

变步长自适应算法在雷达旁瓣对消系统中的应用

张陆游, 张永顺, 潘克战
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:雷达旁瓣对消系统的具体结构是由该系统所采用的性能量度准则及其所对应算法决定的, 雷达旁瓣对消技术是提高雷达电子战能力的关键技术之一, 为了提高雷达旁瓣对消中算法的收敛速度和稳态性能, 针对目前变步长自适应滤波算法中存在的收敛速度慢、稳定性差的问题, 提出了一种基于变步长改进型S函数的LMS算法, 仿真表明: 采用该算法的旁瓣对消系统可快速有效地抑制干扰, 有效提高旁瓣对消系统的实时性和稳态性能; 并根据实际应用环境的需要进行了实验验证, 实验数据表明: 当存在接收机内部噪声和两点相干干扰源时, 采用双相干干扰对消系统好于单个相干干扰对消系统。

关键词:变步长LMS算法; 旁瓣对消; 相干干扰对消器

中图分类号: TN975 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)04-0025-04

在现代战争中, 电磁环境的日益复杂对雷达的抗干扰技术提出了越来越高的要求, 雷达通过在主天线附近安装一个或几个辅助天线, 构成旁瓣对消系统, 可抑制从主天线旁瓣进入的干扰, 达到抗干扰的目的^[1-3]。

一般来说, 雷达旁瓣对消系统的具体结构是由该系统所采用的性能量度准则及对应的算法决定的^[4-5], 所用准则、算法的不同会影响旁瓣对消系统的结构与性能。自适应滤波算法可以针对不同时刻的接收信号, 自适应地调节滤波参数, 以适应信号和噪声未知的或随机变化的统计特性, 准确地提取有用信号。本文针对目前变步长自适应滤波算法中存在的收敛速度慢、稳定性差的问题, 对雷达旁瓣对消系统变步长自适应算法进行了研究, 并对该算法的抗干扰性能进行了仿真。

1 旁瓣对消系统设计

1.1 旁瓣对消系统理论

旁瓣对消系统有闭环和开环两种, 闭环即反馈控制技术^[6], 是通过逐渐改变加权系数来达到最佳对消, 除去干扰, 提取出有用信号, 闭环对消系统一般具有较好的稳态误差, 因此, 在雷达系统中有着广泛的应用^[7-9]。典型的闭环旁瓣对消系统中 V_0 为主天线接收的干扰信号, V^T 为辅助天线接收的 N 维干扰信号, $V^T = [V_1, V_2, \dots, V_N]$ 。通过正交混合器, 辅助天线接收的信号分为同相信号 V_{Ij} 和正交信号 V_{Qj} , 分别对其进行加权、求和。产生与主通道等幅反相的信号, 主天线减去该信号, 从而实现对消。

输出信号为

$$y(n) = V_0 + \sum_{j=1}^N W_{Pj} V_{Pj} \quad (1)$$

参考信号 $d(n)$ 与旁瓣对消系统的输出主信号 $y(n)$ 之差为误差信号 $e(n)$, 反馈系统根据 LMS 算法, 调整加权系数, 使得 $E\{e^2(n)\}$ 最小。

1.2 自适应滤波算法的选择

收稿日期: 2007-10-08

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA×××307)

作者简介: 张陆游(1982-), 男, 安徽芜湖人, 博士生, 主要从事雷达信号处理, 电子对抗研究;

E-mail: woshizhang1982@tom.com

张永顺(1961-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理, 电子对抗研究。

LMS 算法是随机梯度算法族中的一员,算法的权系数更新公式为

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu(n)\mathbf{v}(n) \quad (2)$$

算法的权系数更新一般采用“下降算法”,而梯度下降法是最常用的下降算法,定义代价函数: $J(n) \stackrel{\text{def}}{=} E\{|\varepsilon(n)|^2\} = E\{|\mathbf{d}(n) - \mathbf{w}^H(n)\mathbf{U}(n)|^2\}$,其中 $\mathbf{d}(n)$ 为期望信号, $\mathbf{U}(n)$ 是输入信号, $\mathbf{w}(n)$ 是权系数, $\varepsilon(n)$ 是 n 时刻滤波器的估计误差。梯度下降法算法的更新方向向量 $\mathbf{w}(n)$ 取为 $n-1$ 次迭代的代价函数 $J[\mathbf{w}(n-1)]$ 的负梯度,其权系数的更新表达式可表示为

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) - 1/2\mu(n)\nabla J(n-1) \quad (3)$$

利用输入信号和误差信号的瞬时值代替统计均值,可得到真实梯度矢量的估计值:

$$\hat{\nabla} J(n) = -2[\mathbf{U}(n)\mathbf{d}^*(n) - \mathbf{U}(n)\mathbf{U}^H(n)\mathbf{w}(n)] \quad (4)$$

把式(4)代入式(3)中,就得到我们熟悉的梯度下降算法的权系数更新公式:

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \mu(n)\mathbf{e}^*(n)\mathbf{U}(n) \quad (5)$$

梯度下降法算法中 μ 决定权系数在每一步迭代中的更新量,是影响算法收敛速度的关键参数,由于 μ 是表述LMS算法逼近Wiener滤波器快慢程度的量,因此 μ 也称为学习速率参数。对权系数更新式(5)两边取数学期望,并通过递推得到:

$$\begin{aligned} E\{\mathbf{w}(n)\} &= E\{\mathbf{w}(n-1)\} + \mu E\{\mathbf{e}^*(n)\mathbf{U}(n)\} = (\mathbf{I} - \mu\mathbf{R})E\{\mathbf{w}(n-1)\} + \mu\mathbf{r} = \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^H)^n\mathbf{w}(0) + \mu\sum_{i=0}^{n-1}(\mathbf{I} - \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^H)^i\mathbf{r} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{R} = E\{\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^H(n)\} = \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{Q}^H$, \mathbf{Q} 为酉矩阵, $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 是对角阵, $\mathbf{r} = E\{\mathbf{U}(n)\mathbf{d}^*(n)\}$, $\mathbf{d}(n)$ 为期望信号,其对角元素 λ_i 为矩阵 \mathbf{R} 的特征值,若对于所有的特征值 λ_i 有 $|1 - \mu\lambda_i| < 1$,则可推导出:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E\{\mathbf{w}(n)\} = \lim_{n \rightarrow \infty} E\{\mathbf{w}(n-1)\} + \mathbf{Q}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{r} = \mathbf{0} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r} = \mathbf{w}_{\text{opt}} \quad (7)$$

式(7)表明权系数是均值收敛的,此时满足 $|1 - \mu\lambda_{\max}| < 1$,得到 μ 的解为 $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$ 。

上面从LMS算法均值收敛的角度得到了 μ 必须满足的条件,在LMS算法中最简单的学习速率是使 μ 为一常数,然而这样会引起收敛与稳态性能的矛盾:大的学习速率能提高滤波器的收敛速率,但稳态性能就会降低;反之,为了提高稳态性能而采用小的学习速率时,收敛就会慢,因此学习速率的选择应当兼顾稳态性能和收敛速率。为了改善LMS算法的收敛速度,提高算法的实时性,本文采用了变步长LMS算法——基于S型函数的变步长LMS算法。步长因子变化趋势为

$$u(n) = b(1/(1 + \exp(-a|e(n)|)) - 0.5) \quad (8)$$

从图1中可以看出,步长因子在开始阶段(即误差较大时刻)比较小,而在稳态阶段(误差趋于0时刻)变化太快,不利于收敛,且 $u(n)$ 的计算过于复杂。本文采用基于改进型S型函数的变步长LMS算法,其步长因子的变化函数为

$$u(n) = b(1 - \exp(a|e(n)|)) \quad (9)$$

基于改进型S型函数的变步长LMS算法特点是:在初始收敛阶段,步长因子比较大,以便有较快地收敛速度,在收敛后,步长因子减少,有较小的稳态误差,且步长函数简单。步长因子趋势如图2所示。

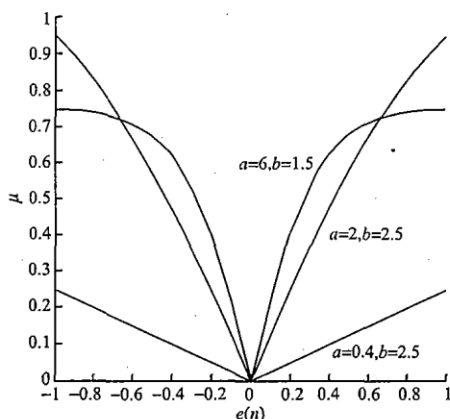


图1 步长因子变化函数

Fig. 1 Step coefficient function

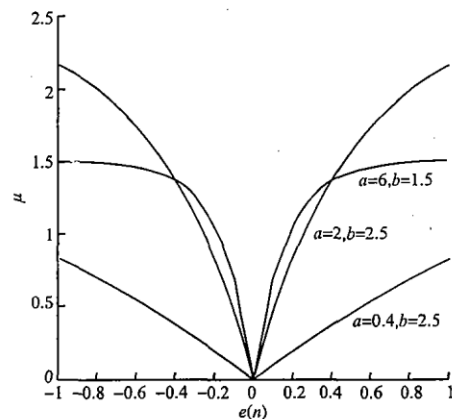


图2 改进型步长因子变化函数

Fig. 2 Advanced step coefficient function

1.3 旁瓣对消系统性能分析

旁瓣对消系统采用基于改进型 S 型函数的变步长 LMS 自适应滤波器,滤波器的阶数 $n = 15$,在不考虑接收机内部噪声时,假设辅助天线通道的干扰信号 $x(k)$ 是一个被白噪声污染的正弦干扰信号,主天线通道的干扰信号是与辅助天线通道的信号特征相同,都为相同频率的正弦信号,应用 Matlab 仿真,仿真结果如图 3 所示。由图 3 仿真可以看出基于改进型 S 型函数的变步长 LMS 算法的自适应旁瓣对消系统可以较快地逼近主天线通道的干扰信号,误差逐步递减并稳定在一个较小的范围内,具有较好的实时性和稳态性能。

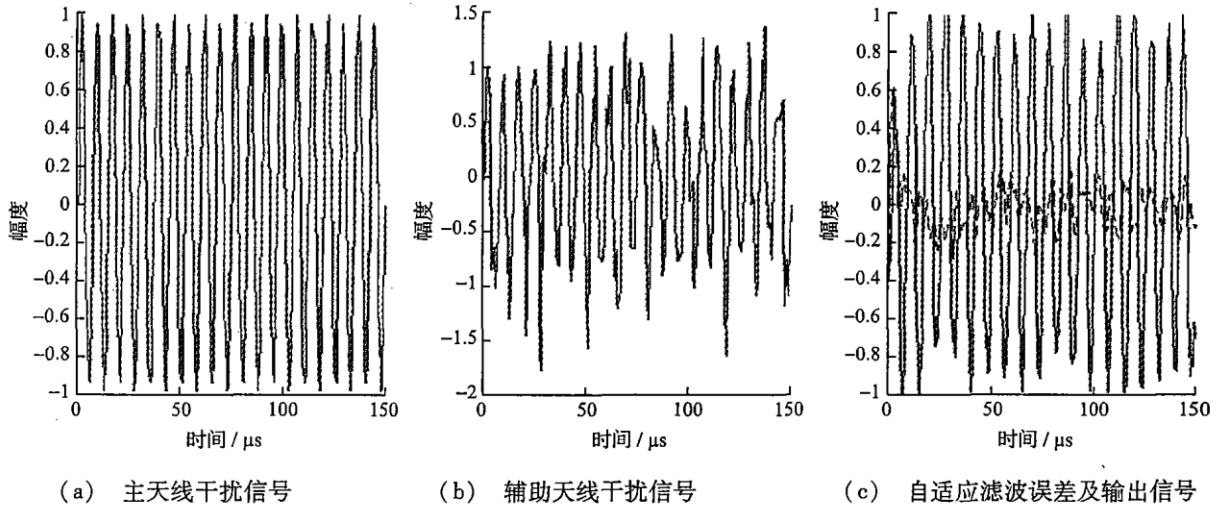


图 3 自适应旁瓣对消系统性能仿真图

Fig. 3 Simulation of adaptive side-lobe cancellation system performance

为了更全面地研究对消系统的性能^[10],需要考虑到接收机内部噪声的影响。在考虑接收机内部噪声且存在相干干扰源影响时,通过仿真得到了受两个相干干扰源干扰影响下旁瓣对消系统的对消比(CR)与干噪比的关系如表 1 和表 2 所示。表 1 表示不同相关系数 ρ 和干噪比 JNR 情况下的单个 CSLC 的对消比;表 2 表示不同相关系数 ρ 和干噪比 JNR 情况下的双 CSLC 的对消比。由表 1 可以看出,当主辅信道的干扰信号之间完全相关时,用 CSLC 只能把干扰信号对消到等于噪声电平,当互相关不完善,干噪比高的情况下,干扰信号将大大超过噪声电平。对比表 1 和表 2,还可以看出,用双 CSLC 可得到的对消比大于单 CSLC。

表 1 不同相关系数值情况下单个 CSLC 的对消比

Tab. 1 The CR of single CSLC in different correlation coefficient

ρ	JNR/dB				
	10	20	30	40	50
0.9	5.8	7.0	7.2	7.2	7.2
0.99	9.6	15.3	16.8	17	17
0.999	10.3	19.3	25.2	26.8	27
1	10.4	20	30	40	∞

表 2 不同相关系数值情况下双 CSLC 的对消比

Tab. 2 The CR of double CSLC in different correlation coefficient

ρ	JNR/dB				
	10	20	30	40	50
0.9	11.1	15.6	16.5	16.6	16.6
0.99	13.1	22.7	31.5	36	36.9
0.999	13.2	23.0	33	42.8	51
1	13.2	23.0	33	43	∞

2 结束语

本文分析了自适应旁瓣对消系统的基本结构与原理,提出了基于改进型 S 型函数的变步长 LMS 算法,

提高了系统的实时性,并通过理论分析和仿真计算表明:采用自适应旁瓣对消技术可有效抑制干扰;在两点相干干扰源情况下,双 CSLC 对消性能优于单个 CSLC。

参考文献:

- [1] 高 铁,李建新. 固态有源相控阵天线多阶振幅量化及副瓣特性的研究[J]. 电子学报, 1994, 22(3):11-17.
GAO Tie, LI Jianxin. The Research of Solid Active Phase Antenna High Order Amplitude Quantization and Side-lobe Characteristics [J]. Electronics Journal, 1994, 22(3):11-17. (in Chinese)
- [2] Li Jianxin, Gao Tie. Pattern Statistic Characteristic Research for Low Side-lobe Solid-State Active Phased Array Antenna [C].//Taiwan:1993 Asia-Pacific Microwave Conference. 1993,42-45.
- [3] 邹 鲲,袁俊泉,龚享依. Matlab6. x 信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
ZOU Kun, YUAN Junquan, GONG Xiangnong. Matlab6. x Signal Processing [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] Curtis D. Electronic Warfare in the Information Age [M]. Boston: Artech House,1999.
- [6] Menachem Levitas, David A Horton. Practical Failure Compensation in Active Phased Arrays[J]. IEEE AP, 1999,43(3): 524-535.
- [7] Vorobyov S, Gershman A B, Luo Z Q. Robust Adaptive Beamforming Using Worst-case Performance Optimization: A Solution to the Signal Mismatch Problem[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003,51(2): 313-324.
- [8] Carlson B D. Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Loading in Adaptive Arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988,24(4): 397-401.
- [9] Cox H, Zeskind R M, Owen M H. Robust Adaptive Beamforming[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987,35(10): 1365-1376.
- [10] Luthra A K. A Solution to the Adaptive Nulling Problem with a Look-direction Constraint in the Presence of Coherent Jammers [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1986,34(5):702-710.

(编辑:田新华)

The Application of un-constant-step Adaptive Algorithm in Radar SLC System

ZHANG Lu-you, ZHANG Yong-shun, PAN Ke-zhan

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

Abstract: The Structure of Radar Side-Lobe Cancellation (SLC) System is determined by its capability measurement rule and the corresponding algorithm, SLC is one of the key techniques in the enhancement of radar electronic war capability. To improve the convergence speed and stable state capability of the algorithm in radar SLC, an improved un-constant-step LMS algorithm based on S-function is put forward aimed at the general problems (low convergence speed and poor stability) existing in the un-constant-step LMS algorithm. The simulation results show that this system can fast restrain the jamming, effectively improve the system Real-time and stable state capability. And the experimental verification is done based on the requirements of the real application circumstances, the result shows that: when two coherent jamming source and the inner noise of receiver are in existence, the application effect of double CSLC is better than that of single CSLC.

Keywords: un-constant-step LMS algorithm ; SLC ; CSLC