

基于 MATLAB 和 IP 核的心电信号数字滤波器的设计

倪维柱, 徐寅林, 吴华玉

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 传统的心电信号滤波功能一般是由模拟滤波器完成, 但模拟滤波器存在较多的缺点 (处理精度不高、速度不快、容易受到干扰以及适应差等), 已越来越难以满足现代信号采集系统的要求. 现提出了一种基于 MATLAB 和 FPGA 的数字滤波器的实现方案, 能较好地克服上述模拟滤波器的缺点. 该数字滤波器首先使用 MATLAB 和 IP 核相结合的方法生成代码, 然后通过 QuartusII 软件把编译的程序下载到 FPGA 中以实现数字滤波器的软硬件设计. 此方法使数字滤波器的设计变得非常简单和可靠. 经试验, 该数字滤波器在心电信号处理运用中满足设计要求.

[关键词] MATLAB, IP 核, FPGA, 数字滤波器, 心电信号

[中图分类号] R312 TP274⁺ 2 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2008)01-0030-04

Design of the Digital Filter of ECG Based on MATLAB and IP

Ni Weizhu Xu Yinyin Wu Huayu

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract The conventional filtering function in the ECG signal processing is realized by analog filter. However, the analog filter can not meet the growing needs in the developing signal acquisition system because the analog filter has many disadvantages such as the limited precision and the low speed and so on. This paper presents a new solution for a digital filter in the ECG signal processing which is based on the MATLAB and IP. The digital filter can conquer the disadvantages of analog filter. The code of digital filter is generated by combining MATLAB with IP, and then the programme of decoding and editing is downloaded into the FPGA by the software of QuartusII to realize the hardware and software design of the digital filter. Such a method makes a digital filter extraordinarily simple and reliable. Furthermore, the digital filter is testified to meet the requests of ECG instrument in practise.

Key words MATLAB, IP core, FPGA, digital filter, ECG

在心电信号采集系统中, 一般来自人体的原始信号中含有大量的干扰信号, 这些干扰信号对疾病的最终诊断有着不可忽视的影响. 在采集系统前端加入模拟滤波电路, 是滤除这些干扰信号的方法之一, 但随着现代心电信号分析设备对采集系统的要求越来越高, 模拟滤波就越来越显得不能满足要求. 例如, 在高精度的采集系统中, 模拟滤波的精度不能满足要求, 稳定性不高. 在高速采集系统中, 模拟滤波电路速度就成为一个瓶颈. 在含有低通、高通和带阻的滤波电路中, 模拟滤波实现需要的器件较多, 且功耗也较大. 模拟滤波还有抗干扰和适应性差的缺点. 如用 FPGA 来实现数字滤波器, 模拟滤波电路的上述缺点就会得到较好的改善, 使采集系统的性能得到较大的提升.

1 总体心电信号采集电路框图

本文基于 MATLAB 和 IP 核设计了心电信号数字滤波器. 整个信号采集电路由信号放大、A/D 转换以及数字滤波 3 个部分组成. 放大电路将微弱的人体体表心电信号放大后由 A/D 转换器转换成数字量, 最终由 FPGA 进行数字滤波. 整个系统框图如图 1 所示.

收稿日期: 2007-03-27
基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金 (2005102TSJB154) 资助项目.
作者简介: 倪维柱 (1981-), 硕士研究生, 研究方向: 生物医学电子学. E-mail: nsnrw@126.com
通讯联系人: 徐寅林 (1962-), 博士, 副教授, 研究方向: 生物医学电子学. E-mail: xuyinlin@njnu.edu.cn

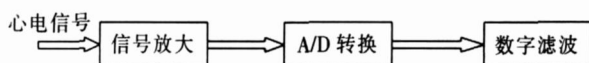


图1 信号放大、滤波框图

Fig.1 The amplification of signal and filter

1.1 信号放大

信号放大电路由两级放大组成. 第一级是由仪表放大器 AD620构成的前置放大电路, 放大倍数大约为 10倍左右, 接成右腿驱动方式. 所谓右腿驱动是电路中取出共模信号将其反相后作为浮地输出接至右腿, 以抵消人体的共模干扰信号, 提高共模抑制比. 第二级放大电路由美信的 OP07组成, 由于心电信号的幅值为 1~3 mV, 而 A/D 的最高输入电压为 3.3 V, 所以总的心电信号放大约需 1 000倍. 由于第一级放大电路只放大 10倍左右, 所以需要第二级的放大电路继续放大, 大约为 100倍左右.

1.2 A/D转换.

经过两级放大的心电信号, 送入 A/D转换器, A/D以 200次/s的速率对心电信号进行转换. 与 MCU相比, FPGA 更适合于直接对高速 A/D器件的采样控制. 通过 VHDL编程, FPGA按一定的时序对 A/D进行控制, 使 A/D转换的数据输入 FPGA中, 实现对转换后的信号数据进行数字滤波处理.

1.3 数字滤波

要使 FPGA能实现数字滤波的功能, 必须编写程序对 FPGA 其进行配置. 程序的设计采用 MATLAB和 Altera公司的 IP核相结合的方法设计.

数字滤波器用 MATLAB生成程序代码比较方便, 并且可在 MATLAB中进行仿真, 但在硬件实现上较困难. 本文采用的 MATLAB和 IP核相结合的方法, 使 MATLAB的仿真结果很容易在硬件上实现.

2 数字滤波器设计

心电信号容易受到基线漂移和工频干扰的影响, 基线漂移的频率范围是 0.08 Hz以下的低频部分; 工频干扰主要是 50Hz 因此, 滤除 ECG 信号中的基线漂移和工频干扰成为 ECG 信号采集的关键. 在数字滤波器设计时主要就是考虑对这两项干扰的滤除. 本文中的数字滤波器是 FIR 数字滤波器, 它的实现分为 3个步骤: 第一步是通过 MATLAB求出 FIR 滤波器系数, 即单位冲击响应 $h(n)$; 第二步是通过 Altera 的 IP核生成滤波器的程序, 实现输入序列 $X(n)$ 与单位冲击响应 $h(n)$ 的线性卷积; 第三步是通过 Quartus II软件编译 IP核的程序生成 SOF文件, 并且下载到 FPGA中, 最终在硬件上实现数字滤波器的功能.

2.1 基于 MATLAB 求出 FIR 系数

N 阶 FIR 滤波器系统的传递函数为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n}. \quad (1)$$

它有 $N-1$ 阶极点在 $Z=0$ 处, 有 $N-1$ 个零点位于有限 Z 平面的任何位置. 式 (1) 系统差分方程表达式为:

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)x(n-m), \quad (2)$$

式 (2) 就是输入序列 $X(n)$ 与单位冲击响应 $h(n)$ 的线性卷积.

用 MATLAB求出滤波器的系数是非常便捷的. 在设计 FIR 数字滤波器的时候, 首先要考虑选取适当的滤波器阶数, 阶数太低可能达不到良好的滤波效果, 太高需占用太多的资源, 使 FPGA 不能满足要求. 经试验, 本文设计的阶数为 100阶, 既能满足滤波要求, 又能使 FPGA 满足要求. 在设计 FIR 数字滤波器时, 还要对单位冲击响应进行截短. 本文的截短是采用窗函数来实现的. 窗函数有矩形窗、汉宁窗、哈明窗等. 选择不同的窗函数, 对滤波的效果的影响是较大的. 本文经过 MATLAB的仿真, 比较了不同的窗函数的实现效果. 有的窗函数在工频处衰减比较大, 但在通带内的波纹较大, 有的窗函数虽然波纹较小, 但在工频处衰减不够理想. 综合考虑之后, 本文选择的是矩形窗, 其工频的衰减可达到 40dB, 其响应如图 2所示. 确定了阶数和窗函数及心电信号中需要滤除的信号之后, 可以通过 MATLAB 的函数:

$$b = \text{fir2}(n, f, m, \text{window}) \quad (3)$$

求出 FIR 的系数. 其中, n 为滤波器的阶数; f 和 m 分别为滤波器期望幅频响应的频率响量和幅值向量, 取值在 $0 \sim 1$ 之间, m 和 f 有相同长度; $window$ 为窗函数, 其为列向量, 长度必须是 $(n+1)$, b 即为所要求的系数. 由 MATLAB 程序产生的系数, 以 ASCII 码的形式存在一个文本文件里面, 且每一行存储一个系数, 以供 IP 核调用.

2.2 由 IP 核生成硬件代码

IP 核是指将一些在数字电路中常用但比较复杂的功能块, 如 FIR 滤波器, SDRAM 控制器, PCI 接口等设计成可修改参数的模块, 让其他用户可以直接调用这些模块, 这样就大大减轻了工程师的负担, 避免重复劳动.

在第一步的基础之上可以通过 IP 核产生数字滤波器的程序. 打开 QuartusII 软件, 在 Tool 的菜单中选择 MegaWizard Plug-In Manager 打开 IP 核的向导, 在类型选择中选择 DSP 中 Filter 中的 FIR Compiler 就可以打开 FIR 的 IP 核. 在 FIR 核的向导中有从外部导入和自动产生系数两种选择. 由于 FIR 核能够自动产生系数的只有高通、低通、带阻等几种滤波器. 本文所要设计的滤波器 IP 核不能自动产生系数, 所以需从外部导入系数, 即导入由 MATLAB 产生的系数.

导入系数设计各种参数, 其中包括数字滤波器的输入位数、输入的通道数、系数占用的位数、器件选择、系数存储单元、数据存储单元、FIR 滤波器的实现方式等. 设计好参数之后就会在 IP 核中显示 FIR 滤波器的仿真结果如图 3 所示. 在仿真图中还可以显示滤波器占用的资源数, 设计的滤波器占用的 Logic Cell 为 1805, FPGA 能满足要求. 参数设计好之后, 并检查仿真图和所使用的资源是否满足要求, 如满足要求就可以按 Generate 生成硬件代码, 如不行需重新开始设计. 由 IP 核生成的文件较多, 有说明文件、代码文件、仿真用的文件等, 所以可以在 IP 核生成的文件的基础上, 再经过第三方软件仿真, 进一步验证设计的正确与否.

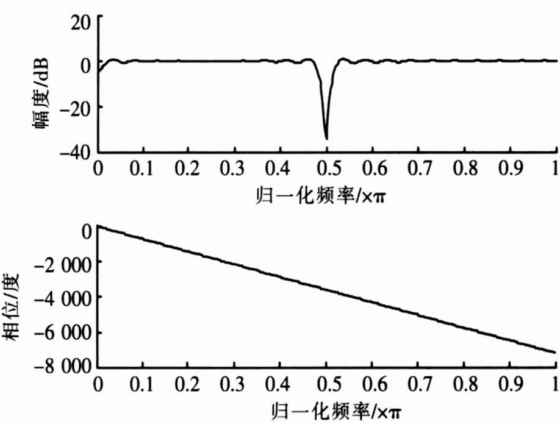


图 2 MATLAB 仿真效果图

Fig.2 The emulational picture of MATLAB

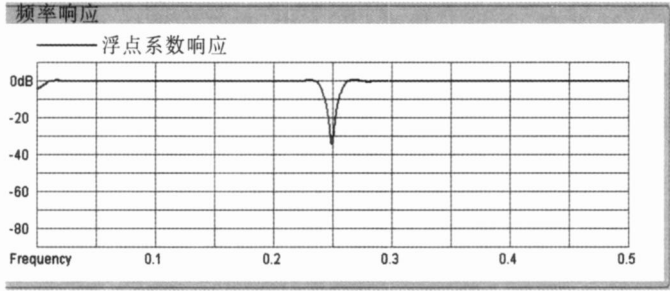


图 3 IP 核的滤波效果图, 其中频率单位已归一化

Fig.3 The picture of effect of the IP

2.3 编译、下载

由上一步生成的数字滤波器的代码与 A/D 控制代码组成了 FPGA 的整个配置程序. 程序经 QuartusII 的编译生成 SOF 文件, 把 SOF 文件通过 JTAG 口下载到 FPGA 中, 就能使 FPGA 实现控制 A/D 转换和数字滤波功能, 从而使整个电路完成对信号的放大和数字滤波的功能.

3 结论

本文基于 FPGA 设计的数字滤波器, 在滤波性能、稳定性、处理速度等方面都有较大的提高, 能有效的克服模拟滤波器的缺点. 并且运用 MATLAB 和 IP 核相结合的方法设计数字滤波器, 使数据滤波器的设计变得更简单方便, 工作量可以大量的减少, 在心电信号处理中能够满足要求.

[参考文献] (References)

- [1] 李伟. FIR数字滤波器的FPGA实现[J]. 计算机与数字工程, 2007, 30(1): 62-65.
Li Wei Realization of FIR digital filter on FPGA [J]. Computer and Digital Engineering 2007, 30(1): 62-65. (in Chinese)
- [2] 王永安, 宋志安, 李佳. 基于Matlab的数字FIR滤波器设计[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2004, 23(4): 62-64
Wang Yong'an, Song Zhi'an, Li Jia Design of digital FIR filter based on matlab [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2004, 23(4): 62-64. (in Chinese)
- [3] 蒋垒, 王昌林, 刘鋈, 等. 基于FPGA的FIR数字滤波器算法实现[J]. 舰船电子工程, 2006, 26(1): 151-156
Jiang Lei, Wang Changlin, Liu Lili, et al Design of FIR filter in FPGA [J]. Ship Electronic Engineering 2006, 26(1): 151-156. (in Chinese)
- [4] 杨丽杰, 崔葛瑾. 基于FPGA的FIR滤波器设计方法的研究[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2006, 36(2): 93-96
Yang Lijie, Cui Gejin. The research of FIR filter design methods implemented on FPGA [J]. Journal of Donghua University: Natural Science Edition, 2006, 36(2): 93-96. (in Chinese)
- [5] 刘春河. 基于MATLAB 7.0的FIR滤波器设计及实现[J]. 电子质量, 2006(12): 39-40
Liu Chunhe. Design and application of FIR wave-filter based on MATLAB 7.0 [J]. Electronics Quality, 2006(12): 39-40. (in Chinese)
- [6] 刘春. MATLAB在数字滤波器设计中的应用[J]. 仪表技术, 2005(5): 23-26
Liu Chun. Application of MATLAB in design of digital wave filter [J]. Instrumentation Technology, 2005(5): 23-26. (in Chinese)
- [7] 柴政, 任海平. 关于数字滤波器设计方式的探讨[J]. 通信电源技术, 2007, 24(1): 33-35.
Chai Zheng, Ren Hai ping. The investigation about the design ways of digital filter [J]. Telecom Power Technologies, 2007, 24(1): 33-35. (in Chinese)
- [8] 王冬, 王华. 基于MATLAB的FIR数字滤波器的设计技术[J]. 应用能源技术, 2006, 17(3): 47-50
Wang Dong, Wang Hua. Design technology of FIR digital filter based on MATLAB [J]. Applied Energy Technology, 2006, 17(3): 47-50. (in Chinese)
- [9] 李亚奇, 张雅琦. 线性相位FIR数字滤波器[J]. 电子测量技术, 2005(6): 35-36
Li Yaqi, Zhang Yaqi. The design of a linear phase FIR digital filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2005(6): 35-36. (in Chinese)
- [10] 王大雄, 王国钧. 基于嵌入式微机的便携心电监护仪设计[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(3): 196-200
Wang Daxiong, Wang Guojun. Development of a portable ambulatory ECG monitor based on Em-bedded microprocessor unit [J]. Space Medicine and Medical Engineering, 2005, 18(3): 196-200. (in Chinese)
- [11] 侯凤贞, 马小飞, 杨希, 等. 心外膜标测系统图形显示软件的设计[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2006, 6(2): 38-41.
Hou Fengzhen, Ma Xiaofei, Yang Xi, et al. The design of graphic software in epicardial mapping system [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2006, 6(2): 38-41. (in Chinese)

[责任编辑: 刘健]