

基于二进小波变换自适应 Kalman 滤波反褶积

董恩清, 刘贵忠, 张宗平

(西安交通大学电子与信息工程学院信息与通信工程系, 西安 710049)

摘要: 本文提出了基于二进小波变换自适应 Kalman 滤波反褶积 (AKFD) 新方法. 它抛弃了传统预测反褶积对信号平稳性的假设, 克服了提高分辨率反而明显降低信噪比的矛盾, 其较好地压缩反射波形, 但噪声并没有明显提高, 所以具有很好的抗噪性能. 在小波域进行的 AKFD 压制假反射比在时域 AKFD 好, 此外, 该方法具有对信号分频进行 AKFD 的特性, 增强了 Kalman 滤波的自适应性, 所以在小波域下的分辨率明显比在时域内高. 同时, 该方法克服了在时域内进行的 AKFD 抬升低频成份的缺陷. 经大量的模型及实际资料处理表明该方法具有明显的效果.

关键词: 二进小波变换; 自适应 Kalman 滤波; 反褶积; 非平稳信号; 信噪比; 多分辨率分析

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 01-0064-04

Adaptive Kalman Filtering Deconvolution Based on Dyadic Wavelet Transform

DONG En-qing, LIU Gui-zhong, ZHANG Zong-ping

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new approach of adaptive Kalman filtering deconvolution (AKFD) is developed based on dyadic wavelet transforms. The technique discards the assumption of signals stationarity in predictive deconvolution, and overcomes the problem of improving resolution at the price of substantially decreasing signal-to-noise rate (SNR). The technique can well compress the reflection waveforms, but the noises are not lifted in substance. So it has a better ability of noise tolerance. Suppressing false reflections in dyadic wavelet transform domain is better than by applying AKFD in the time domain. In addition, since the technique also has the characteristic of adaptive Kalman filtering in every band for a signal respectively, it enhances the adaptation of Kalman filtering, and the resolution being obvious higher than that in the time domain. At the same time, the technique also overcomes the drawback of increasing the low-frequency component of AKFD in the time domain. A great deal of numerical models and real seismic data indicate that the technique has obvious effects.

Key words: dyadic wavelet transform; adaptive Kalman filtering; deconvolution; nonstationary signal; signal-to-noise ratio; multiresolution analysis (MRA)

1 引言

预测反褶积已经广泛应用于处理地震资料^[1], 尽管对平稳信号很有效, 但这种方法有几种缺陷. 该方法一个主要的缺陷是局限于信号为平稳的假设, 这一点明显地不满足实际地震数据. 预测反褶积在提高分辨率的同时, 却对噪声也产生相应的放大, 所以应用预测反褶积来处理实际地震资料具有一定的局限性.

目前用自适应滤波方法处理各种时变信号被认为是最有效的方法, 如语音参数提取、自适应阵列信号处理等^[2-5]. 该技术是基于使用连续自适应线性预测算子, 算子系数应用简单自适应算法进行修正. 所以该方法除了很好地适用于时变非平稳信号外, 计算上也是有效的.

R. E. Kalman 等人在 Wiener 滤波的基础上, 于 60 年代初提出了一种递推滤波方法. 几十年来, Kalman 滤波已在各个领

域得到广泛的应用. 自适应 kalman 指示器被用来动态地估计分支延迟线性结构参数, 很类似于未知参数的递归最小均方误差估计器. 而后, 把每一新数据点的修正估计代替以前的估计, 作为预测算子新的算子系数. “预测剩余量”用来完成算子估计下一次的修正, 所以该方法可以处理非平稳的信号.

应用传统 Kalman 滤波反褶积方法进行地震数据处理研究在国内很少有报道^[6,7], 主要由于它是基于传统的 Kalman 滤波反褶积方法, 要求较多先验知识, 而且该方法对初始参数反应敏感, 对反褶积效果影响较大, 所以在实际很少应用. 而应用本文采用的自适应 Kalman 滤波反褶积方法在国内各个领域还没有被采用过.

小波变换对信号的分时分频的精细表达和多分辨率的全面把握, 使我们能更深入地认识信号和噪声的特性, 便于基于小波域进行更有效的高分辨率的处理工作. 本文基于二进小

收稿日期: 1999-06-08; 修回日期: 2000-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69872030); 陕西省自然科学基金 (No. 98x08)

波变换的这些特点,提出基于二进小波变换的 AKFD 方法.该方法是在二进小波域中的各尺度上分别进行其分辨率随小波尺度变化的 AKFD,从而得到具有不同分辨率水平的反褶积结果.然后,将各个尺度上的反褶积结果,应用 Mallat 重构算法进行重构得到时域的反褶积结果.经过大量的模型及实际资料表明,基于二进小波变换 AKFD 具有明显的效果.该算法除了适合于处理地震信号外,也可以借鉴应用到其它类似的信号的处理.

2 基于 Kalman 滤波的自适应反褶积^[8~11]

非平稳地震道的反褶积的关键是求一个自适应预测算子,其收敛时间常量应与地震道时间变化周期相同.实际上,由于算子系数是连续修正的,其值表现在关于以前道样点具有指数加权统计的一个平均.这里介绍具有最优收敛特性的预测算子的自适应估计方法.

收敛特性的最优化的关键是对预测算子所使用的模型的假设.该模型假设以算子系数短期一致性为基础,假定要求如下方程:

$$A(k+1) = A(k) \quad (1)$$

这里 $A^T(k) \triangleq [a(k-p), \dots, a(k-1)]$ (2)

地震道 $x(k)$ 假设是自回归序列模型

$$x(k) = \sum_{i=1}^p a(k-p+i-1)x(k-i) + v(k) \\ = X^T(k)A(k) + v(k) \quad (3)$$

这里 $X^T(k) = [x(k-1), x(k-2), \dots, x(k-p)]$ (4)

并且 $v(k)$ 是方差为 $\sigma_v^2(k)$ 的白噪声.

现在考虑基于式(3)给出的观测值 $\{x(1), x(2), \dots, x(k)\}$,寻找状态向量 $A(k)$ 的估计 $\hat{A}(k)$ 的问题,即使 $E\{[A(k) - \hat{A}(k)]^T \cdot [A(k) - \hat{A}(k)]\}$ 最小,显然它是最小均方误差状态估计问题的一个特例.应用式(1)和式(3)问题变成一个估计预测算子 $A(k)$ 的简单算法,详细描述如下:

模型方程: $A(k+1) = A(k)$ (5)

$$x(k) = X^T(k)A(k) + v(k) \quad (6)$$

$$E\{v(k)v^T(k)\} = R \quad (7)$$

状态估计方程:

$$A(k+1) = A(k) + K(k+1)y(k) \quad (8)$$

$$y(k) = x(k) - X^T(k)A(k) \quad (9)$$

Kalman 增益和方差矩阵

$$K(k+1) = P(k)X(k+1) \cdot [X^T(k+1) \cdot P(k) \\ \cdot X(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (10)$$

$$P(k+1) = [I - K(k+1)X^T(k+1)] \cdot P(k) \cdot [I - K(k+1) \\ \cdot X^T(k+1)]^T + K(k+1) \cdot R(k+1) \cdot K^T(k+1) \quad (11)$$

反褶积预测剩余给出如下形式:

$$y(k) = x(k) - \hat{x}(k) = x(k) - A^T(k)X(k) \quad (12)$$

这里 $A^T(k)$ 由式(8)给出.

目前可以看到,基于所有以前的数据,从以上公式在每一个迭代点可以得到在最小均方意义上一个最优估计,所以这种方法在计算连续追踪短期变化的算子系数是特别有效的.

可以表明,由于 $A(k+1) = A(k)$ 实际上正是当 A 是一

个常数,令 $A(k) = A$ 的命题,因此它是一个退化了的状态方程.这里把恒定参数形成的递归最小均方误差估计器看作自适应 Kalman 滤波指示器的一个特殊情况.

在以上的式(8)~(11)中未知的参数只有噪声方差 R ,其可以假定有一合适的值.虽然滤波器的稳定状态性能对假定的 R 值不敏感,但对算法的收敛率具有相当大的影响.在这里 R 可以由下式采用平方预测误差自适应地估计

$$R(k) = (1/k) [(k-1)R(k-1) + e^2(k)] \quad (13)$$

可以观察到,应用上式估计 $R(k)$,算法的收敛率得到相当大的改进.最初的参数估计假定是零,并且最初的斜方差 $P(0)$ 是 nI 形式的对角矩阵,这里 n 可以取任意值,也可以取一个大值.

3 基于二进小波变换的 AKFD

3.1 二进小波变换的快速实现算法^[12,13]

有关二进小波变换理论的详细论述可参见文献[12、13],这里只给出其快速算法的简单实现方法.基于多分辨理论,容易导出下面离散二进小波的快速分解和重构算法.其中 $W_2^j f = (W_2^j f(x_i))$ 和 $S_2^j f = (S_2^j f(x_i))$ 分别表示在 2^j 尺度上的小波细节和小波逼近,初始 $S_1^j f(x_i) = d_i$.对于长度为 N 的离散数据 d_i ,为改善边界效应,可以采取周期延拓或先对称延拓再周期延拓方法,则递推二进小波分解和重构算法如下.

二进小波的快速分解算法

$$j=0, \\ \text{while } (j < J) \\ W_2^{j+1}f = S_2^j f * HD_j, \\ S_2^{j+1}f = S_2^j f * LD_j,$$

end of while

二进小波的快速重构算法

$$j=J, \\ \text{while } (j > 0) \\ S_2^{j-1}f = S_2^j f * LR_{j-1} + W_2^j f * HR_{j-1} \\ \text{end of while}$$

其中 HD_j 和 LD_j 分别是尺度为 2^j 的高通和低通分解滤波器,它们分别通过尺度为 1 时的高通和低通初始滤波器 HD 和 LD 的各个系数间插 $2^j - 1$ 个 0 的方法得到. HR_j 和 LR_j 是在尺度为 2^j 的高通和低通重建滤波器,其产生方法与 HD_j 和 LD_j 相似,只是它们的初始滤波器是 HR 和 LR .

3.2 基于二进小波变换的 AKFD 的基本思想

AKFD 在时域内对处理非平稳信号比传统的预测反褶积具有明显的效果.尽管自适应 Kalman 滤波对非平稳信号具有较强的自适应性,但在时域内处理非平稳信号是对信号所有的频率成分同时进行处理.基于上节论及的二进小波变换的分时分频多分辨率特点,如果把信号进行二进小波变换,然后分别在各个尺度上进行自适应 Kalman 滤波预测反褶积,这样在各个尺度上所做的自适应 Kalman 滤波更能发挥该算法的自适应性,可以在反褶积之前就对随机噪声进行较大程度的衰减.基于这种考虑,这里用大量的模型数据和实际资料来验证该方法的有效性.

整体的思路可以简单地概括如下几步：

(1) 根据实际情况,应用二进小波变换把数据分解在若干个尺度上。(2) 在各个尺度上分别进行 AKFD,得到各个尺度上的反褶积结果。(3) 将各个尺度上的反褶积结果,应用二进小波变换快速重构算法,得到原信号的反褶积结果。

这里二进小波变换采用的是二次样条小波^[12]。

由于 AKFD 采用的是连续修正的自适应线性预测算子,能够跟踪变化较快的非平稳信号,从理论上及下面的模型和实际资料处理来看,明显比传统预测反褶积效果要好。但该方法是以加大运算量为代价的,它是要求在每一个观测点的数据上都计算出该点的预测算子,而传统预测反褶积大多是采取滑动时窗的办法,分别在每一时窗内求出代表该时窗的预测算子。显然 AKFD 的计算量随着数据量的加大而加大,一般来讲其运算量是传统预测反褶积的几百倍。而基于二进小波变换 AKFD 的计算量又是 AKFD 的 $J + 1$ 倍,其中 J 表示小波分解级数。但对于如今计算机的计算速度来说,增加的这些计算量对于实际计算是完全没有问题的。

3.3 模型及实际资料处理效果分析

图 1(a)~(c) 分别是反射系数序列、最小相位子波及没有加噪声的合成记录,图 1(d)~(e) 分别为时域内 AKFD 及小波域下的 AKFD 结果。从中可以看到,时域内 AKFD 及小波域下的 AKFD 都较好压缩了子波主峰的宽度,子波旁瓣也受到一定的压制。这样既提高了分辨率,同时又消除了假反射,达到去伪存真的目的。然而小波域下的 AKFD 在压制假反射比在时域下的 AKFD 好。(见图 1(e) 中 72ms、132ms、237ms 处强反射的旁瓣明显比图 1(d) 中的相应位置小)。

在模型实验中,初始选取的参数只有 R 和 $P(0)$ 中的 n 值,实际上 R 和 n 之间是有一定关系的。随着比值 R/n 的增加反褶积的结果的分辨率越低,越接近原始信号。这里为清楚看出模型中的波形旁瓣特征,选比值 R/n 大一些。

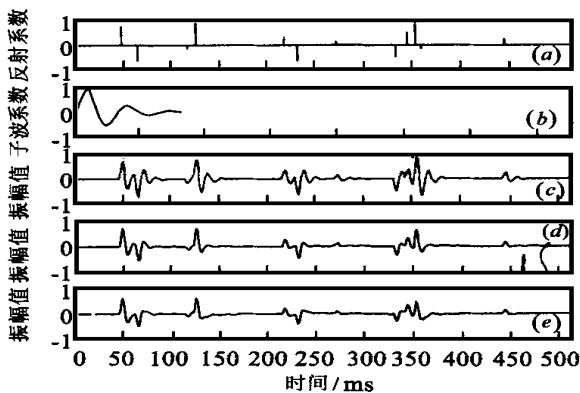


图 1 不加噪声模型分析图。(a) 反射系数序列;(b) 最小相位子波;(c) 合成记录;(d) 时域 AKFD 结果;(e) 基于二进小波变换 AKFD 结果

图 2(a)~(c) 分别是反射系数序列、最小相位子波及加噪声(10dB)的合成记录,图 2(d)~(e) 分别为时域内 AKFD 及小波域下的 AKFD 结果。从中可以看到,时域内 AKFD 及小波域下的 AKFD 都具有较好的抗噪能力。说明基于二进小波变

换的 AKFD 同样具有较强的自适应性,且 AKFD 较好地解决了提高分辨率反而明显降低信噪比的矛盾。

图 3~图 5 分别为原始的实际叠加地震剖面、时域内的 AKFD 剖面及小波域下 AKFD 剖面,图 4 及图 5 都比图 3 分辨率有大幅度的提高,而且图 4、图 5 的反射层的反射强度强弱分明,同相轴连续性增强,更能反映实际的地下地质情况,但图 5 分辨率又比图 4 分辨率高。从剖面反褶积结果的局部特征来看,图 5 中的 A、B、C 区域内的波形分辨率及波形的连续性明显比图 4 中相应的区域要好。

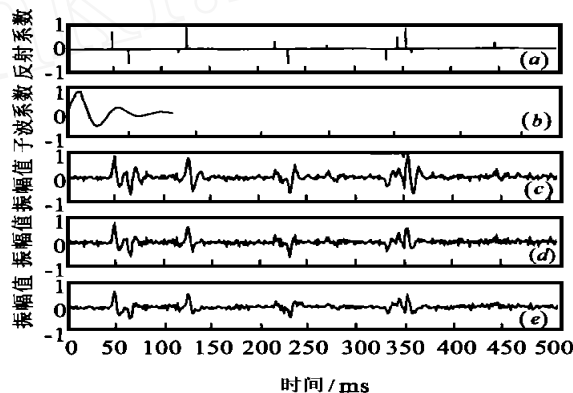


图 2 加噪声(10dB)模型分析图。(a) 反射系数序列;(b) 最小相位子波;(c) 加噪合成记录;(d) 时域 AKFD 结果;(e) 基于二进小波变换 AKFD 结果

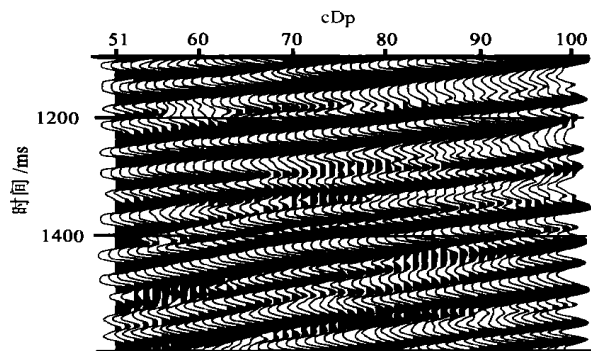


图 3 实际叠加地震剖面

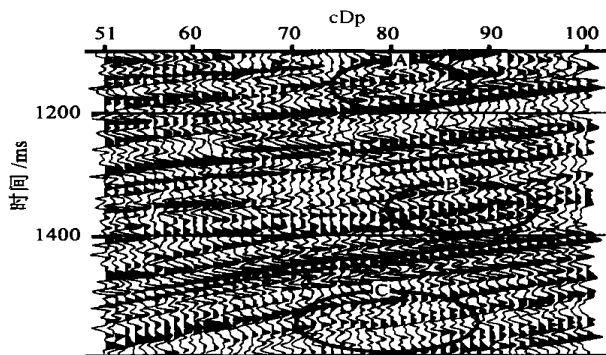


图 4 时域内 AKFD 剖面图

图 6(a)~(c) 分别是原始地震信号、时域内的 AKFD 及小波域下的 AKFD 的振幅谱图。小波域下的 AKFD 的振幅谱

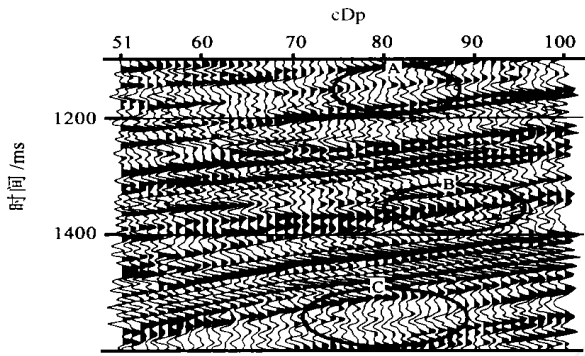


图 5 小波域内 AKFD 剖面图

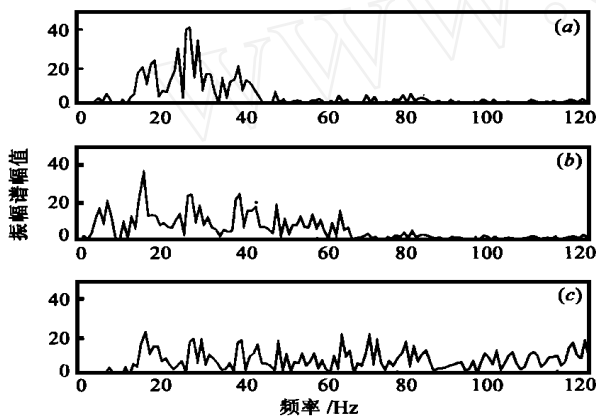


图 6 (a)原始地震信号的振幅谱图; (b)时域内 AKFD 振幅谱图; (c)小波域下的 AKFD 振幅谱图

频带宽度明显比时域下的 $AKFD$ 的振幅谱频带宽度宽。所以基于二进小波变换的 $AKFD$ 的分辨率比在时域下的 $AKFD$ 的分辨率高。从图 6(b) 可以看出在时域内的 $AKFD$ 的频谱图的低频部分能量被抬升了, 在地震信号中低频部分往往被认为是面波等干扰波, 而图 6(c) 却把低频压制得很好, 所以基于二进小波变换的 $AKFD$ 克服了在时域内进行的 $AKFD$ 抬升低频成份的缺点。

4 结论

(1) $AKFD$ 是基于使用连续自适应线性预测算子, 采用最优收敛特性预测算子的自适应估计方法, 适于非平稳信号处理。基于二进小波变换 $AKFD$ 方法具有对信号频段 $AKFD$ 的特点, 增强了 Kalman 滤波反褶积的自适应性, 所以较在时域内 $AKFD$ 分辨率具有明显提高。

(2) 该方法较好地压缩反射波形, 但噪声并没有明显抬升, 所以具有很好的抗噪性能, 解决了传统预测反褶积提高分辨率反而明显降低信噪比的矛盾。(3) 基于二进小波变换 $AKFD$ 比时域内 $AKFD$ 方法具有较强的压缩子波旁瓣宽度, 从而明显消除假反射, 克服了在时域内进行的 $AKFD$ 抬升低频成份的缺点。(4) 基于二进小波变换的 $AKFD$ 取得显著的效果是以付出较大的计算量为代价的。

参考文献:

[1] K. L. Peacock and S. Treitel. Predictive deconvolution: Theory and

practice [J]. *Geophysics*, 1969, 34:155 - 169.

- [2] L. J. Griffiths. A simple adaptive algorithm for real time processing in antenna arrays [A]. *Proc. IEEE [C]*, 1969, 57:1696 - 1704.
- [3] G. K. C. Clarke. Time-varying deconvolution filters [J]. *Geophysics*, 1968, 39:1 - 13.
- [4] O. L. Frost III. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [A]. *Proc. IEEE [C]*, 1975, 63:1692 - 1716.
- [5] B. Widrow et al. Adaptive noise canceling: Principles and Applications [A]. *Proc. IEEE [C]*, 1975, 63:1692 - 1716.
- [6] 黄绪德. 反褶积与地震道反演 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [7] 马振兴. 卡尔曼滤波在地震数据处理中的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 1984, (2):140 - 147.
- [8] L. J. Griffiths, F. R. Snolka and L. D. Tremblay. Adaptive deconvolution: A new technique for time-varying seismic data [J]. *Geophysics*, 1977, 42:742 - 759.
- [9] B. Widrow et al. Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter [A]. *Proc. IEEE [C]*, 1976, 64:1151 - 1162.
- [10] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises and Solutions [M]. New York: Wiley, 1997.
- [11] S. Prasad and A. K. Mahalanabis. Adaptive filter structures for deconvolution of seismic signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, GE-18(3):267 - 273.
- [12] S. Mallat and S. Zhong. Characterization of signal from multiscale edges [J]. *IEEE Transaction on PAMI*, 1992, 14(7):710 - 732.
- [13] S. Mallat and W. L. Hwang. Singularity detection and processing with wavelet [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1992, 38(2):617 - 643.

作者简介:



董恩清 1965 年生, 讲师, 1987 年 7 月于中国矿业大学获工学学士学位, 1993 年 7 月于西安工程学院 (现长安大学) 获理学硕士学位, 现为西安交通大学电信学院在读博士生, 主要研究兴趣包括小波分析、时频分析、非平稳信号处理和数据压缩等。



刘贵忠 1962 年生, 1989 年 6 月获荷兰 Eindhoven 大学博士学位, 现为西安交通大学电子与信息工程学院教授, 博士生导师。主要从事非平稳信号的分析、处理、模式识别、反演等方面的理论、方法与应用研究。

张宗平 1971 年生, 1998 年 7 月于中科院西安光机所获硕士学位。现为西安交通大学电信学院在读博士生, 主要研究兴趣包括小波分析、时频分析、非平稳信号处理、电磁场数值计算等。