小波包变换在面波分离中的应用

张华 潘冬明 刘松

(中国矿业大学,江苏徐州 221008)

摘要:作为一种时频分解方法,小波包变换有着广泛的用途,它不仅优于小波变换,而且与传统Fourier变换相比, 它能刻画出具有相同频率的有效波与面波在时间—空间域的分布,然后可以从中分离面波,再进行重构,即可得到 分离面波后的结果,该方法在成功分离面波的同时,可使有效波的能量(尤其是其低频能量)损失减小,有效地保持 信号的频宽不变,提高记录的信噪比。实际资料的处理结果表明,此方法在分离面波方面具有良好的效果。

关键词 小波包变换 时频分析 分离技术 面波

中图分类号:P631.4 文献标识码:A

文章编号:1000-8918(2007)02-0167-04

面波是一种对地震记录信噪比影响较大的规则 干扰。其主要特征是传播速度低,振动频率低,在地 震记录中能量强,具有一定的频带宽度。地震波在 传播过程中,由于地层的吸收和衰减作用,地震信号 的高频能量将随着传播距离的增加而迅速衰减,到 了中、深层,反射波的有效频带与面波的频带重叠的 部分较多,两者同相轴相互交织在一起,而面波能量 往往是有效波能量的几倍到几十倍,所以目的层的 信噪比非常低,从而直接影响叠前速度分析、静校正 等处理技术的应用效果。特别是我国的地质勘探工 作正大规模地由东部转向西部,西部地质构造条件 复杂,表层激发条件不好,反射波的能量衰减厉害, 并且在山区、沙漠、厚黄土地区的勘探增多,使得面 波干扰更为突出。

目前已经提出了许多种压制面波的方法,如低 截滤波或高通滤波、内切除、滤波、变换等。每种方 法都具有各自的特点并取得明显的效果,但他们都 侧重考虑某一方面的单一特性或仅依据某种条件假 设等,尽管能对面波进行压制,但是有效波也受到不 同程度的损失,导致中、深层资料品质变差,影响最 终的资料质量,从而很难落实地质构造,给深层开采 的研究带来困难。图1是某单炮高通滤波(15~20 Hz)分离面波的结果。可以看出,高通滤波对面波 进行了很好地压制,但这是以牺牲有效波的低频能 量为代价的。由于低频能量的损失,直接导致了单 炮0.55、0.8 s 等几处反射波同相轴连续性变差,并 且受面波干扰影响的地震信号与未受影响的地震 信号能量相差悬殊,若在叠前不进行必要的处理,





对于高分辨率资料处理来说,在不损失高频能量的情况下,低频能量的保持也是十分重要的,因为 决定信号分辨率是子波振幅谱的绝对宽度,而向低频端扩展更有利于提高子波的绝对宽度,从而提高 信号的分辨率。

为了克服这些缺点,笔者利用小波包变换无限 细分的优势,对整个地震波场进分析,在分解出面波 波场(含低频有效波波场)与较高频有效波波场的 基础上,对有效波与面波共存的波场进行处理,从中 提取有效波信号,再与较高频有效波波场进行信号 重构,得到分离面波后的地震波场。该方法采用小 波包变换分频处理的办法,使分离面波仅在有限的 频带进行,对无面波较高频带不进行任何去噪处理 操作,既可最大限度地保护有效波的低频能量,又可 使有效波的高频能量不受损失 ,有效地保持信号的 频宽 ,提高记录的信噪比。

1 方法原理^[3]

1.1 多分辨率分析

平方可积的实数空间 $L^2(R)$ 中,如果存在一系 列闭子空间 { V_i }, $j \in Z$ 满足下列条件:

(1) 一致单调性 $V_i \in V_{j-1}$ $j \in Z$;

(2)渐进完全性 { $\bigcap_{l \in \mathbb{Z}} V_j = 0$, $\bigcup_{l \in \mathbb{Z}} V_j = L^2(R)$ };

(3)伸缩规则性 $f(t) \in V_i \Leftrightarrow f(2^j t) \in V_0 \ j \in Z$;

(4)平移不变性 $f(t) \in V_0 \Rightarrow f(t-n) \in V_0$,对 所有 $n \in Z$;

(5)正交平移性 存在 $\phi \in V_0$,使得 { ϕ (t = n)}_{a=2}是 V_0 是的正交基。

那么所有的闭子空间 { V_j } $j \in Z$ 都是由同一尺 度函数 ϕ 伸缩后平移系列张成的尺度空间 ,并且相 互包含。

设 W_j 为 V_j 在 V_{j-1} 中的补空间,即 $V_j \oplus V_j = V_{j-1}$, $W_j \perp V_j \phi(t)$ 成为 V_j 的尺度函数, $\phi(t)$ 成为 V_j 的小波函数。因此多分辨率分析空间 V_j 空间分解可 表示为 $V_0 = V_1 \oplus W_1 = V_2 \oplus W_2 \oplus W_1 = V_n \oplus W_n \oplus W_{n-1}$ ⊕... $\oplus W_2 \oplus W_1$ 。

1.2 小波包分析

在多分辨率分析的基础上,设平方可积的实数 空间 $L^2(R)$ 中存在一个新的子空间 U_j^n ,则 $U_j^0 = V_j$, $U_j^1 = W_j \ j \in Z$,则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{j-1} = V_j$ ① W_j ,即可用 U_j^n 的分解统一为

 $U_{j-1}^0 = U_j^0 \bigoplus U_j^1$, $j \in Z$.

设 U_j^n 、 U_j^{2n} 分别是函数 $U_n(t)$ 、 $U_{2n}(t)$ 的闭包空间,若 $U_n(t)$ 满足下列方程

$$U_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t - k) , \qquad (1)$$

$$U_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t - k).$$
 (2)

方程(1)和(2)称为小波包的双尺度方程,当n=0时,方程(1)和(2)退化为多分辨率分析的尺度函数和小波函数,其中h(k)为低通滤波系数g(k)为高通滤波系数。

令 *n* 是任意非负整数 则

 $U_{i^{-1}}^n$ = $U_i^{2n} \bigoplus U_i^{2n+1}$,

 U_{j}^{2n} 与 U_{j}^{2n+1} 彼此正交, U_{j-1}^{n} 的基底可用 U_{j}^{2n} 与 U_{j}^{2n+1} 的基底表示为

$$u_{n}(2^{-j+1}t - m) = \frac{1}{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} \{\overline{h}_{m-2k}u_{2n}(2^{-j}t - k) +$$

$$\overline{D} \overline{D} \overline{D} \overline{D} \overline{M} \overline{g}_{m-2k}u_{2n+1}(2^{-j} - k)\}.$$

对于任意尺度 j 下的小波函数空间 W_i ,有

$$W_{j} = U_{j+1}^{2} \bigoplus U_{j+1}^{3}$$

$$W_{j} = U_{j+2}^{4} \bigoplus U_{j+2}^{5} \bigoplus U_{j+2}^{6} \bigoplus U_{j+2}^{7}$$

$$\vdots$$

$$W_{j} = U_{j+k}^{2k} \bigoplus U_{j+k}^{2k+1} \bigoplus \dots U^{2k+1} 6_{j+k} - 1$$

并取定 m = 0,1,..., $2^{k} - 1$, $k \in N$,j = 1,...,函数系 { $2^{\frac{i+k}{2}}u_{2^{k}+m}(2^{-(j+k)}x - l)$ }, $_{l \in Z}$ 为空间 $U_{j+k}^{2^{k}+m}$ 的标准正 交基。

从以上分解可以看出第 k 个正交分解中,小波 分解的第 j 个频带 $H_j(2^{j+1}\Delta\varphi 2^{j+2}\Delta\varphi)$ 进一步划分 为 2^k 个"子频带", $H_j^{k,m}(m=0,1,\ldots,2^k-1), U_{j+k}^{2^k+m}$ 中的正交基提供该子频带内的时间局部化,这正是 小波包提供的频带细分具有时间局部分析的优点。

1.3 小波包算法

设 $g_j^n(t) \in U_j^n$ 则 $g_j^n(t)$ 可表示为 $g_j^n(t) = \sum d_j^{j,n} u(2^j t - l)$

$$\mathcal{B}_{j}$$

此为小波包分解算法。由{d_l^{j-1}ⁿ}求得

$$d_{l}^{j^{2n}} = \sum_{k} a_{k-2l} d_{l}^{j^{-1}n},$$
$$d_{l}^{j^{2n+1}} = \sum_{k} b_{k-2l} d_{l}^{j^{-1}n}.$$

此为小波包重构算法。由 $\{d_l^{j^{2n}}\}$ 与 $\{d_l^{j^{2n+1}}\}$ 可求

$$d_l^{j-1 n} = \sum_{l} [h_{l-2k} d_k^{j 2n} + g_{l-2k} d_k^{j 2n+1}]$$

因此小波包变换可以对地震信号进行精细的分解, 它不仅可以对每次分解的低频系数进行分解,而且 能够对每次分解的高频系数进行分解。这比小波变 换只能对低频部分分解更占有优势。然后可以选择 对某几段频段进行噪声干扰处理,再进行信号的重 构,达到去噪的目的(图2)。图2中Lo_D为低通分 解滤波器,Ho_D为高通分解滤波器,它是将每一层 的频带宽度均一分为二,并传至下一层。这一原理 完全可以用来分离面波,先判断需要分解的层次,找 出低频面波与低频有效波共存的频段,然后结合其 他的方法来分离,比如,水平相干性差异、*f-k* 滤波、 二维小波变换、能量大小差异分离等,这样可以使有 效波的损失达到最小。笔者是用能量差异和切除的 办法从中提取有效波,再进行重构,即可得到分离面



波后的结果[4-5]。

2 实际资料分析

根据小波包的算法,对原始单炮图1a进行时频 分析,分解频率不同的系数剖面。图3是经过6层 小波包分解出来的3层低频面波系数剖面,从中可 以看出具有相同频率的有效波与面波在时间—空间 域的分布,然后将面波区域充零,再与其他小波包系 数合并,进行重构。图 4a 为重构后的结果,可以看 出分离面波后,不仅低频有效波的能量得到了保护, 而且高频有效波的能量没有任何损失,特别是 400 ~1 000 ms 处原面波覆盖区在消除面波后,反射波 的同相轴特征明显比以前变清楚了。图 4b 是用小 波包变换滤掉的部分,与图 1c 相比有效波的损害明 显减少,图 4c 是用一维小波变换处理的结果,由于 一维小波变换只能对低频进行分解,所以分离面波



a—小波包分离面波结果,b—被滤掉部分;c—小波变换分离面波结果

图4 重构后的剖面

不够彻底 同相轴不太清晰。

3 结束语

小波包变换是地震资料中时频细分的好工具, 它以2"(*n*为分解层数)划分信号频段,而且不漏掉 任何频率成分数用它对地震波场进行时频分析,可以 有效地保持地震信号的频宽,有良好的保频特性,因 此在提高信噪比与分辨率方面具有广泛的应用前 景。然而本文方法也不能做到完全不损害有效波信 号的情况下分离面波,只是与其他方法相比较,本文 方法可以把损害减到最少,能够满足高分辨率地震 勘探的目的要求。 参考文献:

- [1] 李卫忠 张明振. 压制面波的波场分离方法[J]. 石油地球物理 勘探,1998,33(5)679.
- [2] 罗国安,杜世通.小波变换及信号重建在压制面波中的应用[J].石油地球物理勘探,1996,31(3)337.
- [3] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京 科学出版社,1999.
 - [4] 王振国,周熙襄,钟本善.小波包对叠前地震面波的分离与信号重建[J].石油地球物理勘探,2002,37(5):460.
 - [5] 李晶,王振国 陈裕明,等.小波包变换叠前地震资料去噪方法 研究[J].成都理工大学学报 2003 30(5) 541.

THE APPLICATION OF WAVELET PACKAGE TRANSFORM TO SURFACE WAVE SEPARATION

ZHANG Hua ,PAN Dong-ming ,LIU Song

(China University of Mining and Techology , Xuzhou 221008 , China)

Abstract : As a time-frequency decomposition method ,the wavelet package transform can be used extensively. It is better than the wavelet transform. The wavelet package transform can divide the seismic data in more detail and better describe the distribution of effective wave and surface wave in the time-space field with the same frequency compared with the conventional Fourier transform. In addition , we can separate the surface waves from it. After reconstruction we can get the result of surface wave separation. The new method can separate surface waves successfully and meanwhile it can also avoid the loss of the effective wave energy (particularly the low frequency energy) preserve the frequency band width of signal and raise the signal/noise ratio of the seismic data. Practice shows that it is very effective in surface wave separation.

Key words : wavelet package transform ; time-frequency analysis separation technique surface wave

作者简介 : 张华(1979 –),男,汉族,江西宜春人,2004 年毕业于中国矿业大学资源学院物探专业,现为中国矿业大学资源学 院物探专业在读硕士研究生,研究方向为地球探测与信息技术,公开发表学术论文数篇。

上接166页

THE APPLICATION OF THE COMMON OFFSET FIRST ARRIVAL CURVE COMBINED WITH COMMON-SOUCE-LOCATION BASIS TO PICKING FIRST ARRIVALS OF SEISMIC WAVE

PI Jin-yun ,WANG Yan-chun , ZHANG Jing

(Key Laboratory of Underground Information Detection Technique and Instrument of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083 ,China)

Abstract: This paper deals with the first arrival batch modification methods which use the common-offset first arrival curve combined with the common-source-location basis by setting different parameters aiming at overestimation and underestimation of first arrivals. It also presents a new approach to the automatic picking of the later phase of the first arrival rather than the first break using a trough-to-peak ratio technique combined with expected arrival time, picking window and threshold. The application of these new methods remarkably improves the precision and efficiency of the first arrivals picking in areas of poor signal-to-noise ratios.

Key words : expected arrival time ; picking window ; threshold ; common-source-location basis ; elevation correction ; second arrival

作者简介 : 皮金云(1969 –)男 ,博士 ,1990 年毕业于中国地质大学(武汉)物探系 2002 年毕业于石油大学(北京)计算机系 , 获得硕士学位 现为中国地质大学(北京)博士研究生 ,主要从事地震勘探数据处理的方法研究及相关软件的开发工作 ,公开 发表学术设立物编据