

OFDM 水声通信实时处理系统的多处理器并行

阎振华[†] 黄建国

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要 OFDM(正交频分复用)充分利用频带,具有较高的数据传输速率;ADSP-TS101是具有高速并行处理能力的高性能数字信号处理芯片。针对OFDM水声通信的实时处理要求,本文设计并研制了具有实时处理能力的水声通信系统。该系统包括由多片ADSP-TS101构成的松/紧联合耦合的并行处理结构作为处理核心、无相位偏差的多通道同步采样模块和FPGA(现场可编程门阵列)逻辑控制模块。湖上实验结果表明该系统具有良好的稳定性和实时处理能力,满足工程设计要求。

关键词 OFDM, 多处理器, 并行处理结构, FPGA, 实时处理

Parallel processing of the multiple processors in real-time processing system of OFDM for underwater acoustic communication

YAN Zhen-Hua HUANG Jian-Guo

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract OFDM can fully use the frequency band and transmit data with a high speed. ADSP-TS101 is a high performance DSP with good properties of parallel processing and high-speed. Aiming at the real-time processing requirement of OFDM acoustic communication, an underwater acoustic communication system with real-time processing capability was implemented. The system is composed of multiple ADSP-TS101s, multi-channel synchronous sampling module and FPGA for logic control. The multiple processors accomplish cluster/data flow associated multiprocessing parallel processing structure as the operation kernel and the multi-channel synchronous sample module is designed to realize no phase warp among multiple channels' data at the same time. Through experiments in a lake, it is shown that the system has good stability and real-time processing capability, such that the system satisfies the technical requirement.

Key words OFDM, Multiple processors, Parallel processing structure, FPGA, Real-time processing

2006-09-06 收稿; 2008-03-18 定稿

作者简介: 阎振华(1980-), 男, 山西人, 博士, 研究方向: 阵列信号处理系统的设计与开发。

黄建国(1946-), 男, 教授, 博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail: yan_zhenhua@mail.nwpu.edu.cn

1 引言

水声通信技术是当代海洋资源开发和海洋环境立体监测系统中的重要组成部分,也是我国海洋高技术急待研究开发的项目之一。近 20 年来,在军用与民用需求的推动下,无线水声通信系统的研究与开发取得了长足进展^[1]。水声通信系统的目的在于高速可靠地将信源信息经过海洋声信道传输到信宿,而实时处理系统的设计与实现是水声通信技术从理论研究到工程应用非常重要的环节。

正交频分复用(OFDM)作为多载波调制技术的一种,是当前研究的一个热点。它利用多个子载波传输数据,可以有效地利用带宽,实现高速可靠的数据传输^[2-4]。在水声通信中也得到越来越多的关注。

随着现代水声信号处理技术的发展和广泛应用,对信号处理系统的要求也愈来愈高,依靠通用计算机芯片已经很难实现高速、高可靠性、大数据量的实时信号处理。随着超大规模集成电路(VLSI)技术的发展,专用数字信号处理器(DSP)产品相继问世,并朝着处理速度更快、并行能力更强、处理功能更加完备的方向发展。虎鲨(Tiger SHARC)系列的 DSP 芯片是 ADI 公司的高性能 DSP,其中 ADSP-

TS101 的工作主频为 300MHz,具有很强的并行处理能力和浮点运算能力,单片可达 1800MFLOPS 的峰值运算能力。

因此,采用多片 ADSP-TS101 构成的松/紧联合耦合的并行处理结构来实现 OFDM 的实时处理;现场可编程门阵列(FPGA)用来控制模数转换(ADC)、数模转化(DAC)、FLASH 的程序引导、串口输出等模块;多通道同步采样模块能够在多个通道同时采样时,实现数据无相位偏移。

本文主要实现了 OFDM 水声通信实时处理系统。第二节介绍了 OFDM 方法的基本理论;第三节主要从硬件设计和软件流程分别介绍了 OFDM 水声通信系统的实现过程;第四节主要从实验室和湖上的实验结果证明本系统具有良好的实时处理能力和稳定性;第五节给出了结论。

2 OFDM 的基本理论

在 OFDM 系统中,串行数据经编码后被分成 N 组并行数据,用 N 个互相正交的载波来传送各数据子流。由于将传输带宽分成多个较窄的并行子信道,在每个子信道采用较低速率传输数据子流,因而在一定程度上克服了延迟扩展的影响,其原理框图如图 1 所示。

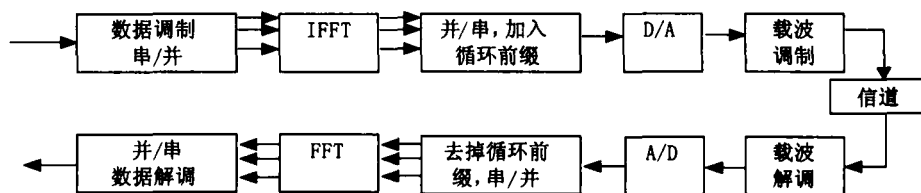


图 1 OFDM 系统的原理框图

OFDM 的子载波间最小间隔等于符号周期倒数的整数倍时,可以满足正交性,因为符号由矩形时间脉冲组成,每个调制载波的频谱为 sinc 函数,其峰值相应于其他所有载波的频谱中的零点,由于各载波上的信息是互不相关的,它们按指数规律相加,时域内的合

成信号非常接近于白噪声。在上世纪 50 年代,苏联科学院院士哈尔凯维奇就从理论上证明^[8]:要克服多径衰落的影响,信道中传输的最佳信号波形应该具有白噪声的统计特性。因此也说明 OFDM 具有对抗多径干扰的能力。

3 实时处理系统实现

3.1 硬件结构设计及系统框架

Jeffrey Milrod 指出^[5], 虽然 Tiger SHARC 系列 DSP(300MHz 的 ADSP-TS101S)的工作主频相对其它高性能 DSP 低得多, 例如: 摩托罗拉公司的 PowerPC 系列的 500 MHz MPC7410 和 1GHz MPC7455, 但是 Tiger SHARC 系列 DSP 强调的是数据输入输出、数据实时处理能力和芯片整体性能三者之间的平衡关系。因此, 判定 DSP 性能好坏不仅只看他的峰值运算速度, 还要看其综合能力—带宽处理率, Bandwidth-to-Processing Ratio, 简记 BTPR:

$$BTPR = \frac{\text{峰值带宽 (MB/s)}}{\text{峰值处理速度 (MFLOPS)}} \quad (1)$$

从(1)式可以得到: ADSP-TS101 的 BTPR 值为 1, 比 MPC7410 (BTPR = 0.25) 和 MPC7455 (BTPR = 0.133) 的 BTPR 值大得多, 说明 ADSP-TS101 具有较好的整体处理性能。

同时, ADSP-TS101 的指令系统能够为通信系统中的 Trellis 解码(例如: Viterbi 和 Turbo 解码器), 还可以运用复数相关进行的解扩操作的增强指令, 有利于通信算法的实现。因此, 我们选择 Tiger SHARC 系列的 ADSP-TS101 作为水声通信实时处理系统的核心处理芯片。

由 ADSP-TS101 多处理器构成的系统结构大致可以分为两类^[6]: 一种是共享总线或共享存储器系统, 称为紧耦合式并行处理结构, 通过这种方式各 DSP 通过同一地址和数据总线访问同一个共享的存储空间, 从而实现数据交换。这种方式的优点是数据交换的峰值速度快, 适于大数据量突发传输, 可对各 DSP 进行广播写操作, 并且当 DSP 通过总线访问从 DSP 时, 从 DSP 可以进行独立的内部数据处理。但由于总线是共享的, 同一时刻只有主 DSP 对共享存储器和总线具有访问权; 另一种是各处理器有各自的数据存储器, 而通过链路口相连的分布式并行处理结构, 实现任意两片

DSP 之间的直接数据交换, 称为松耦合式并行处理结构。这种连接方式的优点是数据链路相互独立, 结构灵活多样, 适于小数据量的频繁实时传输, 缺点是数据传输速度有限(链路口数据宽度是 8 位)。

OFDM 水声通信系统不管采用哪种并行处理结构都存在着弊端, 为了更好地提高 ADSP-TS101 的运算能力, 满足工程所需要的数据实时处理要求, 我们采取了两种并行方式混合的并行处理结构—松/紧联合耦合并行处理结构, 如图 2 所示。这种联合并行处理结构, 综合以上两种结构的优点, 提高了系统的实时处理能力, 但与此同时也提高了系统软件的设计复杂度和印制电路板设计的难度。

归纳起来, 本水声通信实时处理系统主要是由松/紧联合耦合并行处理结构的核心处理模块、FPGA 的逻辑控制模块、多个通道的 ADC 同步采样模块、串口 I/O 模块、DAC 输出模块、程序引导模块和电源模块等构成的, 总的结构框图如图 3 所示。

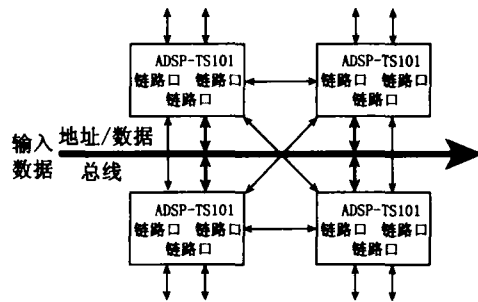


图 2 松/紧联合耦合并行处理结构

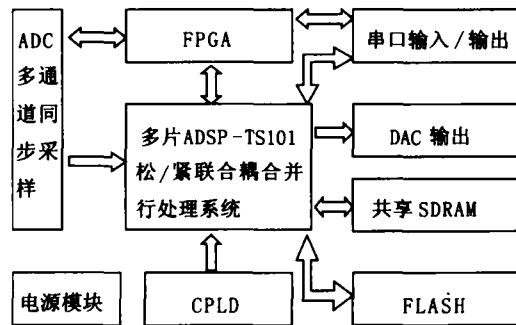


图 3 OFDM 水声通信实时处理系统框图

3.2 软件设计和程序流程

针对多通道同步采样模块,我们采用 FPGA 来完成 ADC 到 DSP 的数据传递,如图 4 所示。主要的过程是:首先,由 DSP 通过 FPGA 对 ADC 的内部控制寄存器写指令,设定 ADC 的工作方式;然后 ADC 将 12 位的有效数据传递给 FPGA,在 FPGA 中完成数据的符号扩展和数据打包;最后由 DSP 通过链路口将多个通道的数据读入 DSP 内部或外部存储器。

但是,多个通道的数据量若在每次采样完后,都向 DSP 的链路口写数,这样会使 DSP 经常产生链路口中断,影响本片 DSP 的工作效率。因此,我们在 FPGA 中设置缓冲,使 ADC 采样得到的数据量达到缓冲半满时,再向 DSP 的链路口写数,这样会减少 DSP 的中断频率。同时使用链路口的直接存储器访问(DMA)传输方式,使数据传输在 DSP 的后台完成。

Tiger SHARC 系列的 DSP 为了解决把同样的数据写入不同的 DSP,寻址空间备有一个广播写空间^[7,9,10]。当我们向广播写空间的某个地址进行写操作的时候,它可以在一个指令周期内,同时对共享总线的各个 DSP 的内部相对地址空间上写入同样的数。这样就很好的解决了多片 DSP 对同一组进行操作的问题,更有利于数据的并行处理,提高系统效率。对于各个 DSP 之间的数据传输,当数据量不是很大,并且要求 DSP 处理主任务的时候,我们通过链路口对数据采用点对点的传输方式。

根据 OFDM 水声通信实时处理系统的软件设计要求,对通信信号的采样数据进行实时处理,得到有效的图形或指令。OFDM 水声通信实时处理系统程序流程如图 5 所示。

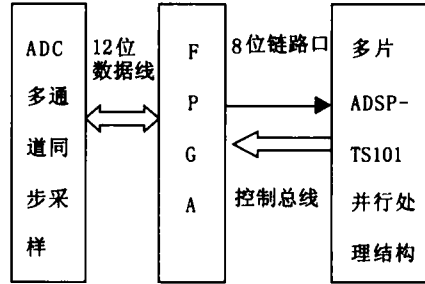


图 4 FPGA 逻辑控制实现的多通道同步采样模块

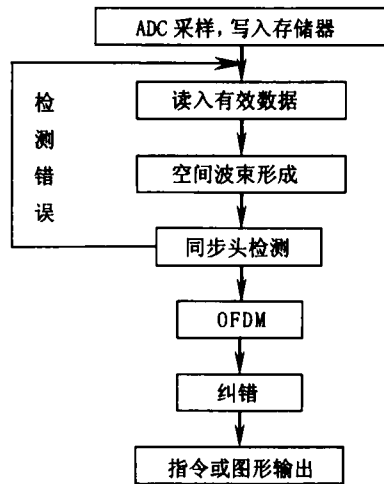


图 5 OFDM 水声通信实时处理流程图

3.3 OFDM 算法实时处理数据流图

现在的大多数的通信系统都是采用 TMS320 系列 DSP,但多处理器结构复杂,一般要采用双端口 ROM 完成各处理器之间的数据交换。而 ADSP-TS101 由于加入了 4 条链路口,增加了数据的传输方式,提高了数据吞吐量,解决了只依靠总线传输数据的瓶颈问题;同时针对多片 ADSP-TS101 的松/紧联合耦合并行结构,结合 OFDM 方法本身的并行性,采用图 6 所示的数据处理方法,实现了 OFDM 水声通信的高速实时处理,满足工程技术要求。

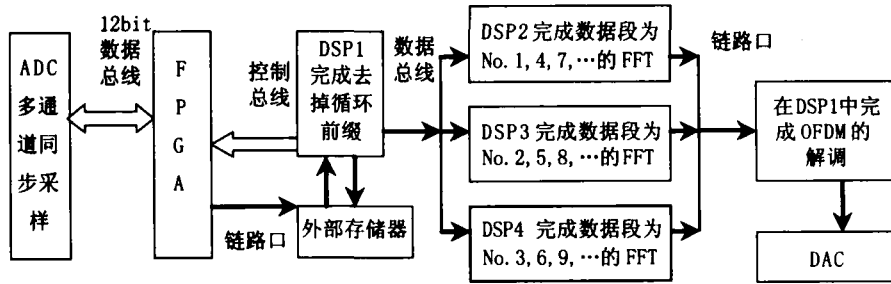


图6 OFDM 水声通信实时处理算法实现的数据流图

4 实验室和湖上实验

我们对水声通信实时处理系统进行了实验室实验和湖上实验。在实验室我们完成的是整个实验系统的电联调实验,在湖上实验时,把水声通信实时处理系统安装在运动的水下航行器上来完成。实验结果如图7所示。



图7 OFDM 水声通信实时处理实验结果

图7所示的是通过OFDM解调技术得到的高数据率的图像传输结果,其中(a)为原始图像,(b)为实验室电联调的实时图像数据传输结果,(c)为水下航行器在近程低速航行时的实时图像数据传输结果。

5 结论

在OFDM水声通信实时处理系统平台上,我们设计并实现了由多片ADSP-TS101构成的实时并行处理系统,设计了由FPGA的逻辑控制完成的多通道同步采样模块的设计和实现,采用松/紧联合耦合连接方式完成了多处理器的并行处理结构的硬件设计和实现,同时应用了广播写空间的共享总线的通信方式和链路口的点对点通信方式。

从实验室的系统联调实验以及湖上水声通信实验的实时处理结果表明,该OFDM水声通信实时处理系统具有运算能力强, I/O带宽大,各部分通信方式多样,通用性好等特点,并且具有良好的系统稳定性和实时处理能力,满足了OFDM水声通信的实时处理要求,并为将来的无线水声通信网的发展提供了良好的开发平台和方向。

参 考 文 献

- [1] Stojanovic M. Recent advance in high-speed underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic engineering*. 1996, 21(2): 125-136.
- [2] William Y Zou, Yiyuan Wu. COFDM: an overview. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1995, 41(1): 1-8.
- [3] Fupin Xiong. M-ary amplitude-shift keying OFDM system, *IEEE Transactions on Communication*. 2003. 10, 51(10): 1638-1642.
- [4] G. D. Mandyam. On the discrete cosine transform and OFDM systems. *IEEE International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*. 2003. 4, 4:544-547.
- [5] Jeffrey Milrod. Continuous Real-Time Signal Processing-Comparing Tiger SHARC and PowerPC. *COTS Journal*. 2003. 12.
- [6] Analog Device Inc. ADSP-TS101 Tiger SHARC Processor Hardware Reference, www.analog.com/dsp. 2004. 3.
- [7] Analog Device Inc. ADSP-TS101 Tiger SHARC Processor Programming Reference, www.analog.com/dsp. 2005. 2.
- [8] 潘长勇,王劲涛,杨知行,编. 现代通信原理实验. 北京:清华大学出版社,2005. 9,164.
- [9] 佟学俭,罗涛,编. OFDM移动通信技术原理与应用,北京:人民邮电出版社,2003. 6,50-136.
- [10] 刘书明,苏涛,罗军辉,编. Tiger SHARC DSP应用系统设计. 北京:电子工业出版社,2004. 5,138-295.