第16卷 第5期　　自动化学报　　Vol. 16, No. 5
1990年9月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　Sept., 1990

# 地震信号去卷的一种自适应滤波方法

邓自立
（哈尔滨黑龙江大学应用数学研究所）

**摘　　要**

本文讨论地震信号去卷问题，提出了一种新的自适应递推去卷滤波器，它由参数和信号估计的两段 Bootstrap 算法组成. 其优点是：1)同增广状态 Kalman 滤波[2,5]相比，显著地减小了计算量；2)采用了虚拟噪声补偿技术，有效地克服了滤波的发散. 仿真例子说明了方法有效性.

**关键词**——信号处理，去卷，自适应滤波.

## 一、引　　言

近年来，地震信号去卷问题引起了广泛的理论和应用兴趣[1]. 在油田地震勘探过程中，"反射系数序列"含有地层结构的重要信息，但在地面上它是以"卷和"形式被观测的，因此基于这种观测信息来估计反射系数序列叫做去卷 (Deconvolution). 与文[1]不同，本文假定反射系数序列信号 $x(k)$ 用如下单变量有色噪声模型描写[2]:

$$x(k)=\sum_{i=1}^{n}a_i(k)x(k-i)+w(k-1), \tag{1}$$

其中 $w(k)$ 是零均值、方差为 $Q$ 的高斯白噪声.

观测方程用如下卷和模型描写[2]:

$$y(k)=\sum_{i=0}^{m}h_i(k)x(k-i)+v(k), \tag{2}$$

其中地震迹 $y(k)$ 是观测信号，$h_i(k)$ 是已知的地震子波，观测噪声 $v(k)$ 是均值为 $r$、方差为 $R$ 的独立于 $w(k)$ 的高斯白噪声.

假定(1)式的参数向量 $\theta(k)=(a_1(k),\cdots,a_n(k))^T$，$T$ 是转置号，用如下随机游动模型描写:

$$\theta(k+1)=\theta(k)+\xi(k), \tag{3}$$

其中 $\xi(k)$ 是均值为 $s(k)$、方差阵为 $S(k)$ 的独立于 $w(k)$ 和 $v(k)$ 的高斯白噪声.

自适应去卷问题是：当系统 (1)—(3) 的参数 $\theta(k)$ 和噪声统计未知时，基于观测 $(y(k),\cdots,y(0))$，求有色噪声信号 $x(k)$ 的自适应滤波估值 $\hat{x}(k)$.

---

本文于1988年2月22日收到.

## 二、参数和信号估计的两段 Bootstrap 算法

**第一段**: 自适应参数估计器

当估值 $\hat{x}(k-i)$ 已知时,将(1)式代入(2)式,且以估值 $\hat{x}(k-i)$ 近似代替 $x(k-i)$,并把所产生的观测模型误差合并到观测噪声中去,有伪观测方程

$$y(k)=\hat{\boldsymbol{c}}(k)\boldsymbol{\theta}(k)+\hat{d}(k)+\eta(k), \tag{4}$$

其中 $\eta(k)=v(k)+h_0w(k-1)+$(观测模型误差项),叫虚拟观测噪声,它补偿了观测模型误差,显然它带未知时变均值 $\lambda(k)$ 和方差 $\Lambda(k)$. 还有

$$\hat{\boldsymbol{c}}(k)=(h_0(k)\hat{x}(k-1),\cdots,h_0(k)\hat{x}(k-n));\ \hat{d}(k)=\sum_{i=1}^{m}h_i(k)\hat{x}(k-i). \tag{5}$$

对系统(3)和(4)式,自适应 Kalman 滤波为[3]

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1/k)+K(k+1)\varepsilon(k+1), \tag{6}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1/k)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)+\hat{\boldsymbol{s}}(k), \tag{7}$$

$$\varepsilon(k+1)=y(k+1)-\hat{\boldsymbol{c}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1/k)-\hat{d}(k+1)-\hat{\lambda}(k), \tag{8}$$

$$P(k+1/k)=P(k)+\hat{S}(k), \tag{9}$$

$$P(k+1)=(I-K(k+1)\hat{\boldsymbol{c}}(k+1))P(k+1/k), \tag{10}$$

$$\hat{\boldsymbol{s}}(k+1)=(1-b_k)\hat{\boldsymbol{s}}(k)+b_k(\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)-\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)), \tag{11}$$

$$\hat{S}(k+1)=(1-b_k)\hat{S}(k)+b_k(K(k+1)K^T(k+1)\varepsilon^2(k+1)+P(k+1)-P(k)), \tag{12}$$

$$\hat{\lambda}(k+1)=(1-b_k)\hat{\lambda}(k)+b_k(y(k+1)-\hat{\boldsymbol{c}}(k+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1/k)-\hat{d}(k+1)), \tag{13}$$

$$\hat{\Lambda}(k+1)=(1-b_k)\hat{\Lambda}(k)+b_k(\varepsilon^2(k+1)-\hat{\boldsymbol{c}}(k+1)P(k+1/k)\cdot\hat{\boldsymbol{c}}^T(k+1)), \tag{14}$$

其中 $b_k=(1-b)/(1-b^{k+1})$, $0<b<1$, $b$ 叫遗忘因子. 取初值为 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)=\boldsymbol{\theta}_0$, $P(0)=P_0$, $\hat{\boldsymbol{s}}(0)=\boldsymbol{s}_0$, $\hat{S}(0)=S_0$, $\hat{\lambda}(0)=\lambda_0$, $\hat{\Lambda}(0)=\Lambda_0$.

**第二段**: 自适应信号估计器

一旦参数估值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k+1)$ 被得到,代入(1)式有

$$x(k+1)=\sum_{i=1}^{n}\hat{a}_i(k+1)x(k+1-i)+w^*(k), \tag{15}$$

其中 $w^*(k)=w(k)+$(模型误差项),叫虚拟模型噪声,带有未知时变均值 $q(k)$ 和方差 $Q(k)$.

对系统(15)和(2)式,自适应递推滤波器为[4]

$$\hat{x}(k+1)=\hat{x}(k+1/k)+l(k+1)e(k+1), \tag{16}$$

$$\hat{x}(k+1/k)=\sum_{i=1}^{n}\hat{a}_i(k+1)\hat{x}(k+1-i)+\hat{q}(k), \tag{17}$$

$$e(k+1)=y(k+1)-h_0(k+1)\hat{x}(k+1/k)$$

$$-\sum_{i=1}^{m} h_i(k+1)\hat{x}(k+1-i)-\hat{r}(k), \tag{18}$$

$$p(k+1/k)=\sum_{i=0}^{n-1}\hat{a}_{i+1}^2(k+1)p(k-i)+\hat{Q}(k), \tag{19}$$

$$l(k+1)=(p(k+1/k)h_0(k+1)+\sum_{i=0}^{h}\hat{a}_{i+1}(k+1)p(k-i)h_{i+1}(k+1))/$$
$$(h_0^2(k+1)\,p(k+1/k)+\sum_{i=0}^{m-1}h_0^2(k+1)p(k-i)$$
$$+2h_0(k+1)\sum_{i=0}^{h}\hat{a}_{i+1}(k\mp 1)p(k-i)h_{i+1}(k+1)+\hat{R}(k)), \tag{20}$$

$$p(k+1)=(1-l(k+1)h_0(k+1))p(k+1/k)$$
$$-l(k+1)\sum_{i=0}^{h}\hat{a}_{i+1}(k+1)p(k-i)h_{i+1}(k+1), \tag{21}$$

$$\hat{q}(k+1)=(1-f_k)\hat{q}(k)+f_k(\hat{x}(k+1)-\sum_{i=0}^{n-1}\hat{a}_{i+1}(k+1)\hat{x}(k-i)), \tag{22}$$

$$\hat{Q}(k+1)=(1-f_k)\hat{Q}(k)+f_k(l^2(k+1)e^2(k+1)+p(k+1)$$
$$-\sum_{i=0}^{n-1}\hat{a}_i^2(k+1)p(k-i)), \tag{23}$$

$$\hat{r}(k+1)=(1-f_k)\hat{r}(k)+f_k(y(k+1)-h_0(k+1)\hat{x}(k+1/k)$$
$$-\sum_{i=0}^{m-1}h_{i+1}(k+1)\hat{x}(k-i)), \tag{24}$$

$$\hat{R}(k+1)=(1-f_k)\hat{R}(k)+f_k(e^2(k+1)-h_0^2(k+1)p(k+1/k)$$
$$-\sum_{i=0}^{m-1}h_{i+1}^2(k+1)p(k-i)-2h_0(k+1)\sum_{i=0}^{h}\hat{a}_{i+1}(k+1)$$
$$\cdot p(k-i)h_{i+1}(k+1)). \tag{25}$$

其中 $f_k=(1-f)/(1-f^{k+1})$，$0<f<1$，$f$ 是遗忘因子，且 $h=\min(n, m)$，并适当地规定滤波初值.

滤波算法(16)—(25)式只要求简单的标量四则运算，避免了矩阵及其求逆运算，因而是一种快速自适应递推滤波算法.

上述两段 Bootstrap 算法是两段互耦自适应滤波器，按图 1 方式交替递推实现.

## 三、仿 真 例 子

考虑用 $AR(2)$ 模型描写的有色噪声信号 $x(k)$：

$$x(k)=a_1x(k-1)+a_2x(k-2)+w(k-1). \tag{26}$$

观测信号 $y(k)$ 用如下卷和模型描写：

$$y(k)=0.8x(k)+0.4x(k-1)+v(k), \tag{27}$$

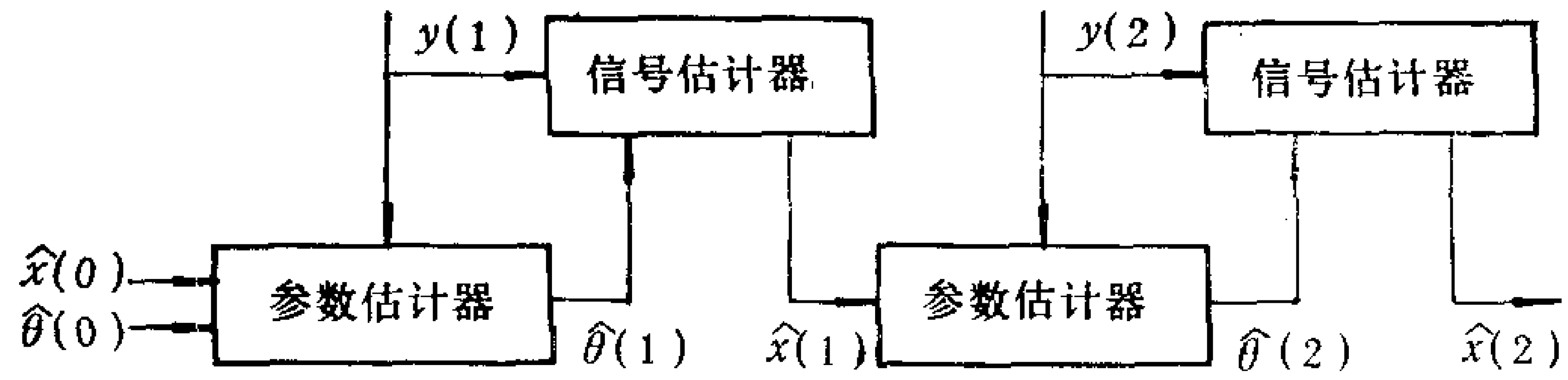


图 1 参数和信号估计的两段 Bootstrap 算法

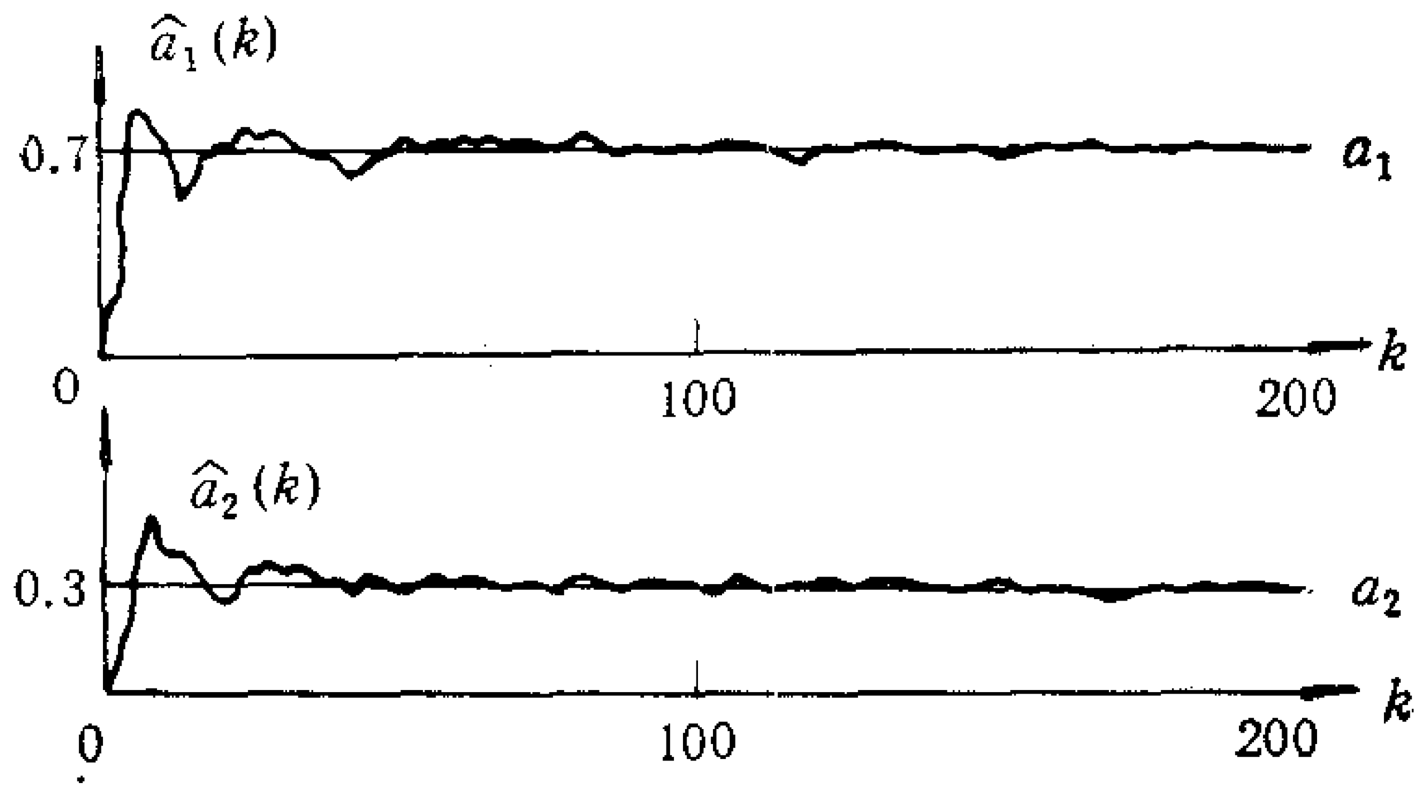


图 2 自适应参数估计 $\hat{a}_i(k)$ 的收敛性

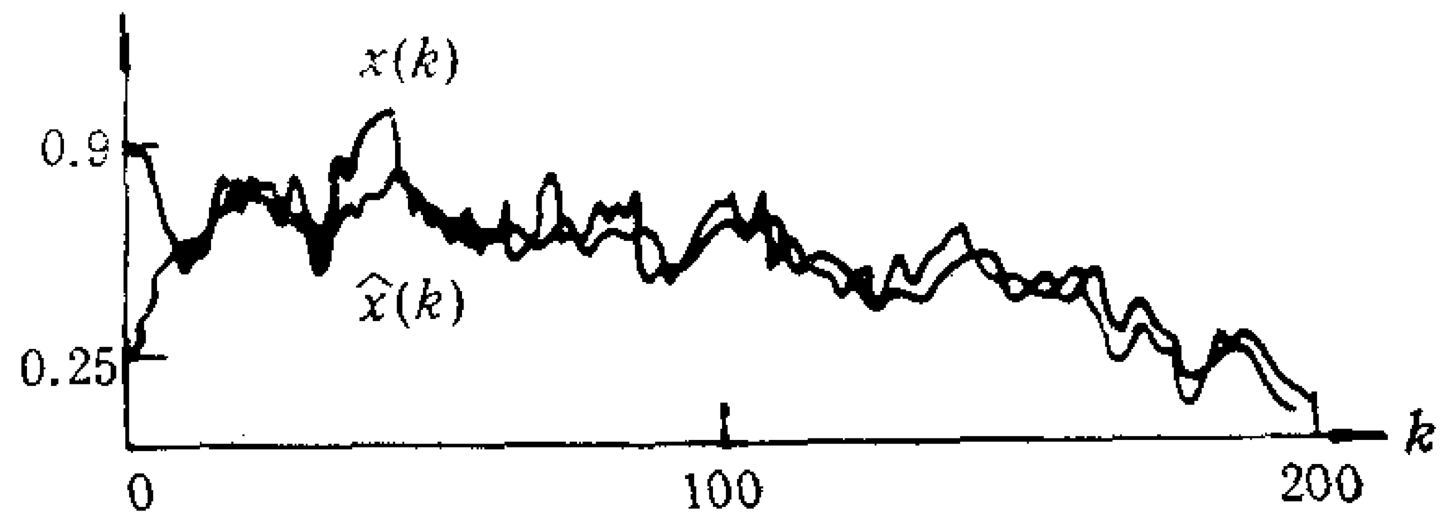


图 3 自适应信号估计 $\hat{x}(k)$ 与真实值 $x(k)$ 比较

其中常参数 $a_1=0.7$，$a_2=0.3$ 是未知的，$w(k)$ 和 $v(k)$ 是带零均值，方差分别为 $(0.16)^2$ 和 $(0.06)^2$ 的独立的高斯白噪声。用本文算法仿真结果如图 2 和图 3 所示。图 2 表明参数估计有良好的收敛性，图 3 表明信号估计有良好的跟踪性能。

致谢：研究生解三名计算了仿真例子，谨表谢意。

## 参 考 文 献

[1] Mendel, J. M., White Noise Estimators for Seismic Data Processing in Oil Exploration, *IEEE Trans. Automatic Control*, **AC-22**(1977), 694—706.

[2] Crump, N. D., A Kalman Filter Approach to the Deconvolution of Seismic Signals, *Geophysics*, **39**(1974), No.1.

[3] 邓自立，郭一新，动态系统分析及其应用，辽宁科学技术出版社，(1985)，190—215.

[4] 邓自立，解三名，Identification of Noise Statistics and Adaptive Filtering for Linear Systems with Multiple Delays, The 18th JAACE Symp. on Stochastic Systems Theory and its Applications, 1986, 185—188.

[5] Prasad, R. M., Sinha, A. K., Mahalanabis, A. K., Tow-stage Bootstrap Algorithms for Parameter Estimation, *Int. J. Syst. Sci.*, **8**(1977), No.12.

# AN ADAPTIVE FILTERING APPROACH FOR DECONVOLUTION OF SEISMIC SIGNALS

DENG ZILI

(*Institute of Applied Mathematics, Heilongjiang University*)

ABSTRACT

This paper deals with the problems of deconvolution of seismic signals. An adaptive recursive deconvolution filter consisting of two-stage bootstrap algorithms for parameter and signal estimations is proposed. It has two advantages. (1) The amount of computation, compared with the augmented state Kalman filter [2, 5], is considerably reduced. (2) The problem of divergence associated the bootstrap algorithms is effectively alleviated, due to a fictitious noise compensation technique used. Simulation example has shown the effectiveness of the proposed approach.

**Key words** ——Signal processing; deconvolution; adaptive filtering.