

复赛谱域提取混合相位子波的方法^{*}

李国发 彭苏萍 高日胜 何兵寿 赵国平

(中国矿业大学资源与安全工程学院·北京)

李国发等.复赛谱域提取混合相位子波的方法.天然气工业,2005;25(1):85~87

摘要 为有效地提高地震资料的分辨率,提出了一种新的混合相位地震子波提取方法。相同振幅谱、不同相位谱的地震子波分别对应不同的最大和最小相位分量。在复赛谱域,遵照一定的规则,子波振幅谱可以分割为两部分,其分别对应于子波的最大和最小相位分量,分割比例的不同决定了子波不同的相位,由此可以得到最大相位子波、最小相位子波、零相位子波和一系列混合相位子波。根据地震记录信噪比谱的情况,设定地震记录的希望输出子波,对地震记录进行确定性子波反褶积。依据反褶积后地震记录方差模大小和分辨率情况,最终从一系列相同振幅谱不同相位谱子谱集合中确定理想的混合相位子波,通过确定性子波反褶积达到提高地震记录分辨率的目标。对理论合成地震记录和实际地震记录进行了子波提取实验,并利用提取的地震子波对地震资料进行了提高分辨率的处理,实验结果表明了该方法的正确性和有效性。

关键词 频谱 振幅谱 相位 子波 分辨率 反褶积

一、相位分解基本原理

Ulrych(1971年)将同态反褶积技术引入到了地震勘探中来。忽略噪声项,地震记录褶积模型在频率域表示为:

$$x(\omega) = w(\omega)\xi(\omega) \quad (1)$$

式中: $x(\omega)$ 、 $w(\omega)$ 、 $\xi(\omega)$ 分别是地震记录、子波和反射系数的富氏变换。

通过对式(1)取对数,式(1)可转化为线性系统:

$$\ln x(\omega) = \ln w(\omega) + \ln \xi(\omega) \quad (2)$$

对式(2)作反富氏变换:

$$\tilde{x}(t) = \tilde{w}(t) + \tilde{\xi}(t) \quad (3)$$

式中: $\tilde{x}(t)$ 、 $\tilde{w}(t)$ 、 $\tilde{\xi}(t)$ 分别称为 $x(t)$ 、 $w(t)$ 、 $\xi(t)$ 的复赛谱序列。

由于子波和反射系数序列“平滑度”的差别,子波的复赛谱一般在原点附近,而反射序列的复赛谱远离原点,基于这种认识,在复赛谱设计低通滤波器就可以在复赛谱中实现子波和反射系数的分离,达到子波提取的目的。

在对频谱取对数时,相位谱成为对数谱的虚部,

但相位的多值性使得要对相位谱做连续相位展开,许多人对此进行了研究并给出了导数法、递归算法等方案,但这些理论上的解决方案在数值实现时有一定的困难和问题。

同态滤波的应用效果在很大程度上还取决于子波和反射系数序列在复赛谱的可分离性,尽管两者在复赛谱中占据不同的区域,但要设计一个线性滤波器使二者完全分离,经过长期的实验几乎是不可能的。因此后来又发展了对数谱平均法、随机窗法等。目的之一是压制噪声的影响,另外也是为了在复赛谱中压制反射系数序列,增强子波的可分离性。但是这种做法很难消除噪声和反射系数序列对子波相位谱的影响。Ziolkowski 和 Slob(1991年)在研究了多项式分解进行反褶积后指出,不利用地下反射响应的统计性假设,就不可能从地震反射序列中提取震源子波,Lichman(1995年)^[1]从波场的传播方程出发,利用“光滑度”的概念指出:在复赛谱域子波的相位与反射系数的相位不可能是完全可分的。

虽然子波的相位谱很难得到,但我们能较准确和方便地获得子波的振幅谱,多道统计自相关是最

^{*} 本成果受“973”国家重点基础研究发展规划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(2002CB11700)资助。

作者简介:李国发,1966年生,高级工程师,博士后;1987年毕业于长春地质学院物探专业,一直从事地震勘探方法研究工作,已发表学术论文十多篇。地址:(100083)北京市海淀区学院路中国矿业大学计算中心。电话:(010)62331305。E-mail:liguofa238@sohu.com

常用的方法之一。Rosa (1991年)^[2], 赵波 (1996年)^[3], 李鲲鹏、李衍达 (2001年)^[4] 分别提出和改进了利用谱模拟技术估计地震子波振幅谱的方法。在实际应用中均取得了较好的效果。所以我们的工作是在已知振幅谱的情况下如何在复赛谱中分解出子波的最大、最小相位分量。

设子波 $w(t)$ 的最大、最小分量为 $u(t)$ 、 $v(t)$;

$$w(t) = u(t) \cdot v(t) \quad (4)$$

在富氏域表示为:

$$|w(\omega)| \exp(i\phi_w(\omega)) = |u(\omega)| \exp(i\phi_u(\omega)) + |v(\omega)| \exp(i\phi_v(\omega)) \quad (5)$$

对数谱表示为:

$$\ln |w(\omega)| + i\phi_w(\omega) = \ln |u(\omega)| + i\phi_u(\omega) + \ln |v(\omega)| + i\phi_v(\omega) \quad (6)$$

为消除相位谱,有

$$2\ln |w(\omega)| = \ln |u(\omega)| + i\phi_u(\omega) + \ln |u(\omega)| - i\phi_u(\omega) + \ln |v(\omega)| + i\phi_v(\omega) + \ln |v(\omega)| - i\phi_v(\omega) \quad (7)$$

在复赛谱表示为:

$$2\tilde{w}_0(t) = \tilde{u}(t) + \tilde{v}(t) + \tilde{u}(-t) + \tilde{v}(-t) \quad (8)$$

其中 $\tilde{w}_0(t)$ 是振幅谱的复赛谱, 对称出现在复赛谱的正、负轴上, $\tilde{u}(-t)$ 是子波的最小相位分量 $u(t)$ 所对应的最大相位函数的复赛谱, $\tilde{v}(-t)$ 是子波最大相位分量 $v(t)$ 所对应的最小相位函数的复赛谱, $\tilde{u}(t)$ 、 $\tilde{v}(t)$ 分别出现在复赛谱的正轴和负轴上, 相应地 $\tilde{u}(-t)$ 、 $\tilde{v}(-t)$ 分别出现在复赛谱的负轴和正轴上。利用式(8), 在复赛谱上确定出子波的最小相位分量, 相应地也就确定了子波的最大相位分量。通过扫描可以确定一组具有相同振幅谱但相位谱不同的子波集合。

二、子波确定

有了相同振幅谱不同相位谱的子波集合, 下面的工作是如何确定正确的震源子波。假设利用第 k 个子波所确定的反褶积滤波器对地震记录做反褶积的输出为 $y_k(t)$, 通常的准则是选取使下式最大的子波为希望子波。

$$e[y_k(t)] = E[y_k^4(t)] - 3E^2(y_k^2(t)) \quad (9)$$

式(9)是样本无穷多的条件下的理论值, 在实际情况下不可能有无穷多的样本, 常使用估计值代替, 故变为:

$$e[y_k(i)] = \frac{1}{M} \left[\sum_{i=1}^M y_k^4(i) - 3 \left(\sum_{i=1}^M y_k^2(i) \right)^2 \right]$$

式(10)整理后等价于使下式最大: (10)

$$\tilde{e}(y_k(i)) = \sum_{i=1}^M y_k^4(i) / \left(\sum_{i=0}^M y_k^2(i) \right)^2 \quad (11)$$

式(11)实际上就是方差模准则, 其物理意义是非高斯序列概率密度分布函数的峰值, 其值越大, 概率密度分布越尖锐。对地震反射序列来讲, 就是要求反射系数序列稀疏。目前这种准则的缺陷在实际应用中逐渐暴露出来, 其最大的缺陷是突出强反射压制弱反射^[5]。针对这个问题人们提出了一些修正方案, 但并没有从本质上解决问题。由于不同的地区、不同的地下构造组合有着不同的反射序列特征, 因而真实子波与最佳方差模的对应关系也应当是变化的。利用方差模最大准则估计的子波只能是对真实子波的一种数学猜测, 不一定是真实的地震子波。由于目前还没有更好的判别准则, 式(11)的准则仍然是人们进行子波提取普遍采用的准则之一。

针对这个问题, 我们在应用式(11)方差模最大准则的基础上, 利用交互技术对提取的子波、反褶积的结果, 方差模的变换进行动态的实时交互显示, 结合地质认识、测井资料和地震记录初至波形特征等确定出适合不同地区的最佳方差模和地震子波的对应关系。

三、效果分析

为了验证方法的正确性和有效性, 我们进行了数值模拟和数值实验。图1-a是模拟的白噪声反射序列的局部显示, 图1-c是输入的混合相位地震子

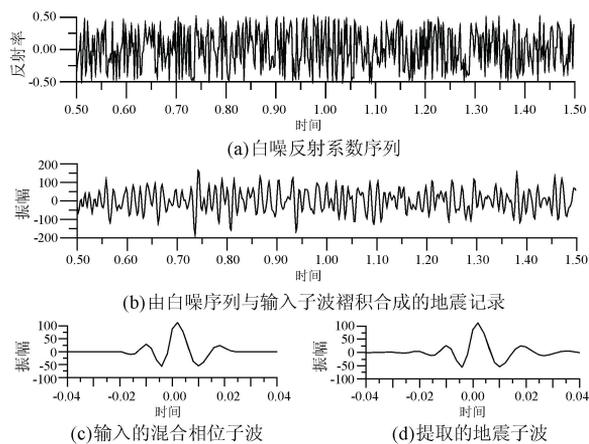


图1 合成数据子波提取效果对比

波, 图1-b是图1-c输入子波与图1-a白噪声反射序列褶积形成的合成地震记录。图1-d是利用本文的方法提取的混合相位子波, 对比图1-c输入的子波与图1-d提取的子波, 可以看出两者是十分接

近的。

图2是利用提取的子波进行混合相位子波反褶积前后迭加效果对比,可以看出,混合相位子波压缩后,剖面的分辨率得到了较大的提高。地震剖面上的构造细节和地质现象更加清晰。

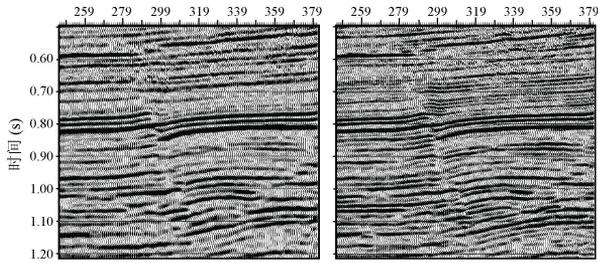


图2 利用提取的子波进行子波反褶积前(左)、后(右)迭加效果对比

四、结 论

笔者在对以往的子波提取方法进行了较深入分析的基础上,提出了一种新的在复数谱域进行子波提取的方法,并编制了相应的混合相位子波交互提

取软件,通过对数学模型、物理模型和实际资料的处理,表明了该方法的有效性、先进性和实用性。

本方法在研究过程中得到了胜利油田物探研究院王延光、东方地球物理勘探公司海上勘探事业部王长春等大力协助和支持,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Lichman E. Phase inversion deconvolution for long and short period multiples attenuation. *Geophysical Prospecting*, 1995; 43: 469—486
- 2 Rosa A L, Ulrych T J. Processing via spectral modeling. *Geophysics*, 1991; 56: 1244—1250
- 3 赵波, 俞寿朋. 谱模拟反褶积方法及其应用. *石油地球物理勘探*, 1996; 30: 102~116
- 4 李鲲鹏, 李衍达. 基于谱模拟技术的混合相位地震子波估计方法. *石油物探*, 2001; 40(2): 21~28
- 5 郭向宇, 周兴元. 混合相位子波的相位估算及校正. *石油地球物理勘探*, 1998; 33: 214~221

(收稿日期 2004-10-18 编辑 韩晓渝)