

二道递归滤波VSP波场分离方法

刘保华 焦湘恒 王成礼 王乃贤

(青岛海洋大学)

(胜利油田)

摘 要

刘保华, 焦湘恒, 王成礼, 王乃贤: 二道递归滤波VSP波场分离方法, 《石油地球物理勘探》, 24 (3) 1989: 271~280, 289

上行波和下行波的分离是垂直地震剖面 (VSP) 资料处理的重要环节之一。本文提出一种用二道递归滤波分离VSP波场的新方法。这种方法在假定地层为水平层状介质的前提下, 从一维波动方程出发, 导出了相邻两道VSP记录的上行波和下行波计算公式。由于该方法参与运算的记录只有两道, 因此, 可以在资料道数少而其他国家又无能为力情况下把波场分开。方法允许不均匀的检波点距, 且不存在空间假频现象和混波效应。理论模型试算和实际资料处理的结果表明, 该方法是切实可行的。

关键词: 递归滤波 垂直地震剖面法 波场分离

ABSTRACT

Liu Baohua, Jiao Xiangheng, Wang Chengli and Wang Naixian: Two-trace recursive filtering for separating VSP wave fields, OGP, 24 (3) 1989: 271~280, 289

One of the important steps in VSP data processing is to separate upgoing wave from downgoing wave. Here we present a new VSP wave field separation method using two-trace recursive filtering. On the assumption that the medium is horizontally layered, we use one dimensional wave equation to derive calculation formula for upgoing and downgoing waves of two adjacent VSP traces. This method, using two traces only, can separate the VSP wave fields which can not be separated by other methods in the case of few traces. This method allows nonuniform group intervals; besides it does not cause spatial aliasing and wave mixing. Both theory and practice prove the method really feasible.

Key words: recursive filtering, vertical seismic profiling (VSP), wave field separation

垂直地震剖面 (VSP) 是近几年迅速发展起来的地震勘探方法之一。它与地面地震剖面相比, 具有波场信息丰富、分辨率和信噪比高等优点。但 VSP 资料中除包含上行波外, 还包含下行波, 两者以不同的复杂程度叠合在一起, 故直接用 VSP 资料进行地质解释无疑是非常困难的。因此, 有效地分离 VSP 波场中的上行波和下行波, 已成为 VSP 资料处理流程中必不可少的重要环节之一。

为了把 VSP 记录中的上行波和下行波分开, 人们曾做了大量的工作, 其中 $F-K$ 速度滤波方法 (Christie 等, 1980) ^{[1], [2]} 是目前生产中较为常用的方法之一。这种方法一般在做 VSP 数据采集时, 要求空间上与时间上一样, 采样间隔不仅要满足尼奎斯特采样定理, 而且是等间隔的。如果其采样间隔不均或过大, 则容易产生空间假频现象。但是, 在实际工作中因施工受井内地质条件及井壁条件的限制, 这一要求是很难满足的。此外, VSP 数据常有缺失, 加之混波效应的影响, 往往会导致对地层深度的错误解释。

Carswell 等人 (1984) ^[3] 提出的在 $\tau-p$ 域分离上行波和下行波的方法, 在一定程度上放宽了对均匀检波点距的要求, 因此, 可适应井内较复杂的条件, 避免了可能出现的空间假频问题。但这种方法却不能克服由于 Radon 变换引起的混波效应。

多道中值滤波 (Hardage, 1983) ^{[4], [5]} 是 VSP 波场分离中较为有效的一种方法。该方法允许不均匀的检波点距, 且抑制随机噪声的效果也比较好。但要达到这种水平, 选用的道数就应适当多一些, 而道数越多, 边道出现的零值就必然越多, 计算量也就越大。显然, 对于道数较少的资料 (少于 7 道时), 这种方法往往得不到满意的效果。

针对目前波场分离方法所存在的问题, 我们提出一种二道递归滤波 VSP 波场分离方法。该方法在假定地层为水平层状介质的前提下, 从一维波动方程出发, 导出了时间域上行波和下行波的计算公式。由于这种方法仅需相邻两道 VSP 记录, 因此, 可用于处理道数较少的资料, 且不存在空间假频现象和混波效应, 检波点的位置或检波点距也可任意选择。文中对理论模型和实际资料进行了处理, 获得了良好的效果, 表明该方法是切实可行的。

方 法 原 理

基本原理

如果假定地层为完全弹性水平层状介质, 且由震源发出的波可以近似地看作平面波, 当震源距离井口较近 (即所谓零偏移距问题) 时, 则地层中的地震波满足一维波动方程

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 Φ 为检波点接收到的波场; v 为地震波的传播速度。

我们知道, 在地面地震勘探中 Φ 代表上行波场, 而在 VSP 记录中检波点接收到的波动 Φ 则为上行波与下行波之和。波场分离的目的就是从式 (1) 出发, 根据记录到的波场 Φ 求出所期望的上行波和下行波。

有时, 我们可以把一组界面近似地看成一个界面 (例如界面 k), 现在用 $U_k(z)$ 、 $D_k(z)$ 分别表示某一界面 k 之上的上行波和下行波的 z 变换, $U_k'(z)$ 、 $D_k'(z)$ 分别表示该界面之下的上行波和下行波的 z 变换 (图1), 由公式 (1) 推出它们之间的关系可用矩阵^[8]表示为

$$\begin{bmatrix} U_k'(z) \\ D_k'(z) \end{bmatrix} = \frac{1}{T_k} \begin{bmatrix} 1 & R_k \\ R_k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_k(z) \\ D_k(z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中

$$R_k = \frac{v_k \rho_k - v_{k'} \rho_{k'}}{v_k \rho_k + v_{k'} \rho_{k'}} \quad \text{为界面的反射系数}$$

$$T_k = 1 + R_k \quad \text{为界面的透射系数}$$

设第 n 个检波点位于界面 k 之上, 而第 $n+1$ 个检波点位于界面 k 以下, 检波点距为 Δz , 检波点 n 所接收到的上行波 $U_n(z)$ 和下行波 $D_n(z)$ 即为界面 k 之上的波场, 故有

$$U_n(z) = U_k(z) \quad (3)$$

$$D_n(z) = D_k(z) \quad (4)$$

若不考虑介质的能量弥散现象, 则检波点 $n+1$ 所接收到的上行波 $U_{n+1}(z)$ 和下行波 $D_{n+1}(z)$ 与界面 k 之下的波仅有时间上的延迟, 而振幅不变。因此, 有关系式

$$U_{n+1}(z) = U_k'(z) z^{-\tau} \quad (5)$$

$$D_{n+1}(z) = D_k'(z) z^{\tau} \quad (6)$$

式中, $\tau = \Delta z/v$ 为两道间波场的旅行时。

将式 (3) ~ (6) 代入式 (2), 可得到联系检波点 n 与 $n+1$ 之间波场的关系式

$$\begin{bmatrix} U_{n+1}(z) \\ D_{n+1}(z) \end{bmatrix} = \frac{z^{-\tau}}{T_k} \begin{bmatrix} 1 & R_k \\ z^{2\tau} R_k & z^{2\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n(z) \\ D_n(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

用 $\Phi_n(z)$ 和 $\Phi_{n+1}(z)$ 分别表示第 n 个检波点和第 $n+1$ 个检波点所接收到的 VSP 记录的 z 变换, 则有

$$\Phi_n(z) = U_n(z) + D_n(z) \quad (8)$$

$$\Phi_{n+1}(z) = U_{n+1}(z) + D_{n+1}(z) \quad (9)$$

将(8)、(9)两式代入式(7), 可得

$$U_n(z) = \frac{T_k \Phi_{n+1}(z) z^{\tau} - (R_k + z^{2\tau}) \Phi_n(z)}{(1 - R_k)(1 - z^{2\tau})} \quad (10)$$

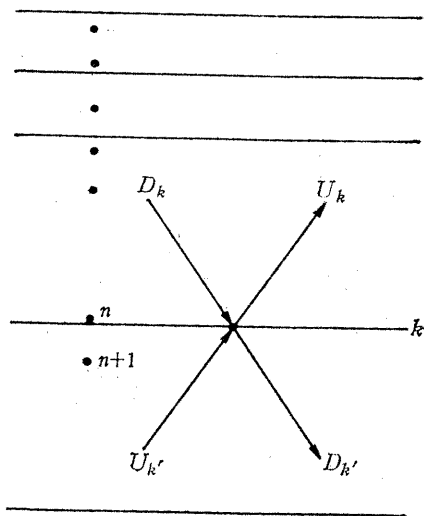


图1 水平层状介质模型
(·代表检波点)

$$D_n(z) = \Phi_n(z) - U_n(z) \quad (11)$$

和

$$U_{n+1}(z) = \frac{\Phi_{n+1}(z) - z^{-\tau} \Phi_n(z)}{1 - z^{2\tau}} \quad (12)$$

$$D_{n+1}(z) = \Phi_{n+1}(z) - U_{n+1}(z) \quad (13)$$

为简单起见, 令

$$Y_n(z) = \frac{T_k \Phi_{n+1}(z) z^\tau - (R_k + z^{2\tau}) \Phi_n(z)}{1 - R_k} \quad (14)$$

$$Y_{n+1}(z) = \Phi_{n+1}(z) - \Phi_n(z) z^\tau \quad (15)$$

则可将式(10)、(12)改写为如下形式

$$U_n(z) = Y_n(z) + z^{2\tau} U_n(z) \quad (16)$$

$$U_{n+1}(z) = Y_{n+1}(z) + z^{2\tau} U_{n+1}(z) \quad (17)$$

从式(16)、(17)可以看出, 只要求得 $Y_n(z)$ 和 $Y_{n+1}(z)$, 就可通过递归滤波求取上行波 $U_n(z)$ 和 $U_{n+1}(z)$ 。此时, 滤波器频率响应的 z 变换为

$$H(z) = 1 / (1 - z^{2\tau}) \quad (18)$$

分析式(18)不难看出, 该式不满足递归滤波的稳定条件。为此, 我们人为地把式(18)作如下修改

$$H(z) = 1 / (1 - \alpha z^{2\tau}) \quad (19)$$

式中 α 为小于 1 的实数。这时, $H(z)$ 在单位圆上及单位圆内无奇点, 即满足稳定条件。此时, 式(16)、(17)在时间域修改后的表达式为

$$u_n(t) = y_n(t) + \alpha u_n(t - 2\tau) \quad (20)$$

$$u_{n+1}(t) = y_{n+1}(t) + \alpha u_{n+1}(t - 2\tau) \quad (21)$$

式(20)、(21)即为时间域内计算上行波的递归滤波公式。

反射系数和透射系数的计算

利用式(14)、(15)计算 $y_n(t)$ 和 $y_{n+1}(t)$ 时, 要求已知地层的反射系数和透射系数。但是在实际工作中, 介质的密度往往是未知的, 且密度值变化较小, 得到的只是由速度测井资料获取的地层速度。在这种情况下, 可以认为地层的密度为常数。因此, 地层的反射系数和透射系数可用下式近似求取, 即

$$R_k = \frac{v_k - v_{k+1}}{v_k + v_{k+1}} \quad (22)$$

$$T_k = 1 + R_k \quad (23)$$

实际资料的处理效果表明, 这种近似基本上是合理的。

参数 α 的选择

为简单起见, 在上述推导过程中, 我们忽略了噪声的影响。但是, 实际记录中噪声干扰是难免的, 且有时相当严重。为此, 令式(14)中的噪声项为 $r_n(t)$, 经滤波后剖面中的噪声为 $R_n(t)$, 于是可推出

$$R_n(z) = \frac{r_n(z)}{1 - \alpha z^{2\tau}} - \frac{(1 - \alpha) z^{2\tau} U_n(z)}{1 - \alpha z^{2\tau}} \quad (24)$$

将式(24)右边第二项展开, 得

$$-\frac{(1-\alpha)z^{2\tau}U_n(z)}{1-\alpha z^{2\tau}} = -(1-\alpha)U_n(z)(z^{2\tau} + \alpha z^{4\tau} + \alpha^2 z^{6\tau} + \dots) \quad (25)$$

式(25)表示, 在波场分离的同时, 反向的上行波将作为规则干扰分散在记录中。当 α 取得越大时, 这种规则干扰就越分散, 因此, 希望将 α 选得大些。但就式(24)而言,

α 越大, $\frac{r_n(z)}{1-\alpha z^{2\tau}}$ 项就越大, 则滤波时对随机干扰的压制就变得越差。实验表明, 当记

录的信噪比较高时, 参数 α 可选大些(图12中, $\alpha=0.9$), 反之选小些(图14中, $\alpha=0.8$)。一般情况下, α 在0.7~0.9的范围内选取为宜。

理论模型试算

我们采用本文提出的方法, 对合成记录进行了试算。图2是由理论模型^[9]按表中
所给参数计算得到的合成VSP记录。从图中可以看出, 一次下行波含有主要的地震波
能量, 层间多次下行波与一次下行波平行排列, 且与上行波成镜像关系。

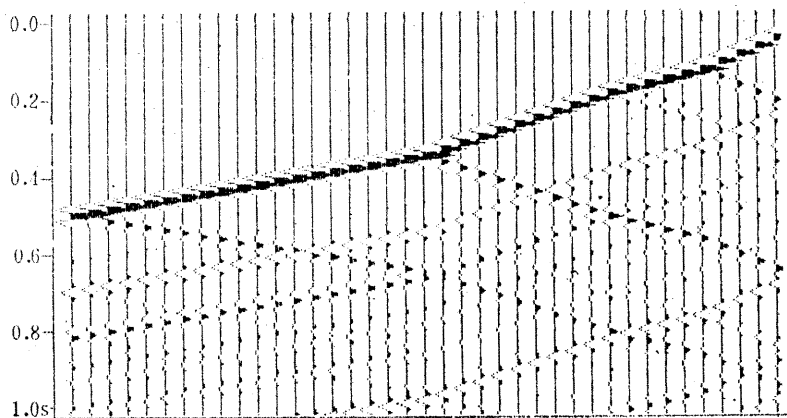


图2 合成VSP记录

图3是用F-K速度滤波方法对合成VSP记录(图2)进行波场分离后的上行波剖面。从图中可见, 由于空间采样间隔不是足够小, 与第一层、第三层相对应的频率高于尼奎斯特空间折叠频率, 致使上行波和下行波发生干涉。此外, 由于下行波的振幅比上行波强4倍左右, 所以下行波未得到充分的压制, 使得上行波辨认不清, 初至亦不清楚, 这将给资料解释工作带来很大的困难。

图4是用7道中值滤波方法对图2进行波场分离后的结果。可见其效果明显优

理论模型参数表

层位	层速度 (m/s)	深度 (m)	密度 (g/cm ³)
1	1 000	100	常数
2	1 670	200	常数
3	1 250	400	常数
4	2 500	780	常数
基底	3 500		常数

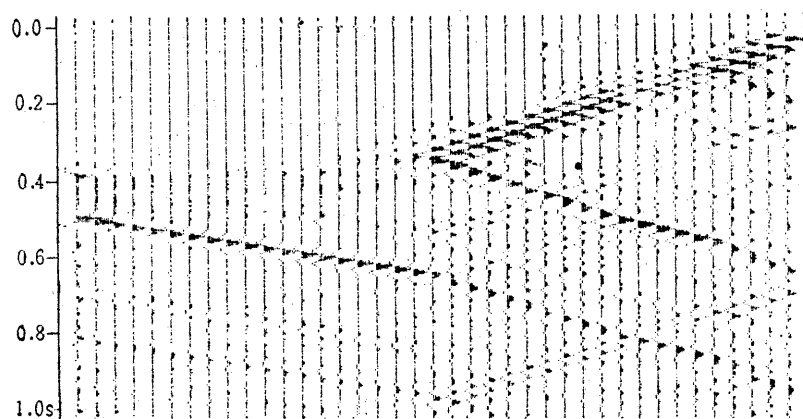


图 3 上行波剖面
(F-K法)

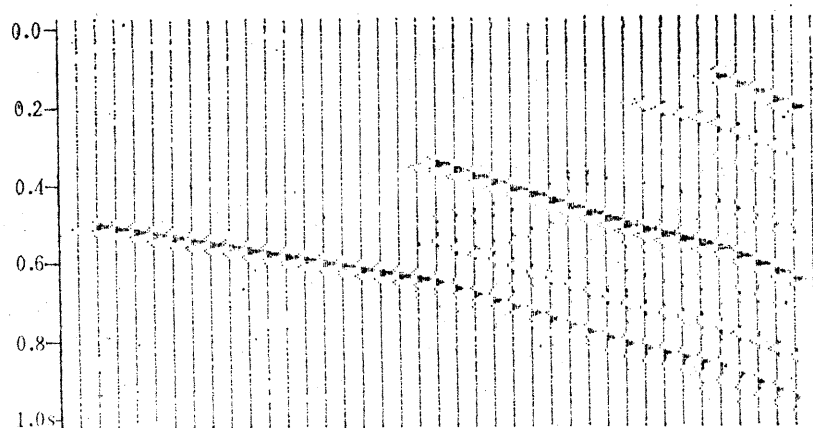


图 4 上行波剖面
(7道中值滤波法)

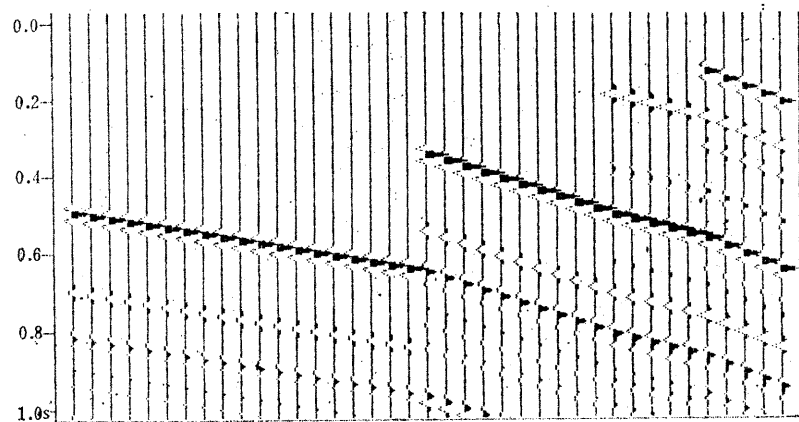


图 5 上行波剖面
(二道递归滤波法)

于 F - K 滤波方法。

图5是用本文提出的方法进行波场分离后的上行波剖面,效果是令人满意的。

为了进一步说明本文所提方法的抗噪能力,我们在图2的合成记录中相对上行波加了40%的随机噪声(图6)。图7和图8是分别用 F - K 滤波法和中值滤波法对图6波场

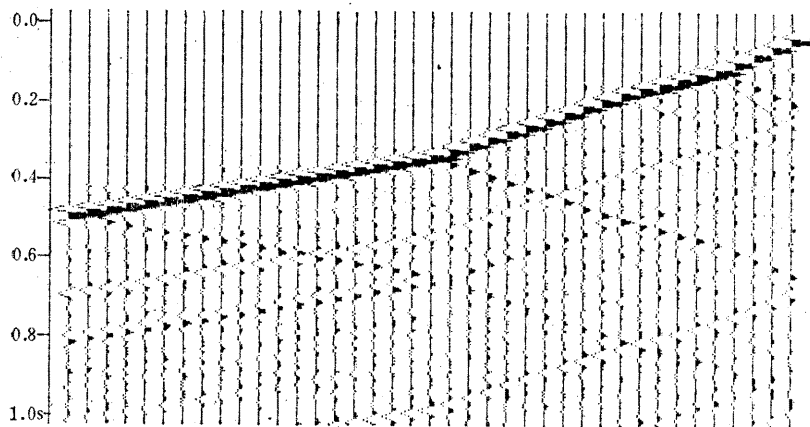


图6 含噪声(40%)的合成记录

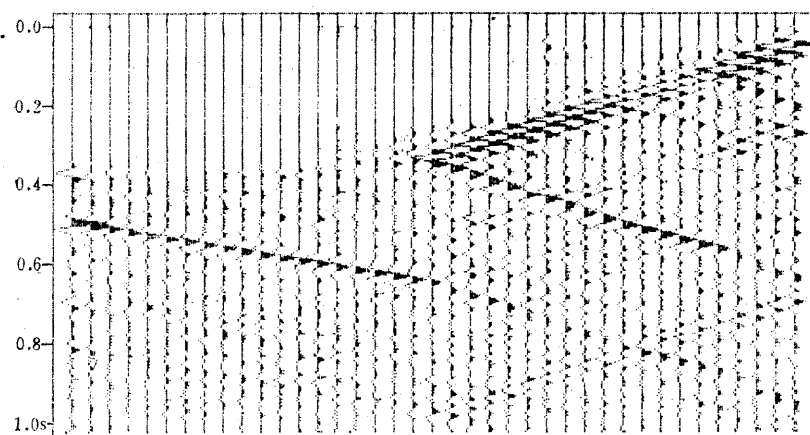


图7 图6经 F - K 滤波处理的结果

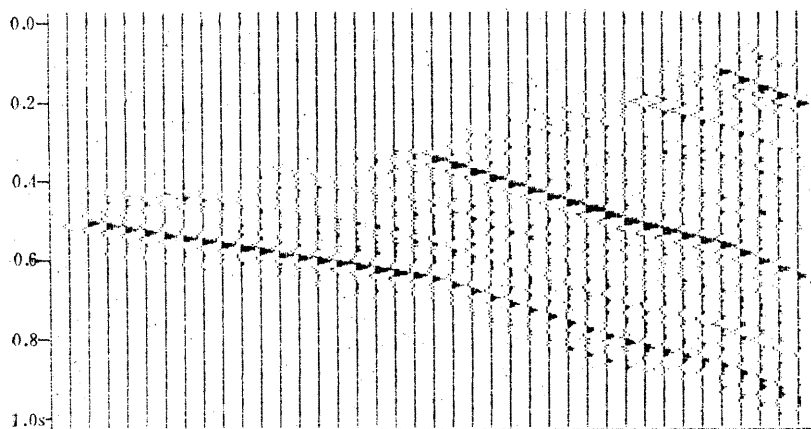


图8 图6经中值滤波处理的结果

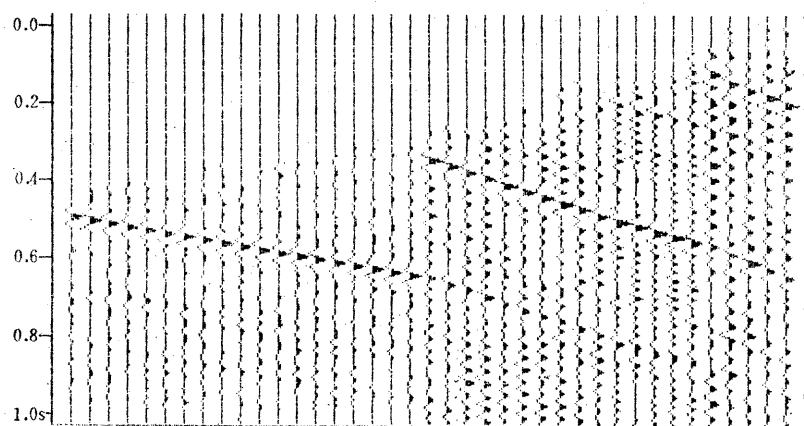


图 9 图 6 经二道递归滤波处理结果

分离后的结果；图 9 为用本文方法对图 6 做波场分离后的结果，可见，尽管在用二道递归滤波进行波场分离后的剖面中（图 9）噪声背景稍有增加，但其效果仍然优于 $F-K$ 滤波方法。

应用实例

目前本方法已作为一个实用处理模块编入 VSP 处理流程之中。下面介绍两个实际资料处理的例子。

例 1

图 10 是胜利油田 A 井 VSP 原始记录剖面；图 11 和图 12 分别为 7 道中值滤波和本文提出的方法对图 10 进行波场分离后的上行波剖面。可见，在这两个剖面上波组之间的对应关系基本上是一致的。但是，在边道及中间缺失道附近，本文所提方法的效果明显好一些。

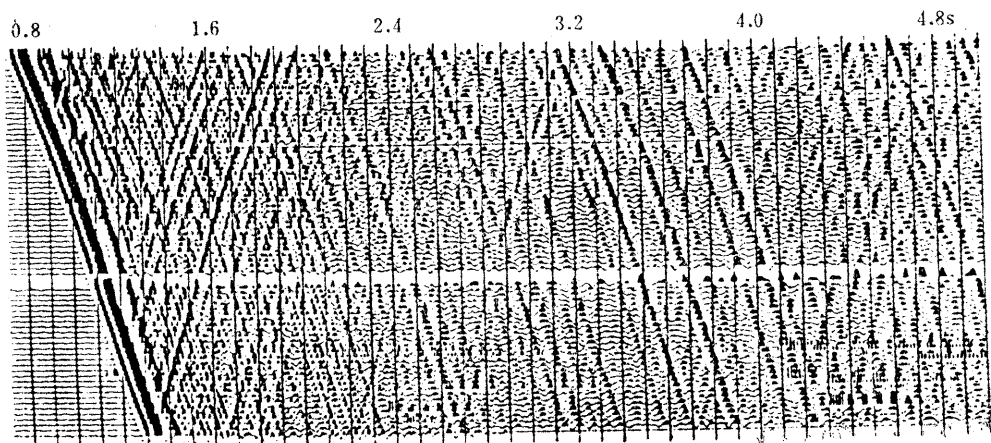


图 10 胜利油田 A 井原始 VSP 记录

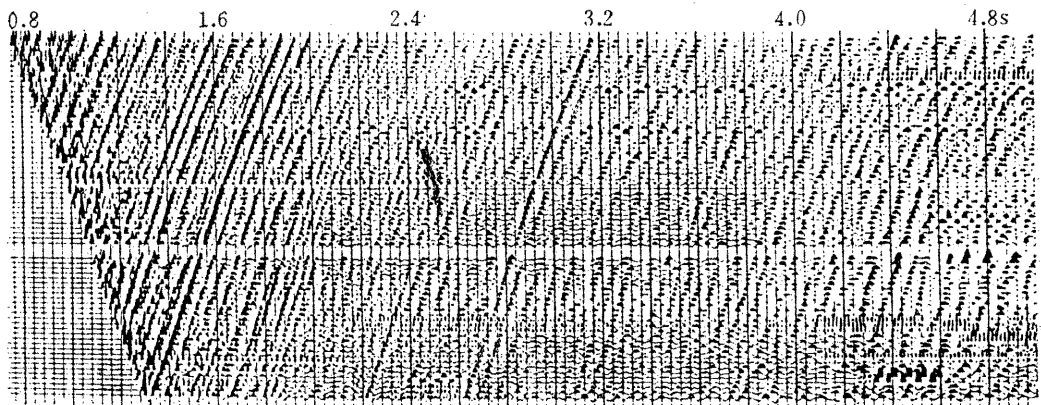


图 11 图10经中值滤波的处理结果

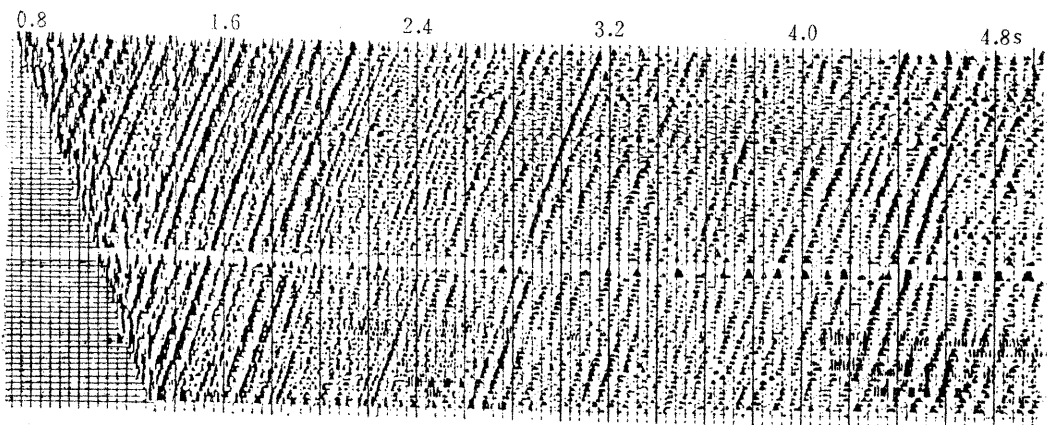


图 12 图10经二道递归滤波的处理结果

 $(\alpha=0.9)$ **例 2**

图 13 是同一地区 B 井的 VSP 原始记录剖面。该井完钻井深为 3 500m, 从 3 500m 至 2 000m 间检波点距为 25m。2 000m 至地表采用检查点观测方式记录, 每连续观测 3

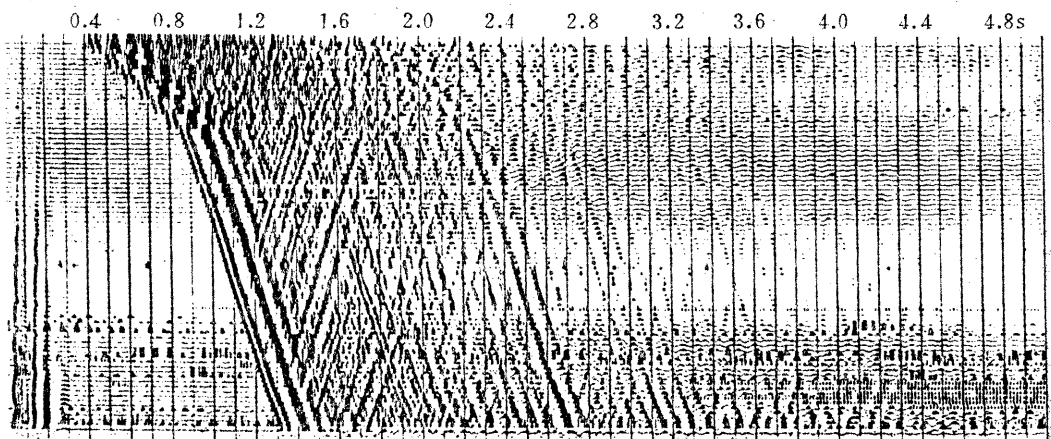


图 13 胜利油田 B 井原始 VSP 记录

个测点跳5个测点(125m)。由于当时本文方法尚未提出,采用原有方法无法将上行波和下行波分开,故2000m至地表的资料未能用于地质解释。后经二道递归滤波方法处理的结果示于图14,由图可见,下行波已得到了压制,突出了上行波,主要层位的反射还是比较清楚的,因此,可用于地质解释。

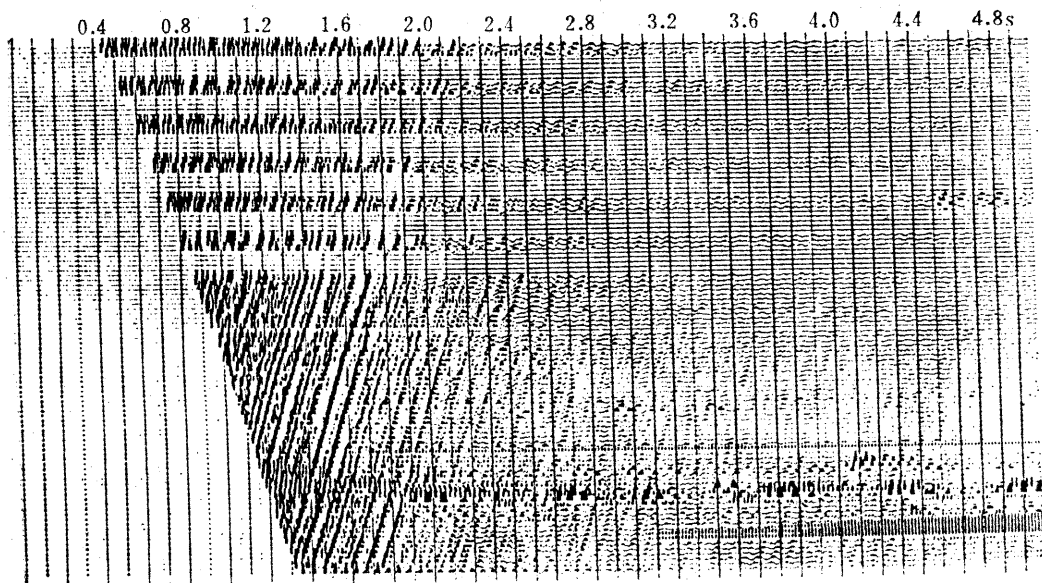


图14 图13经二道递归滤波处理结果
($\alpha=0.8$)

结 束 语

理论模型试算和实际资料处理结果证明,本文提出的二道递归滤波VSP波场分离方法是正确可行的。与传统方法相比,它有不受空间假频的影响,不存在混波效应,对空间采样间隔无严格要求,计算量小等优点。此外,该方法还具有道间内插,波场外推等功能,从而可解决野外采集数据缺失问题。由于方法能对道数较少的资料进行处理,因此,它的应用范围比其它方法更广些。

在本方法的研究中,胜利油田地调指挥部有关领导和同志给予了极大的支持和帮助,王国贞同志提出了有价值的意见,笔者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Christie, P. A. F, Hughes, V. J., and Kennet, B. L. N.: Velocity filtering of seismic reflection data, 50th Annual SEG Meeting, 1980
- [2] Simaan, M., and Jovanovich, D.: Optimum filters for vertical array seismic data processing, 50th Annual SEG Meeting, 1980

(下转第289页)