

基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统

周莎莎,吴侃*,曹先益,隆嘉轩,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:针对传统固态激光雷达中光束快速扫描控制响应速度和电压控制精度较低的问题,提出了一种基于透镜辅助光束扫描(LABS)技术和现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的固态激光雷达测距系统。该系统采用收发一体的结构,系统中的 LABS 器件由 1×16 光开关芯片、 4×4 光纤阵列和透镜组成。根据 LABS 方案每一级只有一个光开关处于工作状态的特点,通过选择不同的发射器,将光束照亮到透镜的不同位置来实现光束的转向。光束扫描采用 FPGA 结合外部选通电路进行控制的方式,通过输出电压控制 4 级马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型光开关工作,实现光束的快速切换。实验结果表明,该系统光束转向角度步长为 0.35° ,最大测距范围可达 200 m,9.2 m 内的测距误差约为 1 cm。

关键词:光束扫描;现场可编程逻辑门阵列;激光雷达;光开关

中图分类号:P215;TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)05-0071-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Solid-state lidar ranging system based on LABS technology and FPGA

ZHOU Shasha, WU Kan*, CAO Xianyi, LONG Jiaxuan, CHEN Jianping

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

Abstract: Aiming at the problems of low response speed and voltage control accuracy in traditional solid-state lidar, a solid-state lidar ranging system based on lens-assisted beam scanning (LABS) technology and field programmable logic array (FPGA) is proposed. The system adopts transceiver integrated structure. The LABS device in the system is composed of 1×16 optical switch chip, 4×4 optical fiber array and lens. According to the characteristics of the LABS scheme, only one optical switch is in working state at each level, and the beam is illuminated to different positions of the lens by selecting different emitters. The beam scanning is controlled by FPGA combined with an external elector, and the 4-stage Mach-Zehnder interferometer (MZI) optical switch is controlled by the output voltage to realize the fast switching of the beam. The experimental results show that the beam steering Angle step of the system is 0.35° , the maximum ranging range can reach 200 m, and the ranging error within 9.2 m is about 1 cm.

Key words: beam steering, field programmable gate array, lidar, optical switch

0 引言

激光雷达具有精确测距、高度自动化及较强的抗干扰能力,广泛应用于自动驾驶^[1]、传感器^[2]、机器人、航天^[3-4]、军事、航海等领域。与传统机械激光雷达相比,固态激光雷达因具有结构简单、扫描精度高、可控

性好、速度快等优势而受到广泛研究。传统激光雷达系统采用机械结构实现光束转向,例如旋转激光雷达,光束转向速度、可靠性以及系统整体体积都受到机械装置的限制。非机械光束转向方案使用了多种器件或技术,包括光学相控阵(OPA)^[5-7]、微机电系统(MEMS)^[8]、反射镜^[9]、液晶器件^[10]、透镜辅助光束偏转(LABS)^[11-18]等。其中,基于 OPA 的波束控制结构相对复杂,对模拟控制的精确度要求较高且对旁瓣抑制能力有限;基于 MEMS 反射镜的光束转向存在有限的转向速度和潜在的机械疲劳问题。LABS 技术基于透镜的成像原理,通过在透镜的焦平面上排布发射单元阵列,由集成光开关将输入光引导到某一选定的发射单元,最后发出的光束照射到透镜,被透镜准直并实现

收稿日期:2023-05-24。

作者简介:周莎莎(1997—),女,湖北人,硕士研究生。本科毕业于武汉大学电子信息学院通信工程专业,硕士毕业于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子与通信工程专业,主要研究方向为激光雷达。

* **通信作者:**吴侃(1983—),男,博士,教授,主要研究方向为光电子。



周莎莎,吴侃,曹先益,等: 基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统

角度偏转。对于光束的发射和接收,收发一体的装置可以共用收发系统。文献[19–21]提出了一种由光栅发射器和周围的 U 形光电探测器(PD)组成收发器阵列的方法,这种方法能够实现收发一体的光束操控。然而,这种阵列的实现过程较为复杂,阵列规模相对较小,还存在漏光问题。针对光开关的切换控制,文献[22]曾采用脉冲宽度调制(PWM)方式,但这种方式响应速度慢、电压控制精度较低,很难满足激光雷达快速切换的需求。基于此,本文提出一种基于 LABS 技术和现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的固态激光雷达测距方案,所需的电控功耗复杂度为 $O(\log_2 N)$ 。

1 激光雷达测距系统原理

基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统原理框如图 1 所示。该系统采用同轴飞行时间(TOF)探测法来探测返回的脉冲光信号。脉冲激光器产生波长为 1550 nm 的光脉冲,其峰值功率为 1 W,重复频率为 20 kHz,脉冲宽度为 1 ns。在该功率水平下,尺寸为 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 波导不会遭到损毁。脉冲激光器被用于同步参考时钟触发,输出的脉冲光经过光纤环形器后耦合到开关芯片中。 1×16 的光开关芯片由 FPGA 电路控制,引导脉冲光通过光开关中的某一路,然后经过 4×4 光纤阵列发射到自由空间。在任意时刻,脉冲光只能在一根光纤中传输。因此,可以通过将光束切换到芯片的不同输出端口并指向透镜的不同位置来实现光束的转向。

光脉冲遇到目标物体(平面镜)后,被散射回来的回波信号沿原光路返回,返回光被光纤环形器提取,通过声光调制器(AOM)后被光电探测器(PD)所接收。实验中的光纤环形器具有较高的隔离度(>55 dB),可

以有效地抑制从激光器到探测器的直接串扰。当脉冲光经过未涂覆的光纤阵列端面与空气接触的界面时,会产生 4% 的反射,该反射脉冲的峰值功率很大,可能会损坏 PD。因此,来自相同参考时钟的关断电脉冲被同步地施加到 AOM,以抑制这种反射光脉冲。此外,通过在光纤阵列的端面上涂覆抗反射涂层,可以进一步降低反射脉冲的幅度。这种被抑制的反射脉冲在时域中也可以作为参考信号。

1.1 LABS 器件原理

LABS 器件结构示意图如图 2 所示。该 LABS 器件由集成的 1×16 光开关芯片、 4×4 光纤阵列和透镜组成。透镜辅助的光束偏转原理如图 3 所示。发射单元与透镜的前焦平面重合,每次只选择一个发射器发射光束,这种选择性发射由 1×16 光开关芯片来实现。发射单元发射的光束具有较大发散性,因此需要经过透镜准直后才能应用于远距离传输。发射单元发射出的光

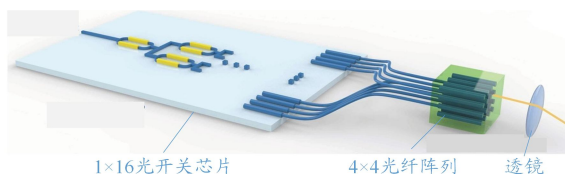


图 2 LABS 器件结构示意图

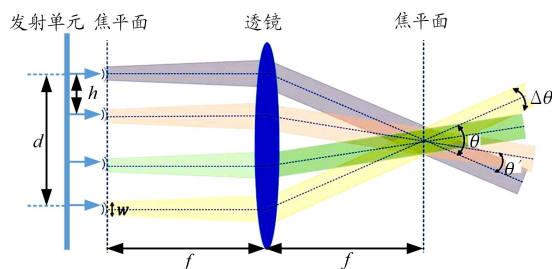


图 3 透镜辅助的光束偏转原理

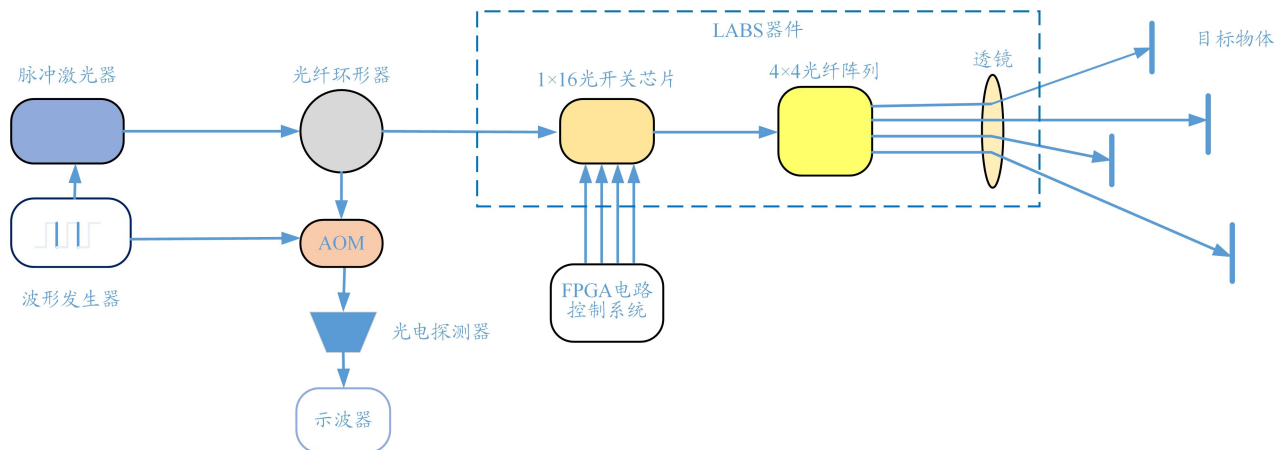


图 1 激光雷达测距系统原理框图

束会根据其照射到透镜的位置来控制传播方向。发射单元中的不同发射器发射的光束彼此平行, 经过透镜后, 所有光束都在透镜后的焦平面上的某点相交(视为虚拟光源)。因此, 通过选择不同的发射器, 可以将光束照射到透镜的不同位置来实现光束的转向。

图 3 中, 最大光束偏转角度 θ [22] 为

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{d}{2f} \right) \quad (1)$$

其中, d 为发射光纤阵列的宽度, f 为透镜焦距。光束发散角 $\Delta \theta$ [22] 为

$$\Delta \theta = \tan^{-1} \left(\frac{w}{f} \right) \quad (2)$$

其中, w 为发射器发出的光束直径。光束转向角度的步长 θ' [22] 近似为

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{h}{f} \right) \quad (3)$$

其中, h 为相邻发射单元的间距。

通过调整发射光纤阵列的布局 and 与透镜的相对位置, 可以获得不同的最大光束偏转角度、光束发散角和光束转向角度步长。当透镜焦距为 40 mm、直径为 20 mm, 且光纤发射阵列的间距相等 (0.25 mm) 时, 根据式 (3) 计算得到的光束转向角度步长 θ' 为 0.35° , 而 4×4 光纤阵列的总光束转向角为 1.05° 。透镜被封装在透镜管中, 以隔离外部的散射光。本文使用 4×4 光纤阵列进行原理性验证, 在实际应用中, 可以通过扩大光纤阵列的规模来增加总的光束转向角, 实现更大范围的扫描。

假设发射光是平面波, 并且假设该光被目标物体均匀地散射回来, 则可以计算出接收功率 P_r [24] 为

$$P_r \propto \frac{A_r P_t}{R^2} \quad (4)$$

其中, A_r 为接收器的面积, P_t 为发射信号的峰值功率, R 为目标距离。目标距离越远, 散射回波信号的功率受到的影响就越大。因此, 通过增大接收孔径的面积可以降低这种影响。

与连续操控光束的 OPA 不同, LABS 器件和其他基于透镜的光束操控是离散的, 每个发射极之间的间隙区域会成为远场扫描的盲区。在目前的发射极阵列设计中, 虽然可以减小每个发射极之间的距离, 但无法完全消除。针对扫描中的盲区问题, 文献[16]提出了一种散焦的方案, 其原理如图 4 所示。发射器平面稍微偏离器件透镜的焦平面。当光从发射器发射时, 由于光束发散, 光束的尺寸在传播过程中会扩大, 到达透镜的焦

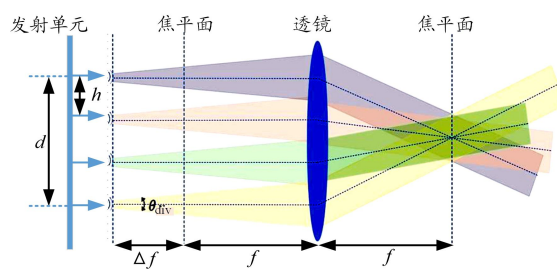


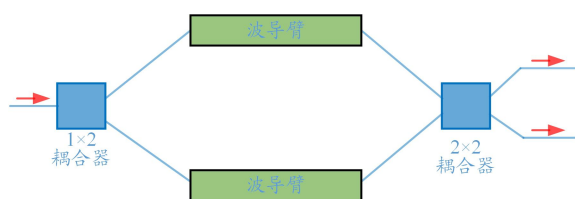
图 4 使用散焦的方案消除盲区

平面时, 光束尺寸会变得足够大, 足以覆盖 2 个相邻光束之间的间隙。通过使用此方法, 可以消除远场中的探测盲区。图中 Δf 为所需偏移距离, $\Delta f = h / \theta_{div}$, θ_{div} 是光束发散角度。

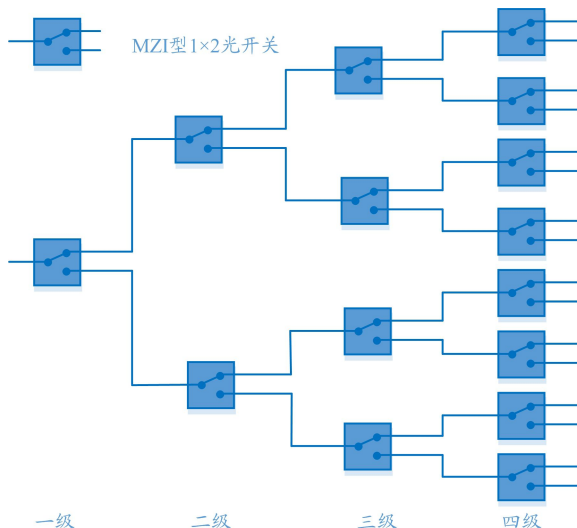
本文作者课题组提出的 1×16 开关芯片由 15 个马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 型 1×2 的光开关以二叉树结构级联组成。每个 MZI 型 1×2 光开关的结构如图 5(a) 所示, 它由 1 个多模干涉 (MMI) 型 1×2 光耦合器、2 个波导臂和 1 个 MMI 型 2×2 光耦合器级联构成。每个 MZI 型 1×2 开关在 1 个波导臂上有 1 个长 $2000 \mu\text{m}$ 、阻值为 80Ω 的钛热单臂加热器作为相位调谐器。相位调谐器原理为: 通过给电极加电压达到局部升温的目的, 而局部温度变化会引起氧化硅折射率的变化, 从而改变光的相位, 通过两波导臂后产生的相位差, 将输入光选择性地从两端口输出, 最终实现开关功能。在理想情况下, 输出通道间的串扰为 0。

1×16 开关芯片是利用标准平面光波导电路 (PLC) 技术制造的, 它采用了 $400 \mu\text{m}$ 厚的硅衬底、 $15 \mu\text{m}$ 厚的纯 SiO_2 作为底部包层, $6 \mu\text{m}$ 厚的掺杂 SiO_2 作为波导, 并使用 $15 \mu\text{m}$ 厚的纯 SiO_2 作为上包层, 其结构示意图如图 5(b) 所示。该开关芯片由 4 级二叉树结构串联的 MZI 型 1×2 开关组成, 共有 16 组光通路。通过将激光脉冲切换到 1×16 开关芯片上的不同通道与光纤阵列上的不同发射器相连, 可以实现不同的光束扫描角度。光开关芯片的所有 16 路输出连接到二维 (2D) 的 4×4 光纤阵列, 从而将一维 (1D) 阵列转换为二维阵列。在实际应用中, 可以用三维 (3D) 波导集成芯片来取代二维光纤阵列, 以扩大探测范围。开关结构实物如图 5(c) 所示, 图中插图为芯片部分的显微镜图像。

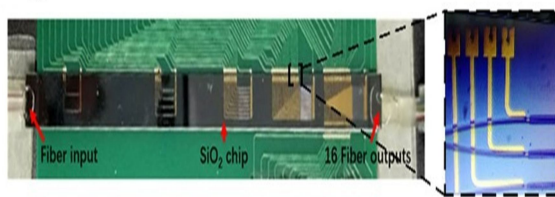
由于 LABS 技术采用二叉树结构级联光开关方式, N 个发射单元需要 $N-1$ 个 MZI 型 1×2 光开关。在任意时刻, 光开关只有一条通路工作, 需要控制的光开



(a) MZI 型 1x2 光开关结构示意图



(b) 4 级二叉树结构级联型光开关芯片



(c) 1x16 开关芯片照片

图 5 开关结构与实物图

关数量为 $\log_2 N$ 个, 所需的功耗复杂度为 $O(\log_2 N)$, 使用预偏置的数字信号对光开关进行控制的难度低。若采用 OPA 技术, 则 N 个发射单元在任意时刻需要同时控制 N 个移相器, 功耗复杂度为 $O(N)$, 且相位调控必须采用模拟信号。由于存在背景噪声, 使用消光比大于 20 dB 的 MZI 型 1×2 光开关可以有效抑制背景噪声, 以保持优良的光束质量。相比之下, 在 OPA 技术中, 光束主瓣相对于背景噪声的抑制比通常只有约 10~12 dB, 且发射单元通常采取稀疏排列, 间距大于光的半波长, 这会产生栅瓣, 导致光束的质量下降。

1.2 基于 FPGA 的光束扫描控制

基于二叉树结构级联光开关的特点, 需要一种能够控制每级开关通断并能够随意切换每一级的控制地址的控制装置。本文通过使用 FPGA 芯片结合外部选通电路 (以下简称为电压扫描控制装置) 来输出控制电压以实现这种功能。该电压扫描控制装置的结构示意图如图 6 所示, 它由 FPGA 芯片、数/模转换器 (DAC) 芯片、4 路放大器和地址选通电路组成。

本文采用 Verilog 语言编程, 控制 FPGA 芯片生成 4 路数字信号, 经过 DAC 芯片和放大器后, 转换为 4 路模拟信号。在任意时刻, 采用二叉树结构级联的光开关阵列只有一条通路处于工作状态。对于 4 级光开关阵列中的每一级, 只需要一路模拟控制信号。通过地址选通电路, 将该信号施加到该级不同的 MZI 光开关上, 以实现对该级光开关通路的控制。光开关阵列每级的 MZI 型 1×2 光开关个数分别为 1、2、4、8, 全受 FPGA 芯片控制。FPGA 芯片生成 4 路控制信号来控制每一级中的光开关, 每个光开关所需的控制信号经过实验标定, 并以查找表的形式, 预先在程序中存储每条光开关通路对应的 4 路控制信号。结合选通电路, 将 4 路模拟控制信号轮流生成并施加到每一级不同的 MZI 型 1×2 光开关的一个臂上, 实现对 4 级光开关阵列的 16 条光通路的轮流导通。

光束扫描系统的扫描精度主要取决于每个 MZI 型 1×2 光开关的灵敏度。实验测得单个 MZI 型 1×2 光开关的消光比约为 26 dB, 其输出光功率随时间的响应曲线如图 7(a) 所示。开关的上升时间约为 1.025 ms, 下降时间约为 0.837 ms。4 级级联后的光开关的响应曲线如图 7(b) 所示。开关的上升时间约为 1.153 ms, 下降时间约为 1.037 ms。4 级级联后的光开关的消光

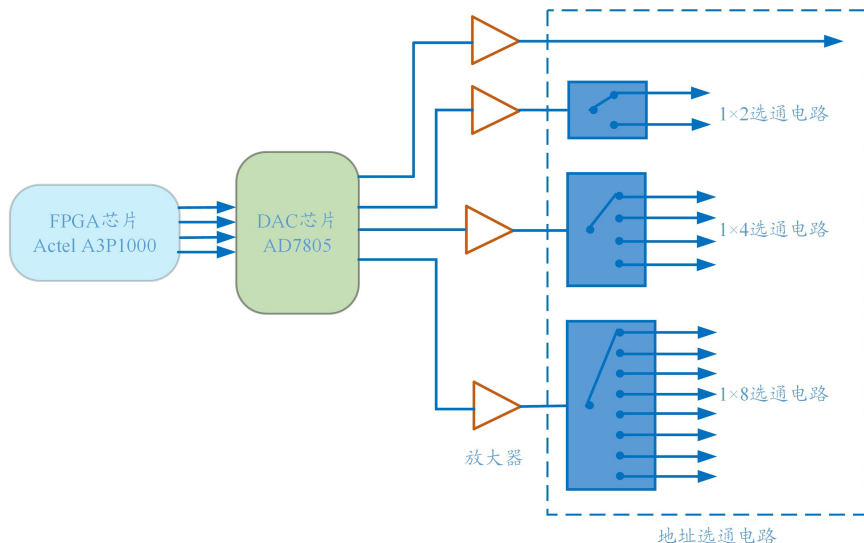
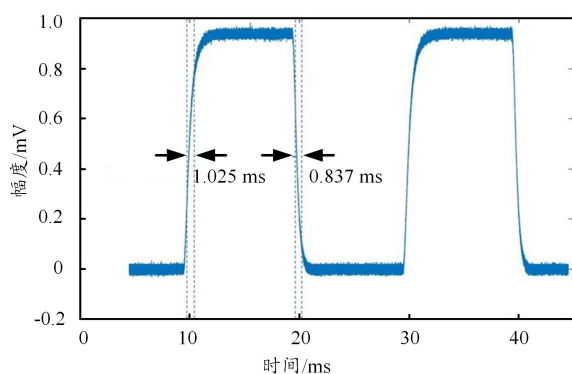
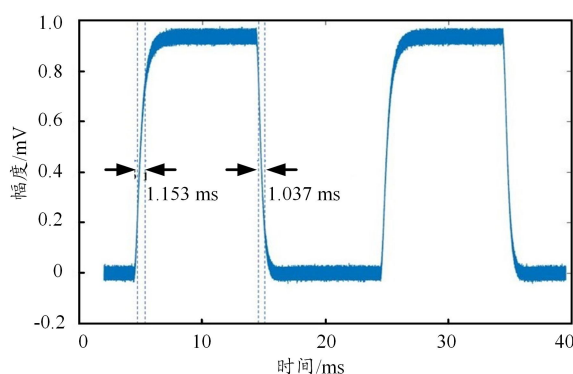


图 6 电压控制扫描装置的结构示意图

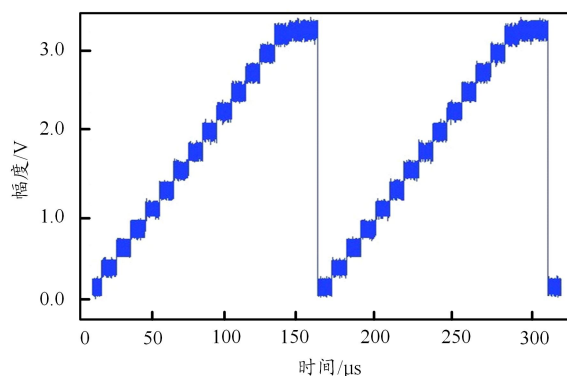


(a) 单个 MZI 开关

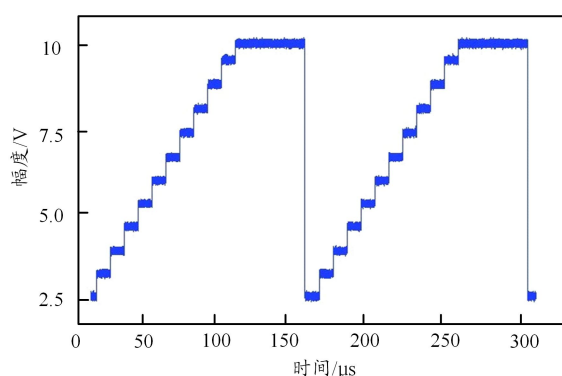


(b) 4 级级联后的 MZI 开关

图 7 光开关响应曲线



(a) 放大前



(b) 放大后

图 8 控制电压变化曲线

比约为 21 dB。若使用氮化硅平台, 可以将光开关芯片的响应速度提高至微秒级别。输出光束总的光损耗包括耦合损耗、每个光开关的插入损耗和传播损耗。

电路扫描控制装置的输出电压切换的上升时间约为 376 ns, 下降时间约为 362 ns, 这两者都小于 MZI 光开关的响应时间。因此, 电路扫描控制装置能够很好地实现多级光开关的高速切换扫描控制。

在光束扫描控制程序中, 通过计数器计数, 以 100kHz 的频率来更新通道序号寄存器的值, 将控制电压施加到 MZI 光开关的 4 级不同臂上, 从而实现 16 路光开关的切换。16 路扫描电压的切换曲线如图 8 所示。可以看出, 电路扫描控制装置中的放大器具有较好的线性度, 放大前的最大电压为 3.3 V, 经过放大后, 电压能够达到光开关驱动的最大电压 8 V。当输入电压超过 10 V 左右时, 放大器会出现放大饱和的情况。

文献[23]曾提出一种使用脉冲宽度调制(PWM)波信号控制光开关的方案, 通过程序控制 FPGA 芯片, 基于其内部时钟产生多个占空比可调的 PWM 方波信号。然后, 这些 PWM 方波信号被一个 3 阶电阻-电容(RC)低通滤波电路转换为直流信号。该直流信号的电

压值与 PWM 波信号的占空比呈线性关系, 经过放大的直流电压可以用来控制 4 级二叉树结构级联光开关。然而, 这种方法可能会由于 RC 滤波电路的非线性导致输出的直流电压产生偏差, 且使用 Verilog 语言生成任意占空比的 PWM 方波信号比较繁琐。因此, 与使用 PWM 波信号电控的方案相比, 本文采用的 FPGA 电路控制方法具有结构简单、精确度高、易于控制的优点。

2 激光雷达测距系统实验

实验采用 TOF 探测法来探测返回的脉冲光信号。通过向目标发射高能量窄脉冲, 并测量发射脉冲与接收脉冲的飞行时间间隔来测量目标物体的位置。TOF 探测法通常采用商用激光雷达, 可以直接探测回波信号, 系统结构紧凑, 且技术成熟。与相干探测法相比, TOF 探测法不需要额外设计相干接收模块, 且不依赖于光源的相位调制技术。TOF 探测法中, 脉冲激光器向空间发射窄脉冲的准直激光束, 遇到物体后反射, 并折射回探测器单元。发射光束与参考光束之间存在时间延时 Δt , 可以计算出目标的距离 R 为

周莎莎,吴侃,曹先益,等: 基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统

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

其中, c 为自由空间中的光速。

TOF 探测法中,系统的测距分辨率主要与脉冲激光有关, $\Delta t^{[2]}$ 的表示式为

$$\Delta t \approx \frac{T}{S} \quad (6)$$

其中, T 、 S 分别为信号的上升时间、平均信噪比。相应的测距误差为

$$\Delta R = \left(\frac{\Delta t}{2} \right) c \quad (7)$$

在实验中,脉冲激光器产生宽度为 1 ns 的窄脉冲信号,信号上升时间 T 约为 0.4 ns,测得的返回信号平均信噪比 S 约为 5 dB。因此,根据式(6)、式(7)计算可得到理论测距误差 ΔR 约为 1.2 cm。

本文通过实验验证该激光雷达测距系统的波束控制和测距功能。将目标物体(平面镜)放置在 3.07~9.20 m 的范围内,并分别通过不同的发射角度测量的返回脉冲如图 9 所示。图中能量较大的峰为在光纤阵列与空气接触的界面产生的反射信号,这个信号

被用作参考信号。能量较小的峰是脉冲光被目标物体反射后的回波信号。时延与被测距离之间存在良好的线性关系。在 9.2 m 的测量距离内,测距误差小于 1 cm,这与理论误差相符。

由于工艺误差,不同光开关通道的插入损耗不尽相同,因此返回脉冲的信噪比略有不同。当前系统可以支持的最大探测距离约为 200 m,实际应用中若使用雪崩光电探测器(APD)可以获得更远的探测距离。

激光雷达的横向距离分辨率取决于透镜平面上的光斑尺寸和光束发散度。假设脉冲从光纤发射时为理想的高斯光束传播,则透镜平面上的光斑尺寸 $g^{[2]}$ 可表示为

$$g = 2 \omega_0 \sqrt{1 + \frac{f \lambda^2}{\pi \omega_0^2}} \quad (8)$$

其中, ω_0 为高斯光束(模式尺寸为 10 μm 的单模光纤)半径, $\omega_0 = 5 \mu\text{m}$; λ 为波长, $\lambda = 1550 \text{ nm}$; $f = 40 \text{ mm}$ 。因此,透镜准直前,根据式(8)计算得到的光斑尺寸为 $g = 7.9 \text{ mm}$ 。透镜准直后,光束发散角为 0.014° (0.25 mrad)。传输 20 m 后,由于光束发散,光束的直径扩大到了 5 mm。实验时,可以通过激光观察卡观测光斑、测量观察卡上的光束尺寸来间接测量光斑大小。

3 结束语

本文提出了一种基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统。根据 LABS 方案每一级只有一个光开关工作的特点,本文使用了选通型的光开关控制系统,实现了 $O(\log_2 N)$ 的控制复杂度和功耗,这优于其它集成固态光束扫描方案(如光相控阵)在复杂度和功耗方面的性能。光束扫描部分采用 FPGA 结合外围电路控制二叉树结构级联光开关阵列的方式,可以实现光束的高速扫描,光开关的上升时间约为 1.153 ms,下降时间约为 1.037 ms。该激光雷达测距系统具有功耗低、扫描速度快、光束质量良好、结构紧凑等优势,在最大测量距离为 9.2 m 的情况下,测距误差小于 1 cm。未来研究中,可以考虑使用氮化硅或硅光等平台,实现微秒级甚至纳秒级的开关速率,或者结合调频连续波的相干探测方式来实现对目标物体距离和速度的同时测量。总之,本文为高性能全固态激光雷达走向实际应用提供了重要的理论依据和技术支持。

参考文献:

- [1] STEFAN P, FABIAN S, JOERG S, et al. Photonically synchronized large aperture radar for autonomous driving [J]. Optics Express, 2019, 27

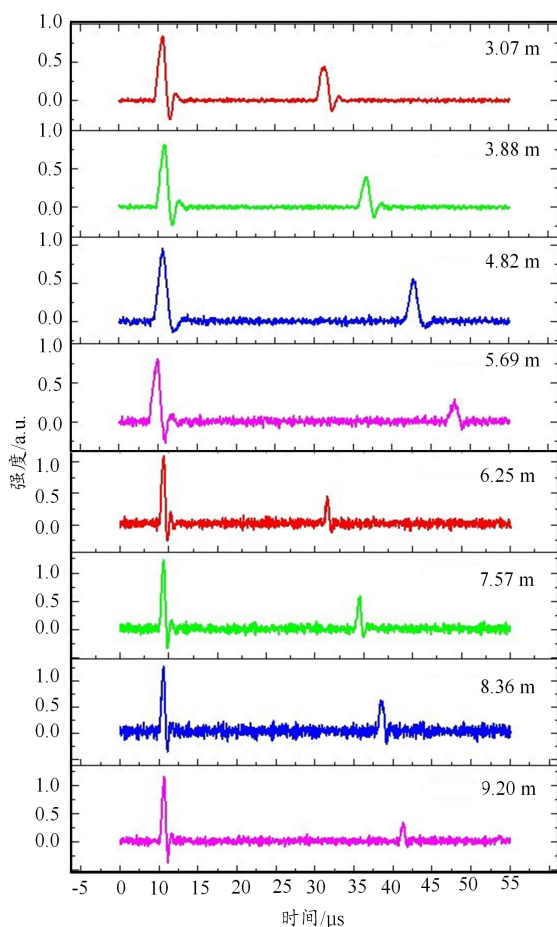


图9 不同目标距离和时延下的返回脉冲信号

- (2): 1199–1207.
- [2] MICHAEL A, WARREN B, GEOFFREY 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]. *BioScience*, 2020, 52 (1): 19–30.
- [3] ALEXANDER K, JOSEP S, MARTIN G, 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.
- [4] OLIVER M, ALEXANDER S, MICHAEL C, 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.
- [5] LUO G, WANG P, MA J, et al. Demonstration of 128-channel optical phased array with large scanning range [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, PP(99): 1–1.
- [6] KIM S H, YOU J B, HA Y G, et al. Thermo-optic control of the longitudinal radiation angle in a silicon-based optical phased array [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 411–414.
- [7] DOSTART N, ZHANG B, KHILO A, et al. Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic lidar beam steering[J]. *Optica*, 2020, 7: 726–733.
- [8] NICLASS C, ITO K, SOGA M, et al. Design and characterization of a 256 × 64-pixel single-photon imager in CMOS for a MEMS-based laser scanning time-of-flight sensor [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (11): 11863–11881.
- [9] SMITH B, HELLMAN B, GIN A, et al. Single chip lidar with discrete beam steering by digital micromirror device [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (13): 14732–14745.
- [10] WILLEKENS O, JIA X, VERVAEKE M, et al. Reflective liquid crystal hybrid beam-steerer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21541–21550.
- [11] CHANG Y C, SHIN M C, PHARE C T, et al. Metalens-enabled low-power solid-state 2D beam steering[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations, May 5–10, 2019, San Jose, USA. Washington: Optical Society of America, 2019: SF3N.5-1–SF3N.5-2.
- [12] KIMS, SLOAN J, LOPEZ J, et al. Luneburg lens for wide-angle chip-scale optical beam steering[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations, May 5–10, 2019, San Jose, USA. Washington: Optical Society of America, 2019: SF3N.7-1–SF3N.7-2.
- [13] ITO H, Y KUSUNOK I, MAEDA J, et al. Wide beam steering by slow-light waveguide gratings and a prism lens[J]. *Optica*, 2020, 7: 47–52.
- [14] DU Z, HU C, CAO G, et al. Integrated wavelength beam emitter on Silicon for two-dimensional optical scanning [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1–10.
- [15] 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.
- [16] LI C, CAO X Y, WU K, et al. Blind zone-suppressed hybrid beam steering for solid-state Lidar[J]. *Photonics Research*, 2021, 9: 1871–1880.
- [17] ROGERS C, PIGGOTT A Y, THOMSON D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. *Nature*, 2021, 590: 256–261.
- [18] SUYAMA S, ITO H, KURAHASHI R, et al. Doppler velocimeter and vibrometer FMCW lidar with Si photonic crystal beam scanner [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30727–30734.
- [19] LI C, WU K, CAO X, et al. Hybrid 2D beam steering for solid-state TOF lidar [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2021, October 24–27, Shanghai, China. Shanghai: IEEE, 2021 T3D.4-1–T3D.4-3.
- [20] LI C, WU K, CAO X Y, et al. Monolithic transceiver for lens-assisted beam-steering lidar[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5587–5590.
- [21] LI C, CAO X Y, LI X W, et al. FMCW lidar system based on cylindrical lens-assisted integrated beam steering [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Applications and Technology, May 9–14, 2021, San Jose, USA. Washington: Optical Society of America, 2021: JW1A.55.
- [22] 邱高峰, 吴侃, 曹先益, 等. 基于 FPGA 电控的二维快速光束扫描雷