

· 处理技术 ·

一种实现谱模拟反褶积的新途径

唐博文* 赵波 吴艳辉 李合群

(东方地球物理公司物探技术研究中心, 河北涿州 072750)

唐博文, 赵波, 吴艳辉, 李合群. 一种实现谱模拟反褶积的新途径. 石油地球物理勘探, 2010, 45(增刊1): 66~70

摘要 与常规反褶积相比, 谱模拟反褶积对反射系数序列为非白噪化的情况有更好的适应性, 在压缩剩余子波提高分辨率的处理中具有较好的效果。然而该方法也存在局限性: ①拟合所用的多项式限制了子波振幅谱的形态; ②多项式拟合的求解较复杂, 且稳定性差; ③未考虑反射系数的颜色特征, 反褶积的结果看不到反射系数振幅谱偏蓝的特点。为了弥补这些不足, 本文提出一种实现谱模拟反褶积的新途径: ①不使用多项式拟合, 把地震记录振幅谱作为一个实数序列, 并使用滤波器来平滑这个振荡的序列从而提取出子波振幅谱; ②考虑反射系数序列的颜色特征, 在模拟子波振幅谱之前, 先压制反射系数序列颜色的影响。理论实验及实际数据处理结果表明: 该方法简单易实现, 能够更为准确地估算出子波振幅谱, 从而得到更好的反褶积结果。

关键词 谱模拟 反褶积 子波 反射系数 白噪 振幅谱

1 引言

在忽略噪声的情况下, 根据 Robinson 褶积模型, 地震记录 $x(t)$ 为地震子波 $w(t)$ 与反射系数序列 $r(t)$ 的褶积, 即

$$x(t) = w(t) * r(t) \quad (1)$$

对于常规反褶积方法, 通常假设反射系数是随机序列。在此假设下, 根据褶积模型公式(1)推导出地震记录的自相关, 可以近似为子波的自相关, 即可得到子波的振幅谱, 求取零相位或最小相位的子波做反褶积。

然而, 大量实际测井数据表明反射系数序列不是随机的, 其振幅谱不是白色的, 这表现在两个方面: 第一, 反射系数的振幅谱总体是偏蓝色的, 即振幅随频率增高而逐渐增强; 第二, 其振幅谱沿频率方向有强弱的变化^[1,2]。基于白噪反射系数序列假设的反褶积方法, 在实际数据处理中会引入较大的误差——处理得到的反射系数的振幅谱通常在最小平方意义上向白色方向靠近, 沿频率方向的强弱变化也变得不明显, 结果使反射系数发生畸变。

Rosa 等及其他人相继提出了多种谱模拟反褶

积方法^[1,3]。谱模拟反褶积方法中假设子波振幅谱是光滑的, 可用多项式最小平方拟合地震记录的振幅谱, 并从中提取子波振幅谱, 然后拓宽子波振幅谱的频带, 达到提高分辨率的目的。与常规反褶积相比, 该方法没有预先假设反射系数序列振幅谱的形态, 而是从估算子波振幅谱出发做反褶积。其优势在于不改变反射系数序列振幅谱局部的强弱关系, 对反射系数序列非白噪的情况有更好的包容性。下式即为 Rosa 采用的光滑子波振幅谱的函数形式

$$F(f) = |f|^k e^{H(f)} \quad (2)$$

其中: f 为频率; k 为常数, 一般小于 3; $H(f)$ 为 f 的多项式。据此构造一个 n 阶的多项式, 在最小平方意义下使 F 逼近地震记录振幅谱, 求得 k 及多项式的系数, 得到子波振幅谱的估计值。

式(2)描述的子波振幅谱, 实际上是类似于雷克子波谱的单峰光滑曲线^[3]。因而 Rosa 的谱模拟方法事实上对子波振幅谱的形态有明确的限定。

谱模拟反褶积对压缩剩余子波的实际处理效果较好, 特别是在提高叠后分辨率的数据处理中效果更明显。然而, 利用多项式拟合的谱模拟反褶积方法也存在不足: ①预设的多项式限制了子波振幅谱

* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心, 072750
本文于 2010 年 5 月 25 日收到, 修改稿于同年 8 月 26 日收到。

的形态;②其求解比较复杂,稳定性易受数据体的干扰(多项式的阶数低,拟合误差大,阶数高,计算速度就低且容易溢出),拟合曲线高低频两端的误差较大;③虽然对反射系数序列非白噪的情况有更好的适应性,但结果仍不能得到反射系数振幅谱偏蓝的特征(对这个问题谱模拟方法只是做了回避,而不是根本性的解决)。

针对传统谱模拟反褶积方法存在的局限,本文提出一种实现谱模拟反褶积的新途径:首先不用多项式拟合,而是在子波振幅谱光滑的假设条件下,采用高低频分离的方法估算子波振幅谱;其次考虑反射系数序列振幅谱的颜色特征,先压制其影响,然后再估算子波振幅谱。

2 实现谱模拟反褶积的新途径

2.1 一种模拟子波振幅谱的新方法

本方法仍是基于谱模拟的假设:子波振幅谱是光滑的,或者说子波振幅谱比反射系数序列振幅谱光滑很多。在这个假设的基础上,我们把地震记录的振幅谱作为一个实数序列来分析,从频率的角度利用滤波器估算子波振幅谱。

对于忽略噪声的地震记录褶积模型,时间域的褶积相当于频率域的相乘,我们只考虑各自的振幅谱,于是有

$$A_x(\omega) = A_w(\omega)A_r(\omega) \quad (3)$$

式中 A_x 、 A_w 、 A_r 分别为地震记录、地震子波及反射系数的振幅谱,即地震记录的振幅谱等于地震子波振幅谱与反射系数序列振幅谱的乘积。对式(3)两边做傅里叶变换,并将 $A_x(\omega)$ 的傅里叶变换简写为 $A_x^{(2)}(\omega)$,于是有

$$A_x^{(2)}(\omega) = A_w^{(2)}(\omega) * A_r^{(2)}(\omega) \quad (4)$$

因式(4)中 $A_x^{(2)}(\omega)$ 、 $A_w^{(2)}(\omega)$ 及 $A_r^{(2)}(\omega)$ 分别为各自的振幅谱,为实数对称序列,故其傅里叶正、反变换的虚部和相位都为零,结果相同。如果视为对其作为傅里叶反变换,式(4)为零相位化后的地震记录、子波、反射系数序列在时间域的关系式。

值得注意的是,我们的目的是提取子波振幅谱而不是时间域的子波,因此将其视为傅里叶正变换并取模,并将这种振幅谱的振幅谱简称为二次谱,则有以下关系:地震记录的二次谱为子波二次谱与反

射系数序列二次谱的褶积。从频率域考虑的优点在于便于分析反射系数序列非白化的影响。

根据谱模拟反褶积的假设,地震子波的振幅谱是光滑的,或者说它总是比反射系数序列的振幅谱光滑。因此地震子波与反射系数序列的振幅谱在频率域必然是可分的。在这种频率分析的角度下,地震记录二次谱 $A_x^{(2)}(\omega)$ 的低频部分反映的是光滑的子波振幅谱 $A_w(\omega)$ 的能量;而高频成分则是剧烈振荡的反射系数序列振幅谱 $A_r(\omega)$ 的能量。因此对地震记录的二次谱,只需要设计一个低通滤波器,就可以将二者分离。低通滤波器能够剔除信号中的短期波动(反射系数振幅谱的剧烈振荡),保留长期趋势(光滑的子波谱),是信号平滑的一种手段。与其他平滑方式如移动平均相比,低通滤波器不会泄漏高频信号。下面我们分析一下这个滤波器的设计。

根据式(4),在反射系数序列白噪化的情况下,可以得到

$$A_x^{(2)}(\omega) \approx A_w^{(2)}(\omega) \quad (5)$$

从时间域考虑,式(5)说明的是去相位的地震记录可以直接视为地震子波,这也是常规反褶积用地震记录自相关替代子波自相关的理论基础。因此, $A_w^{(2)}(\omega)$ 的长度即是地震子波有效延展长度的一半(地震子波零相位化后为实对称序列,故只有原来长度一半)。所以,对于前面提到的低通滤波器,我们可以根据估计的地震子波长度来确定截频的范围。

对于反射系数序列振幅谱非白噪化的情况,低通滤波器的设计也要参考地震子波长度估计值。此时,给低通滤波器加上斜坡能一定程度地压制反射系数序列振幅谱的干扰;同时,适当地设定低截频,损失一部分有效的地震子波振幅谱信息,即可将二者分离。在这种情况下,采用多项式拟合模拟子波振幅谱也仅仅是取得真实子波振幅谱的主要部分。在这一点上,本方法与多项式拟合方法类似。

图 1 是利用已知子波与随机反射系数序列生成的合成记录频谱及用本方法计算的已知子波的二次谱与合成记录的二次谱。可以看出,在反射系数为白噪的情况下,在子波有效延展长度一半的时间范围内,合成记录与已知子波的二次谱是完全一致的,利用滤波器完全可以将子波振幅谱从合成记录振幅谱中分离。

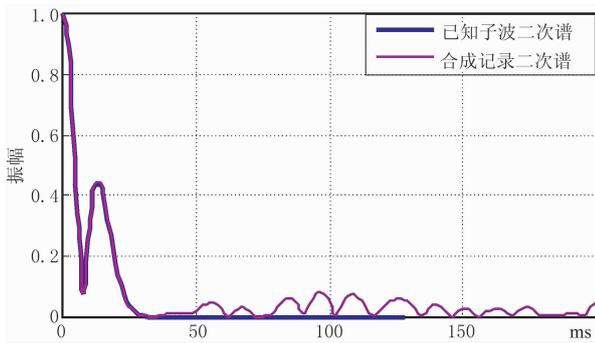


图 1 已知子波与合成记录的二次谱
合成记录为已知子波与随机反射系数序列褶积生成，
已知子波的主频为 30Hz，有效延展长度为 64ms

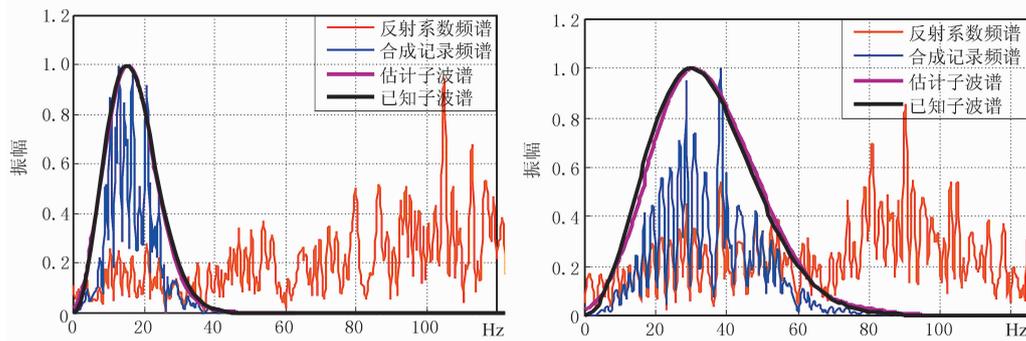


图 2 两个估算子波振幅谱的实例

图 2 左、右两图中的曲线含义如图例所示，左右两图中生成合成记录的反射系数、已知子波皆不同，反射系数由不同的测井信息计算所得。左图已知子波的主频为 15Hz，右图已知子波主频为 30Hz。估计子波谱由文中所述的低通滤波方法估计所得

其非白特征给谱模拟带来的影响有限(图 2)；最大的干扰来自于反射系数序列振幅谱的蓝色。这种干扰随着子波带宽的增加以及反射系数颜色成分的增强而增强。

图 2 右图的模拟结果与左图相比误差增大，就是因为反射系数振幅谱的蓝色更为明显，同时子波带宽增加(右图子波的主频是 30Hz，而左图仅为 15Hz)。利用低通滤波器，可以一定程度上削弱蓝色的影响；如果蓝色明显，就不能既完全压制反射系数振幅谱的影响，又不损失有效子波振幅谱的能量。

现在研究用一个白噪声序列 $R_{白}$ 和一个非白噪声序列 $R_{非白}$ 的褶积来表示反射系数序列^[4]，并假定 X 为频率域的地震记录， W 为频率域的地震子波， R 为频率域的白噪声记录， $|\cdot|$ 表示相应振幅谱，则根据式(3)，有

$$|X| = |W| \times |R_{非白}| \times |R_{白}| \quad (6)$$

而反射系数序列的蓝色是一种低频的趋势，地震子波振幅谱也是低频的，二者必然叠合在一起而不可分。在这种情况下，可利用多项式拟合算法的统计

图 2 是估算子波振幅谱的两个实例，采用了从真实的测井信息得到的反射系数序列，可以看出它们都不是白噪声，本方法提取的子波振幅谱与已知子波振幅谱形态仍能基本一致。注意图 2 中两个实例的子波带宽不同。与左图相比，图 2 右图本方法提取子波振幅谱与已知子波振幅谱误差增大，是因为右图中反射系数序列的蓝色在子波带宽范围内表现更为明显。下一节将讨论如何解决这个问题。

2.2 压制反射系数序列振幅谱颜色的影响

理论和实验证明，如果反射系数序列振幅谱沿频率方向的强弱变化在有效频带范围内比较均衡，

性来弱化反射系数序列蓝色的影响，但只能得到部分真实子波振幅谱，且高、低频两端的误差增大。或者选择对蓝色不做处理，让拟合结果向高频移动，最终的反褶积结果也会弱化高频信息。图 3 是一个明显蓝色的真实反射系数序列合成记录频谱及用本文方法估计出的子波振幅谱实例。可以看出在这种情况下，未压制反射系数序列蓝色影响所提取到的地震子波振幅谱实际是公式(6)中的 $|W| \times |R_{非白}|$ ，因而明显向高频移动。

为此，我们提出一种新的解决方法，即在提取子波振幅谱之前，先压制地震记录振幅谱颜色的影响，然后再做子波提取。

反射系数序列功率谱的形状通常可以用 f^β ($0.5 < \beta < 1.5$) 恰当地表示^[5]，即在某一频率之后功率谱才变成真正平坦。Walden 等给出了一个简单的参数化方法，并证明了一阶的自回归—移动平均模型(即一阶 ARMA 模型)可以较好地拟合一次反射波序列^[3]。描述非白噪特性的 AR 参数 ϕ 和 MA 参数 θ 可以用标准的技术估计。由于应用了最

小延迟表示, $|\phi|$ 和 $|\theta|$ 的估值都小于 1^[5]。根据一阶 ARMA 模型, 可以推导出反射系数序列的非白噪声部分 $R_{\text{非白}}$ 为

$$R_{\text{非白}} = (1, -\theta) * (1, -\phi)^{-1} \quad (7)$$

根据式(7)计算出反射系数序列非白噪声部分的振幅谱 $|R_{\text{非白}}|$, 将其代入式(6)两端, 可推导出

$$|X| \times |R_{\text{非白}}|^{-1} = |W| \quad (8)$$

根据式(8)先压制反射系数序列非白噪声部分对地震记录振幅谱的影响, 然后再按前面的步骤估算子波振幅谱。如图 3 中右图所示, 压制反射系数序

列振幅谱的蓝色影响后, 提取的地震子波振幅谱跟原始子波振幅谱相比基本一致, 明显优于先前未压制蓝色影响的估计结果。

Walden 等已经证明, 根据地区已知的测井信息, 可以估算出反射系数序列的 ARMA 参数; 利用这个估算值对地震数据做蓝色滤波, 其结果总是比什么也不做要好^[4]。从前面图 2 的结果(图 2 中估计的子波振幅谱实际上也向高频移动)可以看出, 去蓝色化后提取出的子波振幅谱, 总是比不去蓝色的结果更准确。图 3 中所用的 ARMA 参数, 即是一个粗略的估计值。

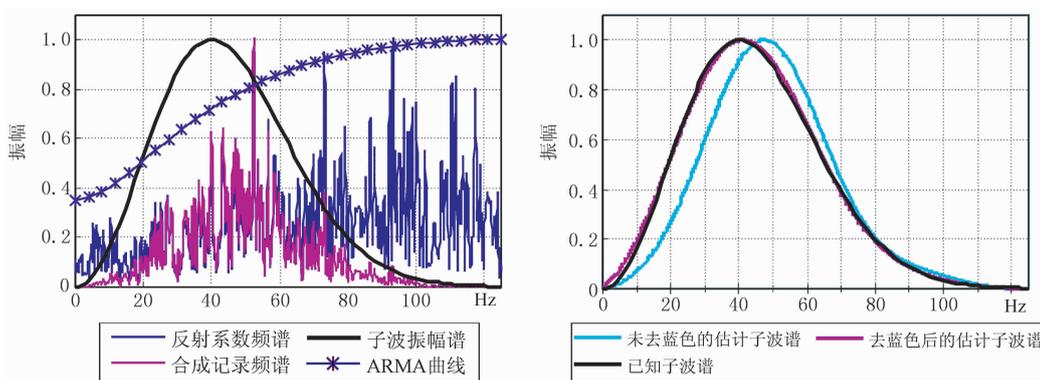


图 3 具有明显蓝色反射系数序列的合成记录估计子波振幅谱实例

左图为反射系数序列、已知子波、合成记录的振幅谱, 以及 ARMA 模型频谱曲线; 右图为已知子波振幅谱与两个估计子波振幅谱(未压制蓝色和压制蓝色后的)的对比; 压制蓝色时使用 ARMA 参数如左图所示, 为 $(-0.25, -0.65)$, 已知子波主频为 40Hz。

3 应用实例

图 4 是使用本文方法对中国西部 A 地区实际数据的处理结果, 其中图 4a 为反褶积前原始剖面, 图 4b 和图 4c 分别为传统谱模拟反褶积结果(多项式拟合估计子波谱)、本文所述新方法的谱模拟反褶积结果。从处理结果可以明显看出, 谱模拟反褶积后, 剩余子波得到有效压缩, 剖面的分辨率明显提高。

本文所述新方法的处理结果(图 4c)与原有的谱模拟反褶积结果(图 4b)相比可以看出: 新方法处理结果剩余子波的压缩更好, 分辨率更高, 而信噪比没有明显降低。值得注意的是, 在低频分量变化较小的情况下, 剖面的高频分量得到有效增强, 高频的同相轴增多、能量增加, 而且从整体上看同相轴的横向连续性变得更好。

通常实际资料的反射系数序列都具有偏蓝的特征, 在剖面上表现为厚层少, 薄层多。本文所述方法

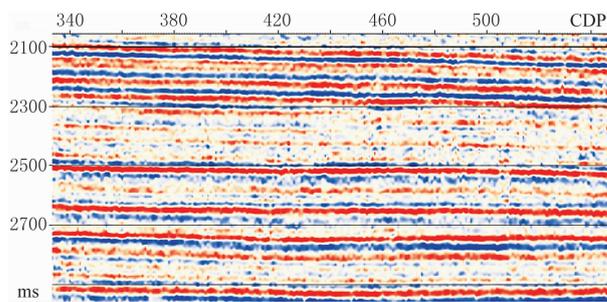


图 4a 原始剖面

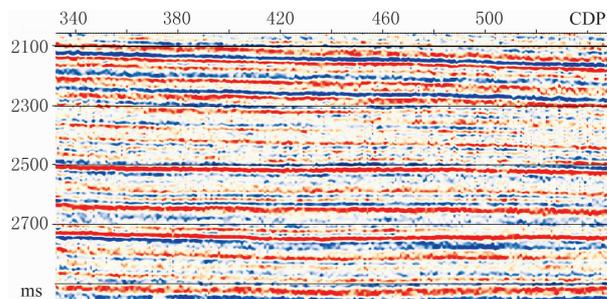


图 4b 传统谱模拟反褶积方法处理后剖面

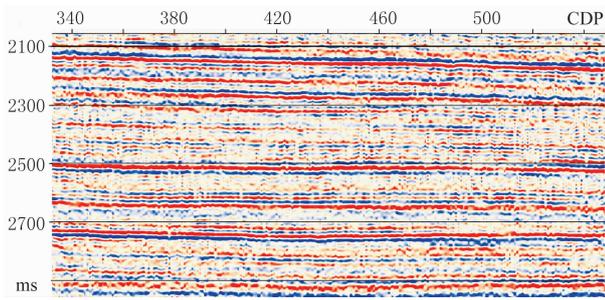


图 4c 本文所述新方法谱模拟反褶积后剖面

的处理结果与原有谱模拟反褶积方法的结果相比,明显更接近这个实际情况。处理剖面的整体质量得到进一步提升,这主要得益于前面所述的两项技术使估计的子波振幅谱与原方法相比更为准确。

4 结束语

本文所述的实现谱模拟反褶积的新途径仍是基于谱模拟的假设,即地震子波的振幅谱是光滑的。因此根据褶积模型从理论上可以构造出低通滤波器,可以将子波振幅谱与反射系数序列的振幅谱分离。该低通滤波器的设计具有明确的物理意义,它的截止频率与地震子波的长度严格相关。在考虑反射系数序列颜色特征的情况下,先进行其振幅谱的颜色压制,再做子波振幅谱估计,能够得到更为准确

的子波振幅谱,从而使反褶积的结果能更真实反映反射系数序列频谱的特征。

本方法与传统的多项式拟合谱模拟方法相比,不需要对子波振幅谱形态做预先的假设限定;算法简单、稳定性好、计算成本低,且具有严格的理论基础;引入 ARMA 参数压制反射系数序列的颜色影响后,提取的子波振幅谱更准确,反褶积的效果将更逼近真实形态。因为本文方法涉及的参数较少并且都具有明确的物理意义,因此实际操作中的可控性强。理论实验和实际数据处理结果都验证了本文方法的正确性和实用性。

参考文献

- [1] Rosa A L R, Ulrych T J. Processing via spectral modeling. *Geophysics*, 1991, 56(8):1244~1251
- [2] 赵波,俞寿朋等. 谱模拟反褶积方法及其应用. *石油地球物理勘探*, 1996, 31(1):101~116
- [3] Walden A T, Hosken J W J. An investigation of the spectral properties of primary reflection coefficients. *Geophysical Prospecting*, 1985, 33(3):400~435
- [4] Walden A T, Nunn K R. Correcting for coloured primary reflectivity in deconvolution. *Geophysical Prospecting*, 1988, 36(3):282~297
- [5] Keshner M S. $1/f$ noise. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(3): 212~218

(本文编辑:金文昱)