

改进的 LMS 算法及其在雷达干扰对消系统中的应用

龙戈农, 童宁宁, 李洪兵, 田野

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:为提高雷达系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力,对雷达干扰对消系统及其自适应滤波算法进行了分析,给出了一种改进的变步长 LMS 自适应滤波算法。该算法利用类 Sigmoid 函数去调节步长,减少了运算量,并在类 Sigmoid 函数中利用误差信号的自相关值调整步长,从而解决了算法较快的收敛速度与较小的稳态误差之间的矛盾,并且降低了算法对输入噪声的敏感性。将该算法应用到自适应干扰对消系统中进行了计算机仿真验证,计算机仿真结果与理论分析一致,表明了该算法具有一定的可行性和优越性。

关键词:LMS 算法;自适应干扰对消;收敛速度;收敛结果

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.05.007

中图分类号:TN975 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)05-0031-04

现代战争的突出特点是首先打击敌方的雷达指挥系统,造成防空体系瘫痪^[1]。为提高雷达系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力,针对雷达系统的各种电子防御技术也受到各国的高度重视,研究出更加有效的抗干扰技术、方法和手段,确保雷达在复杂电磁干扰中发挥作战效能,成为从事雷达装备设计、使用和作战人员的一项重要任务。自适应干扰对消技术就是一种典型的应用极为广泛的抗干扰技术,其性能好坏由所采用的自适应滤波算法决定。LMS 算法作为自适应干扰对消系统的一种典型滤波算法^[2-5],因其结构简单、稳定性好、易于硬件实现等诸多优点而被广泛用于雷达抗干扰。固定步长 LMS 算法在收敛速度、跟踪速率及权失调噪声之间的要求是相互矛盾的,寻求收敛速度快、稳态误差小、改善因子高^[6-8]的自适应滤波算法是研究人员不断努力追求的目标。本文对时域变步长的改进 LMS 算法进行了研究,并在雷达自适应干扰对消中进行了应用仿真。

1 自适应干扰对消

自适应干扰对消系统结构见图 1。

主通道的输入信号 $d(n)$ 不仅包含有用信号(目标信号) $s(n)$,还包含干扰信号 $x_0(n)$ 。参考通道的干扰信号为 $x(n)$, $x(n)$ 与 $x_0(n)$ 均来自同一干扰源,两者相关,但二者的到达时间和幅度并不相同。接收的干扰信号 $x(n)$ 由自适应滤波器进行加权调整,使加权后的参考信号 $y(n)$ 在某一最佳准则下(如最小均方准则)最接近主通道的干扰信号 $x_0(n)$,用求和器将 2 个通道的信号相减,即可将主通道的干扰信号 $x_0(n)$ 对消掉而保

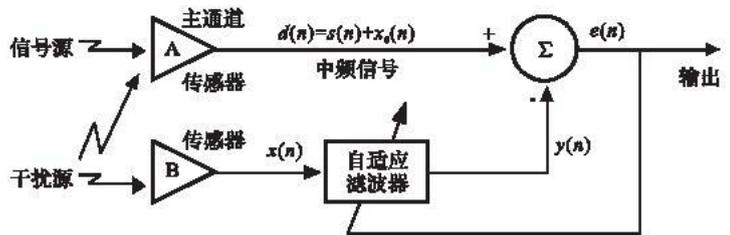


图 1 自适应干扰对消系统

Fig. 1 Adaptive jamming cancellation system

* 收稿日期:2009-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60601016)

作者简介:龙戈农(1979-),男,陕西富平人,讲师,主要从事雷达信号处理和电子对抗技术研究;

E-mail: longgenong@yahoo.com.cn

童宁宁(1963-),女,江苏太仓人,教授,主要从事雷达系统建模和自适应信号处理技术研究。

留有用信号(目标信号) $s(n)$,从而达到干扰对消的目的。

由图1可以求出误差信号 $e(n)$ 为:

$$e(n) = d(n) - y(n) = s(n) + x_0(n) - y(n) \quad (1)$$

将式(1)两边平方,得到:

$$e^2(n) = s^2(n) + [x_0(n) - y(n)]^2 + 2s(n)[x_0(n) - y(n)] \quad (2)$$

对式(2)两边取期望,并考虑到 $s(n)$ 与 $x_0(n)$ 和 $y(n)$ 不相关,得到:

$$E[e^2(n)] = E[s^2(n)] + E\{[x_0(n) - y(n)]^2\} + 2E\{s(n)[x_0(n) - y(n)]\} = E[s^2(n)] + E\{[x_0(n) - y(n)]^2\} \quad (3)$$

由于信号功率 $E[s^2(n)]$ 不受自适应滤波器权系数调节的影响,因此,调节自适应滤波器的权系数使 $E[e^2(n)]$ 最小时,最小误差输出功率为:

$$E_{\min}[e^2(n)] = E_{\min}\{[d(n) - y(n)]^2\} = [s^2(n)] + E_{\min}\{[x_0(n) - y(n)]^2\} \quad (4)$$

显然,当 $E[e^2(n)]$ 达到最小时, $E\{[x_0(n) - y(n)]^2\}$ 也达到最小,因此滤波器输出 $y(n)$ 为主通道干扰信号 $x_0(n)$ 的最佳均方估计。这样,在最小均方误差意义下,系统输出误差 $e(n)$ 最小,表明自适应滤波器输出 $y(n)$ 最接近主通道的干扰信号 $x_0(n)$,等效于系统输出误差 $e(n)$ 最接近有用信号 $s(n)$,大大提高了对消系统输出端的信干比。因此,在最小均方误差准则下,自适应干扰对消系统的核心部件——自适应滤波器通过自动调节本身的单位样本响应达到最优维纳滤波。

2 LMS 算法

基于最速下降法的固定步长最小均方误差(LMS)算法迭代公式如下:

$$e(n) = d(n) - \mathbf{X}^T(n)\mathbf{W}(n) \quad (5)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{X}(n) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T$ 为时刻 n 的参考通道输入信号矢量; $\mathbf{W}(n) = [W_0(n), W_1(n), W_2(n), \dots, W_{M-1}(n)]^T$ 为 n 时刻自适应滤波器的权系数; M 为滤波器的阶数; $d(n)$ 为主通道输入信号; $e(n)$ 为误差; μ 为收敛步长,控制稳定性和收敛速度。

在实际中应用LMS算法时,如果要求较高的收敛速度,则需要采用较大的收敛步长 μ ,但与之俱来的是收敛之后的稳态误差也比较大,收敛精度较差;而如果要保持很小的稳态误差和良好的收敛精度,则需要较小的收敛步长 μ ,这样又会导致收敛速度变慢。即固定步长的LMS滤波算法在收敛速度、时变系统跟踪精度与收敛精度方面对步长因子 μ 的要求是相互矛盾的。

3 改进的LMS算法

为了克服以上矛盾,人们提出了许多变步长的自适应滤波算法,即在LMS算法的权系数递推中采用时变步长代替标准LMS算法中的固定步长,通常称为变步长LMS算法。文献[9]给出了基于Sigmoid函数的变步长LMS算法。该算法在满足步长调整原则的同时能够获得较快的收敛和跟踪速度,但该算法在误差 $e(n)$ 接近零处 $\mu(n)$ 变化太大,不具有缓慢变化的特征,导致自适应稳态阶段仍有较大的步长变化。文献[10]提出了一种基于类Sigmoid函数的变步长LMS算法(NSVS-LMS),其变步长因子的函数形式较文献[9]的函数要简单一些,如式(7)所示:

$$\mu(n) = \beta\{1 - \exp[-\alpha|e(n)|^2]\} \quad (7)$$

该变步长因子在误差接近于零处具有缓慢变化的特性,克服了Sigmoid函数在自适应稳态阶段步长调整过快的缺陷。但该算法的参数 α 和 β 是固定的,如果参数选取不当会引起较大误差。

为了在初始收敛阶段具有较大的 α, β ,从而具有较大的调整步长 $\mu(n)$,当算法逐渐进入稳态过程时, α, β 也相应减小,从而减小调整步长 $\mu(n)$;同时为了降低算法对输入噪声的敏感性,用 $|e(n)e(n+1)|$ 代替 $|e(n)|^2$ 来调整步长 $\mu(n)$,本文对算法进行了改进:

$$\mu(n) = \beta(n)\psi(n) \quad (8) \quad \psi(n) = 1 - \exp[-\alpha(n)|e(n)e(n-1)|] \quad (9)$$

$$\beta(n) = \gamma\beta(n-1) + (1-\gamma)|e(n)e(n-1)| \quad (10) \quad \alpha(n) = |e(n)/e(n-1)|^k, k > 0 \quad (11)$$

式中 $0 < \gamma < 1$, 用于控制参数 $\beta(n)$ 的变化; $\alpha(n)$ 控制步长变化的形状和速度, 若当前误差 $e(n)$ 大于上次误差 $e(n-1)$ 时, $\alpha(n) > 1$, 步长调整力度较大; 若当前误差 $e(n)$ 小于上次误差 $e(n-1)$ 时, $\alpha(n) < 1$, 步长调整力度较小; 若当前误差 $e(n)$ 等于上次误差 $e(n-1)$ 时, $\alpha(n) = 1$, 步长调整力度维持不变。特别是当上次误差 $e(n-1) = 0$ 时, 尽管 $\alpha(n) \rightarrow \infty$, 但 $\exp(-\infty) \rightarrow 0$, 使得 $\mu(n) = \gamma\beta(n-1)$, 即系统不会出现不稳定(奇异)的情况。参数 k 通过调整 $\alpha(n)$ 的变化来控制步长 $\mu(n)$ 的变化速度。图 2 为 $\beta=2.0, \gamma=0.98$, 分别取 $k=2, 1, 0.5, 0.1$ 时, 步长随误差变化的曲线。由图 2 可知, k 值越大, 步长变化越迅速。如果要求快速收敛, 可适当增大 k 值; 如果要求收敛精度高(稳态失调噪声小), 可适当减小 k 值。为保证收敛精度, 取 $k=0.5$, 同时增加以下约束条件:

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_{\max}, & \mu(n) > \mu_{\max} \\ \mu(n), & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中 $0 < \mu_{\max} < \frac{1}{\lambda_{\max}}$ 。

4 计算机仿真

利用图 1 所示的自适应干扰对消系统进行仿真。

仿真条件: 雷达信号为单频正弦连续波信号, 信号幅度 0.01, 系统输入信干比 -42 dB, 敌方施放干扰信号为遮盖性高斯白噪声, 自适应滤波器阶数 $N=2$, 滤波算法分别选用固定步长 LMS 算法、文献[10]提出的 NSVS-LMS 算法以及本文的改进算法。3 种算法的仿真结果见图 3。

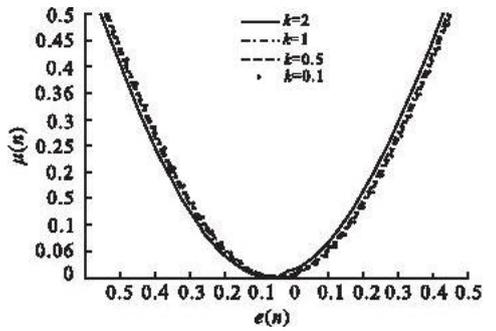


图 2 不同 k 值, 步长随误差变化的曲线
Fig. 2 The step size change with the error, in the k of different

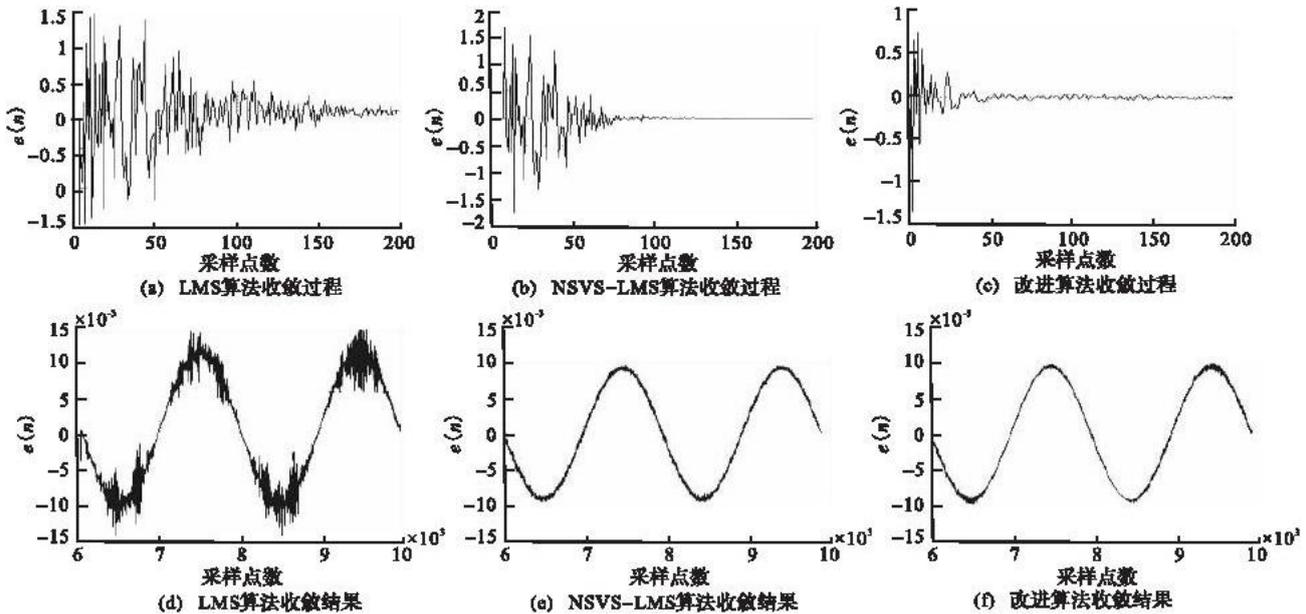


图 3 LMS、NSVS-LMS、本文算法自适应滤波仿真结果

Fig. 3 The result of LMS, NSVS-LMS and this paper algorithms

对图 3 的仿真结果进行分析, 从 3 种算法的收敛速度来说, LMS 算法的收敛速度是最慢的, 约在 200 个采样点收敛, NSVS-LMS 算法的收敛速度较 LMS 算法有了很大的提高, 约在 100 个采样点之后收敛, 而本文改进算法的收敛速度最快, 约在 60 个采样点之后就已经达到收敛状态。从 3 种算法的稳态结果来比较, LMS 算法的收敛结果最差, NSVS-LMS 算法的收敛结果改善很大, 而本文改进算法的收敛结果最好。经计算, LMS 算法的改善因子 G 约为 24 dB, NSVS-LMS 算法的改善因子约为 34 dB, 本文改进算法的改善因子 G 约为 36 dB, 改进算法的改善因子比固定步长 LMS 算法高很多, 与 NSVS-LMS 算法基本相当。

5 结束语

本文给出了一种改进的变步长 LMS 自适应算法,该算法利用类 Sigmoid 函数去调节步长,并用误差信号的自相关值调整步长,解决了算法收敛时间与稳态误差的矛盾,并降低了算法对输入噪声的敏感性。由理论分析和计算机仿真及计算结果可知,与 LMS 算法、NSVS-LMS 算法相比,新的改进算法具有较高的收敛速度、较小的稳态误差和较高的改善因子,表明了新算法的可行性和优越性。

参考文献:

- [1] 张永顺. 雷达电子战原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
ZHANG Yongshun. Principle of Radar Electronic Warfare[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2006. (in Chinese)
- [2] 胡可欣,胡爱明. 自适应旁瓣对消在雷达中的应用[J]. 火控雷达技术,2006,10(3):42-43.
HU Kexin, HU Aiming. The Adaptive Side-lobe Cancelling Application in Radar[J]. Firepower Control Radar Technology, 2006, 10(3): 42-43. (in Chinese)
- [3] Radu Ciprian Bilcu. On Length Adaptation for the Least Mean Square Adaptive Filters[J]. Signal Processing, 2006, 86(9): 3089-3094.
- [4] SUN Junxiang, ZHENG Ruirui. Application of Variable Step LMS Algorithm Based on Iterative Time in ECG Signal Abstraction [C]//The 2nd IEEE International Conference. [S. l]:IEEE Press,2008:5-7.
- [5] Ma ´rcio Holsbach Costa. A Noise Resilient Variable-Step-Size LMS Algorithm[J]. Signal Processing,2008,88(2):733-748.
- [6] Evan J B,Xue P,Liu B. Analysis and Implementation of Variable Step Size Adaptive Algorithm [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1993, 41(8): 2517-2535.
- [7] Bilcu R C,Kuosmanen P. A New Variable Step LMS Algorithm for Transform Domain[C]//The 8th IEEE International Conference. [S. l]:IEEE Press,2001:1161-1164.
- [8] 李洪兵. 时域变步长最小均方自适应滤波算法研究[D]. 西安:空军工程大学,2006.
LI Hongbing. Research on Least Mean Square Adaptive Filtering Algorithms of Variable-Step-Size in Time Domain[D]. Xi'an: Air Force Engineering University,2006. (in Chinese)
- [9] 覃景繁,韦岗. 基于 S 型函数的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 无线电工程,1996,26(4):44-47.
QIN Jingfan, WEI Gang. A Variable-Step-Size LMS Adaptive Filtering Algorithms Based on Sigmoid Function[J]. Radio Engineering of China,1996,26(4):44-47. (in Chinese)
- [10] 冯存前. 干扰机自适应收发隔离技术及其算法研究[D]. 西安:空军工程大学,2004.
FENG Cunqian. Algorithms and Research on Adaptive Transmitter-Receiver-Isolation Technology in the Airborne Electron Jammer[D]. Xi'an: Air Force Engineering University,2004. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

A Refrained LMS Algorithm and Its Application in Radar Jamming Cancellation System

LONG Ge-nong, TONG Ning-ning, LI Hong-bing, TIAN Ye

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Radar Jamming Cancellation system and some adaptive filtering algorithms are studied. Some variable step size LMS algorithms in literature are analyzed, based on which an improved one is presented. For this algorithm the similar sigmoid function is used to adjust the step size, thus the quantity of operation is greatly reduced and in the similar sigmoid function the self-correlation value of the error signal is used to adjust the step size, so the contradiction between the convergence speed and steady-state error is solved. At the same time, the use of LMS algorithm decreases the noise sensitivity. The computer simulation results confirm the theoretical analysis and show that the algorithm is of some feasibility and superiority.

Key words: LMS algorithm; adaptive jamming cancellation; convergence speed; convergence result