

基于FPGA的无创伤血液成分光谱采集系统设计

郭嘉^{1,2}, 卢启鹏^{1*}, 高洪智¹, 丁海泉¹

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 血液成分检测是健康诊断的重要手段, 常规的血液成分检测采用抽血的方法, 不仅给病人带来痛苦, 还存在交叉感染的风险。近红外光谱技术是无创伤血液成分检测中的研究热点。为满足近红外无创伤血液成分检测仪器对其光谱数据采集系统提出的高速、多通道和高信噪比的要求, 设计了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的高速、多通道光谱数据采集系统。该系统采用 Altera 公司 Cyclone IV 系列的 FPGA 芯片作为其微控制器, 控制两片 8 通道的 A/D 芯片并行采集 16 通道的人体血液脉搏波光谱信号, 采集到的数据在 FPGA 的控制下首先缓存在 FPGA 内部建立的乒乓 RAM 中, 然后转存至外部 SRAM 芯片中, 最后经 USB 总线传输至计算机。实验结果表明, 在 19 531 Hz 的采样频率下, 该系统能够高速并行采集 16 个通道的信号, 重复性信噪比可达 40 000 : 1。此外, 在该采样率下, 系统可以采集到高信噪比的人体血液脉搏波信号, 采集速度能够达到每秒 305 幅光谱图。该系统满足近红外无创伤血液成分检测仪器对于光谱数据采集系统的基本要求。该研究的主要创新点为将 FPGA 应用于近红外无创伤血液成分检测仪器的数据采集系统中, FPGA 能够同时控制两片 AD 芯片进行 16 路人体血液脉搏波数据的高速并行采集, 解决了单片机作为微控制器时无法实现多通道大量数据高速采集和储存的问题, 使仪器的采集速度大大加快; 同时使用 FPGA 内部资源建立乒乓 RAM 进行数据的缓冲, 实现了不同位数数据从 AD 芯片到 SRAM 芯片的无缝连续传输。

关键词 近红外光谱; 无创伤血液成分检测; FPGA; 数据采集; 乒乓 RAM

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)09-2991-06

引言

血液成分检测是健康诊断的重要手段。常规的血液成分检测需要抽血检验, 不但增加病人的痛感和交叉感染的风险, 而且不能立即获得检测结果, 无法实现某些疾病所必需的实时连续监测^[1]。因此, 人体血液成分的“无创、连续监测”无疑成为当前血液成分分析领域的研究热点。近红外光谱分析技术具有无创伤、无试剂、无污染、可实时监测等优点, 在无创伤血液成分分析中具有很高的研究价值和广阔的前景^[2]。然而, 尽管国内外学者在此领域耗费了大量的时间和精力, 却依然未能取得满足临床应用的成果^[3-7]。

对于无创伤血液成分分析, 近红外光谱技术面临的主要问题是: (1)有效信号如血液中的葡萄糖、胆固醇、甘油三酯

等有效信号十分微弱; (2)组织背景如皮肤、骨骼、肌肉等对近红外血液光谱的干扰严重^[8]。为了克服人体组织产生的背景干扰, 陈星旦^[9]提出了“血流容积差光谱相减法”, 利用短时间内不同血流容积下测得的人体光谱相减, 从而得到血液的光谱。为有效实现该方法, 光谱测量系统需达到以下条件: (1)光谱系统必须同时采集光谱中所有波长处的信号; (2)光谱仪每秒钟采集光谱图数量不少于 50 幅; (3)光谱仪的信噪比要显著高于 10 000 : 1^[10]。实验室前期研究成果表明, 采用 16 元阵列式探测器同时采集 16 个独立像元, 既保证所有波长点的光强信号采集自同一时刻, 又能使仪器具有较高的采集速度和信噪比^[11]。这就要求仪器的数据采集系统能够同时对 16 个通道的血液脉搏波数据进行高速、高信噪比的采集。

传统的数据采集系统通常采用单片机作为微控制器, 控

收稿日期: 2015-06-10, 修订日期: 2015-10-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA022602), 国家自然科学基金青年基金项目(61308067, 61475155), 吉林省科技发展计划项目(20140204078GX)和应用光学国家重点实验室自主基金项目(Y2Q03FQZ01)资助

作者简介: 郭嘉, 1990 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生 e-mail: guojia486542@126.com

*通讯联系人 e-mail: luqipeng@126.com

制多路信号的采集及处理。但是单片机本身存在一些不足：(1)难以达到较高的采集速度；(2)难以完成大量数据的快速储存；(3)容易出现“程序跑飞”和“复位”现象^[12]。相比之下，FPGA 具有时钟频率高，内部延时小，运行速度快，内部 RAM 资源丰富，易于控制较为复杂的外围电路等诸多优势，适合作为近红外无创血液成分分析中高速多通道数据采集系统的微控制器。为了满足无创血液成分检测仪器对其光谱数据采集系统提出的高速、多通道和高信噪比的要求，本文提出了一种基于 FPGA 的高速多通道光谱数据采集系统设计方案。该系统使用 Altera 公司的 cyclone IV 系列的 FPGA 作为微控制器，结合高速 A/D 芯片、SRAM 储存芯片和

USB 芯片实现了 16 个通道人体血液脉搏波信号的高速采集、储存和传输。系统的采集速度和信噪比均满足近红外无创血液成分检测仪器的基本要求。

1 硬件设计

1.1 系统的组成和工作原理

系统的原理图如图 1 所示，其中，信号调理和 A/D 转换部分实现数据采集；SRAM 芯片用于数据储存；USB 芯片 CY7C68013 用于数据通信；FPGA 是整个系统的微控制器，实现对系统各个部分的控制。

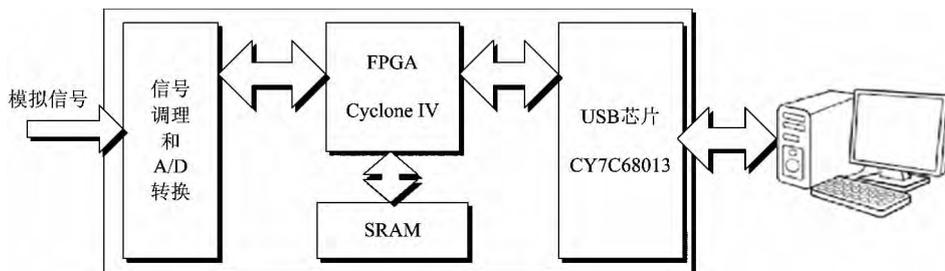


图 1 数据采集系统原理图

Fig 1 Schematic diagram of the data acquisition system

系统设计主要为实现近红外无创血液成分检测中 16 个通道血液脉搏波数据的高速的采集、储存和传输。系统上电后，计算机向数据采集系统发出采集指令，随后 FPGA 控制 A/D 芯片进行 16 个通道血液脉搏波数据的并行采集，FPGA 接收数据并将其存入内部建立的乒乓 RAM 中。当乒乓 RAM 被写满时，FPGA 将数据转存至 SRAM 中，当 SRAM 被写满时，FPGA 控制 A/D 芯片停止采集，并控制 SRAM 将其中的数据通过 USB 接口传输至计算机。

1.2 系统的模块化

系统分为数据采集模块、FPGA 模块和 SRAM 数据储存模块和 USB 通信模块。其中 FPGA 模块是系统的核心，控制数据采集、储存和传输。各个模块既具有相对的独立性，又通过 FPGA 联系到一起。采用模块化设计的方法，有助于系统的设计、调试和维护，同时易于功能的扩展。

1.2.1 数据采集模块

近红外无创血液成分检测仪器要实现 16 通道高速、高信噪比数据采集。为提升系统信噪比，采用全差动放大器，通过差分输入去除共模噪声干扰；为保证采集速度，选用 TI 公司的一款 8 通道、24 位的 A/D 芯片，其采样速率最高为 128 kSPS，信噪比最高为 111 dB，最高支持 37 MHz 的时钟输入；为实现 16 通道数据的并行采集，系统采用两片 A/D 同时工作。

数据采集模块的任务是将探测器采集到的模拟信号通过 A/D 芯片转换成 24 位的数字信号传输至 FPGA，A/D 芯片和 FPGA 的接口如图 2 所示，图中 CLK，SCLK，FSYNC 为时钟接口，是 FPGA 提供给 A/D 芯片的时钟信号；DOUT1~8 为数据接口，是 FPGA 接收 A/D 芯片采集到的 1~8 通

道 24 位串行数据。

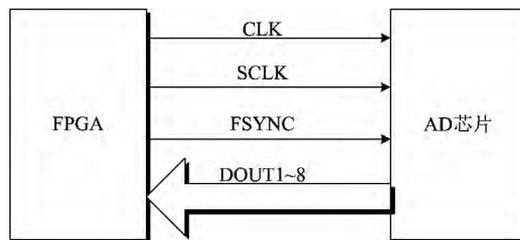


图 2 FPGA 和 A/D 芯片接口

Fig 2 Interface of FPGA and AD conversion chip

1.2.2 FPGA 模块

系统选用 Altera 公司 Cyclone IV 系列的 FPGA 作为系统的微控制器。该系列 FPGA 时钟可达 50 MHz，可用 I/O 管脚为 179 个，具有 2 个锁相环(PLL)和 10 个全局时钟网络，还拥有 6 272 个逻辑单元(LE)和 270KB 的 RAM 等。此外，Altera 公司的 Quartus II 11.0 软件还提供了很多 IP 核，可以完成如建立 RAM，实现固定算法等操作。

1.2.3 SRAM 模块

系统高速并行采集 16 个通道的血液脉搏波数据，处理的数据量较大，需要外扩储存芯片来缓存 FPGA 接收的数据，选用 CYPRESS 公司的一款 128K×16bit 的 SARM 芯片，该芯片可以存储至多 2 Mbit 数据，具有传输速度快，控制方便的优点。SRAM 芯片和 FPGA 的接口如图 3 所示。图中 CE 为片选信号，低电平有效；OE 为使能信号，低电平有效；WE 为写使能信号，低电平有效；ADDR[16:0]为 17 位地址总线，DATA[15:0]为 16 位双向数据总线。

2.3 SRAM 控制模块设计

SRAM 用于储存大量的脉搏波数据, 为提高系统信噪比, 将乒乓 RAM 中各个通道的数据做平均后再写入到 SRAM 中。SRAM 控制模块分为写控制模块和读控制模块两部分: 写控制是将乒乓 RAM 中的数据做平均后写入到 SRAM 中; 读控制是将 SRAM 的数据通过 USB 接口传输至计算机。根据系统要求, SRAM 控制模块需要首先将 SRAM 写满, 然后再将其中数据按照需要读出, 完成一次读写操作。根据所选 SRAM 芯片的读写时序要求, 采用有限状态机的方法进行 SRAM 控制模块的设计。状态转移图如图 8 所示。状态转移进程如下:

IDLE: 当乒乓 RAM 写满时, 转到状态 WRITE1, 否则维持 IDLE;

WRITE1: 将乒乓 RAM 中数据做平均, 同时拉低片选信号 CE 和写使能信号 WE, 转到状态 WRITE2;

WRITE2: 下一个时钟上升沿到来, 转到状态 WRITE3;

WRITE3: 将乒乓 RAM 中数据发送至 SRAM 双向数据总线 DATA[15:0], 如果 SRAM 被写满, 转到状态 READ1, 否则转回状态 WRITE1 继续写入数据;

READ1: 拉低片选信号 CE 和读使能信号 OE, 拉高写使能信号 WE, 转到状态 READ2;

READ2: 下一个时钟上升沿到来, 转到状态 READ3;

READ3: 读取 SRAM 双向数据总线 DATA[15:0] 上的数据, 如果 SRAM 被读空, 转到状态 IDLE, 否则转回状态 READ1 继续读取数据。

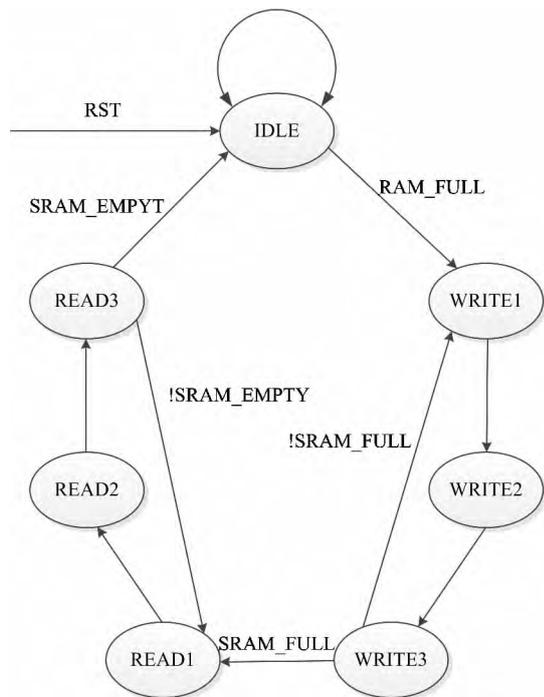


图 7 SRAM 控制模块状态转移图

Fig 7 State transition diagram of SRAM control module

2.4 数据通信模块

利用 CY7C68013 的 USB 接口功能实现 FPGA 和计算机

之间的数据传输。数据通信模块设计由三部分组成: FPGA 中的 Verilog HDL 程序、USB 固件(Firmware)和 USB 设备驱动程序。

在 Slave FIFO 模式下, FPGA 可以像对普通 FIFO 一样对 CY7C68013 的多层缓冲 FIFO 进行读写。该芯片为每个端口提供了“空”标志、“满”标志和“可编程级”标志, FPGA 可以监测这些信号, 用于读写过程的控制^[14]。数据通信模块包括 FIFO 读模块和 FIFO 写模块, FIFO 读模块用于 FPGA 读取计算机发送的采集指令, FIFO 写模块用于将 SRAM 储存的数据通过 USB 接口发送至计算机上。整个模块使用 Verilog HDL 硬件描述语言编写, 在 Quartus II 11.0 中完成编译和综合, 并映射到 FPGA 中运行。

对于固件程序和驱动程序的编写, 本设计采用 Cypress 公司为 CY7C68013 系列芯片提供的固件框架和驱动程序。固件框架可以实现初始化芯片, 处理标准 USB 设备请求以及 USB 挂起时的电源管理等, 只需将自行开发的代码填入到固件框架中就可以实现所需功能。

3 结果与分析

3.1 信噪比测试实验

采用重复性信噪比(signal to noise ratio, SNR)来评价数据采集系统的性能。为测试整个系统的信噪比, 实验在不同的采样率下, 对一个电压为 1.357V 的稳压源进行了测量。由于 A/D 芯片的量程为 -2.5 V ~ +2.5 V, 选择接近半量程的稳压源进行测量可以使数据更具准确性。此外, 从数学上可以证明, 对同一个样品进行 n 次测量求平均值的信噪比为单次测量信噪比的 \sqrt{n} 倍^[11], 可以通过取平均的方式来提高光谱信号的信噪比。因此, 实验每次采集 192 000 组数据, 每 64 个做平均, 得到 3 000 组数据。根据式(1)计算出每个通道的信噪比。其中 \bar{U} 为测得数据的平均值, U_i 为每 64 个数据平均后得到的数据。

$$SNR = \frac{\bar{U}}{\sqrt{\frac{1}{3\,000} \sum_{i=1}^{3\,000} (U_i - \bar{U})^2}} \quad (1)$$

结果如表 1 所示。从表中可以看出, 采样率在 3 096 和 19 531 Hz 之间时(时钟频率为 1~5 MHz), 系统信噪比可以维持在 40 000:1 左右; 当系统采样率逐渐高于 19 531 Hz 时, 系统信噪比开始显著降低, 当采样率提高到 97 655 Hz (时钟频率为 25 MHz), 系统的信噪比只有 10 000:1。由于近红外无创伤血液成分分析要求系统信噪比要显著高于 10 000:1, 选择 19 531 Hz 作为系统的采样率。在该采样率下, 由于数据是每 64 做平均, 经计算可得出每秒采集 305 幅光谱图, 满足每秒至少采集 50 幅的要求。

3.2 血液脉搏波数据采集实验

在信噪比测试完成且达到要求后, 将系统应用到近红外无创伤血液成分分析仪中进行血液脉搏波数据采集实验。实验采集一名 25 岁男性志愿者右手食指的脉搏波信号, 采样率为 19 531 Hz, 采集时间为 10 s, 采集点数为 3 050 个。以信噪比最高的第 8 通道为例, 其脉搏波信号如图 8 所示, 由

表1 不同采样率下各个通道的信噪比

Table 1 The SNR of 16 channels under different sampling rate

	1 通道	2 通道	3 通道	4 通道	5 通道	6 通道	7 通道	8 通道
3 906 Hz	45 692	43 229	44 990	43 827	44 410	44 798	42 848	46 957
19 531 Hz	39 555	41 980	40 293	38 907	41 385	41 028	40 345	43 078
39 062 Hz	15 756	15 238	15 338	15 562	15 927	16 413	16 784	16 633
58 594 Hz	14 155	13 503	13 819	13 627	13 943	13 771	13 806	14 231
78 124 Hz	12 755	11 461	11 612	11 390	11 358	11 290	12 463	13 533
97 655 Hz	12 253	12 266	11 799	11 894	11 694	11 293	11 003	12 229
	9 通道	10 通道	11 通道	12 通道	13 通道	14 通道	15 通道	16 通道
3 906 Hz	42 900	42 424	42 961	42 213	44 388	43 433	44 266	43 484
19 531 Hz	39 181	41 737	38 673	39 674	42 306	40 232	38 319	41 681
39 062 Hz	16 297	15 262	15 979	14 422	15 937	16 838	16 471	16 040
58 594 Hz	13 854	13 815	14 019	13 834	13 769	13 139	13 399	14 062
78 124 Hz	12 262	11 800	11 219	11 184	11 013	11 439	11 696	12 480
97 655 Hz	11 266	12 038	11 449	11 819	11 867	11 721	11 703	12 298

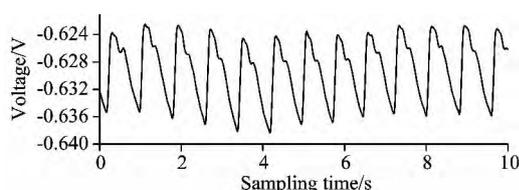


图8 第8通道食指血液脉搏波信号

Fig 8 Channel 8 index finger blood pulse wave signal

图中可以看出,该系统可以采集到高信噪比的人体血液脉搏波信号,且在同一时刻,可采集16个波长点的信号,得到高信噪比的近红外光谱。

4 结论

为满足无创伤血液成分检测仪器对其光谱数据采集系统

的要求:系统同时采集16通道信号,每秒至少采集50幅光谱图,而且信噪比要显著高于10000:1。本文设计了一种新型高速多通道光谱数据采集系统,该系统选用Cyclone IV系列FPGA作为微控制器,控制两片8通道的A/D芯片并行采集16通道人体血液脉搏波信号;使用FPGA内部乒乓RAM进行数据的重组和缓冲,使用外部SRAM进行数据的储存;通过USB总线进行FPGA与计算机之间的高速通信。该设计有效解决了以单片机为微控制器的数据采集系统采集速度低,储存数据量少等问题。通过实验验证,在19531Hz的采样率下,系统的重复性信噪比可达40000:1,采集速度可达每秒305幅光谱图。在该条件下,系统可以同时采集16个波长点的人体近红外血液脉搏波信号,得到高信噪比的近红外光谱。实验结果表明:该系统能够满足无创伤血液成分检测仪器对于其光谱数据采集系统的基本要求,可以实现16个通道的人体血液脉搏波数据的高速采集、储存和传输。

References

- [1] GAO Hong-zhi, LU Qi-peng, DING Hai-quan, et al(高洪智, 卢启鹏, 丁海泉, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2013, 21(8): 1974.
- [2] YU Xin-yang, LU Qi-peng, GAO Hong-zhi, et al(于新洋, 卢启鹏, 高洪智, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(11): 2983.
- [3] Chen J, Arnold M A, Small G W. Analytical Chemistry, 2004, 76(18): 5405.
- [4] Maruo K, Tsurugi M, Tamura M, et al. Applied Spectroscopy, 2005, 59(12): 1480.
- [5] Saptari V, Youcef-Toumi K. Applied Optics, 2004, 43(13): 2680.
- [6] Olesberg J T, Arnold M A, Mermelstein C, et al. Applied Spectroscopy, 2005, 59(12): 1480.
- [7] Arnold M A, Small G W. Analytical Chemistry, 2005, 77(17): 5429.
- [8] LU Qi-peng, CHEN Cong, PENG Zhong-qi(卢启鹏, 陈丛, 彭忠琦). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(4): 873.
- [9] CHEN Xing-dan(陈星旦). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2008, 16(5): 759.
- [10] YANG Hao-wen(杨皓旻). Research on Influence of Instrument Parameters to Noninvasive Biomedical Measurement by Near-Infrared Spectroscopy(仪器条件对近红外光谱无创伤血液成分检测影响的研究). Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences(长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2011.
- [11] CHEN Cong(陈丛). Study on Fast and High Signal-to-noise Ratio Spectrum Signal Detection Technique of Noninvasive Biochemical Monitoring by NIRS(近红外无创伤血液成分分析中快速高信噪比光谱信号检测技术研究). Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences(长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2013.

- [12] GUAN Shou-ping, YOU Fu-qiang, Dong Guo-wei(关守平, 尤富强, 董国伟). Control Engineering of China(控制工程), 2013, 20(5): 970.
- [13] QIAN Feng(钱峰). EZ-USB FX2 MCU Principle, Programming and Application(EZ-USB FX2 单片机原理、编程及应用). Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press(北京: 北京航空航天大学出版社), 2006. 148.
- [14] HUANG Tu-chen, GONG Hui, SHAO Bei-bei(黄土琛, 宫辉, 邵贝贝). Atomic Energy Science and Technology(原子能科学技术), 2013, 47(11): 2172.

Design of Noninvasive Blood Constituent Spectrum Data Acquisition System Based on FPGA

GUO Jia^{1, 2}, LU Qi-peng^{1*}, GAO Hong-zhi¹, DING Hai-quan¹

1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Blood constituent examination is an important means of health diagnosis. For blood constituent examination, we usually adopt the method of drawing blood, which bring pain and the risk of cross infection to the patient. Near infrared spectrum spectroscopy (NIRS) is a research hotspot in noninvasive blood constituent examination. The spectral data acquisition system of existing instruments is using a Single Chip Microcomputer (SCM) as its microcontroller. The spectral data acquisition system cannot realize the high speed multi-channel acquisition and storage of large amounts of data because of the SCM itself has certain deficiency. So a high speed multi-channel spectral data acquisition system based on Field Programmable Gate Array (FPGA) was designed in this paper in order to realize the system of high speed, multi-channel and high signal-to-noise ratio (SNR) in the area of noninvasive blood constituent examination by near infrared spectroscopy. An Altera Cyclone IV series FPGA was used as the microcontroller in this spectral data acquisition system, which simultaneously controlled two pieces of eight channels AD conversion chip acquiring 16 channels blood pulse wave signal parallel. Under the control of FPGA, the data was cached in FPGA internal ping-pong RAM first, after that it was transferred to an SRAM chip, finally it was sent to the computer via the USB port. Experiment result shows that the spectral data acquisition system can collect 16 channels signal parallel and fast under the sampling frequency of 19 531 Hz and the repetitive signal-to-noise ratio is over 40 000 : 1. The system can collect 305 spectrograms per second, more over it can get high SNR human body blood pulse wave signal under the same circumstances. The spectral data acquisition system satisfies the basic requirements of the noninvasive blood constituent examination instrument by NIRS and it can make the instrument collect the human body blood pulse wave data at a high speed. The main innovation point of this article is applying FPGA to the spectral data acquisition system of near infrared noninvasive blood constituent examination instrument. FPGA is able to simultaneously control two pieces of eight channels AD conversion chip acquiring 16 channels blood pulse wave signal parallel. By using FPGA as the microcontroller of the spectral data acquisition system, we solve the problem that SCM as the microcontroller can't realize multi-channel high speed data acquisition and storage of large amounts of data. The acquisition speed is greatly faster than the system before. The second innovation point of this article is we use FPGA internal resources establish a ping-pong RAM buffer. The spectral data from the AD chip is 24 bit, however, the SRAM chip has only 16 bit data bus. Via the ping-pong RAM buffer, the spectral data can transfer from AD chip to SRAM chip. The ping-pong RAM can realize different digits data seamless transfer from AD chip to SRAM chip.

Keywords Near infrared spectroscopy; Noninvasive blood constituent examination; FPGA; Data acquisition; Ping-pong RAM

(Received Jun. 10, 2015; accepted Oct. 25, 2015)

* Corresponding author