

# 分布式光纤传感器中数据采集系统设计

## Data Acquisition System in Distributed Optical Fiber Sensors

(北京航空航天大学) 赵冠成 杨远洪 孟照魁 李安琪

ZHAO Guang-cheng YANG Yuan-hong MENG Zhao-kui LI An-qi

**摘要:** 为了获得分布式光纤传感信号,本文设计了一个具有数据连续采集、预处理及实时传输功能的高速数据采集系统。该系统采用双口 RAM 作为数据缓冲器、当前流行的 PCI 总线作为数据接口、FPGA 实现控制逻辑。本文重点介绍高速数据采集系统在分布式光纤传感器中应用时采用的数据预处理技术、缓存及 PCI 总线的 DMA 传输功能实现等方面的内容。

**关键词:** 分布式光纤传感器; 高速数据采集; 数据缓存; 数据预处理; PCI9054

**中图分类号:** TP212.1; TP274.2

**文献标识码:** B

**Abstract:** In order to acquire the distributed optical fiber sensing signal, a high-speed data acquisition system was designed, and it achieves continuous data collection, pretreatment and real-time transmission function. The system uses a double-port RAM as the data buffer, the popular PCI bus as the data interface and FPGA as the control logic device. This paper focuses on the data pretreatment technology, cache and PCI bus DMA transfer function areas which the high-speed data acquisition system uses in the distributed optical fiber sensor applications.

**Key words:** distributed optical fiber sensor; high-speed data acquisition; data cache; data pretreatment; PCI9054

### 1 引言

分布式光纤传感技术(Distributed Optical-fiber Sensor,简称 DOFS)是应用光纤几何上的一维特性进行测量的技术,它把被测量作为光纤位置长度的函数,在整个光纤长度上对沿光纤几何路径分布的外部物理参量进行连续的测量,克服了传统点式传感器监测漏检的弊端。

分布式光纤传感技术的关键在于光纤内特定位置信息的提取方法及提取精度。其中空间分辨率与采样率有关,如基于光时域反射技术的分布式光纤传感器,当空间分辨率达到 1M 时,每个采样点以 16bit 计算,每秒钟形成的数据流多达 190MB。为了实现数据的有效采集、传输及实时处理,分布式光纤传感系统中的数据采集系统必须具有以下功能:(1)高速、高精度的数据连续采集能力,以实现空间多点、高频及微弱信号的采集;(2)数据预处理能力,对采集到的数据进行压缩,减小采集系统传给 PC 机的数据流;(3)触发功能,使整个系统时序同步,不丢失空间特定位置的有效信息。为了满足分布式光纤传感器对数据采集的特定要求,本文设计了一个基于 PCI 总线的具有 1 个模拟信号采集通道、大容量“乒乓”缓存、数据实时传输及触发功能的高速数据采集系统。

### 2 采集系统总体设计及工作原理

系统总体设计如图 1 所示。

该采集系统包括信号调理、A/D 转换、FPGA、PCI 接口及触发信号整形等几个部分。其中 A/D 转换芯片为 AD9246,PCI 接口控制芯片采用 PLX 公司的 PCI9054;系统时钟管理、数据缓存、PCI9054 本地总线控制器及系统时序逻辑控制电路由 FP-

GA 实现。文中采用 Xilinx 公司 Virtex4 系列中的 XC4VLX25,触发功能包括外部触发和软件触发两种,目的是保持整个系统同步,其中外部触发信号经电平转换芯片和比较器两种方式输入。

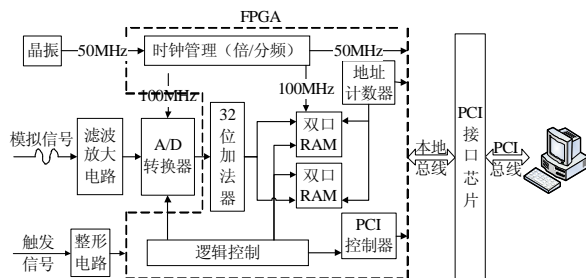


图 1 采集系统总体结构图

信号流程如下:触发信号到来,在系统时钟的上升沿,FPGA 接收 AD9246 输出的数据并存入双口 RAM 中对应的地址,空间上的点全部采集完成为一个循环;下一触发信号到来时,AD9246 转换的数据与在时钟的下降沿取出的上个循环采集到的空间同一点数据相加,并在下一个时钟上升沿存入原地址;当完成个循环(即数据平均 N 次)后,PCI9054 本地总线发出中断信号请求传输数据,同时把数据存储路径切换到另一个双口 RAM 上。

系统中,数据缓存、32 位二进制数加法的快速实现及数据的高效传输是难点。

#### 2.1 数据缓存技术

本文中,采用双口 RAM 作为数据缓存器。双口 RAM 有两套寻址及输入输出机构,在一个端口读写的同时,能在另外一个端口对不同的地址进行操作。这种结构满足系统对数据读写操作的特殊需求。

FPGA 内部同步双口 RAM IP 核的每个数据端口提供了三种操作方式:(1)先写模式,输入数据写入内存的同时出现在输

赵冠成:硕士研究生

基金项目:基金申请人:杨远洪 王平;项目名称:基于保偏光纤布里渊散射的分布式测井技术;基金颁发部门:国家科技部(2006AA06Z216)

出锁存器中;(2)先读模式,新数据写入内存的同时此前存在此内存的数据输出到输出锁存器中;(3)无变化模式,写操作发生时,输出锁存器不发生变化。这里选择无变化模式。

双口 RAM 的存储深度、初始值及工作模式在生成 IP 核时选择。文中,生成两个双口 RAM IP 核,标识为 RAM1 和 RAM2。通过一控制信号与 RAM1 使能信号相连,同时该信号通过反向器与 RAM2 相连来实现数据的“乒乓”存储切换,以实现数据连续采集。

以 IP 核形式实现的双口 RAM 读操作可以到达 3~4ns,写操作可以达到 5ns。它在不改变控制逻辑的情况下实现 FIFO 存储的功能。所以本采集系统满足数据高速存取的要求,而且在不改动硬件的情况下还具有通用性。

## 2.2 数据预处理技术

本系统在连续采集的情况下数据流很大。普通的接口总线和硬盘都无法满足要求;另外,分布式光纤传感器输出的信号带有大量的随机干扰信号,所以有必要采用一种数据预处理技术来减小数据流的同时提高系统的信噪比。

经典的数字滤波方法比较多,有算术平均值法、加权平均值法等。本文采用数字算术平均值法来实现信号滤波。它基于噪声的随机性和信号的稳定性,适用于对一般具有随机干扰的信号进行滤波,其数学表达式是:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (1)$$

式中,  $\bar{y}$  为个采样值的算术平均值;  $y_i$  为第  $i$  个采样值。它对信号的平滑程度完全取决于  $N$ 。为方便求其平均值,  $N$  一般取 2 的整数幂,以便用移位来代替除法。

文中实现二进制数快速加法是关键技术也是难点。当系统的采样率达到 100MSPS 时,采样空间一点的数据只需要 10ns。下一个数据到来之前,空间上一点的数据与前一循环采集对应空间点的数据相加必须完成,否则会造成数据丢失。目前,要实现二进制加法有许多种方法,每一种都有各自不同的面积和延迟权衡。著名的算法有:行波进位加法器、超前进位加法器等。经 Verilog HDL 编程实现并综合、布局布线后仿真可知,超前进位加法器速度较快。

超前进位加法器把进位计算分为两个步骤,先计算中间值。加法器的输入是  $a_i$  和  $b_i$ , 可以计算出  $P$  和  $G$ :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= a_i \oplus b_i \\ G_i &= a_i \cdot b_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$P$  为加法器中经常用到的变量生成 (generate);  $G$  为传递 (propagate)。如果  $G_i = 1$ , 表示和的第  $i$  位产生了一个进位;如果  $P_i = 1$ , 那么第  $i-1$  个进位将传播到下一位。全加器的和及进位公式可以用  $P$  和  $G$  重新写为:

$$\begin{aligned} c_{i+1} &= G_i + P_i \cdot (G_{i-1} + P_{i-1} \cdot c_{i-1}) \\ &= G_i + P_i \cdot G_{i-1} + P_i P_{i-1} G_{i-2} + P_i P_{i-1} P_{i-2} c_{i-2} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中的  $c_{i+1}$  取决于  $c_{i-2}$ , 而不是  $c_i$  或  $c_{i-1}$ 。改写式(3),消去  $c_i$  和  $c_{i-1}$  之后,把括号去掉,在门的长链中,括号代替较大的门。把深度为  $b$  的超前进位单元联系起来构成  $n$  位加法器,有两种方法。超前进位单元可以递归地连接成树:每个单元分别产生各自的  $P$  值和  $G$  值,提供给树中下一级的超前进位单元。另一种更简单的方法就是把并行链中单元的进位输入和进位输出连接起来。由于连接超前进位树的连线很难设计,而且很耗面积,所以本文采用后种方法实现设计。其中进位单独计算,

在编程时,采用 Verilog 硬件表述语言中的连续赋值语句 assign 实现:

$$\text{assign result} = a \cdot b \cdot \text{carryin}; \quad (4)$$

result 为进位输出;  $a, b$  为数据输入; carryin 为进位输入。图 2 为超前进位加法器在 Xilinx ISE 9.1 中调用 modelsim 软件加上时序约束后仿真的屏幕截图。

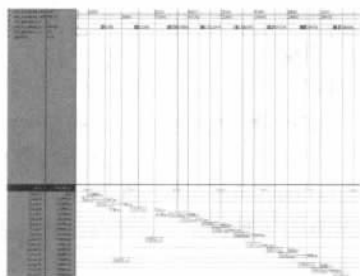


图 2 超前进位加法器仿真图

仿真结果显示,当输入数据变化 8ns 后,加法器输出数据已经稳定。因此,只要在组合逻辑电路—加法器输出的数据稳定后读取数据即能得到正确的结果。从前文分析知道,采用此方法实现 32 位二进制加法器满足系统对加法速度的要求。

## 2.3 总线接口设计

为了实时呈现被测量,数据传输必须具有实时、高效的能力。这时接口总线的选择至关重要。PCI 总线有其他总线无可比拟的优点,如:独立于 CPU,占用系统资源少;能实现数据的突发传输等。因此,系统中采用 PCI 总线实现数据传输。目前实现 PCI 总线接口控制器的方法主要有两种:一种是用可编程逻辑器件设计实现;另外一种是采用专用的接口控制芯片。由于后种方法具有操作简单、成本低及开发周期短等优点而得到广泛的应用。

PCI9054 是 PLX 公司推出的一款高性能的 PCI 接口控制芯片。它符合 PCIv2.2 规范;PCI 总线端支持 32 位/33MHz,可获得高达 132MB/s 的突发传输速度;本地总线支持 M, J, C 三种工作模式;此外,它工作方式灵活,有主、从、DMA (直接数据访问) 三种,所以成为开发 PCI 总线的主流产品。其中, DMA 模式支持本地总线和 PCI 总线之间的数据高效突发传输。PCI9054 支持两个独立的 DMA 通道。每个通道由 DMA 控制器和一个专用的双向 FIFO 组成。两个通道都支持块、分散/集中传输,通道 0 还支持请求方式传输。

文中,数据传输采用 DMA 模式中的块传输方式。当采集系统完成  $N$  个采集循环后,本地逻辑通过计数器溢出输出本地中断信号 LINT# = 0, 引发 PCI 中断信号通知主机读取数据。主机配置 PCI9054 内部的 DMAPADRO/1, DMALADO/1, DMASIZO/1 和 DMADPRO/1 寄存器来设置 PCI 总线和本地总线的起始地址、传输字节数、传输方向。再设置 DMA 的状态/命令寄存器 DMACSR0/1 的始位 (DMACSR0/1 [1]=1) 发起一次传输。PCI9054 申请 PCI 和本地总线。时序如图 3 所示:

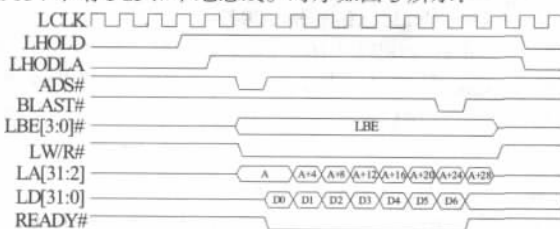


图 3 块 DMA 传输方式时序图



首先,PCI9054通过LHOLD信号有效申请本地总线,得到FPGA应答信号(LHOLDA=1)后取得本地总线控制权,然后向FPGA输出LW/R#=0(读操作)、LBE[3:0]#=0h(本地数据总线宽度为32位)、ADS#=0(本地地址总线上的地址有效,下个时钟上升沿发送地址)。每个本地时钟周期的上升沿,PCI9054向本地地址总线发送的地址自动增加,同时从本地数据总线上接收数据。每传输一个数据,PCI9054内部的传输字节寄存器DAMSIZO/1中的值自动减1。当该寄存器中的值为0时,信号BLAST#有效,表明是本次DMA传输的最后一个数据。传输完成时,命令/状态寄存器DMACSR0/1的传输结束位channel Done有效。PCI9054发出申请释放本地总线信号LHOLD=0,得到应答后(LHOLDA=0),DMA通道处于空闲状态,等待计数器溢出信号的到来。DMA本地控制器以状态机的形式在FPGA内部实现,如图4所示。

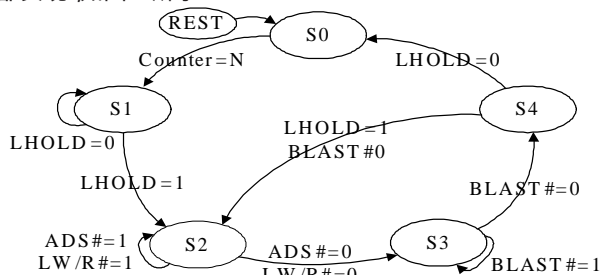


图4 DMA模式本地总线控制状态机

图中S0、S1为等待状态,S2为总线保持状态,S3为DMA传输状态,S4为过渡状态。

### 3 结论

本文在分析分布式光纤传感器对采集系统要求的基础上,设计了基于PCI总线的高速数据采集系统。实验证明,采用数据算术平均滤波技术对数据进行预处理,不仅提高了系统的信噪比,而且还充分利用了PCI数据总线的有效带宽,减小了数据流;以双口RAM实现的“乒乓”存储机制和基于PCI9054接口芯片实现的PCI总线DMA传输方式,实现了数据的连续采集和高速传输。

本文作者创新点:1.用Verilog HDL实现超前进位加法器,并用于数据滤波;2.采用基于双口RAM的“乒乓”存储机制,实现了数据的高速、连续采集;3.采集系统中的数据预处理电路和缓存电路在FPGA内部实现,增强了系统的抗干扰能力、降低了成本。项目经济效益:不少于5000WRMB。

#### 参考文献

- [1]李新华,梁浩等.常用分布式光纤传感器性能比较[J].光通信技术,2007,5:14-18.
- [2]任艳颖,王彬.IC设计基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [3]纪勇,肖铁军.基于PCI总线的数据采集接口的研究与实现[J].微计算机信息,2007,3-1:93-95.
- [4]Virtex-4 User Guide. Xilinx, inc, 2007.
- [5]PLX technology. PCI9054 Data Book Version 2.1, 2000, 1.

作者简介:赵冠成(1982-),男,汉,硕士研究生,研究方向:信号检测及处理;杨远洪(1969-),男,汉,教授,博士生导师,研究方向:光纤传感。

**Biography:** ZHAO Guan-cheng (1982-), Male, Graduate of Beihang University, Research direction: signal measuring and processing.

(100083 北京航空航天大学光电技术研究所) 赵冠成 杨远洪 孟照魁 李安琪

(Institute of Opto-electronics, Beihang University, Beijing 100083, China) ZHAO Guan-cheng YANG Yuan-hong MENG Zhao-kui LI An-qi

通讯地址:(100083 北京 北京航空航天大学光电技术研究所) 赵冠成

(收稿日期:2009.02.23)(修稿日期:2009.03.25)

#### (上接第49页)

本文主要创新点:

1.转矩流变仪测控系统采用以计算机为核心的集散式控制系统(DCS)和模块化设计,大大提升了系统的可靠性,同时利于日后设备的维护和扩展,降低了成本。

2.通信网络物理层选用RS-485总线,增强了传输线路的抗干扰能力;数据链路层选用Modbus通信协议保证了数据快速、准确地在设备间进行传输。

3.自适应PID控制算法缩短温度参数稳定在设定值的时间。

项目经济效益:500万元。

#### 参考文献

- [1]赵洪,王暄,崔思海.基于计算机测控技术的转矩流变仪的研制[J].塑料工业,2002,30(3):52-53
- [2]王锦标.计算机控制系统[M].清华大学出版社,2004:247-249
- [3]陈亭,薛楠.转矩流变仪温度控制系统的设计[J].聚氯乙烯,2005,11:20-22
- [4]高玉芹.电机转速的高精度快速测量[J].自动化与仪表,2000,15(6):41-44
- [5]李正军.现场总线及其应用[M].机械工业出版社,2005:76-87
- [6]吴磊,赵洪.基于B/S的流变仪远程监测系统的研制[J].微计算机信息,2007,5-3:94-96

作者简介:王鹏(1979.6-),男,汉族,2002年毕业于哈尔滨理工大学,哈尔滨理工大学教师,硕士,主要从事工业自动化、EDA技术等方面的研究。

**Biography:** WANG Peng (1979.6-), male, graduated from Harbin university of science and technology in 2002, Master of Engineering, work in Harbin university of science and technology as a teacher, Research area: Industry Automation and EDA technology.

(150040 黑龙江哈尔滨哈尔滨理工大学)王鹏 李迎 赵爱明 赵洪

(Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040) WANG Peng LI Ying ZHAO Ai-Ming ZHAO Hong  
通讯地址:(150040 黑龙江省哈尔滨市三大动力路23号7294信箱)王鹏

(收稿日期:2009.02.23)(修稿日期:2009.03.25)

## 书 讯

《现场总线技术应用200例》  
55元/本(免邮资)汇至

《PLC应用200例》  
110元/本(免邮资)汇至

地址:北京海淀区皂君庙14号院鑫雅苑6号楼601室  
微计算机信息 邮编:100081  
电话:010-62132436 010-62192616(T/F)