

智能天线自适应滤波器算法研究及分析比较*

万政伟, 惠晓威

(辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 对几种最常见的智能天线 LMS 自适应滤波器算法进行了较全面的性能比较, 并利用 Matlab 程序仿真分析了不同算法的误差、收敛速度和稳定性等。分析结果表明, 改进的 LMS 自适应滤波器算法相对于传统的 LMS 自适应滤波器算法在减小误差方面优势明显。

关键词: 智能天线; 算法; 自适应; 收敛速度; 滤波

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

Analysis and comparison of adaptive filtering algorithm for smart antenna

WAN Zheng Wei, HUI Xiao Wei

(Electronics and Information Engineering College, Liaoning Technical University, huludao 125105, China)

Abstract: The performances of several common LMS adaptive filter algorithms for smart antenna are given, and analysis of the error, convergence speed and stability of different algorithms with Matlab program. The results show that improved LMS algorithms can significantly help the smart antenna receive signals with less error.

Key words: smart antenna; algorithm; adaptive; convergence rate; filtering

目前国内外的学术和科研机构都很重视智能天线的研究和开发, 不仅进行理论研究, 还建立了实验平台进行模拟仿真, 研究人员正在考虑在新的移动通信体制中引入智能天线技术^[1]。人们已提出了很多智能天线算法, 如 LMS 算法、RLS 算法、SMI 算法等。LMS 算法是智能天线的一个基本而重要的算法, 基于该算法而设计的各种形式的阵列天线已广泛地应用于各种自适应天线系统, 它们在改善天线系统性能方面发挥着重要的作用。但是众多的算法给人们在设计智能天线选取算法时带来不便。本文将从原理、性能等方面对 LMS 类自适应滤波器算法进行研究。

1 算法分析

1.1 传统 LMS 算法

LMS 算法习惯上被称为 Widrow and Hoff LMS 算法, 是经典的自适应滤波器算法, 具有实现简单、计算量小等优点, 同时也存在收敛速度慢等缺点, 但是仍然得到普遍应用。

LMS 算法是一种自适应波束赋形算法, 如图 1 所示, 可分为波束赋形和自适应权重控制 2 个部分, 通过迭代的方法来求解 MMSE 准则下的最优权重。具体过程如下^[2]:

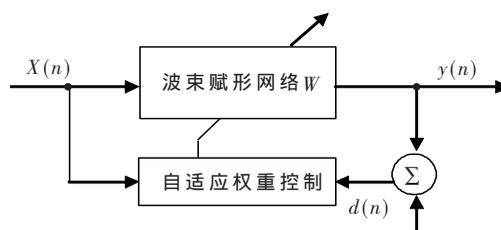


图 1 波束赋形器原理图

在 M 阵元的均匀直线阵中, 假设统计是平稳的, 在时刻 n , $W(n)=[b_0(n), b_1(n), \dots, b_{M-1}(n)]^T$ 为加权向量, $X(n)=[X(n), X(n-1), \dots, X(n-M+1)]^T$ 为参考输入向量, $d(n)$ 是主输入信号, $y(n)$ 是期望输出值, $e(n)$ 既是误差信号, 也是系统输出值, M 是滤波器长度。LMS 算法的理论依据有: 最小均方误差准则和最陡下降原理。滤波器算法的目的是使输出信号 $y(n)$ 与期望信号 $d(n)$ 之间的均方误

* 基金项目: 辽宁省教育厅基金项目资助(2008D028)

综述与评论 Review and Comment

差 $E(e^2(n))$ 最小。根据维纳-霍夫方程, 最小均方误差 $\varepsilon_{\min}=E(e^2(n))=\sigma_d^2-p^T R^{-1} p=\sigma_d^2-p^T W^*$, 其中, $W^*(n)$ 为 $W(n)$ 的估计。由最速下降法可知, ε 面上的某点负梯度方向就是 ε 下降最快的方向, 因此, 权矢量 $W_{i+1}(n)$ 等于 $W_i(n)$ 和一个正比于梯度 ∇_i 的负值变化量之和, 即:

$$W_{i+1}(n)=W_i(n)-\mu \nabla_i \quad (1)$$

再由最速梯度公式 $W_0(n+1)=W_0(n)-\mu(dW_0(n)/dW_0(n))$, 可得: $W_{i+1}(n)=W_i(n)-2\mu e_i X_i$, 其中 $e_i=d_i-X_i$ 。

综上所述, LMS 算法可以归结为以下 3 步:

(1) 计算误差信号: 已知时刻 n 的滤波器滤波系数矢量估值 $W(n)$ 、输入信号矢量 $X(n)$ 及期望信号 $d(n)$, 得出:

$$e(n)=d(n)-W^T(n)X(n) \quad (2)$$

(2) 更新滤波器系数矢量估值:

$$W(n+1)=W(n)+e(n)X(n) \quad (3)$$

(3) 循环执行: 将时间指数 n 增加 1, 返回到第 1 步循环执行, 直到滤波器输出信号达到稳定状态为止。

1.2 变步长 LMS 算法

在自适应滤波器设计过程中, 调整自适应滤波器的失调量会影响其收敛速度, 为了解决失调量和收敛速度之间的矛盾, 人们提出了变步长 LMS 算法^[3]。

假设 $\mu(n)$ 为自适应滤波器的步长, $e(n)$ 是自适应滤波器输出信号误差, 则:

$$\mu(n)=\beta/(1+\exp(-\alpha|e(n)|))-0.5) \quad (4)$$

该算法通过调整步长参数可以增大收敛速度和跟踪速度同时减小稳态误差。该算法的缺点是: sigmoid 函数是非线性函数, 在误差 $e(n)$ 接近 0 处不连续, 变化很大, 不具有缓慢变化的特性, 且 sigmoid 函数比较复杂, 不易实现。

1.3 归一化 LMS 算法

通过上面传统 LMS 算法的分析可知, LMS 算法的稳定性和收敛速度都与自适应滤波器权系数矢量的系数和输入信号的功率有很大关系。因此, 在自适应滤波器的设计中, 可以通过对收敛因子进行归一化来实现自适应滤波器输出信号的稳定和收敛, 即归一化 LMS 算法(NLMS)。该算法采用变步长的方法来缩短自适应收敛过程, 变步长的公式为:

$$W(n+1)=W(n)+\mu\gamma+X^T(n)X(n)e(n)X(n) \quad (5)$$

式中, $e(n)X(n)$ 为滤波权矢量迭代更新的调整量, 参数 μ 为固定收敛因子。步长是输入信号 $X(n)$ 的非线性变量, 随着 γ 的增大, 步长逐渐变小, 从而加速了收敛过程。

1.4 泄露 LMS 算法

为了减小或消除通道误差, 在通信系统的自适应差分脉冲编码中, 常用到的一种算法为泄露 LMS 算法。泄露 LMS 算法的迭代公式可以表示为:

$$w(n+1)=\gamma w(n)+2\mu e(n)X(n) \quad 0<\gamma<1 \quad (6)$$

通常取 γ 近似为 1。若 $\gamma=1$, 则泄露 LMS 算法变为 LMS 算法。对于传统 LMS 算法, 当 μ 值突然变为 0 时,

权系数矢量将不再发生变化而保持为 0 时的值。而对于泄露 LMS 算法, 当 μ 值变为 1 之后, 滤波器的权系数矢量将逐渐变化, 并最终变为 0 矢量, 这一过程称为泄露。

在无噪声的条件下, 泄露 LMS 算法的性能不如传统的 LMS 算法好, 而且泄露 LMS 算法的权系数矢量和最佳权矢量 w_{opt} 之间总是存在偏差, 所以泄露 LMS 算法是一种有偏差的 LMS 算法^[1]。

1.5 极性 LMS 算法

现代数字通信系统对信号处理精度和传输速度提出很高要求, 因此, 用于设计通信系统的各种算法必须满足精度和速度的要求。在智能天线的设计中, 为解决速度问题, 出现了极性算法。极性算法是一种自适应算法, 利用它可以减少计算量, 从而有效地简化了相应的硬件电路, 使设计易于实现。

1.6 其他的 LMS 类算法

以上介绍了几种比较常见的 LMS 类算法, 另外还有其他的 LMS 类算法: 如 M-Max NLMS 算法、Periodic LMS 算法等多种在传统 LMS 算法基础上改进的算法, 这些算法共同的特点是通过更新滤波器的系数矢量, 从而降低运算量。

2 仿真结果

为了对改进的 LMS 算法的性能进行验证, 以归一化 LMS 算法为例, 利用 Matlab 程序分别对传统的 LMS 算法和归一化 LMS 算法的误差权矢量及实际输出信号波动进行了仿真。在输入信号能量和信噪比相同的情况下, 利用传统的 LMS 算法和归一化 LMS 算法进行信号调制, 利用 Matlab 程序仿真出其各自的误差和信号波动的结果如图 2~图 4 所示。

仿真结果: 用 NLMS 算法设计的自适应滤波器系数^[4]如表 1 所示。

通过仿真结果观察不同步长情况下的平均误差曲线, 如图 4 所示。可以看出, 步长越小, 平均误差越小, 但收敛速度越慢, 为了保证精度, 必然牺牲收敛速度; 当降低信噪比时, 尽管 20 次平均仍有好的结果, 但单次实验的误差曲线明显增加, 这是更大的噪声功率对随机梯度的影响^[5]。

如图 2、图 3 所示, 与传统的 LMS 算法相比, 归一化 LMS 算法在减小信号误差方面有一定的改进。但由于在收敛过程开始时, 误差略微大, 初始化收敛过程较慢, 因而收敛速度相对于传统的 LMS 算法没有明显的改善。

从 NLMS 算法、泄露 LMS 算法和极性 LMS 算法的递推公式可以看出, 它们均可视为变步长算法^[6]。为了确保收敛速度, μ 必须取很小的值, 由于 $e(n)$ 在收敛过程开始时一般比较大, 从而造成泄露 LMS 算法和极性 LMS 算法的初始化收敛过程都比较慢。通过仿真分析可以看出: 对于高斯信号, NLMS 算法的收敛性能非常接近于传统的 LMS 算法, 即 NLMS 算法的收敛性能最好。

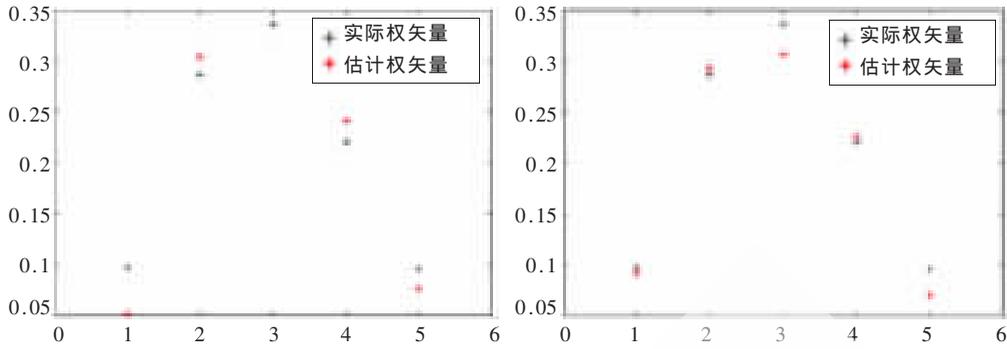


图2 LMS、NLMS 算法的实际权矢量与误差权矢比较

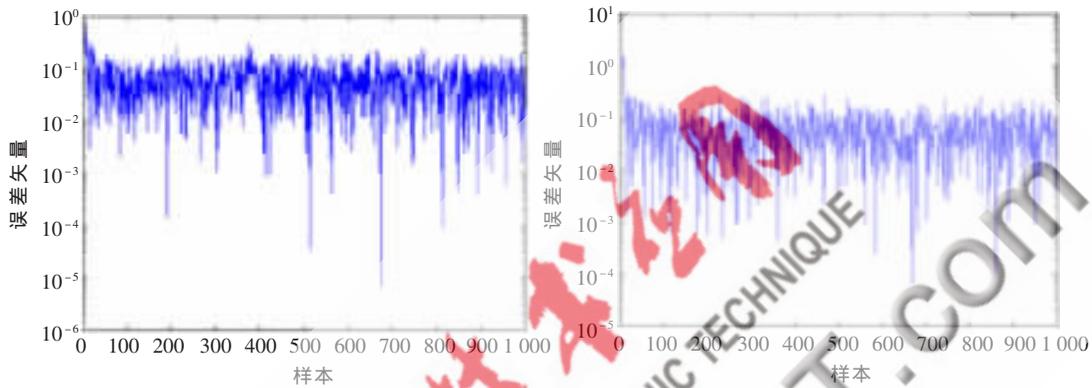


图3 LMS、NLMS 算法实际输出信号误差曲线比较

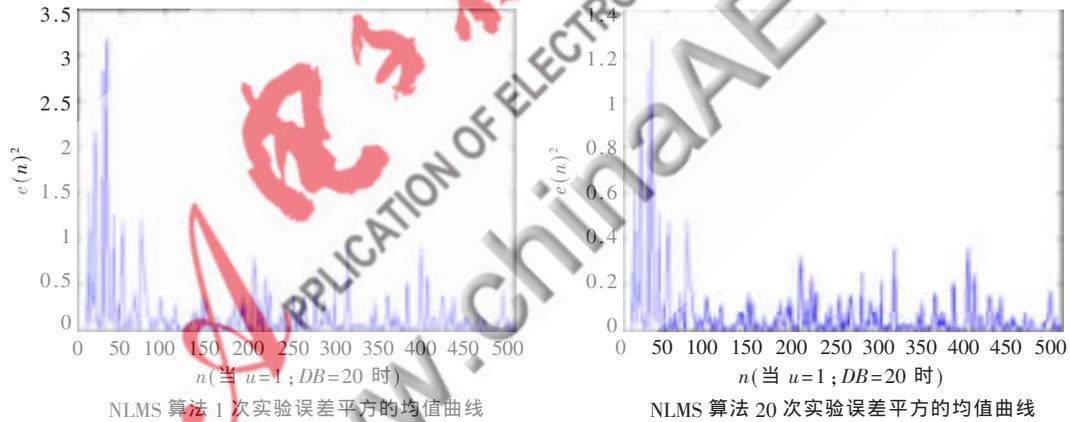


图4 NLMS 算法试验误差平方均值曲线比较

表1 用 NLMS 算法设计的自适应滤波系数

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|---------|----------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 1次 | 0.050 3 | -0.073 0 | 0.046 1 | 0.013 2 | 0.120 2 | -0.421 6 | 1.415 7 | -0.498 5 | 0.197 1 | -0.034 3 | 0.013 9 |
| 20次 | 0.012 8 | 0.033 0 | -0.027 5 | -0.076 5 | 0.151 2 | -0.440 0 | 1.339 7 | -0.461 0 | 0.154 5 | 0.003 1 | 0.026 6 |

改进的 LMS 自适应滤波器算法使输出信号的误差明显减小，避免了传统的 LMS 自适应滤波器算法由于误差大而导致智能天线接收信号精度不高的缺点，这些在智能天线设计中有着广泛的应用。

参考文献

[1] 黄武襄, 王振五. CDMA 系统中的几种智能天线自适应算法[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2004, 16(4).
 [2] 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-59.

[3] 张秦, 冯存前. 变步长 LMS 算法及其在自适应消噪中的应用[J]. 现代电子技术, 2003, 26(14): 14-18.
 [4] 李正周. MATLAB 数字信号处理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 10-78.
 [5] 刘铁铮, 漆兰芬. 智能天线 LMS 算法的分析及实现方案[J]. 科学技术与工程, 2006(9): 36-39.
 [6] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 10.

(收稿日期: 2009-05-14)