

基于 M 估计变步长自适应仿射投影算法的稳健时延估计

贾冲 郭明喜 张雄伟

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要: 该文提出了一种基于 M 估计变步长自适应仿射投影方法的稳健时延估计(TDE)算法。该算法将自适应仿射投影算法应用于时延估计,无须事先假定信号和噪声的统计特性,自适应调整自身参数;应用稳健 M 估计理论,抵消重尾噪声干扰。数值仿真表明,在高斯噪声、非高斯噪声甚至冲激噪声的干扰下,该文算法比高阶统计量法和最小均方自适应法有更强的稳健性和更高的估计精度。

关键词: 时延估计; M 估计; 变步长自适应仿射投影算法; 高阶统计量

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1080-04

Robust Time Delay Estimation Using Variable Step-Size Affine Projection Algorithm with M-estimators

Jia Chong Guo Ming-xi Zhang Xiong-wei

(Institute of Communications Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: Robust time delay estimation is proposed using variable step-size affine projection algorithm with M-estimators. The novel algorithm, using the structure of adaptive filter and M-estimators, is free of the assumption that the statistical characteristics of signal and noise is known. Simulation experiments under three different noise environments, Gaussian, non-Gaussian and impulse noise, are conducted to compare with the proposed TDE method using the existing Higher-Order Spectra(HOS) and Least Mean Square(LMS), and the result shows that the proposed TDE method is more robust and precision.

Key words: Time Delay Estimation(TDE); M-estimators; Variable step-size affine projection algorithm; Higher-Order Statistics(HOS)

1 引言

时延估计(Time Delay Estimation, TDE)是系统辨识、目标定位跟踪等信号处理问题中的关键技术,在雷达、声纳、通信、地震、生物医学、地理勘测以及军事等领域广泛应用,因而时延估计一直是重要而活跃的研究方向^[1, 2]。根据目标信源和处理方式的不同,时延估计可以分为两类:主动时延估计和被动时延估计。前者,主动发射电磁波,利用回波(echo)来进行估计(如雷达等),也称作波达时间估计(Time Of Arrival, TOA);而后者,仅凭接收到的目标发出的信号进行估计(如被动声纳、麦克风阵列等),也称作波达时间差估计(Time Difference Of Arrival, TDOA)^[1]。被动时延估计,隐蔽性强,设备简单功耗小,对于军事应用更具有突出重要的意义,如无特别说明,本文时延估计和被动时延估计含义不加区分。

时延估计的基本方法是互相关法(Cross-Correlation, CC),由于实际环境中存在各种噪声和干扰的影响,加上被动接收无法控制信号的性质和能量,CC 法的估计性能不能令人满意,为此学者提出了诸多性能优良的改进算法:如广

义相关法(Generalized CC, GCC)^[3],相位数据法(Phase Data, PD)^[2],高阶统计量法(Higher-Order-Statistics, HOS)^[4],LMS 自适应滤波法^[1, 5]等。GCC、PD 和 HOS 类算法都依赖于对信号和噪声统计特性先验知识的了解,即使是性能最好、假设条件最少的 HOS 法也假定了信号为非高斯的而噪声则为高斯过程,但这些先验知识往往难于得到,假设难以满足,因此会影响这些算法的性能。LMS 类算法一般不依赖于输入信号和噪声的统计先验知识,尤其在信号和噪声的统计特性未知的条件下,可以通过迭代不断调整自身参数和结构,但其收敛速度慢,阶数低时精度不高。上述算法几乎都没有考虑粗差(outlier)的影响,但统计学家根据大量的数据,指出在生产实际和科学实验中,粗差的出现约占观察总数的 1%~10%^[6],因而上述算法在随机干扰是重尾分布时是不稳健的,性能严重恶化。经过上述分析,GCC, PD, HOS 和 LMS 类算法依然有很大局限性,因此如何同时提高 TDE 估计的稳健性和精度依然是一个未解决的开放性课题(open problem)^[1]。

针对这一难题,本文提出了一种基于稳健 M 估计变步长自适应仿射投影方法(robust-M estimators Variable step-size Affine Projection Algorithm, MVAPA)的 APA 类时延估计算法(MVAPATDE)。该算法将自适应仿射投影算

法应用于时延估计,无须事先假定输入信号和噪声的统计特性,但是比LMS类自适应算法的收敛速度更快、估计更精确;算法引入了稳健M估计理论^[6],可以抵消高斯噪声、非高斯噪声甚至冲激(impulse)噪声等的干扰,比HOS和LMS类算法有更强的稳健性。

本文结构如下。第2节给出了APATDE类算法的系统模型,第3节分析了MVAPA算法,第4节建立噪声模型并通过数值仿真对MVAPATDE,HOSTDE,LMSTDE算法进行了性能比较,第5节是结束语。

2 MVAPA 时延估计算法

2.1 APA 类自适应时延估计系统模型

时延估计系统的基本模型为双基元模型^[1]。假定信号源与时延估计系统处于同一平面内,且信源处于远场,则信号以平面波方式传播。考虑两个空间分离的传感器,其接收到的数据 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 满足下列方程:

$$x_1(n) = s(n) + w_1(n) \quad (1)$$

$$x_2(n) = \alpha s(n - D) + w_2(n) \quad (2)$$

其中 $s(n - D)$ 为 $s(n)$ 的时延信号,时延为 D , α 为衰减因子(本文令 $\alpha = 1$), $w_1(n)$ 和 $w_2(n)$ 分别是两个传感器的观测噪声。

信号 $x_1(n)$ 的时延形式 $x_2(n)$ 可以等效为信号通过一个FIR滤波器后的输出^[5]:

$$x_2(n) = \sum_{m=-P}^P \tilde{h}_n(m) x_1(n - m) + e(n) \quad (3)$$

$e(n)$ 为时刻 n 的估计误差,其中 $\tilde{h}_n(m)$ 为时刻 n 所对应的滤波器权系数,阶数为 $2P + 1$,当算法收敛时,两路信号之间的时延由 $\tilde{h}_n(m)$ 的最大权系数所对应的 m 值进行估计,即 $\hat{D} = \arg\{\max_m \{\tilde{h}_n(m)\}\}$ 。本文将自适应仿射投影算法应用于估计权系数,得到APA类时延估计。

2.2 稳健M估计变步长自适应仿射投影算法

与LMS类自适应方法相比,APA算法有很多优良的特性,如收敛速度更快、抗有色噪声输入、估计更精确等,而计算复杂度介于LMS算法和RLS算法之间,近几年已经成为自适应滤波应用中一种著名的方法^[7]。APA类算法更新公式为

$$\tilde{\mathbf{h}}_i = \tilde{\mathbf{h}}_{i-1} + \mu \mathbf{U}_i^* (\varepsilon \mathbf{I} + \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^*)^{-1} \mathbf{e}_i \quad \text{和} \quad \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_{2,i} - \mathbf{U}_i \tilde{\mathbf{h}}_{i-1} \quad (4)$$

其中 $\tilde{\mathbf{h}}_i$ 是第 i 次迭代时 \mathbf{h}_i 的估计, μ 是步长, $\mathbf{U}_i = [\mathbf{x}_{1,i}, \mathbf{x}_{1,i-D}, \dots, \mathbf{x}_{1,i-(K-1)D}]^T$, $\mathbf{x}_{2,i} = [x_2(i), x_2(i-D), \dots, x_2(i-(K-1)D)]^T$ 。为了在提高收敛速度和减小稳态误差之间折衷,实际中往往采用变步长算法代替固定步长,因而控制步长的方法就成为APA类算法优劣的关键因素。本文采用文献^[7]中指出的准最优步长控制方案。

单纯的APA类算法和LMS类自适应方法相似,没有考虑粗差影响,在粗差存在的环境中应用时是不稳健的,性能将严重恶化^[8],为了抵消粗差的干扰,提高算法的稳健性能,将稳健M估计引入可变步长自适应APA算法。稳健估计又

称为抗差估计,其出发点是在粗差不可避免的情况下,选择适当的估计方法使得估计量尽可能少地受到粗差的影响,得出最佳估计值^[6]。稳健估计分为3类:M估计,L估计和R估计,其中M估计是经典的极大似然估计的推广,又称为广义极大似然估计,它的应用最为广泛。

将M估计引入APA类算法,定义如下:若 $\tilde{\mathbf{h}}_i$ 满足式(5),则称 $\tilde{\mathbf{h}}_i$ 为待估计权系数 \mathbf{h}_i 的M估计量。

$$\sum_{i=1}^n \rho[\mathbf{x}_{2,i} - \mathbf{U}_i \tilde{\mathbf{h}}_{i-1}] = \min \sum_{i=1}^n \rho[\mathbf{x}_{2,i}, t] |_{t \in \Omega} \quad (5)$$

其中 \mathbf{h}_i 满足 $\int \rho(\mathbf{x}_{2,i} - \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{i-1}) dF(x_2) = \min \int \rho(x_2, t) dF(x_2) |_{t \in \Omega}$, Ω 为参数空间(M 维欧氏空间的子集), $\rho(x_2, t)$ 为定义在 $R \times \bar{\Omega}$ 上的实函数($\bar{\Omega}$ 为 Ω 之闭包),且假定 $\rho(x_2, t) \geq C > -\infty$ 。

$\tilde{\mathbf{h}}_i$ 是渐进无偏性的^[8],即当 $n \rightarrow \infty$ 时,有 $\tilde{\mathbf{h}}_i \xrightarrow{a.s.} \mathbf{h}_i$ 。代价函数 $\rho(y)$ 可采用huber双权估计法^[8]。实际上,观测值的信息区间可以划分为正常区间(有效信息),可利用区间和粗差区间(有害信息,必须剔除),后两个区间在huber函数中不加区分。这3部分观测值应该分别加以处理,即采用三权法:保权区:保持原值不便;降权区:做抗差限制;拒绝区:完全剔除,因此本文提出三权法代价函数

$$\rho(y) = \begin{cases} y^2, & |y| \leq k_1 \\ k^2, & k_1 < |y| \leq k_2 \\ 0, & |y| > k_2 \end{cases} \quad (6)$$

直接利用式(5),将会遇到复杂的非线性方程求解问题,可以采用等效噪声的技巧来简化计算。与文献^[8]的条件和假设相同,可以得到一个等效噪声表达式

$$\mathbf{x}_{2,i} - \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{i-1} \approx \mathbf{x}_{2,i} - \mathbf{U}_i \tilde{\mathbf{h}}_{i-1} = \mathbf{e}_i \quad (7)$$

代入式(6),则得到等效噪声函数为

$$\mathbf{e}' = \begin{cases} \mathbf{e}, & |\mathbf{e}| \leq k_1 \\ k \operatorname{sgn}(\mathbf{e}), & k_1 < |\mathbf{e}| \leq k_2 \\ 0, & |\mathbf{e}| > k_2 \end{cases} \quad (8)$$

应用于自适应变步长APA时,用式(8)等效噪声代替式(4)中的噪声。

3 MVAPATDE 算法收敛性能

只有MVAPA算法保证收敛,时延才能准确估计,文献^[9]通过理论推导和数值仿真得到APA类算法保持均方收敛的近似充要条件为:调整步长 μ 必须满足 $0 < \mu < 2$ 。基于LMS或APA算法的时延估计本质上都属于统计类方法,当自适应滤波器收敛(稳态解)时,其权矢量收敛到Wiener滤波器,即可以认为自适应时延估计方法是迭代实现的广义相关时延估计器^[10]。

4 数值仿真

这一节通过数值仿真的方法比较MVAPATDE和HOSTDE,LMSTDE算法在不同噪声环境(高斯噪声、非高斯噪声以及冲激噪声)、不同信噪比和不同粗差污染率下的性

能。

4.1 信号以及噪声的产生^[11, 12]

目标信号一般为非高斯过程, 因而仿真时使用 1000 点归一化非高斯信号 $s(n)$ (仿真工具为 MATLAB7.0), 同时其延迟信号的时延设为 $D = 12$ 。实际使用中的噪声可能是高斯噪声或者非高斯分布噪声, 而且会经常受到冲激噪声的干扰(本文用冲激噪声产生粗差), 充分考虑各种影响, 可以将噪声模型 $w_i(n)$ 表述为 $w_i(n) = v_1(n) + v_2(n)$, 其中 $v_1(n)$ 为基本背景噪声(如高斯噪声和非高斯分布噪声); 而 $v_2(n) = \gamma(n)v(n)$ 是冲激噪声, 其中 $\gamma(n)$ 为 Bernoulli 过程 ($p(\gamma = 1) = \varepsilon$, ε 称为污染因子), $v(n)$ 与 $v_1(n)$ 同分布, 但其方差 $\sigma_v^2 = \lambda\sigma_{v_1}^2$, $\lambda \gg 1$ (当 $v_1(n)$ 为高斯分布时, $w_i(n)$ 就是通信中常用的 Middleton Class A noise 噪声的近似表达)。

4.2 仿真结果

(1) 不同噪声环境下的算法性能

(a) 高斯环境噪声下的时延估计 图 1 比较了 $v_1(n)$ 为高斯噪声的情况下, MVAPATDE 和 HOSTDE、LMSTDE 的算法性能。仿真参数为 $A_s = 1, R_{sw} = 1(0\text{dB}), \varepsilon = 0.01, \lambda = 20$ 。为了得到标准的比较, HOSTDE 法采用 MATLAB 高阶谱工具箱中的 TDE 和 TDEB 两函数来计算。MVAPATDE 算法参数设置为 $\alpha = 0.99, C = 2 \times 10^{-6}, \mu_{\max} = 1, k_1 = 2\sigma_x^2, k_2 = 2k_1$, LMSTDE 步长设置为 0.0001; 这两种算法的阶数都设置为 33 阶。图 1(c), 图 1(d) 是使用两种高阶谱函数来计算时延, 时延值对应于函数峰值点处的横坐标值, 可以看出图 1 (c), 图 1 (d) 的峰值出现在 0 点处, 即得出的时延值为 0, 而真实时延值为 12, 显然这两种算法都失效了。图 1(e), 图 1(f) 分别是本文算法和 LMSTDE 算法的滤波器权系数

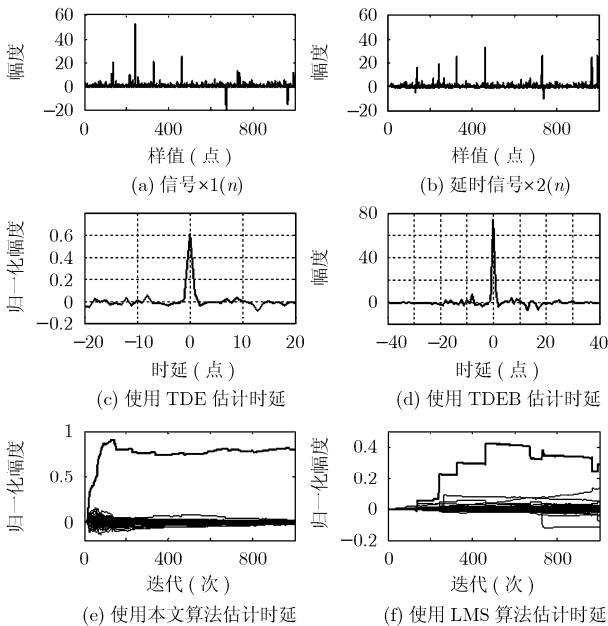


图 1 高斯环境噪声下的时延估计
(纵坐标以 MATLAB 高斯随机函数的均值为单位 1)

$\tilde{h}_n(m)$ 的收敛过程, 其最大权系数对应于时延, 即 $\hat{D} = \arg \{\max_m [\tilde{h}_n(m)]\}$ 。可以发现两种算法都可以计算出正确结果, 最大权系数的收敛曲线清楚地和其它系数收敛曲线分离, 并且对应的 $m = 12$, 即时延为 12。但本文算法收敛速度更快, 最大权系数与其它系数更容易分离, 收敛后的波动更小。

(b) 非高斯环境噪声下的时延估计 图 2 比较了 $v_1(n)$ 为非高斯噪声的情况下, MVAPATDE 和 HOSTDE、LMSTDE 的算法性能, 仿真参数与图 1 相同。非高斯噪声由 $v_1(n) = -\text{sign}[g(n)] \cdot \ln(1 - 2|g(n)|)$ 产生。图 2(c) 的峰值出现在 0 点处, 图 2(d) 的峰值出现在 -6 点处。图 2(f) LMSTDE 算法无法分离出最大权系数, 因而也失效了, 但本文算法图 2(e) 依然保持了良好的性能。

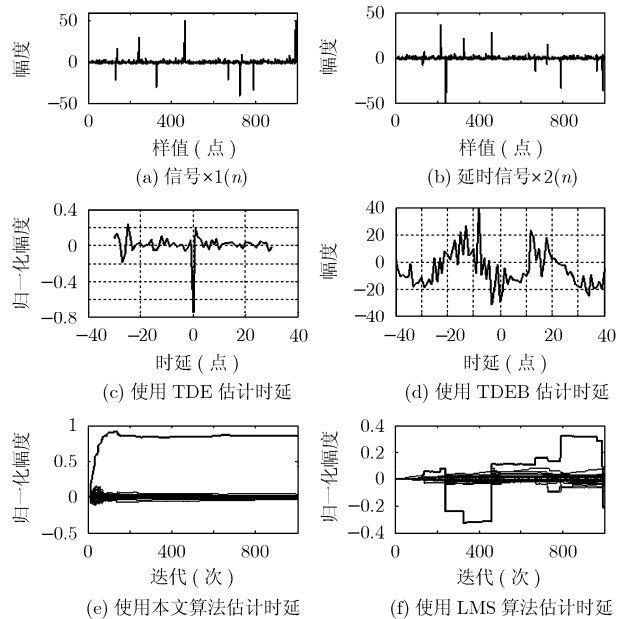


图 2 非高斯环境噪声下的时延估计
(纵坐标以 MATLAB 高斯随机函数的均值为单位 1)

(2) 不同信噪比和粗差污染率下的算法性能 表 1 比较了 $v_1(n)$ 为非高斯噪声的情况下, MVAPATDE 和 HOSTDE、LMSTDE 在不同信噪比、不同粗差污染率下的算法性能。非高斯噪声产生函数及仿真参数设置与图 2 一致。从表中可以看出, 在相同粗差污染率情况下, 高信噪比时, 各算法性能相当; 而低信噪比时, MVAPATDE 算法优于其它算法的估计结果。在相同信噪比的情况下, 由于 MVAPATDE 算法引入了稳健 M 估计, 表现出了很强的抗粗差能力, 而其它算法则在粗差污染率增大时迅速失效。

5 结束语

针对如何同时提高时延估计的稳健性和精度的难题, 本文提出了 MVAPATDE 算法。该算法无须事先假定输入信号和噪声的统计特性, 收敛速度快、估计精确; 可以抵消高斯、

表1 不同信噪比和粗差污染率下的算法性能比较

信噪比 (dB) R_{su}	污染率 ε (%)	时延估计(准确值为 12)			
		MVAPA 算法	LMS 算法	TDE 算法	TDER 算法
1.58	0	12	12	12	12
	1	12	12	12	12
	3	12	0	0	0
0	0	12	12	12	12
	1	12	0	0	-6
	3	12	0	-6	-6
-1.94	0	12	-6	0	0
	1	0	0	0	0
	3	0	0	-6	-6

非高斯甚至冲激噪声以及粗差等的影响,数据仿真表明,比现有的HOS和LMS类算法有更强的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Chen J d, Benesty J, and Huang Y. Time delay estimation in room acoustic environments: An overview [J]. *Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2006: 1-19.
- [2] 孙进才, 朱维杰, 肖卉等. 基于信号相位匹配原理的广义相关时延估计[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(1): 103-109.
- [3] Knapp C H and Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1976, 24(4): 320-327.
- [4] Nikias C L and Pan R. Time delay estimation in unknown Gaussian spatially correlated noise[J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988, 36(11): 1706-1714.
- [5] Youn D H, Ahmed N, and Carter G C. An adaptive approach for time delay estimation of band limited signals[J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1983, 31(1): 780-784.
- [6] Huber P J. *Robust Statistics*[M]. New York: Wiley, 1981: Chart1-2.
- [7] Shin H C, Sayed A H, and Song W J. Variable step-Size NLMS and affine projection algorithms[J]. *IEEE Signal Proc. Letters*, 2004, 11(2): 132-135.
- [8] 沈越弘, 杨英, 钱祖平. 稳健估计的自适应信号处理方法[J]. *电子学报*, 1996, 10(10): 57-62.
- [9] Shen Y-H, Yang Y, and Qian Z-P. Robust estimation method for adaptive signal processing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1996, 10(10): 57-62.
- [10] Shin H C and Sayed A H. Mean-Square performance of a family of affine projection algorithms[J]. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 2004, 52(1): 90-101.
- [11] Youn D H, Ahmed N, and Carter G C. On using the LMS algorithm for time delay estimation[J]. *IEEE Trans. on ASSP*, 1982, 30(5): 798-801.
- [12] Wang Zh Sh, Cheung J Y, and Chen D Z. Neural implementation of unconstrained minimum L1-norm optimization—Least absolute deviation model and its application to time delay estimation[J]. *IEEE Trans. on Circuits Syst. -II*, 2000, 47(11): 1214-1226.
- [13] Middleton D. Non-gaussian models in signal processing for telecommunications: New methods and results for class A and class B models[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(4): 1129-1149.

贾冲: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为声信号处理。
郭明喜: 男, 1978年生, 博士生, 研究方向为通信信号处理。
张雄伟: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字通信、语音信号处理、信息检索等。