

· 技术与方法 ·

基于 DSP 与 FPAA 的电化学信号滤波器

张珂^{1,2} 杜民^{1,2,△} 陈旭海^{1,2}

(1 福建省医疗器械和医药技术重点实验室 福建 福州 350002 2 福州大学精密仪器研究所 福建 福州 350002)

摘要 目的:研究对自主研发的 DNA 电化学分析仪所采集电化学信号的噪声的滤除方法。方法:根据电化学噪声信号的特征及其频率分布范围,采用由现场可编程模拟阵列(FPAA)实现的有高阶低通滤波器和基于 DSP 实现的 FIR 数字滤波器相结合的方式,对混合在电化学信号中的高频噪声信号进行滤除。结果:对滤波结果进行分析,频率在 100HZ 以上的噪声信号基本滤除。结论:FPAA 与 DSP 芯片的结合构成了一个稳定性高、线性相位特性好、实时性强的滤波滤波器。

关键词 电化学; DSP; FIR 滤波; FPAA

中图分类号: TP274.2, R197.39 文献标识码: B 文章编号: 1673-6273(2011)01-134-04

Filter for Electrochemical Signal Based on DSP and FPAA*

ZHANG Ke^{1,2}, DU Min^{1,2,△}, CHEN Xu-hai^{1,2}

(1 Key Laboratory of Medical Instrumentation & Pharmaceutical Technology, 350002, Fuzhou Fujian, China;

2 Institute of Precision Instrument, Fuzhou University, 350002, Fuzhou Fujian, China)

ABSTRACT Objective: To investigate the filter method for electrochemical signal from self-developed DNA electrochemical analyzer. **Methods:** According to the characteristics and the frequency distribution of Electrochemical noise signal, with the combination of second-order low-pass active filter module implemented by Field Programmable Analog Array (FPAA) and FIR digital filter module that achieved by DSPTMS320F2806, filter out the high frequency noise signal that mixed in the electrochemical signal. **Results:** Through the analysis of the results of the filter, the noise with the frequency above 100 HZ was almost filter out completely. **Conclusion:** A filter with high stability, fine linear phase characteristic and real time characteristics was formed with the combination of FPAA and DSP.

Key words: Electrochemical; DSP; FIR filter; FPAA

Chinese Library Classification: TP274.2, R197.39 **Document code:** B

Article ID: 1673-6273(2011)01-134-04

前言

在电化学信号的采集过程中不可避免的要遇到电化学信号的去噪问题。特别是在一些现场环境恶劣的场合,去噪问题显得更加重要。本文旨在讨论在电化学信号采集过程中,对电化学信号噪声的滤除方法以及该滤波方法在 DSP 上的实现。对于电化学工作站的降低成本,便携化的实现方面有一定的借鉴意义。

滤波器在总体上可以分为软件滤波和硬件滤波。数字滤波可以满足滤波器对幅度和相位特性的严格要求^[1],而且能够避免电压漂移、温度漂移和噪声等问题。但阶数过高的数字滤波器会使得本系统的芯片运算量增加实时性变差,而阶数太低时数字滤波器的性能又无法达到仪器的设计要求^[2]。硬件滤波实时性好、经济适用、易于实现,但是电阻、运放等元器件会产生热噪声,使得电路的噪声增大,当工作场合发生变化时,电容与电阻的精度也会不可避免的发生相应的改变,容易引起振荡。近年来,基于开关电容技术的现场可编程模拟阵列(FPAA)取

得了快速的发展。与 FPGA 相对应,FPAA 主要应用在模拟信号的处理方面。相比于传统的电阻、电容等器件构成的硬件有源滤波器,其具有不随时间产生温度和电压漂移,可实时动态和静态编程,还能隐藏客户的专利电路^[3]。

鉴于 FIR 滤波算法在处理此类信号时的稳定性高、线性相位特性好、实时性强以及 FPAA 芯片的低功耗、可编程、精度高等特点,经综合考虑,本系统采用 FPAA(AN231E04)所实现的高阶有源硬件滤波与基于 DSPTMS320F2806 实现的 FIR 滤波相结合的方式,从而能够高效地实现一个较为理想的滤波系统。

1 滤波器设计

仪器的滤波器模块包含 2 个部分:一个是由 FPAA 芯片实现的高阶低通有源滤波器;另一个是由 DSP 实现的 FIR 滤波器。

本文所涉及仪器的信号来源为电化学反应池中工作电极所测的电压、电流信号。对其信号的干扰因素很多,通过对仪器

* 基金项目:国家“863 计划”项目(2008AA02Z433, 2006AA02Z4Z1),国际合作计划项目(2009DFA32050),

福建省科技厅重点项目(2008J1005)资助

作者简介:张珂(1987-),男,硕士研究生,研究方向:生物医疗电子。

△通讯作者:杜民,电话:0591-83759450, E-mail: dm_dj90@163.com

(收稿日期:2010-08-30 接受日期:2010-09-25)

正常工作时所采集的原始信号进行功率谱分析,发现其噪声信号大多为 100 Hz 以外的小幅值干扰信号。因此将仪器的信号采集滤波器模块设置为通带频率为 100 Hz 的低通滤波器。

1.1 基于 FPAA 的低通滤波器

美国 Anadigm 公司的现场可编程模拟阵列(FPAA)采用开关电容技术,具有现场可编程的优点。可以根据需要实时地动态配置电路相关参数。所有硬件滤波电路的实现不再需要电容、运放等器件。大大降低了整个仪器的功耗,减小了仪器的尺寸,而这两点也正是实现便携式化的 2 个重要方面。另外,用户根据厂家提供的 Anadigm Designer2 开发软件可以方便快捷地进行滤波器的设计。

在本文所涉及仪器中,采用 Anadigm 公司的 AN23E04 型号芯片,搭建出高阶低通滤波模块。对于低通滤波器的设计可以在 Anadigm Designer2 软件中快速精确地设计出来。根据 Anadigm filter 工具可以通过拖拽的方式设置滤波器的通带频率、阻带频率以及衰减系数。通过 2 片 AN23E04 的组合可以实现一个过渡带很窄的低通滤波器。对于信号采集模块,滤波器的系数设置为:通带频率为 100 Hz、阻带频率为 150 Hz、衰减系数为 50 dB。滤波器参数的选取完毕,也意味着滤波器的设置完成。然后通过 Anadigm filter 工具将所设置的滤波器导入 AN23E04 芯片组中,即可进行滤波工作^[4]。

而当仪器的工作场合变化时,噪音的频率等其他参数也会不可避免地发生相应的变化,因此低通滤波器的参数也可能出现不能很好地满足滤波要求的特点。所以需要能够及时改变滤波器的一些相关参数以适应环境,FPAA 的可动态配置的优点为使得这种要求成为可能。可通过 Anadigm Designer2 开发软件将事先设置好的配置,储存于 DSP 控制器之中,可以根据需要进行动态的配置。

整滤波器的设置过程无需耗费设计者过多的精力。而对于滤波器的精度,可以非常方便地反复进行调试。其滤波器设计界面如图 1 所示:

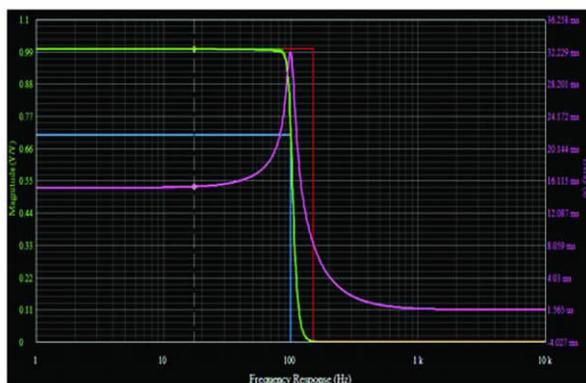


图 1 低通滤波器的参数设置

Fig1 Set up the parameter of the low-pass filter

在 FPAA 内部信号采取差分输入、差分输出的方式,从而避免了共模信号的干扰提高了仪器的精度^[5]。为了检验低通滤波器的设计的合理性,采用软件中提供的模拟信号发生器模块对低通滤波器的特性进行仿真。而该信号发生器模块具有可以由外部导入仿真信号数据的功能,所以可以方便地模拟出具有任意波形的信号。在此,用其模拟一主频为 80 Hz,并掺杂有

200 Hz、500 Hz 杂波的信号,使其通过上文提到的低通滤波器,观察模拟滤波后效果以检验所设计低通滤波器的性能。并作出相应的修改。如图 2 所示:

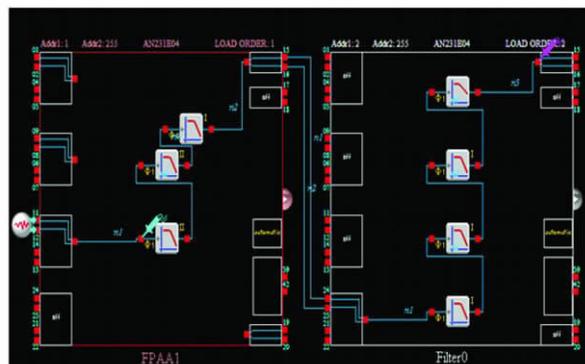


图 2 基于 FPAA 的低通滤波器

Fig2 Low pass filter based on FPAA

图 3 即为通过仿真得到的关于低通滤波器工作性能的波形,从图中可以看到,超过了低通滤波器的通带频率的高频信号没用通过上文所设计的低通滤波器。直观的仿示波器界面提供了一个友好的软件调试滤波器的工具。而在实际试验中,FPAA 芯片组的滤波结构也在电化学信号的要要求的精度范围内。软件的仿真功能可以方便快捷帮助用户设计一款满足实际要求的滤波器。

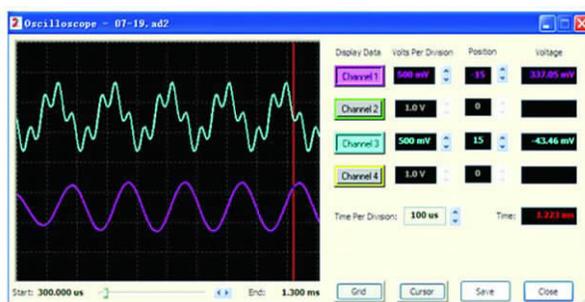


图 3 FPAA 仿真波形

Fig.3 Simulation waveform of FPAA

对于信号发生模块的滤波器,由于其信号为直接经由 D/A 转换的相应波形信号,影响其精度的干扰信号很少,所以通过 Anadigm Designer2 用相同的方法配置出一截止频率为 500 Hz 的低通滤波器。

1.2 基于 DSP 的 FIR 数字滤波器

在实际数字信号处理的应用中,数字滤波器得到了广泛的应用。数字滤波器差分方程的一般形式为^[6]:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^{N-1} b_k y(n-k) \quad (2.2.1)$$

式(2.2.1)中,位为输入序列,位为输出序列, a_k 和 b_k 为滤波器系数, N 为滤波器阶数,若所有的 b_k 都为 0,即得到 FIR 滤波器的差分方程。然后对其进行 Z 变换,整理后可得 FIR 滤波器的传递函数可整理为一般形式^[7]:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{k=0}^{N-1} h_k z^{-k} \quad (2.2.2)$$

FIR 滤波器是一种乘法累加的运算形式, A/D 转换器采集到的信号作为输入 $X(n)$ 不断地输入, 经过延时后进行乘法累加运算, 然后作为滤波结果输出。软件由无限循环主程序与中断服务程序组成。主程序中首先完成 DSP 芯片的初始化工作, 包括: 设置堆栈, 控制寄存器初始化, 根据 A/D 转换器的采样频率设置 DSP 的工作频率等。然后启动 A/D 转换, 并启动中断服务程序, 对输入信号进行数字滤波。

1.3 滤波器的整体实现

考虑到成本与控制复杂度的问题, 本设计选定实现滤波的核心器件为美国 TI 公司的 TMS320F2806, 该款芯片为定点 DSP, 是集成度较高、性能较强的运动控制系列器件。

DNA 传感器采集的信号直接经由 FPAA 实现的低通滤波器滤波后, 进行 A/D 采样, 此处选择的 A/D 转换器为 MAXIM 公司生产的 MAX1168 ADC, 这是一款低功耗、多通道、16 位逐次逼近型串行模数转换器。带有一个高速 SPI/QSPI/MICROWIRE 兼容的接口, 工作可靠、费用也较低, 可以满足此设计产品化的要求。然后进入 DSP 进行数字滤波^[9]。

根据流程图与 FIR 滤波算法借助 TI 公司提供的软件开发平台 CCS 编写相应的软件滤波程序并在调试通过, 然后进行实际滤波检测。

2 系统总体结构

最终整个 DNA 电化学信号分析仪主要由四个模块构成, 如图 4 所示:

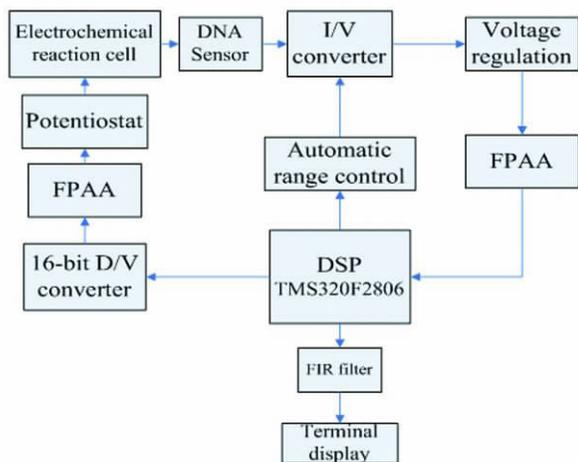


图 4 仪器整体结构图

Fig. 4 The structure of the whole instrument

由于设计目标为一台专用型的 DNA 电化学检测仪, 因此仪器的复杂度、成本和体积与通用型电化学工作站相比都大大降低。

(1). 处理器模块: 这部分采用了 TI 公司的 DSP 处理器 TMS320F2806, 主要负责对信号发生模块与信号采集模块的控制, 同时对 DNA 传感器采集到的电化学信号进行实时 FIR 滤波处理并送终端显示。

(2). 信号发生模块: 包括 16 位 D/A、FPAA 实现的低通滤波器和恒电位仪。在 DSP 的控制下, 根据选择的电化学检测方法, 产生相应的波形信号。并可根据需要动态地配置滤波器的

截止频率等相关系数。

(3). 电化学反应模块: 三电极体系电化学反应的场所, 并将反应中产生的电流信号传送给信号采集模块。

(4). 信号采集处理模块: 包括 I/V 转换电路、自动量程控制电路、电压调整电路、FPAA 实现的低通滤波器和 16 位 A/D、DNA 电化学传感器。其功能是采集电化学反应池中的电流信号, 并送处理器模块进行处理分析。

3 实验与结果

3.1 铁氰化钾测试实验

实验材料: 浓度低至 $1 \mu\text{mol/L}$ 的铁氰化钾的 1 mol/L KCL 溶液 20 ml, 玻碳电极, Ag/AgCL 电极, 铂丝电极, 其他实验工具。

实验方法: 此处三电极体系为: 工作电极(玻碳电极)、参比电极(Ag/AgCL 电极)、对电极(铂丝电极)。检测方法选取了计时电流法。对于此处计时电流法电压为 3V, 循环次数为 4 段, 电压施加时间与静置时间均为 1s。三电极体系搭建完毕后, 开始扫描溶液的特性曲线。并将滤波后与未经滤波的电化学信号导出作出比较。

3.2 实验结果与结论

滤波前后铁氰化钾溶液电化学信号对比如图 5,6 所示:

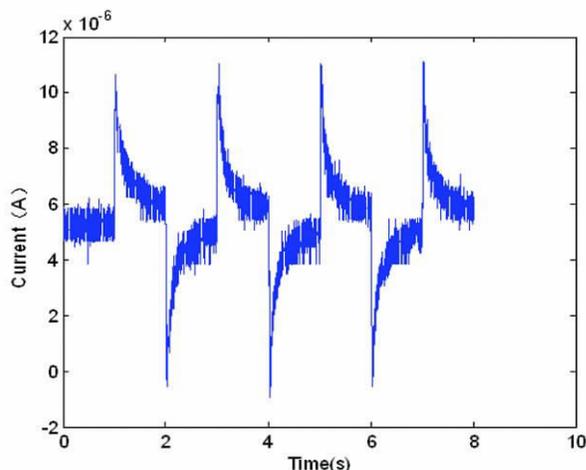


图 5 未经 FIR 滤波的铁氰化钾电化学信号

Fig. 5 Electrochemical signal without FIR filter

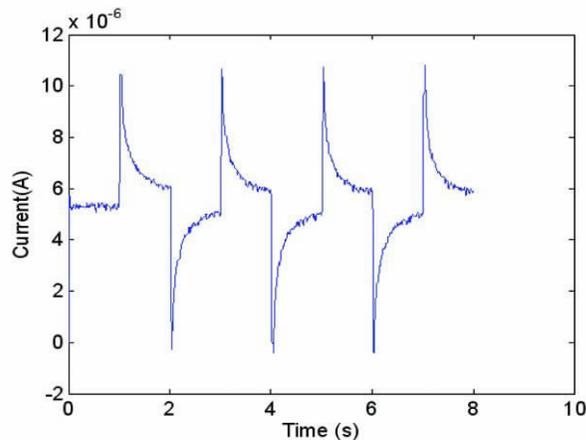


图 6 经 FIR 滤波后的铁氰化钾电化学信号

Fig.6 Electrochemical signal of Ferricyanide through FIR filter

对比滤波前后的信号频谱图变化情况可得:电化学信号的电化学信号经 DSP 滤波后在时域内变得光滑很多,且相位没有明显的偏移,所采集的电化学信号的峰值也没有发生明显的变化。100 Hz 以上高频噪声信号基本滤除。能够满足电化学信号分析的误差要求。

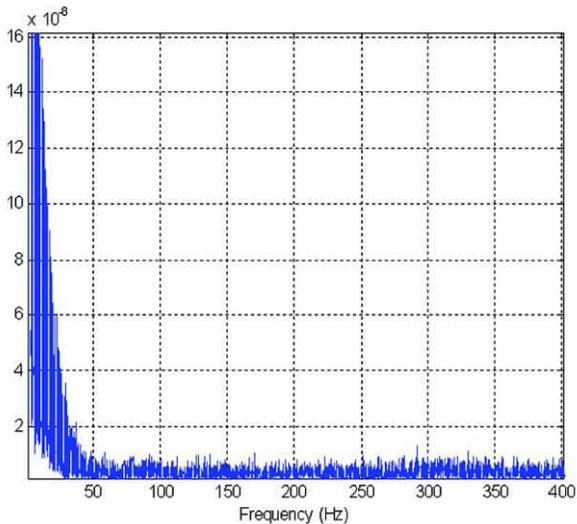


图 7 未经滤波信号频谱图

Fig. 7 Signal spectrum without the filter

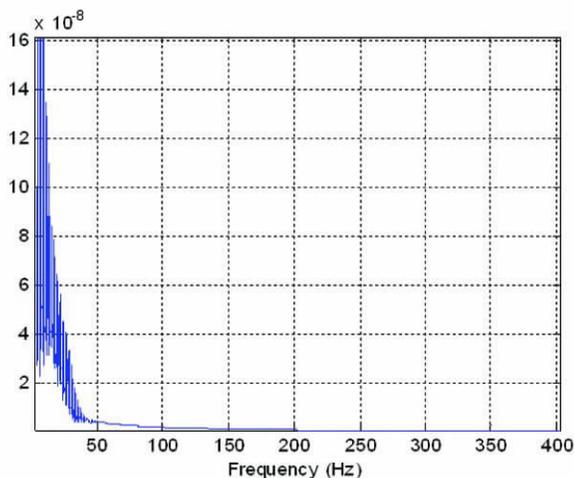


图 8 滤波后信号频谱图

Fig. 8 Signal spectrum after filtering

4 结论

数字滤波现在作为一种经济、高效的滤波手段,得到了越

来越广泛的利用。而随着 DSP 芯片技术的不断发展也为数字滤波技术提供了更加稳定的平台。而基于开关电容技术的现场可编程模拟阵列的发展也使得模拟电路的设计越来越快速、简便,并为电子设备的小型化提供了有力的支持。

本文介绍了一种基于 DSP 的软件滤波结合新兴模拟集成电路技术 FPAA 芯片实现的电化学信号噪声的滤除方法,并通过实验结果验证了该方法的可行性。对于电化学信号滤波等方面的工作以及仪器的便携化等方面有一定借鉴意义。

参考文献(References)

- [1] Kuo SM, Lee BH. Real-time Digital Signal Processing: Implementations, Applications, and Experiments With the TMS320C55X [M]. Chichester, West Sussex, New York John Wiley & Sons, Ltd. (UK). 2001
- [2] 吕振,李定江. 基于 TMS320LF2407A 和 MAX262 的可编程数字滤波系统[J]. 煤矿机电, 2009, (04): 73-75
Lv Zhen, Li Ding-Jiang. Programmable Digital Filter System Based on TMS320LF2407A and MAX262 [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2009, (04): 73-75 (in Chinese)
- [3] Györök G. The FPAA realization of analog robust electronic circuit [C]. International Conference on Computational Cybernetics. ICC, IEEE. 2009, Page(s): 179 - 183
- [4] 罗兵,于化鹏,吴美平,等. 基于 FPAA 的石英音叉陀螺的驱动与解调电路设计[J]. 北京: 计算机测量与控制, 2009, 17(11): 2232-2234
Luo Bing, Yu Hua-Peng, Wu Mei-Ping. Design of Drive and Demodulation Circuit for Quartz Tuning Fork Gyroscope Based on FPAA [J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17 (11): 2232-2234 (in Chinese)
- [5] Chan UF, Chan WW, Sio Hang Pun, et al. Flexible Implementation of Front-End Bioelectric Signal Amplifier using FPAA for Telemedicine System [C]. Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE. Page (s): 3721-3724
- [6] 陈怀琛. 数字信号处理教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
Chen Huai-Chen. Digital signal processing tutorial [M]. Beijing. Electronic industry press. 2004 (in Chinese)
- [7] Du Yong-Xing, Qin Ling. Realization of Digital FIR Filter on Different Rank Number [J]. Modern Electronic Technique, 2005(9): 86-87
- [8] 朱铭锴, 赵勇, 甘泉, 等. DSP 应用系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
Zhu Ming-Gao, Zhao Yong, Gan Quan, et al. DSP Application System [M]. Beijing. Electronics Industry Press, 2002 (in Chinese)