

# 基于 DSP+FPGA 的实时信号采集系统设计与实现

周新淳

(宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

**摘要:** 为了提高对实时信号采集的准确性和无偏性, 提出一种基于 DSP+FPGA 的实时信号采集系统设计方案。系统采用 4 个换能器基阵并联组成信号采集阵列单元, 对采集的原始信号通过模拟信号预处理机进行放大滤波处理, 采用 TMS32010DSP 芯片作为信号处理器核心芯片实现实时信号采集和处理, 包括信号频谱分析和目标信息模拟, 由 DSP 控制 D/A 转换器进行数/模转换, 通过 FPGA 实现数据存储, 在 PC 机上实时显示采样数据和 DSP 处理结果; 通过仿真实验进行性能测试, 结果表明, 该信号采集系统能有效实现实时信号采集和处理, 抗干扰能力较强。

**关键词:** DSP; FPGA; 信号采集; 系统设计

## Design and Implementation of Real Time Signal Acquisition System Based on DSP+FPGA

Zhou Xinchun

(Institute of Physics & Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and bias of real-time signal acquisition, a real-time signal acquisition system based on DSP+FPGA is proposed. The system adopts 4 transducer array to build parallel array signal acquisition unit, the original signal acquisition amplification filtering through analog signal pretreatment, using TMS32010DSP chip as the core of signal processor chip to realize real-time signal acquisition and processing, including the signal spectrum analysis and target information simulation, controlled by DSP D/A converter DAC, through the realization of FPGA data storage, real-time display on the PC and DSP sampling data processing results. The performance of the system is tested by simulation. The results show that the signal acquisition system can effectively realize the real-time signal acquisition and processing, the anti-interference ability is strong.

**Keywords:** DSP; FPGA; signal acquisition; system design

### 0 引言

实时信号采集是实现信号处理和数据分析的第一步, 通过对信号发生源的实时信号采集, 在军事和民用方面都具有广泛的用途。比如, 通过对水声目标信号采集, 能实现水下目标识别和目标方位定位; 通过对雷达信号采集, 能实现飞行导航控制; 对机械振动信号采集能有效实现机械故障监测和状态评估。实时信号采集系统同时还可作为频谱分析或用作数据记录分析仪, 信号采集系统是现代信号与信息处理基础, 相关的系统设计技术研究在信号处理领域具有较高的实用价值<sup>[1]</sup>。

自 20 世纪 60 年代以来, 随着信息学科的飞速发展, 数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 技术得到快速发展, 集成的 DSP 芯片设备尺寸小、造价低和处理速度快等优点<sup>[2]</sup>, 被广泛应用到信号处理系统的设计中, 对信号采集系统的设计起到关键性的作用。目前, 对信号采集系统处理的目标信号主要包括电信号、磁信号、机械信号、热信号和声信号

等, 通过信号采集系统, 提取出纯正的信号或信号的特征, 进行信号频谱分析, 指导工程实践<sup>[3]</sup>。当前, 对信号采集系统的设计取得了一定的研究成果, 其中, 文献 [4] 中提出一种改进的水声换能器基阵信号采集系统优化设计技术, 基于阻抗匹配与功率激励方法进行基阵信号采集系统设计, 系统的抗干扰能力较强, 实现对水声换能器基阵信号的准确实时采集, 但是该系统受到换能器回波微弱差异性特征的影响较大, 在小扰动下信号的测量较大, 输出信噪比不高; 文献 [5] 提出一种高斯色噪声混响背景下的宽带信号检测技术, 构建 FIR 带通滤波器进行信号的高斯色噪声滤波, 通过单片机控制信号的输入输出响应, 实现对实时信号, 包括 CW、LFM、HFM 等信号模型的采集和检测, 输出信号的宽带较大, 检测性能较好, 但该系统设计方案对电磁干扰的抑制能力不好, 对实时信号采集的准确性和无偏性能表现不佳<sup>[6]</sup>。

针对传统方法存在的弊端, 本文提出一种基于 DSP+FPGA 的实时信号采集系统设计方案。系统采用 4 个换能器基阵并联组成信号采集阵列单元, 对采集的原始信号通过模拟信号预处理机进行放大滤波处理, 结合频谱分析和 D/A 转换, 实现信号处理和采集, 并通过 FPGA 实现信号存储和显示, 通过仿真实验进行了性能验证, 展示了本文设计的信号采集系统的可靠性能。

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-03-06。

基金项目: 宝鸡市科技局项目 (16RKX1-16); 宝鸡文理学院院级重点项目 (ZK2017010)。

作者简介: 周新淳 (1983-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事通信技术、单片机及嵌入式系统方向的研究。

# 1 系统总体设计描述与功能指标分析

## 1.1 系统总体设计构架

为了实现对实时信号采集系统的优化设计，需要首先进行系统的总体设计构架，本文采集的实时信号为电磁目标回波信号，信号采集的数据宽度为 16 位，工作频率为 16 MHz。本论文研究的实时信号采集系统需要实现的功能主要包括：(1) 目标回波测量；(2) 信号的 AD 转换和回波模拟；(3) 多通道数据记录分析仪；(4) 信号存储和信号源波形分析。设计的信号采集系统为一个线性宽带系统，主要包括基阵 AD 转换电路、模拟信号预处理机、DSP 控制电路、信号滤波器以及功率放大器等部分，首先由信号基阵发射一个宽带或窄带信号，利用 5409A 位倒序寻址方法进行信号的频谱感知和滤波分析，在基阵接收到原始信号后，在模拟信号预处理机中进行 DSP 分析处理，采用一个恒定带宽滤波器进行信号滤波，系统采用 LabWindows/CV 构建 I/O 接口实现人机通信<sup>[7]</sup>，通过 PCI 总线将采集的实时信号传至 PC 机，DSP 接到信号后经过处理进行信号回放，并实现信号的显示、打印和输出功能。根据上述描述，得到本文设计的实时信号采集系统的总体构架如图 1 所示。

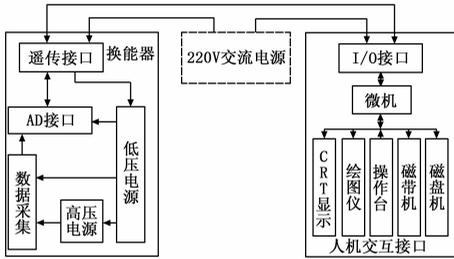


图 1 实时信号采集系统的总体构架框图

## 1.2 系统的功能模块化描述和技术指标分析

根据图 1 所示的系统总体设计构架，进行系统的模块化设计和分析，系统的功能模块主要分为收发转换模块、声电转换/电声转换模块和功率放大器模块以及模拟信号预处理模块等几大部分，采用压电传感器构建信号采集的换能器，采用 4 个换能器基阵并联组成信号采集阵列单元，当一个电信号送到基阵两端，系统采用 VXI 总线技术进行时钟同步信号采样<sup>[8]</sup>，在接收信号端将模拟信号进行输出调制，使得在模拟信号预处理机的输出端输出的采样信号具有稳定的功率增益<sup>[9]</sup>，进一步对各个模块的功能设计描述如下：

1) 收发转换模块。该模块通过 DSP 信号处理器进行信号的收发转换和 AD 采样，收发转换模块负责信号采集，通过 PCI 桥接芯片将采集的实时信号输出至 A/D 转换器，并在 DSP 中控制 D/A 转换器，进行参量设置，如采样率、采样通道数的设置，在 PCI 总线终端输出多路回波信号，进行波束形成处理，读取采样值进行目标信号编译和信息模拟。

2) 声电转换/电声转换模块。声电转换/电声转换模块是控制 D/A 转换器进行数/模转换的功能模块，通过 D/A 转换器输出 0~4.068 V 的电声信号，为后置的 DSP 信号处理器提供足够大的发射功率。

3) 功率放大器模块。该模块是实现原始信号采集后的功

率放大、滤波等功能，通过功率放大器将输出信号进行功率放大，使得输出的电信号满足功率输出增益指标，保证宽带特性。

4) 模拟信号预处理模块。模拟信号预处理模块可以实现对实时信号采集后的回波模拟和数据存储，使得输出的模拟信号具备动态控制增益的功能。

综上所述，得到本文设计的基于 DSP+FPGA 的实时信号采集系统的功能实现如图 2 所示。

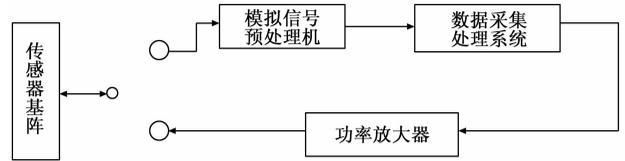


图 2 功能实现框图

结合系统设计需求以及上述对系统功能模块分析描述，得到本文设计的实时信号采集系统的技术指标如下：

- 1) 基阵接收实时信号的增益范围：-20~+20 dB，A/D 采样值 0~4.0 Hzm，计宽带阻抗增益为 20 dB；信号的幅度 ±10 V；
- 2) 实时信号采样的通道为：16 通道的全双工异步采样；
- 3) 输出信号幅度 ±5 V，基阵阻抗匹配：>300 kHz；
- 4) 预处理机动态控制码分辨率：16 位（至少）；
- 5) D/A 分辨率：18 位（至少）；
- 6) 功率放大器输出高、低电平：0~12.095 V；
- 7) 实时信号采集后输出的信号形式：CW、LFM、HFM 等多种形式。

根据上述设计技术指标，进行实时信号采集系统的模块化设计和开发。

## 2 系统设计与实现

### 2.1 系统硬件设计原理分析与器件选择

系统硬件设计中，采用 TMS32010DSP 芯片作为信号处理器核心芯片，DSP 硬件设计是整个实时信号采集和处理系统设计的基础，采用 PCI 与 DSP 相结合方式进行多线程信号采集<sup>[10-11]</sup>，通过高速数字信号处理芯片进行信号的总线传输，从而保证信号的采集速度和信号的处理速度。TMS32010DSP 的主频可达 160 M/MIPS，以此作为核心控制芯片，能有效满足实时信号处理的性能需求，TMS32010DS 数字信号处理芯片具有 1 条程序总线，2 个存储器映射空间、3 条数据总线和 40 位的算术逻辑单元，结合 FPGA 进行数据存储和循环寻址。FPGA 的片内寻址频率为 32K（地址范围 0080H~7FFFH），I/O 存储器选择多映射空间分配方案，由 DSP 控制 D/A 转换器进行数/模转换，使系统的性能达到最优。根据上述模块化设计思想，对信号采集系统的子系统详细设计描述如下。

### 2.2 PCI 总线接口设计

PCI 总线接口设计决定了信号采集系统的数据传输、通信的方式，通过串口使得 VXI 总线、CAN 总线与 PCI 总线的通信和信号传输<sup>[12]</sup>。信号采集的接口采用通用 PCI 接口芯片 AMCC 公司的 AMCC S5920，使用可编程逻辑器件配置硬件接口信号，用户可以根据自己的需要配置空间寄存器。本文设

设计的信号采集系统采用多路复用 32 位和 8 位总线设备, 运行速率高达 50 MHz, 通过 8 个 32 位 Maibox 寄存器进行实时信号的双向数据传输控制。在 PCI Initiator 模式下进行信号采集的 PCI Initiator 操作, PCI9054 与 DSP 通过双端口 RAM 进行嵌入式内核调度和信号采样, 数据总线根据 DI、DO 依次相连, PCI 协议控制信号的 PAR、FRAME#、IRDY#、TRDY#, 将 I/O 初始化, 产生串行 EEPROM 的时钟, 得到一组容量为 256×16Bits 的片选信号和时钟信号, 信号采集系统的接口电路设计如图 3 所示。

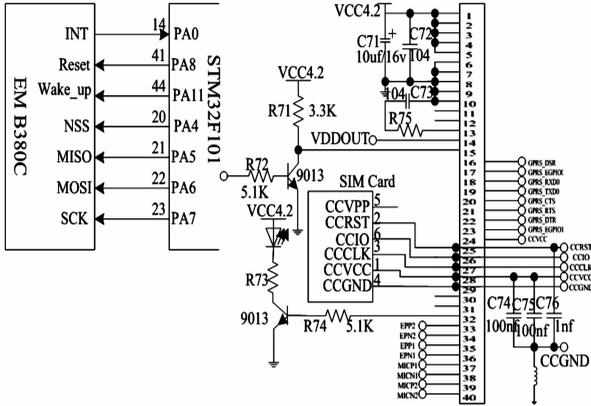


图 3 PCI 总线接口电路设计

### 2.3 时钟电路设计

时钟电路产生串行 EEPROM 的时钟, 通过时钟电路设定信号采集的周期和频率, 采用改进的哈佛结构设计时钟电路, 通过 5409A 数字信号处理 DSP 芯片外接上拉或下拉电阻, 通过 JTAG 口引出双排的 14 脚插针, 选择引脚、时钟信号输入引脚, 通过直流 24 V 供电作为有源晶振的电源输入, 在系统上电、初始化后, 选用 ADM706SAR 进行上电复位, 实现信号采集系统的时钟电路设计, 得到设计电路如图 4 所示。

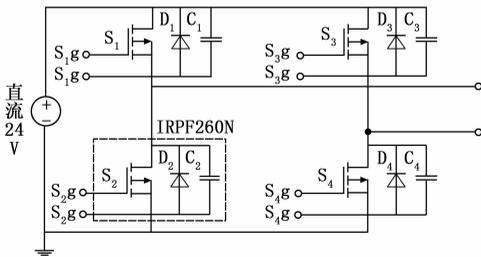


图 4 信号采集系统的时钟电路设计

### 2.4 复位电路设计

复位电路是实现对信号采集系统在上电、初始化和出现异常中断后的复位功能, 本文设计的系统复位分为四种复位模式, 分别为: 上电复位、看门狗复位、帧同步复位以及外设纵向复位等, 结合 3 个多通道的双缓存发送寄存器, 实现多通道多帧数据传送, 通过 CPLD 编程 ADM706SAR, 使 DSP 系统电路开始正常工作。复位电路设计如图 5 所示。

### 2.5 模拟信号处理电路设计

采用 TMS32010DSP 芯片作为信号处理器核心芯片进行信号处理模块的电路设计, 可以实现信号放大滤波、功率放大、

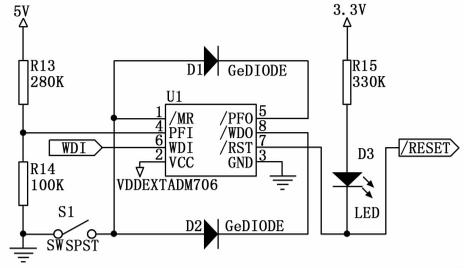


图 5 复位电路设计

信号频谱分析和目标信息模拟等系列功能, 该电路设计是整个信号采集系统的核心。对 TMS32010DSP 芯片进行信号处理的程序加载, 其中滤波程序加载采用的是 FIR 滤波算法, 谱分析采用功率谱密度估计算法, 从外部的 8 位或 16 位存储器中引入换能器采样的原始信号, 通过读取地址 0x20000000 处的地址总线, 从 SPI 主机引导主设备接收 LDR 加载文件, 在模拟预处理机中进行信号分析和波束集成处理, 选择 TWI 存储器进行实时信号的自动波特率侦测, TMS32010DSP 芯片进行信号加载的模式描述见表 1。

表 1 DSP 中的信号加载模式

真值	方式描述
000	从外部 16 位存储器读取地址, 等待配置
001	ROM 配置异步存储引导
010	8 位、16 位或者 24 位地址寻址
011	SPI 主设备接收 TWI 存储器

在 DSP 上电或复位后, 信号采集系统向 EEPROM 发送信号读命令 (0x03), 实时信号读写时钟速率可达 10 MHz, 以 AT25HP512 作为从机进行信号谱分析和滤波处理, 输入引脚 HOLD 上拉电阻, 在 VCC 和地之间并联 1K 电容, 信号发生器通过 (R/X) DATDLY 设置接收和发送数据延迟, MISO 口和 MOSI 口直接连接, 由 DSP 控制 D/A 转换器进行数/模转换, 实现信号存储和通信, 综上, 得到本文设计的信号采集系统的核心处理模块电路如图 6 所示。

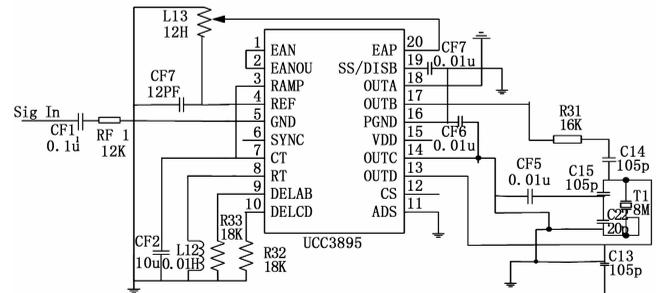


图 6 信号采集系统核心处理模块

## 3 系统软件平台开发及仿真调试分析

系统的软件平台开发主要是实现信号采集后的数据存储和实时显示功能, 软件开发采用可编程的 FPGA 平台设计, 通过 FPGA 实现数据存储, 在 PC 机上实时显示采样数据和 DSP 处理结果, 用 ASM 语言编写仿真程序, 系统上电时, FPGA 通过可编程逻辑程序检查外部引脚 MP/  $\overline{MC}$  的状态, 从片内

ROM 的 0FF80H 起执行数据存储器程序，通过程序加载把应用程序转换成 hex 格式代码，在 FLASH 的 0FF80H 处写入信号存储代码，信号存储在外部数据空间，PCI 卡驱动程序在检测到有用信号后，执行信号滤波、频谱分析、信号输出显示和回放模拟。根据上述硬件设计和软件开发环境设计，进行实时信号采集的仿真分析。仿真实验中，入射信号选择为 CW 波，信号的脉宽为 25ms，采样频率为 1.25 kHz，信号入射的声源级是 1 028 dB，以分辨率为 0.024 Hz，将信号译码输出加载到 9850 的相位累加器中进行信号回放，根据以上参量设定，得到在信号采集系统的入射信号波形和频谱波形如图 7 所示。

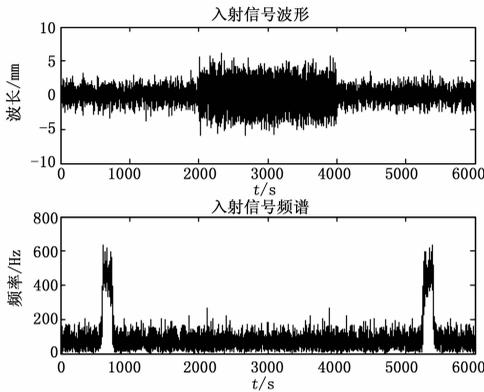


图 7 信号采集波形和频谱分析

由图 7 得知，采用本文设计的信号采集系统，能有效实现实时信号波形采集和频谱分析。选定一组幅频值，设定干扰信噪比为 -12 dB，采用本文设计系统对三个亮点进行定位检测，得到检测结果如图 8 所示。

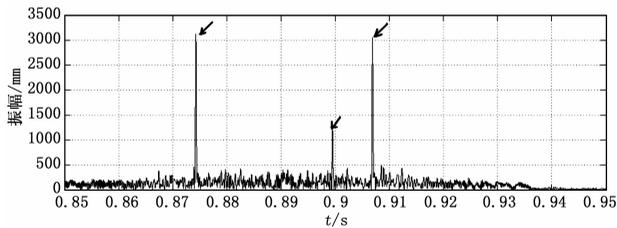


图 8 信号采集系统对目标信号源的检测结果

由图 8 分析结果得知，采用本文系统能准确实现对目标信号源的准确定位检测，抗干扰性能较好。

#### 4 结束语

本文进行了实时信号采集系统的优化设计研究，提出一种

[3] 庄 玮, 段锁林, 徐婷婷, 等. 基于支持向量机的脑电信号分类方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (9): 73 - 77.

[4] 陈世瑜, 倪 莉, 吕 钊, 等. 结合眼电和脑电的人-机交互系统设计与实现 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (5): 1529 - 1532.

[5] 张少白, 曾 又, 刘友谊. 基于 DIVA 模型的脑电信号识别方法 [J]. 系统科学与数学, 2015, 35 (5): 489 - 498.

[6] 谭发江, 赵德春, 孙齐峰, 等. 便携式脑电信号采集与处理系统 [J]. 航天医学与医学工程, 2016, 29 (3): 157

基于 DSP+FPGA 的实时信号采集系统设计方案，首先进行了系统的总体设计描述，采集的实时信号为电磁目标回波信号，对采集的原始信号通过模拟信号预处理机进行放大滤波处理，采用 TMS32010DSP 芯片作为信号处理器核心芯片实现实时信号采集和处理，通过 DSP 控制 D/A 转换器进行数/模转换，采用可编程的 FPGA 平台设计数据存储模块和信号回放模块，在 PC 机上实时显示采样数据和 DSP 处理结果，实现系统优化。系统测试结果表明，本文设计系统具有较好的实时信号采集功能，系统的稳定性较好，抗干扰能力较强，具有较高的实用价值。

#### 参考文献：

[1] 钟 凯, 彭 华, 葛临东. 基于 FABASISO 的时变频率选择性衰落信道 CPM 信号盲均衡 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37 (11): 2672 - 2677.

[2] 张 聪, 余文峰, 夏 珉, 等. 光纤受激布里渊散射的光信号特性分析 [J]. 激光技术, 2016, 40 (3): 363 - 366.

[3] 潘赛虎, 司长峰, 郭坤平, 等. OLEDs 瞬态延迟时间的模拟及在信号通讯的应用 [J]. 发光学报, 2017, 38 (2): 188 - 193.

[4] 邓 异, 梁 燕, 周 勇. 水声换能器基阵信号采集系统优化设计 [J]. 物联网技术, 2015, 5 (4): 36 - 37.

[5] 李春龙, 刘 莹. 一种高斯色噪声混响背景的宽带信号检测算法 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (3): 480 - 483.

[6] 刘昊晨, 梁 红. 线性调频信号参数估计和仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2011, 10 (14): 157 - 159.

[7] 刘家亮, 王海燕, 姜喆, 等. 垂直线列阵结构对 PTRM 阵处理空间增益的影响 [J]. 鱼雷技术, 2010, 18 (4): 263 - 267.

[8] 童峥嵘, 郭尊礼, 曹 晔, 等. 小波包变换对 CO-OFDM 系统高峰均比的抑制性能研究 [J]. 光子学报, 2015, 44 (12): 120 - 121.

[9] Din D R, Huang J S. Multicast backup provisioning problem for Hamiltonian cycle-based protection on WDM networks [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20 (2): 142 - 157.

[10] Choi J S. Design and implementation of a PCE-based software-defined provisioning framework for carrier-grade MPLS-TP networks [J]. Photonic Network Communications, 2014, 29 (1): 96 - 105.

[11] ST-Charles P, Bilodeau G, Bergevin R. SuBSENSE: a universal change detection method with local adaptive sensitivity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24 (1): 359 - 373.

[12] Moghadam A A, Kumar M, Radha H. Common and Innovative visuals: a sparsity modeling framework for video [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23 (9): 4055 - 4069.

[7] 徐乃昊, 姜汉钧, 王 湾, 等. 一种用于心电/脑电采集的电流反馈放大器 [J]. 微电子学, 2016, 46 (1): 25 - 28.

[8] 张亚莉, 吴泽涛, 张智刚. 基于虚拟仪器技术的 GPS 信息采集系统的设计与试验研究 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44 (4): 415 - 418.

[9] 张 黎, 刘国忠. 基于小波熵的数学认知下的脑电信号特性研究 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (23): 65 - 67.

[10] 王建宾. 基于北斗 GNSS 技术的智慧城管数据采集系统架构与实现 [J]. 科技通报, 2016, 32 (1): 179 - 182.