

# 基于 DDS 技术的超声相控阵发射系统研究

施义茂 张陈涛 徐功浩 陈永庆 张建寰

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 超声相控阵技术应用于工业无损检测, 结合 DDS 技术将更具优势。文中分析了频率合成技术 DDS 的基本原理与结构, 利用可编程逻辑器件 FPGA 实现了 DDS 电路; 通过超声相控阵发射原理, 设计出了单通道超声相控阵发射系统, 并进行了实验分析。

**关键词:** 相控阵发射; 超声; DDS

**中图分类号:** TH878<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2013)02-078-04

相控阵技术起源于军事雷达中的电磁波的相控阵, 上个世纪 60 年代, Crawford 等人率先将该技术与超声检测技术结合应用于工业缺陷检测<sup>[1]</sup>。随着材料学、计算机技术及微电子技术的飞速发展, 21 世纪以来, 超声相控阵技术日趋成熟<sup>[2]</sup>, 目前已成功应用于各无损检测领域<sup>[3]</sup>。

应用超声相控阵技术进行无损检测时, 为了能够对被测物清晰成像, 关键是需要精确控制换能器中各阵源的发射相位或接收相位, 使得超声波束的聚焦点小、指向性好<sup>[4]</sup>。传统超声相控阵检测系统通常使用 LC 网络控制换能器中各阵元的发射相位, 然而 LC 网络结构复杂、电气参数不稳定且体积庞大, 信号易受噪声干扰, 极大限制了超声相控阵技术的实际应用。为了克服 LC 网络的不足, 本文采用了直接数字频率合成技术 (Direct Digital Synthesizer, DDS) 来取代传统的 LC 网络。DDS 体积较小、频率分辨率高、转换时间短, 且全数字化可编程, 使得信号不易受噪声干扰<sup>[5]</sup>。本文从研究 DDS 的基本理论出发, 设计了一种单通道的超声相控阵发射电路, 并通过实验对设计进行验证与分析。

## 1 超声相控阵发射原理

超声波相控阵发射是按照一定的规则和时序激发一组探头晶片, 通过调节激发晶片的序列、数量、时间来控制波束的形状、轴线偏转角度及焦点位置, 达到声束聚焦与偏转效果(如图 1 所示)。

图 1(a)中所示为相控发射聚焦, 即先激励阵列换能器两端阵元, 而后向中间阵元逐渐加大延迟, 得到指向一个曲率中心的合成波阵面。图 1(b)中所示为相控发射声束偏转效果<sup>[6]</sup>, 等间隔对阵列换能器各阵元进行增加发射延迟, 使得合成声

束指向一个地方, 达到相控偏转, 图中 OPCM (Orthotropic Piezoelectric Composite Material) 是正交异性压电复合材料的简称。

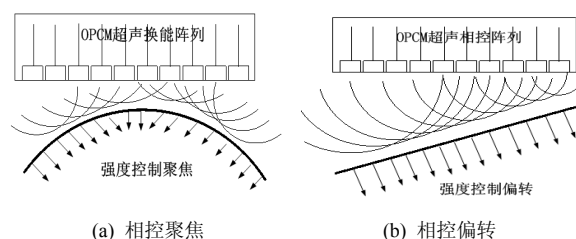


图 1 相控发射聚焦与偏转

## 2 DDS 的基本原理

直接数字频率合成(DDS)技术是一种从相位概念出发直接合成所需要的波形的新的全数字频率合成技术, 将数字信号处理理论用于频率合成领域, 以 Nyquist 采样定理为理论依据, 从相位概念出发, 生成一个频率和相位可调的输出信号。图 2 所示为 DDS 的基本原理图, 由相位累加器、相位寄存器、正弦查找表、D/A 转换器、低通滤波器构成。其中相位累加器、相位寄存器和波形存储器(即正弦查找表)构成数控振荡器(Numerically Controlled Oscillators, NCO), NCO 可产生频率可控制的数字正弦波形。

DDS 系统的核心是相位累加器, 由一个累加器和相位寄存器组成, 在参考时钟的控制下, 相位寄存器以频率控制字为步长进行增加。相位寄存器的输出与相位控制字相加, 其结果作为波形查找表的查找地址对波形表进行查找。正弦查找表由 ROM 构成, 内部存有一个完整周期正弦波的数字幅度信息, 每个查找表的地址对应正弦波中  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围的一个相位点。查找表把输入的地址信息映射成正弦波幅度信号, 同时输出到

**作者简介:** 施义茂(1985—), 硕士研究生, 研究方向: 超声检测。

**通讯作者:** 张建寰(1966—), 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向: 光机电一体化技术、超精密光学非接触测量技术的研究、微型光学系统应用技术、光电信息技术、传感技术等研究。

D/A 转换器的输入端，D/A 输出的模拟信号经过低通滤波器进行平滑处理，可得到一个频谱纯净的正弦波。

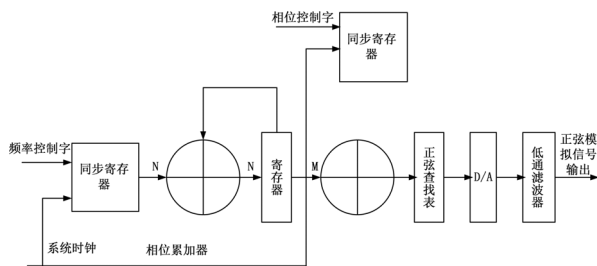


图 2 DDS 基本原理图

### 3 系统的整体设计

#### 3.1 总体方案

本系统通过 FPGA 实现 DDS 的数字电路部分设计，系统主要由 PC 机、FPGA 主控制模块、D/A 转换器、低通滤波器、功率放大器、相控阵探头等部分组成，系统框图如图 3 所示。PC 机主要是完成对 FPGA 的硬件组态及软件编程；FPGA 主控制模块包含数千个逻辑门用于数字系统的设计；D/A 转换器用于数模转换；低通滤波器用于滤除高频噪声，以得到平滑的阶梯状模拟信号；功率放大器将小功率的信号进行放大使得能够激励相控阵探头发射超声。

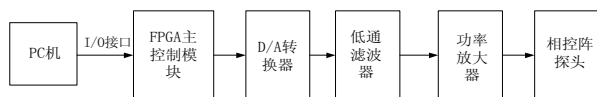


图 3 超声相控阵发射原理图

#### 3.2 DDS 模块设计

本系统中的信号生成模块是基于 DDS 技术进行设计，该模块可分为地址发生器、波形存储器、D/A 转换器、低通滤波器 4 个部分。

##### 3.2.1 地址发生器

地址发生器的初值可设置，用于产生波形存储器的地址信号，是在 Altera 公司提供的 Quartus II 开发集成环境下，使用灵活的 Verilog 编程语言，采用模块化设计，其原理图如图 4 所示。

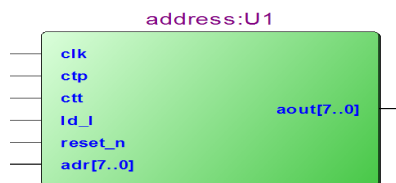


图 4 初值可设定的地址发生器

其中 clk 为系统时钟输入端，ctp、ctt 为累加控制端，ld\_1 为初值选择端，reset\_n 为复位端，adr[7..0]为初值输入端。

##### 3.2.2 波形存储器 ROM 的设计

波形存储器 ROM 是用来存储各种波形数据的，这些波形数据通过寻址计数器进行寻址输出，进行 D/A 转换就可以输出各种波形。输出何种波形，取决于波形存储器 ROM 中所存储的波形。若 ROM 中存储的是正弦波，则经过 D/A 转换后输出的就为正弦波。

首先要设计 ROM 初始化数据文件，初始化数据文件格式有两种：Memory Initialization File(.mif)格式文件或 Hexadecimal(Intel-Format) File(.hex)格式。本设计初始化数据文件采用 .mif 格式文件，对于数据点较多手动计算困难的波形可以利用程序语言生成。利用 C 语言编程对正弦函数进行采样，编译后生成 Sin.exe 文件，在 DOS 命令下执行：sin>sin.mif，可生成 mif 文件中的 ROM 表数据，然后加上 .mif 文件的头部说明，获取 mif 文件之后，使用 Altera 的 MegaWizard Plug-In Manager 定制一个 LPM\_ROM 即可。其模块原理图如图 5 所示。

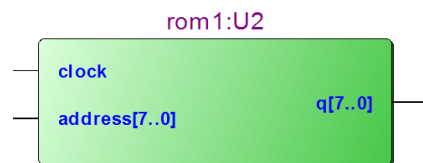


图 5 ROM 查找表

##### 3.2.3 D/A 转换器

本模块采用 AD 公司推出的高速 DA 芯片 AD9708。AD9708 是 8 位，125MSPS 的 DA 转换芯片，内置 1.2V 参考电压，差分电流输出。电路原理图如图 6 所示，波形存储器中的数字信号通过 D/A 转换器的数字信号输入端时如 DADB0-DADB7，将转换成响应的模拟信号。

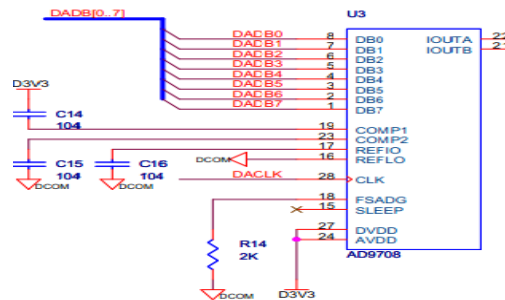


图 6 DA 转换电路原理图

### 3.2.4 低通滤波器的设计

AD9708 芯片差分输出以后, 为了防止噪声干扰, 电路中接入了 7 阶巴特沃斯低通滤波器, 带宽为 40 MHz; 由于巴特沃斯低通滤波器在其通带内非常平坦, 设计不是很复杂, 且能满足设计要求, 所以采用巴特沃斯低通滤波器, 其电路实现如图 7 所示。

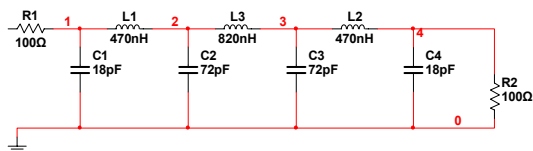


图 7 滤波器

### 3.3 功率放大器的设计

通过低通滤波器后的模拟发射波形, 其输出信号振幅小(为 1.6 V), 无法驱动换能器阵元进行超声发射。本系统中, 在低通滤波器后, 加入了高速运放+互补推挽三极管的高频功放电路, 以对低功率的模拟发射信号进行功率放大, 使得能够驱动压电阵元。功率放大电路如图 8 所示。

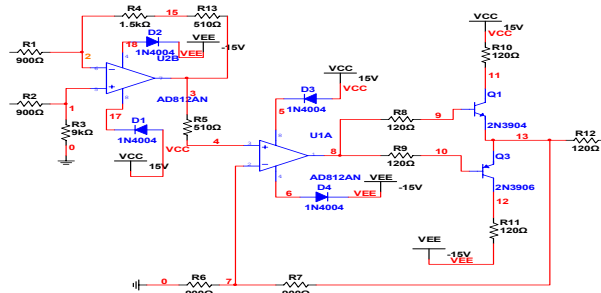


图 8 功率放大电路

## 4 实验结果

为了验证 DDS 的数字电路部分的可行性, 按照 DDS 的工作原理将各子模块连接并进行全编译后, 再利用 Quartus II 软件中自带的 Modelsim-Altera 仿真软件进行仿真。图 9 所示为步长为 5 的 DDS 仿真波形图。

实际上, 从仿真波形图中很难直观地看出 DDS 输出正弦波的情况。为了便于观察, 将 DDS 输出部分连接到示波器中, 得到图 10 所示的波形图。图中正弦波形周期为 2.5 MHz, 峰值为

### 参考文献:

[1] J.V.Hatfield, NR Scales, AD Armitage ,et al. An integrated multi-element array transducer for ultrasonic imaging [J].Sensors and Actuators. 1994,41(1):167-173.

1.44 V, 符合设计要求。

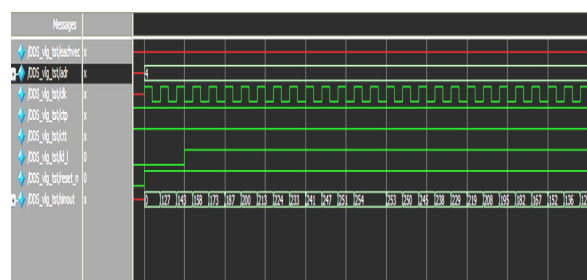


图 9 步长为 5 的 DDS 仿真波形图

为了验证超声相控阵发射系统的可行性, 实验采用的相控阵探头为 P2.5-6420C, 其阵元数为 64, 中心频率为 2.5 MHz, 将探头置于水中, 用示波器接收其回波信号, 得到的超声回波信号如图 11 所示, 说明设计的超声发射系统是可行的。

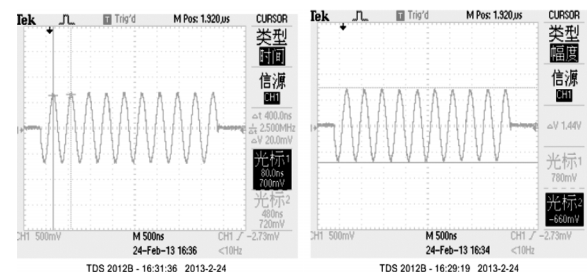


图 10 2.5MHz 正弦波

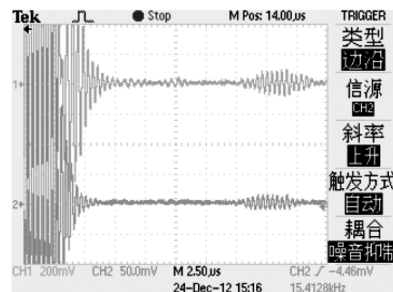


图 11 超声回波信号

## 5 结束语

本文在深入研究 DDS 技术理论的基础上, 利用可编程逻辑器件 FPGA 实现了 DDS 电路设计, 并将 DDS 技术运用到超声相控阵中来, 并通过实验验证了所设计电路的可行性, 实现了单通道相控发射, 为今后设计多通道相控发射提供了硬件基础。

(下转第 86 页)

