

doi: 10.7690/bgzdh.2013.06.023

基于 System Generator 的数字音频滤波器设计

王荣海

(绵阳职业技术学院信息工程系, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了解决传统固定系数滤波器不能处理无法预知信号和噪声特性, 提出一种基于 System Generator 的数字音频滤波器的设计方案。介绍了自适应滤波器基本原理及算法, 采用 LMS 算法并利用 System Generator 构建了滤波器仿真模型。仿真结果证明: 经过自适应滤波器的处理后, 可较好地滤除信号中的噪声; 该方法设计的滤波器有效地实现了对音频信号的自适应滤波, 滤波效果良好。

关键词: LMS; 自适应算法; FPGA; XILINX; System Generator

中图分类号: TP302.7 **文献标志码:** A

Design of Digital Audio Filter Based on System Generator

Wang Ronghai

(Department of Information Engineering, Mianyang Vocational & Technical College, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problems of traditional digital filter with fixed coefficient that can't process unknown noise of audio signal, this paper put forwards a design scheme of digital audio filter based on System Generator. The principle and algorithm of adaptive filter are introduced, and simulation model of filter is constructed using LMS algorithm by System Generator. The simulation result shows that noise signal can be filtered after processing of adaptive filter, the filter based on design scheme can realize adaptive filter for audio signal and achieve great effect.

Key words: LMS; adaptive algorithm; FPGA; XILINX; System Generator

0 引言

随着信息处理技术和微电子技术的不断发展, 数字信号处理技术被广泛应用于语音图像处理、数字通讯、谱分析、模式识别和自动控制等领域^[1]。数字信号处理方法克服了模拟信号处理方法的缺陷和不足, 具有比模拟滤波器精度高、稳定、体积小、重量轻、灵活、不要求阻抗匹配等特点^[2]。

在通信工程领域中, 对于信号和噪声特性无法预知, 不能采用传统的固定系数的滤波器进行处理, 可采用具有自我调节特性的自适应滤波器来获取最优滤波效果。

经典滤波方法基于已知信号和噪声的统计特性而设计, 而现代滤波技术可在未知信号和噪声的情况下对自适应滤波滤波器参数以最佳方式进行反复调整^[3], 达到更优的滤波效果。

自适应滤波算法研究是当今信号处理领域内最为活跃的研究课题之一, 除了 LMS(最小均方)算法、RLS(递归最小二乘)等算法外, 也出现了一些相应的改进算法, 包括 RLSL(递归最小二乘格形)算法、SVSLMS(变步长)算法和 NLMS(归一化)算法等。这些算法在经典算法基础上, 在收敛、跟踪速度及抗干扰性能方面有了改进和提升, 如

SVSLMS 算法可以用较快的收敛速度, 很小的调整步长来达到较小的稳态失调噪声。同时, 由于算法本身的基础理论经过多年发展已日趋成熟, 加上数字处理软硬件实现技术方面也取得了发展和进步, 可用极快的速度对滤波算法进行处理和滤波实现。基于上述情况, 笔者讨论了基于最小均方差的自适应滤波器, 将其用于音频信号滤波当中, 并进行了仿真实现, 从仿真结果来看, 实际滤波效果良好。

1 自适应滤波技术简介

1.1 自适应滤波器基本原理

设计经典滤波器时, 其系数在设计完成时就已确定, 当输入信号出现变化波动时, 这种滤波器并不会随之进行相应的调整, 而仍保持设计时的特性。

在实际工程应用中, 常常不了解信号和噪声的统计特性, 在这种情况下希望滤波器具备自我调节的能力, 能够根据输入信号变化自动进行性能调整, 从而更好地进行信号处理, 实现最优滤波, 这就是自适应滤波器的基本思想。自适应滤波器实质上就是一种能调节自身传输特性从而达到最优的维纳滤波器, 它能够随着外界信号特性动态改变自身参数, 从而保持更优的滤波状态, 在信号处理中应用广泛。如图 1 所示, 自适应滤波一般包括滤波和参数调整

收稿日期: 2013-01-14; 修回日期: 2013-03-28

作者简介: 王荣海(1969—), 男, 四川人, 工程硕士, 副教授, 从事电子与通信工程研究。

2 个过程。



图 1 自适应滤波器结构框图

图 1 中， $x(n)$ 表示输入信号，在输入信号中包括所需信号及干扰信号， $d(n)$ 为期望信号，也称为参考信号或训练信号。 $\hat{d}(n)$ 为当前实际输出信号， $v(n)$ 为混入的干扰信号， w_n 为 p 阶滤波器的系数， $e(n)$ 为第次迭代运算出的误差， Δw_n 为滤波器系数的校正因子，各参数之间的关系可表示如下：

$$x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p)]^T = d(n) + v(n) \quad (1)$$

$$w_n = [\omega_n(0), \omega_n(1), \dots, \omega_n(p)]^T \quad (2)$$

$$\hat{d}(n) = w_n \times x(n) \quad (3)$$

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \quad (4)$$

$$w_{n+1} = w_n + \Delta w_n \quad (5)$$

在处理过程中，滤波器将 $\hat{d}(n)$ 与 $d(n)$ 进行对比得到误差信号 $e(n)$ ，从而利用自适应算法对滤波器系数进行调整，经过数次迭代之后，将使滤波器的滤波性能趋向于最佳。通常情况下不可能事先得到所期望的信号，因此在实际应用中一般会将噪声或者干扰看作期望信号，而需要估计的信号作为干扰，自适应滤波器输出的误差信号就是需要得到信号的估计，实际应用中大部分自适应信号处理都可以归结为该结构。

1.2 自适应算法

滤波器所采用的自适应算法决定了自适应滤波器能够根据外界信号的变化来动态调整参数的特性，常见的自适应算法包括最小均方算法 (least mean square, LMS)、最小平方算法 (ordinary least square, OLS) 以及递归最小平方算法 (recursive least squares, RLS) 等。LMS 算法实现的原理框图如图 2。

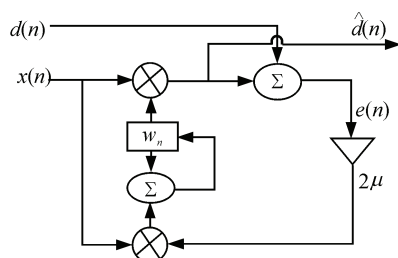


图 2 LMS 算法实现的原理框图

LMS 算法实现简单且对信号统计特性变化具有稳健性^[4]，计算量小且易于实现，广泛应用于工

程实际中。LMS 算法的核心思想是基于最小均方误差准则，采用牛顿法或最速下降法在性能表面上搜索，使滤波器输出信号和期望输出信号之间的均方误差趋近于最小。如果将 LMS 算法应用于自适应滤波器中，那么式 (5) 可写为：

$$w_{n+1} = w_n + 2\mu \times e(n) \times x(n) \quad (6)$$

式 (6) 揭示了 LMS 算法的核心，而选择恰当的滤波器长度和步长因子 μ ，可使均方误差趋于最小值，同时保持 LMS 滤波算法的稳定与收敛^[5]。在文中，自适应滤波器设计时采用了 LMS 算法。

2 System Generator 建模与仿真

与模拟滤波器相比，数字滤波器以数字元件执行运算，避免了模拟电路中噪声影响，如果在设计时采用合适的结构，可以进一步降低输入噪声对系统性能的影响，因此有更高的信噪比。随着可编程逻辑器件技术的发展，具有强大并行处理能力的现场可编程门阵列 (FPGA) 在成本、性能、体积等方面都显示了优势^[6]。System Generator 是 Xilinx 公司开发的设计工具，用于 FPGA 的开发与设计工作，将 Xilinx 的系统开发软件安装完成后，可将模块与 Matlab 的 Simulink 库连接并进行仿真。与传统仿真方式相比较，System Generator 可以图形化方式对硬件系统进行建模，并生成对应的工程，同时可调用 ISE 中组件进行仿真、综合实现以及系统配置等操作，直观方便且效率高，与 Matlab 强大的数据生成、处理功能与 Modlsim 等基础仿真工具很好地结合，可以方便地绘制出系统响应曲线并生成 HDL 代码^[7]，体现了现代 EDA 技术开发的优势与特点。

System Generator 是数字信号处理系统快速建模和实现工具，将数字处理系统和 Xilinx FPGA 有效地结合在一起。其相互作用关系如图 3 所示。

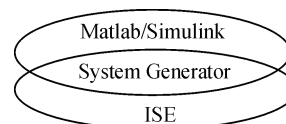


图 3 System Generator 作用图

3 音频滤波器设计与分析

3.1 音频滤波器设计

在通信及音频信号处理相关领域，音频信号不可避免地受到周边环境及设备内部噪声等因素影响，因此对信号进行滤波处理是非常必要的过程，音频滤波器其基本构成原理如图 4 所示，其中叠加了噪声的音频信号和背景噪声信号可分别由作为主

信道和参考信道的两组信号接收设备进行信号采集，并通过 LMS 算法进行对比调节。采用 LMS 算法的自适应滤波器包括延迟模块、乘加模块和系数更新模块等。

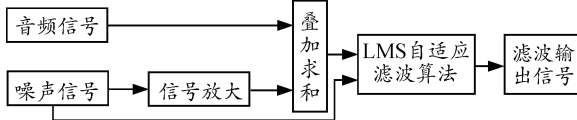


图 4 音频滤波器原理框图

将频率为 30 Hz 的正弦波叠加方差为 0.4 的随机噪声作为测试信号，对 LMS 算法进行仿真，经自适应滤波处理后输出，仿真图形如图 5 所示。

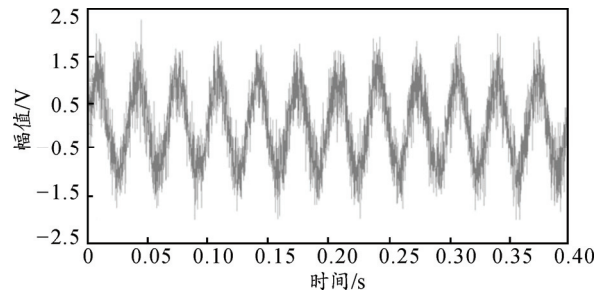
可以看到，图 5 中加噪测试信号经过滤波处理后，干扰噪声被有效滤除，原始信号被恢复。

利用 Matlab 及 System Generator 进行滤波器模型的搭建，本设计所使用的 Matlab 版本为 R2009b，ISE Design Suite 版本为 14.3。

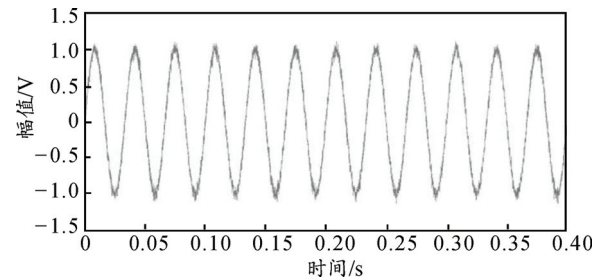
如果软件安装正确，可在 Simulink 库中找到 Xilinx Blockset、Xilinx Reference Blockset 和 Xilinx XtremeDSP Kit 等库，当中包括 Basic Elements、

Communication、Floating-Point 等组件。

利用 System Generator 进行 LMS 自适应滤波器建模，如图 6 所示。



(a) 加噪测试信号



(b) 滤波输出信号

图 5 LMS 自适应滤波处理仿真

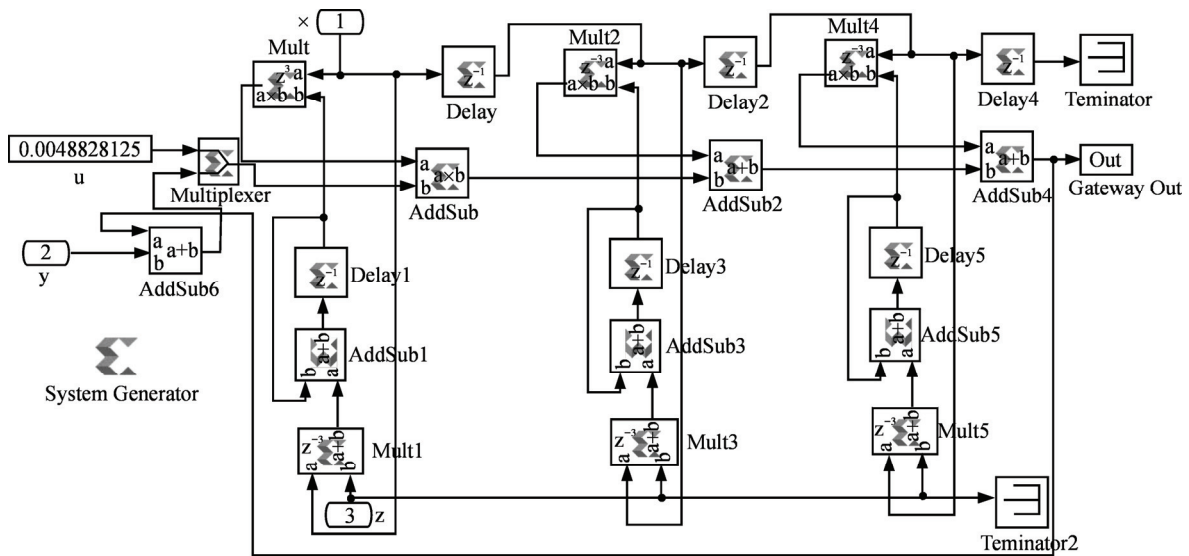
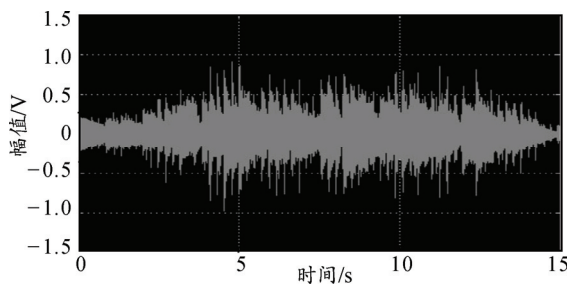
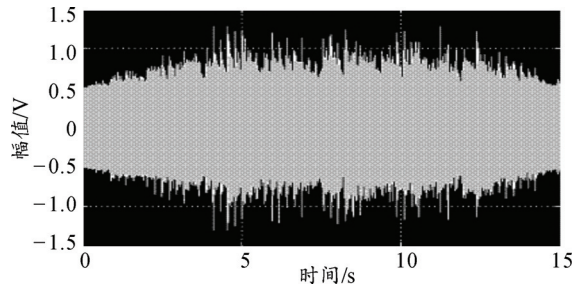


图 6 LMS 自适应滤波模块构成

3.2 仿真结果分析



(a) 原始音频信号



(b) 加噪音频信号

图 7 滤波示意图

滤波示意图如图 7 所示。从图 7 中可以看到，经过自适应滤波器的处理后，可较好地对信号中的噪声进行滤除。图 8 显示了信号迭代过程中误差值的情况。由图 8 可见，在信噪比较大时，LMS 算法自适应滤波器滤波效果较好，在信噪比偏小时，其结果不十分理想，可在设计过程中，对其步长参数和滤波器长度进行适当调整，可提高滤波器滤波效果，使其性能趋于稳定。

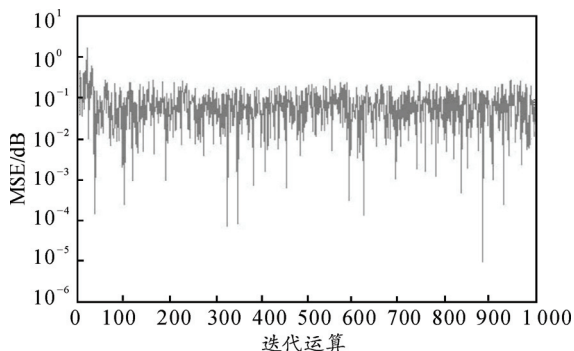


图 8 误差统计

4 结语

笔者阐述了自适应滤波器的基本原理，探讨了常见的滤波算法特性，并利用 System Generator 构建了数字音频自适应滤波器。仿真结果表明：采用 LMS 算法的自适应滤波器具有良好的滤波特性和

(上接第 85 页)

表 1 给出了 2 种控制策略下 TAEM 末端状态的偏差范围，可以看出，常规控制策略下 TAEM 末端状态偏差范围较大，不能保证最终自动着陆初始状态的要求，而约束控制策略下的末端状态偏差范围较小，可以保证最终的安全着陆。

表 1 2 种控制策略下 TAEM 末端状态偏差 %

策略	速度偏差	迎角偏差	过载偏差
常规控制	20	50	20
约束控制	3	5	5

4 结论

该约束控制策略采用动态约束的思想，通过设计迎角和过载约束控制回路，RLV 能根据飞行状态实时进行控制回路指令的切换。仿真验证表明了该策略的有效性和合理性，保证了 TAEM 飞行的安全。

参考文献：

[1] 江绍东. 国外主要新型可重复使用运载器发展概况[J]. 中国航天, 2003(12): 27-31.
 [2] Dumbacher Dan. NASA's Second Generation Reusable

收敛性,可以很好地对加噪声信号进行噪声滤除。利用该方法进行建模简单灵活,可以方便地对系统进行仿真和分析。由于自适应滤波改进算法的出现,较大地改善和提升了滤波器滤波效果和性能,对各种改进算法的研究和仿真,并将其移值于 FPGA、DSP 等高速数字处理芯片中实现,是下一步研究的重点和方向。

参考文献：

[1] 袁炜. 数字滤波器算法研究及其在 DSP 系统中的实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
 [2] 张高记, 罗朝霞. IIR 数字滤波器的 Matlab 和 FPGA 实现[J]. 现代电子技术, 2011, 34(11): 164-166.
 [3] 修海燕, 闫德勤. 基于神经网络控制的 LMS 算法及仿真[J]. 微型机与应用, 2011, 30(5): 98-101.
 [4] 刘影, 南获昌. 基于 LMS 算法的自适应滤波器仿真实现[J]. 现代电子技术, 2008, 31(19): 74-76.
 [5] Behnam, B. Modeling and simulation of a DC motor control system with digital PID controller and encoder in FPGA using Xilinx system generator[C]//Proc. of Instrumentation Control and Automation(ICA). Bandung: IEEE Press, 2011: 104-108.
 [6] 郑文明. 基于 FPGA 的数字信号处理算法研究与高效实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
 [7] Vaňuš, J. Application of optimal settings of the LMS adaptive filter for speech signal processing[C]//Proc. of Computer Science and Information Technology(IMCSIT). Wisla:IEEE Press, 2010: 767-774.

 Launch Vehicle Program Introduction, Status, and Future Plans, AIAA, 2002-23613.
 [3] 赵汉元. 飞行器再入动力学和制导[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
 [4] Alexandre Falcoz, David Henry, Ali Zolghadri. Robust Fault Diagnosis for Atmospheric Reentry Vehicles: A Case Study[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2010, 40(5): 886-899.
 [5] Moore Thomas E. Space Shuttle Entry Terminal Area Energy Management, NASA-TM-104744.
 [6] Norman C, Weingarten, Charles R. Chalk. Application of Calspan pitches rate control system to the space shuttle for approach and landing, NASA-CR-170402.
 [7] 杨一栋. 空间再入返回制导与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
 [8] 杨晖. 无人作战飞机自主控制技术研究[J]. 飞行力学, 2006, 124(2): 1-4.
 [9] 何光宇, 呼卫军. 初始能量不确定飞行器再入制导方法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(5).
 [10] 胡孟权. 航天飞机末端能量管理制导律[J]. 空军工程大学学报, 2006, 7(1).