

基于 FPGA 电控的二维快速光束扫描雷达系统

邱高峰^{*}, 吴侃^{**}, 曹先益, 蔡明璐, 陈建平

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 提出一种基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)电控实现快速扫描的透镜辅助的二维光束扫描和测距装置。利用二叉树结构的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)光开关,结合 FPGA 逐级切换和脉冲宽度调制(PWM)技术,实现了具有 16 个自由切换扫描角度、19.5 m 测距距离和 2 cm 测距误差的激光雷达原理系统。这项工作展现了 FPGA 电控在透镜辅助光束扫描技术中的高效控制方式,选取的电控方案对 N 路光束发射(即 N 个光束扫描角度)只需要 $\log N$ 路 PWM 波形输出。相比于典型的光相控阵(OPA)技术中 N 路光束发射需要 N 个数模转换器(DAC)的电控方案,即控制复杂度为 $O(N)$,本方案极大地降低了控制复杂度($O(\log N)$)和系统成本,因此有望对基于集成光束扫描技术的激光雷达系统的真正应用提供参考。

关键词 激光雷达; 现场可编程逻辑门阵列; 透镜; 光开关; 二维扫描

中图分类号 P215

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1101001

Two-Dimensional Fast Beam Scanning Lidar System Based on FPGA Control

Qiu Gaofeng^{*}, Wu Kan^{**}, Cao Xianyi, Cai Minglu, Chen Jianping

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract This paper proposed a lens assisted two-dimensional beam scanning and ranging device based on the control of field programmable gate array (FPGA). A lidar system with 16 scanning angles, 19.5 m ranging distance, and 2 cm ranging error was achieved through the Mach-Zehnder interferometer (MZI) optical switches with a binary tree structure, FPGA control, and pulse width modulation (PWM). Our work shows the potential of efficient FPGA control in the lens assisted beam scanning technology. The control scheme selected in this paper only needs $\log N$ channels of PWM waveforms for N optical transmitting ports (N beam scanning angles). Compared with the typical optical phased array (OPA) technology that needs N channels of digital-to-analog converter (DAC) for N optical transmitting ports (the control complexity is $O(N)$), this scheme greatly reduces the control complexity ($O(\log N)$) and system cost. Therefore, it is expected to pave the way towards the application of lidar systems based on integrated beam scanning technology.

Key words lidar; field programmable gate array; lens; optical switch; two-dimensional scanning

OCIS codes 010.3640; 040.1240; 050.5080

1 引言

近年来,光探测与测距技术在传感^[1-3]、自动驾驶^[4]、航空航天^[5-6]等诸多领域引起了广泛关注,其

中,对激光光束进行转向的装置是光束探测的核心组成部分。目前常见的光束转向方案主要有机械式偏转^[7-8]、声光偏转^[9-11]、液晶偏转^[12-14]和集成光相控阵(OPA)^[15-17]等技术路线。机械式扫描主要借

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-17; 录用日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61922056, 61875122, 61535006)

^{*} E-mail: qgfbiwang@sjtu.edu.cn; ^{**} E-mail: kanwu@sjtu.edu.cn

助机械驱动和旋转平台完成光束的偏转,所以机械式扫描装置一般质量和体积较大,会存在磨损、振动等问题,并且由于其扫描速度受机械驱动的限制,难以实现高速且精准的光束扫描。声光式光束扫描基于声光效应实现。声光式偏转主要基于超声波与光的相互作用。通过在超声媒介(如透明玻璃)中产生超声波,引起周期性的折射率变化,从而形成相位型衍射栅。然后让光束入射到超声媒介中,产生衍射,从而完成光束偏转。通过改变超声波的强度和频率完成对光束偏转的控制。声光式扫描相比机械扫描,具有体积小、速度快等优势,但是其衍射效率低,偏转角度小,扫描控制也缺乏灵活性。液晶相控阵技术通常是给晶体施加电压,通过液晶分子的电控双折射效应,使得通过晶体的光束产生与外加电压成正比的相位延迟,由于过程中需要同时控制多路电压,其控制复杂性较高。集成光相控阵是近年来兴起的一种技术,利用片上集成光学技术将光束进行多路发射,通过控制每路光的相位来实现光束扫描,但这种方案需要同时精确控制每一路光的相位,目前大多采用一个数模转换器(DAC)控制一路,功耗和控制复杂度都较高。在 2018—2019 年,本课题组和国际上多个课题组前后提出了基于透镜的光束扫描新方案^[18-19]。这种方案利用片上选通结合透镜的思路,大幅降低了功耗和控制复杂度,因此具有很好的实用前景。本课题组利用这种方案,首次验证了全固态激光雷达原理系统,但该系统,对芯片的控制仍然较为繁琐,存在进一步优化空间。

在上述工作的基础上,本文提出基于 FPGA 电控的透镜辅助^[19]光束扫描装置及激光雷达原理系统。利用二叉树结构的 MZI 光开关,结合 FPGA 电控产生的脉冲宽度调制(PWM)与热光效应,最后经由透镜发射完成光束扫描。PWM 技术的选用使得电控系统不需要高成本的数模转换器也可以获得电压的连续调节,更利于电控系统的大规模集成,而结合透镜辅助光束扫描的特点,极大地降低了电路控制复杂度。该研究为基于集成光束扫描技术的激光雷达系统提供了参考。

2 原理与系统设计

2.1 光学系统

本研究提出的基于透镜辅助光束扫描技术的固态激光雷达系统,工作在 1550 nm 波段,采用飞行时间(TOF)^[20]法,且收发光路同轴,即光信号的接收和发射共享相同光路。而 TOF 模式可以直接检

测返回信号。扫描系统有 16 个扫描角,测距距离为 19.5 m,测距误差为 2 cm。

光束扫描原理如图 1 所示。发射端光学天线阵列与透镜的前焦平面重合。每次只有一个光学天线(发射端口)发射光束。光束经过透镜准直并转向。在光束经过透镜之前,不同发射端口发出的各个光束互相平行。所有光束通过透镜后在焦平面上相交于一点 S。显然,发射端口在透镜焦平面上的位置决定了该端口发射的光束经透镜准直后与光轴间的角度。换言之,如果将 S 点视为一个虚拟光源,通过选择不同的发射端口出光,就可以使 S 点光源指向不同的远场光束方向。由此,最大光束转向角 θ 可表示为^[19]

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{L}{2f}\right), \quad (1)$$

其中, L 是发射器阵列的长度, f 是透镜的焦距。光束发散角可表示为^[19]

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{w}{f}\right), \quad (2)$$

其中, w 是来自发射器的光束大小。另外,光束角度的控制步长 θ' 可近似表示为^[21]

$$\theta' = \arctan\left(\frac{p}{f}\right), \quad (3)$$

其中, p 是两个相邻发射器之间的距离。以上 3 个公式表明,通过合理设计发射极阵列和透镜的参数,可以获得不同光束发散角、光束转向角和光束角度控制步长。

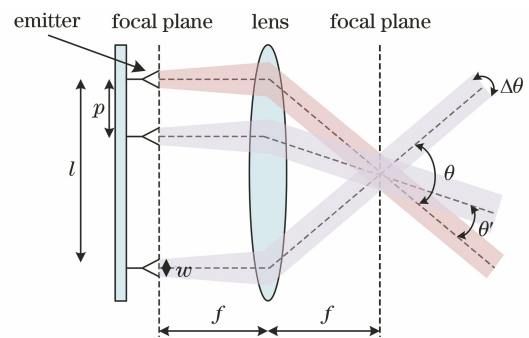


图 1 透镜辅助光束扫描原理图

Fig. 1 Principle of lens assisted beam scanning

本实验中的透镜实际上是由 3 个镜片构成的透镜组,其示意图如图 2(a)所示。通过合理设计透镜组参数,可以在一定的离轴范围内保持较好的一致性。图 2(b)给出了不同离轴距离的光束经过透镜组后的偏转角度(Zemax 仿真)。可以看出,离轴距离小于 5 mm 时,偏转角与离轴距离基本呈线性关系,而本系统发射光束的最大离轴距离只有 0.53 mm,所以(1)~(3)式能够精确地描述光束特性。

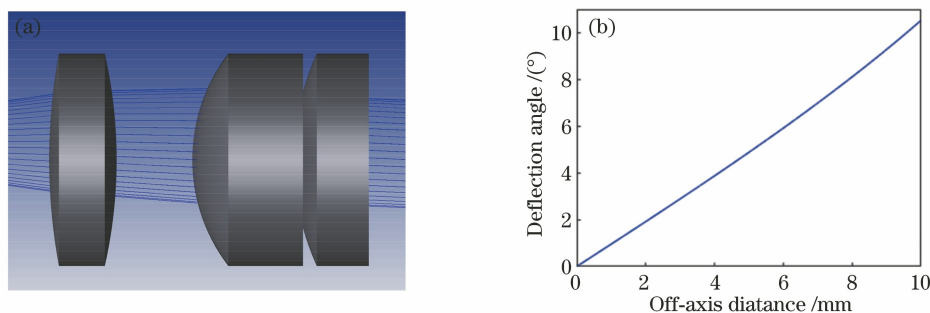


图 2 透镜组和光束偏转。(a)透镜组示意图;(b)不同离轴距离的光束偏转

Fig. 2 Lens group and beam deflection. (a) Schematic of lens group; (b) beam deflection at different off-axis distances

透镜辅助光束扫描装置的结构如图 3(a)所示。该实验装置由集成的 SiO₂ 1×16 开关芯片、4×4 光纤阵列和透镜组成。采用标准的平面光波导回路(PLC)技术制作了 SiO₂ 的 1×16 开关芯片^[22]。它由 4 级级联的 1×2 马赫-曾德尔干涉仪(MZI)开关和热光调谐移相器组成。测量可得单个 MZI 开关的消光比大于 20 dB,相移随不同电压

的变化如图 3(b)所示。芯片中开关的上升时间为 1.178 ms,如图 3(c)所示。移相器的平均电阻为 80 Ω,移相器的相位从 0 变到 π 时,对应的电压变化约为 4 V。芯片封装了单模光纤输入和输出端口。经过测量,该光子芯片的总插入损耗为 3 dB,包括 1 dB 光纤耦合损耗和 2 dB 级联 1×2 开关和波导的损耗。

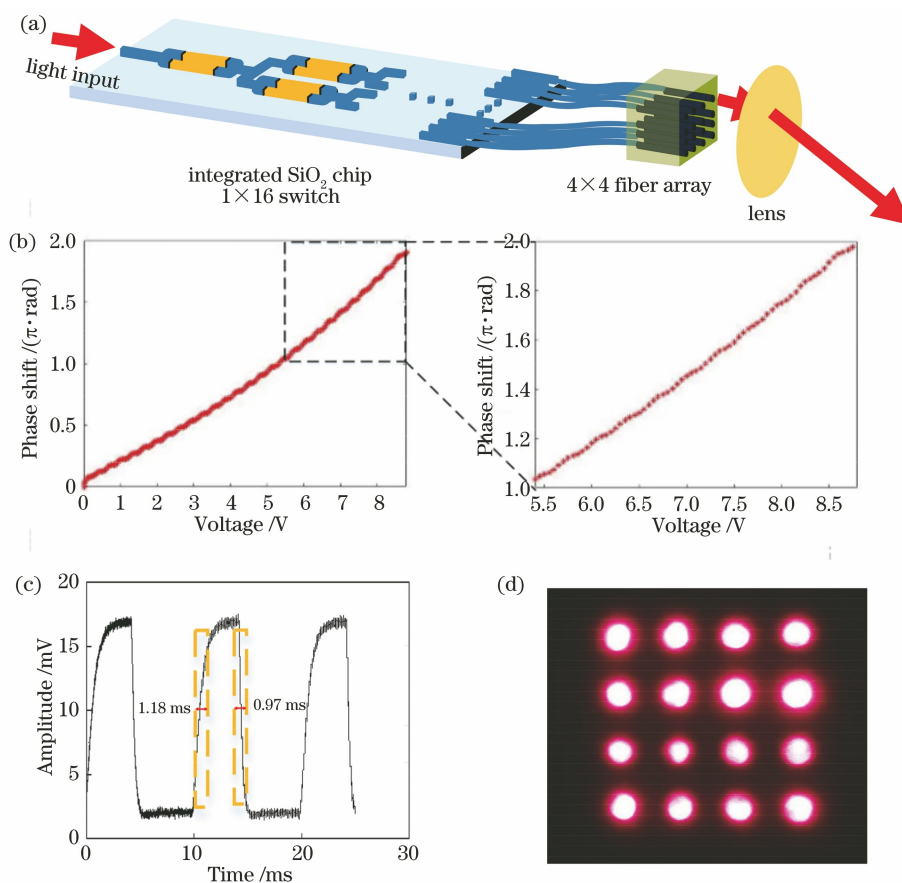


图 3 光束扫描装置结构及测量。(a)透镜辅助光束扫描装置结构图;(b)测量相移与不同电压的关系;(c)光开关切换波形;(d)红光指示的输出光束阵列

Fig. 3 Setup and measurement of the beam scanning. (a) Setup of the lens assisted beam scanning; (b) measured phase shift versus different electrical voltage; (c) measured switching waveform; (d) output red spots for illustration purposes

该芯片有 1 个光纤输入端口和 16 个水平排列的输出端口,16 个输出端口一一与 4×4 光纤阵列对接,从而将一维扫描转化为二维扫描。接着,光纤阵列后放置一个焦距为 40 mm 的透镜,它的焦平面与发射端平面(即光纤阵列表面)重叠,从而完成了光束偏转。为了方便演示,在入射端口施加 630 nm 的红光,红光经过二维阵列后我们可清晰地看到红色输出光斑,如图 2(d) 所示。光纤阵列的间距为 0.25 mm,对应的光束转向角度的步进为 0.35° ,总转向角为 $1.05^\circ \times 1.05^\circ$ 。若需要获得更大的转向角,只需要增大发射阵列规模即可。

整个激光雷达光路系统的结构如图 4 所示。脉冲激光器产生的光脉冲的波段为 1550 nm,峰值功率为 2 kW,脉宽为 0.5 ns,重复频率为 20 kHz。为了实现脉冲同步,该脉冲由一个参考信号触发。激光输出连接到一个消光比大于 60 dB 的光纤环形器,这是为了抑制从激光器到探测器的直接串扰。

然后通过输入光纤将其耦合到开关芯片上。通过 FPGA 电控的方式,引导输入光束从 16 个不同的出射端口发射,再经过 4×4 的二维阵列发射到自由空间。发射到自由空间的光束打到被测物(A4 纸)上后,被散射回来的回波光信号通过发射光路原路返回,进入光纤环形器。从环形器的 3 端口经过声光调制器(AOM)^[19]后进入带放大的光电探测器。实验中发现,光纤阵列发射端的光纤端面由于未镀增透膜,其与空气的界面产生了一个约 4% 的反射信号,其峰值功率很大,会导致光电探测器(PD)饱和甚至产生损耗。所以,在探测器前加入 AOM,通过用一个同步的关断信号,来抑制该反射信号。由于实验中采用商用 PD,若通过通断电源来控制 PD 工作,只能获得毫米级的开关速度,无法满足要求(<100 ns),故实验中采用 AOM(10 ns 边沿)来抑制 4% 的端面反射信号。后续可通过优化 PD 驱动电路来直接对 PD 的工作状态实现高速电控,省去 AOM。

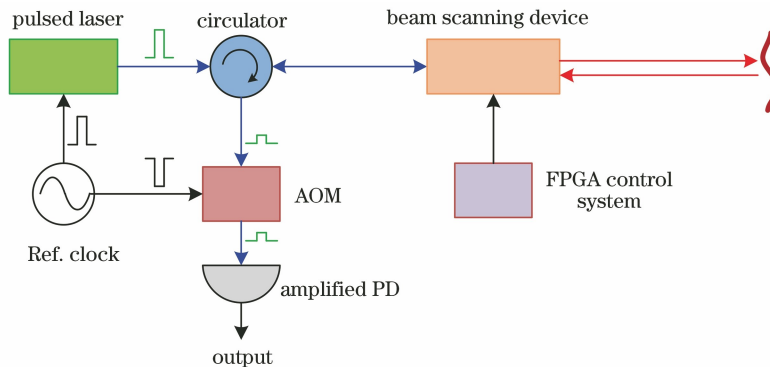


图 4 激光雷达系统结构图

Fig. 4 Setup of the lidar system

图 5 为光电探测器的典型输出波形,从图中可以清楚地看到 AOM 的关断形成了宽度约为 70 ns 的抑制区以及 4% 的反射信号。该反射信号也作为回波信号的参考信号,用于计算回波的飞行时间。

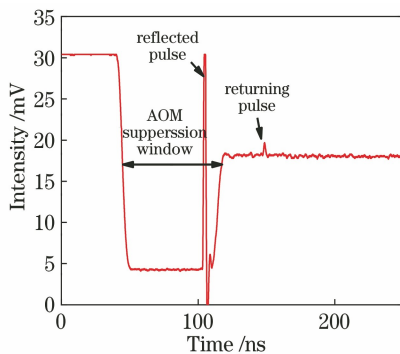


图 5 光电探测器典型输出波形

Fig. 5 Typical output waveform of the photodetector

2.2 电路控制系统

图 6 是基于 FPGA 的二维光束扫描装置电控系统示意图。该系统主要包括以下功能模块: FPGA 芯片(Altera Cyclone IV 系列芯片)、电阻-电容(RC)三阶低通滤波器、放大电路模块和模拟开关。FPGA 芯片经过 Verilog 编程,基于内部时钟,产生多个占空比可调的 PWM 方波信号。该方波信号是数字信号,其理论最大电压是 3.3 V。

接着,每一路 PWM 信号都进入一个 3 阶 RC 滤波电路。该电路的功能是将 PWM 转换成直流信号,直流信号的电压值与 PWM 的占空比呈线性关系。因此,通过调节 PWM 信号的占空比,就能改变 RC 滤波后的直流电压值。这个直流电压经放大后用于控制光开关芯片中的热光移相器,实现了对光开关的操控。图 7 给出了不同 PWM 占空比时的输

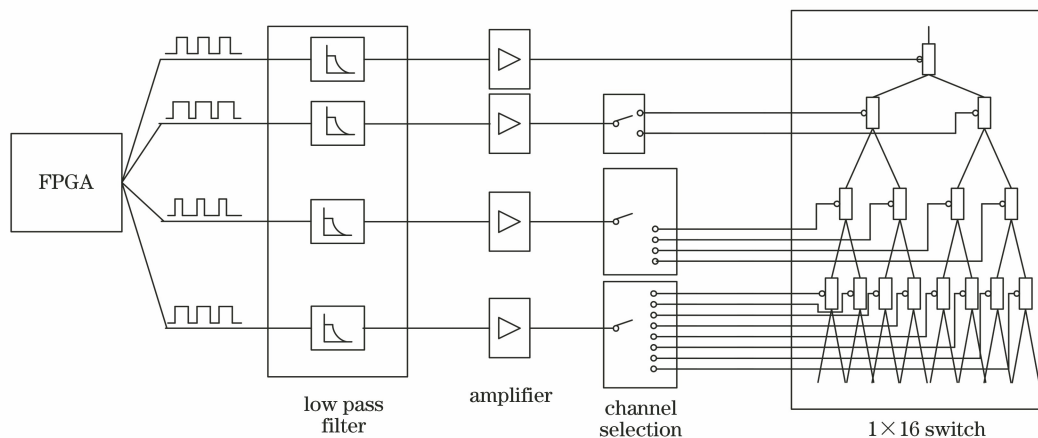


图 6 电控系统结构示意图

Fig. 6 Setup of the electronic control system

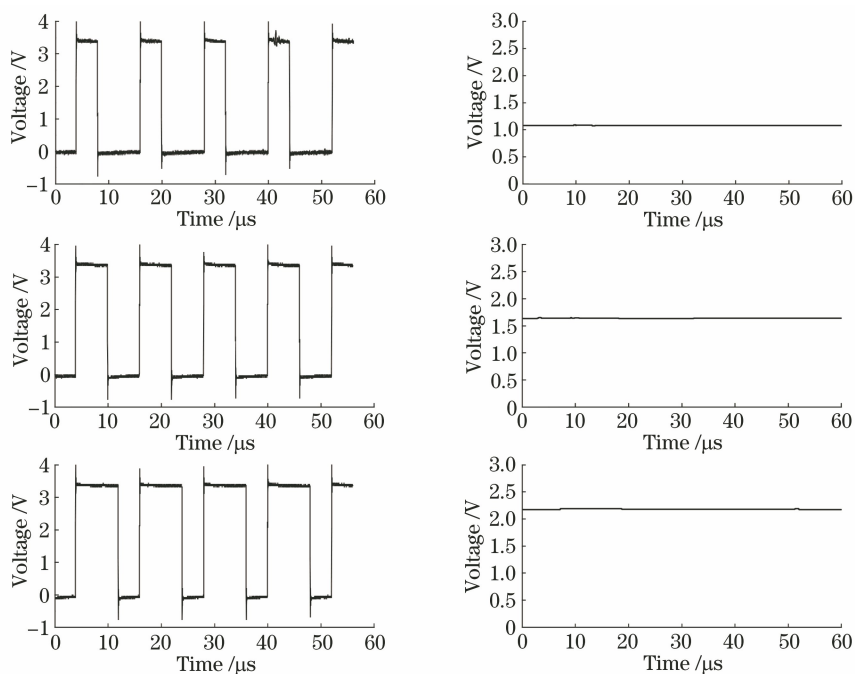


图 7 PWM 波及其滤波电压

Fig. 7 Waveform of PWM and filter voltage

出波形,以及经过 RC 低通滤波后的直流信号。

最后,每一路 PWM 信号经滤波和放大后产生直流电压,用于控制芯片中的每一级光开关。如图 6 所示,对于 16 路输出光开关,由于采用了级联二叉树结构,共有四级。第一级有一个 1×2 光开关,第二级有 2 个 1×2 光开关,第三级有 4 个 1×2 光开关,第四级有 8 个 1×2 光开关。任意时刻,每一级都只有一个光开关工作,因此只需要 4 路控制电压结合选通开关,即可实现对 4 级光开关的控制。因此,第一路的 PWM 信号滤波后,经过放大器,直接驱动第一级中的光开关。放大器的目的—是提供电流驱动能力,二是调整直流电压。因为 PWM 信

号滤波后的直流电压范围约为 $0 \sim 3$ V,而光开关驱动最大需要 10 V,故放大器提供约 3.3 倍的电压增益。类似地,第二路 PWM 信号滤波后,经放大器,进入一个一选二模拟开关,模拟开关的两路输出分别驱动第二级中的两个光开关。同理,第三路、第四路 PWM 信号滤波并放大后,分别经过一个一选四、一选八模拟开关,模拟开关的输出分别驱动第三级和第四级的 4 个和 8 个光开关。根据上述分析,不难看出,对 N 路输出的光开关,在电控方面,共需要 $\log N$ 路 PWM 输出、 $\log N$ 路 RC 低通滤波器、 $\log N$ 路模拟放大器和 $\log N$ 路模拟开关(最大的模拟开关通道是 1 选 $N/2$),总的电控功耗复杂度

是 $O(\log N)$ 。

将已报道的具有 N 路输出的光相控阵芯片^[17]与本方案进行比较,结果如表 1 所示。

对光相控阵芯片,需要 N 路 DAC、 N 路放大器,总的电控功耗复杂度是 $O(N)$ ^[17]。当芯片规模很大

时,如 $N=8192$,光相控阵芯片的功耗复杂度为本方案的 $8192/\log 8192=630$ 倍。因此,透镜辅助光束扫描技术结合本文中提出的 FPGA 控制方案,可以极大地降低电控系统的功耗,从而为集成光束扫描及全固态激光雷达走向实际应用提供了重要的参考依据。

表 1 光相控阵与本方案(透镜辅助光束扫描)的光、电复杂度的比较

Table 1 Comparison of optical and electrical complexity between OPA and our system (lens assisted beam scanning)

Scheme	Number of optical phase shifters working at the same time	Electric analog control mode	Number of analog control channels	Power consumption complexity
OPA ^[16]	N	DAC	N	$O(N)$
Ours	$\log N$	PWM	$\log N$	$O(\log N)$

图 8 所示为电控系统电压切换的上升时间,约为 900 ns。如前所述,MZI 光开关的上升时间约为 1.18 ms,所以本电控系统完全满足光开关的响应时间要求。且若不受限于 MZI 光开关的响应时间,本电控系统理论上可以完成精度更高、响应时间在微秒级别的光开关控制。

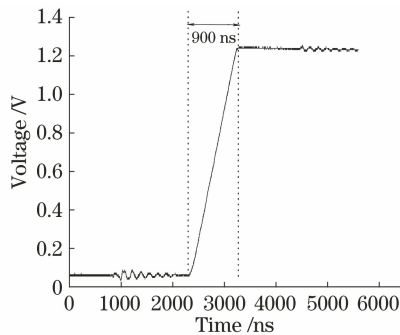


图 8 电压切换的上升时间
Fig. 8 Rise time of voltage switching

3 测试验证

本研究在上述透镜辅助光束扫描和 FPGA 电控模块研制的基础上,实现了全固态激光雷达系统,并对其功能进行了验证。如图 9 所示,研制的激光雷达可以扫描 4×4 个不同远场角度(由 4×4 光纤阵列决定)。实验中,选取阵列上不连续的 4 个角度,4 个目标(A4 纸)被分别对应放置在 4 个角度上,并将其距离分别设置为 4.8 m、6.6 m、5.7 m 和 7.5 m。光束转向角范围为 -0.53° 至 0.53° 。如前所述,光束偏转是通过控制片上光开关并引导光从 16 个输出端口中的一个端口来输出,结合透镜实现光束的准直和偏转。 1×16 开关由 4 级二叉树结构的 1×2 MZI 开关实现。仅需使用 FPGA 输出的 4 路电压信号,结合模拟电开关,就能实现对光学芯片的操控。实际操控中,由于工艺误差,每一个 $1 \times$

2 MZI 开关所需的切换电压都有所不同,因此需要在电模拟开关切换的同时,改变 PWM 波的占空比,最终改变施加到对应光开关上的控制电压。

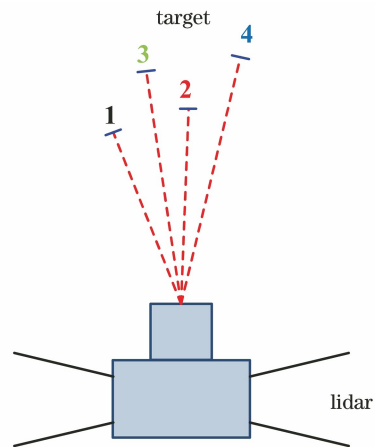


图 9 四目标扫描示意图

Fig. 9 Setup of the four targets scanning experiment

以 4 个不同角度,前后相互距离为 0.9 m 的目标物为例,利用 FPGA 电控,可以使出射光在 4 个不连续目标物之间快速切换。图 10 给出了 4 个不同目标处测得的典型回波信号,可以看出,回波信号

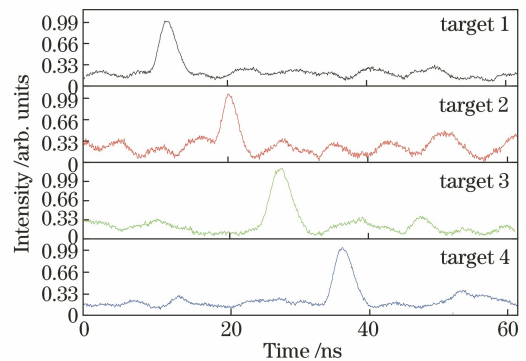


图 10 4 个具有不同角度和距离的目标物的返回脉冲
Fig. 10 Returning pulses at four targets with different angles and distances

与被测距离之间具有很好的线性关系。此外,由于工艺误差,光开关芯片中不同通道的插入损耗存在差异,因此回波脉冲的信噪比略有不同。

在 TOF 法中,时间误差 Δt 与信噪比 R_{SN} 和信号上升时间 t 有以下关系^[23]:

$$\Delta t = \frac{t}{R_{SN}}, \quad (4)$$

相应的测距误差为

$$\Delta R = \left(\frac{\Delta t}{2}\right)c, \quad (5)$$

式中: c 为真空中的光速。本实验中,激光产生的脉冲宽度为 0.5 ns,信号上升时间约为 0.25 ns。实验测得的平均信噪比为 1.9。因此,根据(4)式和(5)式,可得测距误差约为 2 cm。

4 结 论

在 1550 nm 波段实现了基于 FPGA 电控和透镜辅助光束扫描技术的全固态激光雷达原理系统。光束操控的光学部分包括 SiO₂ 开关芯片、用于 1D 到 2D 转换的光纤阵列和透镜,电学部分包括了基于 FPGA 的 PWM 产生、滤波、放大和选通模块。激光雷达在飞行时间模式下工作,实现了 19.5 m 测距,可支持 4×4 个扫描角度,并具有 2 cm 的测距精度。本文提出的 FPGA 电控方案具有 $O(\log N)$ 的电控制复杂度,功耗成本低,相比于复杂度 $O(N)$ 的光相控阵电控,控制流程极大简化,系统成本极大降低。不仅如此,全固态的光束扫描方式可以使得光束能够在随机角度之间快速无惯性切换。这种扫描方式也可以应用于特定点的扫描采样,能以更灵活的方式规避大量无用的扫描点。本研究证实基于 FPGA 电控技术的全固态激光雷达应用的可行性,为高性能全固态激光雷达系统走向实际应用提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] Zhang C L, Cai C, Liu K, et al. Ultracompact refractive index sensor based on integrated optical waveguide trench coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2413001.
张成龙, 蔡宸, 刘克, 等. 基于集成光波导沟槽耦合器的超紧凑折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2413001.
- [2] Wu D C, Liu P, Luo B B, et al. Methods for non-contact road surface meteorological sensing based on dual-wavelength laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2312004.
吴德操, 柳朋, 罗彬彬, 等. 非接触式双波长激光路面气象传感方法研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2312004.
- [3] Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. Lidar remote sensing for ecosystem studies: lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists [J]. *Bio Science*, 2020, 52(1):19-30.
- [4] Preussler S, Schwartau F, Schoebel J, et al. Photonically synchronized large aperture radar for autonomous driving [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1199-1207.
- [5] Mandel O, Sell A, Chwalla M, et al. Architecture and performance analysis of an optical metrology terminal for satellite-to-satellite laser ranging [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 653-661.
- [6] Koch A, Sanjuan J, Gohlke M, et al. Line of sight calibration for the laser ranging interferometer on-board the GRACE follow-on mission: on-ground experimental validation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25892-25908.
- [7] Herranz C E, le Thomas N, Gylfason K B, et al. Low-power optical beam steering by microelectromechanical waveguide gratings [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 855-858.
- [8] Wang Y M, Zhou G Y, Zhang X S, et al. 2D broadband beamsteering with large-scale MEMS optical phased array [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 557-562.
- [9] Yan D P, He A Z, Zhang J J, et al. Application of a stepped acousto-optic deflection technique to interferometric photography [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3): 153-155.
- [10] Woody M S, Capitanio M, Michael O E, et al. Electro-optic deflectors deliver advantages over acousto-optical deflectors in a high resolution, ultra-fast force-clamp optical trap [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11181-11193.
- [11] Bechtold P, Hohenstein R, Schmidt M, et al. Beam shaping and high-speed, cylinder-lens-free beam guiding using acousto-optical deflectors without additional compensation optics [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14627-14635.
- [12] Yan Z Q, Guo T, Wu J, et al. Laser multi-target indication technique based on liquid crystal optical phased array and volume holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0323001.
闫宗群, 国涛, 吴健, 等. 基于液晶相控阵和体全息

- 光栅的激光多目标指示技术[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0323001.
- [13] Wu L, Wang X R, Xiong C D, et al. Polarization-independent two-dimensional beam steering using liquid crystal optical phased arrays [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 101601.
- [14] Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, et al. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. Optics Letters, 1996, 21(9): 689-691.
- [15] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. Nature, 2013, 493 (7431): 195-199.
- [16] Hutchison D N, Sun J, Doylend J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. Optica, 2016, 3(8): 887-890.
- [17] Poulton C V, Byrd M J, Moss B, et al. 8192-element optical phased array with 100° steering range and flip-chip CMOS [C] // 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, Washington DC, United States. Washington, DC: OSA, 2020: JTh4A.3.
- [18] Cook E H, Spector S J, Moebius M G, et al. Polysilicon grating switches for LiDAR [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29 (5): 1008-1013.
- [19] Li C, Cao X Y, Wu K, et al. Lens-based integrated 2D beam-steering device with defocusing approach and broadband pulse operation for Lidar application [J]. Optics Express, 2019, 27(23): 32970-32983.
- [20] Serebryakov S V, Stankevich L A. Visual navigation with a time-of-flight camera [J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(11): 697-700.
- [21] Inoue D, Ichikawa T, Kawasaki A, et al. Demonstration of a new optical scanner using silicon photonics integrated circuit [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2499-2508.
- [22] Asakawa S, Kobayashi M, Nagase R, et al. PLC connector with PLC-fiber physical contact for multichannel receptacle PLC modules for optical circuit board integration [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(3): 821-830.
- [23] Burns H N, Christodoulou C G, Boreman G D, et al. System design of a pulsed laser rangefinder [J]. Optical Engineering, 1991, 30(3): 323-329.