

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.019

基于 DSP 信号处理系统的自适应滤波器

崔旭涛^{1,2}, 杨日杰², 何友²

(1. 海军航空工程学院 科研部, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 信息融合研究所, 山东 烟台 264001)

摘要: 为达到最优的滤波效果, 在对自适应滤波器结构、算法研究的基础上, 利用 DSP、A/D 和 D/A 技术构建了验证信号处理算法的硬件平台, 并通过 DSP 的软件编程, 完成了自适应滤波算法的工程实现, 对 LMS 自适应滤波算法的滤波效果进行了验证和分析。测试表明, 随着信噪比的降低, 自适应滤波器的性能也随之下降, 当信噪比为 0dB 时, LMS 自适应滤波算法不能完成滤波的功能。

关键词: DSP; A/D; D/A; 自适应滤波

中图分类号: TP273⁺.2 **文献标识码:** A

Adaptive Filter Based on DSP Signal Processing System

CUI Xu-tao^{1,2}, YANG Ri-jie², HE You²

(1. Dept. of Scientific Research, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to achieve the best filtering effect, on the basis of researching of adaptive filter architecture and algorithm, building the hardware platform of verify signal processing algorithm using DSP, A/D and D/A technology, and through DSP software programming done Engineering realization of adaptive filtering algorithm, then filter effect of LMS adaptive filter algorithm is verified and analyzed. Tests show that performance of adaptive filter descends with the descending of the SNR, and when the SNR is 0dB, LMS adaptive filtering algorithm cannot realize filtering function.

Keywords: DSP; A/D; D/A; Adaptive filter

0 引言

在信号和噪声特性无法预知或随时间变化的情况下, 采用 FIR 和 IIR 具有固定系数的滤波器滤波, 因滤波器的特性已知而无法实现最优滤波。而自适应滤波器通过自适应滤波算法调整滤波器系数^[1-4], 使滤波器的特性随信号和噪声而变化。故采用 DSP、A/D、D/A 技术, 构建验证信号处理算法硬件平台。

1 自适应滤波理论

自适应滤波器是指其系数能被一种自适应算法修改, 而该算法能对期望性能判别标准做出最佳滤波响应。自适应滤波器由滤波器的结构以及用于调整滤波器系数的自适应算法 2 部分构成。

1.1 自适应滤波器结构

自适应滤波器的结构可以是 FIR 型结构或 IIR 型结构, 由于 FIR 型滤波器结构的自适应技术易实现且具有稳定性^[2], 故通常采用 FIR 型滤波器的横向结构, 如图 1。滤波器的输出表示为:

$$y(n) = W^T(n)X(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) \quad (1)$$

式中, n 为时间序列, N 为滤波器阶数, $X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T$ 为输入矢量, $W(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{N-1}(n)]^T$ 为权系数矢量。

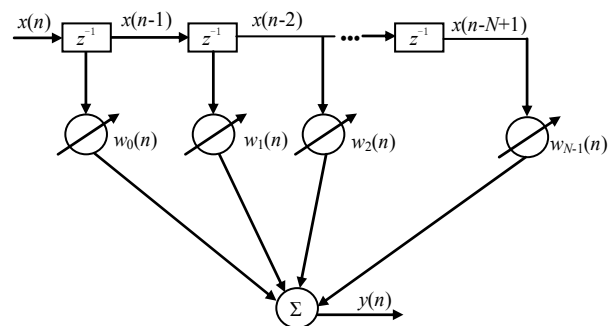


图 1 自适应滤波器的横向结构

1.2 LMS 自适应算法

LMS 自适应滤波算法是根据最小均方误差准则^[2,3,9,10]进行设计的, LMS 算法的目的是通过调整系数, 使输出误差序列的均方值最小化, 并根据该数据来修改权系数。误差序列的均方值 ε 表示为:

$$\varepsilon = E[e^2(n)] = E[(d(n) - y(n))^2] \quad (2)$$

式中, $d(n)$ 为理想信号, $e(n)$ 为输出误差序列。

收稿日期: 2009-07-25; 修回日期: 2009-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60572161)

作者简介: 崔旭涛 (1980-), 男, 山东人, 助理研究员, 海军航空工程学院在读博士, 从事信号检测、处理研究。

将式 (1) 中的 $y(n)$ 代入式 (2), 有:

$$\varepsilon = E[d^2(n)] + W^T(n)RW(n) - 2W^T(n)P \quad (3)$$

其中, $R = E[X(n)X^T(n)]$ 为 $N \times N$ 自相关矩阵, 为输入信号采样值间的相关性矩阵。 $P = E[d(n)X(n)]$ 为 $N \times 1$ 互相关矩阵, 表示理想信号 $d(n)$ 与输入信号矢量的相关性。

在均方误差最小时, 最佳权系数 $W^* = [w_0^*, w_1^*, \dots, w_{N-1}^*]$ 应满足如下方程:

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial W(n)} \right|_{W(n)=W^*} = 0 \quad (4)$$

计算这个线性方程组, 可得到权系数的最佳值:

$$W^* = R^{-1}P \quad (5)$$

为方便工程实现, 避免复杂的 R^{-1} 和 P 矩阵的计算, LMS 算法采用最快下降法的迭代算法来实时计算得到较佳的权系数, 即:

$$W(n+1) = W(n) - u\nabla(n) \quad (6)$$

式中, u 表示自适应步长^[4,7], $\nabla(n)$ 为 n 次迭代的梯度, 表示为:

$$\nabla(n) = \frac{\partial E(e^2(n))}{\partial W(n)} = -E[e(n)X(n)] \quad (7)$$

使用瞬时 $-e(n)X(n)$ 来代替 $-E[e(n)X(n)]$ 的估计, 得到迭代公式为:

$$W(n+1) = W(n) + ue(n)X(n) \quad (8)$$

2 系统硬件结构

所设计的信号处理系统整体结构图如图 2, 它由 DSP 信号处理主板和双路高速 A/D 和 D/A 子板构成。主板具有信号处理和外围接口扩展的功能, 子板通过并行扩展接口接到信号处理主板上, 完成数据采集和数据输出的任务。在设计过程中 DSP 芯片选择 TI 公司的 TMS320C6701, FPGA 选用 Altera 公司的 EPM9320LC84-15, 数据采集选用 Analog 公司的 AD6640AST 芯片, 数模转换选用 Analog 公司的 TxDAC9765AST 芯片, 系统的工作原理为: 通过对 DSP 的软件编程, 从 4 路选择器中选择一路通道作为模拟输入通道, ADC 触发方式设定为外部下降沿触发方式, 采样频率编程设定为 65 MHz, 当 DSP 接收到 TTL 电平同步触发脉冲信号的下降沿后, 对接收到的输入信号采样, 转换成数字信号暂存于对应的 FIFO 存储器中, 当 FIFO 存储器达到编程设定的存储容量时, DSP 的 DMA 控制器按照编程设定的程序, 将 FIFO 存储器中的数字信号通过主板和子板连接的并行扩展接口搬移到 DSP 的内部或外围存储器存储; 同时, DSP 对存储在其存储器中的数字信号进行自适应滤波处理, 处理后的数据再由 DMA 控制器的另外一个通道搬移到 DAC 的 FIFO 存储器中, 当 FIFO 存储器达到设定的容量时, DAC 数模转换器将数字信号转换成模拟信号输出。

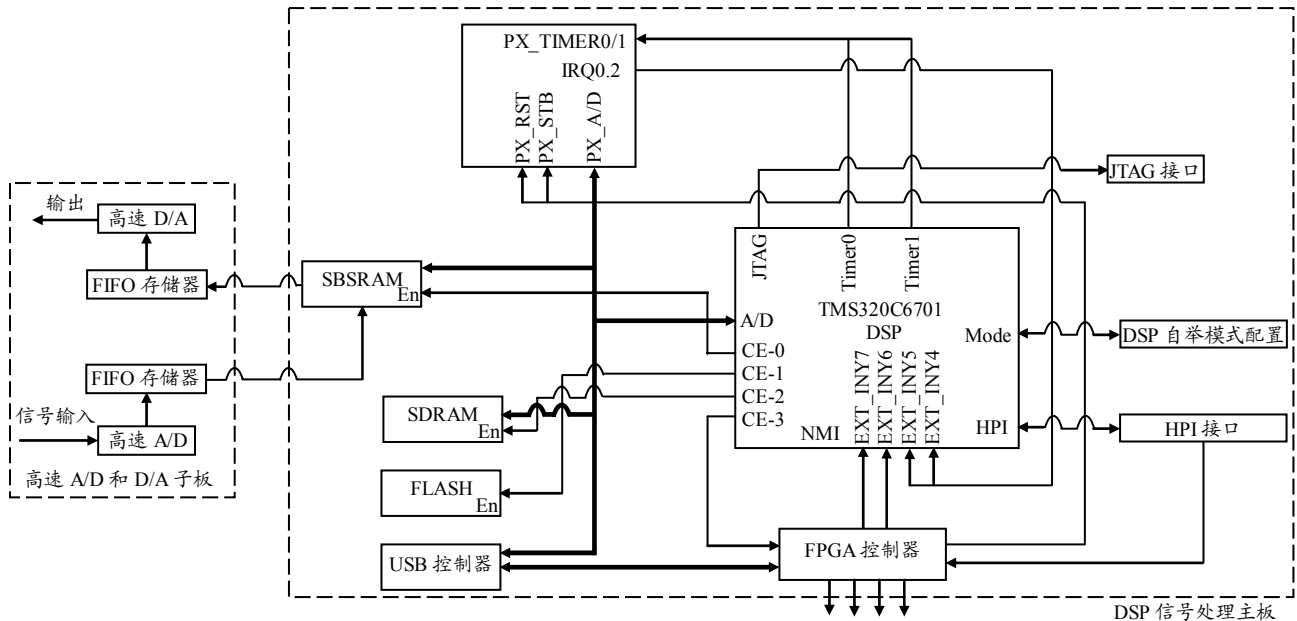


图 2 硬件平台结构框图

3 系统软件设计与调试

所设计的自适应滤波器软件实现的基本功能包

括: A/D 模数转换程序、D/A 数模转换程序及自适应滤波程序设计 3 部分, 软件总体流程框图如图 3。

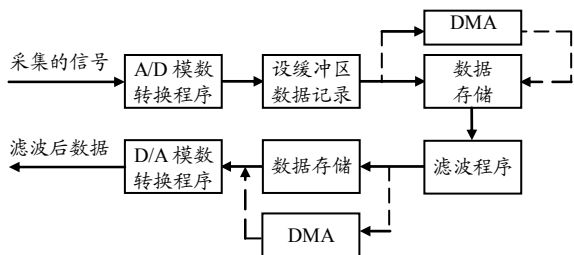


图 3 软件流程图框图

3.1 A/D 模数转换程序

该子程序的基本功能是：信号源将产生的信号送到 ADC 模数转换通道，通过 DSP 的编程对 ADC 的寄存器和相应的 ADC FIFO 存储器进行配置，经过对寄存器和 FIFO 存储器的功能配置，ADC 通道采集一定长度的信号数据转换成数字数据，送到 ADC FIFO 存储器中，当 ADC FIFO 存储器的半满标志 PAF 为 ‘1’ 时，即 FIFO 存储器已经达到设定的满状态时，产生 FIFO 半满中断，这时 DMA 通过初始化配置将 FIFO 存储器中的数据搬移到 DSP 内部存储器中；当 FIFO 中的所有数据都搬移到 DSP 内部存储器后，FIFO 存储器的全空标志 EF 置 ‘1’，即 FIFO 存储器中已经没有数据，这时 DMA 将中止数据的搬移，ADC 数据通道再对信号进行采集，重复上述过程，将模拟信号转换成数字信号。

3.2 D/A 模数转换程序

该子程序的基本功能是：经自适应滤波处理后得到的数据送到系统的 DAC 数模转换通道，通过 DSP 的编程对 DAC 通道的寄存器和 DAC FIFO 存储器进行一定的配置，经过对寄存器、FIFO 存储器和 DMA 传输的功能配置，DMA 通道将 DSP 内部存储器中存储的得到处理的数据搬移到 DAC 的 FIFO 存储器中，当 FIFO 存储器的半满标志 PAF 置 ‘1’ 时，表明设定的 FIFO 存储器中的数据已满，此时 DMA 停止数据传输，DAC 通道将 FIFO 存储器中的数据取出转换成模拟信号输出，当 FIFO 存储器的全空标志 EF 置 ‘1’ 时，表明 FIFO 存储器中的数据已空，DAC 通道停止提取 FIFO 中的数据，DMA 继续将 DSP 中的数据搬移到 FIFO 中，重复上述过程，完成将数字信号转换成模拟信号的功能。

3.3 自适应滤波算法调试结果

设定采样数据的点数为 1024 点，滤波器的全系数设定为 128 阶，自适应步长为 5×10^{-5} 。设定输入信号为正弦波+噪声信号，其中正弦波的周期 $T=256s$ ，幅度 $A=200$ ，正弦波信号功率 $P_s=20\ 000$ ；

噪声设定为零均值、方差 δ 分别为 6 330、20 000，相应的信噪比 ($SNR = 5\ dB, 0\ dB$)，根据自适应迭代式 (10)，使用 DSP 编程实现自适应滤波算法，由 DSP 的 CCS 开发环境图形分析工具得到测试结果如图 4~图 7。

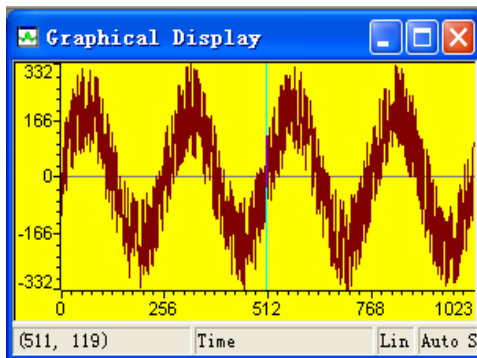


图 4 信噪比为 5 dB 的输入信号

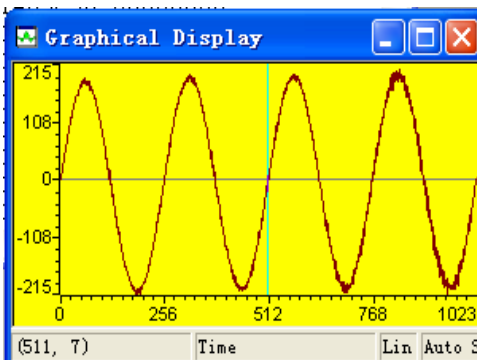


图 5 信噪比为 5 dB 的滤波输出信号

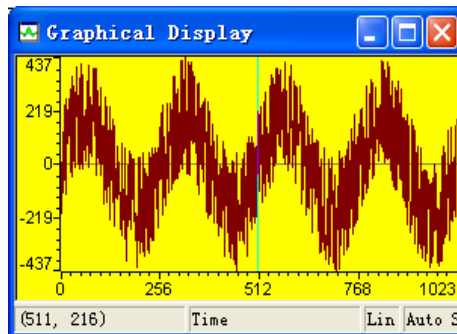


图 6 信噪比为 0 dB 的输入信号

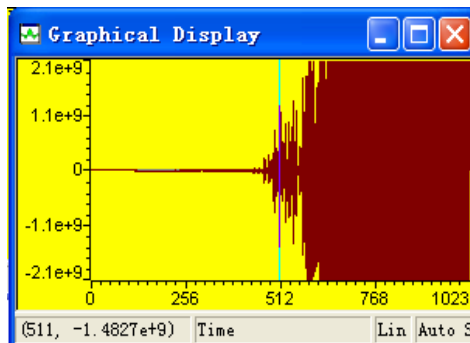


图 7 信噪比为 0 dB 的滤波输出信号

(下转第 71 页)

4 结语

此对跟踪雷达全数字交流伺服系统进行设计, 并详细介绍其实现。伺服系统基于松下 MINAS 伺服控制器和永磁交流同步伺服电机, 结合 TMS320F2812 DSP, 通过矢量控制算法, 实现了跟踪雷达快速响应、高精度跟踪和宽调速范围的性能指标。同时又有效地保护了雷达负载的安全, 保障电机安全稳定的运行。

参考文献:

- [1] 骆群. 基于 Labview 的卫星通信天线伺服控制系统(硕士学位论文)[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [2] Velimir Nedjic, Thomas A. Lipo. Low-cost current-fed PMSM drive system with sinusoidal input currents[J].

(上接第 65 页)

4 结论

该硬件平台的构建, 为理论研究成果到工程应用的转化提供了试验平台, 解决了算法实时性、有效性及局限性的验证问题, 可比较各信号处理算法的有效性和局限性。同时, 通过 DSP 的软件编程, 完成了 LMS 自适应滤波算法的工程实现。测试表明, 得到了信噪比分别为 5 dB 和 0 dB 下的滤波结果, 随着信噪比的降低, 自适应滤波器的性能也随之下降, 当信噪比为 0 dB 时, LMS 自适应滤波算法不能完成滤波的功能, 可为工程实践提供参考。

参考文献:

- [1] 覃景繁, 欧阳景正. 一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(3): 171-174.
- [2] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 北京:

(上接第 67 页)

其中, 图 4 为单神经元算法输出曲线; 实验时间为 4 h, 最终温度稳定范围在 48.78~51.25℃。图 5 为单神经元二次型性能指标学习算法输出曲线; 实验时间为 3 h, 最终温度稳定范围在 49.10~50.90℃。实验结果表明: 单神经元二次型性能指标学习算法比单神经元算法趋于目标值的时间短, 且单神经元二次型性能指标学习算法控制温度的稳定性较好, 超调量也较理想。

5 结论

实践表明, 单神经元二次型性能指标学习算法控制策略比单神经元算法具有更快的系统响应, 大

IEEE Transaction on industry applications, 2006, 42(3): 753-762.

- [3] Jeff Moscrop, Chris Cook, Peter Moll. Control of Servo Systems in the Presence of Motor-Load Inertia Mismatch[C]. The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001: 351-356.
- [4] Ishikawa, K. Ohmae, T. Reliable Control Using Equivalent Transfer Function for Position Servo System[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International.
- [5] Sadegh Vaez-Zadeh. Variable flux control of permanent magnet synchronous motor drives for constant torque operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(4): 527-534.
- [6] 刘伟星. 武器模拟平台控制系统的设计(硕士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

清华大学出版社, 2003.

- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [4] T. Aboulnasr, K. Mayyas. Selective coefficient update of gradient-based adaptive algorithms[J]. Proc. ICASSP'97, 1997(3): 1929-1932.
- [5] 龚耀寰. 自适应滤波器[M]. 北京: 北京电子工业出版社, 1989.
- [6] 邓记才, 裴炳南. 一种求解 LMS 算法收敛步长阈值的新方法[J]. 信号处理, 1996, 12(2): 52-56.
- [7] Widrow B. et al. Adaptive noise cancelling principles and application[J]. IEEE, 1975, 63(12): 1708.
- [8] 叶华, 吴伯修. 变步长自适应滤波算法的研究[J]. 电子学报, 1990, 18(4): 63-69.
- [9] Pi Shengchang, Alan N Willson. Analysis of conjugate gradient algorithms for adaptive filtering[J]. Trans. on SP, 2000, 48(2): 409-418.
- [10] 高鹰, 谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1094-1097.

大大提高了温控箱的实时响应速度, 有一定的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 徐中, 等. 单神经元自适应 PID 控制器的研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5).
- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 9.
- [3] 周立功, 等. ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 11.
- [4] 周立功, 等. ARM 嵌入式系统基础教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 1.
- [5] 李文伟. 陆军数字化旅指挥控制仿真系统[J]. 四川兵工学报, 2008(5): 87-88.