

基于 FPGA 和 DDS 的声光调制器驱动电路的实现

游峰^{1,2}, 陈滔¹, 孔伟¹, 刘豪¹, 舒嵘¹, 胡以华^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

3. 国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037)

摘要:提出了一种以现场可编程门阵列(FPGA)和直接数字频率合成器(DDS)芯片 AD9910 为核心器件, 经过 LT5514, HMC680LP4 和 HELA-10D 组成的三级功率放大的声光调制器驱动电路。该文测量了此驱动电路的单频输出, 频率切换输出和扫频输出性能, 并使用 1 572 nm 波长的分布反馈激光器(DFB)激光二极管作为光源, 测试了该驱动电路驱动 2 款不同工作频率的光纤声光调制器的能力。实验结果表明, 驱动电路的输出频率在 30~300 MHz 可调谐, 输出功率在 20~30 dBm 可调谐, 该驱动电路具有较高的灵活性, 可用于驱动不同类型的声光调制器。

关键词:声光调制器; 现场可编程门阵列(FPGA); 直接数字频率合成器(DDS); 功率放大器; Verilog HDL

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.008

Implementation of Acousto-optic Modulator Driven Circuit Based on FPGA and Direct Digital Synthesizer

YOU Feng^{1,2}, CHEN Tao¹, KONG Wei¹, LIU Hao¹, SHU Rong¹, HU Yihua^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In this paper, an implementation of acousto-optic modulator driven circuit based on FPGA and DDS chip AD9910, with the output signal amplified by a three-stage cascaded LT5514, HMC680LP4 and HELA-10D power amplifiers, is presented. The performance testing of single frequency output, frequency switching output and frequency sweeping output are carried out. And a 1 572 nm DFB laser diode is used as the source to test the capability of the circuit to drive two different fiber acousto-optic modulators. The experimental results indicate that the output frequency of circuit is tunable from 30 MHz to 300 MHz and the output power is tunable from 20 dBm to 30 dBm. The proposed circuit has great flexibility and can be used to drive different types of acousto-optic modulator.

Key words: acousto-optic modulator; field programmable gate array(FPGA); direct digital synthesizer(DDS); power amplifier; Verilog HDL

0 引言

声光调制器(AOM)在冷原子控制^[1], 测距激光雷达的线性调频^[2], 激光雷达探测大气环境要素^[3]等方面有着广泛应用。常见的声光调制器驱动电路采用固定频率的振荡器进行功率放大, 或者采用压控振荡器(VCO)^[4]通过锁相环将频率锁定在较高的工作频点, 然后进行功率放大, 推动声光调制器工作。在不同的应用场景下可能需要快速改变射频信号的幅度和频率, 但 VCO 频率切换速度较慢, 专用

的射频信号源仪器价格较贵。近年来, 直接数字频率合成器(DDS)^[5]因具有频率切换速度快, 相位噪声低等优势, 被广泛应用于声光调制器驱动电路中。为了满足实验室激光雷达系统中声光调制器的应用需求, 本文选用现场可编程门阵列(FPGA)芯片和 DDS 芯片 AD9910^[6]为核心器件, 搭配功率放大器, 采用模块化设计方式设计了一种输出频率在 30~300 MHz 可调谐, 输出功率在 20~30 dBm 可调谐的声光调制器驱动电路。驱动电路在 30~200 MHz

收稿日期: 2018-03-09

基金项目: 中国科学院重点实验室基金资助项目(CXJJ-17S026)

作者简介: 游峰(1992-), 男, 江西赣州人, 博士生, 主要从事激光雷达探测大气环境要素的研究。通信作者: 胡以华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间信息获取与处理技术方面的研究。E-mail: yh_hu@263.net。

内输出 29 dBm 功率时,增益平坦度小于 1 dB。通过编写 Verilog HDL 代码配置 AD9910 的寄存器,可以实现单频输出,频移键控(FSK)输出和扫频输出。该驱动电路具有较高的灵活性,可满足不同应用场景的需求。

1 硬件和软件设计

1.1 硬件电路设计框架

驱动电路的系统框图如图 1 所示。主控芯片选用 Xilinx 公司 Spartan 6 系列 FPGA 芯片,型号为 XC6SLX9-2TQG144C, FPGA 配置芯片选用 Xilinx 公司的 XCF04SVOG20C 芯片。DDS 芯片选用 Analog Devices 公司 AD9910。与上一代的 AD9858 芯片相比,AD9910 降低了芯片功耗,提高了数模转换器(DAC)的位数,内部集成了锁相环。AD9910 内部集成 14 bit 的 DAC,支持最高 1 Gs/s 的采样率,最高能输出 400 MHz 的正弦波信号,频率分辨率为 0.23 Hz,通过软件编程可以灵活地改变频率、幅度和相位。AD9910 的输出频率可由下式确定:

$$f_{\text{out}} = \left(\frac{n_{\text{FTW}}}{2^{32}} \right) f_{\text{SYSCLK}} \quad (1)$$

式中: f_{out} 为输出频率; n_{FTW} 为 AD9910 内部 32 位寄存器的值; f_{SYSCLK} 为参考时钟频率。此处,驱动电路的参考时钟频率配置为 1 GHz。

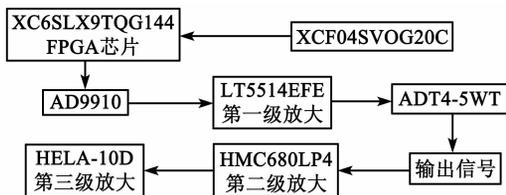


图 1 硬件电路框图

AD9910 的差分输出管脚 IOUT 和 IOUT* 直接与 Linear 公司 LT5514 的 IN+ 和 IN- 管脚连接在一起。LT5514 是可编程增益放大器,有 22.5 dB 可编程增益,1.5 dB 的增益控制步长,通过 4 个管脚 PGA0~PGA3 可改变器件的放大增益。选择输出电阻 200 Ω , LT5514 的大信号带宽为 LF~500 MHz。调整 LT5514 的放大器增益,搭配使用不同组合的功率放大器可适用不同的应用场景。选用 Mini-Circuits 公司的射频变压器 ADT4-5WT 将 LT5514 输出的差分信号转换成单端信号。

此处选用 LT5514 作为第一级放大, Analog Devices 公司的 HMC680LP4 作为第二级放大,

Mini-Circuit 公司的 HELA-10D 作为第三级放大。HMC680LP4 是 5 位数字可变增益放大器,工作频率在 30~400 MHz。HELA-10D^[7]的工作频率在 8~300 MHz,内部阻抗匹配为 50 Ω ,无需进行外部匹配,最大输出功率为 1 W(30 dBm)。组成的三级级联放大器可对 30~300 MHz 的正弦波信号进行放大。

1.2 AD9910 的寄存器配置

使用 Xilinx 公司开发环境 ISE Design Suite 14.7 编写 Verilog HDL 代码。FPGA 芯片通过与 AD9910 的以下管脚相连进行逻辑控制:

- 1) SPI 通信管脚 SDIO, SCLK, CS, I/O_RESET, IO_UPDATE。
- 2) 输出振幅键控管脚 OSK。
- 3) Profile 管脚 Profile 0, Profile 1, Profile 2。
- 4) 数字斜坡发生器模式的控制管脚 DRCTL, DRHOLD, DROVER。

FPGA 通过 SPI 总线协议对 AD9910 寄存器进行配置。通过配置寄存器可以选择 AD9910 工作在单频信号模式或数字斜坡发生器模式。在单频信号模式下,通过控制 OSK 管脚的高低电平可实现 2ASK 调制。通过 FPGA 控制 Profile 0~Profile 2 管脚,可在配置好的 8 个 Profile 寄存器中进行切换,改变 AD9910 的输出频率,如实现 2FSK 调制^[8]。

2 实验结果与讨论

2.1 驱动电路输出性能测试

首先测试驱动电路单频信号的输出,配置 AD9910 寄存器,使 AD9910 输出 40 MHz 和 100 MHz 的单频信号,经过第一级 LT5514 放大后测量输出信号。设置频谱仪的扫频带宽(Span)为 100 Hz,分辨率带宽(RBW)为 1 Hz,得到的输出频谱如图 2 所示。

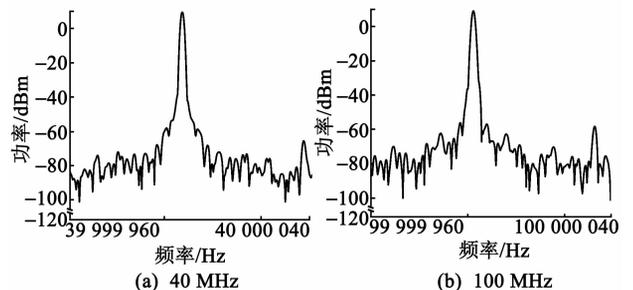


图 2 40 MHz 和 100 MHz 输出信号频谱

改变 AD9910 的寄存器配置,使 AD9910 在 100 MHz 和 200 MHz 频点进行正弦波输出频率切换。经过 LT5514 放大后,使用示波器捕捉频率切换的波形,实验结果如图 3(a)所示。

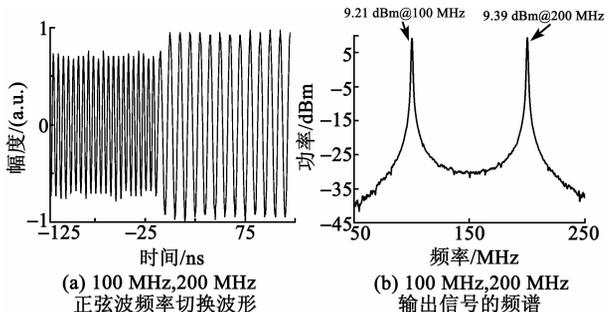


图 3 100 MHz 和 200 MHz 下的正弦波频率切换波形和输出信号的频谱

更改 AD9910 工作模式为数字斜坡发生器模式,对输出信号进行三级级联的功率放大。调整第一级 LT5514 的增益为 18 dB,使输出信号功率约为 24.25 dBm。测试驱动电路在 40~150 MHz 的扫频输出功率曲线,得到的实验结果如图 4 所示。由图 4 插图可知,经过三级放大后,输出信号功率波动小于 1.5 dB。调整 LT5514 的增益为 22.5 dB,使经过三级级联的功率放大后,输出信号功率为 29 dBm。

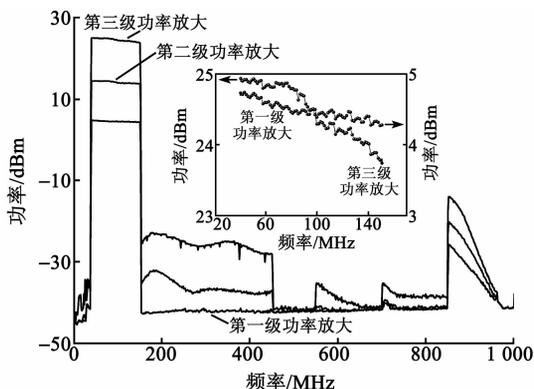


图 4 驱动电路在 40~150 MHz 的输出功率曲线

图 5 是测试 AD9910 从 30~200 MHz 进行扫频,步长为 5 MHz,得到的输出信号功率曲线。由图可见,驱动电路在 30~200 MHz 的输出功率波动小于 1 dB。由于 HELA-10D 发热量较大,工作一段时间后,电路板整体温度升高会导致输出信号的功率下降,需要对电路板进行散热处理。LT5514 在本驱动电路中可调谐的最小增益为 13.5 dB,最大增益为 24 dB,因此,输出信号经过三级放大的功率在 20~30 dBm 内可调谐。

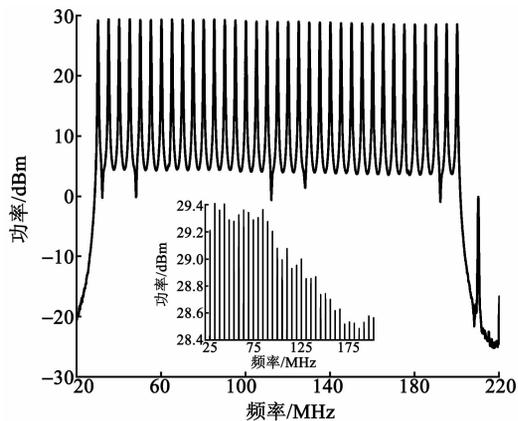


图 5 驱动电路在 30~200 MHz 的输出功率曲线

2.2 驱动声光调制器实验

以 1 572 nm 波长的 DFB 激光二极管作为光源,测试驱动电路用于驱动 2 款声光调制器的效果。

第一款声光调制器选用中电二十六所的保偏光纤声光调制器,工作频率为 100 MHz(±1 MHz),射频驱动信号的典型功率为 1 W(30 dBm)。

第二款声光调制器选用古奇(Gooch & Housego)公司的光纤声光调制器,工作频率为 40 MHz(±1 MHz),射频驱动信号功率的典型值为 0.2 W(23.01 dBm),最大功率值为 0.4 W(26.02 dBm)。

实验测试框图如图 6 所示。DFB 激光器产生的连续激光通过 AOM 后,使用光纤衰减器将激光衰减到合适强度后连接到光电探测器,使用示波器捕捉对应的波形。测试结果如图 7 所示,图 7(a)是声光调制器驱动电路的输出波形,其中正弦波频率为 100 MHz,对 OSK 管脚施加 5 kHz 方波得到的调制包络波形。图 7(b)是经过工作频率为 100 MHz 的 AOM 后光电探测器探测得到的波形。图 7(c)是用 15 kHz 正弦波对 DFB 激光二极管进行幅度调制后,光电探测器探测到的波形。图 7(d)是将使用 15 kHz 正弦波幅度调制的激光通过工作频率为 40 MHz 的 AOM 后光电探测器探测得到的波形,其中驱动电路的包络为 500 Hz 方波。实验测试结果表明,该驱动电路可以通过配置 AD9910 不同参数和改变第一级放大器的增益,实现驱动 40 MHz 和 100 MHz 工作频率的 2 款光纤声光调制器。该驱动电路具有较高的灵活性,通过选择不同的工作模式可以用在其他的应用场景。

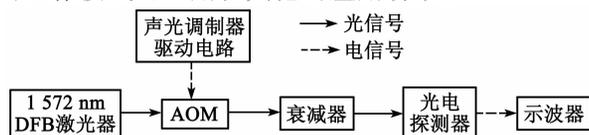


图 6 实验测试框图

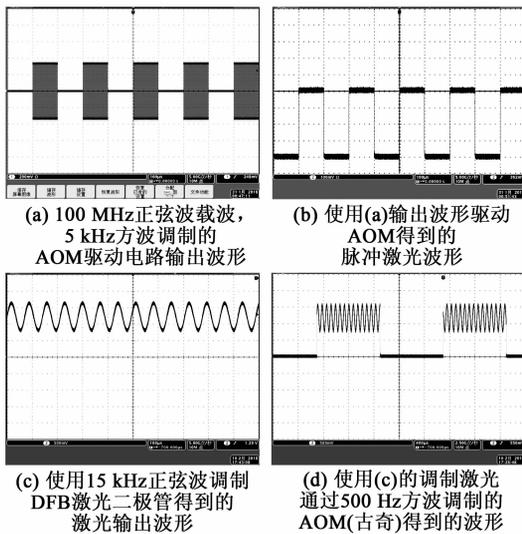


图 7 实验测试结果

3 结束语

本文介绍了一种声光调制器驱动电路,以 FPGA 和 DDS 芯片 AD9910 为核心器件,通过功率放大器芯片 LT5514, HMC680LP4 和 HELA-10D 将信号进行三级功率放大后输出,三级级联的放大器工作范围为 30 ~ 300 MHz。通过 FPGA 配置 AD9910 的相关寄存器,可以实现不同的工作模式:单频输出、调频输出和扫频输出。通过控制第一级功率放大器的增益管脚,可以调谐输出信号的功率在 20 ~ 30 dBm 内变化。该驱动电路具有较高的灵活性,可用于驱动不同工作频率和驱动功率的声光调制器,具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] LI Na, WU Yupeng, MIN Hao, et al. Note: A versatile

radio-frequency source for cold atom experiments[J]. Rev Sci Instrum, 2016, 87: 086109.

[2] 吴军,洪光烈,张鸿翼,等. 一种大测距动态范围高重频相干测距测速激光雷达(II):信号调制[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(3): 321-332.

WU Jun, HONG Guanglie, ZHANG Hongyi, et al. A coherent range and range-rate detection Ladar with large ranging dynamic range and high-repetition-rate (II): signal modulation[J]. J Infrared Millim Waves, 2015, 34(3): 321-332.

[3] YOU Feng, CHEN Tao, KONG Wei, et al. Frequency doubling of a pulsed wavelength-agile erbium-doped fiber MOPA for oxygen A-band spectroscopy[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-8.

[4] ZHANG Jing, WEI Dong, XIE Changde, et al. Characteristics of absorption and dispersion for rubidium D2 lines with the modulation transfer spectrum[J]. Opt Express, 2003, 11(11): 1338-1344.

[5] PRUTTIVARASIN T, KATORI H. Compact field programmable gate array-based pulse-sequencer and radio-frequency generator for experiments with trapped atoms[J]. Rev Sci Instrum, 2015, 86(11): 115106.

[6] Analog Devices Inc. AD9910 datasheet Rev E[EB/OL]. [2018-02-15]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9910.pdf>

[7] Mini-Circuits Inc. HELA-10D Datasheet Rev L[EB/OL]. [2018-02-15]. <https://www.minicircuits.com/pdfs/HELA-10+.pdf>

[8] 廖飞,龚恒翔,梁霄,等. 线阵相机模拟前端驱动处理电路设计及应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016(6): 148-153.

LIAO Fei, GONG Hengxiang, LIANG Xiao, et al. Analogy front end driving and signal processing circuit design for linear camera and application[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2016(6): 148-153.

(上接第 29 页)

[4] ERHART P, TRÄSKELIN P, ALBE K. Formation and switching of defect dipoles in acceptor doped lead titanate: A kinetic model based on first-principles calculations[J]. Physical Review B Condensed Matter, 2013, 88(2): 3605-3611.

[5] FRAYGOLA B M, CHANDRASEKANAR A, BAHATI D, et al. Piezoelectric softening by Nb substitution in (Ba, Pb) ZrO₃ ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100: 1-11.

[6] KARAPUZHA A S, JAMES N K, KHANBAREH H, et al. Structure, dielectric and piezoelectric properties of donor doped PZT ceramics across the phase diagram[J]. Ferroelectrics, 2016, 504(1): 160-171.

[7] FRAYGOLA B, SALAZAR U, BIANCOLI A, et al. Effects of Nb doping in lead barium zirconate ceramics [C]//Prague, Czech Republic; Applications of Ferro-

electric and Workshop on the Piezoresponse Force Microscopy, IEEE, 2014: 89-92.

[8] SUN E, CAO W. Relaxor-based ferroelectric single crystals: Growth, domain engineering, characterization and applications[J]. Prog Mater Sci, 2014, 65: 124-210.

[9] ZUO R, LIU Y, SU S, et al. Phase transformation behavior and electrical properties of Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})O₃-Bi(Zn_{0.5}Ti_{0.5})O₃ solid solution ceramics[J]. J Am Ceram Soc, 2011, 94: 4340-4344.

[10] ZHANG M H, WANG K, DU Y J, et al. High and temperature-insensitive piezoelectric strain in alkali niobate lead-free perovskite[J]. J Am Chem Soc, 2017, 139(10): 3889-3895.

[11] LIU X, CHEN Z, FANG B, et al. Enhancing piezoelectric properties of BCZT ceramics by Sr and Sn co-doping[J]. J Alloys Compd, 2015, 640: 128-133.