

· 经验交流 ·

基于正交多项式的高精度零炮检距地震道拟合

薛亚茹^{*①} 陆文凯^② 陈小宏^① 黄饶^① 刘志鹏^①

(^①中国石油大学·北京; ^②清华大学自动化系信息处理所)

薛亚茹, 陆文凯, 陈小宏, 黄饶, 刘志鹏. 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

摘要 提高零炮检距地震道的拟合精度是保幅地震资料处理的关键环节之一。相对于常规地震叠加技术, 二阶多项式拟合技术能够提高零炮检距地震道的拟合精度。但是不同时刻地层反射信号的 AVO 特性是变化的, 仅仅利用二阶多项式来实现零炮检距地震道拟合是达不到精度要求的。本文采用正交多项式描述 CMP 道集上不同时刻地层反射信号的 AVO 特性, 建立正交多项式系数谱; 并根据 SVD 估计有效波的能量, 自适应地确定不同时刻拟合零炮检距地震道信号所需的阶次, 实现高精度的零炮检距地震道拟合。合成记录和实际数据的处理表明该方法能够有效地减小零炮检距地震道拟合误差, 提高拟合精度。

关键词 零炮检距 拟合精度 正交多项式 系数谱 AVO

1 引言

提高零炮检距地震道的拟合精度是保幅地震资料处理的关键环节之一。地震叠加技术是一种零阶的零炮检距地震道拟合技术, 虽然可以明显地提高地震资料的信噪比, 但是却牺牲了零炮检距地震道的拟合精度。俞寿朋根据 CMP 道集的 AVO 特性提出的零炮检距地震道拟合技术可以克服常规叠加技术带来的高频损伤的缺点^[1], 所拟合的零炮检距剖面要比常规叠加剖面具有更高的分辨率。常规零炮检距地震道拟合技术采用二阶或四阶代数多项式拟合, 用代数多项式直接构造最佳平方逼近方程往往呈现出病态, 容易造成数值的不稳定性^[2], 并且计算结果对噪声敏感。由于 CMP 道集在不同时刻的 AVO 特性是有变化的, 若采用一定阶的多项式拟合, 则无法较好地描述 AVO 变化特性。

针对以上两个问题, 本文采用正交多项式拟合零炮检距地震道。首先对动校正后的 CMP 道集进行正交多项式变换, 建立正交多项式系数谱, 该谱描述了 CMP 道集在正交多项式域的能量分布; 然后根据 SVD 方法估计有效波的能量, 从而能自适应确定零炮检距地震道的拟合阶次。由于此方法可对不

同时刻的地层反射信号采用变阶的正交多项式拟合, 因此提高了零炮检距拟合精度。

2 正交多项式拟合

设一个共中心点道集为 $s(x, t)$, 共 $N+1$ 道, 其零炮检距地震道为 $z(t)$, x 为炮检距, t 为时间。对于某一时刻 t , 不同炮检距地震道的信号和炮检距的关系可以用常规偶次多项式来拟合

$$s(x, t) = z(t)[1 + a_1(t)x^2 + \dots + a_L(t)x^{2L}] \quad (1)$$

式中: $a_1(t), \dots, a_L(t)$ 为待定系数; L 为拟合阶次; $z(t)$ 为零炮检距地震道。给定多项式阶次 L 后, $a_1(t), \dots, a_L(t)$ 和 $z(t)$ 可用最小二乘法确定。在此法中, 求解待定系数需要解代数方程组, 但是该代数方程组往往呈现出病态, 使得拟合误差较大, 因此本文采用正交多项式拟合 CMP 道集以达到减小拟合误差的目的。

选定炮检距坐标上的标准正交多项式集 $\{p_i(x), i=0, \dots, N\}$ ^[3], $p_i(x)$ 表示第 i 阶正交多项式。利用该正交函数集, 对于某一时刻 t , 不同炮检距上的信号和炮检距的关系可以表达为

$$s(x, t) = \sum_{i=0}^N c_i(t) p_i(x) \quad (2)$$

*北京市昌平区中国石油大学资源与信息学院, 102249

本文于 2007 年 8 月 29 日收到。

采用最小二乘估算可得

$$c_i(t) = \sum_{j=0}^N s(x_j, t) p_i(x_j) \quad (3)$$

式中 $c_i(t)$ 是 t 时刻信号 $s(x, t)$ 在第 i 阶正交多项式上的投影系数, 我们定义 $c_i(t)$ 为信号 $s(x, t)$ 的正交多项式系数谱。由于各阶正交多项式是单位正交多项式, 由帕斯瓦尔定理可知^[4], 对于某一时刻信号 $s(x, t)$ 满足

$$\sum_{i=0}^N s(x_i, t) = \sum_{i=0}^N c_i^2(t) \quad (4)$$

因此 $c_i(t)$ 也描述了信号 $s(x, t)$ 在正交多项式域的能量分布。

3 正交多项式系数谱的自适应滤波

考虑到 CMP 道集的 AVO 特性一般可以用低阶多项式描述, 因此在正交多项式系数谱中, 低阶系数表示有效波成分, 而高阶系数则表示噪声分量。为此设计一个合理的正交多项式系数谱滤波器, 滤除高阶系数的影响。常规叠加技术实际上是阶次为零阶的滤波器, 叠加结果是各 CMP 道集的均值; 二阶多项式拟合就是阶次为二阶的滤波器, 比常规叠加技术阶次增加, 地震分辨率也比常规叠加技术有所提高。但是 CMP 道集上不同地层的 AVO 特性并不能完全由二阶多项式表征, 不同地层的 AVO 特性不同, 表征其变化的多项式阶次也需要不同。

由式(4)可知, 正交多项式系数谱表示 AVO 在各阶正交多项式的能量分布, 因此可以根据有效波能量来确定正交多项式的阶次。通常采用 SVD 分解法估计有效波的能量。用矩阵 \mathbf{A} 表示地震记录, 其元素为 $a(t, x)$, t 表示采样点时间, x 表示道号。 \mathbf{A} 包含有效波信号 \mathbf{S} 和噪声 \mathbf{S}_n , 即 $\mathbf{A} = \mathbf{S} + \mathbf{S}_n$, 根据 SVD 理论, \mathbf{A} 可以写成

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \sum \mathbf{V}^T = \sum_{k=1}^r \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k \quad (5)$$

式中: \mathbf{U}, \mathbf{V} 分别是由 $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ 和 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的特征向量 $\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k$ 组成的矩阵; \sum 是 $\mathbf{A}\mathbf{A}^T$ 的特征值按递减顺序组成的对角阵, 又称为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值矩阵, 其中 \mathbf{A} 的秩为 r 。可以证明对于动校正后的 CMP 道集, 有效波信号的能量集中在第一个特征值上, 噪声能量分布在各个特征值上^[5], 故有效波信号的能量为

$$E_s = \sigma_1 - \frac{1}{r-1} \sum_{i=2}^r \sigma_i \quad (6)$$

在正交多项式系数谱中, 假设对某时刻有效信号的能量可用前面的 M 阶系数表示, 即

$$E_s = \sum_{i=0}^M c_i^2(t, f) \quad (7)$$

令式(7)近似等于式(6)估计的有效波能量, 即可以确定阶次 M 。

鉴于不同时刻数据拟合所需正交多项式的阶次是不相同的, 故阶次 M 是时变的, 从而实现 CMP 道集的自适应变阶正交多项式拟合, 即某时刻的零炮检距地震道拟合表示为

$$\tilde{S}(0, t) = \sum_{i=0}^M c_i(t) p_i(0) \quad (8)$$

4 资料处理

为了验证该算法的有效性, 我们采用上述方法处理人工合成的 CMP 道集。该模型炮检距范围为 0~3900m, 检波器间隔为 100m。图 1a 为人工合成 CMP 道集; 图 1b 是三个层位的各道反射系数, 第一个层位的反射系数由正到负, 发生极性反转, 在远道反射系数的绝对值逐渐减小; 第二个层位的反射系数由负到正, 同样也发生了极性反转, 第三个层位的反射系数全部为正值, 在开始时随着炮检距的增加缓慢减小, 在 25 道附近又逐渐增大。CMP 道集是反射系数与 40Hz 雷克子波的褶积结果。图 1c 是该记录的 10 阶正交多项式系数谱, 由该谱可以看到, AVO 的变化完全可以由低阶多项式来描述, 但仅仅使用二阶多项式是不够的, 对于不同地层反射信号的 AVO 变化不同, 需要用不同阶正交多项式来描述。

考虑地层的衰减及动校拉伸畸变, 将上述 CMP 道集做 Q 滤波来衰减远道记录的高频, 远道记录的振幅谱为

$$A(f) = A_0(f) \exp(-\pi ft/Q)$$

式中 $A_0(f)$ 表示零炮检距地震道的振幅谱。滤波后的结果如图 1d 所示, 衰减因素会降低叠加剖面的分辨率。将合成记录中前 5 道抽出, 利用第 6~40 道数据, 分别采用本文所述方法和二阶多项式拟合技术所得到的零炮检距地震道进行对比(图 1e)。图 1e 中从左至右分别是合成(即真实)零炮检距地震道、正交多项式拟合技术得到的零炮检距地震道

和二阶多项式拟合技术得到的零炮检距地震道。图 1f 给出了正交多项式拟合结果的误差,图 1g 给出了二阶多项式拟合结果的误差。从图中可以看到

二阶多项式的拟合误差较大,而正交多项式拟合得到的零炮检距地震道的误差非常小,非常接近合成零炮检距记录。

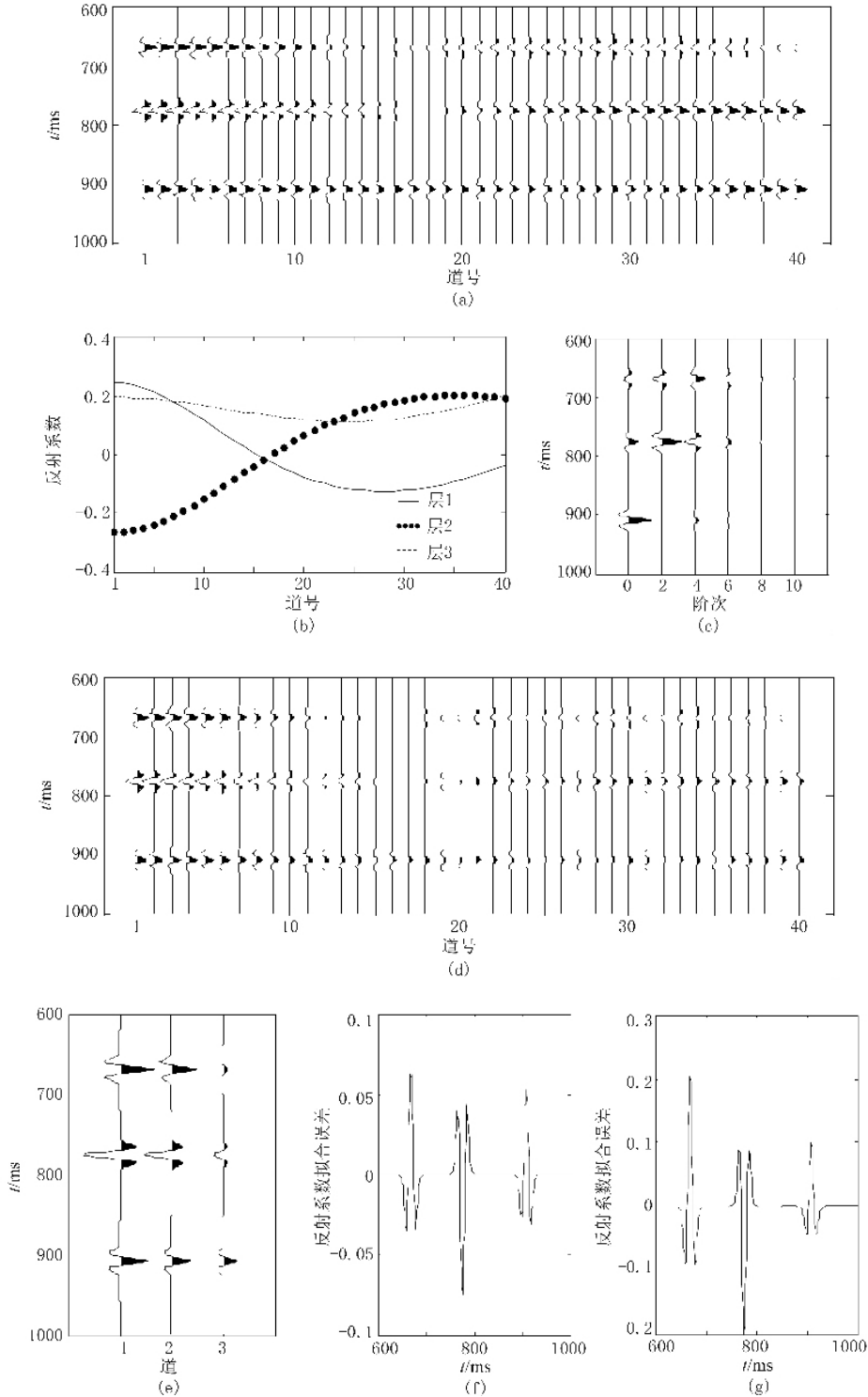


图 1 合成记录的零炮检距地震道拟合

(a)合成 CMP 道集;(b)各层位反射系数;(c)CMP 道集的 10 阶正交多项式系数谱;(d) $Q=2$ 滤波后的 CMP 道集;(e)合成的(1 道)、本文所述方法(2 道)及二阶多项式(3 道)等拟合的零炮检距地震道的对比;(f)正交多项式拟合误差结果;(g)二阶多项式拟合误差

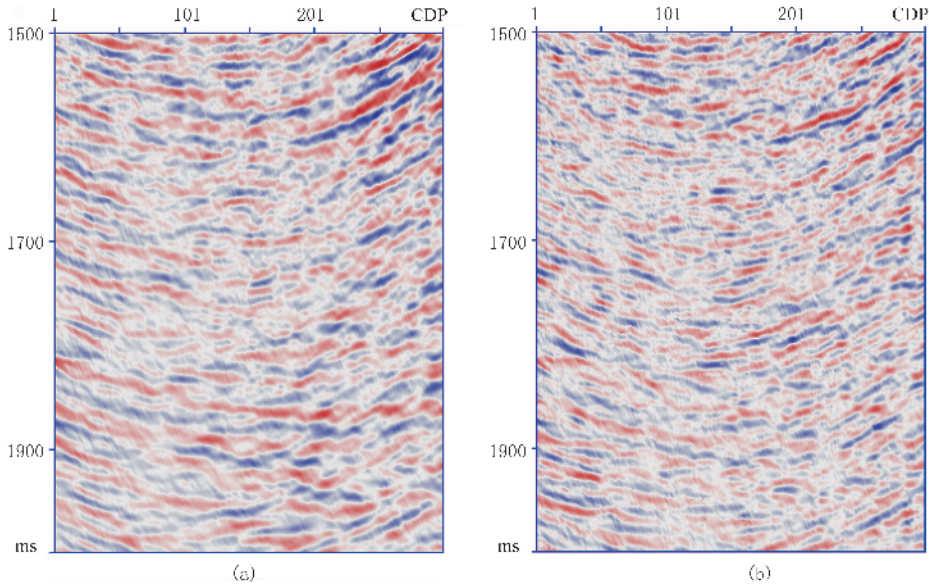


图2 二阶零炮检距拟合剖面(a)与本文所述方法拟合剖面(b)对比图

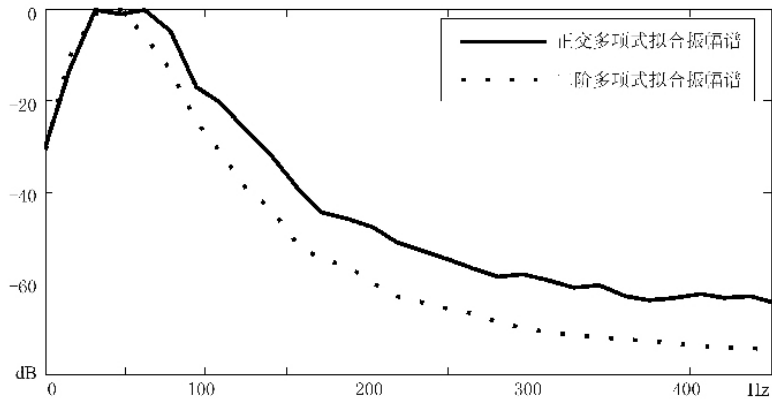


图3 正交多项式拟合和二阶多项式拟合频谱对比

将该方法应用于实际资料的处理结果如图2所示。图2a为用二阶零炮检距拟合的剖面,图2b是采用本文所述正交多项式拟合的结果。从对比图可以看到,本文所述方法拟合剖面的分辨率较常规零炮检距拟合剖面有所提高,主要表现为一些断点显示较清晰,层位信息更丰富。图3显示了两种方法的频谱,从中可以看到利用正交多项式拟合剖面的主频有所提高,有效频带也略有加宽。

5 结束语

本文提出一种高精度正交多项式拟合零炮检距地震道的方法,即首先将CMP道集进行正交多项式变换,得到CMP道集正交多项式系数谱,然后根

据SVD分解法估计有效波的能量,自适应地确定零炮检距道的拟合阶次,针对不同地层AVO特性,实现时变的CMP道集拟合。利用此方法可以减小零炮检距地震道拟合误差,提高拟合精度。

参考文献

- [1] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探. 北京:石油工业出版社, 1993
- [2] 文世鹏. 数值分析. 北京:石油工业出版社,1999
- [3] Johansen T A, Brulan L, Lutro J. Tracking the AVO by using orthogonal polynomials. *Geophysical prospecting*, 1995, 43: 245~261
- [4] 郑君里. 信号与系统. 北京:高等教育出版社,2000
- [5] 刘洋,李承楚. 地震资料信噪比估计的几种方法. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(2): 257~262

(本文编辑:张亚中)