

基于 DSP 和 ARM 的便携式脑电信号处理系统的实现

赵丽, 邢潇, 刘泽华

(天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300222)

摘要: 为使脑-机接口技术 (brain-computer interface, BCI) 面向实用化、产品化, 建立便携式的处理平台成为重要研究问题; 系统采用现场可编程门阵列 (FPGA) 控制 VGA 显示器, 设计了多功能视觉诱发刺激器, 实时在线产生多种组合模式的刺激信号, 诱发稳态视觉诱发电位; 信号采集后放入到数字信号处理器 (DSP) 中, 经过 FIR 滤波和 FFT 算法的处理后, 得到辨识度较高的视觉诱发电位信号, 并由无线将数据发送给 STM32 处理器, 在 LCD 触屏上实时显示; 实验结果表明系统实时采集、处理、显示脑电信号, 相对于目前的 BCI 系统实现了多平台的便携式。

关键词: 脑-机接口; 视觉诱发电位; FIR; FFT; LCD;

Portable EEG Signal Processing System Based on DSP and ARM

Zhao Li, Xing Xiao, Liu Zehua

(Tianjin Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to make it possible for the brain-computer interface (BCI) to get rid of the PC, so establishing practical and pragmatic products, as well as a portable processing platform has become a vital study. This system adopts field-programmable gate array (FPGA) to control VGA monitor and design a multi-purpose visual evoked stimulator, thus the system can produce a variety of combinations of real-time online mode stimulation signals to induce steady-state visual evoked potential of people. When the signal was collected into a digital signal processor (DSP), the FIR and FFT will process this signal so as to obtain a higher recognizable of the visual evoked potential signals. Then the data will be transmitted by radio to the processor STM32 and display on the LCD touch screen at the real time. This system acquires, processes and displays EEG at the real-time, thus it achieved the portable pattern from the stimulator, acquisition and processing platform to display. Besides, it is available to be transplanted into other miniature devices.

Keywords: brain-machine interfaces; visual evoked potential; FIR; FFT; LCD

0 引言

21 世纪脑科学和生物科学的研究已被美国和欧洲等许多国家列入国家级科研计划。脑-机接口作为脑科学的重要组成部分, 经过几十年的发展, 已经由实验室阶段逐渐面向实用化、产品化。目前已有少数研究小组开发的脑-机接口技术用于实际。传统的脑-机接口技术对计算机系统的依赖性较大, 不利于脑电产品的开发, 所以利用微处理器平台取代上位机, 实现设备的便携式是当前的主要研究方向之一^[1]。

脑电信号是人的生理电活动反映在大脑皮层中形成的, 其中包含了大量的生理病理信息。脑-机接口帮助人类实现了无需肢体动作仅靠脑信号与外界沟通的方法, 经研究取得了很大的成就。诱发电位作为脑电的一种重要识别信号, 在临床医学、神经生理学、认知科学等方面具有重要的作用。视觉诱发电位 (VEP) 是枕叶皮层对视觉刺激产生的电活动, 属于长期潜伏的近场皮层电位。根据刺激的频率不同, 又可分为瞬态 (刺激频率 ≤ 2 Hz) 和稳态视觉诱发电位 (steady state visual evoked potential, SSVEP) (刺激频率 > 8 Hz), SSVEP 具有高信息传输

率、较短训练时间和特征易于提取等优点, 且仅需要位于枕叶皮层位置少数几个电极的信号就可提取^[2]。因而, SSVEP 是一种比较常用的人机交互系统输入信号, 利于将提取出的信号转化为外部控制命令, 在众多领域里具有很大的研究价值。

1 系统流程及实验设计

本文所设计的脑电信号处理系统包括由 FPGA 驱动 VGA 的视觉刺激器、脑电采集放大器、DSP 信号处理平台以及 STM32 驱动的 LCD 触屏四部分, 相对于目前的 BCI 系统, 系统信号处理和实时显示均在微处理器中完成, 实现了设备的便携性和灵活性。系统的流程图如图 1 所示。

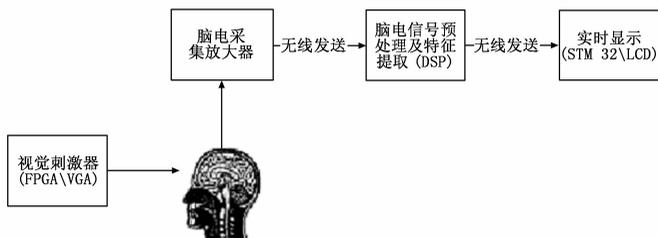


图 1 系统流程图

为验证和检测系统可靠性和稳定性, 选取 5 名 24~26 岁的男女受试者, 身体健康, 均无精神疾病, 分别单独进行试验。实验中所使用的电极、电极帽以及安放电极位置参考国际 10-20 脑电极放置标准模式, 电极位置 O1 作为信号采集时的电极安放位置, A1、A2 作为参考电极位置, 受试者平视刺激

收稿日期:2014-03-17; 修回日期:2014-04-17。

基金项目:国家自然科学基金项目(61178081);校级科研项目(KJ13-01, YJS10-03)。

作者简介:赵丽(1962-),女,辽宁人,教授,博士,主要从事生物医学工程方向的研究。

器。依次顺时针注视 12 Hz、14 Hz、16 Hz、18 Hz 刺激模块。

2 视觉刺激器的实现

脑—机接口视觉刺激器既是提供视觉刺激的外部装置，也是脑—机接口系统中的人机界面。为实现系统的便携式和增强系统的集成度，脑—机接口刺激器基本上在计算机显示器或是电视机上通过硬件和软件两种方式产生^[3]。系统采用 ALTERA 公司的 Cyclone IV 系列中的 EP4CE15F17C8 芯片驱动 VGA 显示器作为视觉刺激器，通过 VerilogHDL 语言在 QuartusII 软件上编程产生各种刺激模式。按照 VGA 逐行扫描的工作原理和 VGA 工业标准，在 FPGA 中设计了 VGA 控制器，包括分频模块、扫描时序模块、图像描述模块等。

时钟分频模块用 Verilog HDL 代码实现，对输入时钟 clock 进行倍分频后可以输出不同的时钟频率。扫描时序产生模块提供 VGA 行扫描和场扫描的时序。对像素输出频率计数分频，产生行扫描频率。对行扫描频率计数分频，得到场扫描频率。图像描述模块描述需要产生的刺激图形，包括位于屏幕不同区域的方块。通过行坐标和场坐标来描述方块位置及大小。图形的改变或运动可引起有效的诱发电位，当闪烁的时钟信号为低电平时，方块为黑色；为高电平时，方块为白色。在刺激模块黑白变的同时，发出触发信号。同时可编程为其他颜色交替变化，便于研究不同颜色的闪烁光对稳态视觉诱发电位的影响。

FPGA 作为半定制电路，具有很强的在线修改能力，可以随时修改设计而不必改动硬件电路。因此，通过编程可以灵活地产生不同的刺激模式，修改和升级十分方便，兼具用硬件或软件方式实现视觉刺激器的优点。根据上述控制器的设计，产生了下列几种刺激模式，如图 2 所示。

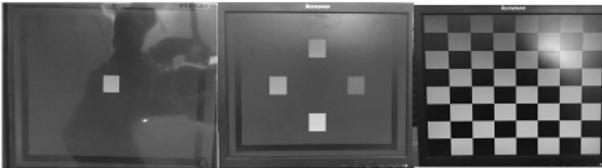


图 2 单频率、多频率、棋盘格

3 系统的信号采集与处理

3.1 脑电信号的采集

系统的脑电采集放大器采用的是 16 导联的微型脑电放大器，脑电信号由氯化银电极采集进入放大器后，经过滤波、三级放大、50 Hz 工频陷波、模数转换后将 μV 级的生物电信号转化为了 mV 级的数字信号，并由无线发送传输给 DSP 目标板。DSP 通过无线模块收到数据后，将数据实时放入到程序写好的数组中，准备进行滤波和特征提取。

经过放大转换后的脑电信号仍然存在大量的噪声信号，因此本课题对生物电信息的处理主要研究两方面的内容：(1) 信号的预处理算法，目的是进一步提高信号的信噪比，使所需要的信息从强噪声背景中凸显出来；(2) 对稳态视觉诱发电位的特征进行提取。

3.2 SSVEP 信号的特征提取

系统的滤波器采用等纹波逼近的设计方法，根据切比雪夫最佳一致逼近理论设计了一个 100 阶的 FIR 滤波器，通带范围为 5~38 Hz，带通与带阻的范围仅需要修改滤波系数就可以完成。通过使用数字滤波算法，能大大提高生物电信号的信噪比，信号特征能进一步明显。

在 DSP 上实现 FIR 滤波器通常只需要 3 个步骤：首先根据已知数据编写计算公式程序，其次按照要求计算滤波系数，

最后是调试与分析。滤波器的计算是乘法累加的过程，结合 DSP 内部专有的硬件乘法器优势，采用了汇编语言编写公式，并通过 C++ 结构体中调用公式。利用 MatLab 中数字信号处理工具箱中 FDATool 完成滤波器设计、仿真与分析后，在 FDATool 菜单栏下选择 target 选项，选择产生 C 头文件系数，并保存为 16 位的有符号的整型数据，由此就生成了滤波系数，将其调入到 DSP 中即可^[4-5]。滤波系数生成时，FDATool 中设置的采样频率、阶数与 DSP 中编程设计的一致。为满足 FFT 变换的要求，需对滤波后的数据 Q15 格式化类型转换，FFT 所需输入数据为 32 为长整型。经过滤波后的信号和原始信号在 CCS3.3 软件上利用图像功能实时显示如图 3 所示，14 Hz 的原始信号与滤波后的信号对比大大改善了信噪比。图中横坐标为采样点数，纵坐标为幅值，其他频率类同。

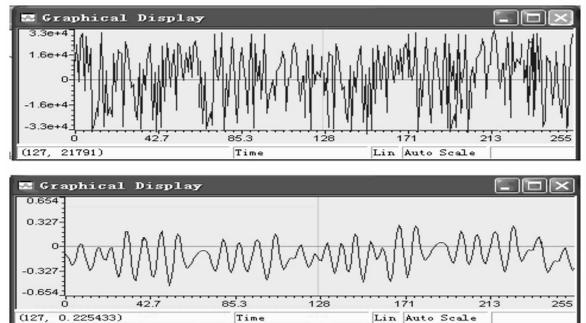


图 3 14 Hz 的原始 SSVEP 信号和 FIR 滤波后的信号

3.3 SSVEP 信号的特征提取及 DSP 实现

快速傅里叶变换 (FFT) 是离散傅里叶变换的一种快速算法。本文中主要采用按时间抽选的基-2 快速傅里叶算法。利用这种方法计算 0 到 $N/2-1$ 区间内的所有点的奇数项和偶数项的离散傅里叶变换就可以计算出 0 到 $N-1$ 区间内的所有数据点的离散傅里叶变换的值，有效的减小了运算量^[6]。在 DSP 中滤波后的 SSVEP 信号数组经过 FFT 函数处理数据的起始位置后，依次通过复制旋转因子、拉倒序处理、归一化处理、求实部平方和等算法处理程序后，再计算出各个频率的幅度谱完成 FFT 计算。FFT 后的 12 Hz、14 Hz、16 Hz、18 Hz 的 SSVEP 信号的频域图如图 4 所示。

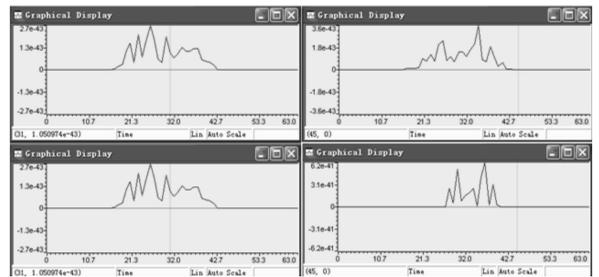


图 4 左侧 12 Hz (上) / 14 Hz (下) 右侧 16 Hz (上) / 18 Hz (下) 功率谱图

4 系统的实时显示

显示平台硬件由 STM32 和 LCD 触屏组成。软件界面在 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 操作系统中完成。 $\mu\text{C}/\text{GUI}$ 是一个源代码开放的 GUI，可以实现 Windows 风格的图形界面，占用很小的系统资源，易于移植。采用 100% 的 ANSIC 编写，可以应用于任何 LCD 和 CPU 中。经过 DSP 处理后的信号由无线模块 NRF24L01

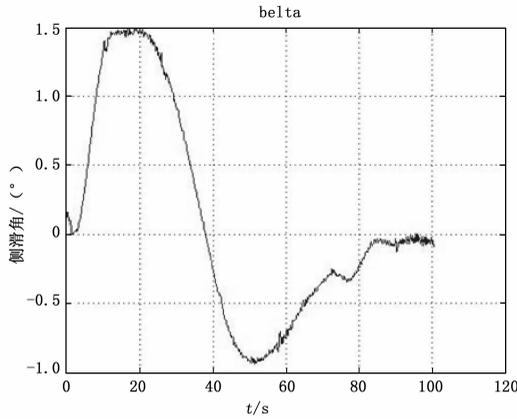


图 7 滑翔弹侧滑角曲线

Studio 环境中，实现了模型到代码、再到 RTX 实时平台的无缝连接。该方法可以应用于导弹以及无人机等飞行控制系统开发，也可以应用于汽车、舰船控制系统研制，有效降低系统开发的成本，提高系统开发效率以及可靠性。

参考文献:

[1] 雷虎民. 导弹制导与控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[2] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[3] 李晓晖, 严卫生, 范欣. 基于 RTX 的水下飞行器实时仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (4): 850 - 853.

[4] BacicM. On hardware-in-the-loop simulation [A]. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville [C]. Spain, 2005: 12 - 15.

[5] 刘杰. 基于模型的设计及其嵌入式实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

[6] CamusJL, DionB. Efficient Development of Airborne Software with SCADE Suite [M]. Esterel Technologies, 2003.

[7] 刘杰, 翁公羽, 周宇博. 基于模型的设计: MCU 篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

[8] 马继峰. 基于 RTX 的导弹半实物仿真系统接口技术研究 [J]. 航天控制, 2010, (2): 56 - 62.

(上接第 2982 页)

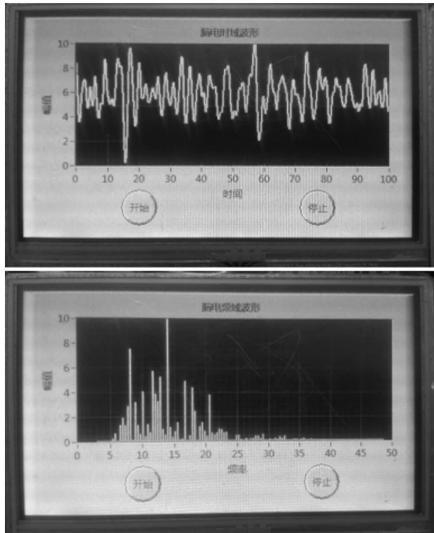


图 5 LCD 实时显示预处理 (时域) 和特征提取 (频域) 信号

以数组的形式实时发送给后端的 STM32 处理器，收到数据后实时转存入显示数组，由显示函数实时显示在用 GUI 做的横坐标分别代表时间 (s) 和频率 (Hz)，纵坐标代表幅值的界面里，准确的显示收到的脑电数据属于哪个特征频率下的脑电信号。操作界面实现了简单的人机交互，手动按下开始和停止按钮可以控制设备是否将收到的数据显示在坐标轴上^[7-8]。如下图 5 是 14 Hz 信号经过预处理和特征提取后在 LCD 上的信号显示。

5 结语

经过实验的结果分析，5 名受试者均实现了从刺激器刺激出脑电信号，采集后传入 DSP 中，经过预处理和特征提取后实时显示在 LCD 屏幕上。无线传输数据稳定，证明了本系统的实用性和可靠性，完成了设计的初衷。本系统实现了便携式的处理显示平台，与当前的产品相比成本低，有较好的可移植性，便于移植到其他集成的处理器上，如 OMAP 系列双核处理器等。为进一步开发便携的脑电产品提供了技术基础，具有很好的适用性和前景。

参考文献:

[1] 丁超. 便携式脑电采集系统设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[2] 张锋, 徐光华. 稳态视觉诱发电位的研究与展望 [J]. 仪器仪表学报, 2010, (8): 156 - 165.

[3] 王永, 何庆华, 田逢春, 等. 基于 FPGA 的脑机接口实时系统 [J]. 电子技术应用, 2009, 35 (4): 133 - 136.

[4] 淘炳坤, 陈鹏宇. FIR 数字滤波器的 MATLAB 仿真和 DSP 的实现 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (9): 177 - 179.

[5] 史明泉. 基于 DSP 的 FIR 滤波器的 C 语言算法实现 [J]. 无线电工程, 2011, 41 (1): 13 - 21.

[6] 罗熹之, 张勇. 扫频式 FFT 频谱分析仪数字中频全软体化设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (9): 1259 - 1264.

[7] 张磊, 江海河. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的嵌入式 GUI 研究与应用 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (17): 50 - 52.

[8] 刘苍, 王建业. 基于 ARM 的便携式数据采集存储系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, (8): 89 - 92.