

相控超声激发系统的设计

刘姝言,王青东,李禹志,郭各朴,马青玉

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对相控阵列声涡旋中的多路相控信号的激发问题,选用波形存储和窄带滤波谐振相结合的信号发生芯片 MD2134 实现信号的输出和功率放大,并利用 FPGA 编程技术控制输出信号的相位,设计了一个相位可调的 8 路相控超声激发系统,达到高集成度、操控灵活、相位差可控的目标. 在设计中,用 Quartus II 软件编写寄存器代码,控制信号发生电路输出带有相位差的信号,经过 D/A 转换和功率放大后驱动换能器形成谐振. 将同步输出的 8 路中心频率约为 500 kHz,相位差为 $\pi/4$ 的信号分别激励 8 个换能器,用示波器采集水听器所接收到的声波波形,并测量各路声波的相位差. 结果表明设计系统的集成度高,输出信号幅度和相位稳定,各路声波相位差和理论结果一致,可在相控超声系统中推广和应用.

[关键词] 相控超声, FPGA, MD2134, 窄带滤波谐振

[中图分类号] X87 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2016)04-0008-07

Design of Phase Controlled Ultrasound Excitation System

Liu Shuyan, Wang Qingdong, Li Yuzhi, Guo Gepu, Ma Qingyu

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to realize the excitation of phased array in acoustic vortex, a phased ultrasonic excitation system is designed in this paper. Controlled by a FPGA, the chip MD2134 is employed to generate phased signal by using the techniques of waveform storage and narrow-band resonant filter with high integration degree, flexible operation and controllable phase difference. The control codes of chip registers are written by Quartus II to generate signals with the controllable phase difference. After D/A conversion and power amplification, the output signals are used to drive the transducer effectively, to generate electrical resonance to drive acoustic waveforms. 8-channel synchronous signals at the frequency of 500 kHz with the phase difference of $\pi/4$ are used to drive 8 transducers. The corresponding acoustic signals are detected by a needle hydrophone and collected by an oscilloscope to conduct waveform comparison. The consistent phase differences of the experimental results demonstrate that the designed system is highly integrated with stable amplitudes and phases of the generated acoustic signals, and that the system can be applied in phase controlled ultrasonic system.

Key words: phase controlled ultrasound, FPGA, MD2134, narrow-band resonant filter

超声相控阵是由大量换能器阵元按照一定规律排列而成. 由于换能器内部是由多个独立的压电晶片组成,当受到不同的时序信号激励时,发出的信号在空间经过干涉叠加,形成一个新的波阵面,通过调整控制信号的延迟量,可产生具有不同相位差的超声子波束,实现声束的偏转和聚焦^[1-3]. 这种波束发射形式利用电子方式控制,结合数字电路的方法,能够灵活便捷地控制声束形状和指向性. 相控阵超声技术在无损检测领域应用很多,早期仅用于医疗方面. 医学上使用 B 超诊断仪来进行动态聚焦,利用换能器的快速扫描进行医学成像^[4]. 如今,利用大功率超声的可控聚焦性,可以对病变组织进行局部升温,杀死病变细胞,达到治疗癌症的目的. 随着微电子、计算机技术的快速发展,相控超声在工业上的应用也更广泛. 利用数字方式控制改变相控阵探头中的晶片阵列的激励信号,可改变波束特性产生动态聚焦波束,实现复杂形状零部件的高效检测.

收稿日期:2016-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金(11274176、11474166、11604156)、江苏省自然科学基金(BK20161013)、中国博士后科学基金(2016M591874)、江苏高校优势学科建设项目.

通讯联系人: 马青玉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电子技术、信息处理、声学. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

涡旋声场是声传播中由相位奇异性而产生的螺旋状扭转的特殊波前,其相位沿圆周角均匀变化,涡旋声场可以通过多路相控信号的激发和叠加形成。目前对相控发射系统的研究多注重相位精度的控制,相控聚焦延时算法以及相控阵超声应用的讨论,普遍采用数字化控制的方法产生信号,相比传统模拟延迟线的方法要更加灵活。骆英^[5]等人考虑到线性阵列换能器相控聚焦的延时算法,提出了用 ROM 存储波形数据的思想。杨斌^[6]等人用 CPLD 控制信号输入,考虑到各路通道激励脉冲的同步控制,通过延时算法实现相控。崔娟^[7]等人设计了 FPGA 控制下的激发系统,将 D/A 转换芯片和运放结合起来实现对输出信号的控制和处理。杨玲^[8]等人用相位编码的技术产生可控的声源信号并进行了涡旋声场声压和相位分布的研究。

为了在声涡旋的研究中灵活准确地控制每一路声信号的相位,本设计选用波形数据存储、窄带滤波谐振和功率放大相结合的超声生成驱动芯片 MD2134,在高集成度 FPGA 的控制下完成相控正弦信号的产生和功率放大,驱动换能器激发出具有相位信息的超声波,同时利用数字相控方法,实现高精度可控相位差,通过寄存波形数据产生带有相位差信号,在理论上能实现最小相位差 $\pi/360$ 。实验制作了 8 路同步相控信号发射电路,同步输出 8 路中心频率约 500 kHz、相位差为 $\pi/4$ 的相控正弦信号并分别激励 8 个超声换能器,用示波器采集水听器所接收到的声波信号,对具有不同相位差的超声信号进行了测量和对比,实验结果与理论一致,证明设计系统具有高集成度,输出信号幅度和相位稳定,可在相控超声系统中应用和推广。

1 系统整体框架及芯片选型

相控超声激发系统的结构图如图 1 所示。系统采用数字化波形发射方式,PC 机由 USB 接口通过 JTAG 将程序烧录至 FPGA 开发板,通过 MD2134 芯片的 SDI 端口接收 FPGA 发出的控制字,控制 8 路通道的超声生成驱动芯片产生数字化波形激励信号,经过数模转换与功率放大后驱动换能器阵列发出声波。FPGA 作为控制单元,为相控发射提供精确的时间延迟并为信号波形的产生提供连续数据,使信号的频率、幅度、相位、波形等参数均可调。

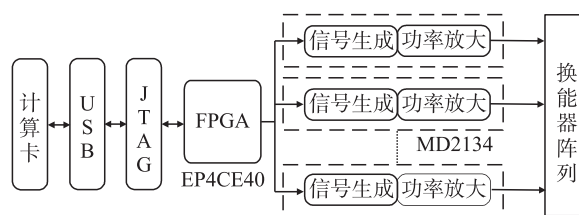


图 1 相控超声激发系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

本设计的信号特性和同步控制选用 Altera 公司的 FPGA(EP4CE40)芯片,该芯片集成度高,有丰富的 I/O 口,可实现多组控制信号输出。系统设计中选用 50 MHz 频率的晶振作为系统时钟输入,可满足控制信号的频率要求。超声生成驱动芯片采用 Supertex 公司的 MD2134,内含数据锁存、脉幅调制、等级转换、数模转换等多种模块功能,集成信号波形产生、功率放大、窄带滤波谐振及任意幅度和相位的可控性于一体;输出信号最大频率为 250 MHz,有 15 个独立可编程的等级寄存器及 8 bit 分辨率的 PAM;通过芯片 SDI 端口接收 FPGA 产生的逻辑控制信号,经数据锁存,对芯片内部的 PAM 与数模转换器进行逻辑控制;由波形数据寄存器存储事先编辑好的波形数据点,根据 FPGA 发送数据的变化改变寄存器中的值,从而对信号的相位进行控制。4 个逻辑输入 M[3:0]用以传输数据等级的选择,结合 PAM 与等级寄存器控制波形形状,并从 PA 和 PB 端口输出,经两个 MOS 管实现推挽功率放大,并通过变压器实现阻抗匹配后驱动换能器。

2 硬件设计

单路相控输出的电路设计如图 2 所示。FPGA 通过 M[3:0],SDI 和 CS 端口将控制字传送给 MD2134,通过芯片内部寄存器控制其工作模式。信号经 MD2134 生成处理后,从 PA 和 PB 推挽输出。输出信号首先通过 D5A、D5B(D6A、D6B)组成的 5 V 钳位二极管,经滤波后流入两个对称的 DN2625 耗尽型 NMOS 管,同时外接 5 V 直流电压 VPP,使之与变压器构成耦合功率放大电路。测试端用跳针分隔两路输出,一路是 RC 假负载电路,模拟压电换能器,用于电路调试;另一路接入换能器,利用水听器和示波器来采集输出的信号波形。在设计中需分析电路谐振参数,选择合适的电容接入到假负载电路中,并为换能器设置静态匹配电路^[9],使电路输出频率与换能器中心频率相匹配,提高系统效率。电路中还需安装滤波电容来削减芯片输出和电源噪声影响。如图 2 左下角的虚框所示,通过改变电阻 R14 的阻值来调节芯片基准电压,二极

管 U4 起到稳定电压 V_{REF} 的作用, VDD 是外接的 5 V 电压. 芯片 MD2134 的输出电流为:

$$I_A = \frac{48 \times V_{\text{REF}} \times \text{DAC} \times (2^6 - 1) \times \frac{L_A}{127}}{9 \times R_{\text{FB}}},$$

$$I_B = \frac{48 \times V_{\text{REF}} \times \text{DAC} \times (2^6 - 1) \times \frac{L A_X}{127}}{9 \times R_{\text{FB}}},$$

式中, DAC 为 MD2134 芯片中 DAC 寄存器存储值的十进制形式, LA_x 为波形数据值对应的十进制数, 由写入芯片寄存器中的数据所确定. R_{FR} 为图 2 中对应 R16 的电阻值.

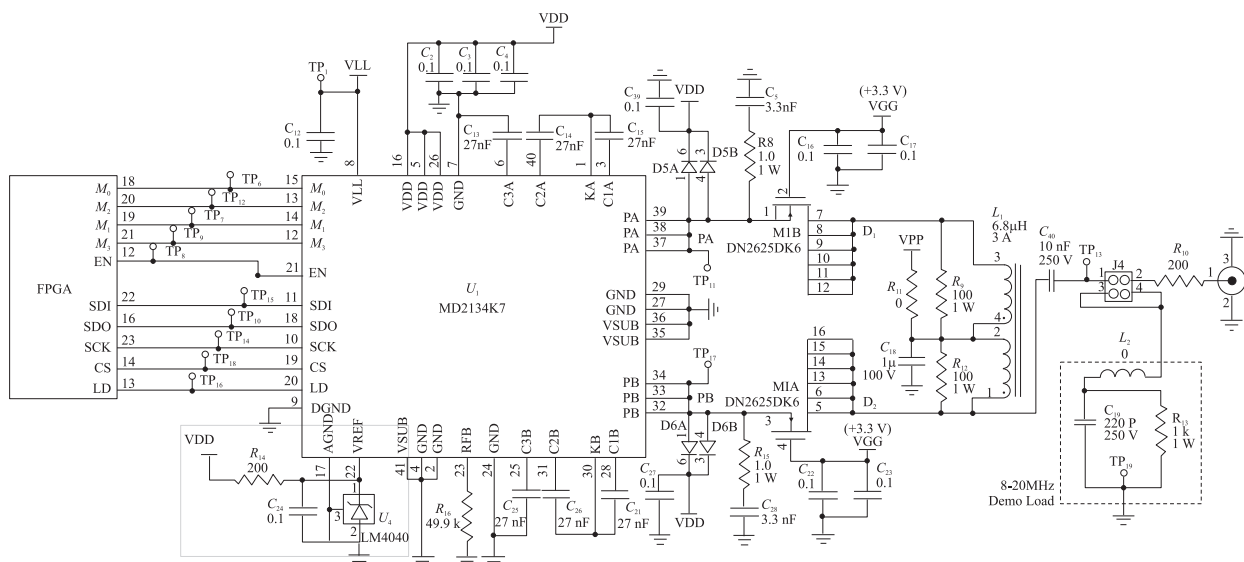


图 2 单路相控和功率驱动输出电路图

Fig. 2 Single channel circuit of phase control and power driver

多路相控系统的实现可借鉴单路系统方法,每一路寄存波形数据相同,只需在确保同步发射的前提下调整各路发射的初始相位,使每一路输出都有等间隔的相位差. 在 FPGA 不同端口输出控制下,实现 8 通道相控信号的控制. 所设计和制作的硬件系统如图 3 所示.

3 软件设计

本设计利用驱动芯片 MD2134 含有的多种模块功能及逻辑输入口,结合直接数字合成(DDS)技术^[10-12],采用寄存波形数据点方式,先将波形分层次采样数据点并寄存,再依据波形特征调用数据等级生成数字激励信号。根据前人研究的换能器数量和相位差固定的问题,利用圆周上均匀分布的 N 个换能器和可控相位差 $\Delta\varphi = 2m\pi/N$,结合本次设计需要实现 8 路信号,取 $m = 1$,以 $\pi/4$ 为各路信号的相位延迟进行设计。

MD2134 中含有 16 个 16 位寄存器,前 2 位分别控制芯片的工作状态与读写,第 3~6 位存储数据等级. 另外,除第一个寄存器的后 8 位寄存 DAC 的二进制值,其余 15 个寄存器的后 7 位用于存储波形数据点. 基于芯片上寄存器的应用,将正弦波形划分为 15 个等级和 1 个中断控制级,选取 7 个正数、7 个负数以及 0 构成波形数据点,并将波形数据用二进制形式寄存. 输送到芯片的 16 位寄存器中. 其中,第一个寄存器用

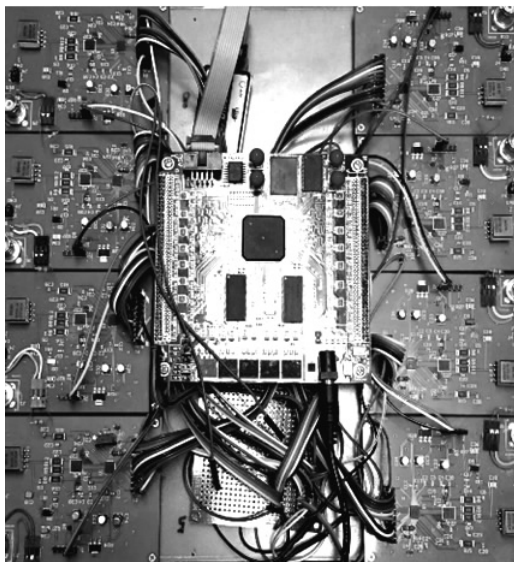


图3 FPGA控制下的8路相控驱动系统实物照片

Fig. 3 Picture of the 8-Channel phase controlled system controlled by FPGA

以存储 0 到 255 内固定的 DAC 值,该值影响芯片 MD2134 的输出电流大小,从而也影响输出信号的幅值. 在本实验中 DAC 值设为 2.

如图 4 所示,4 个逻辑输入 $M[3:0]$ 传输 15 个数据等级并控制芯片的推挽输出口,其中 Lv0 用于标志输出的中断,Lv1–Lv7 从 PA 输出,Lv8–Lv15 从 PB 输出. 配合计数器的控制,按照正弦波的波形特征依次输出 $M[3:0]$,控制驱动芯片生成数字激励信号. 这种方法利用波形存储单元将所需激励信号波形预先编辑好并存储在波形存储器中,相比传统的单一单脉冲激励形式,产生的激励信号更灵活,可控性更强. 这种数字控制方法在改变相控精度上也十分灵活,在本实验中各路的相位差为 $\pi/4$,根据 $y = \sin(\omega t + \varphi)$,若要实现 $\pi/4 + \phi$ 的相位差,即将波形采样点的方程改为 $y = \sin(\omega t + \varphi + \phi)$,而等级调用不发生变化.

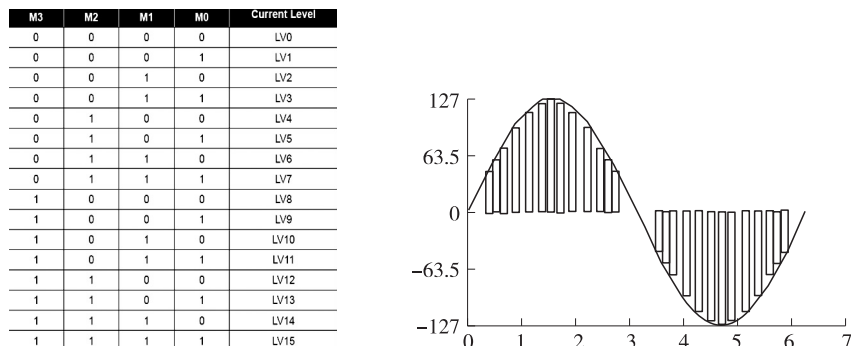


图 4 调用等级与对应二进制数的关系和波形层次划分示意图

Fig. 4 Relation between the current level and the corresponding binary number, and the diagram of waveform hierarchy

由于实验中 8 个换能器的中心频率各不相同,首先用阻抗分析仪对换能器进行测量,得到每个扇形中心频率约为 500 kHz. 系统晶振频率为 50 MHz,若设计的一组正弦波用 33 个采样点完成,计数周期 60 ns,频率 $f = 1/(33 \times 60 \text{ ns}) \approx 500 \text{ kHz}$,可满足换能器频率的匹配. 信号控制过程中,首先对 50 MHz 的晶振时钟进行 3 分频作为全局时钟;然后计数器控制波形数据寄存器的输入,每计数一次,SDI 便串行向寄存器输入 1 组波形数据中的 1 位数据,直至完成 16 组 16 位的数据输入;最后以 CS 为片选信号,在存储波形数据时控制寄存器工作状态的标志,并以 LD 为 CS 的标志信号,在 CS 上升沿到来后的下一个时钟置为高电平,以 EN 控制驱动芯片工作状态,在数据生成过程中始终置高电平.

多路系统的设计原理与单路相同,FPGA 输出 8 路 SDI 端口和 $M[3:0]$ 输出,信号产生方式不变. 8 路信号同步并行工作,各通道设置独立的 CS、LD、EN 防止串扰. 当波形数据存储完成后,各路的 $M[3:0]$ 开始工作. 以第一路信号为基准,以后每一路初始相位都比前一路延迟 $\pi/4$,形成 8 路具有固定相位差和总相位为 2π 的相控信号.

本设计中脉冲波形设置为连续输入 300 个计数周期(12 000 ns)后,暂停 3 000 个计数周期(120 000 ns),其占空比约为 9.09%. 这种较低的占空比设置有利于降低芯片的功耗,提高芯片的散热效果,同时可消除换能器工作过程中超声回波的影响.

4 实验系统测试

在 Quartus II 环境下,用 Verilog 语言编写了发射系统的控制信号,并结合 ModelSim 编写了 testbench 文件,所得 8 路控制信号数字仿真图如图 5 所示,各通道控制波形输出的 $M[3:0]$ 都保持相等的相位差. 在不改变波形数据寄存器值的情况下,通过改变数据等级的选择也可实现小范围内信号的相位控制.

为验证本设计能否满足声涡旋系统中相位控制和功率放大及换能器驱动能力的要求,搭建了实验平台,并对输出信号的特性进行了测试. 在电路输出端接上换能器,用水听器接收和示波器观测到换能器在水中的声波波形如图 6 所示,可见输出脉冲正弦波形的周期约为 $2.0 \mu\text{s}$,占空比约为 9.1%,完全符合实验要求.

将 8 路相控驱动系统分别接上 8 个换能器,以第 1 路输出信号为基准,用示波器采集并分别测试 8 路信号之间的相位关系,图 7 显示了相位差绝对值为 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 时两路信号的输出波形,示波器的相位测

量结果分别为 45.22° 与 90.15° , 这些微小的误差是由输出电路中换能器和电感的谐振特性差异所产生, 通过换能器特性的电路匹配可解决. 总体上看, 两路信号的幅度与相位较为稳定, 相位差符合预期效果, 误差较小.

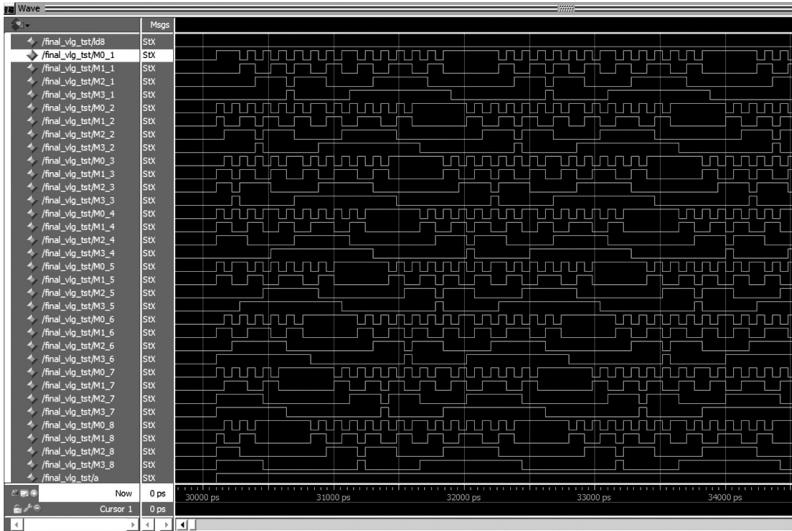
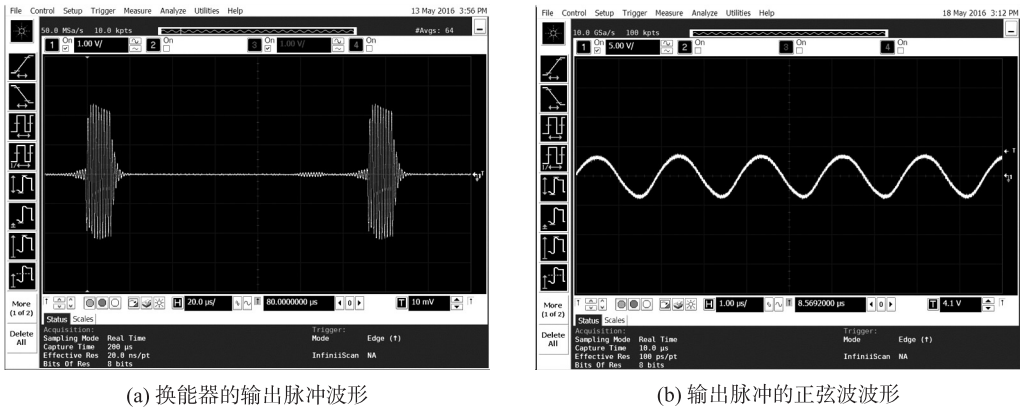


图 5 控制信号的数字仿真图

Fig. 5 Simulation results of the phase controlled signals

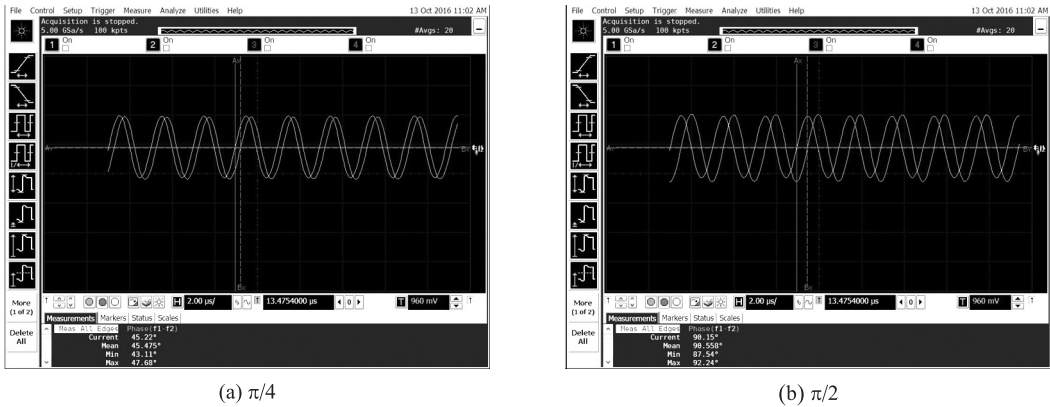


(a) 换能器的输出脉冲波形

(b) 输出脉冲的正弦波波形

图 6 换能器的输出脉冲波形和输出脉冲的正弦波波形

Fig. 6 Collected burst waveform from the transducer and the corresponding sine wave



(a) $\pi/4$

(b) $\pi/2$

图 7 相位差分别为 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 时相控系统的输出声波波形

Fig. 7 Waveforms of the phase controlled acoustic signals with the phase differences of $\pi/4$ and $\pi/2$

为进一步验证该系统在输出信号幅度调节上的作用, 选取两组相位差绝对值分别为 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 的输出信号进行实验. 保持两路信号相位差不变, 增加其中一路的外接电压 V_{PP} (MD2134 推挽输出端所外接

的电压),分别采集2组信号波形得到如图8所示的输出信号.从图8可以看出,通过调节电路的外接电压能够改变输出信号的幅值.从前文中 MD2134 输出电流的计算公式可知,编程与硬件电路中 R16 的取值影响芯片输出电流的大小,从而也会改变输出信号的幅度.因此,在本设计中可用多种方法实现对系统输出信号幅值的控制.

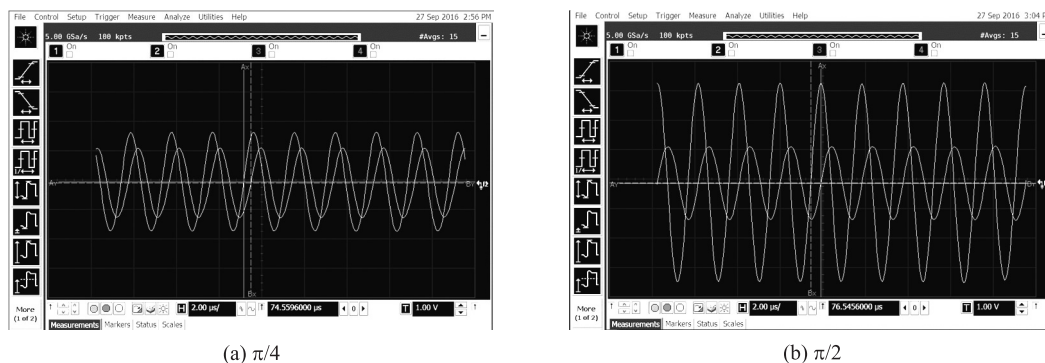


图8 相位差分别为 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 时相控系统输出具有不同幅度的声波波形

Fig. 8 Waveforms of the phase controlled acoustic signals with the phase differences of $\pi/4$ and $\pi/2$ at different amplitudes

5 结论

本文针对相控阵列声涡旋中的多路高频相控信号激发问题,将波形数据存储和窄带滤波谐振相结合,利用 FPGA 的 I/O 引脚资源和高速计数功能,结合直接 DDS 技术,通过可编程方式控制产生相控超声激励信号,设计了一种相控超声激发系统.通过数字控制方式同步输出 8 路相位差为 $\pi/4$ 的信号,并经功率放大驱动换能器发出声波,利用高集成芯片设计了相位精确可控的实验系统,对控制信号、单路换能器发射波形和 8 路相控波形进行了频率和相位差的测试.结果表明,设计系统的集成化程度高,具有良好的信号产生和驱动能力,输出信号的幅度和相位稳定可控,可应用于各类高频相控信号激发系统,为相控超声系统的设计提供了新方法.

[参考文献] (References)

- [1] 钟志明,梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用[J]. 无损检测,2002,24(2):69-71.
ZHONG Z M, MEI D S. Development and application of ultrasonic phased array technique[J]. Nondestructive testing, 2002, 24(2):69-71. (in Chinese)
- [2] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(9):925-934.
JIN S J, YANG X X, CHEN S L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2014, 28(9):925-934. (in Chinese)
- [3] 曾锦辉. 高频环阵换能器数字波束聚焦技术[D]. 北京:北京协和医学院,2007.
ZENG J H. Digital beam focusing technique for high frequency ring array transducer[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2007. (in Chinese)
- [4] 李亚奇. 超声相控阵电子系统的研究[D]. 北京:中国科学院声学研究所,2007.
LI Y Q. Research on ultrasonic phased array electronic system[D]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [5] 骆英,王伟,王自平,等. 基于 FPGA 的超声相控阵相控发射系统的研究[J]. 仪表技术与传感器,2010(10):51-53.
LUO Y, WANG W, WANG Z P, et al. Research on technology of high integration ultrasonic phased array transmission system based on FPGA[J]. Instrument technique and sensor, 2010(10):51-53. (in Chinese)
- [6] 杨斌,王召巴,陈友兴. 基于 CPLD 的超声相控阵高精度相控发射系统的实现[J]. 中国测试技术,2007,33(2):10-12.
YANG B, WANG Z B, CHEN Y X. High-precision phased ultrasonic transmission in phased array ultrasonic systems based on CPLD[J]. China measurement technology, 2007, 33(2):10-12. (in Chinese)
- [7] 崔娟,王红亮,何常德,等. 基于 FPGA 的超声相控阵发射系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2015(7):54-56.

- CUI J, WANG H L, HE C D, et al. Design of ultrasonic phased array transmission system based on FPGA[J]. Instrument technique and sensor, 2015(7): 54-56. (in Chinese)
- [8] YANG L, MA Q Y, TU J, et al. Phase-coded approach for controllable generation of acoustical vortices[J]. Journal of applied physics, 2013, 113(15): 154 904.
- [9] 郭林伟, 林书玉, 许龙. 压电换能器静态匹配电路的研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2008, 21(3): 361-363.
- GUO L W, LIN S Y, XU L. Study on matching circuit of ultrasonic transducers[J]. Basic sciences journal of textile universities, 2008, 21(3): 361-363. (in Chinese)
- [10] 鲍晓宇, 施克仁, 陈以方, 等. 超声相控阵系统中高精度相控发射的实现[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 153-156.
- BAO X Y, SHI K R, CHEN Y F, et al. Realization of phase-controlled transmission and synchronization of ultrasonic phased array system[J]. Journal of Tsinghua university (science and technology edition), 2004, 44(2): 153-156. (in Chinese)
- [11] 王政, 徐霞, 张强, 等. 基于 DDS 的新颖多功能程控电源的设计[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2016, 16(2): 41-46.
- WANG Z, XU X, ZHANG Q, et al. Design of novel multifunctional programmable power supply based on DDS[J]. Journal of Nanjing normal university (engineering and technology edition), 2016, 16(2): 41-46. (in Chinese)
- [12] ZHENG H X, GAO L, MA Q Y, et al. Pressure distribution based optimization of phase-coded acoustical vortices[J]. Journal of applied physics, 2014, 115(8): 084 909.

[责任编辑: 严海琳]