

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 面向MEMS振镜激光雷达系统的近程接收机设计

万岁岁, 庞亚军, 薛瑞祥, 白振旭

#### 引用本文:

万岁岁, 庞亚军, 薛瑞祥, 等. 面向MEMS振镜激光雷达系统的近程接收机设计[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230287.

Wan S S, Pang Y J, Xue R X, et al. Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230287.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.230287>

收稿日期: 2023-11-22; 修改日期: 2024-02-22; 录用日期: 2024-02-22

### 相关论文

#### 单光子激光雷达技术发展现状与趋势

赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 姜成昊, 蒋衍, 赵政伟, 朱精果

光电工程 2024, 51(3): 240037 doi: 10.12086/oe.2024.240037

#### 基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试

王玲, 刘博, 吴城, 罗兰, 杨玉强

光电工程 2024, 51(3): 240032 doi: 10.12086/oe.2024.240032

#### 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法

胡申博, 刘俊辰, 余苏, 杨承昱, 曲兴华, 张福民

光电工程 2024, 51(3): 230285 doi: 10.12086/oe.2024.230285

#### 高精度相位式激光雷达测距系统的设计

李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 张传辉, 李伟, 牟媛慧, 蔡恩林

光电工程 2024, 51(3): 230246 doi: 10.12086/oe.2024.230246

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.230287

## 面向 MEMS 振镜激光雷达系统的近程接收机设计

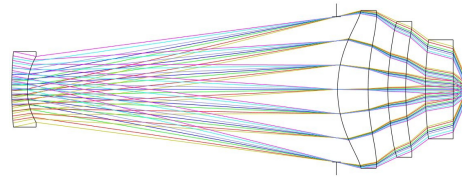
万岁岁<sup>1,2</sup>, 庞亚军<sup>1,2\*</sup>, 薛瑞祥<sup>1,2</sup>, 白振旭<sup>1,2</sup><sup>1</sup>河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;<sup>2</sup>河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401

**摘要:** 针对 1550 nm 波段铟镓砷探测器小光敏面无法有效接收 MEMS 较大扫描视场回波的问题, 设计了一种适用于近程宽视场的接收装置。接收端光学系统利用像方远心结构作为接收天线, 通过仿真在 1 mm 的光敏面下实现了 36° 的接收视场, 整体相对照度超过 95%, 集光性能和通光性能较好。同时, 接收电路采用 T 型网络放大结构, 结合时刻鉴别电路, 利用 TDC7200 实现高精度时间测量。实验结果表明, 飞行时间测量精度在 200 ns 量程下小于 120 ps, 在 8 m 范围内测距精度优于 2 ns, 能够满足近程探测的需要。

**关键词:** 微机电系统; 大视场; 光学设计; 近程探测

中图分类号: TN274

文献标志码: A



万岁岁, 庞亚军, 薛瑞祥, 等. 面向 MEMS 振镜激光雷达系统的近程接收机设计 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230287

Wan S S, Pang Y J, Xue R X, et al. Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230287

## Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror

Wan Suisui<sup>1,2</sup>, Pang Yajun<sup>1,2\*</sup>, Xue Ruixiang<sup>1,2</sup>, Bai Zhenxu<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;<sup>2</sup>Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China

**Abstract:** To address the ineffective reception of larger scanning field echoes by the small photosensitive area of the indium gallium arsenide InGaAs detector in the 1550 nm wavelength band, a receiver device suitable for near-range wide field-of-view applications has been designed. The optical system at the receiving end utilizes an afocal telecentric structure as the receiving antenna, achieving a reception field-of-view of 36° at a photosensitive area of 1 mm. The relative illuminance exceeds 95%, demonstrating excellent light collection and transmission characteristics. Additionally, the receiver circuit adopts a T-network amplification structure combined with a moment identification circuit, utilizing the TDC7200 to achieve high-precision time measurements. The flight time measurement accuracy is less than 120 ps within a range of 200 ns, and the experimental results demonstrate ranging accuracy better than 2 ns within an 8 m distance, meeting the requirements for near-range detection.

**Keywords:** microelectromechanical systems; large field of view; optical design; short-range detection

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-02-22; 录用日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61905063); 河北省自然科学基金资助项目 (F2020202055)

\*通信作者: 庞亚军, yjpang@hebut.edu.cn.

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

## 1 引言

相比于摄像头、毫米波雷达等探测方式, 激光雷达以高准直度的激光光束来获取目标距离、方位、形态, 以及运动状态等信息, 具有更加优越的三维信息感知能力<sup>[1]</sup>。早期激光雷达体积大、造价高, 主要应用于军事、测绘、环境监测等领域<sup>[2-4]</sup>, 而现如今激光雷达已渐渐地融入到消费市场, 进一步在无人驾驶、智能感知<sup>[5]</sup>等方面发挥出巨大作用, 成为了当今的研究热点。

激光雷达的主要功能可划分为测距和扫描成像两个主要模块。随着汽车、无人机等激光雷达主要搭载平台对其重量、体积和功耗的要求, 传统机械激光雷达不断向固态化扫描方式发展。在众多扫描器件中, MEMS 微镜由于体积小、功耗低、角度分辨率高等优点, 逐步发展成为激光雷达扫描的热点方向<sup>[6]</sup>。其中微镜的镜面尺寸、偏转角和振动频率等参数同样对 MEMS 激光雷达整体性能有重要影响。为解决 MEMS 扫描角度有限的问题, Lee 等人<sup>[7]</sup>设计了一种基于 MEMS 的折叠式均匀扫描光学系统, 该系统包括聚焦正透镜、f-0 透镜组、发散负透镜组, 能在  $40^\circ \times 40^\circ$  视场范围内均匀扫描。此外, 德国的 Fabian 等人<sup>[8]</sup>于 2020 年展示了世界首个机械扫描角度超过  $\pm 45^\circ$  的谐振一维 MEMS 反射镜。随着激光雷达技术的进步, MEMS 的扫描视场不断增大, 因此对发射视场和接收视场的匹配要求也日益提高。

对于整体的 MEMS 激光雷达, 光学设计主要分为共轴与离轴两种方式, 而基于共轴的光学系统由于接收视场与扫描视场同步, 实际可探测视场较广。一般在共轴光路需利用半透半反透镜<sup>[9]</sup>、偏振分光棱镜<sup>[10]</sup>或者空间光环形器<sup>[11]</sup>等方式实现收发隔离, 但该方法若隔离度不足或当出射激光光束无法全部有效准直在 MEMS 微镜范围之内, 那么接收通道易发生串扰, 难以区分主波与回波信号, 后续信号处理电路较为困难, 适用性较差。而基于离轴的雷达系统, 光路更容易调节, 且收发两通道彼此隔离, 避免了反射的影响, 但是该方法接收视场相对较小, 不能覆盖相应的扫描区域。为了扩大探测范围, 在离轴系统中常采用增大探测器等效光敏面的方法, 如 Lee 等人<sup>[12]</sup>利用 7 个单通道 PIN 探测器, 并运用六棱柱分束法, 提高了探测器的有效孔径, 扩大接收视场到  $\pm 5^\circ$ , 有效光敏面直径从 0.5 mm 增加到 1.5 mm。李启坤等人<sup>[13]</sup>

利用浸没透镜实现了半像高小于 1 mm, 视场角为  $67^\circ$  的接收天线。范娜娜<sup>[14]</sup>利用 16 线 APD 阵列和纤维光锥实现了  $40^\circ \times 10^\circ$  接收视场。Xu<sup>[15]</sup>等人开发了新型非同轴 MEMS 激光雷达, 采用了一个面积较小的垂直扫描和两个面积较大的同步水平扫描单轴 MEMS 微镜实现了  $60^\circ \times 10^\circ$  的接收范围; 除增大接收面积外, 使用灵敏度更高的探测器, 提高接收装置对目标信号的响应能力, 也能实现较大接收视场范围。如 Kota 等人<sup>[16]</sup>使用了  $256 \times 64$  单光子探测器阵列, 系统整体实现  $40^\circ \times 10^\circ$  的接收视场, 测量范围达到 25 m。

同时在不同波段的 MEMS 激光雷达与之可适配的探测器也具有较大差异。Barry<sup>[17]</sup>等人在陆军实验室开发的雷达基础上利用高功率 1550 nm 激光器通过锥形光纤束在 1 mm 的光敏面上设计了视场为  $42^\circ \times 21^\circ$ , 量程为 35 m, 距离分辨率为 40 cm 的结构装置。李小宝<sup>[18]</sup>通过接收视场为  $50^\circ$  的非成像光学镜组, 利用 1064 nm 激光器在直径 3 mm 的 Si 型 APD 探测器上, 设计了探测距离为 40 m, 精度为 15 cm 的雷达系统。罗栋<sup>[19]</sup>借助广角镜头在 1 mm 的光敏面上实现了  $20^\circ \times 20^\circ$  接收视场, 通过对 905 nm 激光脉冲编码, 在 5 m 范围内实现的测距精度为 3 cm。Wang<sup>[20]</sup>等人利用 SiPM 实现了接收视场为  $20^\circ$ , 在 50 m 范围内测距精度约为 5 cm 的探测性能。基于 1550 nm 的 MEMS 激光雷达相比于其他波段雷达, 虽然具有更大的发射功率, 有利于实现远距离探测, 但在该波段探测器的选择却较为单一, 其它波段的 MEMS 激光雷达探测器主要以硅基材料为主, 可选择的种类较多<sup>[21]</sup>, 然而对于 1550 nm 波段则主要以铟镓砷材料为主, 其中大规模的铟镓砷阵列式 APD 探测器价格十分昂贵, 单点探测器的光敏面又比较小, 大部分均不超过 1 mm, 导致需要大视场的离轴接收装置一般较为复杂, 且在探测范围内照度相对均匀性较差。

为解决 1550 nm 波段铟镓砷探测器光敏面较小的问题, 本文设计了一种收发分置接收装置, 经仿真该装置在直径为 1 mm 的探测器上实现了  $36^\circ$  的接收视场, 系统 F 数为 0.55, 具有较高的集光性能, 整体结构相对简单, 通光性能较好。此外, 本文还设计了一种基于 T 型反馈网络的激光雷达回波信号处理系统, 利用 TDC 芯片实现了高精度时间测量。实验结果表明, 测量精度在 200 ns 量程下实际测量飞行时间低于 120 ps, 系统整体在 8 m 范围内测距精度优于 2 ns,



能够满足对 MEMS 雷达近程大视场范围接收的需要。

## 2 系统整体构成

本文的激光雷达系统如图 1 所示, 整体结构划分为光学收发部分、激光扫描执行机构、回波处理电路以及 FPGA 信息采集与控制单元。该系统以 1550 nm 窄线宽光纤激光器作为发射光源, 在 FPGA 的一路触发脉冲信号下, 发射 10 ns 范围内脉宽可调、重频为 100 kHz 的脉冲激光, 经过发射光学部分准直到直径为 3 mm 一维 MEMS 镜面上。为了扩大发射端扫描范围, 使用两相电机完成水平方向扫描, MEMS 振镜完成垂直方向扫描, 两者构成二维扫描机构实现预期光束偏转。接收端通过离轴光路实现大视场接收, 由接收电路提取回波时刻鉴别信号, 然后经过 TDC 芯片完成高精度时间间隔测量, 最后通过 FPGA 实现角度位置与飞行时间信息的采集上传。

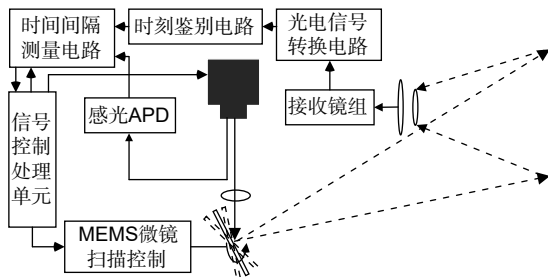


图 1 系统整体结构示意图  
Fig. 1 System overall structure diagram

### 2.1 发射端光学设计

发射端使用 1550 nm 短脉冲激光器, 采用主振荡器加功率放大器结构, 输出与监控端口均采用 SMF-

28e 标准单模光纤, 数值孔径为  $0.122NA$ ,  $M^2$  因子小于 1.2。扫描器件选用西安知微的直径为 3 mm 的 P1130 谐振式微镜, 它在闭环控制系统下, 实时偏转角度可由式 (1) 计算:

$$\theta_t = \left(\frac{A_n}{2}\right)\sin(2\pi ft), \quad (1)$$

式中:  $A_n$  为光学扫描全角,  $\theta_t$  表示 MEMS 光学偏转角度,  $f$  表示微镜谐振频率, 取值为 1.15 kHz。由于 MEMS 的非线性扫描特性, 在逐点扫描过程中产生了中间稀疏、两端密集的非均匀光斑阵列。

图 2 展示了在振镜扫描 1/4 周期处、激光重频为 100 kHz 的条件下, 使用不同准直透镜得到的 3 mm 与 5 mm 光斑阵列图像, 对于高精度的激光雷达成像, 应该尽量保持激光脚点互不干扰, 同时要求光斑实现更大空间覆盖率, 所以需要充分考虑焦距的大小。假设经过 MEMS 反射后的光斑大小按照传输方向是以双曲线规律变化, 可以得到像方光斑最大半径与探测距离的关系为

$$\omega'(z) = \frac{\lambda f}{\pi \omega_0} \sqrt{1 + \left(\frac{z\pi\omega_0^2}{\lambda f^2}\right)^2}, \quad (2)$$

其中:  $\omega_0$  表示激光束腰半径,  $z$  表示像方束腰与目标的探测距离, 根据上式对激光波长为 1550 nm, 在不同探测距离下的光斑进行仿真, 结果如图 3 所示。由图可知, 焦距较小的准直透镜会在远端形成较大的光斑导致成像质量恶化, 而假设选择较大的焦距, 虽然能够提高在远端成像的清晰度, 但是光斑在初始位置尺寸相对较大, 无法有效准直到 MEMS 镜面上, 从而造成过多的能量损失。综上所述, 使用焦距为 11.32 mm 的偶次非球面透镜作为准直器, 其发散半角为  $0.026^\circ$ ,

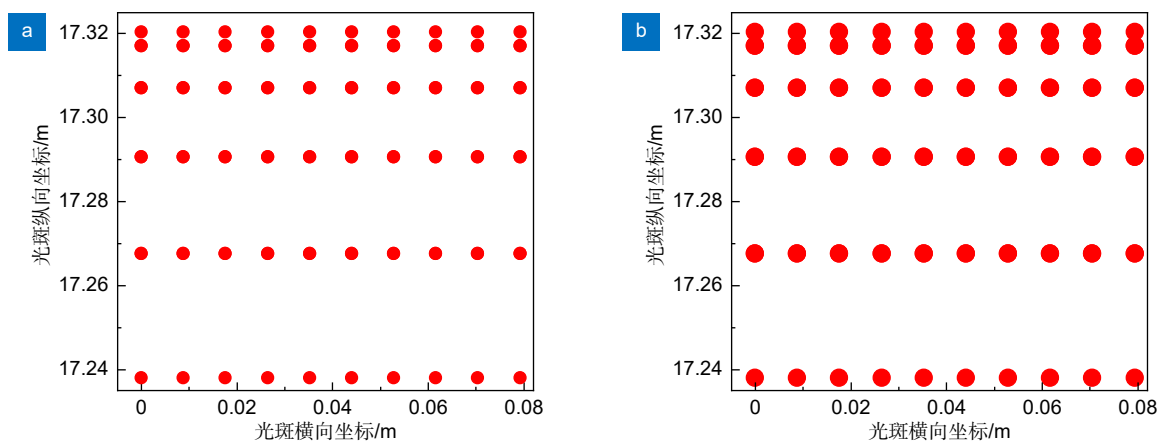


图 2 MEMS 扫描光斑阵列。(a) 光斑直径等于 3 mm; (b) 光斑直径等于 5 mm  
Fig. 2 MEMS scanning spot array with varying diameters. (a) Spot diameter of 3 mm; (b) Spot diameter of 5 mm

经光学系统仿真, 在不同扫描角度下在 MEMS 上的光斑分布如图 4 所示, 输出光斑直径约为 2.94 mm, 平均损失能量小于 25%, 能够满足大功率激光扫描实现近程探测的要求。

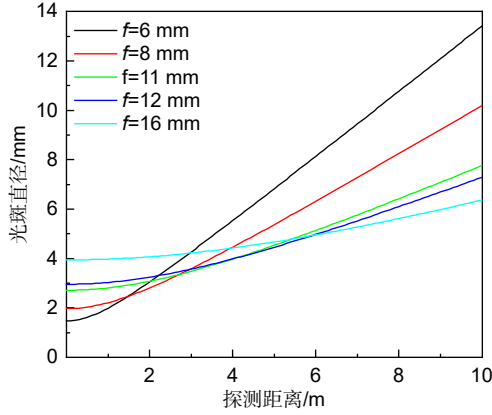


图 3 不同焦距光斑直径变化

Fig. 3 Variation of light spot diameter with different focal lengths

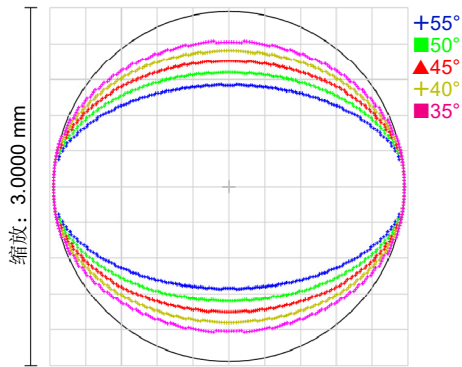


图 4 各偏转角 MEMS 光斑分布

Fig. 4 Angular distribution of MEMS light spot deviations

## 2.2 接收端光学设计

一般激光雷达方程可以表示为<sup>[22]</sup>

$$P_R = \frac{P_L G_T}{4\pi R_L^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R_M^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_{Atm} \eta_{Sys}, \quad (3)$$

式中:  $P_L$  为发射峰值功率,  $G_T$  为发射天线增益,  $R_M$  与  $R_L$  分别表示被探测物体表面距离接收端与发射端的距离,  $D$  为系统有效接收直径,  $\eta_{Atm}$  为大气透过率,  $\eta_{Sys}$  为光学系统透过率, 设  $\Omega_i$  为发射孔径立体角, 则  $G_T = 4\pi/\Omega_T$ ,  $\Omega_T \approx \pi[\omega'(z)]^2/R_L^2$ . 单位面积散射截面<sup>[23]</sup>可表示为

$$\sigma^0 = 4\pi f_r \cos\theta_i \cos\theta_r. \quad (4)$$

设  $\beta_i$  与  $\beta_r$  分别表示入射光线与反射光线相对水平位置的夹角, 且  $\beta_i = 2\alpha_{MEMS}$ , 其中  $\alpha_{MEMS}$  表示 MEMS 微镜扫描摆动角度, 且  $\alpha_{MEMS}$  需满足式 (5), 式中  $L$  表

示收发两端距离,  $\theta_{max}$  表示最大接收半角:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{L_d}{L} - \tan\theta_{max}\right) \leq \alpha_{MEMS} \\ \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{L_d}{L} + \tan\theta_{max}\right) \geq \alpha_{MEMS} \end{cases}. \quad (5)$$

由于收发两端的距离远小于目标探测距离, 故令  $\beta_i = \beta_r$ , 式 (4) 可改写为式 (6), 式 (6) 中  $\varphi$  表示物体反射面相对水平位置的夹角:

$$\sigma^0 = 4\pi f_r \cos^2(\beta_i + \varphi). \quad (6)$$

在近程激光探测下, 光束先经过 MEMS 镜面反射, 然后由接收光学系统收集在探测物体表面散射的回波信号, 设探测物表面符合朗伯反射特性, 其双向散射分布函数可表示为  $\rho_0/\pi$ , 由于光斑面积远小于目标有效面积, 则  $A \cos(\beta_i + \varphi) \approx \pi[\omega'(z)]^2$ , 式中  $A$  表示投射在物体表面的光斑面积, 则雷达反射截面  $\sigma$  为

$$\sigma = A\sigma_0 \approx 4\pi\rho_0[\omega'(z)]^2 \cos(\beta_i + \varphi). \quad (7)$$

将式 (7) 带入到式 (3), 并考虑 MEMS 振镜最大能量损失, 接收回波功率可表示为式 (8), 式中  $\rho = \rho_0\rho_{MEMS}$ ,  $\rho_0$  与  $\rho_{MEMS}$  分别表示探测目标和 MEMS 微镜反射率。

$$P_R = \frac{P_L D^2 \rho \cos(2\alpha_{MEMS} + \varphi) \sin(\alpha_{MEMS} + \pi/4)}{4R_M^2} \eta_{Atm} \eta_{Sys}. \quad (8)$$

改变不同被探测物体表面位置, 接收回波功率随着 MEMS 偏转角度变化如图 5 所示。

为实现较高的探测概率, SNR 一般要求取为 8<sup>[24]</sup>, 设大气透过率为 0.99, 系统透过率为 0.7, MEMS 镜面反射率为 0.95, 机械偏转角设为  $\pm 10^\circ$ , 目标反射率为 0.1, 1550 nm 激光器实际发射峰值功率可达 1000 W, 为了实现较大的接收视场, 对于任何探测光学系统, 应满足  $A\omega/nD \leq 1$  的条件<sup>[25]</sup>. 取半视场  $\omega$  为  $18^\circ$ , 在接收光敏面直径  $D$  为 1 mm 的限制下, 则入瞳直径  $A$  最大为 3.18 mm. 设探测器最小可接收回波功率为  $-32$  dBm, 饱和光功率为  $25 \mu\text{W}$ , 那么由式 (8) 结合图 5 分析, 可得探测距离范围约为 2~12 m. 另外为了提高 MEMS 光学接收系统的集光性能, 对于强接收光学系统应具备大的相对孔径, 一般要求 F 数小于 1.4<sup>[26]</sup>, 同时还应要求尽量使用较少的镜片, 使得接收系统具有较好的透光性能. 经上述分析确定光学接收系统设计指标如表 1 所示。

对于设计具有较大相对孔径和大视场的物镜结构, 需要综合考虑外形尺寸、结构复杂度和工作距离长度等因素. 根据上述条件, 在设计过程中设计较大的孔

径容易导致轴外光线超出光敏面, 能量损失较为严重。而若减小像方焦距, 扩大接收范围, 则又导致边缘视场像差难以矫正。若考虑使用浸没透镜, 采用反远距结构进行设计, 将会导致整体相对照度分布不均匀, 且浸没透镜在使用时, 需要将光电探测器粘贴在其后表面, 但探测器的保护窗和光敏面实际存在一定的间隙, 这将给系统的装调带来不便<sup>[13,26]</sup>。本文对这种结构进行改进, 采用像方远心光路, 后组使用3片正透镜构成聚光物镜型结构, 提供较大的相对孔径, 前组

利用弯月型负透镜, 平衡后组由于较大的正光焦度产生的像差, 并使用非球面透镜矫正球差和轴外边缘视场的各类像差, 提升像面照度均匀性。整体结构较为简单, 减小了光电探测器的装调难度。

通过合理分配后组的光焦度, 优化后的结构见图6所示。该系统的入瞳直径为3 mm, 实际半像高为0.49 mm, FOV达到36°, F数为0.55, 具有较高的集光性能。图7和图8表明接收镜组能够实现将能量全部集中在直径为1 mm的光敏面区域内。图9表

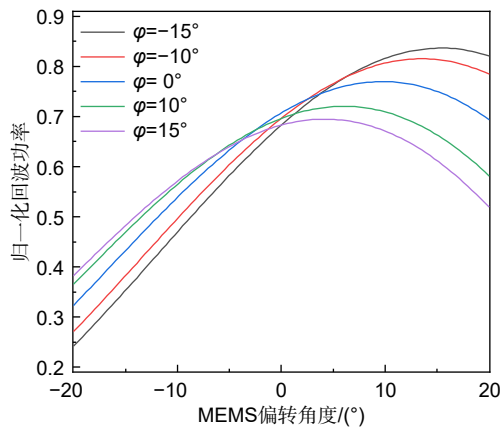


图5 MEMS偏转角与回波功率变化关系

Fig. 5 MEMS deflection angle and echo power correlation

表1 光学接收系统指标

Table 1 Optical receiver system specifications

参数	指标
工作波段	1550 nm
全视场角	≥30°
全像高	≤1 mm
F数	≤1.4
入瞳直径	≥3 mm
全视场相对照度	≥90%
天线接收增益	≥9.4
系统长度	≤50 mm

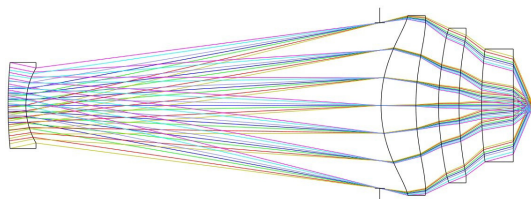


图6 接收光学天线结构

Fig. 6 Optical antenna structure for reception

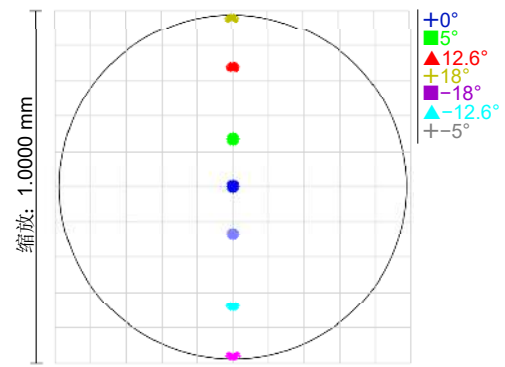


图7 探测器表面光迹图

Fig. 7 Surface track image of the detector

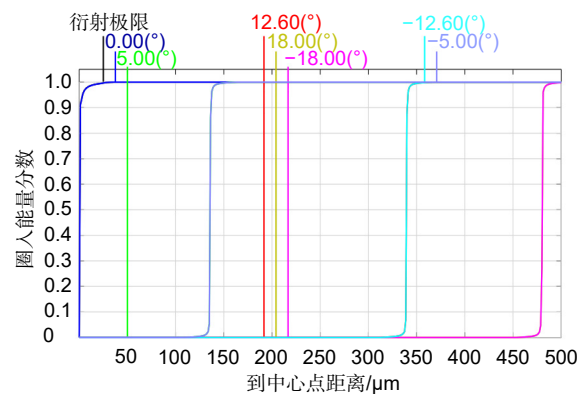


图8 几何圈入能量图

Fig. 8 Geometric ring entrance energy map

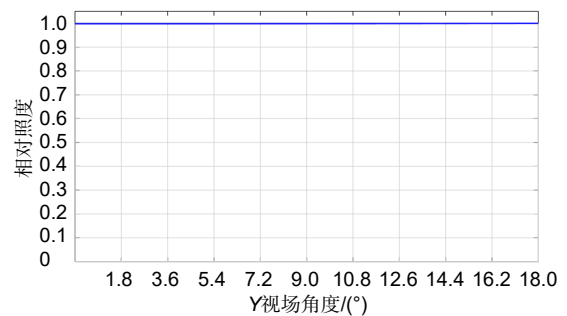


图9 不同视场相对照度分布

Fig. 9 Distribution of relative illuminance in different fields of view

明系统像面相对照度超过 95%，全视场内能量分布均匀。且该结构整体畸变小于 5%，系统后焦长为 1.5 mm，接收天线光学增益<sup>[27]</sup>为 9.5，均符合设计要求。

### 2.3 硬件电路设计

为测量脉冲飞行距离和回波信号强度，需要利用前端电路将接收系统的光信号转为电信号，探测器选用光特科技公司直径为 1 mm 的 InGaAs APD，前置运放使用具有超低偏置电流、低噪声和较高压摆率的 OPA657 作为跨阻放大器，并利用 T 型网络作为反馈电路，输出电压表示为  $V_o = I_{in}(R_1 + R_3 + R_3R_1/R_2)$ ，DS1100-20 组成的可调延时电路和 R5, R6 组成的衰减电路，共同与高速比较器 TLV3501 构成恒定比例时刻鉴别电路。为了提高检测概率，降低虚警率，恒比定时电路还需和前沿阈值检测电路通过高速与门相与后输出时间停止信号。设计回波接收电路如图 10 所示，经过仿真与实际测试后，系统输出的整形脉冲满足后续 TDC 电路的时序要求。

时间测量部分使用了 TI 公司推出的低功耗的数

字时间转换器 TDC7200 芯片，它可以实现 55 ps 的分辨率和 35 ps 的标准偏差范围。其内部能实现自动校准功能，可以补偿随着系统噪声和温度变化等因素带来的时间偏差。由于该芯片需要提供外部时钟，用于精确地校准内置时基。因此测量精度很大程度依赖外部时钟精度。一般考虑选用 16 MHz 的参考时钟获取较好的性能。设计时间测量电路如图 11 所示。

TDC7200 内部使用两点校准方法用于确定实际的时间最小分辨单位。先对外部时钟的单个时钟周期进行测量，其结果存储在 CAL1 寄存器中，然后对 CONFIG2 寄存器中的 CAL2\_PERIODS 设置的外部时钟周期进行测量，其结果存储在 CAL2 寄存器中。结合外部基准时钟周期计算出校准系数可表示为

$$normLSB = \frac{CLOCKperiod}{\left(\frac{CAL2 - CAL1}{(CAL2\_Periods) - 1}\right)} \quad (9)$$

芯片内部结构如图 12 所示，时间测量部分取决于粗计数器和时钟计数器。前者计算环形振荡器周期性循环的次数，并将结果寄存在 TIME1 到 TIME6 中。

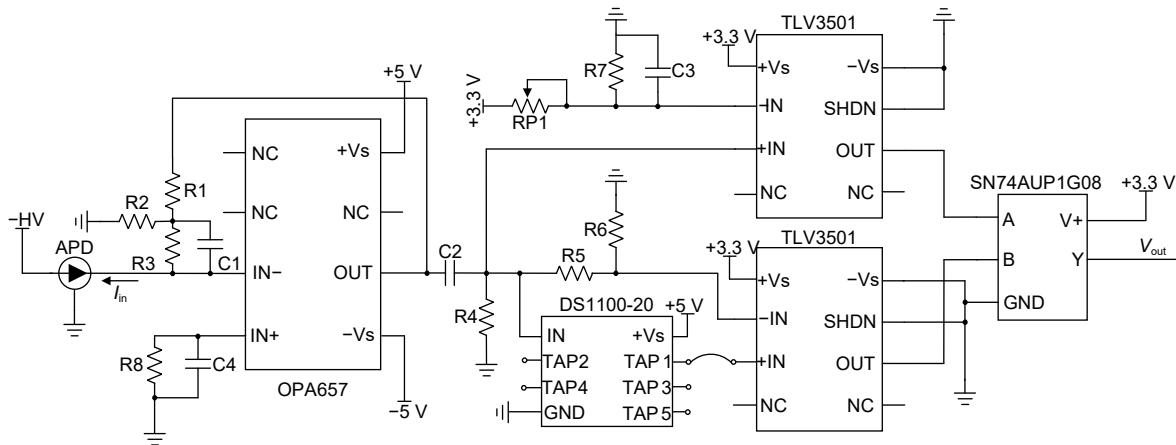


图 10 大视场回波接收电路

Fig. 10 Wide angle echo reception circuit

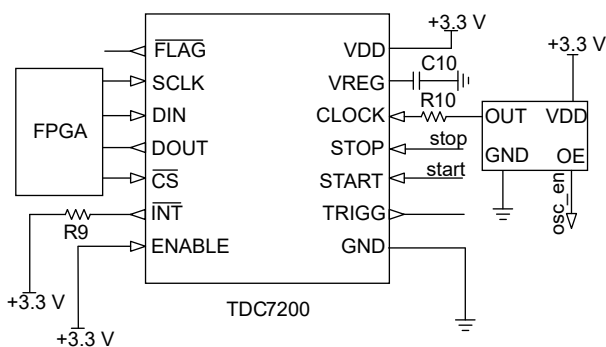


图 11 TDC7200 时间测量电路图

Fig. 11 Design of TDC7200 time measurement

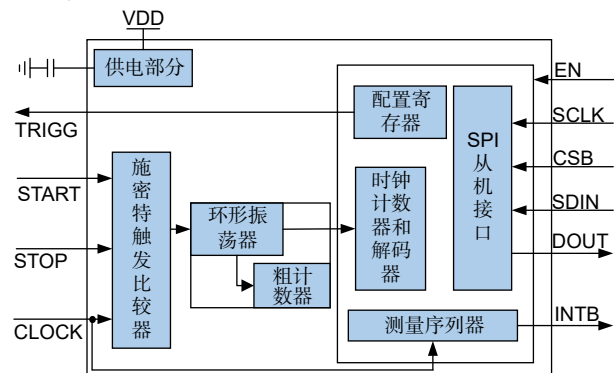


图 12 TDC7200 内部原理示意图

Fig. 12 TDC7200 internal working mechanism



后者计算开始时刻和停止时刻之间的整数时钟周期数, 结果寄存在 COUNT1 到 COUNT5 中。若计数器产生溢出, 则测量将会终止。TDC7200提供了两种测量模式, 可以在 CONFIG1 中进行配置, 第一种是利用环形振荡器和粗计数器对 500 ns 时间内进行测量, 该模式与时钟计数器无关。第二种模式是将核心时间测量机制用于小数部分的计数, 而整数部分通过时钟计数器进行计数, 能够实现 8 ms 大范围的时间测量。对于第一种模式的 TOF 数可表示为

$$TOF_n = TIME_n \cdot normLSB. \quad (10)$$

将 TDC7200 上电初始化后, 光纤激光器的监控端输出的时刻鉴别信号作为 TDC 的起始信号, TRIG 触发引脚在芯片接收到 START 脉之后该引脚被拉低。而如果没有接收到起始信号, 计时器将会进入无限期的等待状态。接收的回波脉冲经过恒比定时电路后得到 TDC 的终止信号, INTB 默认情况下为高电平, 当一次 TDC 测量完成之后, 会被拉低。系统可以通过 SPI 接口读取测量值将其转换为 TOF 数。如果未收到停止信号, 时钟计数器或粗计数器将溢出并产生中断, TDC 将停止计时并重新测量。具体设计流程如图 13 所示。

### 2.4 实际结果测量分析

利用 CycloneIV FPGA 生成两路高精度延时可调节的时序信号模拟发射端和接收端时刻鉴别信号, 将 TDC7200 的 START 和 STOP 端口分别接入到 FPGA 的输出端口, 对该系统设定固定延时后, 在 200 ns 范围内每间隔 10 ns 对每一次延时采集 10000

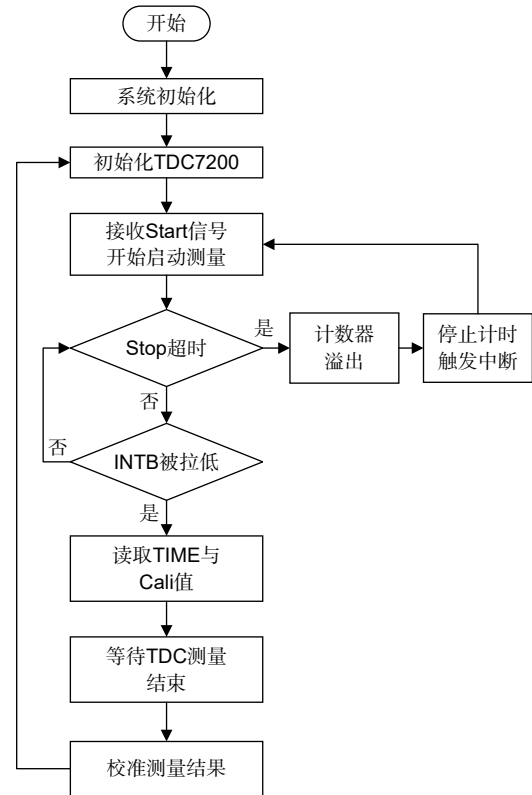


图 13 TDC 时间测量流程框图

Fig. 13 TDC time measurement process flowchart

次数据。按照式 (11) 与式 (12) 计算各组的平均值以及标准差<sup>[28]</sup>。选取固定延时为 150 ns 进行测量得到如图 14 所示频数分布图, 并使用高斯函数进行拟合, 实际统计得到该组平均值为 150.178 ns, 标准差为 101 ps。其余各组实际测量结果如表 2 所示, 表明 TDC7200 在模式一 200 ns 量程下的标准差在 120 ps 以内。

表 2 时间测量数据 (时间单位: ns)

Table 2 Time measurement data (time unit: ns)

标准时间间隔	最大测量值	最小测量值	测量平均值	测量误差	标准差
100	100.838	99.292	100.103	0.103	0.092
110	110.603	109.637	110.128	0.128	0.077
120	120.646	119.663	120.137	0.137	0.084
130	130.323	129.969	130.135	0.135	0.107
140	140.388	139.988	140.174	0.174	0.109
150	150.580	149.775	150.178	0.178	0.101
160	160.361	159.979	160.185	0.185	0.107
170	170.469	169.857	170.179	0.179	0.115
180	180.471	179.882	180.186	0.186	0.108
190	190.842	189.607	190.195	0.195	0.117
200	200.853	199.463	200.219	0.219	0.120



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (12)$$

在表 2 中, 系统测试标准差与 TDC7200 所标定的标准差在 200 ns 范围内最大相差 85 ps, 这是由于提供标准时间的 FPGA 时钟源信号本身的不稳定性, 晶振工作的不稳定性, 以及所存在的电路噪声等因素均可能致使 TDC7200 粗测量的产生的时钟漂移逐渐增大, 细测量的时钟抖动产生累计效应引起计数误差逐渐增大, 导致整体测量标准差随着待测时间的延长也不断增加; 利用最小二乘法对实际测量时间和测量标准时间进行拟合, 计算非线性误差 $\delta=0.124\%$ , 观测到绝对误差随着标准时间延长, 近似呈现线性增长趋

势 (图 15), 这可能是因为除了不规则逻辑门的传输延迟时间, 还包括受到电路布局走线等因素的影响所导致的, 可以通过后续滤波处理减小误差。

### 3 系统测试

搭建系统结构如图 16 所示, 为验证接收机静态测距性能, 设置激光器驱动电流为 3500 mA, 输出平均功率约为 570 mW。使出射光束直接垂直照射漫反射板, 在近距离 2.3 m 处测试回波幅值为 2410 mV, 在接收距离为 8.1 m 位置测试回波幅值为 284 mV。计算整体电路的输入噪声的均方根值约为 38 mV, 测试结果表明系统可测量约为 18 dB 范围内的回波功率。通过漫反射板对 100 kHz 激光脉冲在 6 m 处采样 1000 点, 实际测试时间分布散点图如图 17 所示, 修正

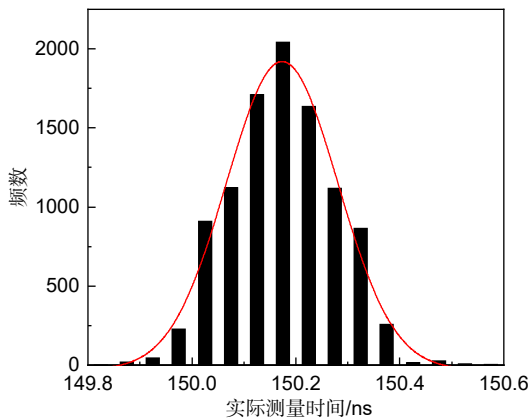


图 14 实际测量 150 ns 统计直方图

Fig. 14 Histogram of actual measurement with 150 ns

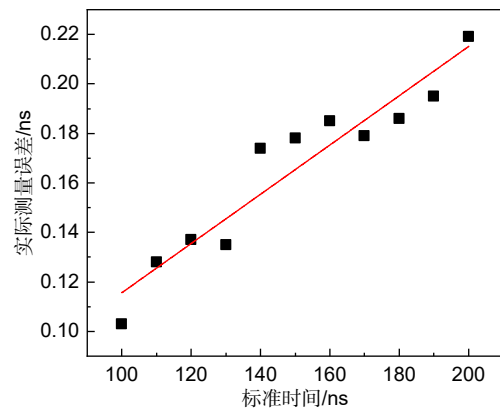


图 15 实际测量误差

Fig. 15 Measurement error of TDC in actual conditions

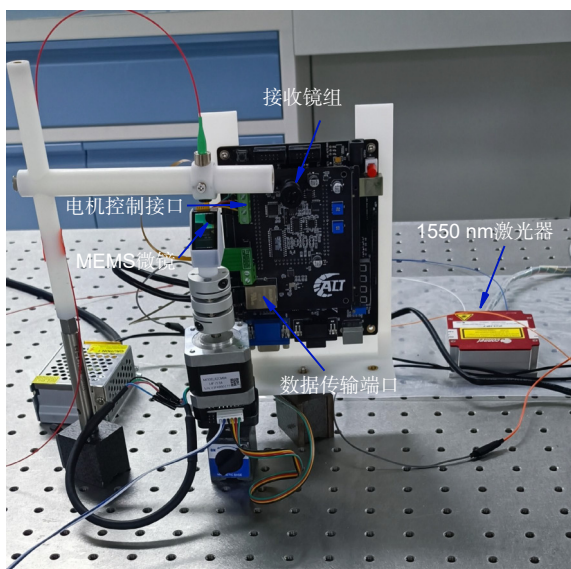


图 16 接收装置实物图

Fig. 16 Receiving physical devices

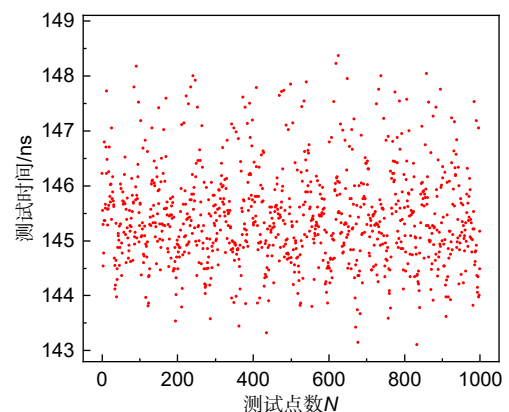


图 17 6 m 处距离测试时间分布

Fig. 17 Time distribution of testing at a distance of 6 m

系统存在固定的延迟差后的实际测距精度为 0.871 ns, 测量误差为 9.68 cm。对测距范围内其它各点实际飞行数据标定修正后的真实测距值如表 3 所示。

如图 18 所示, 在室内环境下利用 100 kHz 激光脉冲进行测试, 在漫反射板靠近中心位置粘贴黑色卡纸标记 MEMS 偏转起始位置, 于距离 3 m 处经 MEMS 微镜反射后测得回波脉冲如图 19 所示, 计算输入噪声约为 118 mV。实验设置 MEMS 模组最小脉冲间隔为 0.05°, 通过对振镜输出角度标志脉冲计数可获取一个周期内的偏转角度, 一个周期结束后利用零位标志脉冲对计数结果复位, 循环往复测试 MEMS 实时输出偏转角度数据。为了避免实际动态扫描测距过程中出现部分测距点数据的缺失以及部分测距点由于干扰杂波带来的较大偏差影响, 利用中值滤波对 MEMS 偏转多个半周期内的同一方位的数据进行滤波处理, 且由于收发两端 5 cm 的固定间距, 在测距范围内存在双程往返测量误差, 而该误差主要和扫描角度近似呈线性相关, 通过补偿修正后在距离接收机在垂直方向上漫反射板上得到 100 kHz 下

MEMS 偏转角、回波强度与测距值如表 4 所示。

## 4 结论

本文提出一种适合基于 MEMS 近程激光雷达接收方案, 针对 1550 nm 波段铟镓砷探测器小光敏面无法有效接收 MEMS 较大扫描视场的回波问题, 设计了一种适用于近程宽视场的接收装置。接收端光学系统利用像方远心结构作为接收天线, 同时, 接收电路采用 T 型放大结构, 利用 TDC7200 实现高精度时间测量。通过仿真在 1 mm 的光敏面下实现了 36° 的接收视场, 整体相对照度超过 95%, 集光性能和通光性能较好。实验结果表明, 实际测量飞行时间测量精度在 200 ns 量程下低于 120 ps, 该系统在 8 m 范围内测距精度优于 2 ns。本文所设计的系统结构相对简单, 可适用于 MEMS 扫描激光雷达大视场近程探测。

由于本实验在离轴模式下, 出射光束经 MEMS 微镜反射后, 探测器接收较大背景光噪声导致系统信噪比下降, 从而降低了整体测距精度。此外, 为了扩

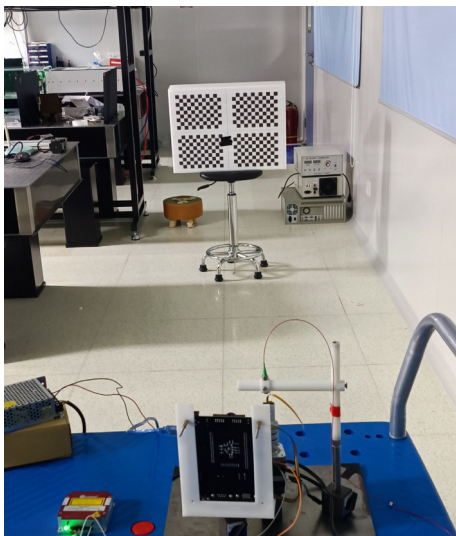


图 18 实际室内场景测试  
Fig. 18 Actual indoor scene testing

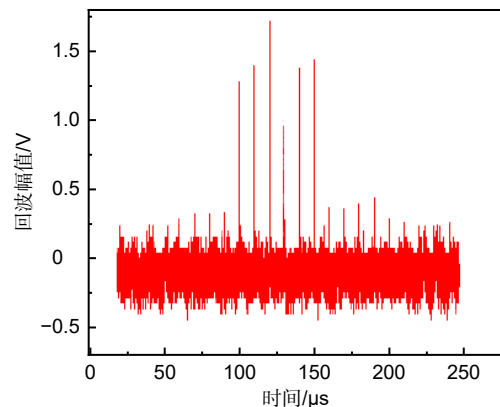


图 19 100 kHz 回波波形  
Fig. 19 100 kHz echo waveform

表 3 修正后的实际测距结果  
Table 3 Revised actual ranging results

测量距离/m	时间真实值/ns	时间标准差/ns	均值误差/cm
2.5	16.981	0.452	4.71
3	19.811	0.559	2.84
4	26.382	0.649	4.28
5	33.754	0.736	6.31
6	39.354	0.871	9.68
7	47.051	1.236	5.76

表 4 100 kHz 回波测试结果  
Table 4 Results of 100 kHz echo test

微镜扫描角度/(°)	回波幅度/mV	测距值/m	实际误差/m
+14.5	286	—	—
+12.6	317	7.82	0.25
+10.6	324	7.75	0.22
+8.5	335	7.68	0.20
+6.4	1277	3.05	0.03
+4.3	1397	3.03	0.02
+2.2	1716	3.02	0.02
0	957	3.03	0.03

大接收视场范围, 所设计的较小的接收口径对探测距离有一定限制。并且 TDC 芯片测量耗费时间也相对较长, 不能适应在 MEMS 较高谐振扫描频率下进行大视场更高重频的激光探测。针对上述出现的问题, 后续研究将进一步优化电路设计, 增大回波电路接收的动态范围、减少定时电路的不稳定性以及缩短测距时长, 以提升激光雷达的整体近程探测性能。

## 参考文献

- [1] Rozsa Z, Sziranyi T. Object detection from a few LIDAR scanning planes[J]. *IEEE Trans Intell Veh*, 2019, **4**(4): 548–560.
- [2] Hanson W S, Jones R E, Jones R H. The Roman military presence at Dalswinton, Dumfriesshire: a reassessment of the evidence from aerial, geophysical and LiDAR survey[J]. *Britannia*, 2019, **50**: 285–320.
- [3] Persendt F C, Gomez C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs[J]. *Geomorphology*, 2016, **260**: 32–50.
- [4] Zhao G Y, Lian M, Li Y Y, et al. Mobile lidar system for environmental monitoring[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(5): 1506–1516.
- [5] Chen H P, Li M Y, Cao T F, et al. Obstacle recognition on Mars surface based on LiDAR data[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220240.  
陈海平, 李萌阳, 曹庭分, 等. 基于激光雷达数据的火星表面障碍物识别[J]. *光电工程*, 2023, **50**(2): 220240.
- [6] Raj T, Hanim Hashim F, Baseri Huddin A, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. *Electronics*, 2020, **9**(5): 741.
- [7] Lee X, Wang C H. Optical design for uniform scanning in MEMS-based 3D imaging lidar[J]. *Appl Opt*, 2015, **54**(9): 2219–2223.
- [8] Schwarz F, Senger F, Albers J, et al. Resonant 1D MEMS mirror with a total optical scan angle of 180° for automotive LiDAR[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11293**: 1129309.
- [9] Zhong Y H, Gong Q, Zhu T F. High speed optical scanning system based on MEMS[J]. *Appl Laser*, 2021, **41**(2): 391–394.  
钟义晖, 龚强, 朱天凤. 基于MEMS高速光学扫描系统[J]. *应用激光*, 2021, **41**(2): 391–394.
- [10] Siepmann J P, Rybaltowski A. Integrable ultra-compact, high-resolution, real-time MEMS LADAR for the individual soldier[C]//*Proceedings of 2005 IEEE Military Communications Conference*, Atlantic City, USA, 2005: 3073–3079. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2005.1606131>.
- [11] Tanahashi Y, Koutsuka Y, Tanimoto R, et al. Development of coaxial 3D-LiDAR systems using MEMS scanners for automotive applications[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10757**: 107570E.
- [12] Lee X, Wang X Y, Cui T X, et al. Increasing the effective aperture of a detector and enlarging the receiving field of view in a 3D imaging lidar system through hexagonal prism beam splitting[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(14): 15222–15231.
- [13] Li Q K, Qiu Q. Design on omnidirectional optical system of lidar based on 2D MEMS mirror[J]. *J Appl Opt*, 2015, **39**(4): 460–465.  
李启坤, 邱琪. 基于2D微电子机械系统(MEMS)镜全向激光雷达光学系统设计[J]. *应用光学*, 2015, **39**(4): 460–465.
- [14] Fan N N, Wang M, Wen S C, et al. Optical design for 2D MEMS-based lidar system[J]. *Opt Tech*, 2020, **46**(3): 290–294.  
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.
- [15] Xu F H, Qiao D Y, Xia C F, et al. A semi-coaxial MEMS LiDAR design with independently adjustable detection range and angular resolution[J]. *Sens Actuat A Phys*, 2021, **326**: 112715.
- [16] Ito K, Niclass C, Aoyagi I, et al. System design and performance characterization of a mems-based laser scanning time-of-flight sensor based on a 256×64-pixel single-photon imager[J]. *IEEE Photon J*, 2013, **5**(2): 6800114.
- [17] Stann B L, Dammann J F, Giza M M. Progress on MEMS-scanned lidar[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9832**: 98320L.
- [18] Li X B. Research on key technologies of MEMS-based large scanning laser 3D image sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 61–64. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2017.000001>.  
李小宝. MEMS大视野扫描激光3D图像传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 61–64. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2017.000001>.
- [19] Luo D. Prototype design of 3D LiDAR system based on MEMS mirror scanning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 62–78. <https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2019.004022>.  
罗栋. 基于MEMS微镜扫描的三维激光雷达样机系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 62–78. <https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2019.004022>.
- [20] Wang Y Y, Tang P J, Shen L K, et al. LiDAR system using MEMS scanner-based coaxial optical transceiver[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference*, Shenzhen, China, 2020: 166–168. <https://doi.org/10.1109/OGC50007.2020.9260456>.
- [21] Chen J G, Ni X X, Yuan B, et al. Analysis of detection probability performance of SiPM LiDAR under sunlight[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(10): 210196.  
陈建光, 倪旭翔, 袁波, 等. SiPM激光雷达阳光下探测概率性能分析[J]. *光电工程*, 2021, **48**(10): 210196.
- [22] Yang H Z, Zhao C M, Zhang H Y, et al. Design and optimization of all-fiber lidar transmitting and receiving optical systems[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(11): 1106005.  
杨宏志, 赵长明, 张海洋, 等. 全光纤激光雷达发射和接收光学系统设计与优化[J]. *光学学报*, 2016, **36**(11): 1106005.
- [23] Chen H M, Li T, Liu X M, et al. *Short-Range Laser Detection Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 124–127.  
陈慧敏, 李铁, 刘锡民, 等. 近程激光探测技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 124–127.
- [24] Xiong R L. Performance analysis on co-detection of infrared

- systems[J]. *Laser Infrared*, 2016, 46(5): 575–577.  
熊蓉玲. 红外系统协同探测性能分析[J]. *激光与红外*, 2016, 46(5): 575–577.
- [25] Liu X M. Approach to the design of optical system for ultrahigh-light detection[J]. *J Appl Opt*, 1995, 16(1): 5–8.  
刘肖民. 超强光探测光学系统设计探讨[J]. *应用光学*, 1995, 16(1): 5–8.
- [26] Liu X M. The study of non-vignetting receiving features of optical system for electro-optic detecting[J]. *J Appl Opt*, 1999, 20(5): 5–7.  
刘肖民. 光电探测光学系统无晕接收特性的研究[J]. *应用光学*, 1999, 20(5): 5–7.
- [27] He W G, Wu J, Wang S F. Design of wide-FOV optical system with optical gain[J]. *Laser J*, 2006, 27(1): 27–28.  
何武光, 吴健, 王仕璠. 宽视场有增益光学系统设计[J]. *激光杂志*, 2006, 27(1): 27–28.
- [28] Bai X F, Feng D, Qin C, et al. Design and experimental study of high precision pulsed laser ranging system[J]. *Laser J*, 2019, 40(10): 6–10.  
白雪菲, 冯迪, 秦川, 等. 高精度脉冲激光测距系统设计与实验研究[J]. *激光杂志*, 2019, 40(10): 6–10.

## 作者简介



万岁岁 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光雷达。  
E-mail: wanlang\_s@126.com



【通信作者】庞亚军 (1988-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光雷达与光电探测技术。  
E-mail: yjpang@hebut.edu.cn

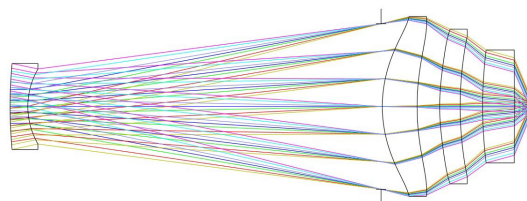


扫描二维码, 获取PDF全文



# Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror

Wan Suisui<sup>1,2</sup>, Pang Yajun<sup>1,2\*</sup>, Xue Ruixiang<sup>1,2</sup>, Bai Zhenxu<sup>1,2</sup>



Optical antenna structure for reception

**Overview:** Compared to detection methods such as cameras and millimeter-wave radar, LiDAR (light detection and ranging) utilizes a highly collimated laser beam to obtain target distance, azimuth, shape, and motion information, providing superior three-dimensional perception capabilities. In the early days, LiDAR was primarily used in military, surveying, environmental monitoring, and other fields, given its large size and high cost. However, LiDAR has gradually integrated into the consumer market and played an increasingly crucial role in autonomous driving and intelligent perception, becoming a hot research topic in recent years. The primary functions of LiDAR can be divided into scanning imaging modules. As weight, size, and power consumption become crucial for platforms such as automobiles and drones, traditional mechanical LiDAR systems are evolving toward solid-state scanning approaches. Among various scanning devices, MEMS (micro-electro-mechanical systems) mirrors have become a hot direction in LiDAR scanning due to their small size, low power consumption, and high angular resolution. With the advancement of LiDAR technology, the scanning field of view of MEMS devices continues to increase, resulting in increasingly stringent requirements for matching the emission and reception fields of view.

The influence of MEMS deflection angle on the received power was derived based on the laser radar equation in this study. Detailed design specifications for the lidar system were analyzed, along with the achievable detection distance range. A suitable receiving scheme for MEMS-based short-range laser radar was proposed, where a single-piece non-spherical mirror was used for beam collimation at the transmitting end, and a small sensitive area InGaAs detector operating at 1550 nm was employed at the receiving end to address the problem of inefficient echo reception for larger scanning fields of the MEMS system. A receiver device suitable for near-range wide field-of-view applications has been designed. The optical system at the receiving end utilizes an afocal telecentric structure as the receiving antenna, achieving a reception field-of-view of 36° at a photosensitive area of 1 mm. The relative illuminance exceeds 95%, demonstrating excellent light collection and transmission characteristics. Additionally, the receiver circuit adopts a T-network amplification structure combined with a moment identification circuit, utilizing the TDC7200 to achieve high-precision time measurements. The flight time measurement accuracy is less than 120 ps within a range of 200 ns, and the overall experimental results demonstrate ranging accuracy better than 2 ns within an 8 m distance, meeting the requirements for near-range detection.

Wan S S, Pang Y J, Xue R X, et al. Design of short-range LiDAR receiver based on MEMS mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230287; DOI: 10.12086/oe.2024.230287

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (61905063), and Natural Science Foundation of Hebei Province (F2020202055).

<sup>1</sup>Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; <sup>2</sup>Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China

\* E-mail: yjpang@hebut.edu.cn