

文章编号: 1671-8585(2009)05-0330-04

基于高阶累积量拟合及混合蚁群算法的地震子波估计

王 荐¹, 朱仕军¹, 文中平², 赵振伟², 刘二军³, 吴华明⁴

(1. 西南石油大学资源与环境学院, 四川成都 610500; 2. 川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司, 四川成都 610213; 3. 东方地球物理勘探公司装备事业部, 河北涿州 072750; 4. 西部钻探吐哈录井工程公司一分公司, 新疆鄯善 838202)

摘要:假设地层反射系数是平稳非高斯独立同分布的序列, 利用地震道褶积模型的高阶累积量构造目标函数, 通过优化算法来进行地震子波提取。针对该方法的非线性优化问题, 利用遗传算法的快速性、随机性、全局收敛性, 再结合蚁群算法的并行性、正反馈机制以及求解效率高特性, 来提高求解效率。通过对合成地震记录进行子波估计的理论模型试验, 结果表明, 该方法对高斯有色噪声有很好的压制效果, 且能保留地震记录的相位信息, 使子波提取具有较高的精度。将该方法运用于实际地震资料处理, 利用估计出的较精确的地震子波来进行反褶积, 能有效地拓宽地震剖面的频谱, 使其信噪比和分辨率都有所提高。理论模型分析与实例计算验证了该方法的可行性。

关键词: 地震子波提取; 高阶累积量; 遗传算法; 蚁群算法

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

地震子波提取是地震勘探中一个非常关键的步骤, 精确估计地震子波是提高地震资料分辨率的重要保证。在过去常规的地震资料处理中, 子波反褶积都是通过二阶统计量——自相关来进行的。利用自相关估计地震子波时, 往往假设地震子波为最小相位, 实际上地震子波是混合相位的^[1]。另外, 自相关法只有在高斯白噪声下才能得到相对可靠的结果, 而实际地震记录中的噪声大多是满足高斯分布的有限带宽有色噪声, 因此基于二阶统计量的自相关方法估计的地震子波是不准确的。随着高阶统计量在地震勘探方面的应用, 利用地震信号高阶统计量包含的相位、幅值信息以及其超强的抗干扰能力, 使地震子波估计的准确性得以提高^[2]。

1 高阶累积量拟合方法

地震记录 $x(t)$ 可以看成是地震子波 $w(t)$ 与反射系数序列 $r(t)$ 褶积, 并加上一个噪声 $n(t)$ 的结果, 即

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

当噪声满足高斯分布, 反射系数序列约束趋于稳定的、非高斯和统计独立的随机过程时, 我们就可以利用一些高阶累积量和高阶协方差函数的特殊性质, 从地震记录中求取实际的地震子波。首先对式(1)求四阶累积量, 应用 BBR 公式^[3]得:

$$C_{4x}(t_1, t_2, t_3) = C_{4r}(t_1, t_2, t_3) * M_{4w}(t_1, t_2, t_3) + C_{4n}(t_1, t_2, t_3) \quad (2)$$

其中, C_{4x} 为地震记录的四阶累积量, 可定义为:

$$C_{4x} = E\{x(t)x(t+t_1)x(t+t_2)x(t+t_3)\} - C_{2x}(t_1)C_{2x}(t_2-t_3) - C_{2x}(t_2)C_{2x}(t_1-t_3) - C_{2x}(t_3)C_{2x}(t_1-t_2) \quad (3)$$

M_{4w} 为地震子波的四阶矩函数, 可定义为:

$$M_{4w} = E\{w(t)w(t+t_1)w(t+t_2)w(t+t_3)\} \quad (4)$$

C_{4n} 为噪声的四阶累积量, 由于噪声满足高斯分布, 则有 C_{4n} 趋于零; C_{4r} 为反射系数序列的四阶累积量, 反射系数序列为非高斯、独立同分布的随机序列, 当数据量趋于无穷时, 有:

$$C_{4r}(t_1, t_2, t_3) = \beta_{4r} \quad (5)$$

则式(2)可写为

$$C_{4x}(t_1, t_2, t_3) = \beta_{4r}M_{4w}(t_1, t_2, t_3) \quad (6)$$

式中, β_{4r} 为反射系数序列峰度, 是一标量常数, 在不影响所求子波形状的情况下可作为系数被 M_{4w} 吸收。由此表明, 地震记录的四阶累积量与地震子波的四阶矩函数之间仅差一个标量因子^[4]。由于高阶累积量关于它们的变元对称, 则在最小平方误差意义下可建立如下目标函数:

$$\Phi = \sum_{t_1=0}^k \sum_{t_2=0}^{t_1} \sum_{t_3=0}^{t_2} [a(t_1, t_2, t_3)C_{4x}(t_1, t_2, t_3) - M_{4w}(t_1, t_2, t_3)]^2 \quad (7)$$

式中: k 为地震子波的长度; $a(t_1, t_2, t_3)$ 为三维

收稿日期: 2009-03-30; 改回日期: 2009-04-09。

第一作者简介: 王荐(1985—), 男, 硕士研究生, 从事地震资料高分辨率处理研究工作。

Parzen 窗函数^[5]。对于给定的地震记录,可以利用式(3)得到其四阶累积量,在解空间任意定义一个子波利用式(4)得到其四阶矩,当目标函数 Φ 收敛到最小时,即可获得一个相应的地震子波参数。可以看出, Φ 是一个非线性、多参数、多极值的目标函数,需要用全局寻优的方法来求解^[6]。

目前有很多非线性全局最优化的算法,如遗传算法、模拟退火和神经网络等。然而对于函数问题优化的复杂性,每种算法都表现出各自的优势和缺陷。利用遗传算法的快速性、随机性和全局收敛性,再结合蚁群算法的并行性、正反馈机制以及求解效率高等特性,可以更有效地找到目标函数的全局最优解。

2 混合蚁群优化算法

蚁群优化算法是近年来诞生的随机优化算法,它是一种源于大自然的仿生类算法,主要是通过蚁群之间的信息传递而达到寻优的目的^[7]。它的原理是一种正反馈机制,通过信息素的不断更新最终收敛到最优路径上,具有本质并行性,而且易与多种算法相结合,以改善算法功能。缺点是初期信息素匮乏,求解速度较慢。因此,丁建立等^[8]提出了一种基于遗传算法(GA)和蚁群算法(AA)的混合算法 GAAA,基本思想是吸取两种算法的优点,克服各自的缺陷,优势互补。该算法是一种时间效率和求解效率都比较好的算法,基本步骤如下。

- 1) 由遗传算法定义适应度函数 f ,随机生成一组种群,对每个染色体进行二进制编码。
- 2) 对各染色体进行杂交、变异后根据适应度来选择染色体,进行递归迭代后生成若干组优化解。
- 3) 根据蚁群算法由优化解生成吸引强度初始

分布,即

$$\tau_s = \tau_c + \tau_G \tag{8}$$

式中: τ_c 是一个根据具体问题给定的吸引强度常数; τ_G 是遗传算法求解结果转换的吸引强度。

- 4) 将 m 只蚂蚁置于各自的初始邻域,每只蚂蚁按概率 P_{ij} 做邻域搜索

$$P_{ij} = \frac{[\tau_j]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_k]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \tag{9}$$

式中: τ_j 为蚂蚁 j 的邻域吸引强度; η_{ij} 定义为 $f_i - f_j$,即为适应度函数差异值; $\alpha, \beta \in [1, 5]$; $k = 1, 2, \dots, m$ 。当 $\eta_{ij} \geq 0$ 时,蚂蚁 i 按照概率 P_{ij} 移至蚂蚁 j 的邻域;当 $\eta_{ij} \leq 0$ 时,蚂蚁 i 做半径 r 的邻域搜索。

- 5) 计算各蚂蚁的适应度函数,记录当前最优解,按更新方程

$$\tau_j(t+1) = \rho \cdot \tau_j(t) + \sum_k \Delta\tau_j \tag{10}$$

$$\Delta\tau_j = Q/L_j \tag{11}$$

修正轨迹强度。式中: $\Delta\tau_j$ 表示第 j 只蚂蚁在本次循环中吸引强度的增加值; $0 < Q < 10000$; L_j 表示本次循环中 $f(X)$ 的变化量,定义为 $L_j = f(X+r) - f(X)$; $0 \leq \rho \leq 1$ 。

- 6) 进行递归迭代,达到预定迭代次数则输出最优解。

3 数值试验结果

对基于高阶累积量拟合方法的地震子波估计,我们运用混合蚁群算法进行了数值模拟试验。合成地震记录由式(1)生成,分别采用零相位的雷克子波(图 1)和混合相位子波(图 2)来进行提取试验,

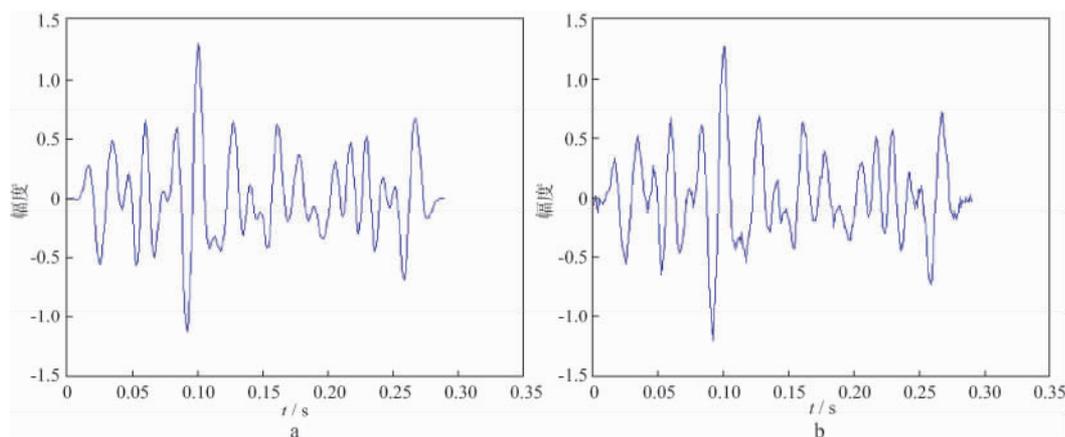


图 1 用零相位雷克子波合成的地震记录
a 未加入噪声的合成地震记录; b 加入 10% 的噪声后的合成地震记录

采样间隔 2 ms, 中心频率为 25 Hz, 采样点数 41; 反射系数采样间隔为 2 ms, 251 个采样点; 加入 10% (噪声与信号的能量比) 的零均值高斯有色噪声。对该合成地震记录应用以上提出的地震子波

估计方法, 估计出的地震子波如图 3 所示。

可见, 该地震子波估计方法不需要假设子波为最小相位, 且对高斯有色噪声有良好的压制作用, 可以用于进一步对实际的地震子波进行估计。

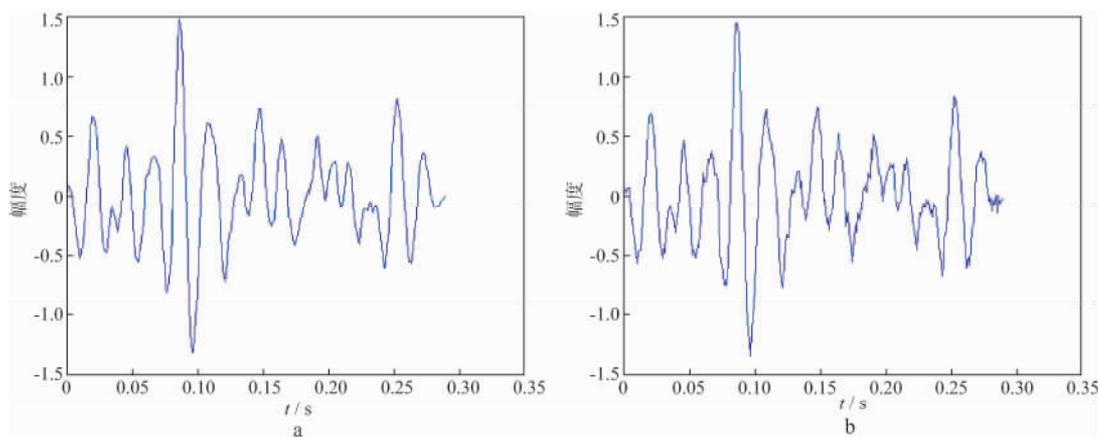


图 2 用混合相位子波合成的地震记录

a 未加入噪声的合成地震记录; b 加入 10% 的噪声后的合成地震记录

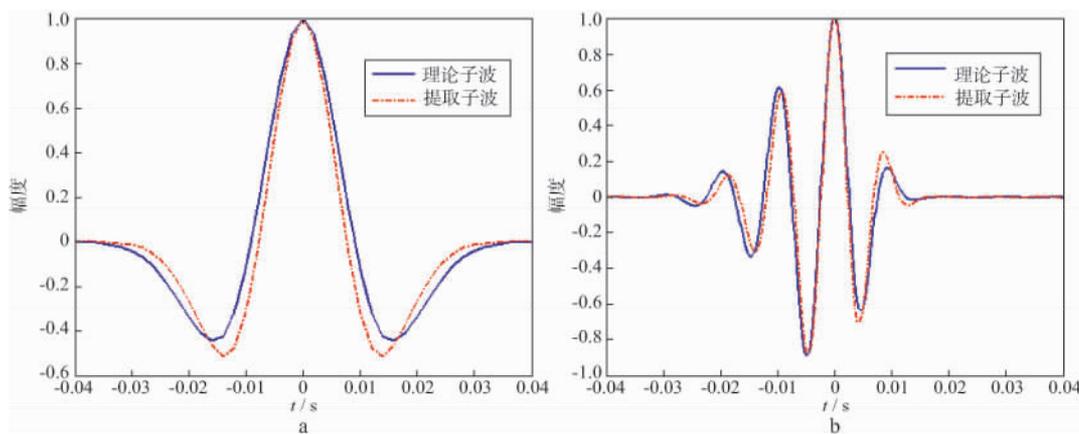


图 3 从合成地震记录中提取的地震子波同理论子波的比较

a 提取的零相位雷克子波; b 提取的混合相位子波

4 实际资料处理

要验证上述地震子波估计方法的实用性, 就必须对实际地震资料进行处理。在实际资料处理中, 先运用本文提出的方法从地震记录中估计出地震子波(图 4)并计算反褶积算子, 做子波反褶积处理, 消除由于激发、接收条件的不同而引起的地震子波不一致性, 从而达到压缩子波, 提高地震资料分辨率的效果。再作预测反褶积, 进一步压制噪声和压缩子波, 适当拓宽频谱, 进一步提高资料的分辨率。图 5a 是某工区一测线反褶积前的剖面, 图 5b 是用本文提出的方法估计出的地震子波进行反褶积处理后的剖面。由图可见, 处理后的剖面无论

是信噪比还是分辨率都比处理前的剖面有所提高, 并且剖面的频谱也有所拓宽(图 5c)。

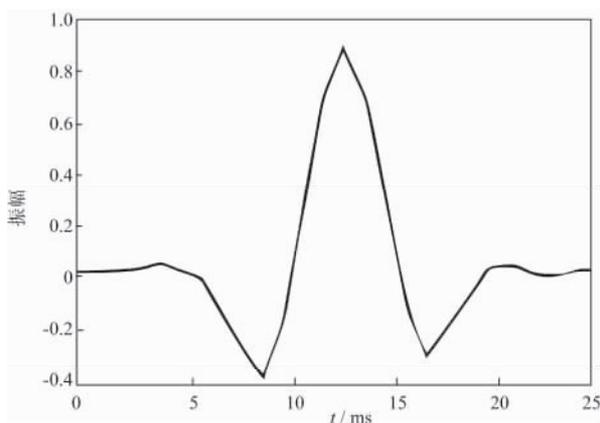


图 4 用本文方法从实际资料提取的子波

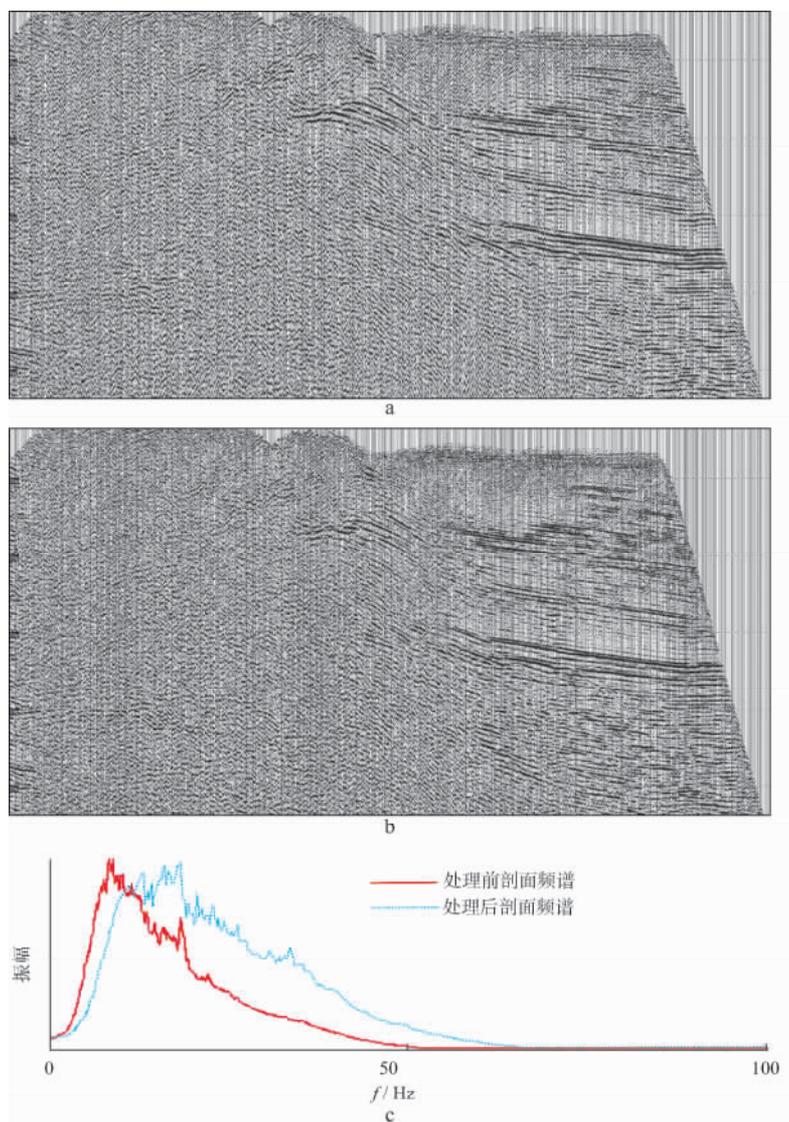


图5 实际资料处理

a 进行反褶积处理前的剖面；b 用本文提出的方法进行反褶积处理后的剖面；c 用本文提出的方法进行反褶积处理前后剖面的频谱对比

5 结束语

地震子波估计作为地震资料反褶积处理的基础,对高分辨率、高信噪比的地震资料处理有重要的意义。我们从常规的地震子波估计存在的问题入手,深入研究了高阶累积量的优势,提出了采用四阶累积量拟合方法进行地震子波提取的方法。针对方法中的非线性优化问题,采用融合了遗传算法和蚁群算法各自优点的混合蚁群算法。数值试验和实际资料处理证明,该方法能够得到较为精确的子波估计结果,并且可以提高地震资料分辨率。

参考文献

- 1 石殿祥,李岩. 基于高阶累积量的非最小相位地震子波提取[J]. 石油地球物理勘探,1999,34(5):491~499
- 2 李大卫. 基于高阶统计的混合相位子波估计及其处理[J]. 勘探地球物理进展,2005,28(2):117~121
- 3 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法[M]. 北京:清华大学出版社,1996. 501
- 4 Lazear G D. Mixed-phase wavelet estimation using fourth-order cumulants[J]. Geophysics, 1993, 58(7): 1 042~1 051
- 5 Velis D R, Ulrych T J. Simulated annealing wavelet estimation via fourth-order cumulant matching[J]. Geophysics, 1996, 61(6): 1 939~1 948
- 6 尹成,周翼,谢桂生,等. 基于综合的混沌优化算法估计地震子波[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(2): 97~100
- 7 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005. 447
- 8 丁建立,陈增强,袁著址. 遗传算法与蚂蚁算法的融合[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(10): 1 240~1 245