

· 经验交流 ·

# 用小波分析提高地震资料的分辨率

何光明\* 高如曾

(四川石油管理局地调处研究所)

## 摘 要

何光明,高如曾.用小波分析提高地震资料的分辨率.石油地球物理勘探,1995,30(2):257~263

将小波分析用于高分辨率处理有着广阔的应用前景。本文利用小波分解的特性将地震记录分解成不同的频道成分,然后进行增益控制,使各频道记录的振幅叠加结果逼近一个标准子波的振幅谱,从而实现提高分辨率的目的。此法称为谱子波化方法。

**主题词** 数据滤波 小波分析 高分辨率 谱子波化

## ABSTRACT

He Guangming and Gao Ruzeng. Seismic resolution improvement using wavelet analysis. OGP, 1995, 30(2): 257~263

Application of wavelet analysis to high resolution processing has good prospects. Wavelet decomposition characteristic is used to decompose seismic records into different frequency-band components, which then undergo gain control. The gain control makes the stacked amplitude spectrum of all different frequency band components approach to the amplitude spectrum of a standard wavelet, thus improving the seismic data resolution. This method is called spectrum waveleting.

**Subject heading:** data filtering, wavelet analysis, high resolution, spectrum waveleting

## 引 言

由于目前地震勘探仪器及其它因素的限制,利用现今地震勘探资料分辨薄层和小断层还有许多困难,也远远达不到钻探的需求。为此,许多地球物理学家根据不同的理论,在不同的方面作了许多努力,试图解决人们解释薄层和小断层时遇到的困难,实践证明他们的努力都见到了较好的效果。本文将介绍用小波分析作叠后高分辨率处理方面的研究,以便为叠后高分辨率资料处理提供一种新的手段。

小波分析是人们熟知的傅里叶分析的发展,它优于傅里叶分析之处主要在于时间域和频率域都有良好的局部化性质,同时由于对高频成分采用了逐渐精细的时间域或空间域采样步

\* He Guangming, Research Institute, Geological Survey Division, Sichuan Petroleum Administration, Nanchong City, Sichuan Province, Postcode: 637000

本文于 1994 年 6 月 7 日收到。

长,因此可以在任何细节上聚焦成像。目前,它已被广泛应用于信号处理、图像处理、量子场论、地震勘探、语言识别等领域。

## 小波分析原理

小波分析也称为多分辨分析,它是傅里叶分析发展的里程碑。一个信号的小波变换是信号与小波基褶积所得到的信号系列。小波基是由小波函数经平移和伸缩构成。规范正交小波基,由于其计算方便简捷,而被广泛应用。

小波分析最实用的算法是 Mallat 算法。在介绍 Mallat 算法前,先介绍多分辨分析的定义。

### (1)多分辨分析定义

空间  $L^2(R)$  中一列闭子空间  $\{V_j\} (j \in Z)$  称为  $L^2(R)$  的一个多分辨分析或逼近,并满足下列诸条件。

- 单调性:  $V_j \subset V_{j+1}$ , 任意  $j \in Z$ ;
- 逼近性:  $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}$ ,  $\bigcup_{j \in Z} V_j = L^2(R)$ ;
- 伸缩性:  $\mu(x) \in V_j \Leftrightarrow \mu(2x) \in V_{j+1}$ ;
- 平移不变性:  $\mu(x) \in V_0 \Rightarrow \mu(x-k) \in V_0$ , 任意  $k \in Z$ ;

• Riesz 基: 存在  $g(x) \in V_0$  使得  $\{g(x-k) | k \in Z\}$  构成  $V_0$  的 Riesz 基,即对任何  $\mu(x) \in V_0$  存在唯一序列  $\{a_k\} \in L^2$ , 使得  $\mu(x) = \sum_{k \in Z} a_k g(x-k)$ ; 反之,任意序列  $\{a_k\} \in L^2$  确定一函数  $\mu(x) \in V_0$ , 且存在正数  $A, B$ , 并有  $A \leq B$ , 使得

$$A \|\mu\|^2 \leq \sum_{k \in Z} |a_k|^2 \leq B \|\mu\|^2$$

对所有  $\mu(x) \in V_0$  成立。

### (2)Mallat 算法

Mallat 在 Burt 和 Adelson 图像分解和重构的塔式算法启发下,基于他的多分辨分析框架,提出了 Mallat 算法或称塔式算法。

设  $\{V_j\}$  是一给定的多分辨分析,  $\varphi(x)$  和  $\psi(x)$  分别是相应的尺度函数和小波函数。现在我们要对一地震记录  $f(x)$  进行分析, 设  $f(x) \in V_{J_1}$ ,  $J_1$  为一确定的整数(这一假设是合理的,因为地震勘探仪器记录的信号总是只具有有限分辨率), 于是有分解

$$f(x) = A_{J_1} f(x) = \sum_{k \in Z} C_{J_1, k} \varphi_{J_1, k}(x)$$

注意到

$$(\varphi_{J_1, k}, \varphi_{J_1+1, m}) = \bar{h}_{k-2m}; \quad (\varphi_{J_1, k}, \psi_{J_1+1, m}) = \bar{g}_{k-2m}$$

$$\text{其中} \quad h_k = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi\left(\frac{x}{2}\right), \varphi(x-k) \right); \quad g_k = \left( \psi(x), \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi(2x-k) \right)$$

则有

$$f(x) = A_{J_1} f(x) = A_{J_1+1} f(x) + D_{J_1+1} f(x)$$

其中

$$A_{J_1+1} f(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{J_1+1, m} \varphi_{J_1+1, m}(x); \quad D_{J_1+1} f(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} D_{J_1+1, m} \psi_{J_1+1, m}(x)$$

而

$$C_{J_1+1, m} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{h}_{k-2m} C_{J_1, k} \quad (1)$$

$$D_{J_1+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{g}_{k-2m} C_{J_1,k} \quad (2)$$

引入无穷矩阵  $H=(H_{m,k}), G=(G_{m,k})$ , 其中  $H_{m,k}=\bar{h}_{k-2m}, G_{m,k}=\bar{g}_{k-2m}$ , 则式(1)、(2)可简写为

$$C_{J_1+1} = HC_{J_1} \quad (3)$$

$$D_{J_1+1} = GC_{J_1} \quad (4)$$

依此类推,有

$$f(x) = A_{J_2}f(x) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(x)$$

其中

$$A_j f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(x); \quad D_j f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_{j,k} \psi_{j,k}(x)$$

同样

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j \\ D_{j+1} = GC_j \end{cases} \quad (j = J_1, J_1 + 1, \dots, J_2 - 1) \quad (5)$$

式(5)便是 Mallat 算法的塔式分解算式。我们将  $A_j f(x)$  称作  $f(x)$  在  $2^j$  分辨率下的连续逼近,  $D_j f(x)$  为  $f(x)$  在  $2^j$  分辨率下的连续细节, 而称相应的数列  $C_j$  和  $D_j$  分别为在分辨率  $2^j$  下的离散逼近和离散细节。按照 Mallat 分解算法, 我们将地震记录  $f(x)$  分解成了不同的频率通道成分。Mallat 重构算法为

$$C_j = H^* C_{j+1} + G^* D_{j+1} \quad (j = J_2 - 1, \dots, J_1) \quad (6)$$

$H^*$  和  $G^*$  分别是  $H$  和  $G$  在  $L^2$  中的对偶算子。

## 高分辨率实现途径

小波分解就是将地震记录分解成不同的频率通道成分(图1), 也就是将地震记录作了分

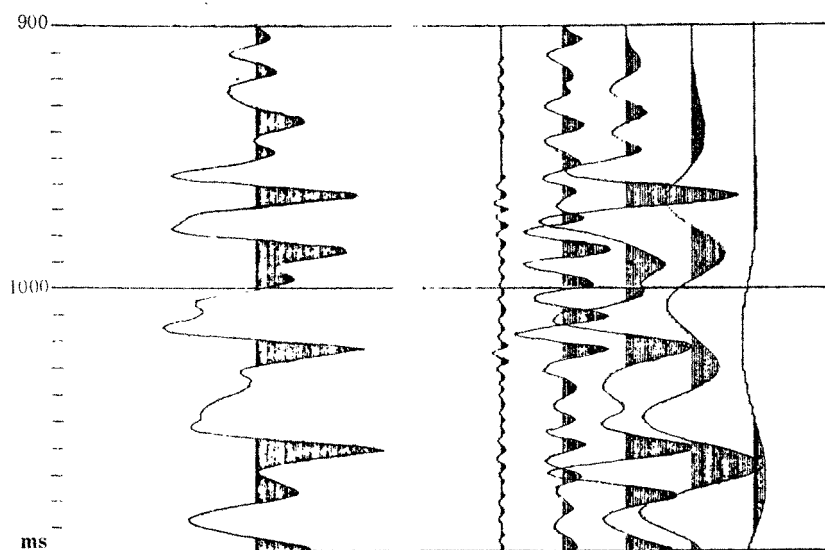


图1 地震记录(左)及小波分解(右)

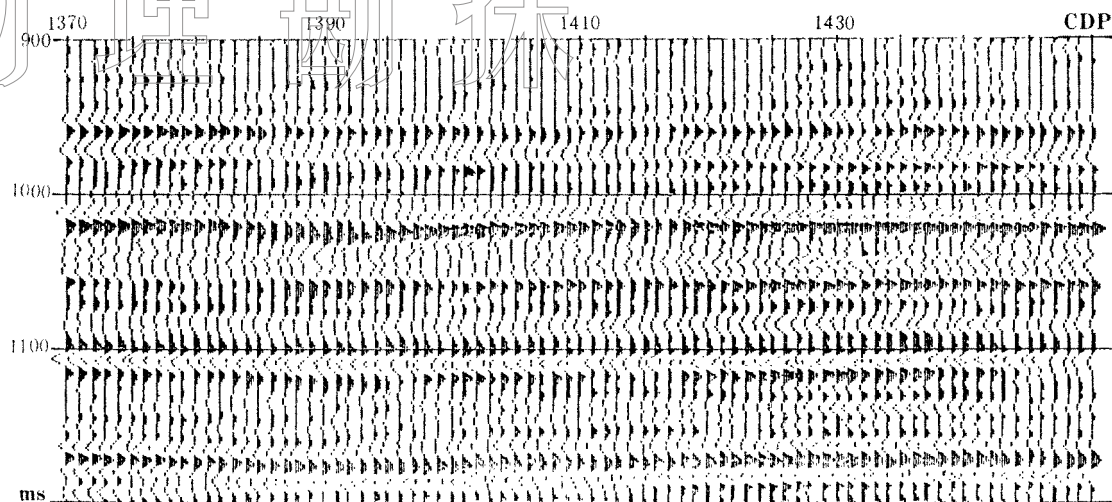


图 2a 未作谱白化的地震剖面

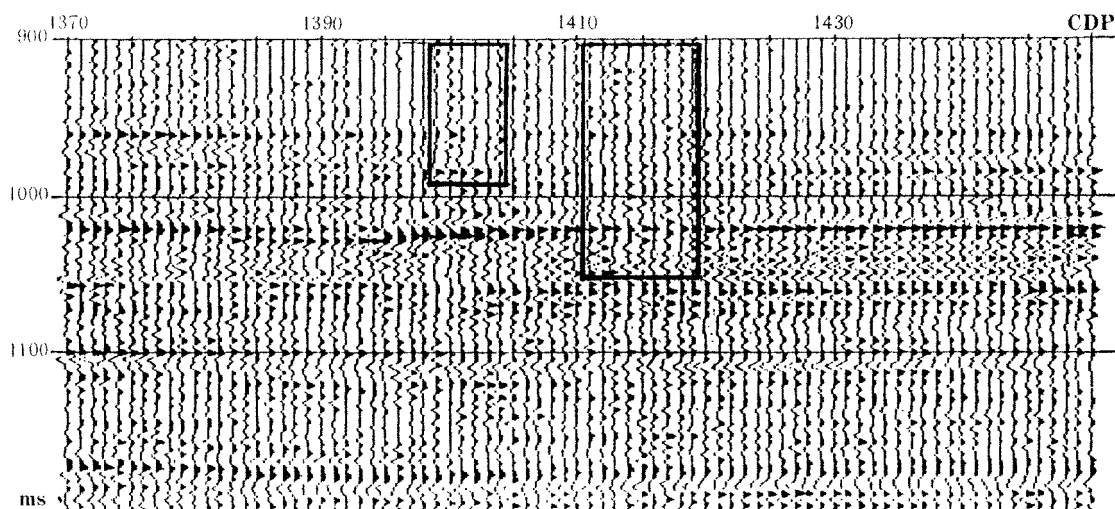


图 2b 相对于图 2a 作了谱白化后的地震剖面

频处理。因此,地震记录可作谱白化处理。但作者根据谱白化的做法作出的高分辨率剖面,具有较明显的“挂面条”现象(图 2a、2b),使资料的可信度大大降低。于是,作者借用了谱白化的思想提出了谱子波化的方法。

地震记录经小波分解分成不同的频带后,有效波的强度不能如实地反映出地下界面的阻抗,低频部分的能量显得较强,高频部分因地层对其吸收衰减较低频部分快,其能量明显地被削弱。因此,我们对分频后的记录进行增益控制,使各频带记录的振幅谱叠加结果逼近于一个标准子波(比如雷克子波)的振幅谱,这样可以达到增强有效波、压制干扰波、补偿地层对地震波高频成分的吸收,恢复地震记录的理想状态,从而达到提高地震记录分辨率和信噪比的目的。

## 应用实例

(1)为了验证方法的有效性,我们用某一测井声波资料制作出 70 Hz 与 90 Hz 的合成记录(图 3 左、右),再对 70 Hz 合成记录作高分辨率处理(图 3 中),与 90 Hz 的高频合成记录对比,可以看出,各个合成同相轴能够一一对应。由此可见,此方法是可以信赖的高分辨率处理手段。

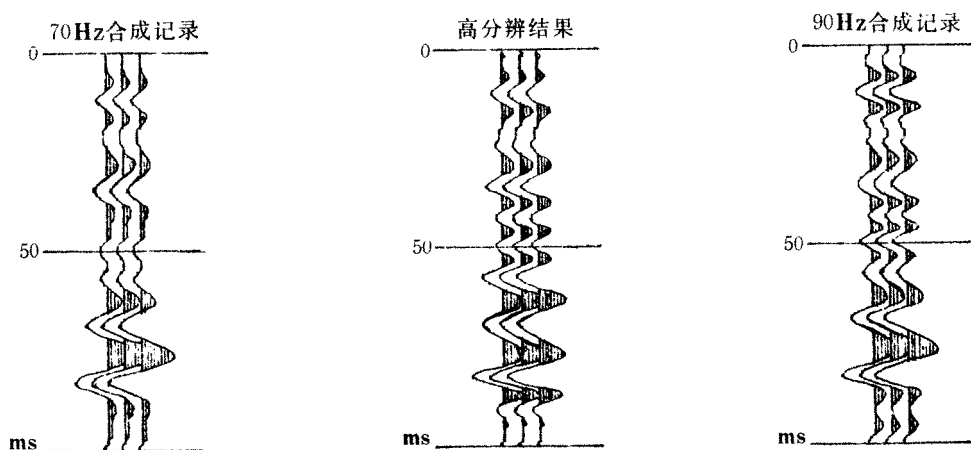


图3 合成记录及其高分辨处理结果对比

(2)我们用该方法对四川某油田的一条地震测线资料作了处理。图 4 为常规处理地震剖面,图 5 为高分辨率处理地震剖面。可以看出图 5 的分辨率得到了较大的提高,特别是在时间为 1020 ms、CDP 号为 1390 处的断层在高分辨率剖面上看得十分清楚,在常规处理剖面上则不然。在高分辨率剖面上,在时间为 1020 ms、CDP 号 1310 处,断点精楚,而在常规处理剖面上则无法看出。图 6 是高分辨率处理前及处理后的同一道的频谱对比曲线,可见高分辨率处理后谱的峰值明显向高频移动,且通频带也明显拓宽。

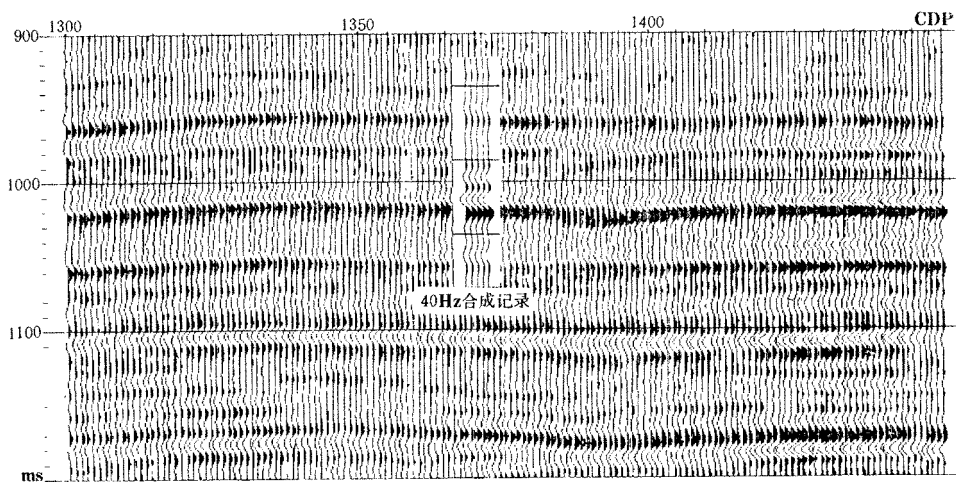


图4 常规处理地震剖面



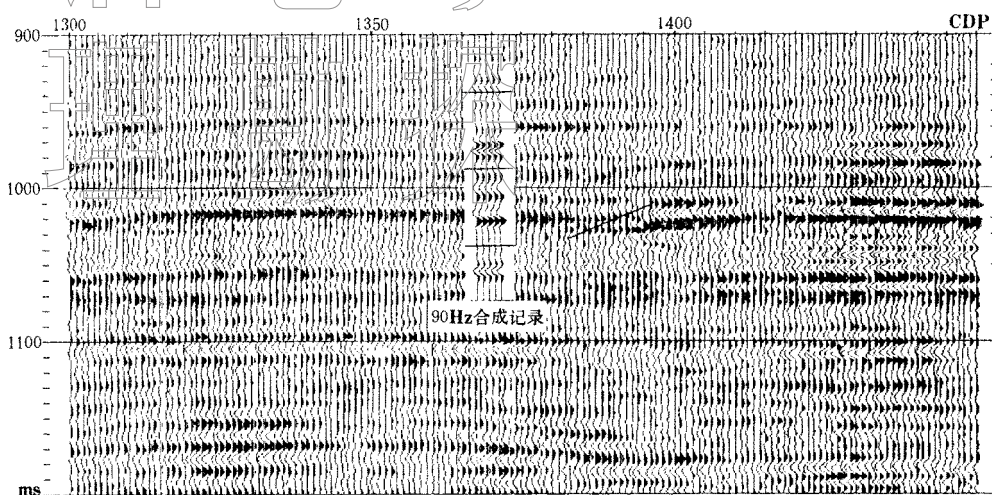


图5 采用高分辨率处理剖面

(3)图7是四川某油田的一条测线的地震剖面,图8是该剖面的高分辨率处理结果。从图8与图7的对比可以看出,在高分辨率处理剖面上有以下明显的改进:①在 CDP3798~3886 之间,时间为 1050~1100 ms 间有一个明显的复波变异出现;②在 CDP3914~3936 间,时间为 1200~1300 ms 间有明显的断层特征,且断陷中的同相轴也明显增多;③在 CDP3940~3970 之间,时间为 1050~1100 ms 间,图7为不清晰的弱复波,而图8表现出一个强的峰值异常段。总之,高分辨率处理剖面比常规处理剖面能反映出较多的地震响应细节。

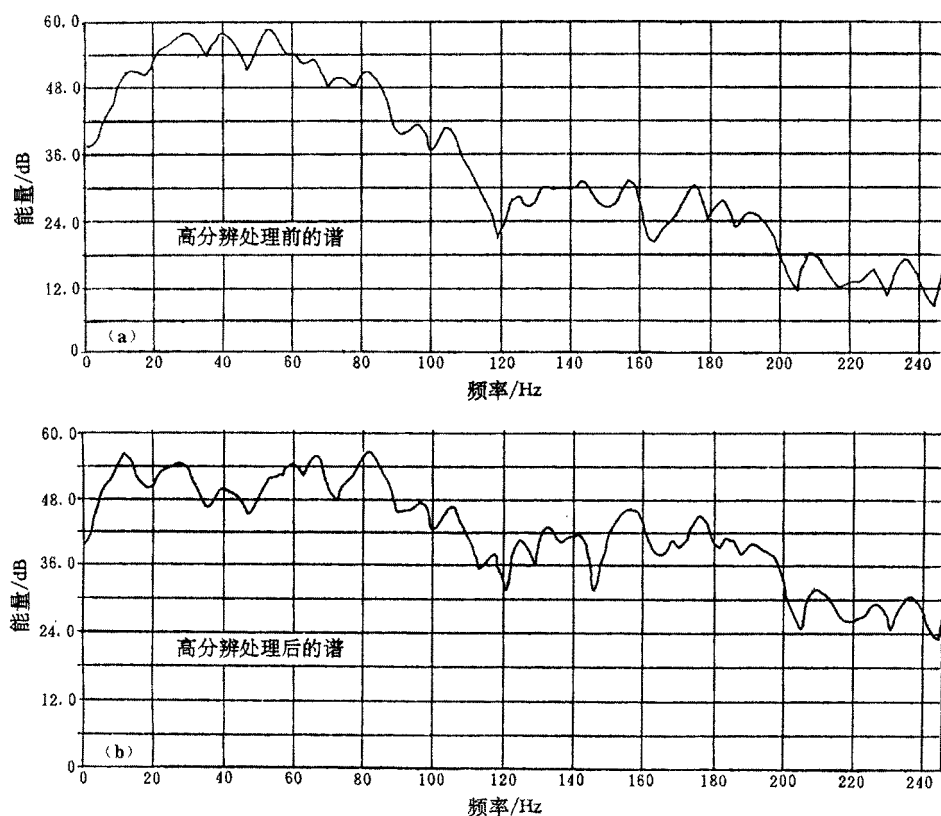


图6 地震记录的谱(a)和高分辨率处理后的谱(b)对比图

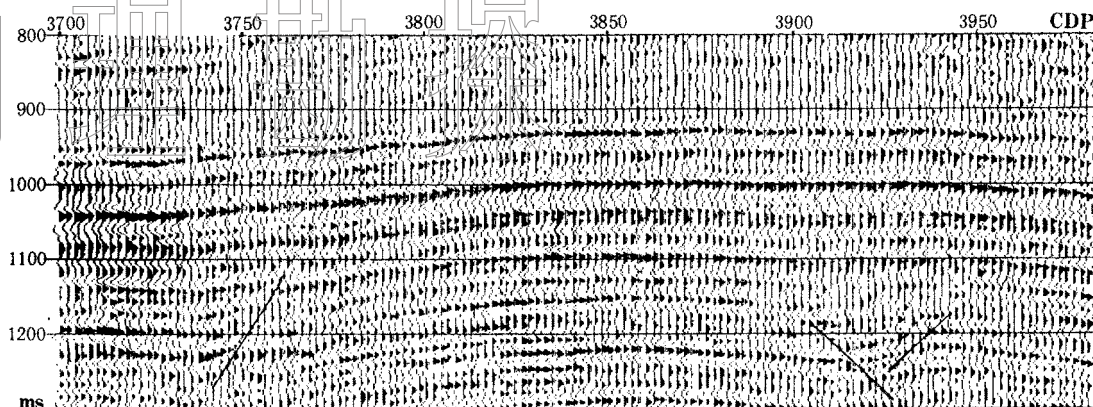


图 7 常规处理剖面

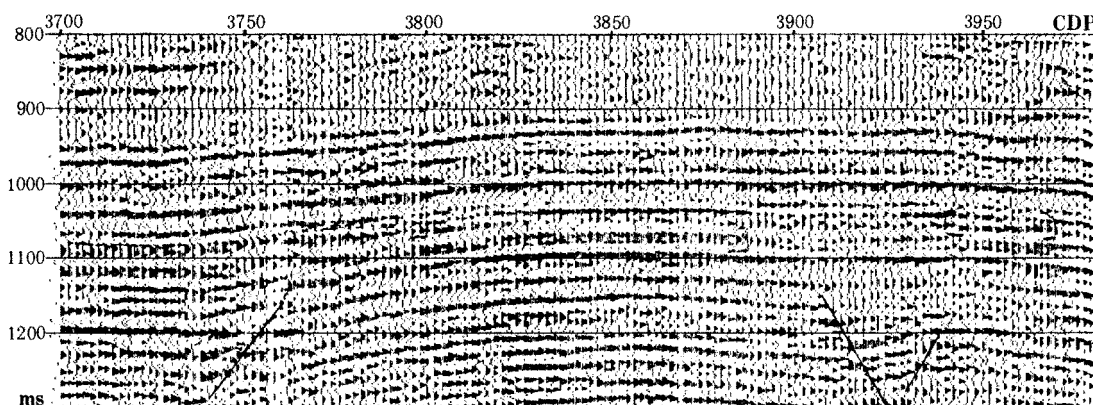


图 8 与图 7 同一测线高分辨率处理剖面

## 结 束 语

由于小波分析可进行时-频分析,故它在去噪、数据压缩、奇异性检测、高分辨率处理等方面有着广泛的应用前景。本文所述的高分辨率处理结果,只是初步的工作,有待于继续深入。

在该项研究工作中一直得到刘开时所长的关心和大力支持,文中的合成记录由罗文同志提供,在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 曹思远等. 小波变换与信号分解. 中国地球物理学会年刊,地震出版社,1992
- 2 刘贵忠. 小波分析及其应用,西安电子科技大学出版社,1992
- 3 李正文. 高分辨率地震勘探,成都科技大学出版社,1993