

适合单片机实时处理的简单 FIR 滤波器设计

鄢 刚, 张阿卜

(厦门大学 信息科学与技术学院 福建 厦门 361005)

摘要:介绍了一种以 Matlab 7.0 为辅助设计工具, 采用窗函数法结合零、极点调整法和试探法设计的滤除工频 50 Hz 干扰的 FIR 滤波器的设计与实现。该滤波器运算简单、计算量小, 非常适合通用单片机进行实时处理, 同时具有低通滤波和 50 Hz 陷波功能。实验结果表明该滤波器对心电信号中的 50 Hz 工频干扰和高频干扰具有很好的滤波效果。

关键词:心电信号; 50 Hz 工频干扰; FIR 滤波器; 单片机

中图分类号: TP138

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X(2007)11-046-03

Design of FIR Filter Suitable for Processing of the Single Chip in Real-time

YUN Gang, ZHANG Abu

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

Abstract: The paper introduces the design and realization of a 50 Hz FIR digital filter based on Matlab 7.0. The filter has the characters of simple operation and reduction of computation. It is very suitable for the processing of the single chip in real-time and equal to a low pass filter. Experimental results show that the filter can remove the 50 Hz power line interference and high frequency interference efficiently.

Keywords: ECG signal; 50 Hz power line interference; FIR filter; single chip

1 引言

近年来, 心脏病的发病率不断上升, 为了使病人能够随时随地得到诊治, 科研人员研制了多种便携式移动心电监护设备。在研制便携式心电监护设备时, 既要考虑使用者携带及使用方便, 又要保证采集到高质量的心电信号。解决这一矛盾的惟一途径就是用尽量优化的软、硬件资源来完成相应功能。心电信号的频率在 0.05~100 Hz 之间, 一个正常的心电图由 P 波、QRS 波群、T 波等组成。由频谱分析可知, QRS 波群的中心频率在 17 Hz 带宽约为 10 Hz, P 波、T 波等的频带都在此频带的低端以外^[1]。心电信号采集过程中的噪声源主要有: 50 Hz 工频干扰及其各次谐波, 呼吸运动和电极移动所产生的频率小于 5 Hz 的干扰, 肌肉收缩产生的 0~100 Hz 肌电(EMG)噪声, 用于信号处理的电子设备所产生的噪声等^[2,3]。其中最明显的是 50 Hz 工频干扰及其各次谐波和由于呼吸运动所产生的频率小于 5 Hz 的干扰。要得到清晰、准确的心电信号, 必须在不影响正常心电波形的基础上将这些干扰滤除。这就要求滤波器具有良好的幅频特性和严格的线性相位特性。本文借助 Matlab 7.0^[4], 采用窗函数法结合零、极点调整法^[1]和试探法设计了一种滤除工频 50 Hz 干扰的 FIR 滤波器。

2 基本原理

2.1 窗函数设计滤波器^[6,7]原理简述

设滤波器的理想频率响应函数为 $H_d(e^{j\omega})$, 则其对应的单位脉冲响应为:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$$

窗函数法设计滤波器的基本原理就是用有限长度单位脉冲响应序列 $h(n)$ 去逼近 $h_d(n)$ 。通常 $h_d(n)$ 是无限长序列, 且是非因果的, 所以用窗函数 $w(n)$ 将 $h_d(n)$ 进行截断并作加权处理得到:

$$h(n) = h_d(n)w(n)$$

$h(n)$ 就是实际设计的 FIR 数字滤波器的单位脉冲响应序列, 其频率响应函数为:

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n}$$

其中, N 为所选窗函数 $w(n)$ 的长度。同时, 如果要求滤波器具有线性相位特性, 则 $h(n)$ 必须满足:

$$h(n) = \pm h(N-1-n)$$

2.2 方法改进及实现

设计中选用 FIR I 型滤波器^[8,9], 即满足 $h(n) = +h(N-1-n)$ 且 N 为奇数。选用 Hamming 窗对理想滤波器的单位脉冲响应进行截断, 窗函数为:

$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n/N), N = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

按常规设计方法直接设计 50 Hz FIR 陷波器, 要达到较好的滤波效果, 滤波器的阶数较高且滤波器系数多为小数, 不利于通用单片机进行实时处理。设定采样频率 $F_s = 200$ Hz, 先用窗函数法设计一个低频特性较好的 30 Hz 低通滤波器, 然后利用 Matlab FDATool 工具箱里的量化工具对滤波器的系数进行量化和调整。量化前、后滤波器的幅频特性如图 1 所示。

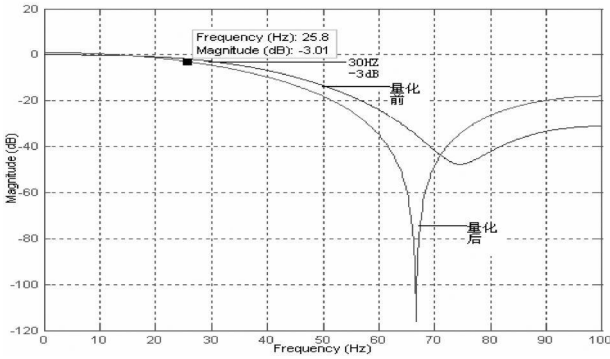


图 1 量化前、后滤波器的幅频特性曲线

量化后滤波器的传递函数为:

$$H_1(z) = 0.125 + 0.25z^{-1} + 0.375z^{-2} + 0.25z^{-3} + 0.125z^{-4}$$

3 滤波器波形特性比较

由以上滤波器的幅频特性, 结合零、极点调整法和试探法反复对滤波器系数进行调整, 使其具有更好的低频特性和 50 Hz 衰减特性。系数调整后滤波器的幅频特性如图 2 所示。

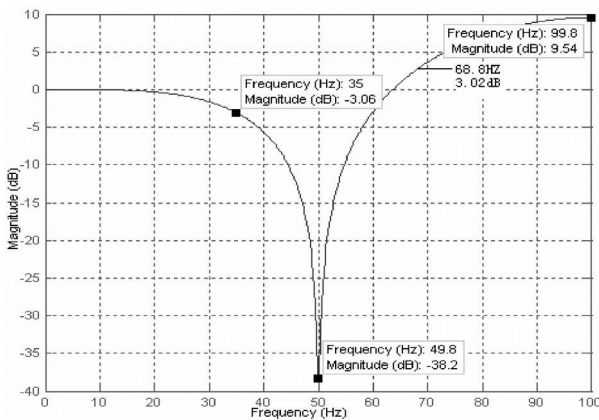


图 2 系数调整后滤波器的幅频特性曲线

系数调整后滤波器的传递函数为:

$$H_2(z) = -0.25 + z^{-1} - 0.5z^{-2} + z^{-3} - 0.25z^{-4}$$

由滤波器幅频特性曲线可以看出, 经系数调整后滤波器具有更好的低频特性, -3 dB 截止频率为 35 Hz, 同时对 50 Hz 工频干扰的衰减达到 -38 dB。但是, 系数调整也使滤波器的高频特性变差, 在 68.8 Hz 处的增益超过

+3 dB。为了滤除心电信号中的高频噪声, 必须对 50 Hz 以上频段范围内的信号进行衰减。

同样, 可以用窗函数法结合试探法设计了一个低频特性较好且具有良好的高频衰减特性的 40 Hz 低通滤波器。利用 Matlab FDATool 工具箱里的量化工具对滤波器的系数进行量化和调整。量化前、后滤波器的幅频特性曲线如图 3 所示。

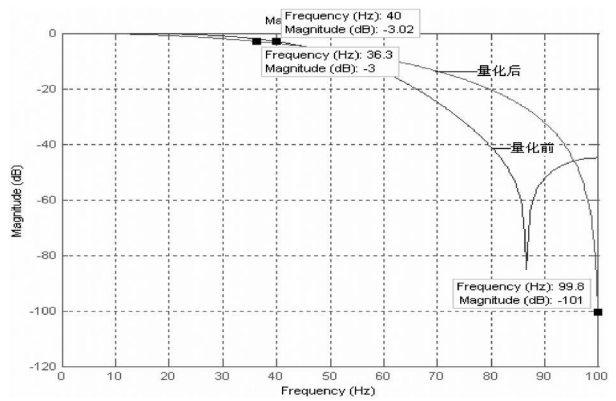


图 3 量化前、后滤波器的幅频特性曲线

量化后滤波器的传递函数为:

$$H_3(z) = 0.25 + 0.5z^{-1} + 0.25z^{-2}$$

由幅频特性曲线可以看出, 量化后滤波器的 -3 dB 截止频率为 36.3 Hz 且具有良好的低频和高频特性。综合以上两种滤波器的幅频特性, 将这两种滤波器进行级联。级联后滤波器的传递函数为:

$$\begin{aligned} H(z) &= H_2(z)H_3(z) \\ &= (0.25 + z^{-1} - 0.5z^{-2} + z^{-3} - 0.25z^{-4}) \cdot \\ &\quad (0.25 + 0.5z^{-1} + 0.25z^{-2}) \\ &= (-1 + 2z^{-1} + 5z^{-2} + 4z^{-3} + 5z^{-4} + \\ &\quad 2z^{-5} - z^{-6})/16 \end{aligned}$$

级联后滤波器的幅、相频率特性如图 4 所示。

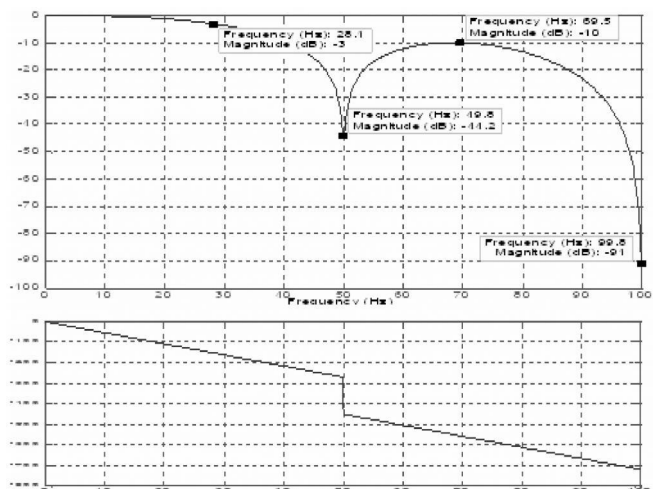


图 4 级联后滤波器的幅、相频率特性

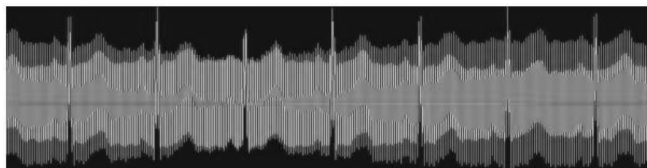
滤波器的幅、相频率特性由图 4 可以看出, 级联后滤波器的-3 dB 截止频率为 28.1 Hz, 在 50 Hz 频率处的衰减为-44.2 dB, 高频最小衰减为-10 dB, 且滤波器在通带内具有严格的线性相位特性。该滤波器的群延时为:

$$t = [(N-1)/2] * T_s = 3 * 5 = 15 \text{ ms}$$

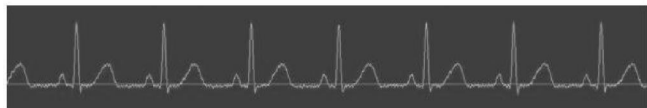
由心电图信号的功率谱可知, -28 dB 的截止频率能够满足心电监护的需要。

4 滤波效果

将上述设计的滤波器用于实际心电图信号滤波取得了良好的滤波效果。滤波前、后的心电信号波形如图 5 所示。



(a) 受到严重干扰的心电信号波形



(b) 滤波后的心电信号波形

图 5 滤波前、后的心电信号波形

5 结 语

由滤波器的幅、相频率特性和实际滤波效果可以看出, 该滤波器不但能够很好地滤除工频干扰而且具有良好的低频特性。同时, 滤波器的系统函数中分子、分母的各相系数

均为整数, 便于乘法运算。并且分母正好是 2 的 4 次幂, 在进行除法运算时可以直接由一条移位指令完成。这无疑给编程和运算都带来了极大的方便。

本滤波器结构简单、占用资源少、滤波效果好, 非常适用于嵌入式便携设备中的信号滤波。同时, 该滤波器的设计方法也可以推广到其他相似性能指标的滤波器设计中, 在科研实践中一定会有较大的发展前途。

参 考 文 献

- [1] 王磊, 郑崇勋, 叶继伦, 等. 一种高效的 QRS 波实时检测方法[J]. 北京生物医学工程, 1998, 17(4): 217-222.
- [2] 李刚, 刘巍, 抑制工频干扰及基线漂移的快速算法[J]. 中国生物医学工程报, 2000, 19(1): 99-103.
- [3] Van Alste, Schilder J A. Removal of Base Line Wander and Power Line Interference from the ECG by an Efficient FIR Filter with a Reduced Number of Taps [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1995, 32(12).
- [4] 王蒙. Matlab 7 辅助信号处理技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 冯华君, 洪淑月, 施晓钟. 借助 Z 变换和零极点设计数字陷波器[J]. 浙江师范大学学报, 2004, 2(1): 27.
- [6] 田新广, 张尔扬. 一种基于窗函数法设计 FIR 数字滤波器的新算法[J]. 无线电工程, 2001(21): 228-232.
- [7] 苏飞, 王兆华. 基于矩形窗二叉分解的窗函数设计[J]. 天津大学学报, 2004, 8(5): 704-708.
- [8] 周利清, 苏菲. 数字信号处理基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [9] 朱铭铭, 赵勇, 甘泉. DSP 应用系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

作者简介 郇 刚 男, 1978 年出生, 河南平顶山市人, 硕士研究生。主要从事计算机控制和智能控制方向的研究。
张阿卜 男, 教授, 硕士生导师。主要从事计算机控制和智能控制方向的研究。

(上接第 45 页)

5 结 语

本文以 TMS320F206 为例详细阐述了 DSP 芯片前向通道、后向通道接口电路的设计思路及方法。在系统资源受到限制或设计需要的情况下, 可以将 A/D 和 D/A 同时配置在 DSP 的扩展总线上。此时, 最重要的是综合考虑 A/D 和 D/A 与 DSP 收发数据时序的匹配。本文设计方案, 以电路板的方式已运用于厂家的产品中, 对机载雷达的大规模、复杂性信号处理发挥了一定的作用。

作者简介 祝贞凤 男, 1979 年出生, 国防科技大学硕士。主要从事产品设计开发及质量监督工作。

参 考 文 献

- [1] TMS320C20xx User's Guide. SPRU127C. Texas Instrument, 1999.
- [2] TMS320F206 Digital Signal Processor SPRS050A. Texas Instrument, 1998.
- [3] Monolithic 16 Bit DACPORT AD669. Analog Devices, 2002.
- [4] 16 Bit, 1 LSB INL, 1 M SPS Differential ADC AD7677. Analog Devices, 2003.