

改进的统计子波反褶积

苏贵士* 周兴元

(石油地球物理勘探局研究院处理中心)

摘 要

苏贵士, 周兴元. 改进的统计子波反褶积. 石油地球物理勘探, 1997, 32(3): 399~403

通常, 地震子波的小相位性、反射系数的白噪声以及理想的期望子波是地震资料反褶积处理需要考虑的三个主要因素。当地震子波为非最小相位时, 可利用指数加权方法使之小相位化; 对于反射系数非白噪声问题, 本文提出利用对数功率谱来估算地震子波的自相关函数进而求取地震子波以及反褶积算子的方法; 对于理想的期望子波, 本文采用“宽带雷克子波”作为期望输出子波。实际资料的处理结果表明, 该方法是提高地震资料分辨率的一种有效的处理方法。

主题词 雷克子波 对数功率谱 最小相位 反射系数 反褶积

ABSTRACT

Su Guishi and Zhou Xingyuan. An ameliorative statistical wavelet deconvolution. OGP, 1997, 32(3): 399~403

Small phase of seismic wavelet, white noise of reflection coefficient, and ideal expected wavelet are three important factors which must be considered in the deconvolution of seismic data. When seismic wavelet is in non-minimum phase, we can make it have smaller phase by doing exponential weighting. As for nonwhite noise problem of reflection coefficient, we may employ logarithmic power spectrum to estimate the autocorrelation function of seismic wavelet, then obtain seismic wavelet and deconvolution operator. In so far as ideal expected wavelet problem, wide-band Ricker wavelet is taken as expected output wavelet in the method. It is shown practically that the method is very effective in raising the resolution of seismic data.

Subject heading: Ricker wavelet, logarithmic power spectrum, minimum phase, reflection coefficient, deconvolution

问题的提出

众所周知, 反褶积是提高地震记录分辨率的一种重要处理手段。目前, 统计子波反褶积越来越受到人们的重视。通常, 统计子波反褶积假设地震子波是最小相位的, 反射系数为白噪声。当这两个假设条件满足时, 处理效果是良好的。然而实际的地震资料往往不能满足这两个条件, 因此需要对统计子波反褶积做进一步的改进。对于地震子波最小相位化问题, 可以通过对

* Su Guishi, Data Processing Center, Geophysical Research Institute, Bureau of Oil Geophysical Prospecting, Zhuozhou City, Hebei Province, 072750
本文于1996年9月9日收到。

地震记录进行指数加权来实现^[1]。对于反射系数非白噪声问题,传统的统计子波反褶积采用共炮点或共检波点地震记录自相关的统计平均,但由此估算出的地震子波仍然不能较好地克服反射系数非白噪声产生的影响。此外,传统的统计子波反褶积,其期望子波要么是带限子波,要么是雷克子波。对于带限子波,其延续时间长,旁瓣波形复杂;而雷克子波,其旁瓣幅值较大。它们都不是冲激函数最好的近似^[7],为此需要寻找一种较为理想的期望子波。

针对反射系数非白噪和理想期望子波如何选取问题,本文提出采用地震记录的对数功率谱来估算地震子波的自相关进而求得地震子波的方法,同时选取宽带雷克子波作为期望子波。

方法原理

由 Robinson 的褶积模型可得

$$x(t) = b(t) * \xi(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为地震记录; $b(t)$ 为地震子波; $\xi(t)$ 为反射系数。在不考虑噪声的情况下,便可经式(1)把地震记录压缩成反射系数序列。此时,期望输出子波为一尖脉冲,从而达到了提高分辨率的目的。

然而,地震子波通常是未知的,而且期望输出子波也常常具有一定的延续时间。在反射系数 $\xi(t)$ 是白噪声,子波 $b(t)$ 是最小相位的前提下,可通过两次 DECON 求得小相位子波 $b(t)$ 。然后将 $b(t)$ 作为输入, $d(t)$ 作为期望输出,应用最小平方原理得到正则方程组,从而求得反褶积算子 $a(\tau)$ 。具体算式为

$$\sum_{\tau=0}^m r_{bb}(\tau-s)a(\tau) = r_{db}(s) \quad (2)$$

其中

$$r_{bb}(\tau-s) = \sum_t b(t-\tau)b(t-s) \quad (3)$$

$$r_{db}(s) = \sum_t d(t)b(t-s) \quad (4)$$

在实际应用中,子波 $b(t)$ 如果不是严格小相位,可利用指数加权方法先求出小相位的地震子波,再进行反指数加权,便得到实际子波的估算结果。除了地震子波小相位化问题之外,还有反射系数白噪声化的问题以及如何选取最佳期望地震子波的问题。下面分述之。

利用多道统计对数功率谱来估算地震子波的自相关

当地震子波未知时,我们需要从地震记录中估算出地震子波。传统的方法是利用地震记录的自相关来作为地震子波的自相关,通过解二次托布里兹方程求得地震子波,此时要求的地震反射系数序列是白噪声。两步法统计子波反褶积通过多道统计共炮点,或共检波点道集的自相关^[1],可提高地震反射系数序列的随机性,但对于反射系数序列非白噪的问题仍然没有得到较好的解决。为此,我们提出利用多道统计对数功率谱来估算地震子波的自相关。具体过程如下。

首先,对式(1)作傅氏变换,得

$$X(\omega) = B(\omega)\Xi(\omega) \quad (5)$$

然后,求其功率谱,即

$$P(\omega) = X(\omega) \overline{X(\omega)} = B(\omega) \overline{B(\omega)} \Xi(\omega) \overline{\Xi(\omega)} \quad (6)$$

如果反射系数为白噪声,则有

$$\Xi(\omega) \overline{\Xi(\omega)} = 1 \quad (7)$$

此时,由式(6)便可得到

$$X(\omega) \overline{X(\omega)} = B(\omega) \overline{B(\omega)} \quad (8)$$

从上式可看出,地震记录的自相关就是地震子波的自相关。

当反射系数为非白噪声时,对功率谱取自然对数便得到对数功率谱,或称为复赛功率谱,即

$$\ln P(\omega) = \ln |X(\omega)|^2 = \ln |B(\omega)|^2 + \ln |\varepsilon(\omega)|^2 \quad (9)$$

上式表明,地震记录的对数功率谱是地震子波对数功率谱和反射系数对数功率谱之和。由于地震子波通常是一个比较光滑、有一稳定视周期、衰减比较快的短时间序列,而反射系数序列则是一个比较长的、很不光滑的脉冲串^[6]。因此地震子波的对数功率谱表现为低频,其时间序列集中在时间轴原点附近;而反射系数序列的对数功率谱则呈高频分布,其时间序列为远离时间轴原点的系列尖脉冲。那么,通过对地震记录的对数功率谱作低通滤波后,由此算出的地震子波的自相关就可以克服反射系数非白噪声的影响。

利用宽带雷克子波作为期望输出子波

为求取较好的反褶积算子,选取合理的期望输出子波是反褶积处理的另一个重要因素。为此,著名地球物理学家俞寿朋先生于 1995 年提出了一种新的子波,称为宽带雷克子波(李庆忠院士称之为“俞氏子波”)。它是由不同宽度的雷克子波合成的,具有主瓣较窄,旁瓣幅值较小,波形简单等特点,而且在同样的主瓣宽度情况下,振幅的峰值频率比较低,因此宽带雷克子波是一种比较理想的期望输出子波。宽带雷克子波的数学表达式为

$$y(t) = \frac{1}{q-p} [qe^{-(\pi qt)^2} - pe^{-(\pi pt)^2}] \quad (10)$$

式中: p 、 q 为频率积分限; t 为时间。

理论试算

为了验证本方法的效果,我们首先产生一个非白噪声的反射系数序列(幅值均为正值的脉

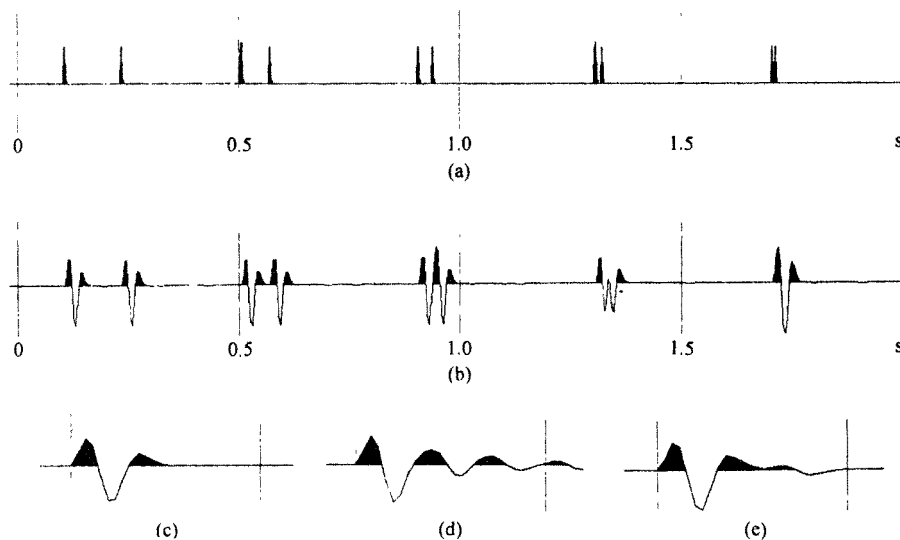


图 1 地震子波的求取试验

(a)反射系数(非白噪声);(b)合成记录;(c)输入的子波;
(d)利用传统的方法求取子波,相似系数为 0.9051;(e)利用对数功率谱求取子波,相似系数为 0.9771

冲串),然后输入最小相位子波,合成理论记录。试算结果是,利用传统方法求得的子波,其相似系数为 0.9051,而利用对数功率谱方法求取的子波,其相似系数为 0.9771(图 1)。图 2 显示的是峰值频率为 34Hz 的雷克子波及其频谱;图 3 为同样峰值频率、积分限在 20~80Hz 的宽带雷克子波及其频谱。图 4a 为利用传统的统计子波反褶积方法求得的结果;图 4b 是以图 3 的宽带雷克子波为期望子波,利用改进的统计子波反褶积方法求得的结果。通过上述的比较发现,利用本方法得到的反褶积结果比传统方法的结果具有更高的分辨率。

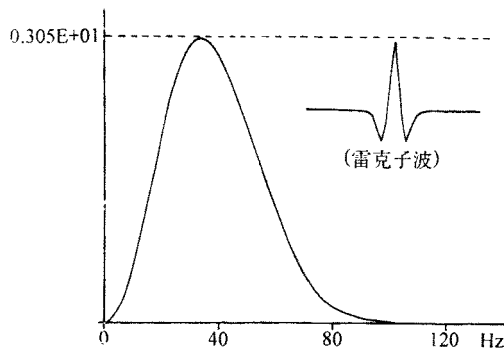


图 2 峰值频率为 34Hz 的雷克子波及其频谱

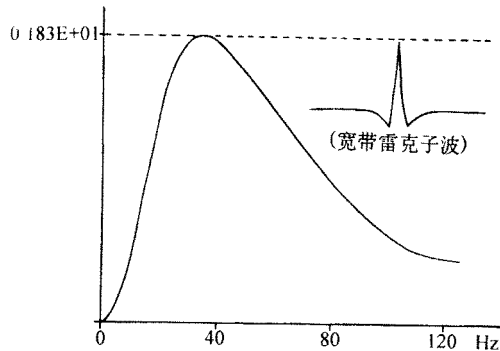


图 3 峰值频率为 34Hz 的宽带雷克子波及其频谱(积分限为 20~80Hz)

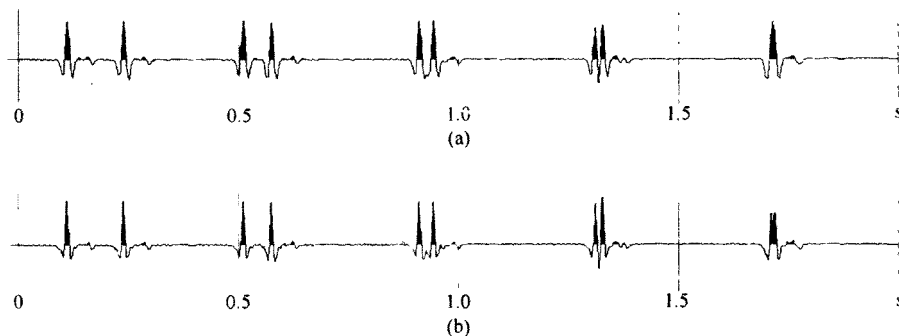


图 4 两种不同方法的理论试算结果对比

(a)传统的统计子波反褶积结果;(b)改进的统计子波反褶积结果

实例分析

我们选用了胜利油田一条测线进行方法试验。图 5a 为利用传统的统计子波反褶积求得的结果;图 5b 为利用本方法进行反褶积得到的结果。通过比较可以看出,本方法反褶积结果的分辨率较高,连续性也比较好。

结束语

反褶积算子的求取是反褶积处理技术的关键步骤。本方法利用对数功率谱求取地震子波的自相关,进而求得地震子波及反褶积的算子,较好地克服了地震反射系数非白噪声的影响。此外,本方法以“宽带雷克子波”作为期望输出子波,较好地拓宽了地震子波的频谱,从而提高了分辨率。实际资料处理结果表明,该方法可作为提高分辨率的一种有效的处理手段。值得注意的是,该方法输入的原始地震记录要有一定的信噪比,否则会影响地震子波统计的准确性。

本方法是在原有的统计子波反褶积基础上改进的,郭向宇同志提供了统计子波反褶积程

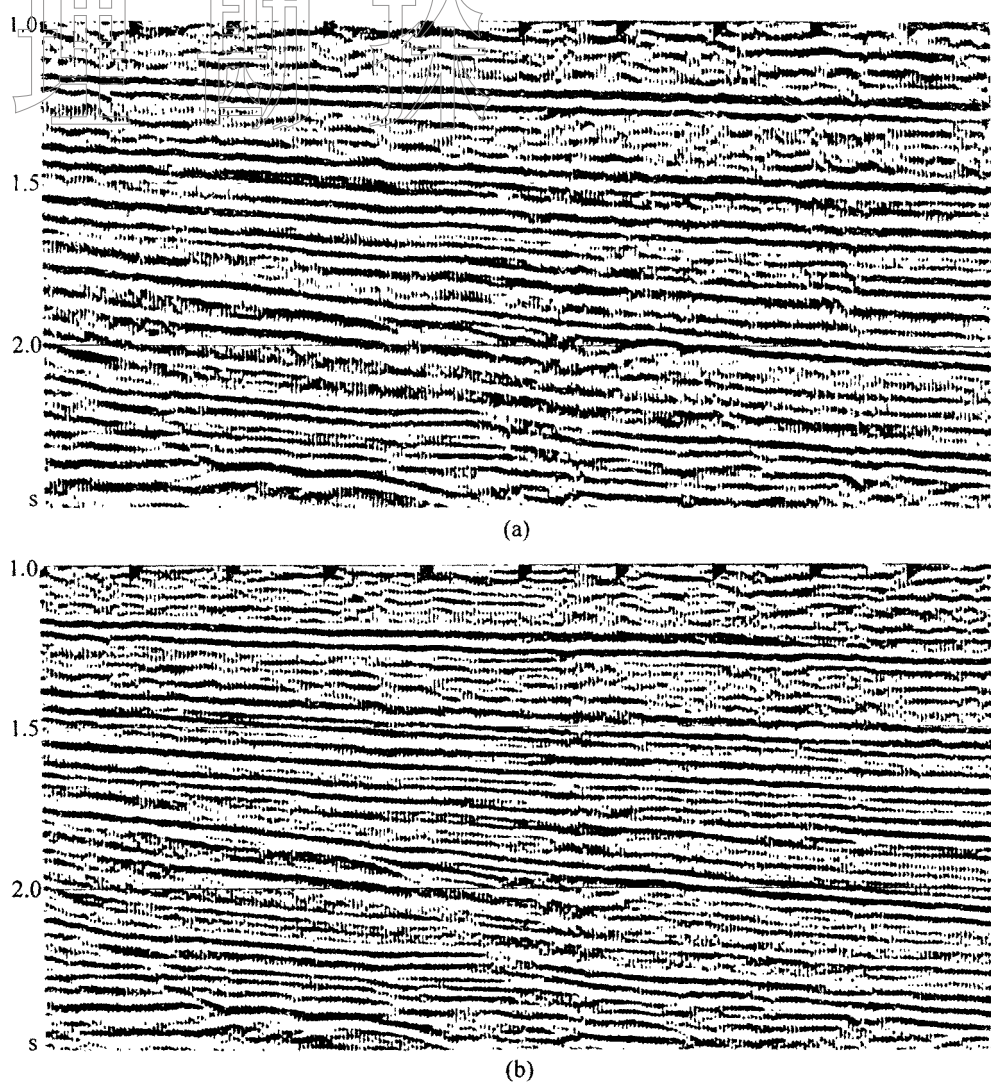


图5 两种不同方法的叠加剖面对比

(a)传统的统计子波反褶积叠加剖面;(b)改进的统计子波反褶积叠加剖面

序,使得本方法能在较短的时间内得以实现。此外,有关能量归一问题得到了王真理博士的许多建议,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 张永刚等. 两步法统计子波反褶积. 物探科技通报, 1988, 6(2)
- 2 夏洪瑞等. 两步法反褶积技术中子波的提取与反子波的计算. 地震资料处理技术论文集, 石油工业出版社
- 3 姚逢昌. 噪声自适应子波处理. 地震资料处理技术论文集, 石油工业出版社
- 4 牟永光主编. 地震勘探资料数字处理方法, 石油工业出版社
- 5 陈乾生编. 信号数字处理的数学原理, 石油工业出版社
- 6 周兴元. 应用同态理论估算地震子波. 石油地球物理勘探, 1983, 18(6): 510~521
- 7 俞寿朋等. 宽带 Ricker 子波. 石油地球物理勘探, 1996, 31(5): 605~615