

文章编号: 1000-4556(2012)04-499-09

基于模块计算机的千兆网磁共振谱仪 控制接口

王 洪¹, 熊泽冲², 林先钊³, 王为民^{2*}

(1. 泰山医学院 放射学院, 山东 泰安 271016;

2. 北京大学 信息科学与技术学院 电子系量子所, 北京 100871;

3. 北京万东医疗装备股份有限公司 磁共振成像产品事业部, 北京 100016)

摘 要: 提出了一个基于模块计算机的磁共振谱仪的控制接口, 它建立了核磁共振成像谱仪与上位计算机之间的通信, 实现了控制谱仪、上传和下载、数据处理等功能, 具备较高的传输速度, 以及较好的实时性. 该接口以硬件模块的方式集成到谱仪上, 通过千兆和百兆以太网连接上位机, 接收下传至谱仪的序列; 用中断机制和直接内存存取(DMA)方式实现与谱仪的数据传输, 并将处理采集到的回波数据并上传到上位机. 控制接口的设计采用模块计算机 Computer-On-Module(COM)的设计思路, 以高性能的处理器为嵌入式平台, 在 Linux 操作系统下开发驱动程序和应用程序. 实验证明, 该模块具有数据处理速度快、传输速率高, 成本低, 体积紧凑, 扩展性强等特点, 是实现磁共振谱仪高性能的控制接口的理想方案.

关键词: 核磁共振(NMR); 谱仪; 模块计算机; 控制接口

中图分类号: O482.53 文献标识码: A

引言

过去 10 年, 随着并行采集和相位阵列线圈在核磁共振成像领域的重要性逐步体现, 对底层硬件的要求也在不断提升, 数据采集控制接口的性能需要提高^[1]. 因为随着采集通道和线圈单元数的增加, 传输及处理越来越大量的数据成为一个关键问题.

作为谱仪的一个重要组成部分, 控制接口以硬件模块形式集成在谱仪上, 通过接口

收稿日期: 2012-03-01; 收修改稿日期: 2012-03-21

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05008-004).

作者简介: 王洪(1960-), 男, 河南潢川人, 硕士, 副教授, 从事医学影像技术研究. * 通讯联系人: 王为民, 电话: 010-62755054, E-mail: wmwang@ele.pku.edu.cn.

或线缆连接上位机，接收下传至谱仪的序列，然后发射控制指令，设置扫描参数。并且用中断机制和直接内存存取(DMA)方式实现与谱仪的数据传输，最后将采集到的回波数据加以处理并上传到上位机。因此开发控制模块中一个关键指标就是与上位机兼容。一般通过 2 个方法来实现上位机兼容^[2-6]。一个是嵌入计算机到谱仪内部；一个是使用计算机标准接口，包括：IDE 总线^[7-9]、PCI 总线以及 USB^[10,11]，100 M 以太网^[12]。

然而，以上提到的方法有一定的不足之处^[13]。嵌入计算机到谱仪内，使得谱仪内部本来并不宽裕的空间更加拥挤，降低了谱仪的易用性和稳定性；另外为了避免干扰，还需要专门设计一路独立的直流供电，更加重了以上矛盾。如果使用计算机标准接口，对板卡的要求比较高，降低硬件层面的可定制性和灵活性，而且成本不低，例如即美国 GE 公司在其 Signa HDe 1.5 T 磁成像系统中，采用了基于千兆以太网的控制接口，其成本非常昂贵、硬件实现非常复杂、升级换代非常困难。

为了解决上面的问题，我们用了一种新方法来说设计硬件，即采用市场上已有的即用式(off-the-shelf)模块计算机(Computer-On-Module, COM)为基础来说设计磁共振谱仪接口。控制接口由 2 块 PCB 一起构成：核心板和载板。核心板是一个 COM 模块：在一片非常小的 PCB 上集成了一台完整的嵌入式微型计算机，包括 CPU、供电、内存以及 Flash 等。这个 COM 模块可以通过 Linux 操作系统来访问各种总线和管理输入输出接口。COM 模块的好处是，非常容易通过更新 COM 来实现硬件的升级换代，提高了硬件可定制性。另外，COM 模块具有易用和低成本的优点。

控制接口提供了 2 个以太网口：一个百兆以太网和一个千兆以太网。使用 16 位本地总线来和其它芯片互联，比如 FPGA，DSP 以及 CPU。整个控制接口的尺寸大小仅为 220 mm × 100 mm，

是这样进行的: 谱仪通过脉冲序列编程器发送一个射频激励信号到磁共振线圈从而产生 MR 信号, MR 信号被接收机检测, 采集并解调成 2 路正交信号, 此时控制接口负责发起 DMA 传输, 向自己的主内存拷贝数据。

图 2 展示了控制接口的硬件结构。它由一个核心板(Core Board)和一个自主开发的载板(Carrier Board)组成。核心板是 COM 模块, 型号是 Overo Tide (GUM3503W, Gumstix Inc.)。COM 模块内部集成有一个高性能-低功耗的双核处理器 OMAP3530, 512 MB 的 DDR 内存以及 512 MB 的 NAND 闪存, 保证了强大的计算处理能力。COM 的尺寸非常小, 只有 58 mm×17 mm, 相当于一片口香糖的大小。核心板通过 2 个 70 针接头安插到载板上。

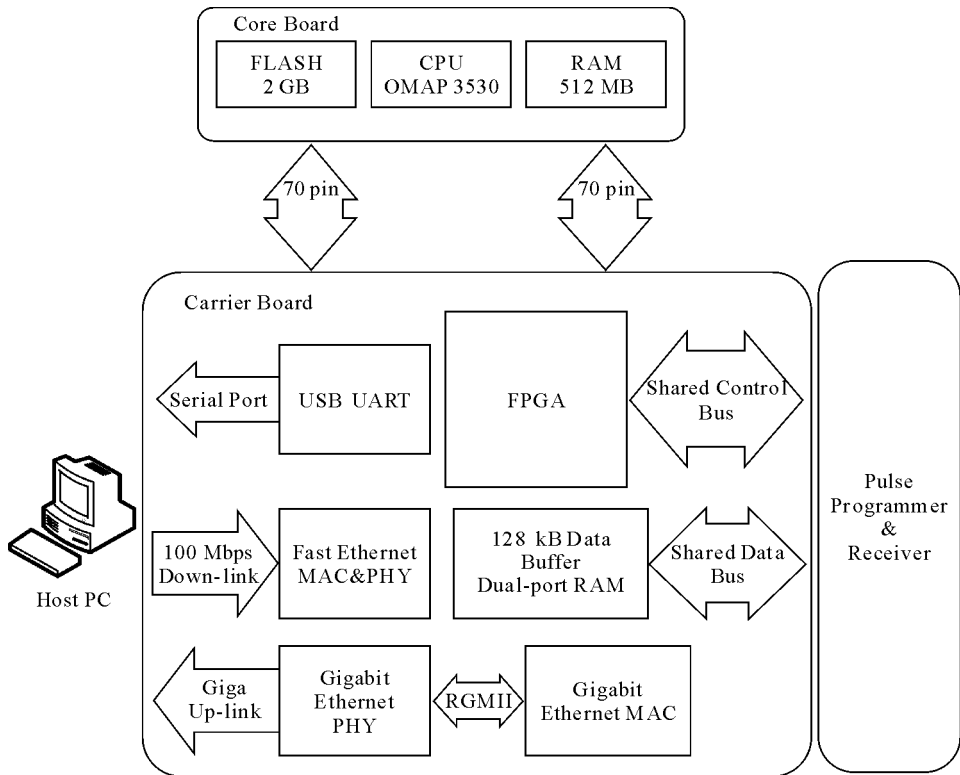


图 2 控制接口的硬件框图。控制接口通过接插件的方式集成到谱仪中, 用 100 M 以太网传输控制命令, 用 1 000 M 以太网传输回波数据。这样可以避免数据和控制共用一条网线时, 发生包冲突, 以产生大延迟, 降低实时性

Fig. 2 The block diagram of the described interface. The carrier board is integrated into a rack-based MR spectrometer, connecting a host PC via two Ethernet connections; 100 Mbps for broadcasting control, and 1 000 Mbps for receiving data. This implementation can avoid packet collision when data and control share one cable, which may cause long delay and fail real-time transmission

OMAP3530 作为中央处理单元(CPU), 拥有 2 个子单元: 一个基于 ARM Cortex-A8 内核的微控制子单元以及一个基于 TMS320C64x+ 内核的数字信号处理器子单元。OMAP3530 的通用内存控制器(General-Purpose Memory Controller, GPMC)和通用输

入输出接口(General Purpose Input Output, GPIO)是 OMAP3530 用来和外设互联的 2 组通道。

载板除了用来安插带有 COM 模块的核心板之外, 还通过一个 96 针插槽连接到谱仪. 载板使用了一片 FPGA (EP1C6PQ240, Altera Inc.) 来和脉冲序列编程器及接收机交互^[14]. FPGA 提供了接口扩展逻辑(Glue Logic), 相当于 OMAP3530 和接收机间的一个桥梁. 控制接口寻址外部内存能力是 26 位地址, 16 位数据位宽, 因此总的寻址空间是 128 MB(最大可扩展到 384 MB), 较大的寻址空间有利于实现乒乓结构.

载板上嵌入了一个千兆以太网的 MAC 层芯片(AX88180, ASIX Inc.), 这个芯片通过缩减的千兆网接口(Reduced Gigabit Media Independent Interface, RGMII)来连接 PHY 层芯片(RTL8211D, Reltek Inc.). 用 OMAP 的 GPMC 总线来连接 MAC 层芯片, 保证了低延迟和实时性. 一个 USB 串口(USB-to-Serial UART)也集成在了载板上, 使用的芯片是 FTDI's FT232R.

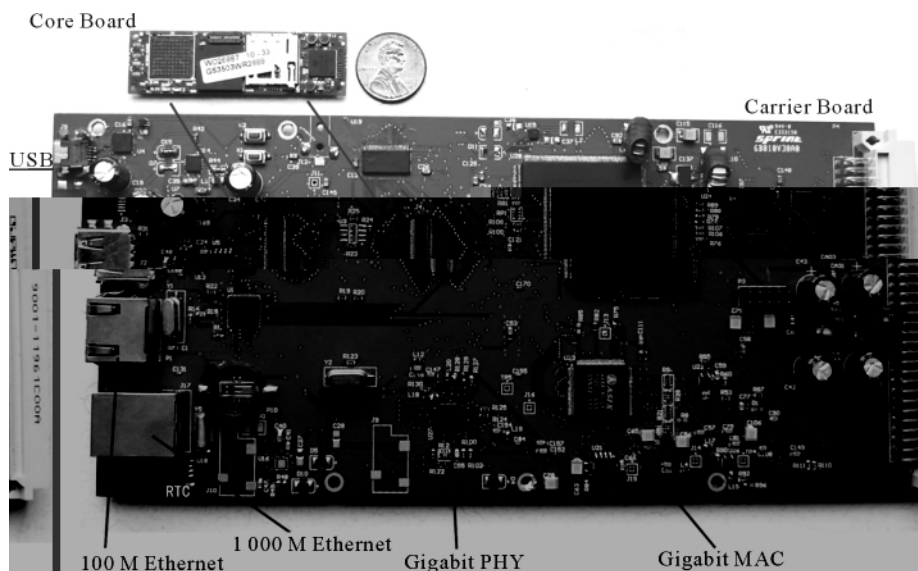


图 3 控制接口实物图. 硬币左面的是核心板, 下面的是载板. 使用 mini-USB 进行 5 V 供电, 功耗 < 3 W
Fig. 3 The interface's topview. The core board is located on the left of the coin, and the carrier board is under the coin. This control interface can apply 5 V of power from a mini-USB connector, and it consumes less than 3 W of power

2 软件设计

软件设计的基本工具是 OpenEmbedded, 驱动程序使用 C 语言编写, 服务程序使用 C++ 编写. OpenEmbedded 是一个代码构架工具, 可用于建立嵌入式 Linux 所需要的整个代码体系(包括源代码、补丁、编译器、软件包). 这个工具首先建立 i386 平台到 ARM 平台的交叉编译链, 然后用一系列脚本来自动寻找所需要的补丁和下载源码包. 最后编译生成 Uboot、文件系统、Linux 内核.

图 4 给出了软件的功能框图. FPGA、千兆以太网、百兆以太网以及双端口 RAM 都需要驱动程序来访问, 因此, 编写 Uboot 和 Linux 下驱动程序成为软件开发的重要环节.

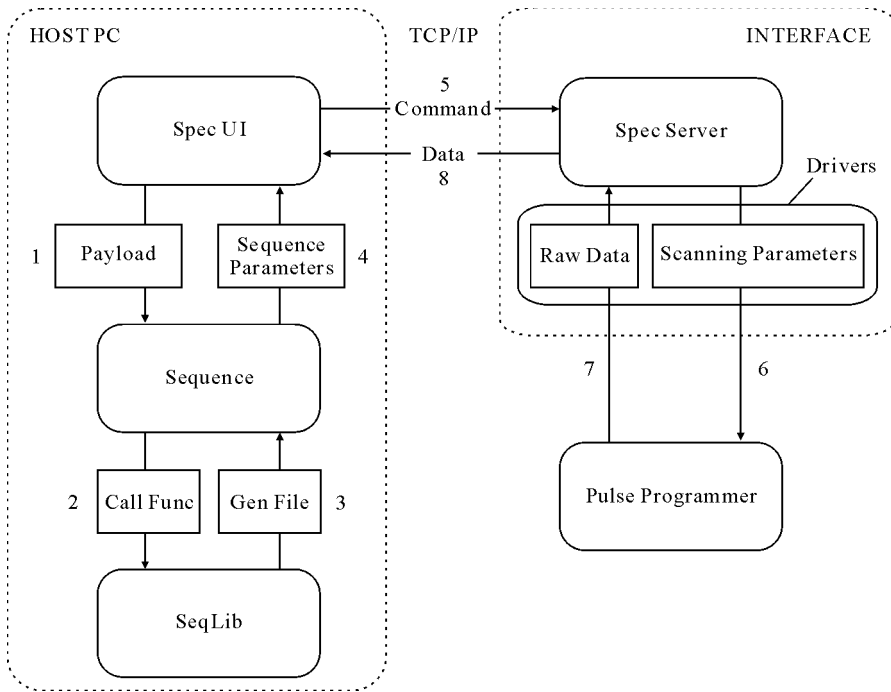


图 4 软件功能框图, 图示包括了上位机程序, 控制接口的驱动程序和服务程序的交互. 图中的阿拉伯数字表示磁共振扫描工程的执行次序

Fig. 4 Function diagram of software related to the embedded control interface. The numbers indicate the order how the whole scanning process is completed

硬件的某些特殊功能需要驱动程序的配合才能实现^[15], 控制接口开发也不例外, 我们编写驱动来满足核磁共振谱仪的需求, 比如, 具有扫描状态的判断策略的中断处理函数. 驱动的编制是在 Linux 的规范下进行的. 在 Linux 操作系统内, 驱动程序以模块 (module) 的形式存在.

控制接口在中断响应程序中使用 DMA 来拷贝数据, 使用软件初始化内存到内存模式 (software-initiated memory-to-memory DMA mode). DMA 可以有效地减少 CPU 的负担并且改善系统的响应延迟, 使之类似于一个实时系统. 比起硬件初始化 DMA 模式, 软件初始化模式可以在初始化时加入谱仪周边设备初始化代码, 因此更适合核磁共振环境. 软件初始化 DMA 需要利用到外部中断来触发. OMAP3530 可以把任意的通用输入输出管脚作为中断源来使用, 提供了大量的中断源. 用户使用宏 `OMAP_GPIO_IRQ()` 来通过管脚号得到系统中断号. 得到中断号以后, 用户就可以使用 `gpio_request()` 函数注册中断函数到 Linux 中.

服务程序是运行在非内核空间的用户程序, 主要用来进行数据处理和实现网络通信. 服务程序处理来自内存的原始数据. 首先把数据转换成浮点型, 并且把实部和虚部

加以区分和排列. 然后, 服务程序进行数据的累加和 K 空间相位补偿. 在所使用的实例中, K 空间矩阵元拥有 64 位精度. 矩阵的一行拥有 256 或更多个矩阵元. 服务程序把每一行数据压进一个数据包, 然后设置标志信息. 这个标志可以提供数据包校验.

服务程序协同驱动程序一起提供错误处理机制. 驱动程序监视硬件工作状态, 并且发送错误代码, 重置硬件. 服务程序收到错误代码以后决定是否重新扫描, 并且报告上位机, 进行记录.

3 实验结果

在进行核磁共振成像数据采集试验之前, 对评价控制接口的关键设计指标即数据采集能力进行了评估. 数据采集的核心问题是数据采集的时延和速度. 为了测得时延, 用示波器测试了中断响应时间; 为了测得数据采集速度, 观测了一定量数据全部采入系统内存的时间. 为了进行实验环境搭建, 把控制接口安装到了 PKSPEC 中, 并且连接了上位计算机. 在环境搭建好以后, 从上位机启动了一次扫描任务, 使用 GRE3D 序列(三维梯度回波成像序列, 主要扫描参数: $TE=6$ ms, $TR=40$ ms). 之后, 接收机接收到扫描线, 然后发送中断信号到控制接口. 采用示波器 (Tektronix DP04034 digital phosphor oscilloscope) 来监视总线状态, 并设置示波器为中断下降沿触发. 图 5 给出了一个测试结果示意图, 结果表明中断响应时间是 $8.2 \mu\text{s}$ 以及一行数据读入内存的时间是 $448 \mu\text{s}$.

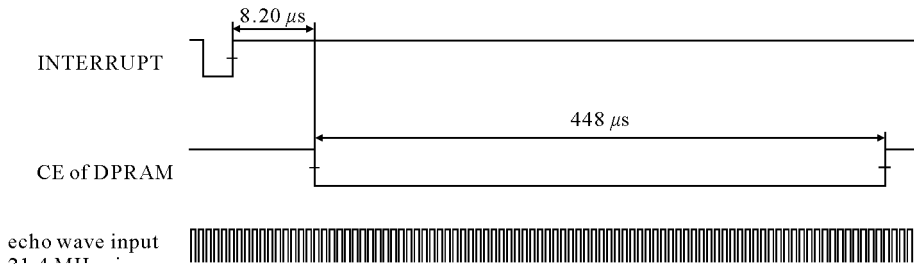


图 5 数据传输响应和终止时间测试结果 (示意图而非示波器. 图示中断响应时间为 $8.2 \mu\text{s}$, 数据传输耗时 $448 \mu\text{s}$)

Fig. 5 The data-transmission ability test result (a schematic diagram, not the snapshot on oscilloscope itself), which demonstrates that the interrupt responding time is $8.2 \mu\text{s}$ and the scan-line copy time is $448 \mu\text{s}$

进行了磁共振扫描成像测试, 测试在万东 0.5 T 开放式永磁 MRI 系统 (i_{open} 0.5-T MRI) 上进行. 图 6 和图 7 给出了头部和膝关节成像结果, 线圈均为 4 通道线圈, 数据采集为 4 个通道并行采集, 最后将 4 个通道的数据进行处理得到 MRI 图像. 具体扫描参数设置见图 6 和图 7 的说明. 实验说明: 基于模块计算机的方法设计控制接口是有效的.

4 讨论

根据传输测试结果, 控制接口的实测数据传输速度为:

$$\frac{\text{A scanning line: } 8 \text{ kB}}{\text{Copy time: } 448 \mu\text{s}} = 148.876 \text{ Mbps}$$

考虑到核磁共振的信号带宽通常在 100 kHz 以下^[16], 控制接口达到了一个满意的速度, 超过文献[2]中报道的控制接口速度的 3 倍(2×16 bits in 900 ns, 35.5 Mbps). 因此, 本控制接口能够满足大多数核磁共振成像序列的要求.

此外, 本控制接口非常适合便携式的核磁共振应用. OMAP3530 在核磁共振方面有得天独厚的优势: 它除了小巧易用, 还拥有 DSP 核心. DSP 在 K 空间滤波, K 空间相位控制以及 FFT 方面有着非常大的优势, 可大幅改善便携式 MRI 平台的整体运算能力. 如果在控制接口上安装 LCD 触摸屏, 甚至不需要上位 PC 的辅助, 就可以直接控制核磁共振成像和图像显示, 这会给便携核磁共振成像实现低功耗, 小体积做出很大贡献.

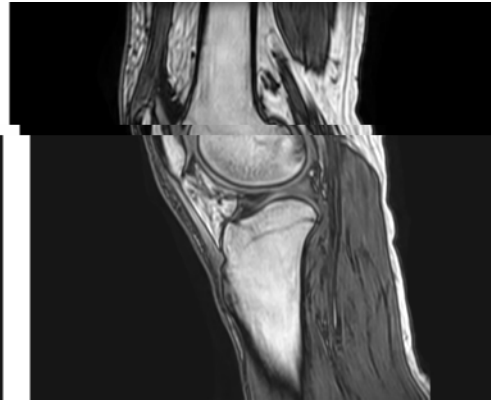
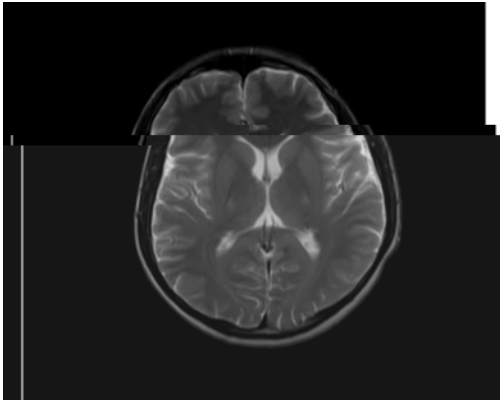


图 6 2D 扫像结果, 图示是一个 T_2 加权自旋回波像. 这是一幅人脑 T_2 加权像(成像参数: $TR=4\ 250$ ms, $TE=138$ ms, $NEX=4$, $FOV=250$ mm \times 250 mm, $matrix=256\times 191$)

Fig. 6 The 2D test result, a T_2 -weighted spin-echo MR image (Parameters: $TR=4\ 250$ ms, $TE=138$ ms, $NEX=4$, $FOV=250$ mm \times 250 mm, $matrix=256\times 191$)

图 7 2D 扫像结果, 图示是一个梯度回波膝关节像. 这是一幅自旋回波质子密度像(成像参数: $TR=40$ ms, $TE=6$ ms, $NEX=2$, $FOV=159$ mm \times 200 mm, $matrix=256\times 143$)

Fig. 7 A gradient echo MR image (of a human knee parameters: $TR=40$ ms, $TE=6$ ms, $NEX=2$, $FOV=159$ mm \times 200 mm, $matrix=256\times 143$)

5 结论

配备千兆网并基于模块计算机的核磁共振谱仪控制接口, 可以满足大多数磁共振序列的需要, 特别是对多通道数据传输的大规模、实时性的要求, 在集成度、便携性以及稳定性方面有较大优势, 是一个优良的解决方案.

参考文献:

- [1] David J L, Rita G N. Parallel magnetic resonance imaging[J]. Phys Med Biol, 2007, 52: R15—R55.
- [2] de Alejo R P, Rodriguez E M, Rodriguez I, et al. A low-cost interface to control a commercial magnetic resonance spectrometer from a personal computer[J]. Meas Sci Technol, 2002, 13: 95—100.
- [3] Puvvada R, Mekaoui S. A microcomputer-based data acquisition system for an NMR pulse spectrometer[J]. Meas Sci Technol, 1990, 1: 647—650.

- [4] Constantin J, Pearson R M, Brown M F. A personal computer-based nuclear magnetic resonance spectrometer [J]. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(11): 3 354—3 362.
- [5] Humbert F, Retournard A, Mischler E, *et al.* NMR data acquisition, data processing, and spectrometer control with an IBM PC compatible[J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63(11): 5 359—5 361.
- [6] Buszko M L, Wang D C. A common gateway interface program for the World-Wide Web NMR spectrometer[J]. *Appl Magn Reson*, 1997, 12: 95—101.
- [7] Goetz C, Choquet P, Hyacinthe J, *et al.* Low cost NMR/MRI spectrometer using industrial boards[C]. Kyoto, Japan: (ISMRM, 12th Scientific Meeting & Exhibition), 2004, 2 628.
- [8] Liu Z M, Zhao C, Zhou H Q, *et al.* A novel digital magnetic resonance imaging spectrometer[C]. New York: IEEE (28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society), 2006, 647—650.
- [9] Jie S, Qin X, Ying L, *et al.* Home-built magnetic resonance imaging system (0.3 T) with a complete digital spectrometer[J]. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76: 105101-105101-8.
- [10] Stang P, Conolly S, Pauly J, *et al.* A scalable MR console for parallel imaging[J]. Berlin, Germany: ISMRM (Joint Annual Meeting ISMRM-ESMRMB), 2007, 925.
- [11] Tang W N, Wang W M. A single-board NMR spectrometer based on a software defined radio architecture[J]. *Meas Sci Technol*, 2011, 22: 015902.
- [12] Tang W N, Wang W M. A Low-cost multichannel spectrometer for magnetic resonance imaging[C]. Wuhan, China: iCBBE (Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2011 5th International Conference), 2011, 978-1-4244-5089-3.
- [13] Zhou Juan(周娟), Zhou min-xiong(周敏雄), Lei Du(雷都), *et al.* The design of a data exchange method for integrated nuclear magnetic resonance spectrometer(一体化核磁共振谱仪数据交换的实现机制) [J]. *Chinese J Magn Reson(波谱学杂志)*, 2009, 26(3): 345—350.
- [14] Xie Qing-ming(谢庆明), Xiao Li-zhi(肖立志), Zhang Xiao-ling(张晓玲), *et al.* Design and implementation of an FPGA-based pulse programmer for low field NMR spectrometer(基于 FPGA 的低场核磁共振谱仪脉冲编程器设计与实现) [J]. *Chinese J Magn Reson(波谱学杂志)*, 2011, 28(3): 27—29.
- [15] Shang Yun(商贇), Zhou Juan(周娟), Lei Du(雷都), *et al.* Software system design in an integrated NMR spectrometer console(一体化核磁共振谱仪控制台的软件系统设计) [J]. *Chinese J Magn Reson(波谱学杂志)*, 2012, 29(1): 68—77.
- [16] Handa S, Domalain T, Kose K. Single-chip pulse programmer for magnetic resonance imaging using a 32-bit microcontroller[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78: 084705.

A Computer-on-Module Based High-Performance Control Interface with Gigabit Ethernet for Magnetic Resonance Imaging Spectrometer

WANG Hong¹, XIONG Ze-chong², LIN Xian-chai³, WANG Wei-ming^{2*}

(1. Department of Radiology, Taishan Medical University, Taian 271016, China;

2. Institute of Quantum Electronics, School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Beijing Wandong Medical Equipment Co., Ltd, Beijing 100016, China)

Abstract: A control interface for magnetic resonance imaging (MRI) spectrometer was presented. The control interface connects the host computer and the MRI spectrometer, which has the following functionalities: supervising the operation of pulse programmer and receiver, using direct memory access (DMA) and transferring the processed data via Gigabit Ethernet transmission. The real-time interaction between the host PC and the spectrometer is achieved through two Ethernet links. Its scalable hardware consists of a computer-on-module (COM) and a carrier. The COM possesses a high-performance CPU, which has both Cortex-A8 and DSP sub-units. The software, including Linux kernel, drivers and a console server, was developed for the board. Tests show that this scalable structure can achieve high data processing & transmission speed. With features such as low-cost and highly-integrated characteristics, the control interface is suitable for most MRI spectrometers, especially for portable ones.

Key words: magnetic resonance imaging, spectrometer, computer-on-module, control interface

* Corresponding author: Wang Wei-ming, Tel: 010-62755054, E-mail: wmwang@ele.pku.edu.cn.