

文章编号:1673-5005(2010)01-0041-05

# 子空间法单输入多输出系统混合相位地震子波提取

杨培杰<sup>1,2</sup>, 潘勇<sup>3</sup>, 穆星<sup>1</sup>, 任向东<sup>4</sup>

(1. 胜利油田地质科学研究院, 山东东营 257015; 2. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东东营 257061;  
3. 胜利油田井下作业公司, 山东东营 257077; 4. 胜利油田孤岛采油厂, 山东东营 257000)

**摘要:**针对高阶统计量混合相位地震子波提取方法要求地层反射系数是非高斯白噪声,并且子波提取速度较慢的缺陷,提出子空间法单输入多输出系统(SIMO)混合相位地震子波提取方法,即基于信号和噪声子空间正交的原理,建立二次型的目标函数,通过对目标函数进行优化就可以提取出混合相位的地震子波,它不需要对地层反射系数做任何假设,因此完全不同于高阶统计量地震子波提取。模型试验和实际应用结果表明,子空间法 SIMO 系统混合相位子波提取速度快且准确度高,非常适合于无井和井资料不可靠地区的地震子波提取,具有广阔的应用前景。

**关键词:**子空间法;单输入多输出系统;二阶统计量;混合相位子波

**中图分类号:**P 631.443 **文献标志码:**A

## Mixed-phase seismic wavelet extraction of SIMO system by subspace method

YANG Pei-jie<sup>1,2</sup>, PAN Yong<sup>3</sup>, MU Xing<sup>1</sup>, REN Xiang-dong<sup>4</sup>

(1. *Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257015, China;*  
2. *College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;*  
3. *Downhole Service Company of Shengli Oilfield, Dongying 257077, China;*  
4. *Gudao Oil Production Plant of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China*)

**Abstract:** The method of high-order statistics seismic wavelet extraction requires reflection coefficient to be non-gauss white noise and its extraction speed is slow. In order to overcome the shortcomings, a novel mixed-phase seismic wavelet extraction method for single input multiple output(SIMO) system by subspace method was presented. Quadratic objective function was built based on the orthogonality between a signal and a noise subspaces, and the seismic wavelets were extracted by optimizing the objective function. The reflection coefficient need not be made any assumption. So this method is totally different from high-order statistics wavelet extraction. The results of numerical simulation and application show that this method is characterized by high accuracy and good stability, and it is very suitable for the areas without well materials or reliable well materials. This method has wide application prospects.

**Key words:** subspace method; single input multiple output(SIMO) system; second order statistics; mixed-phase wavelet

地震子波在地震勘探正反演中起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。子波的提取方法包括两大类,第一类是确定性子波提取方法,第二类是统计子波提取方法。第一类子波提取方法<sup>[2-5]</sup>指的是利用地震道数据结合测井资料求出地震子波;第二类统计性提取子波的方法不需要测井资料,主要基于高阶统计量理

论<sup>[6-11]</sup>,通过地震道自身来提取子波,这类方法的缺点是假设地层反射系数是非高斯白噪声且需要较多的数据才能有比较好的估计效果。另外还有基于二阶统计量的方法<sup>[12-13]</sup>,该方法假设地下的反射是具有高斯白噪声谱的随机序列,由于二阶统计量并不含有信号的相位信息,因此对于子波的相位谱必须给

收稿日期:2009-04-06

基金项目:国家“973”项目(2007CB209605)

作者简介:杨培杰(1972-),男(汉族),山东青州人,工程师,博士,博士后,从事地震反演、属性分析及储层预测方面的研究。

出一定的假设,如假设地震子波是零相位、最小相位等,而实际上地震子波是一种混合相位的。子空间法混合相位子波提取可以克服这些不足,与高阶统计量子波提取方法相比速度快且稳定性好。笔者基于信号和噪声子空间正交的原理,建立二次型的目标函数,提出一种子空间法单输入多输出系统混合相位地震子波提取方法。

### 1 问题描述

从盲信号处理的角度出发,混合相位子波提取应该属于盲系统辨识<sup>[14]</sup>的范畴,盲系统辨识(blind system identification, BSI)就是指在输入信号和系统函数都未知的情况下,仅仅根据系统的输出来辨识系统函数。

文献[15]指出,对于SIMO系统,仅仅使用二阶统计量就可以进行盲系统辨识。子空间法混合相位子波提取就是基于这样的思想,考虑如下地震褶积模型:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \mathbf{h}(t - mT) + \mathbf{b}(t). \quad (1)$$

式中,  $T$  为采样时间;  $\mathbf{x}(t)$  为地震道;  $\mathbf{h}(t)$  为系统函数即地震子波;  $\mathbf{b}(t)$  为观测噪声。

假设:

- (1)  $\mathbf{h}(t)$  只在有限的时间内有值;
- (2) 系统是单输入双输出(single input dual output, SIDO)系统。

#### 1.1 过采样

对于单输入单输出(single input single output, SISO)系统可以采用过采样技术转化为SIMO系统,用采样周期  $\Delta < T$  对观测数据进行过采样,则可以产生  $P = T/\Delta$  个采样序列  $\mathbf{x}_n^{(i)} = \mathbf{x}(t_0 + i\Delta + nT), i = 0 \sim (p - 1)$ , 每个序列对应一个系统函数

$$\mathbf{H}^{(i)} = [h_0^{(i)}, h_1^{(i)}, \dots, h_M^{(i)}]^T = [h(t_0 + i\Delta), \dots, h(t_0 + i\Delta + MT)]^T, \quad (2)$$

共有  $p$  个系统函数,每一个系统函数的长度相同,都等于  $M + 1$ 。令  $\mathbf{X}_n^{(i)} = [x_n^{(i)}, x_{n-1}^{(i)}, \dots, x_{n-N+1}^{(i)}]^T$ , 则

$$\mathbf{X}_n^{(i)} = \mathbf{H}_N^{(i)} \mathbf{D}_n + \mathbf{B}_n^{(i)}. \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{H}_N^{(i)} = \begin{bmatrix} h_0^{(i)} & \dots & h_M^{(i)} \\ & h_0^{(i)} & \dots & h_M^{(i)} \\ & & \ddots & \\ & & & h_0^{(i)} & \dots & h_M^{(i)} \end{bmatrix}.$$

式中,  $\mathbf{D}_n$  和  $\mathbf{B}_n^{(i)}$  分别代表  $(N + M) \times 1$  和  $N \times 1$  的向

量;  $\mathbf{H}_N^{(i)} = \mathbf{T}_N(\mathbf{H}^{(i)})$  为  $N \times (N + M)$  维的 Toeplitz 滤波矩阵。

过采样后的数据为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_n^{(0)} \\ \mathbf{X}_n^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_n^{(L-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_N^{(0)} \\ \mathbf{H}_N^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_N^{(L-1)} \end{bmatrix} \mathbf{D}_n + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_n^{(0)} \\ \mathbf{B}_n^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_n^{(L-1)} \end{bmatrix},$$

它的维数是  $LN \times (N + M)$ 。使用上面的符号,第  $i$  个传感器接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{x}^{(i)}(t) = \sum_{m=0}^M d_{n-m} \mathbf{h}^{(i)}(mT) + \mathbf{b}^{(i)}(t).$$

#### 1.2 子空间

令观测向量  $\mathbf{X}_n$  的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_x = E(\mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^T).$$

由于观测噪声与系统的输入数据相互独立,则  $\mathbf{R}_x$  还可以写成

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{H}_N \mathbf{R}_d \mathbf{H}_N^T + \mathbf{R}_b.$$

其中

$$\mathbf{R}_d = E(\mathbf{D}_n \mathbf{D}_n^T), \mathbf{R}_b = E(\mathbf{B}_n \mathbf{B}_n^T),$$

式中,  $\mathbf{R}_d$  的维数是  $(N + M) \times (N + M)$ , 未知且是满秩的;  $\mathbf{R}_b$  是白噪声序列,  $\mathbf{R}_b = \sigma^2 \mathbf{I}$ 。

令 FIR 滤波器  $\mathbf{H}^{(i)}$  的传递函数为  $\mathbf{H}^{(i)}(z) = \sum_{j=0}^M h_j^{(i)} z^j$ 。假设  $N \geq M$  且多项式  $\mathbf{H}^{(i)}(z)$  之间没有共同的零点,则  $\mathbf{H}_N$  是列满秩的,即  $\text{rank}(\mathbf{H}_N) = N + M$ 。

#### 1.3 子空间分解混合相位子波提取

因为矩阵  $\mathbf{R}_d$  是满秩的,则自相关矩阵  $\mathbf{R}_x$  的信号部分  $\mathbf{H}_N \mathbf{R}_d \mathbf{H}_N^T$  的秩为  $(M + N)$ , 令  $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{LN-1}$  为  $\mathbf{R}_x$  的  $LN$  个特征值,因为  $\text{rank}(\mathbf{H}_N \mathbf{R}_d \mathbf{H}_N^T) = N + M$ , 则

$$\begin{cases} \lambda_i > \sigma^2, & i = 0, 1, \dots, M + N - 1, \\ \lambda_i = \sigma^2, & i = M + N, \dots, LN - 1. \end{cases}$$

令  $\mathbf{S}_i$  和  $\mathbf{G}_i$  分别代表信号特征值(即  $\lambda_i > \sigma^2$ ) 和噪声特征值的特征向量,自相关矩阵  $\mathbf{R}_x$  还可以表示为

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{S} \text{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{M+N-1}) \mathbf{S}^T + \sigma^2 \mathbf{G} \mathbf{G}^T,$$

其中

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}_0, \dots, \mathbf{S}_{M+N-1}], \mathbf{G} = [\mathbf{G}_0, \dots, \mathbf{G}_{LN-M-N-1}].$$

矩阵  $\mathbf{S}$  的列代表信号子空间  $(M + N)$  维, 矩阵  $\mathbf{G}$  的列与之正交, 代表噪声信号子空间, 且有

$$\mathbf{G}_i^T \mathbf{H}_N = \mathbf{0}, 0 \leq i \leq LN - M - N. \quad (4)$$

公式(4)的正交条件对于系统函数(地震子波)

来说是线性的,在实际应用中,只能得到信号噪声特征向量的估计值,最终可以得到如下二次型目标函数:

$$\begin{cases} q(\mathbf{H}) = \sum_{i=0}^{LN-M-N-1} |\mathbf{G}_i^T \mathbf{H}_N|^2 = \mathbf{H}^T \mathbf{Q} \mathbf{H}, \\ \text{s. t.} \\ \mathbf{A} \cdot \mathbf{H} = \mathbf{C}, \quad -c_1 \leq \mathbf{H} \leq c_2. \end{cases}$$

当目标函数达到最小时就提取出了混合相位的地震子波  $\mathbf{H}$ 。

需要说明的是,本文中所提到的噪声信号子空间是指由于系统函数  $\mathbf{h}(t)$  的不同所产生的,它与观测数据的噪声  $\mathbf{b}(t)$  是不同的。

## 2 模型验证

地层反射系数采用混合高斯模型 (mixture Gaussian model, MGM) 求解,如图 1(a) 所示,然后与两个混合相位地震子波褶积并分别得到两道地震记录(图 1(b),(c))。共使用了两个地震子波来模拟两个系统函数,这两个子波的时间长度相同,但是幅度不同,并且相位上也有差别。其中图 1(b) 的地震记录使用的子波形状为图 2(a) 的实线,图 1(c) 的地震记录使用的子波形状为图 2(b) 的实线。

图 1 反射系数及地震记录

Fig. 1 Reflection coefficient and seismic traces

图 2~4 是子空间法子波提取的结果(实线为模型给定的子波,虚线为提取的地震子波)。可以看出:当噪声为零时该方法可以得到非常好的子波提取结果(图 2);信号子空间与噪声信号子空间乘积的数量级为  $10^{-14}$ ,已经接近于零,说明信号子空间与噪声子空间是正交的(图 3)。

信噪比为 14, 10 dB 时的地震子波提取结果(图

4,  $R_{SN}$  为信噪比)显示,即使在信噪比较低的情况下(图 4(b)) 依然有较好的提取结果,说明本文中提出的子波提取方法稳定性好且抗噪能力较强。

图 2 子空间法子波提取结果(无噪声)

Fig. 2 Wavelet extraction results without noise using subspace method

图 3 信号子空间与噪声信号子空间的乘积

Fig. 3 Product of signal subspace and noise subspace

图 4 不同信噪比时的子空间法子波提取结果

Fig. 4 Wavelet extraction results with different signal-to-noise ratio using subspace method

### 3 实际地震资料应用

图5(a)为某油田一条原始叠后地震剖面,共有51道,每道300个采样点,叠后地震剖面中的每一道可以看作一个SISO系统,因此如果要采用子空间法提取子波就必须将SISO系统转化为SIMO系统,可以使用过采样技术,这里将该地震数据相邻的两道看作是SIDO系统,即将这两道数据作为系统的两道输出,而认为它们的输入(即反射系数)是相同的。图6为应用本文方法所提取出的地震子波,这里只显示了一部分。从图中可以看出,地震子波的振幅比较平滑,相位比较一致,是一种近似于零相位的混合相位子波。图7为实际地震数据与提取出子波的振幅谱比较(其中虚线代表估计出子波的平均振幅,实线为地震记录的振幅谱),可以看出提取的子波的振幅谱与地震数据的振幅谱非常一致。

图5 地震剖面及反褶积结果  
Fig.5 Seismic section and deconvolution section

图6 提取出的地震子波  
Fig.6 Extracted seismic wavelets

提取出的地震子波可用于对地震资料进行反褶积、反演等处理,从而可以提高地震资料的分辨率,为地震解释提供可靠的岩性物性参数。图5(b)是用图7的地震子波对原始剖面进行反褶积的结果,反褶积剖面在没有降低资料信噪比的情况下提高了分辨率(如图中椭圆、方框内所示)。

图7 实际地震数据与提取出子波的振幅谱比较  
Fig.7 Amplitude spectrum comparison between seismic data and extracted wavelets

### 4 结束语

提出了子空间法SIMO混合相位子波提取方法,它完全不同于传统的混合相位子波提取方法。模型试验和实际应用结果表明,本文中提出的方法准确度高且稳定性好,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 李庆忠. 走上精确勘探的道路[M]. 北京:石油工业出版社,1994.

[2] 李振春,张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营:石油大学出版社,2004:8.

[3] 梁光河. 地震子波提取方法研究[J]. 石油物探,1998,37(1):31-39.  
LIANG Guang-he. On the method of seismic wavelet extraction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1998,37(1):31-39.

[4] BULAND A, MORE H. Bayesian wavelet estimation from seismic and well data [J]. Geophysics, 2003,68(6):2000-2009.

[5] 张广智,刘洪,印兴耀. 地震子波外推方法研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(1):25-29.  
ZHANG Guang-zhi, LIU Hong, YIN Xing-yao. Study on seismic wavelet extrapolation method[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007,31(1):25-29.

[6] 戴永寿,魏磊,霍志勇. 基于高阶累积量的线性化子波提取方法研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(4):24-29.  
DAI Yong-shou, WEI Lei, HUO Zhi-yong. Research on wavelet extraction via linear equation approach based on higher-order cumulant[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2006,30(4):24-29.

[7] ULRYCH T J, VELIS D R, SACCHI M D. Wavelet estimation revisited[J]. The Leading Edge, 1995,11:1139-

- 1143.
- [8] LAZEAR G D. Mixed phase wavelet estimation using fourth order cumulants[J]. *Geophysics*, 1993,58(7):1042-1051.
- [9] VELIS D R, ULRICH T J. Simulated annealing wavelet estimation via fourth order cumulant matching[J]. *Geophysics*, 1996,61(6):1939-1948.
- [10] SACCHI M D, ULRICH T J. Nonminimum-phase wavelet estimation using higher order statistics[J]. *The Leading Edge*, 2000(1):80-83.
- [11] MATSUOKA T, ULRICH T J. Phase estimation using the bispectrum[J]. *Proceedings of The IEEE*, 1984,72(10):1403-1411.
- [12] PORSANI M J, URSIN B. Mixed-phase deconvolution[J]. *Geophysics*, 1998,63(2):637-647.
- [13] MOULINES E, DUHAMEL P, CARDOSO J. Subspace methods for the blind identification of multichannel FIR filters[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1995,43(2):516-525.
- [14] ABED-MERAIM K, QIU W, HUA Y. Blind system identification[J]. *Proceedings of IEEE*, 1997,85(8):1310-1322.
- [15] TONG L, XU G, KAILATH T. A new approach to blind identification and equalization of multipath channels[C//OL].//*Proceeding of the 25th Asilomar Conference*, Pacific Grove, CA, USA, Nov 4-6, 1991. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=186568](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=186568)

(编辑 修荣荣)

(上接第36页)

后信号振幅不变,道集同相性增强,叠加后信号有效频带变宽。

(2)利用近偏移距地震道的叠加道作为模型道,在有效消除剩余时差和校平同相轴的同时,避免了叠前道集动校拉伸畸变对模型道的影响,保证了技术实现的精度。

(3)合成和实际数据的处理结果证明该方法在消除叠前道集中剩余动校正量方面具有较强的实用性。

#### 参考文献:

- [1] 王云专,杨立伟,李素华. 剩余时差校正及泊松比反演[J]. *地球物理学进展*,2006,21(1):214-218.  
WANG Yun-zhuan, YANG Li-wei, LI Su-hua. Residual moveout correction and Poisson's ratio inversion[J]. *Progress in Geophysics*, 2006,21(1):214-218.
- [2] 林伯香,孙建国. 相位替换法剩余时差校正[J]. *石油物探*, 2001,40(3):15-22.  
LIN Bo-xiang, SUN Jian-guo. Residual moveout correc-

tion by using phase replacement[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2001,40(3):15-22.

- [3] 程玉坤,冉建斌,肖伟. 基于CRP道集的叠前处理技术及应用[J]. *勘探地球物理进展*,2008,31(1):38-43.  
CHENG Yu-kun, RAN Jian-bin, XIAO Wei. CRP gather based prestack data processing and its application[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2008,31(1):38-43.
- [4] 刘洋,魏修成. 基于线性连续速度模型的速度分析与动校正方法[J]. *石油勘探与开发*, 2003,30(5):71-74.  
LIU Yang, WEI Xiu-cheng. Velocity analysis and normal moveout correction based on linear continuous velocity model[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003,30(5):71-74.
- [5] 刘葵,刘招军,朱建伟,等. 时频分析在石油地球物理勘探中的应用[J]. *世界地质*,2000,19(3):282-285.  
LIU Kui, LIU Zhao-jun, ZHU Jian-wei, et al. Application of time-frequency analysis in geology[J]. *World Geology*, 2000,19(3):282-285.

(编辑 徐会永)

(上接第40页)

- [10] 王学军,马劲风. 考虑振幅随偏移距变化的人工合成地震记录制作方法[J]. *石油地球物理勘探*,2001,36(1):30-36.  
WANG Xue-jun, MA Jin-feng. A method for making synthetic seismogram by considering amplitude versus offset (AVO)[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001,36(1):30-36.
- [11] 马劲风,贾春环,李庆春,等. 转换波人工合成地震记录与速度反演方法研究[J]. *石油地球物理勘探*,

1999,34(5):509-519.

- MA Jin-feng, JIA Chun-huan, LI Qing-chun, et al. Converted-wave synthetic seismogram and its velocity inversion method[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999,34(5):509-519.
- [12] 李庆忠. 岩石的纵横波速度规律[J]. *石油地球物理勘探*,1992,27(1):1-12.  
LI Qing-zhong. The P and S wave velocity rule of rocks[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1992,27(1):1-12.

(编辑 修荣荣)