

基于 AD9273 的超声相控阵检测系统设计

刘 建,徐大专

(南京航空航天大学 电子信息工程学院,南京 210016)

摘 要:提出了一种基于 AD9273 的高集成度超声相控阵检测系统设计方案。在传统超声相控阵检测系统的基础上,利用新型高集成度芯片 AD9273 和 HV748 完成 32 通道高压发射电路和接收采集电路设计;采用 FPGA 子系统结合 ARM 平台的方式构成系统数字信号处理的核心;采用数字正交包络检波技术完成接收波束成形。系统满足探伤的实时、高速的要求。系统在小型化和数字化方面有显著提高,可为便携式超声相控阵检测系统设计奠定基础。

关键词:高集成度;超声相控阵;正交包络检波;系统研制

中图分类号: TG115.28+5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)02-0045-04

Design of Ultrasonic Phased Array Inspection System Based on AD9273

LIU Jian, XU Da-Zhuan

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper presents a highly integrated ultrasonic phased array inspection system based on AD9273. The system is designed based on traditional ultrasound phased array inspection system. In the system, some new and highly integrated chips, such as AD9273 and HV748, are used to complete 32-channel high-voltage transmitter and receiver acquisition circuit, FPGA subsystem and ARM platform are used to constitute the core of digital signal processing part, and digital quadrature envelope detector is used to complete the receiver beamforming. The system meets the real-time, high-speed requirements of detection systems. Significant improvement appears in the system's level of miniaturization and digitization. This solution provides the basis for Portable ultrasonic phased array inspection system.

Keywords: Highly integration; Ultrasonic phased array; Quadrature envelope detection; System development

现代无损检测技术发展的大趋势是从对材料的定性检测到高精度、高分辨率的定量检测,从而实现对工业设备更加准确的无损评价。近年来一个研究热点就是相控阵超声检测技术。超声相控阵技术的基本思路来源于雷达电磁波相控阵技术,最早应用于医用 B 超成像系统中。但在工业无损检测领域,由于检测仪器复杂度高,制作成本高昂,其应用受到很大的限制。然而近年来多种相关高技术,如压电复合材料、纳秒级别脉冲信号控制、数据分析和数据分析、软件技术和微电子技术的快速发展,使得

超声相控阵技术在无损检测领域得到快速发展^[1-2]。与传统的超声检测技术相比,超声相控阵技术在声束可达性、检测精确性、重现性及检测结果的可靠性、实时性和直观性等方面具有明显的优势。

传统超声相控阵系统一般体积较大,不便于携带。笔者结合现代数字信号处理技术和微电子技术,提出了一种高集成度相控阵超声检测系统的实现方案。该方案包含 32 个独立收发通道,采用多种新型高集成度芯片完成其超声发射和接收模块的设计,大大提高了系统的集成度,为系统设备的小型化提供可能。利用可灵活配置的 FPGA 芯片实现高精度发射波形产生和数字接收动态聚焦,进一步提高系统的数字化水平。

收稿日期: 2011-03-08

作者简介: 刘 建(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为通信与信息系统。

1 超声相控阵检测原理

相控阵超声检测系统由超声阵列换能器和相应的电子控制系统组成。超声阵列换能器由多个相互独立的压电晶片按照一定的排列方式组成阵列。每个阵元都有自己独立的发射和接收电路。利用电子技术控制超声阵列换能器不同阵元之间的触发延时时序,产生具有不同相位的超声相干子波束在空间叠加干涉,达到声束聚焦和偏转的效果(图 1)。

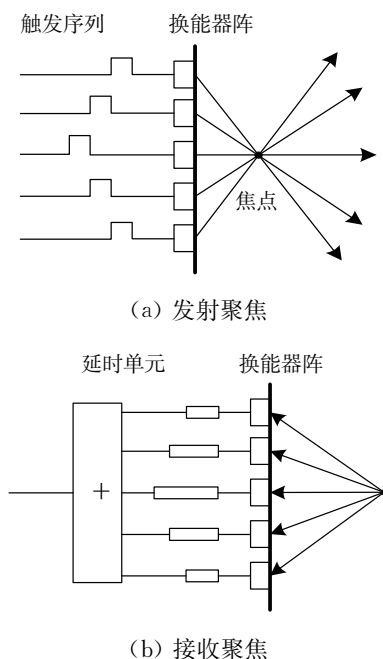


图 1 相控发射接收聚焦

在相控阵超声发射状态下,阵列换能器中各个阵元按照一定延时规律顺序激发,产生的超声发射波束在检测空间合成,形成聚焦点和指向性。改变各阵元激发的延时规律可以改变焦点位置和波束指向,实现在一定空间范围内的聚焦扫描。

在相控阵超声接收状态下,阵列换能器的各阵

元接收声场的反射信号,根据聚焦点的几何位置按不同延时值进行延时,然后加权求和获得接收合成声束。在一次接收过程中实时改变聚焦延时值,可以实现动态跟踪聚焦^[3]。

2 系统硬件组成与功能实现

超声相控阵检测系统的主要功能是利用电子技术控制超声声束的聚焦与偏转,实现对被测工件的扫查,并对接收回波进一步分析成像。系统的硬件总体框图如图 2 所示。系统主要包含超声波发射接收电路、FPGA 数据处理与控制模块和 ARM 后处理模块。

超声波发射接收电路的主要功能是生成用于激发探头阵元产生超声波的高压脉冲,以及实现对微弱的回波信号进行数控增益放大/衰减、带通滤波和高速采样。FPGA 数据处理与控制模块主要实现 32 通道脉冲激励序列延时,超声回波波束成形、压缩、实时数据的双向传输、储存以及其他一些时序逻辑控制。ARM 后处理模块主要实现对合成后的波束进行相应的成像算法处理,并转化为二维图形直观显示以及探伤标准的软件实现、人机交互接口和一些相关外设的驱动。

2.1 超声相控发射电路结构及功能实现

如图 2 所示,超声相控发射电路一般由发射波束形成模块、高压放大电路、开关复用电路组成。其工作过程如下:首先由 ARM 处理器根据设定的聚焦点计算出延时序,储存在 FPGA 内部的 RAM 中。FPGA 内部延时计数器在发射同步信号的触发下开始计数,当计数值等于某个通道的延时值时,该通道产生一个数字脉冲信号。将该信号送至脉冲产生模块进行高压放大,并通过开关复用到探头某个指定的阵元上激励产生超声波。

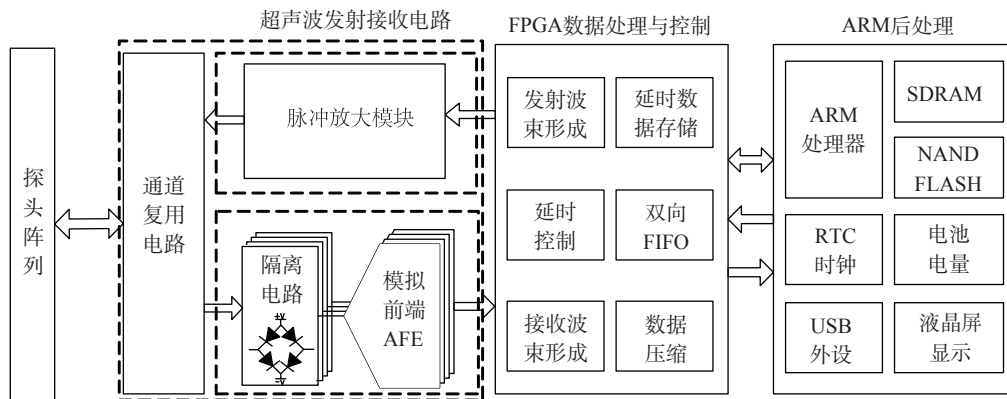


图 2 超声相控阵检测系统硬件总体框图

电路的脉冲放大模块采用 SUPERTEX 公司的 HV748。该芯片内部集成了 4 个并行通道,单片封装为 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 的 QFN 封装,那么 8 个芯片就能实现 32 通道的发射功能,大大提高了系统的集成度。开关复用模块选用的是 HV2301,该芯片集成了 8 个独立控制的高压模拟开关。可以通过 SPI 编程控制各开关的关断。用 16 个芯片级联与一个 128 阵元的探头相连,通过 FPGA 编程实现 128 阵元与 32 个发射接收通道间的复用。

2.2 超声相控接收电路结构及功能实现

超声波接收电路是实现相控阵超声成像系统硬件主要性能指标的关键之一。如图 2 所示,一般由收发隔离电路、超声接收模拟前端和接收波束成形模块组成^[4]。

超声回波信号一般都很微弱,最小的只有几毫伏,而发射端用于激励探头的脉冲信号则高达上百伏。这么高的电压势必会影响微弱回波信号的稳定性,同时也会损坏后端元器件。为此设计采用 Supertex 公司的 MD0100 进行隔离,该芯片能有效阻止峰-峰值 $> 2\text{ V}$ 的信号通过,保证峰-峰值 $< 2\text{ V}$ 的小信号无失真地通过,起到了很好的隔离效果。

超声波在媒介中传播是有衰减的,传播距离越大,衰减越大。因此不同深度的回波信号的幅值也不同。在信号进入 ADC 采样之前需要对回波信号作适当的调理,将信号电平调整到 ADC 的有效输入范围之内。系统采用 Analog Devices 公司的 AD9273 来实现对模拟回波信号的调理和采样。该芯片内部含有八个独立并行通道,各通道均由一个 SPI 可编程低噪声放大器(LNA),一个可变增益放大器(VGA),一个抗混叠滤波器和一个采样速率为 $10 \sim 50\text{ MSPS}$, 12 bit 采样精度的 ADC 级联组成。各通道增益动态范围为 $-42 \sim 0\text{ dB}$,最高增益可达 52 dB ,可以动态改变其增益值以完成不同深度回波信号的调理。可配置抗混叠滤波器带宽滤除有效带宽外的噪声,提高信噪比。采用 LVDS 输出,不仅满足 ADC 的高波特率输出要求,而且极大地降低了对 FPGA 引脚资源的需求。

2.3 FPGA 数据处理与控制模块

系统完全采用数字化设计,因此涉及到许多控制信号的时序配合和大量高速数据的处理与存储。FPGA 具有丰富的可编程资源,集成度高,实现灵活,能够很好地满足设计要求。

如图 3 所示,给出了 FPGA 数据处理与控制模

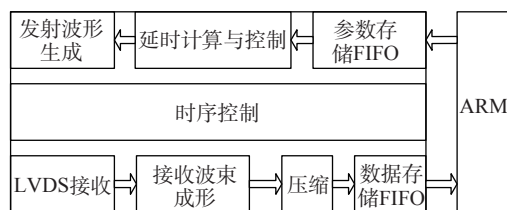


图 3 FPGA 数据处理与控制模块结构框图

块的功能结构框图。该模块是实现超声相控阵系统主要功能指标的核心所在。一般主要由发射波形产生模块、接收波束成形模块、延时控制模块、数据存储模块、时序控制模块等组成。

发射波形产生模块根据探测要求产生相应的脉冲激励序列,使合成超声波束在空间产生预定的聚焦与偏转,从而实现各种扫查方式。接收波束成形模块采用正交包络检波的方法^[5]提取各通道回波信号的包络,然后叠加求和得到一条某一个特定方向上的扫描线。因为包络是慢变信号,对延时精度要求不高,从而大大降低了由于高精度带来的系统复杂度和实现难度。延时控制模块一方面精确控制超声波发射端各通道的延时量以达到较好的聚焦偏转效果,另一方面在接收过程中,实时计算各动态聚焦点到相应接收阵元的延时量,动态跟踪接收波形的相位以实现动态跟踪聚焦,提高系统成像的清晰度。

系统选用 Xilinx 公司的 Spartan 6 芯片。该系列芯片内部含有丰富的存储器资源,有效解决大量延时数据的存储;丰富的乘法器资源极大地提高了信号处理能力;性能优秀的数字时钟管理模块易于实现较高的延时精度。

2.4 ARM 后处理模块

如图 4 所示,给出了 ARM 后处理模块硬件结构框图。该模块是实现超声相控阵系统软件功能和人机交互接口的关键所在。ARM 的高性能的处理能力和较强的内存管理技术能有效完成数据的后处理^[6],将探测结果以 B,C,D,S 等多种显示模式直观地呈现出来。同时它还有丰富的片内外围设备接口,如网口、串口、USB 接口、非常适合便携式嵌入式系统的应用,大大简化了硬件的设计难度。

3 若干关键技术的实现

3.1 基于 FPGA 的发射波束形成器

基于 FPGA 的发射波束形成器如图 5 所示。FPGA 外部时钟输入为 50 MHz ,内部倍频至 250 MHz ,利用其先进的数字时钟管理模块产生不

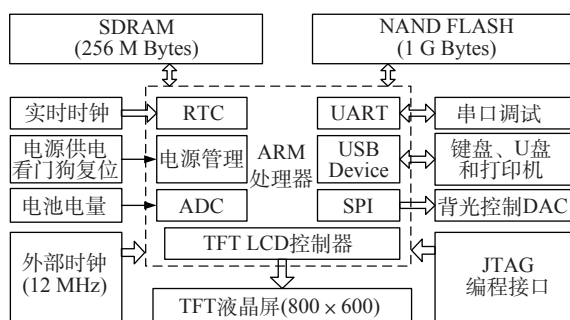


图4 ARM后处理模块硬件结构框图

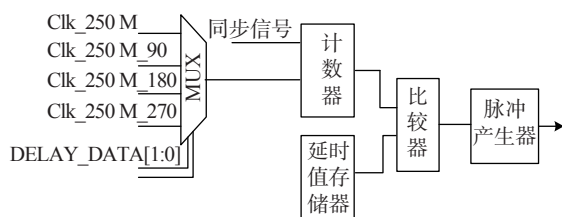


图5 发射波束形成器框图

同相位的四个时钟信号: clk_250M , clk_250M_90 , clk_250M_180 , clk_250M_270 。相邻两个时钟的时间相差 1 ns, 因此可使系统发射延时精度达到 1 ns。具体实现过程如下: 首先由 ARM 计算出各通道的延时值并写入 FPGA 的 RAM 中, 位宽为 16 bit。将低两位作为选择器的选通控制信号, 选择相应的时钟信号作为计数器的计数时钟。计数器检测到同步信号后开始计数, 当计数值等于延时值的高 14 位时产生使能信号, 使能脉冲成形器产生激励脉冲波形。

3.2 基于正交包络检波的接收波束形成技术

超声回波信号是高频脉冲信号, 若直接采样需要很高的采样率才能得到比较精细的相位信息, 对 ADC 的要求较高。而实际上只有在接收信号包络中含有所需要的目标信息。如图 6 所示, 提出了一种非相干数字包络检波算法。该算法首先对回波信号采样值进行数字包络检波, 将回波信号从高频变

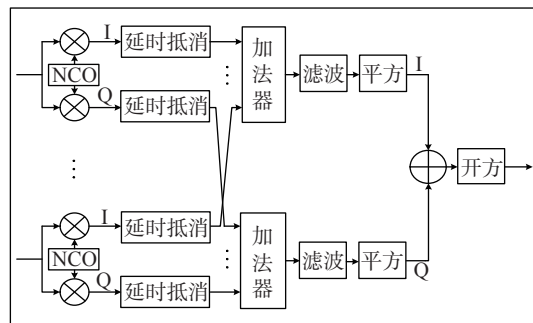


图6 正交包络检波算法框图

换到基带, 但仍保留原信号的包络和时延引起的相位信息, 然后再进行相位抵消的相关处理。该算法的优点在于不需要很高的延时分辨率。

在具体实现时, 由 NCO 产生与探头中心频率相同的参考信号, 经过混频将接收回波信号搬移到基带。但由于同一点的回波信号到达各阵元的距离不同, 导致接收回波信号的包络时延和由时延引起的相位也不同。因此需要对得到的基带信号进行延时和相位的抵消处理。对于包络时延, 由于包络是慢变信号, 对时延精度要求并不高, 可通过寄存器时延来实现; 对于相位差, 由于不同位置反射回波的相位差也不同, 因此在接收过程中可动态跟踪相位的变化并将其抵消, 实现接收动态聚焦。然后, 将 32 路回波信号加权求和、滤波形成一条特定方向的扫描线。

4 结语

提出了一种基于 FPGA 的高集成度超声相控阵检测系统的解决方案。系统完全采用数字化设计, 利用 FPGA 丰富的资源和高速的处理能力, 完成了系统核心功能的实现。同时, FPGA 的可重配置特性十分方便以后硬件设计的升级换代。另外该方案拥有 32 个独立的接收/发射通道, 利用当前新型的高集成度芯片, 大大降低了系统的硬件复杂度, 为便携式超声相控阵探测系统的设计提供了基础。

参考文献:

- [1] 周琦, 刘方军, 李志军. 超声相控阵成像技术与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(3): 34-37.
- [2] 王华, 单宝华, 王鑫. 超声相控阵实时检测系统的研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 771-774.
- [3] 李衍. 超声相控阵技术[J]. 无损探伤, 2007, 31(4): 24-28.
- [4] Eberhard Brunner. Ultrasound System Considerations and their Impact on Front-End Components[M]. Analog Devices Inc, 2002.
- [5] seong Ho Chang, Song Bai Park, Gyu Hyong Cho. Phase-error-free quadrature sampling technique in the ultrasonic B-scan imaging system and its application to the synthetic focusing system[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1993, 40(3): 216-223.
- [6] 常青龙, 徐大专, 韩中波. 基于 ARM 平台的超声波自动探伤系统的研制[J]. 无损检测, 2009, 31(12): 1015-1018.