

# 对地震转换波的数字滤波处理

雷兴林 邵学钟 张家茹  
(国家地震局地质研究所)

## 摘 要

本文讨论运用低通滤波、偏振滤波、频率加强滤波、相关滤波及迭加处理等数字滤波方法，对地震转换波测深资料进行数字处理的方法及效果。数字滤波处理结果在一定程度上提高了记录的信噪比，为准确地进行相位对比和震相识别提供了可靠基础。

**关键词** 转换波；滤波；偏振；相关；频率加强

## 一、前 言

在我国传统的转换波测深方法中，因受手工分析的限制，震相识别往往存在一定困难。实际上，由于各种噪音的干扰及有用震相的相互干涉，从而使信息在一定程度上受到歪曲及掩盖。为了准确地识别有用信息，就必须对原始记录进行必要的数字滤波处理，以提高信噪比及分辨率。

分析实际资料发现，主要的干扰按其物理特征可分为如下三大类：①背景噪音，如地面随机噪音，车辆、行人、工农业施工振动等；②与仪器有关的噪音；③较规则的由远震所激发的各种干扰波，如源区多次波、接收区多次波、沉积盖层中的面波等。上述噪音与有用信号即转换波震相之间在某些物理特征上（如频谱分布、偏振特性、视速度大小，到时差变化规律等）有一定差异，据此便可以采取相应的数字滤波手段，以达到压制干扰加强信息的目的。

## 二、转换波数字滤波处理方法综述

对记录进行数字滤波处理之前，必须首先将原始三分量记录转换成为计算机所能识别的数字形式，进行能量均衡、去均值及斜坡、将初至 P 波的最大波峰对齐等预处理。作完预处理的数字记录按一定格式存于计算机内存或磁带上，以便进一步数据处理时调用及长期保存。

据噪音与信号之间的物理特征上的差异，主要采取以下处理手段对原始记录进行处理：①低通滤波，②特征分量记录，③偏振滤波，④频率加强滤波，⑤相关滤波及⑥迭加处理。

### 1. 低通滤波

1987 年 5 月 9 日收到本文初稿，1989 年 2 月 8 日决定采用。

地震 PS 转换波及可利用的二次波的卓越周期大都在 0.5—2 秒之间<sup>[1-3]</sup>,而许多干扰则具较高频率,故可设计一低通滤波器将这类干扰有效地压制掉。但由于低通滤波使信号高频成份受到损失,使分辨率有所下降,故应对实际资料作具体分析,尽量加宽通带宽度。采用 Kaiser 的最高平低通滤波器<sup>[4]</sup>,用快速傅氏变换对记录进行滤波处理。图 1 为一个滤波实例,可见原始记录中的高频成份被压制掉了。

## 2. 特征分量记录

用  $R$ (径向),  $T$ (切向),  $P$ (纵向)特征分量记录分析转换波震相是很有利的。因为转换波主要在  $R-T$  平面内偏振,而初至 P 波及以 P 波形式出射的多次波主要在  $P$  方向偏振,故  $R, T, P$  记录有利于分离 PS 转换波与多次 P 波。令初至 P 波的方位角为  $A$ 、垂向偏角为  $90^\circ - D$ ,则特征分量记录可由下式给出:

$$\begin{bmatrix} R(t) \\ T(t) \\ P(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos D \cdot \sin A & \cos D \cdot \cos A & -\sin D \\ \cos A & \sin A & 0 \\ \sin D \cdot \sin A & \sin D \cdot \cos A & \cos D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

图 2 为一个实际的原始三分量记录及其特征分量记录的对比图,在  $R$  分量上 PS 波很清晰。

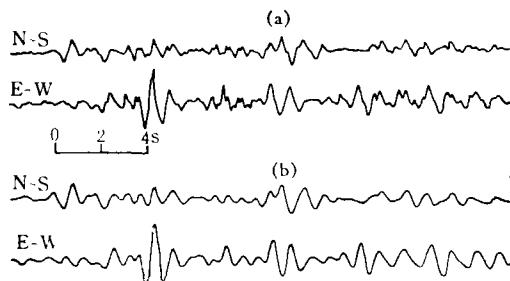


图 1 低通滤波处理实例

(a) 滤波前 (b) 滤波后

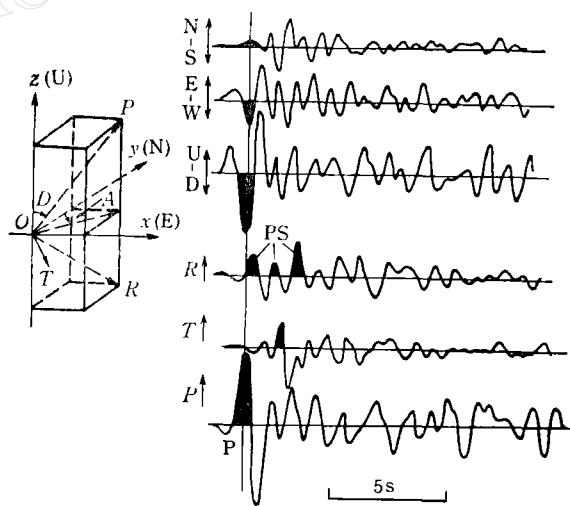


图 2 特征坐标系及特征分量记录实例

(N-S, E-W, U-D 为原始三分量记录;  $R, T, P$  为特征分量记录)

## 3. 偏振滤波、频率加强滤波及相关滤波

偏振滤波利用波的偏振特征压制干扰波,频率加强滤波则在信噪比曲线的约束下合

理地展宽频带以提高分辨率，相关滤波利用转换波与初至 P 波波形相似的特点来实现加强信号的目的。关于这三种滤波处理方法，后文将进一步讨论。

#### 4. 叠加处理

转换波具有较大的视速度，而面波、散射波等具有相对较小的视速度，因此沿测线进行迭加处理有利于提高震相信噪比。图 3 是利用 R 分量进行迭加处理后的记录，用此记录能较好地进行相位对比追踪。

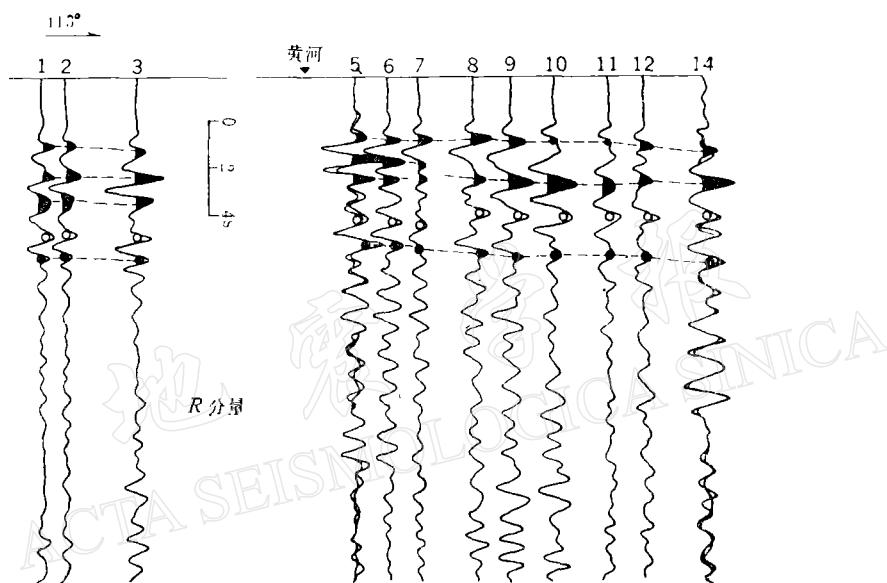


图 3 R 分量迭加处理实例  
(1985 年河南—山东转换波测深剖面 1—14 为台站编号；地震：  
1985.10.25 班达海，震源深度  $H = 600\text{ km}$ )

### 三、偏 振 滤 波

线性偏振滤波方法在转换波测深资料数据处理中的应用，对提高震相识别能力起到了一定作用<sup>[5-7]</sup>。由于实际地球介质的各向异性、非均匀性以及波的干涉作用，转换波往往具有平面偏振的特征，因而我们设计了平面偏振滤波器。为了对比两种偏振滤波方法的不同作用，下面同时对二者进行讨论。

设数字化的特征分量记录为  $X_1(R), X_2(T), X_3(P)$ ，在时该  $I \cdot \Delta t$  ( $I$  为整数  $\Delta t$  为采样间隔)计算协方差矩阵：

$$W(I) = \{W_{ii}(I)\} \quad (2)$$

其中

$$W_{ii}(I) = \text{cov}(X_i, X_i)$$

$$= \sum_{K=I-M}^{I+M} [X_i(k) \cdot X_i(k)] / (2M + 1) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$M$  为大于零的整数， $M \cdot \Delta t$  表示协方差矩阵时窗半长度。令：

$$F_l(I) = [1 - (|\lambda_2/\lambda_1|)^{N_l}]^{J_l} \quad (4)$$

$$F_p(I) = \{1 - [2 \cdot |\lambda_3| / (|\lambda_1| + |\lambda_2|)]^{N_p}\}^{J_p} \quad (5)$$

其中  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  分别表示  $W(I)$  的最大、次大、最小特征值。显见  $F_l, F_p$  分别表示在上述时窗内质点振动的线性度及平面度。当  $F_p \rightarrow 1$  时质点趋于平面偏振，当  $F_l \rightarrow 1$  时质点趋于线性偏振，并且平面偏振包括线性偏振。设特征向量分别为：

$$L_i(l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

引入线性方向性因子及平面方向性因子：

$$D_{li}(I) = |l_{ii}|^{\kappa_l} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

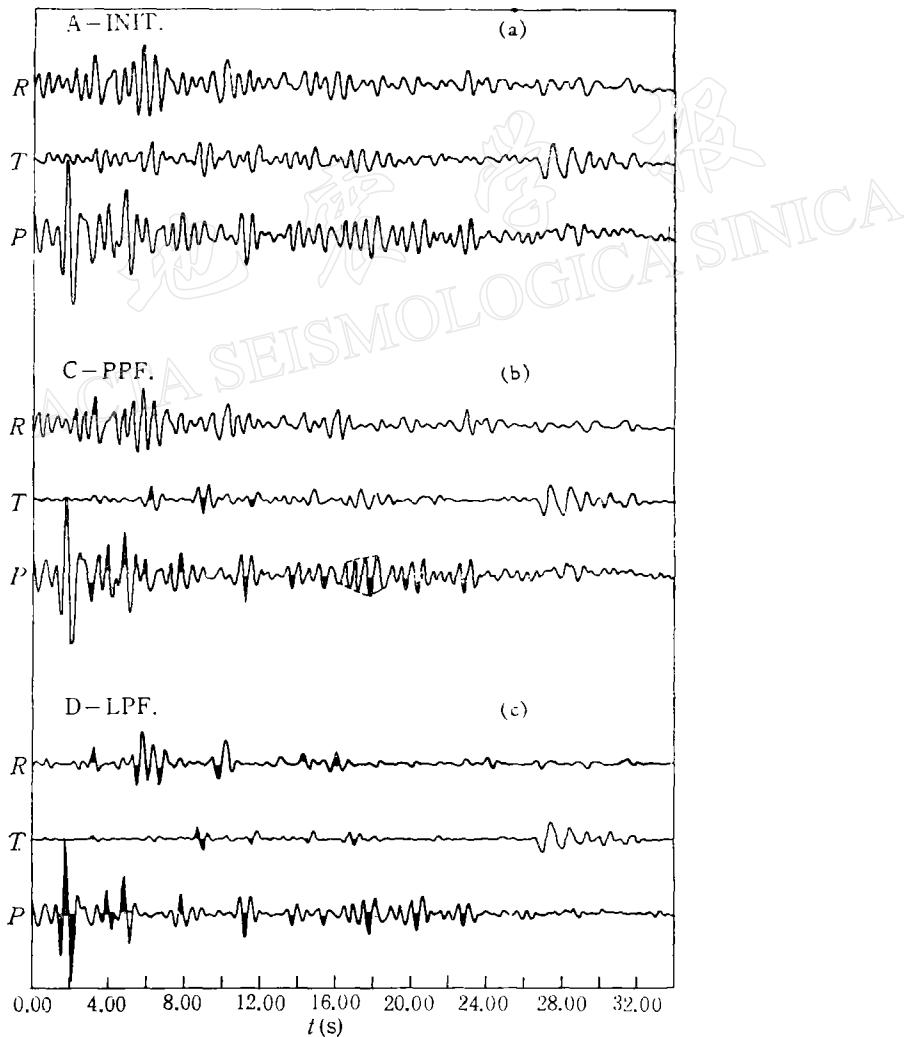


图 4 偏振滤波实例

(1982 年邢台 DTR 磁带仪观测资料 地震: 1982.5.10, 14<sup>h</sup>04<sup>m</sup>(GMT), 班达海 测点: 正元寺)

$$D_{Pi}(I) = \left\{ \frac{|l_{1i}| + |l_{2i}|}{\sqrt{1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 (|l_{1j}| + |l_{2j}|)}} \right\}^{K_p} \cdot C_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

其中

$$C_i = \begin{cases} |\cos \theta_p| & i = 1, 2 \\ 1 - |\cos \theta_p| & i = 3 \end{cases} \quad (9)$$

$\theta_p$  为偏振平面法向矢量与  $P$  方向的夹角。当  $\theta_p \rightarrow 0^\circ$  时质点趋于  $P$  波零平面即  $R-T$  平面偏振，对应于  $PS$  转换波及  $S$  波形式出射的二次波，这时  $C_i$  取：

$$C_i = \begin{cases} 1 & i = 1, 2 \\ 0 & i = 3 \end{cases}$$

偏振滤波的最终结果由下面两式给出：

$$LX_i(I) = X_i(I) \cdot F_i(I) \cdot D_{li}(I) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

$$PX_i(I) = X_i(I) \cdot F_p(I) \cdot D_{pi}(I) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

(10)式表示线性滤波，将加强所给时窗内线性度高的成分，(11)式表示平面偏振滤波，将加强平面度高且偏振平面靠近  $R-T$  平面或垂直于  $R-T$  平面的成分。由于上述平面偏振滤波器充分地利用了转换波偏振特征，因而较之于前人的方法具有更加明显的效果。图 4 为一偏振滤波实例，由图可见线性偏振滤波结果具有较高信噪比，但丢失了一些能量较小的信号，而平面偏振滤波结果则在提高信噪比的同时，保证了信号少受损失。

公式(4)–(8)中的  $N_l, N_p, J_l, J_p, K_l, K_p$  为经验参数，可取为  $N_l, N_p = 0.5-1$ ,  $J_l, J_p = 1$ ,  $K_l, K_p = 2$ 。计算协方差矩阵的时窗长度应选择为信号周期的 0.5–2 倍。另外滤波因子  $F_l, F_p, D_{li}, D_{pi}$  往往不平稳，故应对其进行平滑处理，平滑窗的长度可取为协方差时窗长度的一半。

## 四、频率加强滤波

频率加强滤波在石油地震勘探中用于提高记录的分辨率，具有较明显效果<sup>[8]</sup>。转换波震相之间有时相互干涉，影响震相识别与测定，因此在提高信噪比的同时还应尽可能提高记录的分辨率。

### 1. 频率加强滤波的原理

如已知信号功率谱  $P_s(f)$ ，则可得分辨滤波器：

$$H_r(f) = \frac{1}{A_s(f)} = \frac{1}{\sqrt{P_s(f)}} \quad (12)$$

$A_s(f) = \sqrt{P_s(f)}$  为振幅谱。分辨滤波器能使信号振幅谱展宽，提高信号分辨率，但同时将在一定程度上降低信噪比。信噪比定义为信号功率谱与噪音功率谱  $P_n(f)$  之比，即

$$R_{s/n} = P_s(f)/P_n(f) \quad (13)$$

相干滤波器定义为：

$$H_c(f) = \frac{P_s(f)}{P_s(f) + P_n(f)} = 1 / \left( 1 + \frac{1}{P_{s/n}(f)} \right) \quad (14)$$

显然  $H_c(f)$  能够加强信噪比较高的成分而压制信噪比较低的成分, 但又在一定程度上降低分辨率。若将  $H_r(f)$  和  $H_c(f)$  串联, 所得滤波器便能在信噪比曲线约束下, 最大限度地、合理的展宽信号频带, 这便是频率加强滤波器  $H_f(f)$ 。

$$H_f(f) = H_r(f) \cdot H_c(f) = \frac{1}{\sqrt{P_s(f)}} \cdot \frac{P_s(f)}{P_s(f) + P_n(f)} \quad (15)$$

## 2. 信号功率谱和噪音功率谱的估计

正确估计信号功率谱和噪音功率谱从而获得比较准确的信噪比曲线, 是频率加强滤波之关键。在构造简单的情况下, 可假设不同台站的信号相同, 因此第  $j$  台  $i$  分量记录可表示为:

$$X_{ji}(t) = S(t) + N_{ji}(t) \quad (j = 1, \dots, N, \quad i = 1, 2, 3) \quad (16)$$

其中  $S(t)$  表示信号,  $N_{ji}(t)$  为  $j$  台  $i$  分量的附加噪音。设  $N_{ji}(t)$  与  $N_{mk}(t)$  ( $i \neq j \neq m \neq k$ ) 之间互不相关 (仪器的噪音及随机地面干扰等均具此种性质), 则有

平均功率谱

$$\bar{P}_x(f) = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N |F_{ji}(f)|^2}{3N} \quad (17)$$

平均信号功率谱

$$\begin{aligned} \bar{P}_s(f) = & \\ & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \sum_{k=1(k \neq i)}^N [F_{ji}(f) \cdot \overline{F_{ik}(f)} + \overline{F_{ji}(f)} \\ & \cdot F_{ik}(f)] \end{aligned} \quad (18)$$

平均干扰功率谱

$$\bar{P}_n(f) = \bar{P}_x(f) - \bar{P}_s(f) \quad (19)$$

式中  $F_{ji}(f)$  为  $X_{ji}(t)$  的傅氏谱,  $\overline{F_{ji}(f)}$  为  $F_{ji}(f)$  的复共轭, 其余类推。当产状变化时, 可以推导新的公式, 但事实表明, 其结果与不考虑产状变化时大同小异。

在求出滤波器时, 一般要对各功率谱进行平滑处理。图 5 为一滤波实例, 图中  $M$  表示功率谱平滑窗半长度 (采样点数), 由图可见  $M$  越小分辨率越高, 但信噪比越低; 反之  $M$  越大, 分辨率便越小, 但信噪比越大。在实际资料处理中要注意选择适当的  $M$  值。

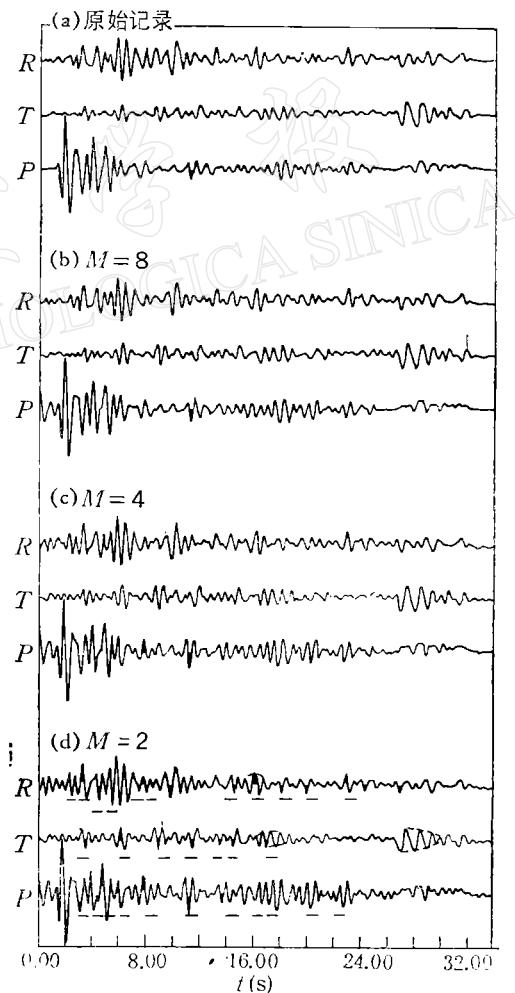


图 5 频率加强滤波实例  
 $M$  为功率谱平滑窗半长度(采样点数)  
(a)——原始记录;(b),(c),(d)——用不同长度平滑窗处理的结果(记录来源同图 4)

## 五、相关滤波

转换波与初至 P 波波形相似，因此可以用相关滤波器压制那些与初至 P 波波形不相似的干扰波如背景噪音、面波、多次波等。相关系数可用来度量波形相似程度，记录上某时刻  $I \cdot \Delta t$  的对于初至 P 波的相关系数为：

$$D(I) = \frac{\sum_{j=1}^M R(I - M_a + j) \cdot W(j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^M R(I - M_a + j)^2 \cdot \sum_{j=1}^M W(j)^2}} \quad (20)$$

其中  $R(i)$  ( $i = 1, \dots, I, \dots, NT$ ) 为记录采样数组； $W(j)$  ( $j = 1, \dots, M_a, \dots, M$ ) 为初至 P 波波形数组， $W(j)$  在  $j = M_a$  处取得最大峰值。相关滤波器可定义为：

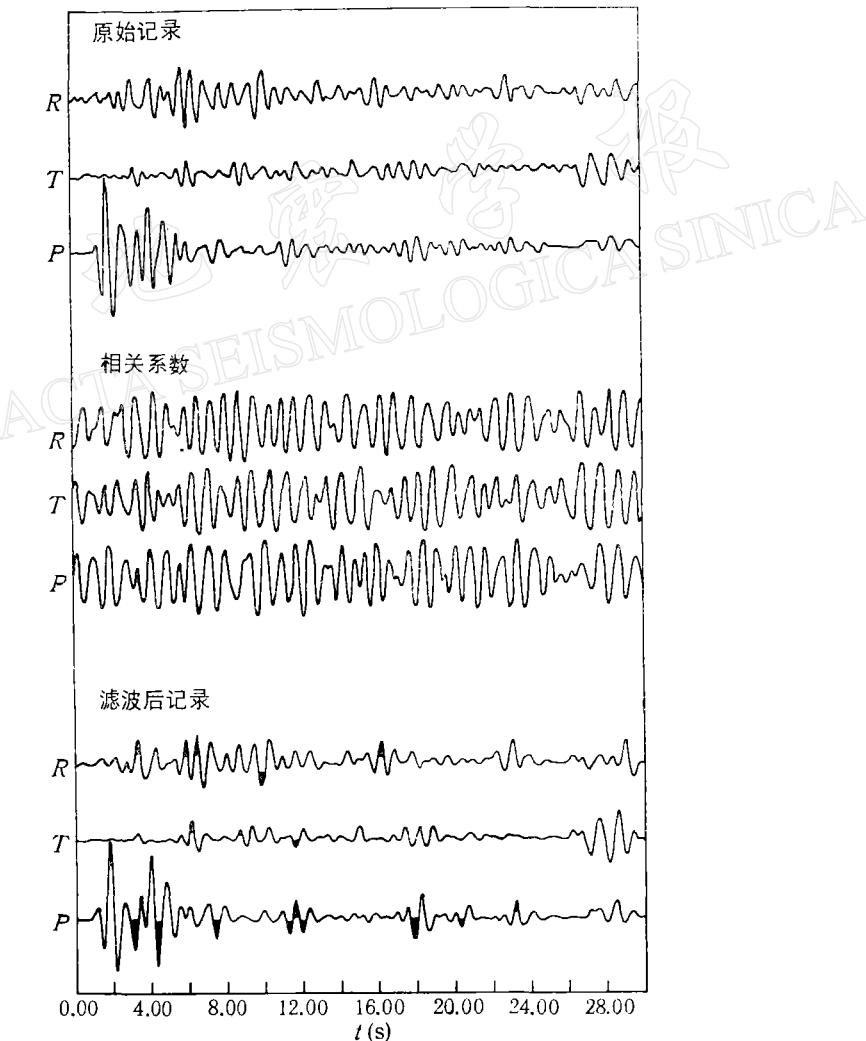


图 6 相关滤波实例  
(地震参数同图 4, 测点: 高邑)

$$F_c(I) = |D(I)|^{CR} \quad (I = 1, \dots, NT) \quad (21)$$

其中  $CR$  为经验参数,一般可取为 1—2. 滤波结果为

$$R_c(I) = R(I) \cdot F_c(I) \quad (I = 1, \dots, NT) \quad (22)$$

相关滤波会引入一定高频干扰,但能用低通滤波将其压制掉. 图 6 为一实际滤波效果对比图,滤波后的记录中干扰成分明显减少.

## 六、结 论

以上介绍的各种数字滤波处理方法,目的在于使信号能更加清晰地显露出来,从而能被更加准确地识别和测定. 每一种方法都利用了地震波的某一物理特征,针对信号与干扰在这种特征上的差异来达到上述目的. 各方法均有各自的优点和不足. 低通滤波在很大程度上提高信噪比,但同时又降低分辨率,使到时差测定误差增大. 频率加强滤波可使分辨率提高,但同时因降低了信噪比从而使振幅测定误差增大. 叠加处理用于相位追踪具有较好效果,但不宜用于测定震相参数. 偏振滤波和相关滤波较小改变震相的波形特征,但却往往损失一些信号. 由此可见不同方法之优劣是互为补充的,综合运用各种数字滤波方法及综合分析各种处理结果能更为有效地达到数字滤波的目的.

在本文工作中曾得到国家地震局地质研究所转换波组全体同志帮助,滕吉文、马瑾、刘国栋等先生曾阅读本文初稿并提出宝贵意见,在此一并致以衷心感谢.

## 参 考 文 献

- [1] 邵学钟、张家茹、程学华、章思亚,1980. 京津唐地区转换波测深结果. 地震地质,3,2,11—20.
- [2] 刘启元、邵学钟,1985. 天然地震 PS 转换波的合成理论地震图研究. 地球物理学报,28,291—302.
- [3] 邵学钟、张家茹、章思亚、东纪平,1986. 唐山大地震区深部构造的初步研究. 地球物理学报,29,28—41.
- [4] 中国电子仪器仪表学会信号处理分会编译,1983. 数字信号处理程序库. 391—398. 清华大学出版社.
- [5] Gal'Perin, E.I., 1983. *The Polarization Method of Seismic Exploration*. 37—43. D. Reidel Publishing Company (英译版).
- [6] Kanasewich, E.R., 1975. *Time sequence Analysis in Geophysics*. 286—304. Second edition. The University of Alberta Press.
- [7] 张家茹、邵学钟、雷胜利,1982. 利用转换波偏振特性提高转换波震相识别的可靠性. 地球物理学报,25,125—142.
- [8] 俞寿明、查 中、梁 杰,1984. 频率加强滤波. 石油地球物理勘探,6,200—210.

## DIGITAL FILTERING IN THE PROCESSING OF CONVERTED WAVES

LEI XINGLIN, SHAO XUEZHONG AND ZHANG JIARU

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

### Abstract

Some approaches by digital filtering in the processing to earthquake generated converted waves are discussed in this paper. Lowpass filtering, polarization filtering, frequency weighting filtering, correlation filtering, and superposition processing are used to improve the resolving power of seismic records and to raise the signal-to-noise ratio, and so the possibility of phase identification of PS converted waves is greatly improved.