是提高地震分辨能力的一种新的思路 and 手段,通过谱反演可以直接从叠后地震数据中获取反射系数体,在地震资

料信噪比较高条件下可解决常规资料无法准确识别的薄层识别问题,并对勘探开发中常遇到的储层横向变化情况进行精细刻画,为油气勘探和油藏描述提供重要依据。利用谱反演得到的反射系数体与高频子波褶积,还可获得频谱拓宽的高分辨率地震数据,在此数据基础上可进行高精度地

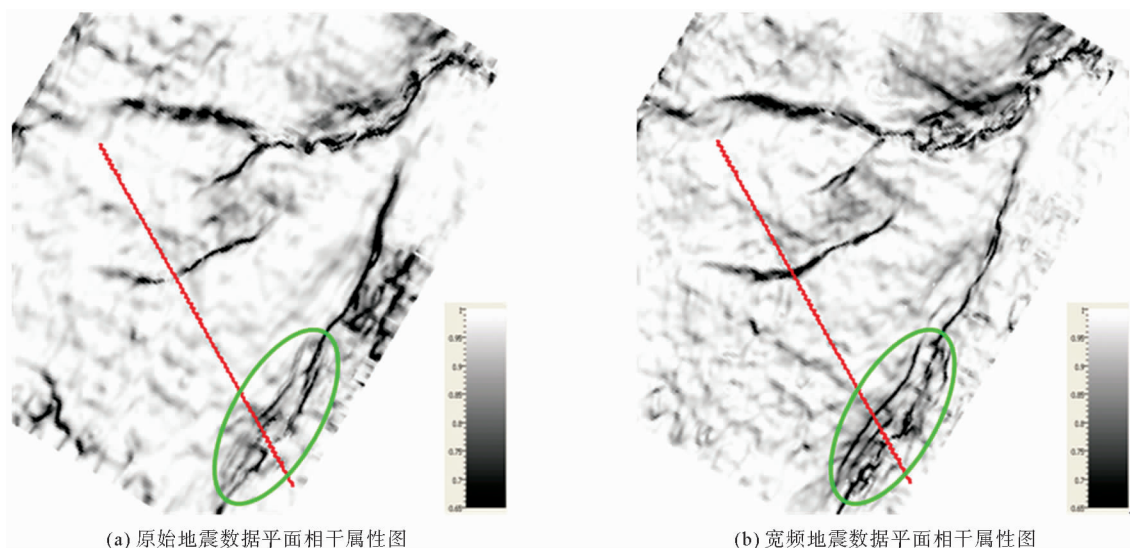


图 6 平面相干属性图对比

Fig. 6 Comparison of variance property along a horizon

震属性分析,在小断层等地质目标的高精度刻画以及层序界面识别等方面具有良好的应用效果。

需要注意的是,由于谱反演过程中高频的拓展来源于原始地震频谱分解的高频成分,原始地震数据的信噪比直接影响反演的可靠性,因此在谱反演之前需进行必要的去噪处理,以保证输入数据的信噪比。另外,由于谱反演过程没有井约束,在反演时需与已钻井进行标定来确定合适的反演参数,在最终成果应用中也需做到地震地质一体化解释,为高精度勘探开发提供更加可靠的成果。

参考文献:

- [1] 云美厚.地震分辨率[J].勘探地球物理进展,2005,28(1):13-14.
- [2] 云美厚,丁伟.地震分辨力新认识[J].石油地球物理勘探,2005,40(5):603-608.
- [3] 云美厚,丁伟,杨凯.地震道空间分辨力研究[J].地球物理学进展,2005,20(3):741-746
- [4] 凌云研究组.应用振幅的调谐作用探测地层厚度小于1/4波长地质目标[J].石油地球物理勘探,2004,38(3):268-274.
- [5] 凌云研究组.叠前相对保持振幅、频率、相位和波形的地震数据处理与评价研究[J].石油地球物理勘探,2004,39(5):543-544.
- [6] 李曙光,唐建明,徐天吉,等.几种提高地震资料分辨率的方

法及效果分析[J].勘探地球物理进展,2010,33(5):323-327.

- [7] 曹鉴华,邱智海,郭得海,等.叠后地震数据的谱反演处理技术及其应用浅析[J].地球物理学进展,2013,28(1):0387-0393.
- [8] 刘万金,周辉,袁三一,等.谱反演在地震属性解释中的应用.石油地球物理勘探[J].2013,48(3):423-428.
- [9] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41: 2297-3415.
- [10] Portniaguine O, Castagna J P. Inverse spectral decomposition[C]//The 74th SEG Annual International Meeting. SEG Expanded Abstracts,2004:1786-1789.
- [11] Chopra S, Castagna J P, Portniaguine O. Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion[J]. CSEG Recorder, 2006,31(1):19-25.
- [12] Chopra S, Castagna J P, Portniaguine O. Thin-bed reflectivity inversion[C]//Expanded Abstracts of 76 Annual International SEG,2006: 2057-2061.
- [13] Puryear C I, Castagna J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application[J]. Geophysics,2008,73(2):37-48.
- [14] 张广智,李宁,李超,等.基于非常快速模拟退火算法的地震谱反演方法[J].西北地震学报,2012,34(4):313-318.
- [15] 柴新涛,李振春,韩文功,等.基于LSQR算法的谱反演方法研究[J].石油物探,2012,51(1):11-18.

APPLICATION OF SPECTRAL-INVERSION BASED ON
MATCHING PURSUIT TO SEISMIC INTERPRETATION

LIU Jianhui, MING Jun, PENG Gang

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd. , Tianjin 300459, China)

Abstract: Due to the limitation of seismic resolution, small geological objects, such as thin beds and microfaults are difficult to be identified. The spectral-inversion technique based on matching pursuit has been introduced in this paper as an effective way to improve the resolution of seismic interpretation. Spectral-inversion technique can directly acquire reflection coefficient data without any prior model and horizon based on high precise matching pursuit spectral decomposition. The reflection coefficient data can be used for stratigraphic sequence description, thin reservoir prediction and small fault identification with its higher resolution. Actual applications of this technology to several oilfields have shown good results and a wide application is expected.

Key words: matching pursuit; spectral-inversion; reflection coefficient; thin reservoir identification; small fault identification

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部