

优势频率约束下的 递推 f - x 去噪和谱均衡方法

陈必远*

马在田

(大庆石油管理局物探公司研究所) (同济大学海洋地质与地球物理系)

摘 要

陈必远, 马在田. 优势频率约束下的递推 f - x 去噪和谱均衡方法. 石油地球物理勘探, 1997, 32(4): 575~581

在高分辨率地震资料处理中, 提高信噪比的关键是消除高频噪声的影响。为此, 本文提出了在优势频率约束下的递推 f - x 去噪和谱均衡处理方法。该去噪方法是以优势频率成分(即具有最高信噪比的频率成分)的预测因子为约束条件, 在给定的频段内分别沿频率减小和增大的方向进行递推求解, 准确地求取其它较低信噪比频率成分的预测因子, 使低信噪比频率成分的去噪结果更为理想。

优势频率约束下的谱均衡方法是以优势频率的振幅值为基础, 对窗口内的地震数据进行谱均衡处理, 保持了地震数据的相对振幅关系不变, 同时提高了地震子波的视主频。

主题词 优势频率 约束 f - x 预测滤波 谱均衡 递推 信噪比 预测因子

ABSTRACT

Chen Biyuan and Ma Zaitian. Recursive noise elimination in f - x domain and spectrum equalization under dominant frequency restriction. OGP, 1997, 32(4): 575~581

The key to improving signal/noise ratio in high-resolution seismic data processing lies in eliminating the influence of high frequency noises. Thus a new method is given of recursive noise elimination in f - x domain and spectrum equalization under dominant frequency restriction. According to the method, by using the restriction of prediction operator of dominant frequency contents having the highest signal/noise ratio, people can make recursive solution respectively along the increase and decrease directions of frequency in the given band to solve for the desirable prediction operators of other frequency contents which have low signal/noise ratio, thus achieving satisfactory noise elimination of the contents whose signal/noise ratio is low.

The spectrum equalization under dominant frequency restriction is based on the

* Chen Biyuan, Research Institute, Geophysical Exploration Corporation, Daqing Petroleum Administration, Heilongjiang Province, 163357

本文于1996年9月12日收到。

amplitudes of dominant frequency contents, and it can achieve the spectrum equalization of seismic data in given windows to keep constant the relative amplitude relation of seismic data, and to raise the apparent dominant frequency of seismic wavelets.

Subject heading: dominant frequency, restriction, f - x prediction filtering, spectrum equalization, recursion, signal/noise ratio, predictive operator

引言

高分辨率地震资料处理的关键是信噪比问题。其中,高频噪声对地震信号频带的拓宽影响极为严重。但由于大地吸收及其它因素的影响,所接收到的地震子波高频成分大大衰减,而地震记录的高频区又往往都存在很强的高频噪声,从而导致地震记录高频区的信噪比非常低。可见要拓宽地震波的频带、提高分辨率,应首先提高地震记录高频区的信噪比,克服高频噪声的影响。

f - x 预测滤波是消除随机噪声的一种有效方法,但该方法的去噪效果受信噪比高、低的制约。当某一频率成分的信噪比过低时,利用 f - x 预测滤波方法很难求取准确的预测因子,因此无法拾取出正确的有效信号。

从上述分析可见,求取准确的预测因子是提高低信噪比记录 f - x 预测滤波精度的关键。本文提出在优势频率约束下的 f - x 去噪方法,是先在给定的频段内进行一次常规的 f - x 去噪处理,再根据去噪结果,求出具有最高信噪比的优势频率及该频率成分的预测因子。然后,从该优势频率出发,分别沿频率减小和增大的方向进行递推,求取其它频率成分的预测因子。这样,就可在求取预测因子过程中减少噪声的影响,提高预测滤波的精度。

常用的谱均衡是提高地震记录子波视主频的有效方法,它的主要缺点是破坏了地震记录的相对振幅关系。造成这种情况的原因是常规的谱均衡方法采用了不变的期望输出振幅谱,这样就使谱均衡之后的地震记录在任意时间、空间位置都有相同的平均振幅值。而优势频率约束下的谱均衡方法是以时窗内优势频率成分的振幅值为参考,自动地给出时变、空变的期望输出振幅谱,使谱均衡之后的振幅相对关系保持不变,同时提高了地震子波的视主频。由于采用了具有最高信噪比的优势频率成分来控制期望输出的振幅谱值,从而减少了噪声的影响。

方法原理

f - x 预测滤波简述

f - x 预测滤波方法是假定在 f - x (频率—空间)域相干信号是可预测的,而随机噪声是不可预测的。据此,就可设计出一个预测算子作用于数据,预测出相干的信号,压制随机噪声。

相干信号的预测过程一般是在一个给定频率 f_i 的数据上进行的。我们设定某一个窄小的时间、空间窗口内地震记录数据为 $d(t, x)$, 从 t - x 域变换到 f - x 域后记为 $D(f, x)$ 。对一个给定频率 f_i , 其预测算子为 g_i , g_i 应使期望输出与实际输出的误差平方达到最小^[1]。给定频率 f_i 的误差平方定义为

$$E(f_i) = \sum_n \left| D(f_i, x_n) - \sum_{l=1}^L g_i(l) D(f_i, x_{n-l}) \right|^2 \quad (1)$$

式中: n 为地震道数 ($n=1, 2, \dots, N$); i 为频率采样点数 ($i=1, 2, \dots, I$); L 为预测因子长度。

求解式(1)得到使 $E(f_i)$ 为最小的 g_i , 即为频率 f_i 数据的预测算子。将 g_i 与 $D(f_i, x)$ 褶积

$$O(f_i, x_n) = \sum_{l=1}^L g_i(l) D(f_i, x_{n-l}) \quad (2)$$

式(2)即是所求的预测滤波结果。

优势频率的求取

我们定义具有最高信噪比的频率为优势频率。在求取优势频率之前, 必须估算出每一频率成分的近似信噪比, 以确定出优势频率。估算信噪比不是在全频段上计算, 而是在一个给定的频率范围 (f_1, f_2) 内计算。频率范围可以根据子波主频及噪声背景情况来给定, 一般来说, 子波主频也在此范围之内。目前, 对地震记录信噪比的概念和计算方法尚无一个统一的定义。我们采用的方法也只是一种近似算法, 因此求出的信噪比值称为视信噪比值。

设频率范围 (f_1, f_2) 内的地震数据在 f - x 域表示为 $D_1(f, x)$ 。对 $D_1(f, x)$ 数据的每一个频率成分按 f - x 滤波方法进行预测滤波, 得到去噪后的结果为 $O_1(f, x)$, 则某一频率成分的视信噪比值定义为

$$S(f_i) = A(f_i) / [B(f_i) - A(f_i)] \quad (3)$$

式中

$$A(f_i) = \left[\sum_{l=1}^N O_1(f_i, x_l) \overline{O_1(f_i, x_l)} \right]^{1/2}$$

$$B(f_i) = \left[\sum_{l=1}^N D_1(f_i, x_l) \overline{D_1(f_i, x_l)} \right]^{1/2}$$

很明显, 用式(3)计算视信噪比的过程中将规则干扰也视为有效信号处理。这样, 只要规则干扰能量比有效反射波弱, 就不会影响计算结果的正确性。

我们将 $S(f_i)$ 取最大值的频率定义为优势频率 f_M , 即 f_M 满足

$$S(f_M) = \max_i [S(f_i)] \quad f_1 \leq f_i \leq f_2 \quad (4)$$

优势频率约束下的递推 f - x 去噪

在优势频率约束下的递推 f - x 去噪方法, 是以含 f_M 频率成分的数据为基础, 并以该频率成分的预测因子为最初的约束条件, 递推求取其它频率成分的预测因子, 完成所有频率成分的预测去噪。

用递推求取预测因子必须有如下假设条件: 即在计算时窗内, 有效信号不同频率的分解数据必须有相同的或随频率缓慢变化的时、空线性几何形态, 以保证相邻频率成分数据的几何形态及预测因子有较高的相似性。很明显, 地震记录是完全满足这一假设条件的, 因为地震子波在一个窄小的时窗内的频率特征(振幅特性和相位特性)变化是极小的或较缓慢的, 这就使地震数据有效信号不同频率分解数据具有相同的或缓慢变化的几何形态。

递推 f - x 去噪的步骤如下:

(1) 对优势频率成分地震数据进行一次常规 f - x 去噪, 然后再求取预测因子 $g_M(l)$ 。

(2) 由优势频率 f_M 到截止频率 f_I 的正向递推。令 $H_M(l) = g_M(l)$, 递推求取某一频率成分预测因子的公式为

$$G_i(l) = \alpha \cdot H_{i-1}(l) + (1 - \alpha) \cdot g_i(l) \quad (5)$$

式中: $0 \leq \alpha \leq 1$; $i = M+1, M+2, \dots, I$; $G_i(l)$ 为所求的 f_i 频率成分的递推 f - x 去噪预测因子; $H_{i-1}(l)$ 为 f_{i-1} 频率成分经递推 f - x 去噪之后(即经 $G_{i-1}(l)$ 作用之后)再由常规 f - x 去噪方法求取的预测因子; $g_i(l)$ 为 f_i 频率成分进行递推 f - x 去噪之前由常规 f - x 去噪方法求取的预测因子; α 为加权系数, 表示对 $H_{i-1}(l)$ 的影响程度, 一般取 0.8。

在求得 $G_i(l)$ 后, 将它作用于该频率数据, 便得到递推 f - x 去噪结果, 即

$$O(f_i, x_n) = \sum_{l=1}^L G_i(l) D(f_i, x_{n-l}) \quad (6)$$

从式(5)、(6)可以看出, 最初的预测因子 $H_M(l)$ 是从优势频率(f_M)成分中求取的, 所以有最好的预测效果。将 $H_M(l)$ 不同程度地(α 值的大小决定)作用于相似性好的相邻频率 f_{M+1} , 将会提高 f_{M+1} 频率成分的预测效果。这样, 一直递推计算到截止频率 f_I , 就完成了优势频率到截止频率的预测去噪处理。

(3) 由优势频率 f_M 到零频率的反向递推。令 $H_M(l) = g_M(l)$, 递推求取某一频率成分预测因子的公式为

$$G_i(l) = \alpha \cdot H_{i+1}(l) + (1 - \alpha) \cdot g_i(l) \quad (7)$$

式中: $0 \leq \alpha \leq 1$; $i = M-1, M-2, \dots, I$; 其它参数含义同式(6)。

完成以上计算步骤, 就完成了—个时窗数据的优势频率约束下的递推 f - x 去噪处理, 再经反傅氏变换返到 t - x 域, 便得到 t - x 域结果。

优势频率约束下的谱均衡方法

优势频率约束下的谱均衡是用时窗内的优势频率 f_M 的振幅谱值来标定期望输出振幅谱值的大小, 使之与谱均衡前优势频率的振幅值相关联, 并使谱均衡处理前后的相对振幅关系基本保持一致。

给定的谱均衡期望输出振幅谱经归一化处理后表示为 $P(f)$ 。经上述递推 f - x 去噪之后, 时窗内的实际的谱均衡期望输出振幅谱设计为

$$P_R(f) = \frac{A(f_M)}{P(f_M)} P(f) \quad (8)$$

对时窗内的数据按式(8)给出的期望输出振幅谱进行谱均衡处理, 即完成了该时窗优势频率约束下的谱均衡处理。

由式(8)可知, 在不同时窗内, 即使优势频率不同, 也都有相同形态的期望输出振幅谱, 只是振幅谱值不同(由优势频率成分的实际振幅谱值决定)。这样, 不同时窗内的数据经谱均衡处理后, 地震子波的视主频便提高到相同的等级, 而相对振幅关系基本保持不变。

算 例

图 1a 为二维单次覆盖剖面, 由于没有进行多次叠加, 信噪比非常低, 高频干扰严重; 图 1b 为优势频率约束下的递推 f - x 去噪处理结果(2 次迭代); 图 1c 为常规 f - x 去噪处理结果(2 次迭代)。比较图 1b 和图 1c, 从表面上看并无大的区别。

图 2a、图 2b 分别为图 1b 和图 1c 剖面的(60~120Hz)带通滤波结果(即高频段的结果)。

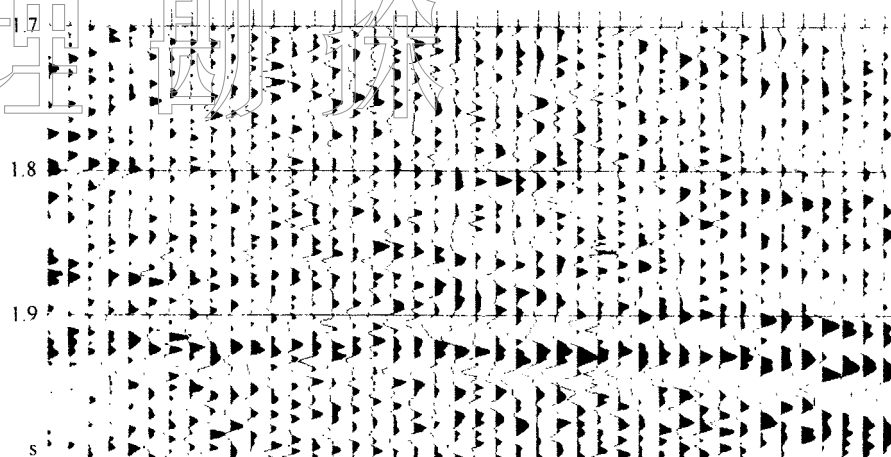


图 1a 二维单次原始覆盖剖面

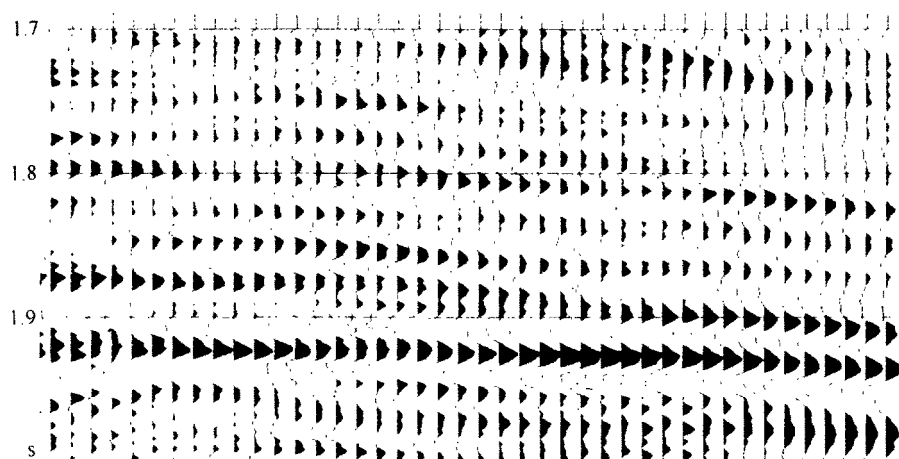


图 1b 图 1a 优势频率约束下的递推 f - x 去噪处理结果

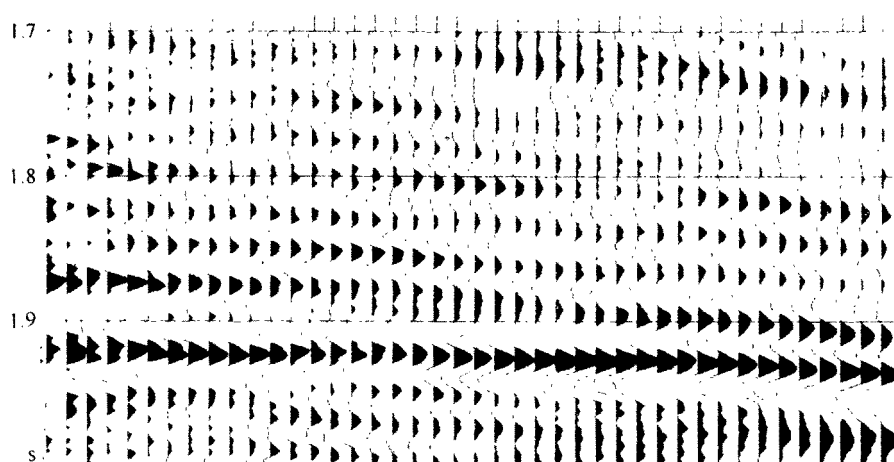


图 1c 图 1a 的常规 f - x 去噪处理结果

两图相比,差别较大,在图 2a 中有很多与有效反射波同相轴一致的高频成分同相轴,很明显,这就是从低信噪比的高频成分中预测出来的高频有效信号。而在图 2b 中几乎看不见这些高频同相轴,只有强的高频随机噪声和一些与有效反射波同相轴不一致的规则干扰。可见,优势频率约束下的递推 $f-x$ 去噪不但可以有效地衰减低信噪比的高频噪声,预测出高频有效信号,同时也能压制与有效反射波不一致的规则高频干扰。

图 3a、图 3b 分别为图 1b 和图 1c 经优势频率约束下的谱均衡处理结果。谱均衡动平衡时窗长度为 150ms,期望输出振幅谱带宽为 0~140Hz,处理结果使子波视主频从 40Hz 左右提高到 70Hz 左右,而且基本保持了原有的相对振幅关系。比较两结果看出,由于常规 $f-x$ 去噪结果中 60Hz 以上的频率成分信噪比较低,谱均衡之后高频噪声得以突出,反射波的连续性变差;而优势频率约束下的递推 $f-x$ 去噪结果在高频段有较高的信噪比,经谱均衡之后,在提高地震子波视主频的同时,还保持了较好的反射波连续性。

用该算法还做了部分处理的例证,效果同图 1~图 3 一致,故图略(编者)。

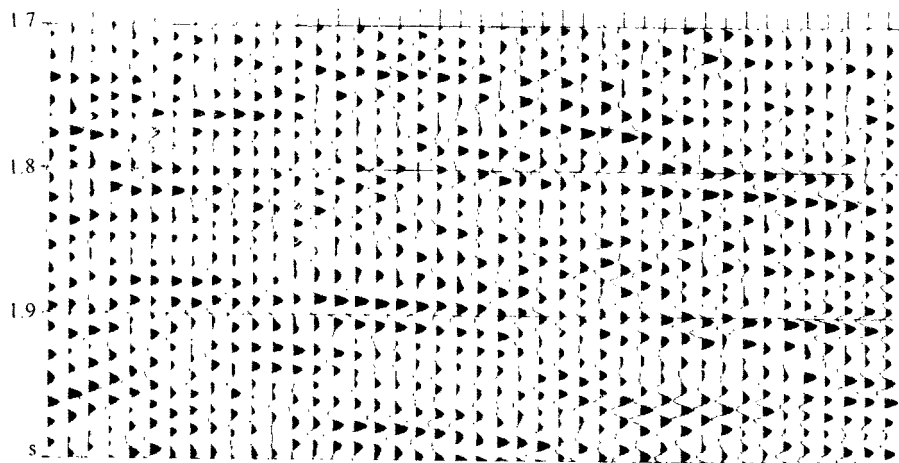


图 2a 图 1b 的带通滤波处理结果(60~120Hz)

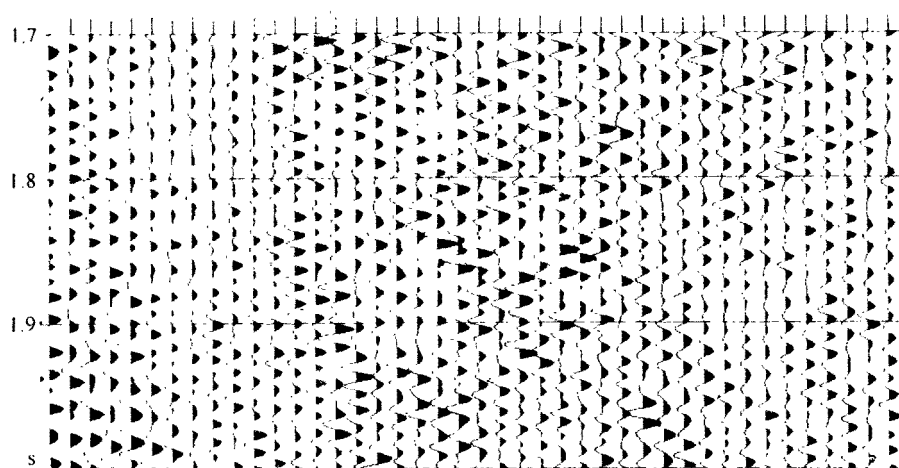


图 2b 图 1c 的带通滤波处理结果(60~120Hz)

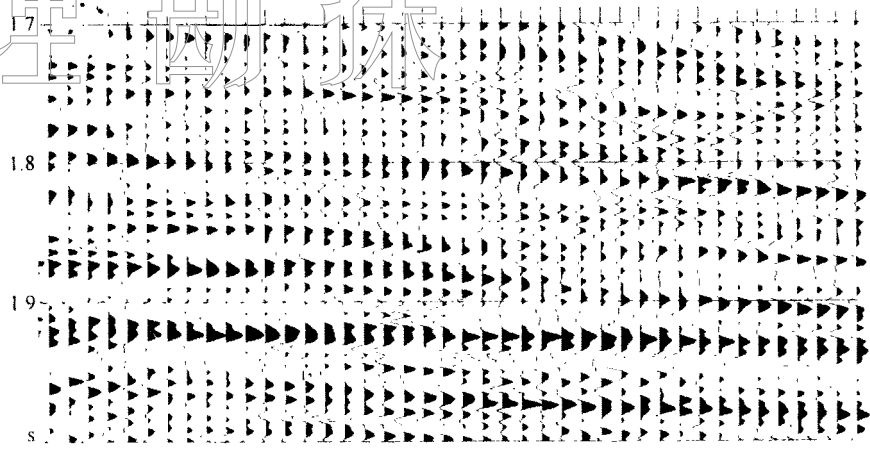


图 3a 图 1b 优势频率约束下的谱均衡处理结果

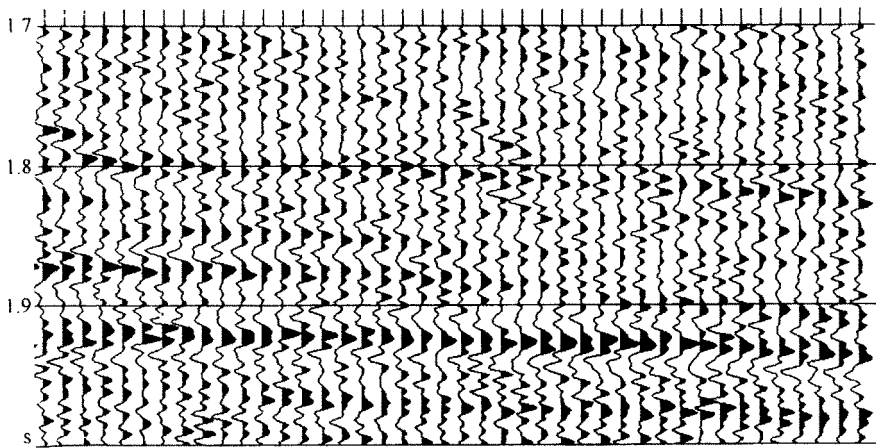


图 3b 图 1c 优势频率约束下的谱均衡处理结果

结 束 语

针对高分辨率地震资料处理的信噪比问题,本文提出的在优势频率约束下的递推 f - x 去噪及谱均衡处理方法,能精确地预测出低信噪比成分中的有效信号,在提高地震子波视主频的同时,可较好地保持反射波的连续性及其相对振幅关系。

参 考 文 献

1 Gnlunary N. FXDECDN and complex Wiener prediction filtering. Presented at 56th SEG Annual Meeting, 1986

2 Galbraith M et al. 用 f - x 预测衰减随机噪声. 美国勘探地球物理学家学会第 61 届年会论文集,石油工业出版社,1993

3 Wang W et al. 倾角切除的 f - x 滤波. 美国勘探地球物理学家学会第 61 届年会论文集,石油工业出版社,1993