

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

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

引用本文:

王玲, 刘博, 吴城, 等. 基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试[J]. *光电工程*, 2024, 51(3): 240032.

Wang L, Liu B, Wu C, et al. Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240032.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240032>

收稿日期: 2024-01-31; 修改日期: 2024-03-20; 录用日期: 2024-03-20

相关论文

远场合成孔径计算光学成像技术: 文献综述与最新进展

李晟, 王博文, 管海涛, 梁坤瑶, 胡岩, 邹燕, 张许, 陈钱, 左超
光电工程 2023, 50(10): 230090 doi: [10.12086/oe.2023.230090](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230090)

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](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240037)

合成孔径激光雷达成像技术研究进展

徐晨, 晋凯, 魏凯
光电工程 2024, 51(3): 240007 doi: [10.12086/oe.2024.240007](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240007)

宏/子脉冲编码光子计数激光雷达

刘博, 姜朔, 于洋, 陈臻
光电工程 2020, 47(10): 200265 doi: [10.12086/oe.2020.200265](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200265)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



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



 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240032

基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试

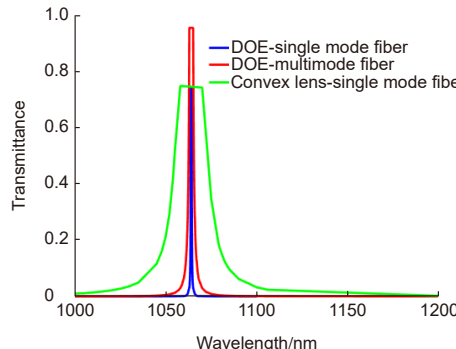
王玲^{1,2,3,4}, 刘博^{1,2,3,4*}, 吴城^{1,3,4}, 罗兰^{1,2,3},
杨玉强^{2,3}¹中国科学院光场调控科学与技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 四川 成都 610209;³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;⁴中国科学院大学, 北京, 100049

摘要: 在激光雷达系统设计中, 光学系统的优化与设计是一个重要的研究方向, 本文利用衍射光学元件 (DOE) 的设计自由度高和色散大等优势, 将 DOE 用于激光雷达接收端, 同时实现聚焦和滤光作用, 降低了光学系统复杂度。本文基于 DOE 的原理, 仿真分析了 DOE 的光学特性, 并且以 DOE 作为激光雷达的光学接收端, 完成了激光雷达测距实验, 证明了 DOE 同时具有聚焦作用和窄带滤光作用, 实验结果与仿真基本一致。本文利用 DOE 在激光雷达中的优势, 实现激光雷达的轻量化、集成化和高效化。

关键词: 激光雷达; 衍射光学元件; 轻量化; 滤光

中图分类号: O439

文献标志码: A



王玲, 刘博, 吴城, 等. 基于衍射透镜接收的激光雷达特性分析及测试 [J]. 光电工程, 2024, 51(3): 240032

Wang L, Liu B, Wu C, et al. Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240032

Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving

Wang Ling^{1,2,3,4}, Liu Bo^{1,2,3,4*}, Wu Cheng^{1,3,4}, Luo Lan^{1,2,3}, Yang Yuqiang^{2,3}¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The optimization and design of optical systems is an important research direction in LiDAR. In this paper, the advantages of diffractive optical elements (DOE), such as high design degree of freedom and large dispersion, are used in the receiving end of LiDAR. The focusing and filtering effects are realized at the same time, which reduces the complexity of the optical system. Based on the principle of diffractive optical elements, the optical

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-03-20; 录用日期: 2024-03-20

*通信作者: 刘博, boliu@ioe.ac.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

characteristics of diffractive optical elements are simulated and analyzed. The LiDAR ranging experiment is completed by using the diffractive optical element as the optical receiving end of the LiDAR. It proved that the diffractive optical elements have both a focusing effect and a narrow-band filtering effect. The experimental results are basically consistent with the simulation. Using the advantages of diffractive optical elements in LiDAR, the lightweight, integration, and high efficiency of LiDAR can be realized.

Keywords: LiDAR; diffractive optical element; lightweight; filtration

1 引言

相比于传统雷达技术, 激光雷达是一种将激光技术与光电探测技术进行结合的先进主动探测系统, 能够快速、准确地获取目标的三维空间信息, 被广泛地应用在自动驾驶、空间交会对接、目标识别等民用、航空航天以及军用等领域^[1-7]。激光雷达主要由激光发射单元、望远镜接收单元、滤波单元、探测器单元和信息处理单元组成^[8-9]。其中, 一般使用望远镜实现回波能量的收集; 使用光谱滤波器件将有用回波信号从大量的噪声中筛选出来, 常见的光谱滤波器件有窄带干涉滤光片、法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 标准具, 光栅滤波器件、原子滤波器件等^[10]。传统激光雷达需要望远镜和光谱滤波器件配合使用以达到目标回波信号的收集和有效提取, 在一定程度上增加了激光雷达接收光学系统的复杂度。

衍射光学元件 (Diffractive optical element, DOE) 采用微纳加工技术在基底刻蚀浮雕结构以实现相对位的控制, 具有超轻质量、极小型化, 可变面型、超低成本等优势^[11-15]。将 DOE 引入到激光雷达中, 在轻量化的基础上, 可降低系统的复杂度, 提升系统的集成化。20 世纪 90 年代, 美国 NASA 开发了一种新的望远镜系统^[16-18], 提出采用全息图代替透镜或镜子, 以减少用于测量大气特性的激光仪器的尺寸、重量和成本, 利用最轻和最便宜的技术开发用于地球科学应用的星载扫描激光遥感器。2003 年, MIT 的 Jigsaw 计划^[19], 利用 DOE 的分束能力将单束高斯光束转变为 32×32 阵列光束, 研制一款高分辨三维成像激光雷达。2009 年, NASA 发射的 LOLA^[20], 在发射光路中加入 DOE, 采用单个脉冲通过衍射光学元件产生 5 个激光光斑, 生成高分辨率地表三维测绘图形。2018 年, 李道京研究团队联合中国科学院长春光机所^[21-22], 提出了衍射光学系统结合全光纤光路激光雷达的宽波束接收和波束频率扫描方法, 研制出我国第一台衍射薄膜镜多通道相干激光雷达原理样机, 并获

取了地面和空中运动目标试验数据集。2020 年, 吴光课题组在光子计数激光雷达发射端采用 DOE 轴锥镜实现贝塞尔光束的调制^[23-24], 利用贝塞尔光束的无衍射效应, 实现了 31 m 目标的单光子激光雷达穿雾探测。哈工大相关研究团队采用 DOE 作为激光雷达发射端实现激光雷达的阵列探测。

目前研究主要是利用 DOE 的相位调控特性和分束特性, 忽略了 DOE 的色散特性。与传统光学元件的色散特性不同的是, 折射元件的折射率取决于材料本身, 而 DOE 的折射率是由台阶状浮雕微结构对不同波长的分光作用引起的, 与材料近乎无关^[25]。DOE 的色散只与系统的工作波段有关系, 随着波长的变化而变化。DOE 色散越大, 对波长越敏感, 其焦距与波长成反比。因此, 可以利用 DOE 大色散的特点, 从而使得在焦点处设计波长的能量集中, 其他波长的能量发散。这个特性表明 DOE 在以单色光为探测背景的相关应用中具有巨大的价值。因此, 将 DOE 引入到激光雷达接收端, 在有效减轻激光雷达系统重量的基础上, 还可以充分利用其大色散特点实现滤光功能。由于不同波长的光经过 DOE 时, 汇聚焦点不同, 通过在设计波长的焦点处设置小孔, 实现设计波长能量的高效集中。本文针对 DOE 在激光雷达接收端的特性进行了分析及测试。首先根据 DOE 的理论分析了衍射效率与台阶数以及衍射级次的关系; 然后根据 DOE 色散大的性质, 将 DOE 与光纤结合实现滤光作用, 并通过仿真给出了纤芯直径与滤波带宽之间的经验公式, 即纤芯直径越小, 滤波效果越好。进一步, 我们设计并加工了一款设计波长 1064 nm、口径 50 mm、焦距为 300 mm 的 DOE, 搭建了基于 DOE 接收的激光雷达测距实验系统, 完成了对实验平台外 2.1 km 目标的测距。同时, 为了验证 DOE 的滤光特性, 分别使用芯径为 10 μm 的单模光纤和芯径为 200 μm 的多模光纤对 DOE 的滤波能力进行测试, 并与 0.5 nm 带宽的滤光片进行对比。通过对比实验, 验证了 DOE 应用于激光雷达接收端实现聚焦的同时,

与光纤结合时还具有抑制噪声的窄带滤波效果, 与仿真一致。

2 理论推导

2.1 衍射光学元件的原理

DOE 由一系列的同心圆环组成, 其中每个圆环有特定的形貌, 精细调控激光波前位相的分布。它具有以下 3 个特性: 1) DOE 的色散与波长成反比, 其阿贝数相比于传统玻璃为负值; 2) DOE 具有高设计自由度, 可以实现对光束的任意位相进行调制, 通过改变浮雕结构、深度等得到任意形状的输出面光斑。3) DOE 的表面浮雕结构 (即为刻蚀深度) 为微米量级, 元件重量就是基底重量, 具有重量轻、体积小特点^[26]。

基于标量衍射理论, 将 DOE 近似看作相位调制光栅: 对于周期为 T , 衍射级次为 m , 台阶数为 N 的光栅进行理论推导。

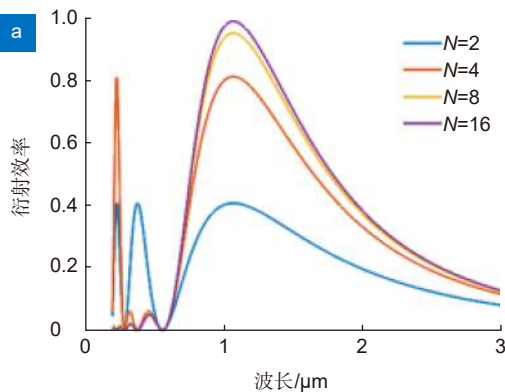
首先对光栅进行台阶模型建立, 透过率函数如下:

$$t(x_0) = \text{rect}\left(\frac{Nx_0}{T}\right) \cdot \sum_{q=0}^{N-1} \text{comb}\left(\frac{x_0 - \frac{qT}{N}}{T}\right) \exp\left(\frac{-jq2\pi\varphi}{N}\right), \quad (1)$$

式中, φ 为一个周期最大相位差, 以波长为单位。对上述函数作傅里叶变化, 得到远场衍射分布复振幅:

$$F(t(x)) = T \cdot \text{comb}(Tf_x) \cdot \exp\left(j\pi(\varphi - Tf_x)\left(1 - \frac{1}{N}\right)\right) \cdot \frac{\sin(\pi(\varphi - Tf_x))}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\varphi - Tf_x)\right)} \frac{T}{N} \text{sinc}\left(\frac{T}{N}f_x\right), \quad (2)$$

其中, $f_x = 1/x_0$ 。衍射效率定义为光线通过衍射元件后设计级次衍射光的能量与总光能量之比, 是衍射元



件的关键性能指标之一^[27]。由梳状函数定义, $Tf_x = m (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 对式 (2) 进行化简之后, 第 m 级次的衍射效率为

$$\eta_m^N = \left\{ \frac{\sin(\pi(\varphi - m))}{\sin\left(\frac{\pi}{N}(\varphi - m)\right)} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)}{\pi m} \right\}^2. \quad (3)$$

当 $\varphi = m$ 时, 衍射效率有最大值。一般 $m = 1$, 此时 $\varphi = 1$, 即为一个周期内最大光程差为 λ_0 (λ_0 为设计波长)。此时, 最佳台阶高度为

$$\Delta h = \frac{\lambda_0}{N(n(\lambda_0) - 1)}. \quad (4)$$

对于激光雷达系统而言, 接收端是为了将回波光尽可能多地收集到探测器中, 因此接收端可看作聚焦透镜。根据激光雷达探测系统的要求, 对于 1064 nm 的波长, 衍射级次为 +1 级的 DOE 进行了仿真, 得到相位失高图, 如图 1 所示。根据式 (3) 和 (4) 将 DOE 进行台阶量化, 同时分析了衍射效率随台阶数和衍射级次的变化关系, 如图 2 所示。

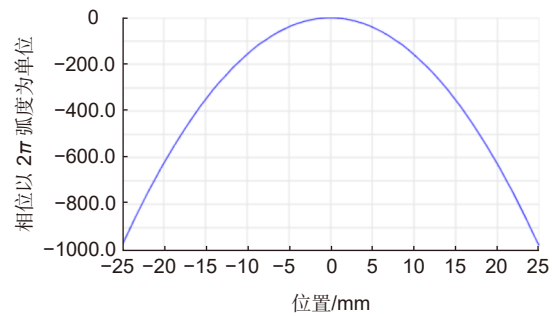


图 1 衍射光学元件相位失高图
Fig. 1 Phase vector height diagram of diffractive optical elements

从图 2 中可以看出, 在设计波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 衍射级次为 $m = 1$ 时, 对于同一台阶数, 在波长 1064 nm 处的衍射效率最高。此外, 随着台阶数的增大, 衍射

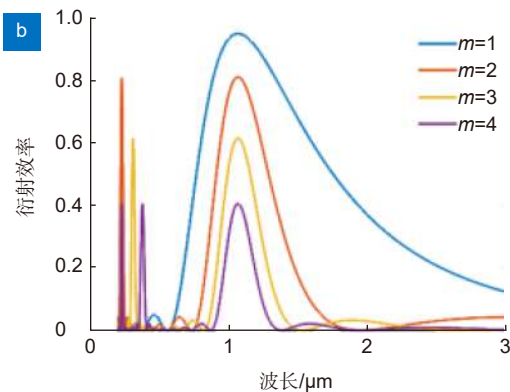


图 2 DOE 衍射效率 (a) 随台阶数的变化关系 (衍射级次为 $m=1$); (b) 随衍射级次的变化关系 (台阶数 $N=8$)
Fig. 2 The relationship between the diffraction efficiency of DOE and (a) the number of steps ($m=1$), (b) the diffraction order ($N=8$)

效率也是逐渐增大的。可以发现, 当 $N=8$ 时, 其衍射效率能达到 95% 以上。

2.2 衍射光学元件的色散特性

DOE 与折射式光学元件不同, 衍射光学元件的色散是由于衍射元件对光波的衍射作用引起的, 衍射光学元件的色散方向与常用折射光学材料的色散方向相反, 这个特性也被称为负色散。折射光学元件的阿贝数 ν 和等效部分色散系数 P 定义为

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad (5)$$

$$P = \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}, \quad (6)$$

其中: n_F, n_D, n_C 为对应 F, D, C 三种光的折射率。衍射光学元件的等效阿贝常数 ν 和等效部分色散系数 P 定义为

$$\nu = \frac{\lambda_D - 1}{\lambda_F - \lambda_C}, \quad (7)$$

$$P = \frac{\lambda_F - \lambda_D}{\lambda_F - \lambda_C}. \quad (8)$$

由式 (7) 可以发现, 衍射光学元件的等效阿贝常数 ν 的值为负数, 并且 DOE 的阿贝数更小, 意味着其色散更大。

如图 3 所示, 假定 DOE 的设计波长和焦距为 λ_0 和 f_0 , 则对于入射波长为 λ_m , 其焦距有如下关系成立:

$$f_m = \frac{f_0 \lambda_0}{\lambda_m}. \quad (9)$$

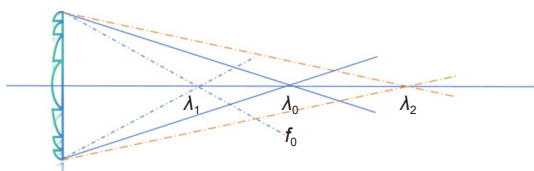


图 3 DOE 的色散特性
Fig. 3 Dispersion characteristics of DOE

而在激光雷达中, 特别地, 在激光雷达接收端, 利用衍射光学元件色散大特性, 将其与特定光纤进行结合, 可同时实现聚光功能和滤波功能。假设一款口径为 50 mm, 焦距为 300 mm 的 DOE, 在焦点处分别放置一直径为 10 μm 的单模光纤和直径为 50 μm 的多模光纤, 在半径 5 μm 、25 μm 处各个波长的圈入能量 (等效透过率) 如图 4 所示。

带宽表示频谱通过入射能量穿过滤光片的特定部分, 用最大透过率的一半处的宽度表示。在图中, 对于 DOE 与单模光纤结合而言, 其峰值透过率为

70% 左右, 35% 透过率对应波长为 1063.7 nm 和 1064.3 nm, 其半带宽为 0.6 nm, $OD=5$ 时, 截止范围为 [1032 nm, 1045 nm], [1083 nm, 1200 nm]。对于 DOE 与多模光纤结合而言, 其峰值透过率为 95% 左右, 47.5% 透过率对应的波长为 1065.5 nm 和 1062.5 nm, 其半带宽为 3 nm, $OD=5$ 时, 截止范围为 [970 nm, 1000 nm], [1150 nm, 1200 nm]。通过对多个不同纤芯直径的光纤与 DOE 结合时, 各个波长的圈入能量进行仿真分析, 发现滤波半高宽 B 与纤芯直径 D 存在以下关系:

$$B = a + b \times D, \quad (10)$$

其中, a, b 为常数。如图 5 所示。

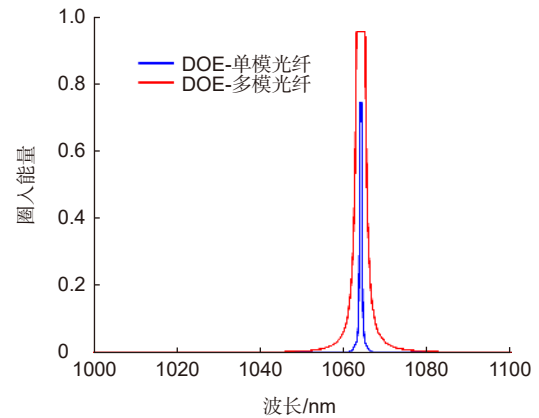


图 4 DOE 与单模光纤、多模光纤结合后滤波特性图
Fig. 4 The filtering characteristic diagram of DOE combined with single mode fiber and multimode fiber

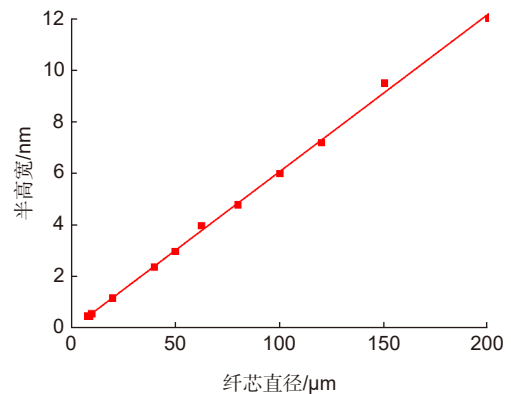


图 5 滤光半宽与光纤纤芯直径的关系
Fig. 5 The relationship between filter half width and fiber core diameter

可以看出, 光纤的纤芯直径越大, 其带宽也更宽。在实验时, 可以根据实际滤光需求选择合适的光纤。

另外, 针对激光雷达接收端常用的凸透镜, 对凸透镜与单模光纤结合的圈入能量进行了仿真, 在凸透

镜成像达到衍射极限并且不考虑与滤光片结合的情况下, 仿真结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 传统透镜与单模光纤的结合, 其带宽为 22 nm, 几乎不具备滤波功能。因此, 在使用传统透镜作为激光雷达接收端时, 需要与窄带滤光片一起配合使用, 以减少太阳光等背景杂散光的影响。而将 DOE 引入到激光雷达接收端, 在轻量化的基础上, 不仅可以代替传统透镜实现回波能量的收集, 还可以在实际实验中, 根据系统的特性选择合适的光纤, 从而实现特定的滤波效果, 并代替滤光片的功能, 实现回波信号的高效提取, 大大降低了系统的复杂度, 更有利于系统的集成。

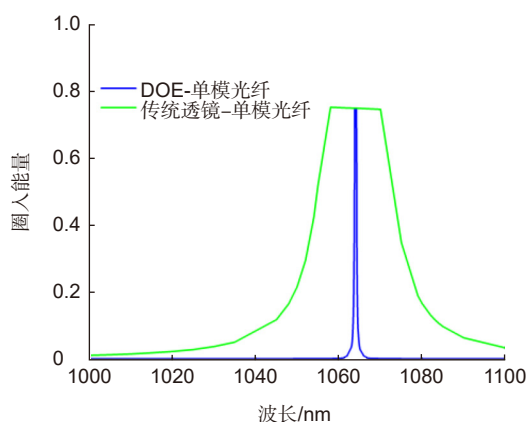


图 6 传统透镜与单模光纤结合和 DOE 与单模光纤结合的圈入能量分析

Fig. 6 Coil-in energy analysis of traditional lens combined with single-mode fiber and DOE combined with single-mode fiber

3 实验结果

对 2.2 节所描述的 DOE 滤波特性进行了测试。DOE 是由合作单位生产制造的, 设计波长为 1064 nm, 口径为 50 mm, 焦距为 300 mm, 台阶数为 8, 设计衍射效率达到 95%, 透过率达到 78%。但是由于加工工艺影响, 实际衍射效率为 60.08%。如图 7(b) 所示。在实验室搭建了如图 7(a) 所示的激光雷达测距实验平台, 1064 nm 激光器发射激光光束, 激光通过分束棱镜 (BS) 后分成两束光, 一部分光送到了光电二极管 (positive-intrinsicnegative diode, PIN) 处, 随后 PIN 管输出脉冲信号作为整个系统的起始信号。另一部分光通过光扩束器来减少光的发散角, 经过扩束后的光直接出射到目标上。回波通过衍射透镜之后汇聚进入光纤, 最后输入单光子探测器 (single photon avalanche diode, SPAD)。单光子探测器的信号送到

时间相关 (time-correlated single photon counting, TCSPC) 模块中记录光子的到达时刻。系统参数如表 1 所示。

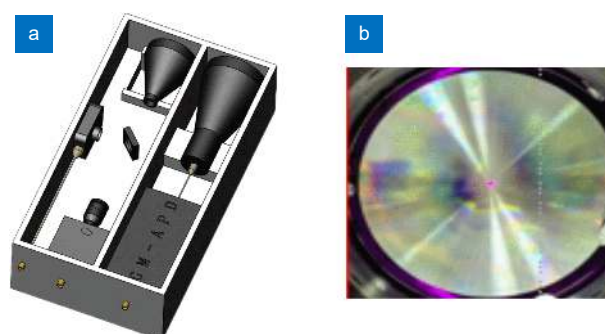


图 7 (a) 基于 DOE 接收的激光雷达测距系统图; (b) 口径为 50 mm 的 DOE

Fig. 7 (a) Concept map of laser radar ranging system based on DOE receiving; (b) DOE with a diameter of 50 mm

表 1 系统参数
Table 1 System parameter

| 系统参数 | 参数名称 | 值 |
|-------|-------------------------|------------|
| 系统发射端 | 激光波长(λ) | 1064 nm |
| | 激光脉冲宽度(T_i) | 10.00 ns |
| | 激光发散角($\theta_{1/e}$) | 7.000 mrad |
| | 光学系统发射效率(η_t) | 50.00% |
| 系统接收端 | DOE口径(D_{DOE}) | 50.00 mm |
| | 光学系统接收效率(η_r) | 78.00% |
| | SPAD探测效率(η_{qe}) | 2.800% |
| | SPAD死时间(t_d) | 41.30 ns |

首先, 通过上述的实验设备对实验室外的目标测距。由于激光器的发散角为 7 mrad, 因此需要进行扩束 (12 \times), 之后其发散角为 0.58 mrad。接收视场角要与激光发散角相匹配, 为此选择了实验室现有飞博思达光纤, 其纤芯直径为 200 μm , 与 DOE 配合得到的接收视场角为 0.67 mrad, 略微大于激光的发散角, 能将回波光全部收集到系统中, 满足要求。为了更好地抑制噪声, 在本系统中, 在光纤另一端耦合了一带宽为 0.5 nm 的窄带滤光片, 系统光路如图 8 所示。事实上, 由于实验条件的限制, 如果激光器的发散角尽可能小, 在接收系统只需要配对纤芯直径更小的光纤, 而不需要滤光片, 这也更有利于远距离的探测。测距结果如图 9 所示, 实现了对 2.1 km 的目标测距。

为验证 DOE 用于在激光雷达接收端的滤光特性, 实验中分别使用一根单模光纤 (10 μm) 和一根多模光纤 (200 μm) 将回波光子传输到 SPAD 中, 光纤一端放置在 DOE 焦点位置, 另一端接入 SPAD。由于单模光纤纤芯直径较小, 与 DOE 配合的接收视场角仅有 30 μrad 。对于远距离目标, 对光路要求极高, 同时激光经过扩束后的发散角 0.58 mrad, 与接收视场角不匹配, 远距离较难探测到回波光子信号。因此,

选择在室内夜晚下进行实验。对室内近距离目标进行探测, 实验结果如图 10 所示。

从图 10(a, b) 可以看出, 纤芯直径 10 μm 的单模光纤与 DOE 结合 (等效 0.6 nm 窄带滤光片), 其结果与加 0.5 nm 带宽的滤光片的结果较为接近, 验证了 DOE 与单模光纤的结合可同时代替传统透镜与滤光片的作用。从图 10(c, d) 可以看出, 纤芯直径 200 μm 的多模光纤与 DOE 结合, 等效带宽 12 nm。其虽然

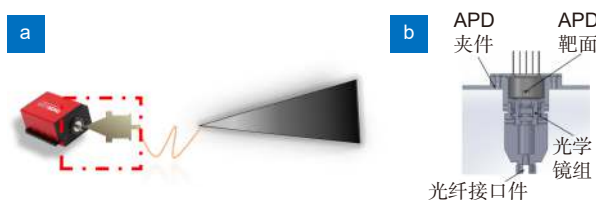


图 8 (a) 耦合 0.5 nm 滤光片的接收光路; (b) 光纤端与 APD 靶面的具体结构示意图

Fig. 8 (a) The receiving optical path coupled to the 0.5 nm filter; (b) The specific structure diagram of the optical fiber end and the APD target surface

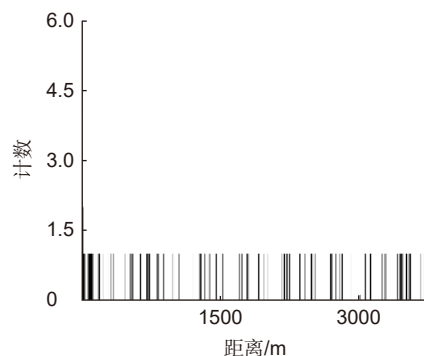


图 9 测距结果

Fig. 9 Distance measurement result

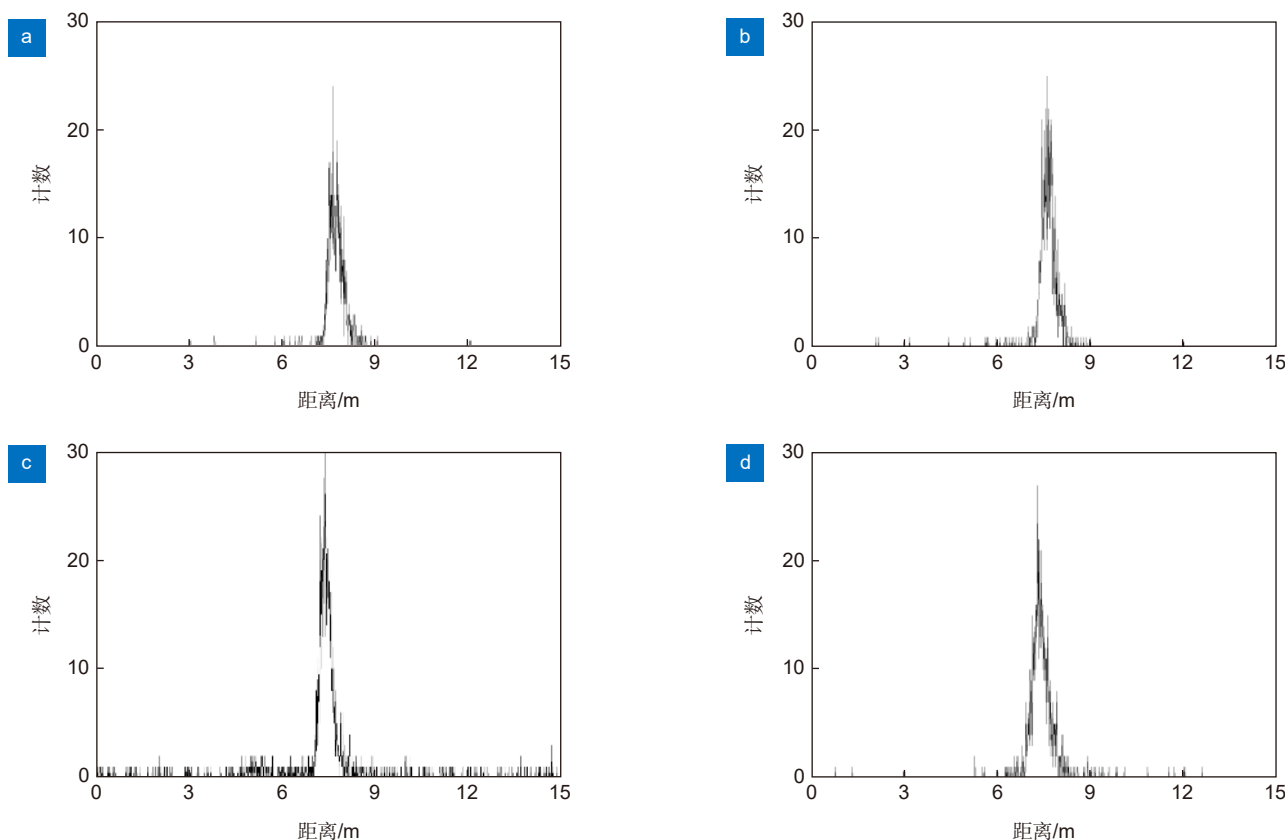


图 10 实验结果。(a) 单模光纤; (b) 单模光纤 (0.5 nm 滤光片); (c) 多模光纤; (d) 多模光纤 (0.5 nm 滤光片)

Fig. 10 Experimental results. (a) Single-mode fiber; (b) Single-mode fiber (with 0.5 nm filter); (c) Multimode fiber; (d) Multimode fiber (with 0.5 nm filter)

也具有一定的滤光作用, 但是由于带宽较宽, 与加 0.5 nm 带宽的滤光片的结果对比较差。

4 结 论

本文首先从衍射光学元件的理论出发, 通过理论推导和数值仿真, 分析了衍射光学元件的台阶数量和衍射级次对衍射效率的影响, 结果表明, 为了提高衍射光学与元件的衍射效率, 应该选择+1 级次, 且台阶数应该尽可能大。然后分析了衍射光学元件的色散特性, 与传统折射透镜色散对比, 衍射光学元件具有较大的色散, 利用该特性, 仿真了一个波长 1064 nm、口径 50 mm、焦距为 300 mm 的 DOE, 通过在焦点处耦合不同纤芯直径的光纤, 实现不同带宽的滤光效果。仿真结果表明, 纤芯直径越小, 衍射光学元件的等效滤光带宽越窄, 当纤芯直径为 10 μm 时, 带宽可达到 0.6 nm, 并给出了光纤纤芯直径与滤光带宽之间的经验公式。最后, 本文使用现有的一款与仿真参数相同的 DOE 用于激光雷达接收端, 并进行了实验测试。搭建了基于 DOE 接收的激光雷达测距实验系统, 实现了对 2.1 km 目标的测距, 验证了 DOE 具有聚光能力。同时, 使用纤芯直径为 10 μm 的单模光纤和纤芯直径为 200 μm 的多模光纤进行实验, 以计数率为评价指标衡量滤光能力, 并与带宽为 0.5 nm 的窄带滤光片对比, 结果表明, 使用单模光纤的实验结果基本与窄带滤光片的实验结果接近, 使用多模光纤的实验结果较差, 实验结果与仿真基本一致。因此, 在未来可利用 DOE 的高设计自由度和滤光特性, 实现激光雷达系统的轻量化、集成化、高效化。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Gargoum S, El-Basyouny K. Automated extraction of road features using LiDAR data: a review of LiDAR applications in transportation[C]//2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Banff, AB, Canada, 2017: 563–574. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047822>.
- [2] Dassot M, Constant T, Fournier M. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges[J]. *Ann For Sci*, 2011, **68**(5): 959–974.
- [3] Rivera G, Porras R, Florencia R, et al. LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: a review of recent advances[J]. *Comput Electron Agric*, 2023, **207**: 107737.
- [4] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(7): 15–27. 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 15–27.
- [5] Ma Y Z, Zhang Y F, Feng S. A denoising algorithm based on neural network for side-scatter lidar signal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(6): 220341. 马愈昭, 张岩峰, 冯帅. 基于神经网络的侧向激光雷达信号去噪算法[J]. *光电工程*, 2023, **50**(6): 220341.
- [6] 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.
- [7] Yan D L, Gao S, Li S H, et al. Detection of road roughness and drivable area based on LiDAR[J]. *Laser Technol*, 2022, **46**(5): 624–629. 闫德立, 高尚, 李韶华, 等. 基于激光雷达的道路不平度及可行驶区域检测[J]. *激光技术*, 2022, **46**(5): 624–629.
- [8] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, et al. Use of LiDAR in landslide investigations: a review[J]. *Nat Hazards*, 2012, **61**(1): 5–28.
- [9] Li M L, Zhu J G, Meng Z, et al. Design of lightweight and small sized airborne laser scanner[J]. *Infrared Laser Eng*, 2015, **44**(5): 1426–1431. 李孟麟, 朱精果, 孟拓, 等. 轻小型机载激光扫描仪设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(5): 1426–1431.
- [10] Liu B, Jiang Y, Wang R, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon Lidar[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(1): 20220748. 刘博, 蒋贇, 王瑞, 等. 全天时单光子激光雷达技术进展与系统评价[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(1): 20220748.
- [11] Li R C, Zou Y J, Chen T H, et al. Broadband achromatic metasurface holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230118. 李瑞琛, 邹毅军, 陈天航, 等. 宽频消色散超表面全息成像[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230118.
- [12] Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230117. 柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230117.
- [13] Yu J J, Han Q Q, Ma J, et al. Potential application of diffractive optical elements in satellite laser communication terminals[J]. *Infrared Laser Eng*, 2013, **42**(1): 130–137. 俞建杰, 韩琦琦, 马晶, 等. 衍射光学元件在卫星激光通信终端中的潜在应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(1): 130–137.
- [14] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(3): 255–275. 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [15] Wan Y Q, Liu W J, Lin R Y, et al. Research progress and applications of spectral imaging based on metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230139. 万源庆, 刘威骏, 林若雨, 等. 基于超构表面的光谱成像及应用研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(8): 230139.
- [16] Schwemmer G K, Wilkerson T D, Guerra D V. Compact scanning LiDAR systems using holographic optics[J]. *Proc SPIE*, 1998, **3504**: 51–59.
- [17] Schwemmer G K. Holographic airborne rotating LiDAR instrument experiment (HARLIE)[C]//Nineteenth International Laser Radar Conference, 1998: 623–626.
- [18] Schwemmer G K, Wilkerson T D. Development of a

- holographic telescope for optical remote sensing[J]. *Proc SPIE*, 1994, **2270**: 40–47.
- [19] Marino R M, Davis W R, Jr. Jigsaw: a foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Lab J*, 2005, **15**(1): 23–36.
- [20] Smith J G, Ramos-Izquierdo L, Stockham A, et al. Diffractive optics for moon topography mapping[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6223**: 622304.
- [21] Hu X, Li D J. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(12): 1210002.
胡焯, 李道京. 10 m衍射口径天基合成孔径激光雷达系统[J]. *中国激光*, 2018, **45**(12): 1210002.
- [22] Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research on space-borne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture[J]. *Chin J Lasers*, 2022, **49**(3): 0310001.
李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2m衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. *中国激光*, 2022, **49**(3): 0310001.
- [23] Shi H T, Shen G Y, Qi H Y, et al. Noise-tolerant Bessel-beam single-photon imaging in fog[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(7): 12061–12068.
- [24] Shi H T, Qi H Y, Shen G Y, et al. High-resolution underwater single-photon imaging with Bessel beam illumination[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2022, **28**(5): 8300106.
- [25] Siemion A. The magic of optics —An overview of recent advanced terahertz diffractive optical elements[J]. *Sensors*, 2020, **21**(1): 100.
- [26] Huo J Q, Hu Y, Cheng B P. History and application of diffractive optics technology[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2023, **60**(7): 0700002.
霍家琦, 胡源, 程彬鹏. 衍射光学技术发展历程及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(7): 0700002.
- [27] Poleshchuk A G. Fabrication and application of diffractive optical elements[J]. *Proc SPIE*, 2010, **7544**: 75443L.

作者简介



王玲 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光雷达探测的研究。

E-mail: 2049759660@qq.com



【通信作者】刘博 (1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光雷达探测与通信的研究。

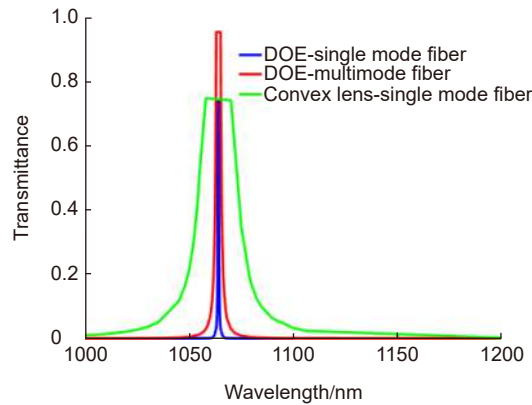
E-mail: boliu@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving

Wang Ling^{1,2,3,4}, Liu Bo^{1,2,3,4*}, Wu Cheng^{1,3,4}, Luo Lan^{1,2,3}, Yang Yuqiang^{2,3}



The filtering characteristics of DOE

Overview: LiDAR is an advanced active detection system that combines laser technology and photoelectric detection technology, which can obtain the three-dimensional spatial information of the target quickly and accurately and is widely used in civil, aerospace, and military fields such as autonomous driving, space rendezvous, and docking, target recognition and so on. The design and optimization of optical systems is an important research direction for LiDAR systems. The traditional LiDAR receiver generally uses a set of lenses and filters (such as an interference filter, dispersion filter, etc) to achieve the focusing and filtering functions of the echo energy. The two are independent devices, which increases the complexity of the system. In contrast, the diffractive optical element (DOE) uses micro-nano processing technology to etch relief structure on the substrate to achieve phase control and has the advantages of lightweight and large dispersion, which can be introduced into the LiDAR receiver to achieve focusing and filtering functions at the same time. In this paper, the characteristics of DOE at the receiving end of LiDAR are analyzed and tested. Firstly, we simulate the filtering characteristics of the combination of DOE and fiber, and the formula between the fiber core diameter and the filter bandwidth is given, that the smaller the diameter of the fiber core, the better the filtering effect. For example, the equivalent bandwidth of the fiber with 10 μm core diameter combined with DOE is 0.6 nm and the 200 μm core diameter is 12 nm. Secondly, a LiDAR ranging system based on DOE receiving was set up, with 1064 nm designed wavelength, 50 mm aperture, and 300 mm focal length. The system successfully measures the range of the 2.1 km target outside the experimental platform. Finally, the filtering ability of DOE was tested by using single mode fiber with 10 μm core diameter and multimode fiber with 200 μm core diameter respectively. Through comparative experiments, it is verified that the DOE is applied to the LiDAR receiver to achieve focusing, and it also has a narrow-band filtering effect to suppress noise when combined with the fiber, which is consistent with the simulation. In summary, the advantages of DOE in LiDAR are used to realize the lightweight, integration, and high efficiency of LiDAR.

Wang L, Liu B, Wu C, et al. Characteristics analysis and test of LiDAR based on diffraction lens receiving[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 240032; DOI: 10.12086/oe.2024.240032

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: boliu@ioe.ac.cn