

一种 HB 加权的自适应时延估计器¹

邱天爽 王宏禹

(大连理工大学电子工程系 大连 116023)

摘 要 本文提出了一种 HB 加权的自适应时间延迟估计方法。这种方法不依赖于输入信号和噪声的先验知识, 具有较高的估计精度和收敛速度, 适用于低信噪比下的时间延迟估计。

关键词 自适应, 时间延迟估计, HB 加权

中图分类号 TN911.7

1 引言

在雷达、声纳等领域, 时间延迟估计 (TDE) 受到了人们的普遍重视^[1,2], 其中广义相关时延估计方法具有较高的估计精度。HB 加权广义相关法^[3]是一种以在时延真值处信号峰值与背景噪声之比最大为准则的时延估计方法, 与最大似然法具有相同的性能。然而, 由于这种方法依赖于输入信号和噪声的先验知识, 因而在实际应用中常常遇到困难。本文提出了一种自适应实现 HB 加权时延估计器的方法。这种方法不依赖于信号和噪声的统计先验知识, 且保持了 HB 加权时延估计精度较高的优点。另一方面, 与基本 LMS 自适应时延估计方法 (LMS TDE) 相比, 这种方法具有较低的估计方差和较快的收敛速度。

2 HB 加权方法及其自适应实现

设双基元时延估计的离散时间信号模型为

$$x_1(n) = s(n) + n_1(n), \quad (1a)$$

$$x_2(n) = s(n - D) + n_2(n), \quad (1b)$$

源信号 $s(n)$ 和加性噪声 $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$ 均为正态分布的零均值平稳随机过程, 且互不相关, D 为时延真值。HB 加权函数或 HB 滤波器如下式所示^[3]:

$$W_{HB}(f) = G_{ss}(f) / [G_{x_1x_1}(f)G_{x_2x_2}(f)], \quad (2)$$

式中 $G_{ss}(f)$ 、 $G_{x_1x_1}(f)$ 和 $G_{x_2x_2}(f)$ 分别为源信号和接收信号的自功率谱。HB 加权时延估计器的自适应实现是基于两个 Roth 处理器^[4]的自适应实现的。利用信号与噪声的互不相关性, 可将 (2) 式写为

$$W_{HB}(f) = |G_{x_1x_2}(f)| / [G_{x_1x_1}(f)G_{x_2x_2}(f)], \quad (3)$$

¹ 1994-09-13 收到, 1995-10-26 定稿
国家教委博士点基金资助项目

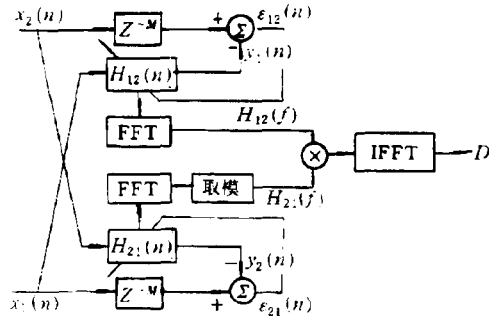


图 1 HB 加权自适应时延估计器原理图

于是广义互功率谱函数 $G_{y_1 y_2}(f)$ 为

$$G_{y_1 y_2}(f) = G_{x_1 x_2}(f) |G_{x_1 x_2}(f)| / [G_{x_1 x_1}(f) G_{x_2 x_2}(f)]. \quad (4)$$

经傅里叶逆变换, 有广义相关函数为

$$R_{y_1 y_2}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}[G_{y_1 y_2}(f)] = \mathcal{F}^{-1}[H_{12}(f) |H_{21}(f)|] \quad (5)$$

其中 $H_{12}(f)$ 和 $H_{21}(f)$ 各表示一个 Roth 处理器。由 $H_{12}(f)$ 和 $H_{21}(f)$ 的自适应实现, 即可实现 HB 加权的自适应时延估计器。图 1 为其原理图。

3 性能分析

由 (3) 式可知, HB 加权对互功率谱 $G_{x_1 x_2}(f)$ 起到两个作用: 其一是加重了 $G_{x_1 x_2}(f)$ 中的源信号成分, 其二是对输入互功率谱以两输入信号的自功率谱进行归一化, 这实际上是对 Roth 处理器预白化方法的改进。可以证明, HB 加权时延估计的方差为

$$\text{Var}[\hat{D}] = \frac{3}{8\pi^2 T} \cdot \frac{1 + 2\text{SNR}}{(\text{SNR})^2} \cdot \frac{1}{f_2^3 - f_1^3} \quad (6)$$

式中 T 为观察时间, f_2 和 f_1 分别为信号通带的上下限频率。若 SNR 满足信噪比门限^[5], 则其估计方差可以达到克拉美罗界。

HB 加权函数需要有关输入信号功率谱的先验知识, 这在许多实际应用中是难于得到的。而利用有限数据估计功率谱又不可避免地要产生误差。这样采用自适应系统将时延估计转化为滤波器系统的参数估计问题, 可以避开功率谱估计的麻烦, 尤其适用于信号和噪声功率谱未知或时变的场合。

由图 1 可知, HB 加权自适应时延估计器是由两个 LMS 自适应噪声抵消系统构成的。 $H_{12}(n)$ 和 $H_{21}(n)$ 的作用是在各自的参考输入端自动插入一段与基本输入端相等的时间延迟, 以保证两路信号最大的相关性。若输入信号和噪声满足平坦谱条件, 且有 $G_{n_1 n_1}(f) = G_{n_2 n_2}(f) = G_{nn}(f)$, 则当自适应迭代收敛时, 最佳权矢量的频域形式可表示为

$$H_{12\text{opt}}(f) = G_{x_1 x_2}(f) / G_{x_2 x_2}(f) = G_{ss}(f) e^{-j2\pi f D} / [G_{ss}(f) + G_{nn}(f)]. \quad (7)$$

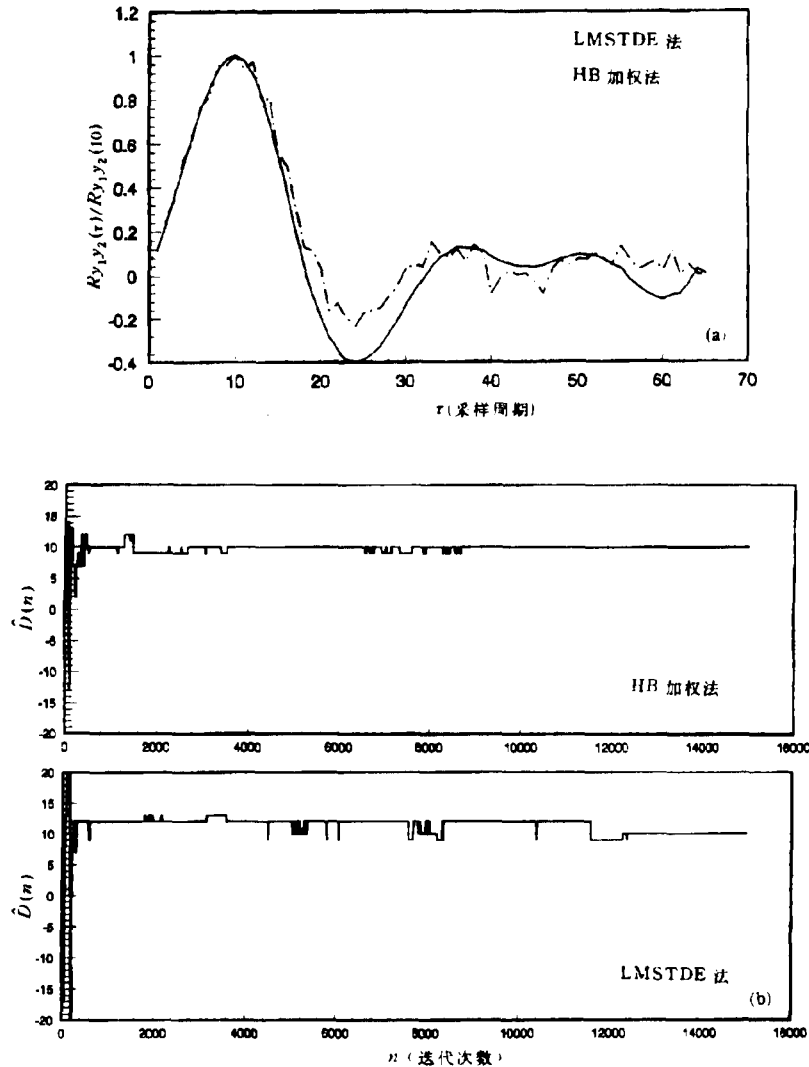


图 2 计算机模拟的结果 ($\hat{D}(n)$ 的单位为采样周期)

(a) 两种方法的权矢量分布曲线, (b) 两种方法的峰值点跟踪曲线

另一最佳权矢量与此类似。此时, 自适应滤波器 $H_{12}(n)$ 输出噪声功率 $G_{y_1 n}(f)$ 为

$$G_{y_1 n}(f) = G_{nn}(f) |H_{12\text{opt}}(f)|^2, \quad (8)$$

则系统输出信噪比与输入信噪比之比为

$$(\text{SNR})_{\text{out}}/(\text{SNR})_{\text{in}} = G_{nn}(f)/G_{y_1 n}(f) = [G_{ss}(f) + G_{nn}(f)]^2/G_{ss}^2(f) = [1 + 1/(\text{SNR})_{\text{in}}]^2. \quad (9)$$

显然, (9) 式的比值大于 1, 即经过自适应 HB 加权处理之后, 系统的信噪比有所改善。

一般来说, LMS 自适应滤波器的收敛速度取决于其自相关阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 与最小特征值 $\lambda_{\min}$ 之比和所选定的收敛因子 μ 之值。对于自适应时间延迟估计问题来说, 收敛速度还与

信号的信噪比有关^[6], 信噪比越低, 收敛越慢。这是因为自适应滤波器总是先调整自身的参数以适应信号的信噪比, 然后才与时间延迟相匹配。由于 HB 加权的自适应时延估计器改善了信噪比, 从而加快了自适应时延估计的收敛过程。计算机模拟表明, HB 加权自适应时延估计器的收敛速度明显快于 LMS TDE。

4 计算机模拟

用白噪声发生器产生三组正态分布, 均值为零, 方差为 1 的随机序列, 并按 (1) 式构成两路输入信号。其中 $s(n)$ 为一通带宽度 $\Delta f=100\text{Hz}$, 采样频率 $f_s=2048\text{Hz}$ 的 10 阶 Butterworth 低通滤波器的输出。时延真值 $D=10$ 个采样周期。信噪比 (SNR) $\text{dB} = 10 \log_{10}(\sigma_s^2/\sigma_n^2)$ 设定为 -10dB , 自适应滤波器的阶数为 64 阶, 图 2 给出了计算机模拟的结果。由图可见, HB 加权自适应时延估计器的收敛速度快于 LMS TDE 方法。此外, HB 加权法的分布曲线很平滑, 表现出很好的稳定性, 而 LMS TDE 法则有较大的波动。

5 结束语

本文研究了 HB 加权广义相关时延估计的自适应实现问题。理论分析和计算机模拟表明, 与 HB 加权广义相关法相比, 这种方法不依赖于对输入信号和噪声先验知识的了解, 保持了 HB 处理器估计精度较高的优点。与 LMS TDE 法相比, 这种方法具有较快的收敛速度和较高的时延估计精度, 适用于低信噪比情况下的时延估计。

参 考 文 献

- [1] Hannan E J, Thomson P J. Journal of Time Series Analysis. 1988, 9(1): 21-33.
- [2] 王宏禹. 现代谱估计. 南京: 东南大学出版社, 1990, 361-363.
- [3] Hassab J C, Boucher R E. IEEE Trans. on ASSP, 1979, ASSP-27(4): 373-380.
- [4] Roth P R. IEEE Spectrum, 1971, 8(4): 62-70.
- [5] Weinstein E, Weiss A J. IEEE Trans. on ASSP, 1984, ASSP-32(5): 1064-1077.
- [6] Ho K C, Chan Y T, Ching P C. IEEE Trans. on ASSP, 1993, ASSP-41(7): 2289-2299.

AN HB WEIGHTED ADAPTIVE TIME DELAY ESTIMATION

Qiu Tianshuang Wang Hongyu

(Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract This paper proposes an HB weighted adaptive time delay estimator. The theoretical analysis and the computer simulation show that this new method does not depend on the knowledge about input signals and it has a higher precision and faster convergence speed. Under low SNR conditions, the performances of this method are better than those of LMS TDE obviously.

Key words Adaptive, Time delay estimation, HB weighted

邱天爽: 男, 1954 年生, 工程师, 博士, 现从事信号处理方面的教学和研究工作。

王宏禹: 男, 1929 年生, 教授, 博士生导师, 现从事信号处理方面的教学和研究工作。