

# 磁光开关时分复用全固态激光雷达实验研究

王振川<sup>1,2</sup>, 刘雪生<sup>1,2</sup>, 郝鹏<sup>1,2\*</sup>, 姚晓天<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河北大学物理科学与技术学院光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;

<sup>2</sup>河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

**摘要** 因磁光开关的开关速度快、可靠性高、串扰小等特点,提出一种基于光纤磁光开关的时分复用全固态激光雷达。分析了基于光纤磁光开关的时分复用全固态激光雷达的成像原理,实验测试影响激光雷达性能的磁光开关相关性能参数,包括延迟时间、开关上升沿时间、插入损耗、回波损耗。随后,基于 $1 \times 8$ 光纤磁光开关搭建了时分复用全固态激光雷达实验系统,通过磁光开关将光路切换到二维光束阵列不同位置的光纤通道中,基于飞行时间(ToF)测距技术实现了激光雷达的快速三维成像。最终,通过对空间目标构建三维点云图,验证了该雷达系统的全固态三维成像能力,实现了510.3 Hz的扫描频率和 $0.36^\circ$ 的角度分辨率,并通过微平移台可将角度分辨率提高到 $0.18^\circ$ 。与micro-electro-mechanical system (MEMS)和光学相控阵的光束成像技术相比,所设计的技术方案具有成本低、能量利用率高和光束质量高等优点。

**关键词** 激光雷达; 时分复用; 磁光开关; 光纤阵列

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221948

## Experimental Study of All-Solid-State Lidar Based on Magneto-Optical Switching Time Division Multiplexing

Wang Zhenchuan<sup>1,2</sup>, Liu Xuesheng<sup>1,2</sup>, Hao Peng<sup>1,2\*</sup>, X. Steve Yao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics Information Innovation Center, College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;

<sup>2</sup>Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

**Abstract** Based on the characteristics of magneto-optical switch, such as fast switching speed, high reliability, and low cross talk, a time division multiplexing solid-state lidar based on a fiber magneto-optical switch is proposed. First, the working principle and properties of the time division multiplexing solid-state lidar based on a fiber magneto-optical switch are discussed and examined, and the performance indexes of the magneto-optical switch related to the performance of lidar are tested, including delay time, switch rising edge time, insertion loss, and return loss. Then, a time division multiplexing solid-state lidar system was constructed based on the  $1 \times 8$  optical fiber magneto-optical switch. A time-of-flight (ToF) ranging technology was used to quickly achieve three-dimensional (3D) imaging of the lidar by switching the optical path to the fiber channel at various locations of the two-dimensional beam array. Finally, the 3D point cloud map of the measured object was built in the experiment to confirm the system's all-solid-state 3D imaging capability. The scanning frequency of 510.3 Hz and angular resolution of  $0.36^\circ$  are achieved, and the angular resolution is increased to  $0.18^\circ$  by the microjitter translation platform. The developed technique has advantages over micro-electro-mechanical system (MEMS) and optical phased array beam imaging technology, including low cost, high energy utilization, and good beam quality.

**Key words** lidar; time division multiplexing; magneto-optical switch; optical fiber array

## 1 引言

激光雷达可以快速、精准地获取被测目标距离、速

度、三维形状等信息,广泛应用于人工智能、航天航空、军事和气象等领域<sup>[1-3]</sup>。激光雷达按扫描方式分为机械式激光雷达和固态式激光雷达<sup>[4]</sup>,其中固态激光雷

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-07-14; 网络首发日期: 2022-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(12004092)、河北省创新能力提升计划(20542201D)、河北省自然科学基金重点项目(F2021201013)、河北省自然科学基金(F2020201041)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019035)、河北大学高层次人才科研启动项目(801260201243)

通信作者: haopeng@hbu.edu.cn

达是未来激光雷达的发展趋势,尤其是近年来智能驾驶、智能机器人新兴产业领域发展需求的牵引。对于固态激光雷达,目前的实现方式主要包括 micro-electro-mechanical system (MEMS) 激光雷达、Flash 激光雷达和相控阵激光雷达 3 种。

MEMS 激光雷达通过微机系统的微振镜实现激光扫描,具有微型化、集成化、成本低和扫描性高的特点,但 MEMS 振镜易受到冲击、振动、高低温的影响从而降低使用寿命<sup>[5]</sup>。Flash 激光雷达采用面阵光同时照射一大片探测区域,利用高灵敏度的探测器来完成目标测距,具有质量轻、体积小和成像速度快的特点,但对激光功率要求高,对人眼构成一定威胁<sup>[6]</sup>。相控阵激光雷达通过光学相控阵(OPA)改变光波的相位,利用光波的干涉原理改变光的传播方向,实现三维扫描成像,可以实现任意方向的探测,具有芯片化、高精度和低成本的优势,但在主光束以外会形成旁瓣,导致能量分散<sup>[7]</sup>。除以上 3 种常用固态扫描方式外,一种基于光开关阵列波束控制的全固态激光雷达技术也逐渐成为研究者所关注的热点<sup>[8-9]</sup>。激光器发射出的光经过光开关阵列传输至阵列排列的光学天线,光学天线位于透镜前焦平面处,不同位置处的单元光学天线经过透镜后,获得不同方向的光束偏转,光开关不同通道的切换就可实现对光束的偏转控制。

光开关包括传统的机械式光开关<sup>[10]</sup>、基于硅光集成技术的硅基光开关<sup>[11]</sup>、由光电晶体材料(如 LiNbO<sub>3</sub>)

制成的电光效应开关、利用法拉第磁光效应的磁光开关。其中磁光开关具有开关速度快、稳定性强、可靠性高、光路无交融和偏振敏感性低等特点<sup>[12]</sup>。本文提出和实验研究了一种基于磁光开关切换扫描的全固态激光雷达系统。采用 1×8 磁光开关对光路进行开关切换。收发光学系统由准直透镜和位于透镜焦平面处的光纤阵列组成,光纤阵列与磁光开关各通道一一对应,准直透镜焦平面上相对于焦点,不同位置处的光纤阵列各通道经透镜后形成不同偏转角的阵列光束,光路中加入半导体光学放大器(SOA)对各通道进行脉冲调制,采用飞行时间(ToF)激光雷达传感原理,实现激光雷达的 3D 成像<sup>[13]</sup>。基于磁光开关的时分复用全固态激光雷达对被测目标进行了三维点云图成像,验证了系统的全固态三维成像能力。相比于 MEMS 激光雷达和基于 MEMS 光开关的波束扫描激光雷达,基于磁光开关的波束扫描激光雷达具有受冲击振动和高低温影响小、使用寿命更长、可靠性更高的优点。与 OPA 激光雷达技术相比,基于磁光开关的波束扫描激光雷达具有结构简单、功耗低、光束质量高的技术优势。

## 2 基于磁光开关的全固态激光雷达实验系统

基于磁光开关的全固态激光雷达系统结构如图 1(a)所示。波长为 1550 nm 的 DFB 激光器发射激光,激光进入脉冲半导体光放大器(SOA;PSOA15

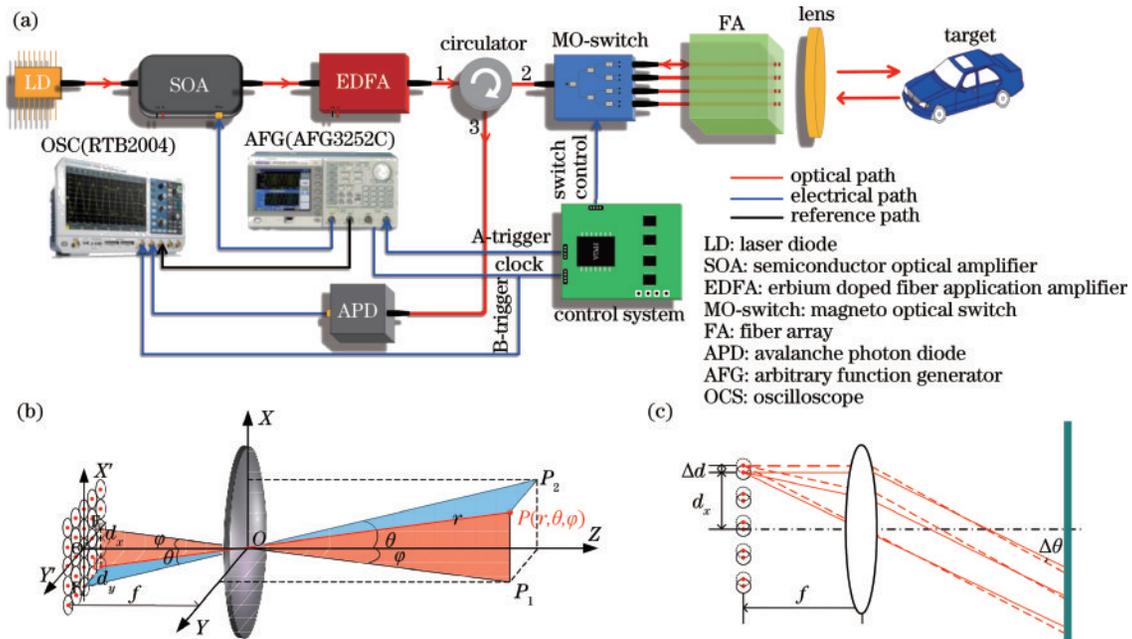


图 1 基于磁光开关的全固态激光雷达的结构及成像原理。(a)基于磁光开关的全固态时分复用激光雷达系统图;(b)光纤阵列相对透镜光轴的位置坐标( $d_x$ ,  $d_y$ )和探测目标 P 点的空间位置坐标( $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ )示意图;(c)通过抖动镜头或光纤阵列来提高光束角分辨率的示意图

Fig. 1 Structure and imaging principle of all-solid-state lidar based on magneto-optical switch. (a) Diagram of all-solid-state time division multiplexing lidar system based on magneto-optical switch; (b) schematic of the position coordinate ( $d_x$ ,  $d_y$ ) of the optical fiber array relative to the optical axis of the lens and the spatial position coordinate ( $r$ ,  $\theta$ ,  $s$ ) of the detection target point P; (c) schematic of improving beam angular resolution by dithering the lens or fiber array

SM, 朗普达光电公司)中进行脉冲调制,通过任意函数发生器(AFG; AFG3252C, Tektronix 公司)产生重复频率为 100 kHz 且脉宽为 5 ns 的脉冲信号,此信号驱动 SOA 将连续光调制成脉冲光。SOA 输出的光脉冲峰值功率为 30 mW(平均功率为 15  $\mu$ W),随后经过掺铒光纤放大器(EDFA; OAM-EDFA-C-PL-33, OPEAK 公司,工作波段为 1540~1560 nm)放大到 12 W(平均功率为 6 mW)。放大后的光脉冲经光环形器 1 端口输入,2 端口输出,到达 1 $\times$ 8 磁光开关(M1 $\times$ 8 Magnet Optical Switch, 一飞通讯公司),磁光开关通过驱动板控制实现光脉冲在 8 个通道  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_8$  之间的切换, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_8$  各通道与光纤阵列中的 8 个通道相对应。经磁光开关输出的脉冲光分别进入二维(5 $\times$ 8)光纤阵列(5 $\times$ 8 125P 2DFA-FC APC, 美速光电公司)中,光纤阵列输出端面位于收发光学透镜的焦平面处<sup>[14-15]</sup>。脉冲光信号经收发光学透镜准直后形成平行光束,同时每个通道的脉冲光被偏转到不同的方向。脉冲光发射至探测目标后发生漫反射<sup>[16]</sup>,反射光被收发光学透镜接收,收发光学透镜将回波脉冲光聚焦到与发射对应的光纤阵列端口,再次经过 1 $\times$ 8 磁光开关进入到光环形器 2 端口中,然后从光环形器 3 端口进入 InGaAs 雪崩光电探测器(APD; KY-APRM-200M-I-FC, 科杨光电公司),光信号转换成电信号,最后通过示波器(RTB2004, Rohde & Schwarz 公司)进行数据采集。在脉冲信号调制时序控制方面,为了实现 1 $\times$ 8 磁光开关在切换状态下 SOA 调制产生的光脉冲均落在不同通道的通光时间内,需要同步触发磁光开关驱动信号与任意波形发生器产生的脉冲信号,通过任意波形发生器同时对 SOA 和磁光开关驱动模块进行控制。

光纤阵列端面与收发光学透镜之间的位置关系如图 1(b)所示。以收发光学透镜的中心为原点,收发光学透镜位于 XOY 面,光发射方向为 Z 方向, $X'O'Y'$  面为收发光学透镜前焦平面,二维光纤阵列放置在收发光学透镜的焦平面  $X'O'Y'$  上,坐标为  $(d_x, d_y)$  的每根光纤依次发出脉冲光信号,脉冲光信号被透镜准直并指向空间中的唯一确定方向。探测物体的位置信息(距离和角度方向)表示为  $P(r, \theta, \varphi)$ ,其中  $r$  是物体与透镜中心之间的距离, $\theta$  是相对于 YOZ 平面的光束垂直偏转角, $\varphi$  是相对于 XOZ 平面的光束水平偏转角<sup>[17]</sup>。则  $\theta$  和  $\varphi$  可分别表示为

$$\theta = \arctan \frac{-d_x}{f}, \varphi = \arctan \frac{-d_y}{f}, \quad (1)$$

式中: $(d_x, d_y)$  是透镜的光轴测量焦平面上光纤阵列单元的位置坐标; $f$  是透镜焦距。从式(1)可以看出,光纤阵列出射端不同位置经收发光学透镜后一一对应着确定的光束偏振角,光纤阵列端口距离透镜的光轴越远或透镜焦距越小,则光束的垂直偏转角或水平偏转角

越大。结合雷达获得被测目标的距离信息  $r$ ,即可获得被测目标空间位置信息  $P(r, \theta, \varphi)$ 。对式(1)求导,得到该激光雷达系统垂直和水平的角度分辨率:

$$\Delta\theta = \frac{-\Delta d_x/f}{1 + d_x^2/f^2}, \Delta\varphi = \frac{-\Delta d_y/f}{1 + d_y^2/f^2}. \quad (2)$$

从式(2)可以看出,激光雷达系统的角分辨率与  $\Delta d_x$  和  $\Delta d_y$  成正比关系,当  $d_x \ll f$  和  $d_y \ll f$  时,角度分辨率与焦距  $f$  成反比。若使光纤阵列相对于透镜在 X 或 Y 方向上发生相对移动,则透镜后准直的光束也会发生偏移,因此可通过这种小幅度移动阵列或透镜的方式来提高激光雷达系统的角度分辨率,如图 1(c)所示。

### 3 实验结果

磁光开关基于法拉第旋光效应,通过控制磁光晶体外加磁场的方向,实现对入射偏振光偏振面的改变,进行光路的切换。磁光开关的驱动电压低、串扰小,具有开关速度快、稳定性高、可靠性高等特点<sup>[12]</sup>。磁光开关的开关速度直接决定了激光雷达的扫描成像速度。磁光开关的插入损耗越大,激光雷达光链路损耗就越大,出射光的能量就越小,雷达的可探测距离就越短。磁光开关的回波反射信号也将被雷达的光电探测器所接收到,若磁光开关的回波信号太强,将导致光电探测器发生饱和现象,影响探测系统信号质量;同时回波损耗也将导致激光雷达的出射能量降低。因此,首先对系统采用的 1 $\times$ 8 磁光开关的开关速度、插入损耗和回波损耗三个性能参数进行了测试。

1550 nm 半导体激光器为光源,发射出的光经 1 $\times$ 8 磁光开关后经  $P_1 \sim P_8$  端口输出;利用 APD 分别探测光纤端口出射的光信号,用示波器对 APD 探测的光信号和驱动磁光开关的脉冲电信号进行采样;最终得到不同通道的光信号与驱动磁光开关的脉冲电信号时序图,如图 2 所示。其中  $t_D$  为磁光开关延迟时间, $t_{R1}$  为磁光开关上升沿时间, $t_L$  为磁光开关通光时间, $t_{R2}$  为磁光开关下降沿时间, $t_S$  为 1 $\times$ 8 磁光开关阵列扫描阵列间的延迟时间, $T$  为 1 $\times$ 8 磁光开关阵列扫描一个周期所需时间。同时用光功率计对 1 $\times$ 8 磁光开关各通道的插入损耗(IL)和回波损耗(RL)进行测试。根据不同通道光信号与驱动脉冲信号的时域关系得到各通道的扫描特性参数值,并通过多次实验,将各通道的扫描特性参数平均值记录于表 1 中。

从图 2 和表 1 可以看出,通过  $P_1$  通道光信号和驱动脉冲信号的关系可以得到  $t_D = 45 \mu\text{s}$ ,通过  $P_8$  通道光信号和驱动脉冲信号的关系可以得到  $t_S = 200 \mu\text{s}$ 。分析表 1 可以得到不同通道的上升沿时间  $t_{R1}$ 、通光时间  $t_L$  和下降沿时间  $t_{R2}$ ,通过公式  $T = t_D + 8 \times (t_{R1} + t_L + t_{R2}) + t_S$  得到 1 $\times$ 8 磁光开关阵列扫描周期为 1959.6  $\mu\text{s}$  时对应的激光雷达扫描频率为 510.3 Hz。根据表 1 测试数据可以得到:1 $\times$ 8 磁光开关插入损耗  $L_1 \leq$

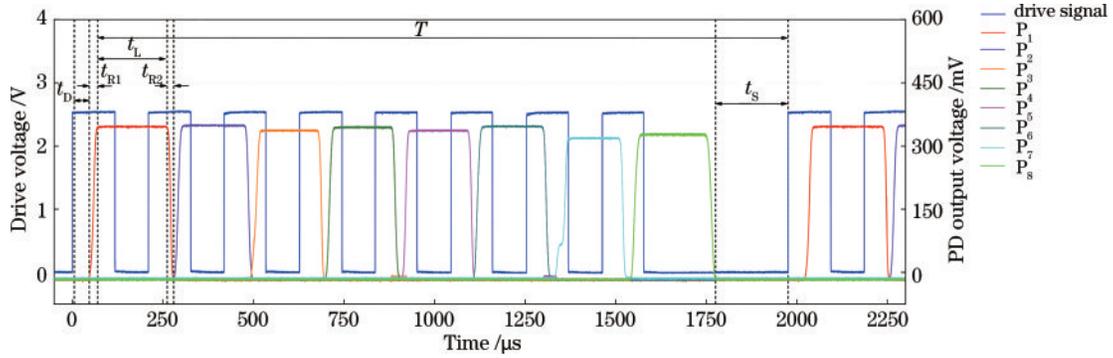


图2 1×8磁光开关各通道光信号与驱动脉冲信号的时域测试图

Fig. 2 Time-domain relation diagram of 1×8 magneto-optical switch's different channel optical signal and driving pulse signal

表1 实验用1×8磁光开关的性能参数

Table 1 Performance parameters of the 1×8 magneto-optical switch

Fiber optic port	$t_{R1}/\mu\text{s}$	$t_L/\mu\text{s}$	$t_{R2}/\mu\text{s}$	IL/dB	RL/dB
P <sub>1</sub>	23.0	196.2	22.2	1.00	45.19
P <sub>2</sub>	28.6	157.8	20.6	1.01	45.11
P <sub>3</sub>	27.8	156.2	22.2	1.20	45.14
P <sub>4</sub>	27.0	152.2	22.2	1.21	45.78
P <sub>5</sub>	25.4	156.2	24.6	1.32	45.59
P <sub>6</sub>	27.8	163.4	23.0	1.14	46.08
P <sub>7</sub>	38.2	139.4	24.6	1.35	45.17
P <sub>8</sub>	28.7	177.0	30.3	1.35	46.99

1.35 dB且回波损耗 $L_R \geq 45.11$  dB;MEMS光开关插入损耗 $L_I \geq 1.63$  dB,回波损耗 $L_R \leq 42.3$  dB,且通道间切换时间为ms量级<sup>[18]</sup>。磁光开关的开关速度快,且插入损耗小,回波损耗小。同时,磁光开关的驱动电压为2.5 V,通道串扰为40 dB,偏振相关损耗为0.20 dB,这些指标使磁光开关应用于激光雷达方面也具有优势。这些都更有利于实现基于磁光开关的激光雷达大探测距离、高测距精度、抑制通道信号间串扰。

为验证基于磁光开关的全固态激光雷达系统的三维探测能力,选取4辆玩具车模型作为探测目标,分别距离镜头1.93 m、3.25 m、4.54 m和5.46 m,距离地面0.86 m、0.89 m、0.94 m和1.01 m。各个探测目标沿Z轴方向位于一条垂直线上,如图3(a)所示。磁光开关的8个输出通道对应光纤阵列2×4子阵列单元,如图3(a)左下角所示。其中P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>是对第1辆玩具车(从透镜中心沿Z轴方向看)进行探测的两个不同位置点;P<sub>3</sub>和P<sub>4</sub>是对第2辆玩具车进行探测的两个不同位置点;P<sub>5</sub>和P<sub>6</sub>是对第3辆玩具车进行探测的两个不同位置点;P<sub>7</sub>和P<sub>8</sub>是对第4辆玩具车进行探测的两个不同位置点。考虑到“拖尾”现象,测量之前利用红色激光波分复用确认光纤阵列发出的光照射到对应的各个玩具车中间位置,防止一个激光脉冲同时打到两个物体上。对磁光开关1~8通道依次进行扫描探测,根据

上述对应关系实现激光雷达系统的横向扫描和纵向扫描。1×8磁光开关依次切换进行扫描,每个磁光开关通道的通光时间 $t_L$ 为139.4~196.2 μs,调制光脉冲周期为10 μs,每个通道含有多个光脉冲,即对一个探测点进行多次探测,当对8个探测点依次完成测距扫描时,8个探测点的回波光信号经过APD光电探测后由示波器采集。

基于磁光开关的全固态激光雷达系统对不同距离处目标进行测试前先对雷达系统沿Z方向的测距零点进行标定测量。该系统中任意函数发生器发出脉冲调制信号的同时也输出一路信号到示波器,用于雷达系统出射面距离的参考原点。收发透镜出射面设为测距零点,因此将标定目标放置于透镜出射面处,记录该目标接收到的脉冲信号的时间序列。随后,移走探测目标,调节设置任意函数发生器发出原点标定信号的相位,使其产生的脉冲信号的相位与标定目标的回波信号重合。图3(b)表明回波信号和基准信号的时域关系。其中图例中实线表示雷达系统出射面距离参考原点的基准信号;第二根虚线是距离雷达收发透镜1.93 m的第1辆玩具车上两个探测点的回波信号与基准信号的延时差 $\Delta t_1=12.939$  ns、 $\Delta t_2=12.922$  ns,对应距离为 $r_1=194.085$  cm、 $r_2=193.830$  cm;第三根虚线是距离雷达收发透镜3.25 m的第2辆玩具车上两个探测点的回波信号与基准信号的延时差 $\Delta t_3=21.775$  ns、 $\Delta t_4=21.787$  ns,对应距离为 $r_3=326.625$  cm、 $r_4=326.805$  cm;第四根虚线是距离雷达收发透镜4.54 m的第3辆玩具车上两个探测点的回波信号与基准信号的延时差 $\Delta t_5=30.679$  ns、 $\Delta t_6=30.639$  ns,对应距离为 $r_5=460.185$  cm、 $r_6=459.585$  cm;第五根虚线是距离雷达收发透镜5.46 m的第4辆玩具车上两个探测点的回波信号与基准信号的延时差 $\Delta t_7=36.596$  ns、 $\Delta t_8=36.624$  ns,对应距离为 $r_7=548.940$  cm、 $r_8=549.360$  cm。经与实际实验距离对比,基于磁光开关的全固态激光雷达系统的实验测量结果与实际相符合。

P<sub>1</sub>~P<sub>8</sub>通道各光纤阵列的坐标位置如图3(a)中左下角局部图所示,结合透镜焦距 $f=20$  cm,基于式(1)

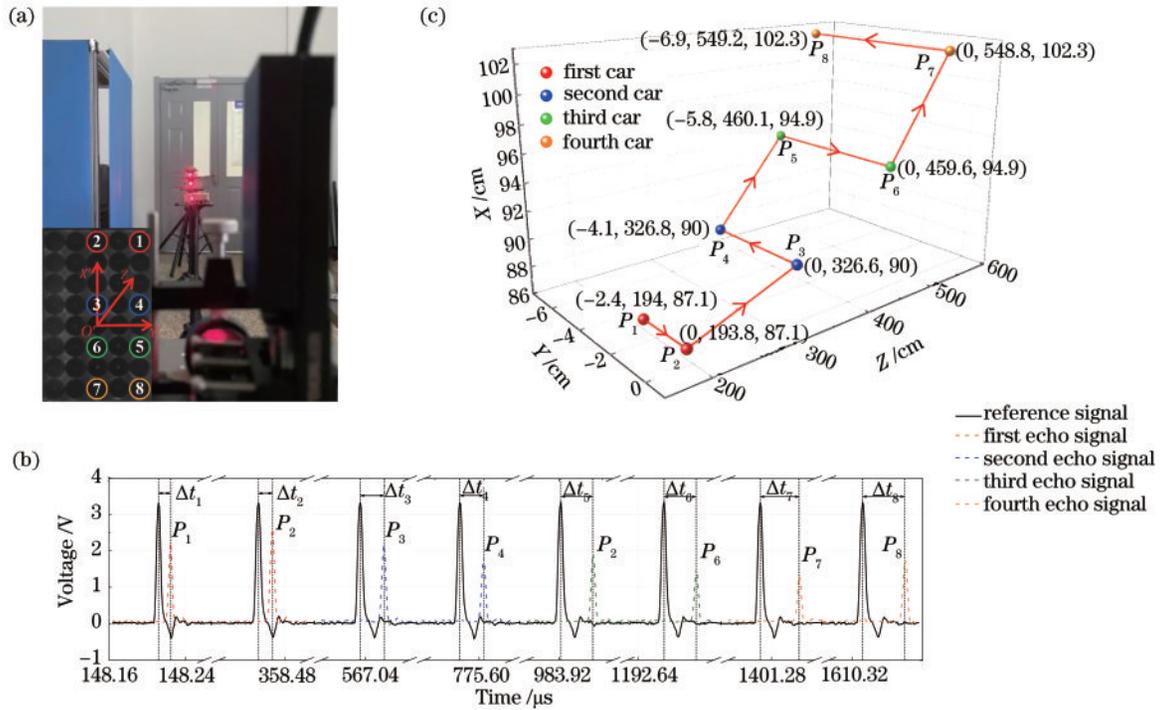


图3 基于磁光开关的全固态时分复用激光雷达系统探测不同距离处4个目标物(玩具车模型)实验图。(a)对距离雷达收发透镜1.93, 3.25, 4.54, 5.46 m的4辆玩具车的测试实验场景照片;(b)4辆不同位置玩具车的回波信号与基准信号时域关系图;(c)4辆不同位置玩具车的三维点云图(共8个探测点)

Fig. 3 Four targets (toy car model) at different distances away from the all-solid-state time division multiplexing lidar system based on magneto-optical switch are sensed. (a) Photo of the experiment showing four toy cars placed 1.93, 3.25, 4.54, 5.46 m, respectively, away from the lens; (b) time domain relation diagram of echo signal and reference signal of four toy cars in different positions; (c) 3D point cloud of four toy cars in different positions (total of 8 detection points)

和式(2)可求出各个光纤阵列通道对应的垂直偏转角 $\theta$ 和水平偏转角 $\varphi$ ;结合脉冲测距,得到探测目标与透镜中心距离 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_8$ ,则可得到探测目标点三维坐标 $P(r, \theta, \varphi)$ ,从而可绘制出图3(c)所示的点云图(其中连线表示激光雷达的扫描方向)。由图3(b)和图3(c)可以看出,基于磁光开关的全固态激光雷达系统通过磁光开关快速切换各阵列通道,光纤阵列加收发透镜实现光束转向,可实现对被测目标的全固态三维传感探测。

为了验证光纤阵列相对于收发透镜进行微移动可同时提高雷达成像分辨率和扩大视场角,利用基于磁光开关的全固态激光雷达系统对长度为17 cm、宽度为17 cm、高度为7.5 cm的立方体盒进行了三维成像探测。首先,利用激光功率计探头(50(150)A-BB-26, Ophir公司)测量了光纤阵列(FA)不同阵列通道光发射时峰值功率的平均值,为6.44 W(平均功率为3.22 mW)。2 m处立方体盒目标物反射回波信号到APD,输出的脉冲峰值电压为1.7 V。APD的探测灵敏度为85 kV/W,计算可得反射回波信号的脉冲峰值功率为20  $\mu\text{W}$ (平均功率为10 nW)<sup>[19]</sup>。同时,立方体盒距离镜头2.61 m,在距离立方体盒2 m处放置一块高反射率的板子作为背景,如图4(a)所示。实验中选取光纤阵列中间一列进行 $X'$ 方向传感探测,实验采用

光纤之间距离为 $\Delta d_x = \Delta d_y = 125 \mu\text{m}$ 的二维(5 $\times$ 8)光纤阵列和焦距为 $f = 20 \text{ mm}$ 的透镜,由式(1)可得所对应 $X$ 方向的垂直角分辨率 $\Delta\theta$ 为 $0.36^\circ$ ,垂直视场角为 $2.51^\circ$ 。将光纤阵列安装在电控微位移平台上(KMTS25E/M, Thorlabs公司)进行 $Y'$ 方向往复微扫描传感探测,移动分辨率为 $0.05 \mu\text{m}$ ,双向可重复性为 $1.6 \mu\text{m}$ ,相对于 $X'$ 方向,可实现更高系统的角度分辨率和更大的角度成像范围。如:设置微位移台往复移动18步(单向9步),步长 $62.5 \mu\text{m}$ ,对应激光雷达系统的水平角分辨率提高至 $0.18^\circ$ ,水平视场角提高至 $7.92^\circ$ ;磁光开关沿 $X'$ 轴切换各阵列通道,激光雷达的垂直角分辨率为 $0.36^\circ$ ,垂直视场角为 $2.51^\circ$ 。

基于磁光开关的全固态激光雷达系统对距离为2.61 m、长度为17 cm、宽度为17 cm、高度为7.5 cm的立方体盒进行了三维成像探测,得到的三维点云图(其中双向箭头代表微位移平台往复移动方向)如图4(b)所示。根据图4(b)可以看出,每个点云的三维空间坐标为 $(X, Y, Z)$ ,通过图1(b)所描述空间关系可计算出每个点云的空间位置坐标 $(r, \theta, \varphi)$ <sup>[17]</sup>。根据相邻点云沿 $X$ 方向的垂直偏转角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 的差值,可计算出激光雷达系统的垂直角分辨率为 $0.36^\circ$ ;依据相邻点云沿 $Y$ 方向的水平偏转角 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的差值,可计算出激光雷达系统的水平角分辨率为 $0.18^\circ$ 。基于磁光开关的全固

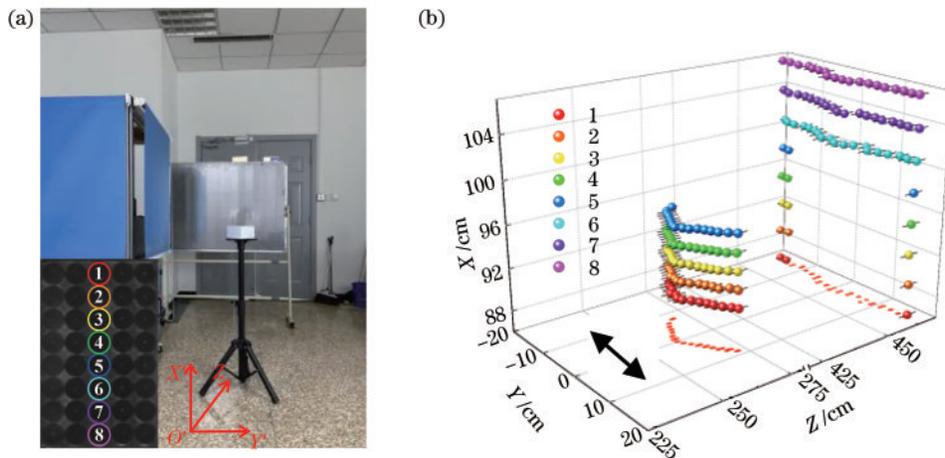


图 4 基于磁光开关的全固态时分复用激光雷达系统对立方体盒进行三维传感测试的实验。(a)立方体盒三维扫描的实验照片；(b)立方体盒的三维点云图

Fig. 4 Three-dimensional sensing of cube box sensed by all solid-state time division multiplexing lidar system based on magneto-optical switch. (a) Photo of the experiment showing cube box 3D imaging; (b) 3D point cloud of cube box

态激光雷达系统结合微位移平台可以进一步提高激光雷达水平分辨率和水平视场角,若采用双轴微抖动平移台,则可实现水平和垂直双轴成像分辨率及视场角的提高,雷达系统的角分辨率与移动平台的步进分辨率和扫描范围相关。

## 4 结 论

根据磁光开关的开关速度快的技术特点优势,实验研究了一种磁光开关时分复用全固态激光雷达系统,采用 $1 \times 8$ 光纤磁光开关和光纤阵列搭建了全固态激光雷达三维传感成像实验系统,并对其进行了三维扫描成像能力实验验证。激光雷达实验系统的出射平均光功率为 $3.22 \text{ mW}$ ,实验实现了距离 $5.4 \text{ m}$ 内的目标物传感探测,验证了其具有 $510.3 \text{ Hz}$ 扫描频率和 $0.36^\circ$ 角度分辨率的三维成像能力,且该雷达系统通过微抖动平移台可将角度分辨率进一步提高到 $0.18^\circ$ 。基于磁光开关的全固态激光雷达系统相对于MEMS光开关具有更高的可靠性,还具有更高的扫描频率,在目标识别、实时成像等应用领域具有良好的技术发展前景。

## 参 考 文 献

- [1] 王佳立, 徐孝彬, 吴家林, 等. 脉冲激光探测多平面目标回波特性[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0604004.  
Wang J L, Xu X B, Wu J L, et al. Echo characteristics of multiplane targets detection using pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0604004.
- [2] 张磊, 徐孝彬, 曹晨飞, 等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0610001.  
Zhang L, Xu X B, Cao C F, et al. Robot pose estimation method based on image and point cloud fusion with dynamic feature elimination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0610001.
- [3] 狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600002.  
Di H G, Hua D X. Research progress of lidar in cloud detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600002.
- [4] 魏雨, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 固态面阵激光雷达接收光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 517-526.  
Wei Y, Jiang S L, Sun G B, et al. Design of solid-state array laser radar receiving optical system[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 517-526.
- [5] 范娜娜, 王懋, 温少聪, 等. 基于二维MEMS振镜的激光雷达系统的光学设计[J]. 光学技术, 2020, 46(3): 290-294.  
Fan N N, Wang M, Wen S C, et al. Optical design for 2D MEMS-based lidar system[J]. Optical Technique, 2020, 46(3): 290-294.
- [6] Zhou G Q, Zhou X, Yang J Z, et al. Flash lidar sensor using fiber-coupled APDs[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4758-4768.
- [7] Li Z, Zang Z H, Han Y Q, et al. Solid-state FMCW LiDAR with two-dimensional spectral scanning using a virtually imaged phased array[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16547-16562.
- [8] Raptakis A, Gounaridis L, Weigel M, et al. 2D optical phased arrays for laser beam steering based on 3D polymer photonic integrated circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6509-6523.
- [9] Cao X Y, Qiu G F, Wu K, et al. Lidar system based on lens assisted integrated beam steering[J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5816-5819.
- [10] 李长安, 江毅, 全本庆, 等. 无抖动机械式光开关结构设计[J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 190-192.  
Li C A, Jiang Y, Quan B Q, et al. Structure design of mechanical-optical switch with No jitter[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(2): 190-192.
- [11] 刘克, 牟思璇, 黄晖, 等. 硅基矩形结构马赫-曾德 $2 \times 2$ 热光开关的设计与仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0213001.

- Liu K, Mu S X, Huang H, et al. Design and simulation of silicon-based rectangular Mach-Zehnder  $2 \times 2$  thermo-optical switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2): 0213001.
- [12] 翁梓华, 朱金攀, 何竞彦, 等. 纳秒量级开关时间的全光纤磁光开关[J]. *光子学报*, 2012, 41(12): 1441-1446.  
Weng Z H, Zhu J P, He J Y, et al. All-fiber magneto-optic switch with the nanosecond-level switching-time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1441-1446.
- [13] 徐国权, 李广英, 万建伟, 等. 脉冲调制激光雷达水下成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(3): 20210204.  
Xu G Q, Li G Y, Wan J W, et al. Underwater imaging system of pulse modulated lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210204.
- [14] 况耀武, 何志平, 徐卫明, 等. 收发共光路单模光纤耦合光学系统研究[J]. *半导体光电*, 2019, 40(2): 206-210, 230.  
Kuang Y W, He Z P, Xu W M, et al. Study of the receiver/transmitter common-path optical system based on single-mode fiber coupling[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2019, 40(2): 206-210, 230.
- [15] 张广进, 吴侃, 李超, 等. 透镜辅助的集成收发调频连续波激光雷达[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0623001.  
Zhang G J, Wu K, Li C, et al. Lens-assisted frequency modulated continuous wave lidar based on integrated transceiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0623001.
- [16] 祖爽, 胡攀攀, 潘奇. 基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0810001.  
Zu S, Hu P P, Pan Q. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810001.
- [17] Yao X S, Liu X S, Hao P. Scan-less 3D optical sensing/lidar scheme enabled by wavelength division demultiplexing and position-to-angle conversion of a lens[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35884-35897.
- [18] Pollock C, Pardo F, Imboden M, et al. Open loop control theory algorithms for high-speed 3D MEMS optical switches[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2010-2019.
- [19] 谭显裕. 激光雷达测距方程研究[J]. *电光与控制*, 2001, 8(1): 12-18.  
Tan X Y. Research on ranging equation for laser radar[J]. *Electronics Optics & Control*, 2001, 8(1): 12-18.