

透镜辅助的集成收发调频连续波激光雷达

张广进^{*}, 吴侃^{**}, 李超, 曹先益, 周莎莎, 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 基于单片集成收发芯片搭建了一个透镜辅助光束扫描的激光雷达系统。基于硅基集成技术设计了一个单片集成收发芯片, 片上集成了一个 1×4 的光开关以及 2×2 的收发器阵列。收发器由中间的一个光栅发射器以及周围的 U 形光电探测器构成。实验证明, 光开关具有 $5.4 \mu\text{s}$ 左右的响应时间, 收发器具有 0.3 A/W 的光电流响应。结合研制的具有 300 ns 响应时间的扫描电控装置, 搭建了调频连续波激光雷达系统, 并在 1 m 范围内进行了测距实验。

关键词 光学器件; 激光雷达; 调频连续波; 现场可编程门阵列; 光束扫描

中图分类号 P215

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0623001

Lens-Assisted Frequency Modulated Continuous Wave Lidar Based on Integrated Transceiver

Zhang Guangjin^{*}, Wu Kan^{**}, Li Chao, Cao Xianyi, Zhou Shasha, Chen Jianping

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

Abstract Based on a monolithic transceiver chip, a lens-assisted beam scanning lidar system is built. The monolithic transceiver chip is fabricated based on silicon-based integration technology, which integrates a 1×4 optical switch and 2×2 transceiver array. The transceiver consists of a grating transmitter in the middle and a surrounding U-shaped photodetector. The experimental results show that the response time of optical switch is about $5.4 \mu\text{s}$, and the photocurrent response of the transceiver is 0.3 A/W . Combined with our self-developed scanning electronic control device with the response time of 300 ns , a frequency modulated continuous wave lidar system is realized, and the ranging experiment is carried out in the range of 1 m .

Key words optical devices; lidar; frequency modulated continuous wave; field-programmable gate array; beam scanning

1 引言

激光探测和测距在自动驾驶、空间探测和成像等方面显示出巨大的潜力。与传统的机械式激光雷达相比, 全固态激光雷达在扫描速度、体积和稳定性等方面具有显著优势。为了实现非机械式的扫描, 国内外很多课题组提出了解决方案, 包括基于微机电系统^[1-4]、光学相控阵^[5-15]、液晶器件^[16-18]和透镜辅助的光束扫描(LABS)^[19-26]等方案。在 LABS 激

光雷达系统中, 通过选择发射光栅阵列的不同发射单元配合透镜来实现二维的光束扫描。通过控制片上光开关网络将输入光引导到不同的发射器上, 再由透镜对发射器阵列发射的光进行准直和偏转, 其中发射光的传播方向由所选发射器的相对位置决定。因此, 可以通过控制片上光开关网络实现光束扫描, LABS 激光雷达在光束质量、控制复杂度和功耗等方面都具有一定的优势。

对于收发独立的雷达系统来说, 光束的扫描和

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61875122, 61922056)

通信作者: *zhang_guangjin@sjtu.edu.cn; **kanwu@sjtu.edu.cn

接收需要两套独立的器件。一方面,两套器件会增加系统尺寸和复杂度。另一方面,扫描和接收装置需要进行协同对准校正。对于 LABS 激光雷达来说,由于扫描原理上的特点,反射光会按照发射的光路返回,故十分需要一种收发一体并且包含光开关的紧凑结构。一个收发一体的扫描芯片可以极大地减小系统的体积与复杂程度,提高工作的稳定性。此外,扫描控制是激光雷达需要重点关注的一个方面。对于激光雷达的应用来说,大阵列的扫描需要一个复杂度较低且响应速度较快的方案。目前已有的是采用脉冲宽度调制的方式来控制切换,这种方式具有较慢的响应速度且电压控制精度较低,故很难满足激光雷达快速切换的需求。

本文研究了收发一体的集成收发器芯片,结合扫描电控装置实现了快速扫描且紧凑的 LABS 激光雷达,并采用调频连续波(FMCW)对其测距效果进行了验证。集成收发器芯片单片集成了一个光开关网络与收发器阵列,片外仅需要提供光源以及透镜。收发器中间为一个发射光栅,周围为一个 U 形的光电探测器(PD),经实验测量可以完成高效的光束发射与接收。由于采用了二叉树结构的光开关网络,故 LABS 激光雷达具有 $O(\log_2 N)$ 的控制复杂度,其中 N 为总的输出端口。为了实现芯片的高速响应、任意扫描和数字编程扫描,本文搭建了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)精确控制数模转换芯片(DAC)多路模拟电压输出和同步控制多路复用器阵列的电控装置。基于一个 2×2 的收发集成芯片和扫描电控装置搭建了一个 FMCW 激光雷达系统,并在此系统上进行了测距的验证。本工作将为基于 LABS 技术的单片集成激光雷达的实用化打好基础。

2 收发与探测原理

2.1 透镜辅助的光束扫描激光雷达原理

LABS 激光雷达原理如图 1(a)所示,扫描芯片单片集成了一个 $1 \times N$ 的光开关网络以及一个收发器阵列,该图中 $N=4$ 。每一个收发器单元的中间为一个光栅发射器,周围为一个 U 形的 PD。 $1 \times N$ 光开关网络的输出连接着具有 N 个收发器的光栅发射器,控制光开关网络可以将输入光路由到某个特定的发射器上。同时,在收发器阵列上方放置了一个透镜,透镜的焦平面与收发器阵列平面重合。

光束发射与偏转原理示意图如图 1(b)所示。对光开关网络进行控制可以将耦合到片上的输入光引导到某个特定的光栅发射器上,随后光束照射到

透镜的不同位置并被偏转到不同方向。通过对 $1 \times N$ 光开关网络的控制,可将输入光路由到 N 个输出通道中的任意一个,可以实现设计范围内离散的任意位置扫描。由于发射光栅阵列处于透镜的焦平面上,故从不同光栅发射的光束会在透镜的另一端聚集于一点 S 。此时, S 可被视为一个虚拟光源,从不同光栅发射的光束相当于从 S 点发射到不同的方向。因此,最大偏转角度 $\theta^{[27]}$ 为

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

式中: L 为发射光栅阵列的长度; f 为透镜焦距。同理可得相邻发射光栅扫描角度差 $\Delta\theta^{[27]}$ 为

$$\Delta\theta = \arctan \frac{h}{f}, \quad (2)$$

式中: h 为相邻发射光栅的间距。光束发散角 $\theta_D^{[27]}$ 为

$$\theta_D = \arctan \frac{\omega_e}{f}, \quad (3)$$

式中: ω_e 为光栅发射光束的光斑尺寸。发散角 θ_D 的大小表明当光束在自由空间中传播时,其光斑尺寸变化的速度。

回波光束接收示意图如图 1(c)所示,其中 ω_r 为反射光束的光斑尺寸。当光束遇到物体被反射时,反射光会按照与发射光相同的路径照射到透镜上并被聚焦,同时照射到发射时相同的位置处。由于经过空间传播以及反射,因此反射光束在芯片上形成的光斑会具有更大的尺寸,此时围绕在光栅周围的 U 形 PD 就能接收到发射光。另外,透镜采用平凸透镜,透镜中的平面会对发射光束产生反射,被反射的光束同样会照射到探测器上,故被目标物体反射的光和被透镜平面反射的光会在空间上交叠,进而可以实现对回波信号的相干探测。有关 LABS 的详细理论,具体可参见本团队的前期工作^[27]。

2.2 调频连续波测距原理

FMCW 测距的原理是经过线性调频的发射光与反射回来的光混频之后产生拍频信号,通过这个低频的拍频信号可以求解出物体的距离信息与速度信息。相比飞行时间测距法,相干探测具有更高的信号灵敏度,同时对人眼具有更高的安全性。

FMCW 测距原理图如图 2 所示。在发射的信号光经过线性调频后,其频率随时间变化,周期为 T 。在前半个周期内,其频率随时间线性增加,在后半周期内,其频率随时间线性减小。为便于分析,仅考虑频率随时间线性增加的部分,其瞬时频率^[28]可以表示为

$$f(t) = f_0 + Kt, \quad (4)$$

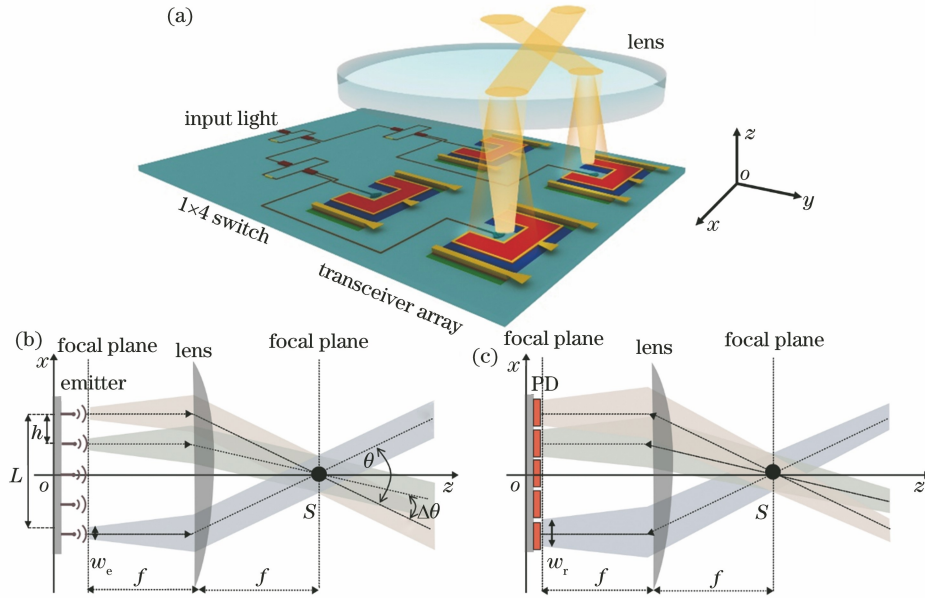


图 1 LABS 原理图。(a) 2×2 集成扫描芯片结构图；(b) 光束发射与偏转原理示意图；(c) 回波光束接收示意图
Fig. 1 Schematic diagram of LABS. (a) Structural diagram of 2×2 integrated scanning chip; (b) schematic diagram of beam emission and deflection; (c) diagram of echo beam reception

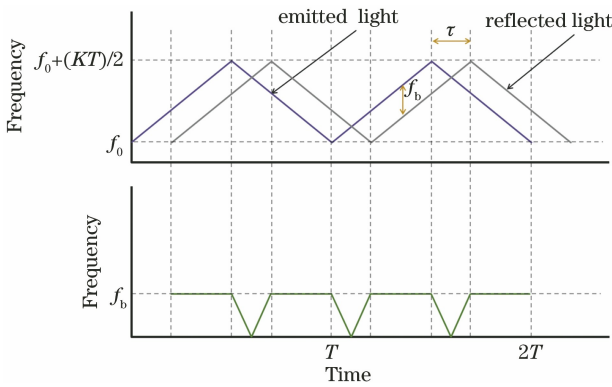


图 2 FMCW 测距原理图

Fig. 2 Schematic diagram of FMCW ranging

式中： f_0 为发射光的扫频基础频率； K 为扫频系数，单位为 Hz/s ； t 为时间。

如图 2 所示，经过反射的回波光束相比发射光束有一个时间延迟 τ ，其表达式为 $\tau = (2D)/c$ ，其中 D 为物体与发射器之间的距离， c 为光速。在有效区域内，发射光与发射回来的光混频之后产生的拍频信号频率与时间延迟 τ 有关。由图 2 可知，经过等比变换^[28]可以得到

$$\frac{\tau}{T/2} = \frac{f_b}{B}, \quad (5)$$

式中： B 为扫频带宽； f_b 为拍频。拍频表达式^[28]为

$$f_b = \frac{4DB}{cT} = \frac{2DK}{c}, \quad (6)$$

故目标距离公式^[28]为

$$D = \frac{f_b c T}{4B} = \frac{f_b c}{2K}. \quad (7)$$

由(7)式可知，FMCW 测距的精度在很大程度上取决于扫频激光源的扫频线性度。在搭建的实验系统中，使用了一个经过扫频预校正的分布式反馈(DFB)激光器作为扫频激光源。通过外部的一个任意波形发生器(AWG)来产生 DFB 激光器的电流驱动信号，由于驱动电流与激光器的输出频率并不是线性的，故采用了一种迭代算法对 AWG 输出的驱动电流信号进行了预校正，进而保证了 DFB 激光器输出频率的线性度^[29]。经预校正可得到扫频线性度较为理想的线性扫频信号，扫频速率为 52.4 GHz/ms ，AWG 输出驱动信号为经过预校正的近似三角波信号，幅度为 $2.5 \sim 7.5 \text{ V}$ ，信号周期为 1 ms 。

3 器件设计与表征

基于第 2 节提到的收发一体的 LABS 激光雷达的原理，采用硅(Si)基集成工艺设计了集成收发扫描芯片，单片集成了一个 1×4 的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)热光开关与 2×2 的收发器阵列。 1×4 的光开关通过级联 1×2 MZI 光开关得到，这种二叉树式的光开关阵列可以很方便地拓展到 1×2^M ，其中 M 为二叉树的级数，总的输出端口为 $N = 2^M$ ，如图 3(a)所示。由于任意时刻处光开关的输入到输出只有一条通路，故光开关二叉树的每一级只有一个 1×2 MZI 光开关在工作，总共有 $M = \log_2 N$ 个，

控制的复杂度是 $O(\log_2 N)$ 。在实际芯片中,单个 1×2 的 MZI 光开关由多模干涉(MMI)光耦合器以及带有移相器的波导臂构成。通过控制加载在其上的电压可在两臂之间产生不同的相位差,进而实现开关的效果。实验中目前的集成收发芯片上有一个 1×4 的光开关,其 4 个输出分别连接了 4 个收发器单元中的光栅发射器。4 路发射的功率差异小于 1 dB,功率差异主要是光开关的插损差异导致的。

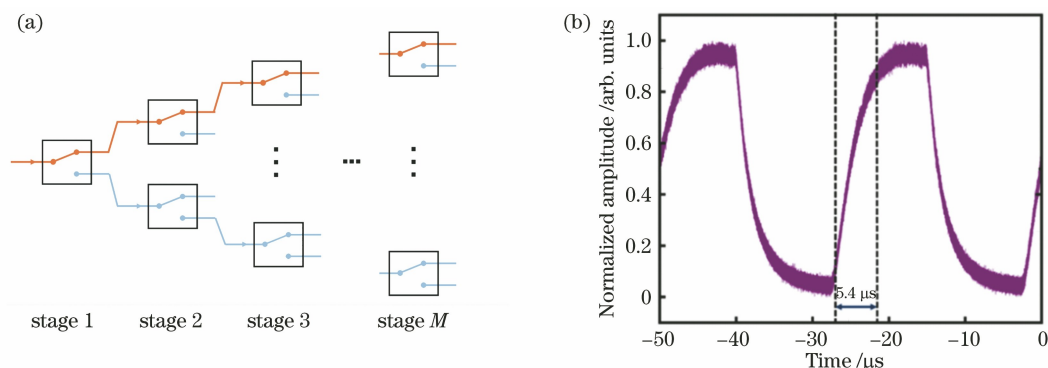


图 3 片上集成 MZI 光开关。(a)片上光开关网络结构示意图;(b) MZI 光开关响应曲线图

Fig. 3 Integrated MZI optical switch on chip. (a) Schematic diagram of network structure of on-chip optical switch; (b) response curve of MZI optical switch

收发器的三维结构示意图如图 4(a)所示。可以发现,收发器由两部分组成,分别是中间的光栅发射器与周围的 U 形 PD。光栅发射器与光开关网络的输出相连可将输入光发射到自由空间当中,周围的 U 形 PD 能够接收反射回来的空间光束并将其转换为电信号。在设计制造上,通过在 Si 层掺杂 P^+ 和 P^{++} 实现载流子的收集以及欧姆接触,再在 Si 层上使用外延生长工艺生长一层锗(Ge)薄膜,其厚度约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。为了实现 n-i-p 结构,在 Ge 薄膜的顶端约 50 nm 厚的位置掺杂 N^+ 。在掺杂浓度的选择上,Si- P^+ 的掺杂浓度(每立方厘米中掺杂离子的数量)约为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,Si- P^{++} 的掺杂浓度约为 $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,Ge- N^+ 的掺杂浓度约为 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。就整体而言,一个收发器的面积约为 $250 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,其中 12% 的面积为光栅发射器,其面积为 $50 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$,其余面积均为 U 形的 PD,铜电极分别连接到 Si- P^{++} 与 Ge- N^+ 区域。片上集成探测器的工作波长为 1550 nm ,对 1.0 V 和 3.5 V 反偏电压下 PD 的光电流响应进行了测试,如图 4(b)所示,光电响应约为 0.3 A/W 。图 4(b)插图显示了不同偏压下的 PD 暗电流, 1.0 V 反偏电压下 PD 的暗电流约为 $6.4 \mu\text{A}$ 。在输入光功率为 0 dBm 时,测得的 PD 的光电流响应在 $1460 \sim 1580 \text{ nm}$ 波长范围内的变化如图 4(c)所示。图 4(d)展示了四路 PD 在不同输入功率

目前限制阵列规模的因素主要有片上探测器面积、波导和电极的走线等。基于集成芯片搭建的雷达系统的扫描速率主要取决于 MZI 光开关的响应速度。通过实验测试了 Si 基集成热光开关的响应曲线,如图 3(b)所示。可以发现,输出幅度从 10% 增加到 90% 大约需要 $5.4 \mu\text{s}$,所有光开关的消光比范围为 $20 \text{ dB} \sim 25 \text{ dB}$,这确保了光束的发射和接收具有较好的效果。

下的光电流响应。可以看出,片上 PD 一致性较好。

4 扫描控制

基于光开关网络的结构特点,设计了一种光束扫描控制装置。扫描电控装置示意图如图 5 所示,以 FPGA 作为核心来控制单片或者多片 DAC 与多路复用器阵列。具体来说,当光束扫描芯片中有 N 个发射单元时,光开关构成的二叉树结构有 $M = \log_2 N$ 级,如图 3 所示。从前到后,每一级的 1×2 光开关数量分别为 $1, 2, 4, \dots, 2^{M-1}$ 个。由于在同一时刻下每一级的 1×2 光开关中只有一个光开关工作,故只需对这一个光开关进行控制即可。针对这一特点,设计了如图 5 所示的系统结构,FPGA 控制 M 路 DAC 输出,DAC 的每一路输出经过放大器后进入选通开关。第一路 DAC 输出用以控制第 1 级光开关,第 1 级只有一个光开关,故无需选通开关,直接连接到第 1 级的光开关控制端即可。第二路 DAC 输出用以控制第 2 级光开关,第 2 级有两个光开关,故需要一个 1×2 选通开关以确定控制信号加载到哪个光开关上。以此类推,第 M 路 DAC 输出控制第 M 级光开关,有 2^{M-1} 个,故采用 $1 \times 2^{M-1}$ 选通开关进行信号选择。放大器的功能:1)将 DAC 输出电压范围放大到光开关控制所需的电压范围;2)提供相应的驱动能力,光开关采用热光控制,片上

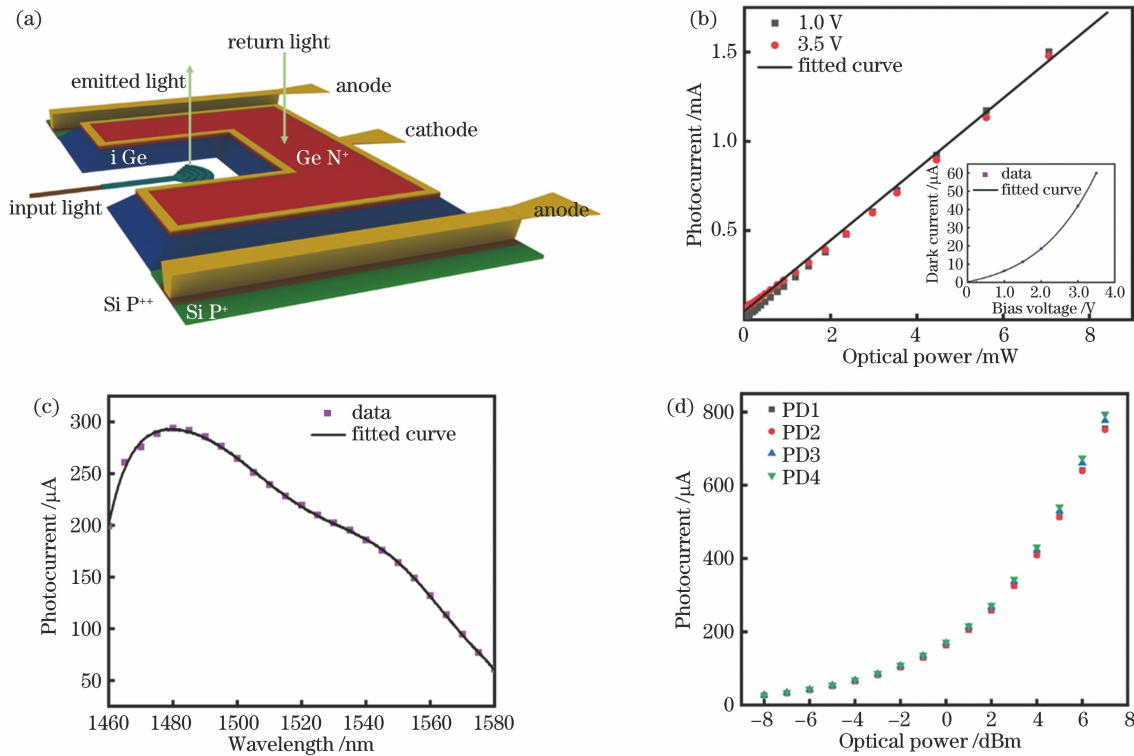


图 4 集成收发器。(a) Ge-Si 集成收发器的三维示意图；(b) PD 光电流随输入光功率的变化，插图为不同偏压下的暗电流；(c) PD 光电流随输入光波长的变化；(d) 四个 PD 光电流随输入光功率的变化

Fig. 4 Integrated transceiver. (a) Three-dimensional illustration of Ge-Si integrated transceiver; (b) photocurrent of PD varying with input optical power, illustration shows dark currents under different bias voltages; (c) photocurrent of PD varying with wavelength of input light; (d) photocurrents of 4 PDs varying with input optical power

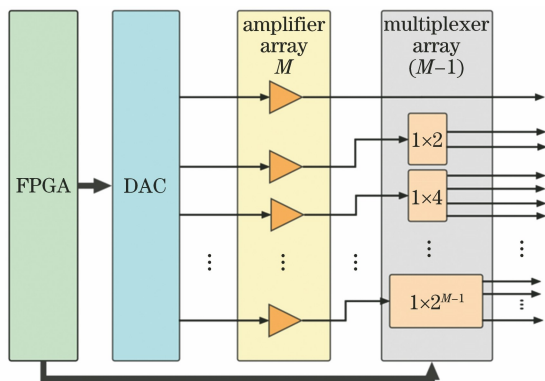


图 5 扫描电控装置示意图

Fig. 5 Setup of scanning electronic control device

电阻约为 400Ω 。因此,对具有 N 个发射单元的激光雷达芯片只需要 $\log_2 N$ 路 DAC 控制,结合选通开关即可实现对所有扫描角度的控制,这大大降低了控制系统的硬件复杂度、功耗和成本。

从实验上对图 5 中一个扫描电控装置的切换响应时间进行了测量,通过内部编程使得某个通道输出电压从最小值切换到控制电压值,分别在不负载以及有负载情况(驱动电路是否连接到片上热光开关)下进行了测试。通过示波器观察了 DAC 输出、

放大电路输出以及多路复用器输出三个不同位置的波形,分别对应图 3 中的 stage 1、stage 2、stage 3,结果如图 6 所示。可以发现,在有负载情况下,不同点位的响应时间基本相同,约为 300 ns ,与光开关所测得的 $5.4 \mu\text{s}$ 的响应时间相比,此电控扫描装置完全满足其驱动需求。

在测试了扫描电控装置的响应时间之后,在 2×2 收发一体的集成激光雷达芯片上,对此电控扫描装置进行了功能验证。以 100 kHz 的频率进行了扫描切换,通过示波器观察了单个通道经过放大电路前后的波形图,如图 7(a)、(b)所示。其中,图 7(a)为 DAC 输出,图 7(b)为放大器输出。可以发现,放大器输出电压在所需的芯片控制电压($0 \sim 11 \text{ V}$)范围内都保持了较好的放大线性度,满足控制需求。放大器放大倍数为 3.9,最大输出电压约为 11.2 V ,因此当 DAC 输出电压过大时,会发生放大饱和的情况,如图 7(b)中最高脉冲所示。扫描切换速率由寄存器刷新频率决定,目前受所使用的 DAC 的限制,可实现的最高电切换频率接近 1 MHz 。

通过研制的控制装置,可以实现芯片上不同位

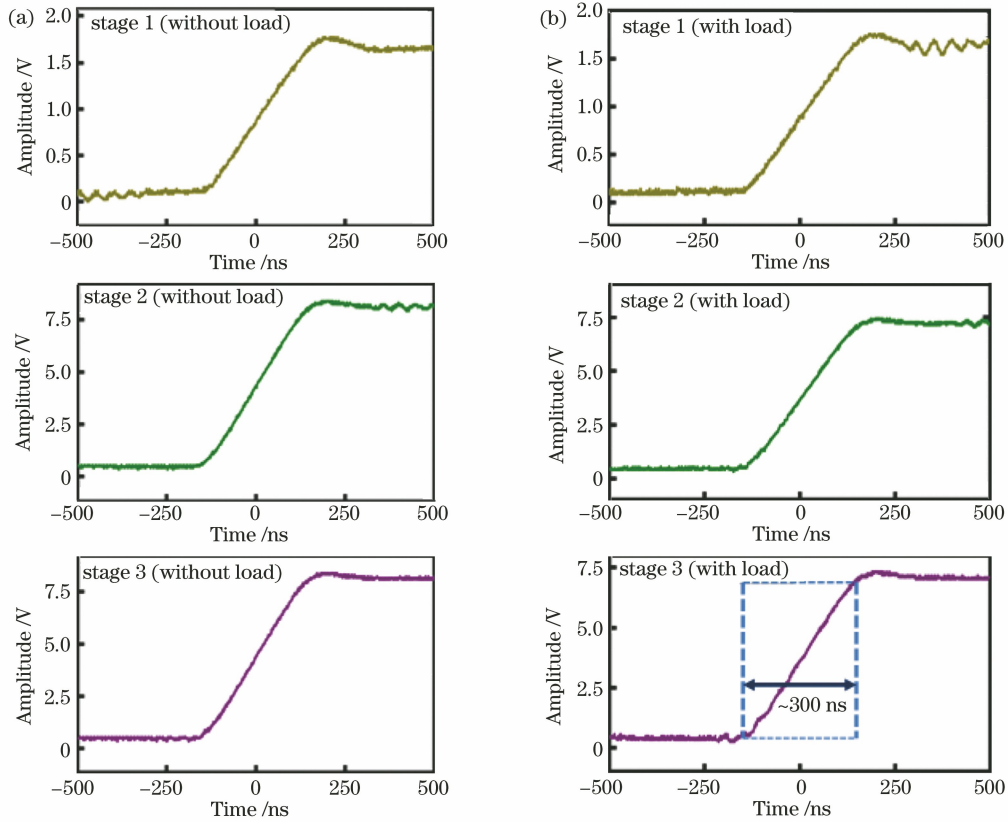


图 6 扫描电控装置响应曲线。(a)无负载时三个不同位置的响应曲线;(b)有负载时三个不同位置的响应曲线

Fig. 6 Response curves of scanning electronic control device. (a) Response curves at three different locations without load; (b) response curves at three different locations with load

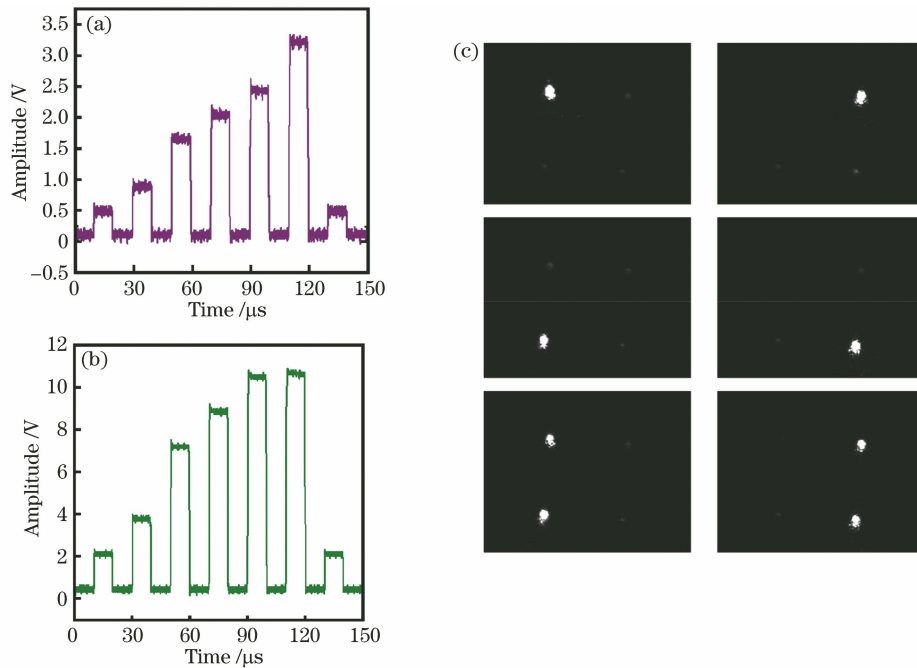


图 7 扫描电控装置的切换测试。(a)经过放大电路前 100 kHz 自动切换的输出波形;(b)经过放大电路后 100 kHz 自动切换的输出波形;(c)切换效果光斑图

Fig. 7 Switching test of scanning electronic control device. (a) Output waveform with 100 kHz auto switching before amplifying circuit; (b) output waveform with 100 kHz auto switching after amplifying circuit; (c) images of light spot with switching

置的光束发射,如图 7(c)所示。直接用红外相机对准芯片的输出来观察光束发射情况。图 7(c)中前两行四幅图是单通道输出,最后一行两幅图是将最后一级 1×2 光开关设置在 50:50 的输出,实现了双通道输出。从图 7(c)中还可以发现,由于光开关的消光比有限,故当一个发射单元输出光时,其他通道的发射单元也有微弱光输出(约 20 dB 的抑制)。

5 调频连续波测距验证

基于第 4 节中的控制系统和收发一体的集成芯片实现了 FMCW 激光测距的验证实验。由(7)式可知,对于 FMCW 测距来说,需要反射回来的信号光与参考光发生相干叠加,通过相干叠加后的拍频信号才能得到物体的距离信息。对于收发集成的 LABS 激光雷达来说,参考信号目前有两个选择:1)发射光栅会有部分漏光直接进入光栅周围的 U 形 PD,但是这个漏光不会与信号光产生相干叠加,故该漏光无法作为 FMCW 测距的参考光;2)发射光

栅照射到透镜上的光束会被部分反射回来,从透镜反射回来的光束能量大约为发射光能量的 5%,这个直接从透镜发射回来的光与信号光共享了部分光路,故两者会进行非常充分的相干叠加,产生的拍频信号会被 U 形 PD 接收到,并且可以通过改变透镜的镀膜来改变反射光束的能量大小。因此,实际上透镜的反射光是 FMCW 测距的参考信号。

基于第 3 节中的单片集成收发扫描芯片以及扫描电控装置进行了 FMCW 测距实验。搭建的 FMCW 激光雷达结构如图 8 所示。在光路上采用一个经过预校正的任意波形产生器产生扫频驱动信号进而驱动一个 DFB 激光器产生三角波调频输出。通过一个偏振控制器(PC)来调整 DFB 激光器输出光的偏振,输出光经过调整后进入到光束扫描芯片。在电路上通过电控扫描控制装置来控制扫描芯片切换到不同的发射单元,并通过模数转换器对拍频之后的信号进行采样并进行快速傅里叶变换或者直接通过示波器观察其波形。

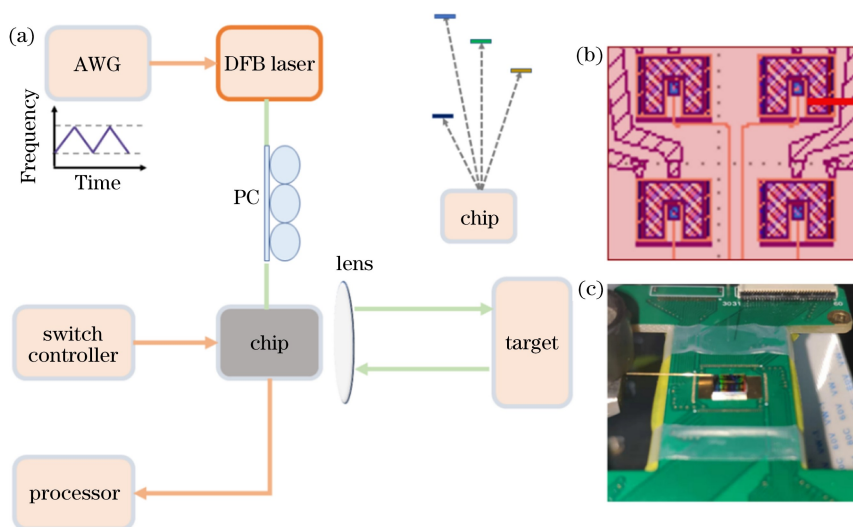


图 8 基于 LABS 芯片的 FMCW 激光雷达。(a) FMCW 激光雷达系统结构图;(b)基于收发阵列的 LABS 芯片版图;(c)器件实拍照片

Fig. 8 FMCW lidar based on LABS chip. (a) Setup of FMCW lidar system; (b) layout of LABS chip based on transceiver array; (c) photo of device

实验中采用的透镜焦距为 1 cm,得到的扫描角度为 2.860° ,发散角为 0.086° 。对 2×2 光栅发射阵列切换到 4 个不同发射单元的情况进行了测试,分别在 4 个不同距离处进行了测距实验,所得的拍频信号的频域波形如图 9 所示。若拍频频率分别为 348.9, 278.0, 217.0, 146.0 kHz, 扫频速率为 52.4 GHz/ms,则由(7)式可计算得到目标距离分别为 1.01, 0.80, 0.63, 0.42 m,与通过标尺测量的距离对比,发现误差在 0.01 m 内,这种误差基本是

手动测量导致的。

6 结 论

设计了一种透镜辅助的收发一体集成 FMCW 激光雷达,通过收发一体的集成收发芯片,单片实现了较为高效的光束发射与探测。单个收发器的中间为作为光束发射单元的光栅发射器,周围为 U 形的 PD,并在片上集成了光开关。经实验测量,收发器的光电响应为 0.3 A/W,光开关响应速度约为

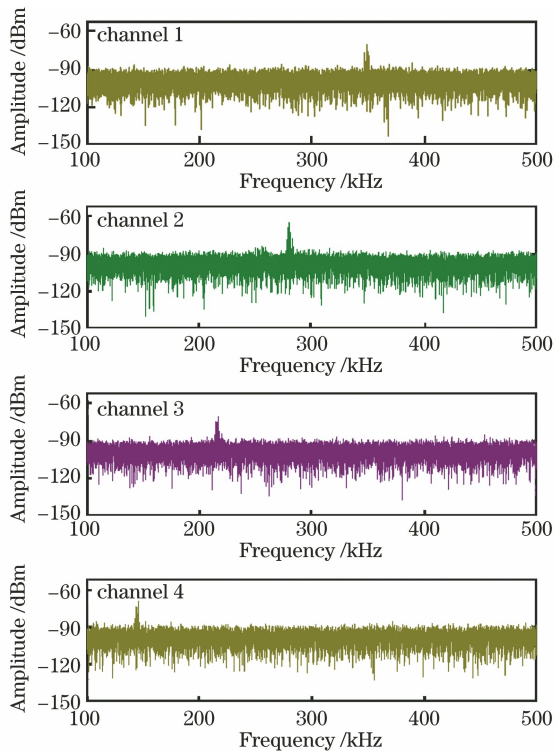


图 9 4 个通道不同距离的拍频信号的频谱

Fig. 9 Spectra of beat frequencies from 4 channels at different distances

5.4 μs 。为了实现对扫描的自动控制,设计了一种扫描电控装置,具有 300 ns 左右的响应速度。基于集成收发芯片以及扫描电控装置,搭建了一个紧凑的 FMCW 激光雷达,并在 1 m 范围内进行了测距实验。所提的集成收发芯片对 LABS 激光雷达的大规模集成具有重要价值,将为全固态激光雷达走向实际应用打好基础。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zhang X Y, Koppal S J, Zhang R, et al. Wide-angle structured light with a scanning MEMS mirror in liquid [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3479-3487.
- [3] Wu L, Dooley S, Watson E A, et al. A tip-tilt-piston micromirror array for optical phased array applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(6): 1450-1461.
- [4] 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.
- [5] Guan B B, Scott R P, Qin C, et al. Free-space coherent optical communication with orbital angular, momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit [J]. *Optics Express*, 2013, 22(1): 145-156.
- [6] Tyler N A, Fowler D, Malhouitre S, et al. SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5851-5858.
- [7] 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.
- [8] Dostart N, Zhang B H, Khilo A, et al. Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic lidar beam steering [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 726-733.
- [9] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jágerská J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [10] Zadka M, Chang Y C, Mohanty A, et al. On-chip platform for a phased array with minimal beam divergence and wide field-of-view [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2528-2534.
- [11] Kwong D, Hosseini A, Zhang Y, et al. 1×12 unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(5): 051104.
- [12] Yousefzadeh C, van Rynbach A, Bos P J. Design of a large aperture, tunable, Pancharatnam phase beam steering device [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 991-1001.
- [13] 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.
- [14] Ye X W, Zhang F Z, Pan S L. Compact optical true time delay beamformer for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3956-3959.
- [15] Luo G Z, Wang P F, Ma J B, et al. Demonstration of 128-channel optical phased array with large scanning range [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 6800710.
- [16] Willekens O, Jia X N, Vervaeke M, et al. Reflective liquid crystal hybrid beam-steerer [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21541-21550.
- [17] Kim J, Oh C, Serati S, et al. Wide-angle, nonmechanical beam steering with high throughput utilizing polarization gratings [J]. *Applied Optics*,

- 2011, 50(17): 2636-2639.
- [18] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, et al. A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1078-1096.
- [19] 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.
- [20] Zhang X S, Kwon K, Henriksson J, et al. Large-scale silicon photonics focal plane switch array for optical beam steering [C]//*Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021*, June 6-11, 2021, Washington, D. C. Washington, D. C.: OSA, 2021: F4A.2.
- [21] 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*, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2019: SF3N.5.
- [22] Kim S, Sloan J, López J J, et al. Luneburg lens for wide-angle chip-scale optical beam steering [C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 5-10, 2019, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2019: SF3N.7.
- [23] Ito H, Kusunoki Y, Maeda J, et al. Wide beam steering by slow-light waveguide gratings and a prism lens[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 47-52.
- [24] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. *Nature*, 2021, 590(7845): 256-261.
- [25] Martin A, Dodane D, Leviandier L, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.
- [26] Du Z M, Hu C Y, Cao G Y, et al. Integrated wavelength beam emitter on silicon for two-dimensional optical scanning [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 6603710.
- [27] 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.
- [28] Axel D, Reinhard N. *Laser measurement technology: fundamentals and applications [M]*. Zhang S L, Transl. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2017: 135-144.
- [29] Cao X Y, Wu K, Li C, et al. Highly efficient iteration algorithm for a linear frequency-sweep distributed feedback laser in frequency-modulated continuous wave lidar applications[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(10): D8-D14.