

任意相位子波的分形反褶积方法

乐友喜* 王才经

(石油大学(华东))

摘 要

乐友喜,王才经. 任意相位子波的分形反褶积方法. 石油地球物理勘探,1996,31(6):826~834

通过假设反射系数具有分形特性,并对预测误差滤波器进行修改,即可推导出任意相位的地震子波的反滤波方程,建立未知地震子波情况下求解反滤波因子和地震子波的迭代算法。该方法可以克服传统反褶积方法中假设反射系数为白噪声所带来的问题,能够明显提高剖面目的层段的分辨率,并具有一定的抗干扰能力。

主题词 分形 维数 反褶积 相位 子波 分辨率

ABSTRACT

Le Youxi and Wang Caijing. Fractal deconvolution of any-phase wavelets. *OGP*, 1996, 31(6):826~834

By presuming that reflectivity has fractal characteristic, and revising predictive error filter, we can deduce the antifiltering equation suitable to any-phase seismic wavelets, and construct an iteration algorithm for estimating the antifiltering operator and wavelets without known seismic wavelet. The method helps people remove the problem in usual deconvolutions which results from a presumption that reflectivity is white noise. It favours obvious improvement of objective interval resolution of a seismic section, and has certain ability of noise resistance.

Subject heading: fractal, dimension number, deconvolution, phase, wavelet, resolution

引 言

分形是由法国数学家 Mandelbrot 于 1973 年首先引入,其原意是“复杂的、粗糙的、破碎的和不规则”的意思。通俗地说,分形是极不规则、极不连续的几何图形。分形具有两个基本特性:一是自相似性,二是标度不变性。自相似性系指局部是整体成比例缩小或放大的性质,标度不变性是指对于某些图形,不论将其放大或缩小,它的形态、复杂程度及不规则性等各种特性均不会发生变化。除了严格数学意义上的分形之外,自然界实际存在的客体的自相似性是近似的或仅是统计意义上的相似,而这种相似性只存在于无标度区,超出无标度区,自相似性就不复

* Le Youxi, Petroleum University, Dongying City, Shandong Province, Postcode: 257060

本文于 1995 年 11 月 23 日收到,修改稿于 1996 年 3 月 27 日收到。

存在,这时就不能再用分形理论对其进行分析。分形的统计特性满足幂律分布,即

$$N(\delta) \propto \delta^{-D}$$

其中, δ 为观测尺度, $N(\delta)$ 是分形对象在该尺度下观测到的量度值, D 为分数维。

由罗宾逊褶积模型可知,地震记录是由地震子波与反射系数褶积得到的,由于地震子波和反射系数都未知,因此在对地震记录进行反褶积求反射系数时,就要对地震子波和反射系数序列的统计特性作假设,从而出现了各种各样的反褶积方法。实际生产中广泛使用的预测误差反褶积假设反射系数是白噪声、地震子波是最小相位的。Todeschuck 等人根据地层沉积的规律,假定这种地质现象所表现出来的特征(反映到地震上就是声阻抗函数)基本上符合 Joseph 功率谱^[1],即可认为声阻抗的功率谱与 $f^{-\beta}$ 成正比。据此,可进一步推导出反射系数序列的功率谱与 $f^{2-\beta}$ 成正比。通过几口实测井的声波时差曲线计算出反射系数序列,表明其功率谱基本上满足上述假设条件。这个假设条件与分形的统计特性——幂律分布是一致的,因而可以认为地震记录所反映的声阻抗函数具有分形特征。利用这一假设条件,本文提出了一种新的分形反褶积方法,对传统的预测误差滤波器进行修改,并从算法上加以改进,使其适合于任意相位的地震子波,从而推导出地震子波为任意相位时的反滤波方程,并建立了在地震子波未知的情况下求解反滤波因子和地震子波的迭代算法。

方 法 原 理

基于 Todeschuck 和 Jensen^[1](1988)的讨论,可以认为地震记录所反映的声阻抗函数具有分形特征,即功率谱与 $f^{-\beta}$ 成正比。地震记录通常是在一定的观测尺度(即时间采样间隔)下得到的,若存在无标度区,也应是在有限范围内的(大于采样间隔、小于记录长度),所以只能在无标度区内来分析地震记录的分形特征。利用波谱法计算分数维时,求得的分数维 D 与 β 之间的关系为: $\beta = 5 - 2D$,这样就可以通过无标度区内分析地震记录的分数维 D 得到 β 值。由于反射系数序列的功率谱与 $f^{2-\beta}$ 成正比,令 $\alpha = 2 - \beta$,从而得到反射系数的功率谱为

$$P(f) = Cf^{\alpha}$$

其中, C 为常数。利用这种假设对传统的预测误差滤波器进行修改,设计一个预测误差滤波器 $\{a_m\}$ 对地震记录 $\{x_k\}$ 作预测误差滤波,其输出就是反射系数序列 $\{\xi_k\}$ 。若同时在算法上加以改进,使其适合于任意相位的地震子波,即可推导出地震子波为任意相位时的反滤波方程。具体推导过程如下:

设 $\{w(i), i=1, 2, \dots, n\}$ 为任意相位的子波,则反子波应为双边函数,可取为 $\{a(i), i=-p, -p+1, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, q\}$ 。地震记录自相关函数的 Z 变换为

$$R(Z) = X(Z) \overline{X(Z)} = W(Z) \xi(Z) \overline{W(Z)} \overline{\xi(Z)}$$

其中, $\xi(Z)$ 为反射系数的 Z 变换,根据反滤波方程有

$$A(Z) = \frac{1}{W(Z)}$$

$$A(Z)R(Z) = \overline{W(Z)} \xi(Z) \overline{\xi(Z)}$$

对反射系数的功率谱 $P(f) = Cf^{\alpha}$ 进行傅立叶反变换,可得到反射系数序列的自相关函数 $\{\dots, Cd_{-2}, Cd_{-1}, Cd_0, Cd_1, Cd_2, \dots\}$,其对应的 Z 变换为

$$\xi(Z)\xi(Z) = \cdots + Cd_{-2}Z^{-2} + Cd_{-1}Z^{-1} + Cd_0 + Cd_1Z + Cd_2Z^2 + \cdots$$

从而

$$(a_{-p}Z^{-p} + \cdots + a_{-1}Z^{-1} + a_0 + a_1Z + \cdots + a_qZ^q)(\cdots + r_{-1}Z^{-1} + r_0 + r_1Z + \cdots) \\ = (W_0 + W_1Z + \cdots + W_nZ^n)(\cdots + Cd_{-2}Z^{-2} + Cd_{-1}Z^{-1} + Cd_0 + Cd_1Z + Cd_2Z^2 + \cdots)$$

比较两边 Z 的同幂次系数,可得到由 $\{W_0, W_1, \cdots, W_n\}$ 表示的关于 $\{a_{-p}, \cdots, a_{-1}, a_0, a_1, \cdots, a_q\}$ 的方程组

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ r_{p-i} & r_{p-i-1} & \cdots & r_{-q-i} \\ \vdots \\ r_p & r_{p-1} & \cdots & r_{-q} \\ \vdots \\ r_{p+j} & r_{p+j-1} & \cdots & r_{-q+j} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{-p} \\ \vdots \\ a_0 \\ \vdots \\ a_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \sum_{k=0}^n d_{k-i} W_k \\ \vdots \\ C \sum_{k=0}^n d_k W_k \\ \vdots \\ C \sum_{k=0}^n d_{k+j} W_k \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

又由于 $A(Z)W(Z) = (a_{-p}Z^{-p} + \cdots + a_{-1}Z^{-1} + a_0 + a_1Z + \cdots + a_qZ^q)(W_0 + W_1Z + \cdots + W_nZ^n) = 1$, 比较两边 Z 的同幂次系数,可得到由 $\{a_{-p}, \cdots, a_{-1}, a_0, a_1, \cdots, a_q\}$ 表示的关于 $\{W_0, W_1, \cdots, W_n\}$ 的方程组

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ a_{-i} & a_{-i-1} & \cdots & a_{-i-n} \\ \vdots \\ a_0 & a_{-1} & \cdots & a_{-n} \\ \vdots \\ a_j & a_{j-1} & \cdots & a_{j-n} \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_0 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

联合方程组(1)和(2),就建立起求解反滤波因子与地震子波的迭代算法。求解步骤如下:首先从地震记录中估计一个初始子波,作为方程组(1)的输入,通过解方程组(1)得到反滤波因子;然后将此反滤波因子代入方程组(2),由方程组(2)得到子波,经过几次迭代解便收敛了,从而也就得到了最终的反滤波因子和地震子波。

理论模型试验

为验证本反褶积方法的效果,首先生成一条功率谱与 f^α 成正比的反射系数序列(图1),这里取 $\alpha=0.8$ 。然后用该反射系数分别与最小相位子波及零相位子波褶积得到合成地震记录,进行反褶积试验,并与传统的预测误差反褶积结果进行比较。图2中(a)、(b)、(c)图分别为最小相位子波、零相位子波和混合相位子波,子波长度均为80ms。

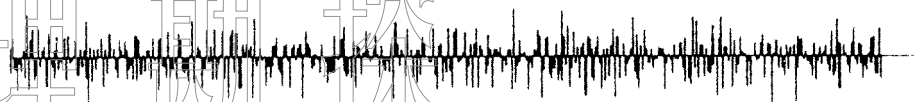


图 1 反射系数序列

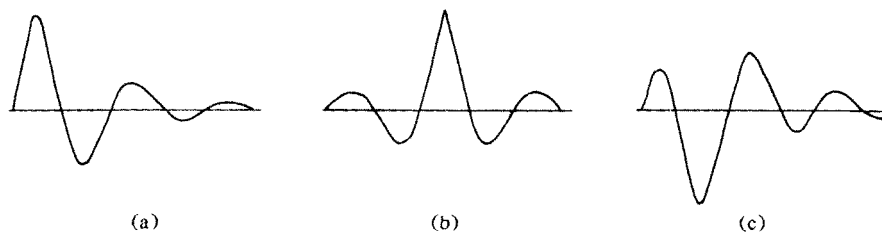


图 2 不同相位的地震子波

(a)最小相位子波;(b)零相位子波;(c)混合相位子波

最小相位子波试验

图 3 为最小相位子波与反射系数序列褶积得到的合成记录,反褶积结果如图 4 所示:

- (1)图 4a 为预测误差反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.88029;
- (2)图 4b 是用图 2a 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.98152;
- (3)图 4c 是用图 2a 作初始子波, $\alpha=1.0$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.97596;
- (4)图 4d 是用单位脉冲作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.98094;
- (5)图 4e 是用图 2b 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.98113;
- (6)图 4f 是用图 2c 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.98126。

零相位子波试验

图 5 为零相位子波与反射系数序列褶积得到的合成记录,反褶积结果如图 6 所示:

- (1)图 6a 为预测误差反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.667;
- (2)图 6b 是用图 2b 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.97084;
- (3)图 6c 是用图 2b 作初始子波, $\alpha=1.0$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.96466;
- (4)图 6d 是用单位脉冲作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.94045;
- (5)图 6e 是用图 2a 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.95171;
- (6)图 6f 是用图 2c 作初始子波, $\alpha=0.8$ 时的分形反褶积结果,该结果与反射系数序列间的相似系数为 0.95226。

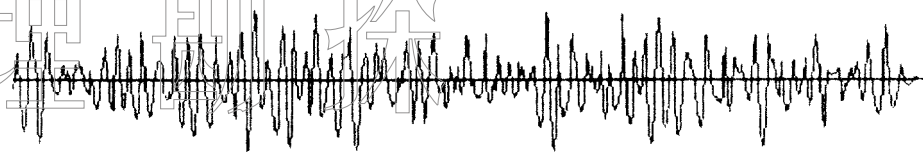


图3 最小相位子波的合成记录

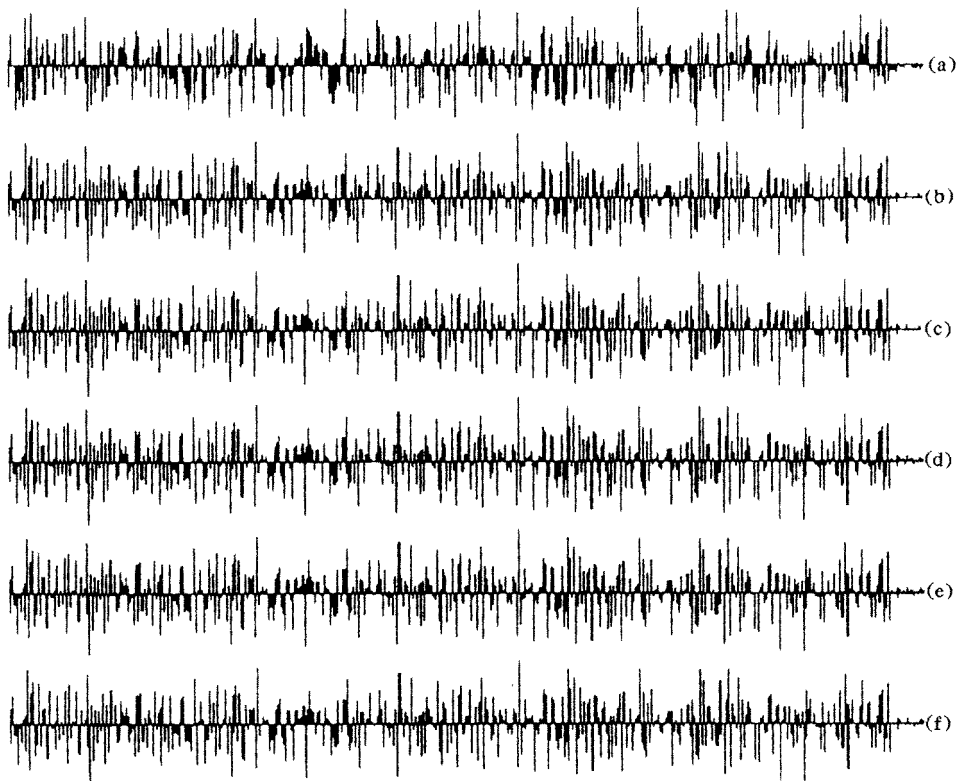


图4 对图3的反褶积结果

(a)预测反褶积结果;(b)用图2a作初始子波, $\alpha=0.8$;(c)用图2a作初始子波, $\alpha=1.0$;(d)用单位脉冲作初始子波, $\alpha=0.8$;(e)用图2b作初始子波, $\alpha=0.8$;(f)用图2c作初始子波, $\alpha=0.8$

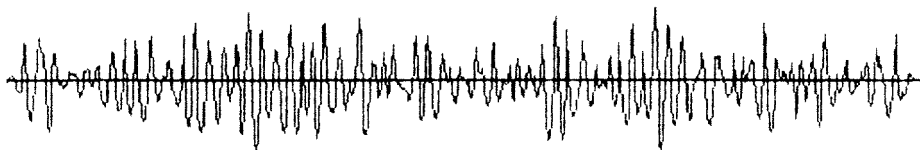


图5 零相位子波的合成记录

由图4、图6可见,分形反褶积结果要比预测误差反褶积结果好得多,并且分形反褶积结果对 α 值并不很敏感,这就为实际应用打下了较好的基础,因为实际地震记录的分形维数常常不易求准。反滤波因子的长度是一个比较重要的参数,既不能取得太短,也不能取得太长,太长了在解超定方程组时会引起较大的误差,从而使反褶积效果变差。在处理实际资料时要通过试验来选取。

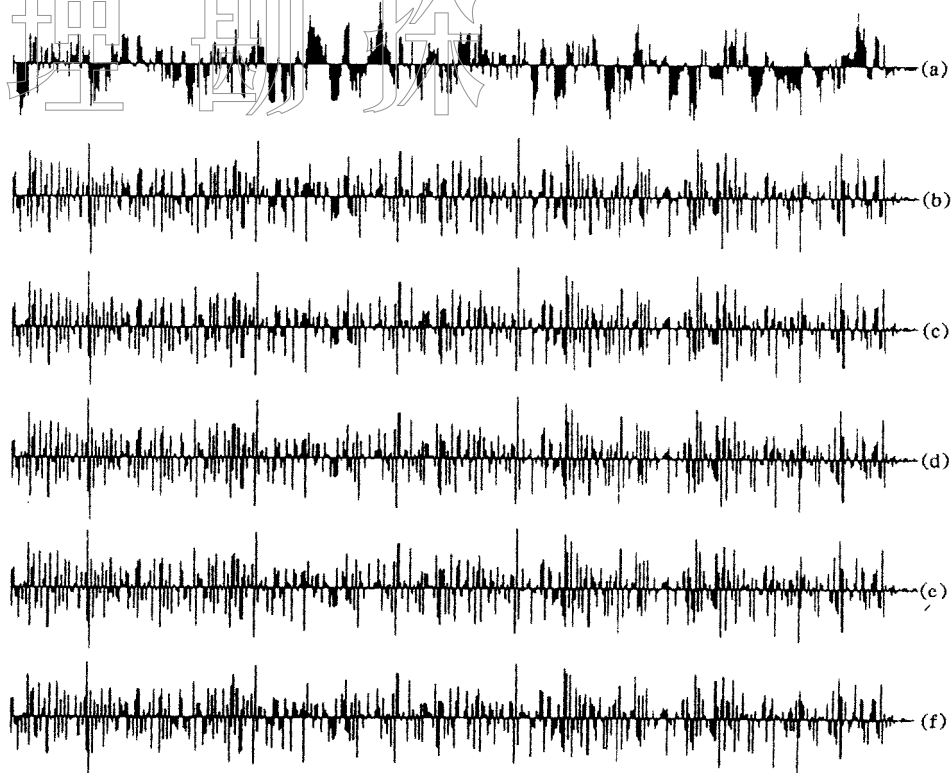


图 6 图 5 的反褶积结果

(a)预测反褶积结果;(b)用图 2b 作初始子波, $\alpha=0.8$;(c)用图 2b 作初始子波, $\alpha=1.0$;(d)用单位脉冲作初始子波, $\alpha=0.8$;(e)用图 2a 作初始子波, $\alpha=0.8$;(f)用图 2c 作初始子波, $\alpha=0.8$

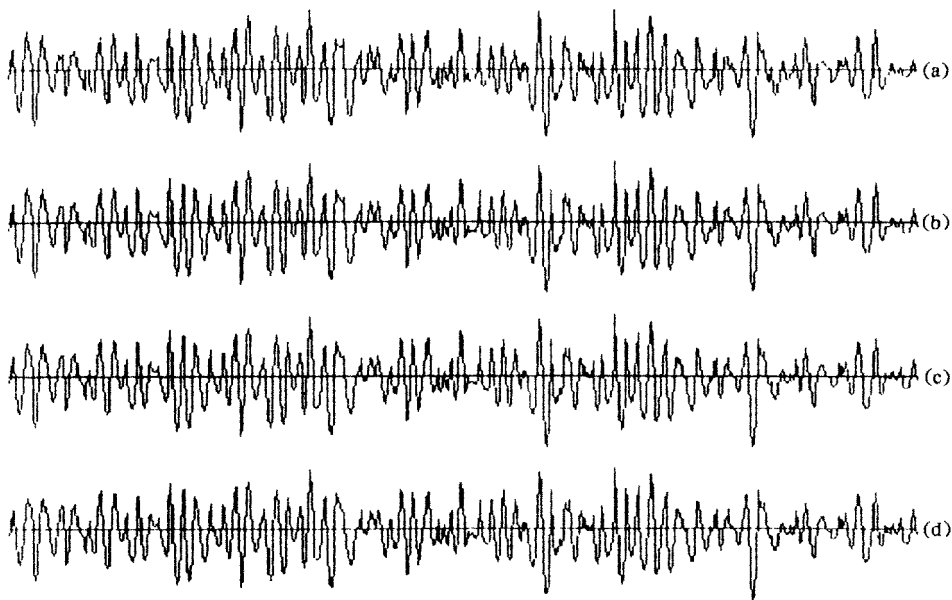


图 7 加入随机噪声后的合成记录

加入的噪声比例分别为:(a)5%;(b)10%;(c)15%;(d)20%

抗噪能力的试验

为了检验该方法对随机噪声的适应能力,在最小相位子波与反射系数序列褶积得到的合成记录(图 3)上分别加入不同含量的随机噪声,如图 7 所示,图中(a)、(b)、(c)及(d)的记录分别相应地加入了 5%、10%、15% 及 20% 的随机噪声。用零相位子波作初始子波,对上述加入

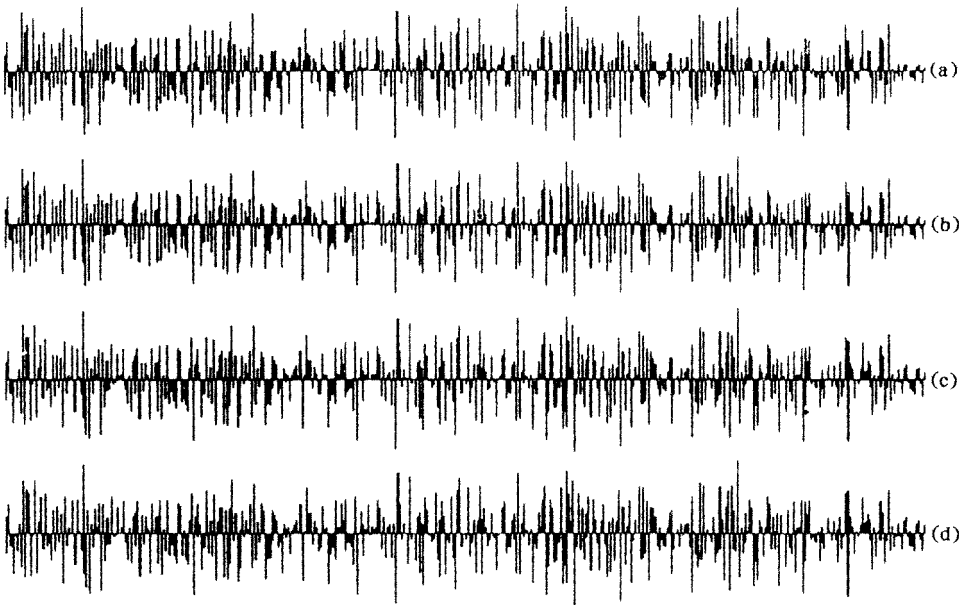


图 8 图 7 的反褶积结果

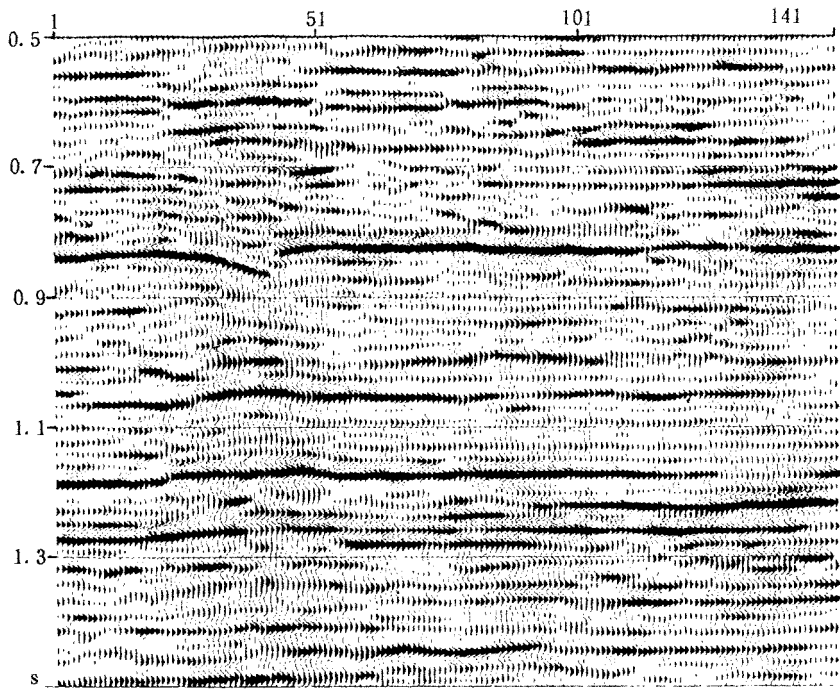


图 9 原始水平叠加剖面

随机噪声的合成记录进行反褶积试验。试验结果如图 8 所示,图中(a)、(b)、(c)及(d)与原始反射系数序列间的相似系数分别为:0.9551、0.9353、0.9085、0.8902。可见,该方法具有一定的抗干扰能力。

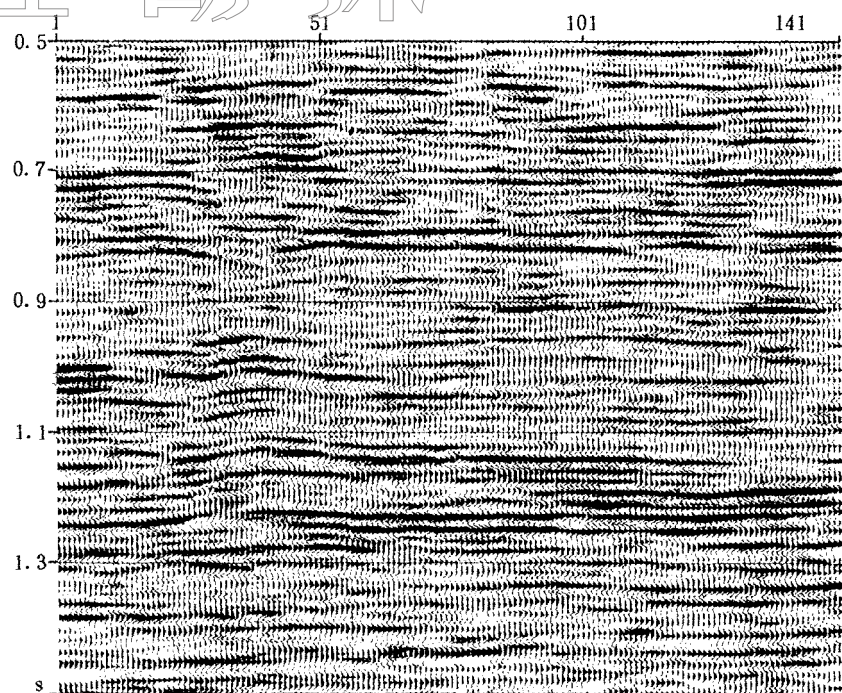


图 10 分形反褶积结果

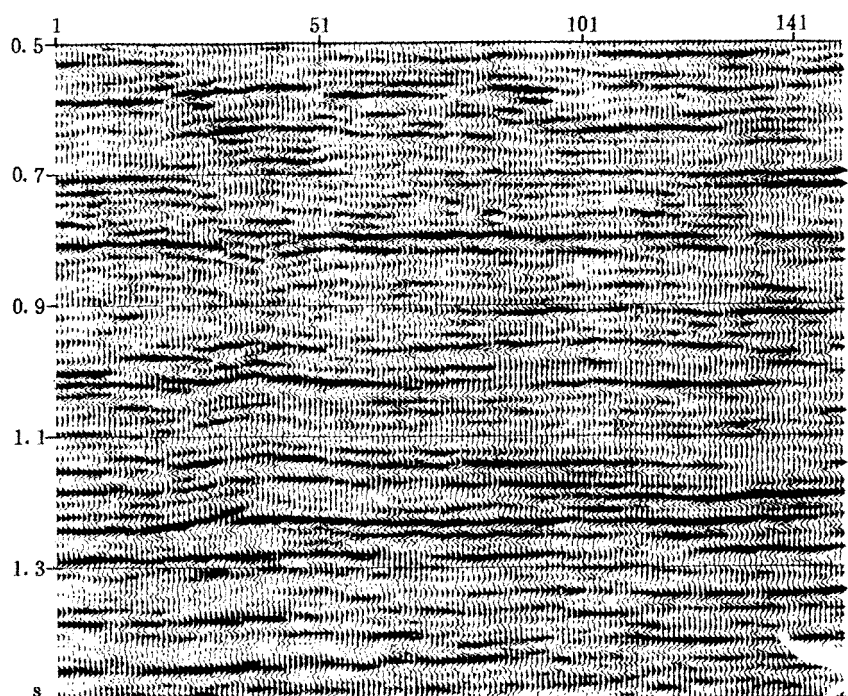


图 11 常规反褶积剖面

实际资料的处理

我们对胜利油田某地区的实际地震记录进行了处理。图 9 为原始水平叠加剖面,研究的目
的层段深度在 800ms 与 1200ms 之间。首先分析地震记录的分形维数,得到参数 $\alpha=0.87$,然
后从地震记录中估计一个初始子波,通过试验确定出反滤波因子的长度,最后通过迭代算法求
解反滤波因子,得到最终的分形反褶积结果(图 10)。通过与常规反褶积剖面(图 11)对比可以
看出,分形反褶积明显提高了该目的层段的分辨率。

结 论

以上实例证实了本文提出的分形反褶积方法的确能改善传统预测误差反褶积的效果。通
过假设反射系数具有某种分形特性,克服了传统反褶积方法中反射系数是白噪声的假设所带
来的问题。这种反褶积方法计算简单、对预先估计的子波不是很敏感,可以很方便地应用到实
际生产中去。

参 考 文 献

- 1 Todoschuck J P and Jensen O G. Joseph geology and seismic deconvolution, *Geophysics*, 1988, 153(11): 1410~1414
- 2 陈颢等著. 分形与混沌在地球科学中的应用, 学术期刊出版社, 1989
- 3 Todoschuck J P and Jensen O G. Scaling geology and seismic deconvolution, *Pure & Appl Geophys*, 1989, 131, 1/2, 273~287
- 4 黄绪德编著. 反褶积与地震道反演, 石油工业出版社, 1992
- 5 李文涛. 分形技术在地球物理中的应用. 石油物探专题情报成果集, 第 7~8 集, 中国石油天然气总公司地球物理勘探局科技情报所, 1993
- 6 Turcotte D L. Fractals in geology and geophysics. *Pure & Appl Geophys*. 1989, 131, 1/2

更 正

本刊今年第 4 期(31 卷)上由屠世杰先生撰写的“地震不连续点成像”一文中,因编辑工作不慎出现两处明显错误:其一,凡是该文出现“共炮间距道集”的地方均应改成“共炮检距道集”;其二是该期第 556 页倒 2 行中“只要发射界面上”应改为“只要反射界面上”。为此编辑部向作者和广大读者深致歉意。

《石油地球物理勘探》

编辑部