

水下单光子激光雷达光学系统设计

刘春尧 于信 白素平 王凌云 邵会博 才存良

Underwater single-photon LIDAR optical system design

LIU Chun-yao, YU Xin, BAI Su-ping, WANG Ling-yun, SHAO Hui-bo, CAI Cun-liang

引用本文:

刘春尧, 于信, 白素平, 王凌云, 邵会博, 才存良. 水下单光子激光雷达光学系统设计[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0108

LIU Chun-yao, YU Xin, BAI Su-ping, WANG Ling-yun, SHAO Hui-bo, CAI Cun-liang. Underwater single-photon LIDAR optical system design[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0108

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0108>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内腔式非稳腔DF激光光束质量研究

Study on beam quality of DF laser with inner cavity unstable resonator

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1068 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0210>

产生环形激光的光学系统设计

Design of an optical system for generating ring-shaped laser beam

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1365 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0045>

轻巧型半主动激光制导光学系统设计

Design of a lightweight semi-active laser guided optical system

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1431 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0229>

面向空间目标广域探测的大视场宽光谱光学系统设计

Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1174 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0198>

折反式变形光学系统设计

Design of catadioptric anamorphic optical system

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0035>

大变倍比制冷型长波红外变焦光学系统设计

Design of cooled long-wave infrared optical system with large zooming range

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 69 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0052>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-12

水下单光子激光雷达光学系统设计

刘春尧, 于 信*, 白素平, 王凌云, 邵会博, 才存良
(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要:针对单光子激光雷达在水下广域探测中难以兼顾大扫描视场与系统小型化的问题,本文提出基于转镜扫描与环形隔水视窗密封相结合的技术方案。通过构建扫描角度、光束口径与转镜几何尺寸之间几何关系,结合环形隔水视窗构型,在满足大扫描视场的同时实现系统小型化;采用光线追迹方法建立光学系统初始结构,利用柱面光学元件的成像与补偿原理,改善激光束经环形隔水视窗跨介质传输后光束质量退化的问题,并结合望远系统开展一体化优化设计,进一步提升光束质量。实验结果表明,该系统可实现 110° 扫描视场,发射激光光束质量因子优于 1.3 倍衍射极限,发散角为 0.084 mrad ,传输效率为 91.00%,在水质衰减系数为 0.184 m^{-1} 环境中的最大探测距离为 24 m。该系统兼具大视场扫描能力和小型化结构优势,可为水下广域探测装备的工程化应用提供参考。

关键词:水下单光子激光雷达;激光光束质量补偿; 110° 大视场扫描

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.3724/CO.2026-0108 CSTR: 32171.14.CO.2026-0108

Underwater single-photon LIDAR optical system design

LIU Chun-yao, YU Xin*, BAI Su-ping, WANG Ling-yun, SHAO Hui-bo, CAI Cun-liang
(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Jilin Changchun 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: 41213100@qq.com

Abstract: To address the challenge of simultaneously achieving a large scanning field of view and system miniaturization in underwater single-photon LiDAR, this paper proposes a technical solution based on mirror scanning and a sealed annular window. By establishing the geometric relationship between scanning angle, beam aperture, and mirror size, and integrating an annular water-isolated window structure, the system achieves miniaturization while maintaining a large scanning field of view. The initial optical system structure is built using ray tracing, and by applying the imaging and compensation principles of cylindrical optical elements, it improves the degradation of beam quality after passing through the annular window across different media. Integrated optimization with the telescope system further enhances beam quality. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a scanning field of view of 110° , a beam quality factor of less than 1.3 times the diffraction limit, a beam divergence angle of 0.084 mrad , and a transmission effi-

收稿日期: 2026-06-25; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 62205032); 吉林省科技发展计划重点研发项目 (No. 20260201027GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Foundation (No. 62205032); Jilin Province Science and Technology Development Plan Item (No. 20260201027GX)

ciency of 91.00%. The maximum detection range reaches 24m in water with an attenuation coefficient of 0.184m^{-1} . The proposed system provides both wide-field scanning capability and compact structural advantages, offering a potential solution for the engineering development of underwater wide-area detection platforms.

Key words: Underwater single-photon lidar, Laser beam quality compensation; Geometric figure; 110° wide-angle scan

1 引言

单光子激光雷达凭借高灵敏度、高时间分辨率和高精度测距能力,在微弱回波探测、远距离成像和三维重建等方面具有显著优势^[1],为水下目标识别、考古勘察、海洋测绘及水下三维场景重建等任务提供了新的技术支撑。随着海洋探测技术快速发展以及水下高精度自主探测和复杂海域精细感知需求的不断提升^[2-3],水下单光子激光雷达逐渐成为水下探测领域的重要研究方向。对于水下单光子激光雷达系统而言,光学系统直接决定出射激光光束质量、扫描覆盖范围以及能量传输效率,是决定系统探测性能与工程应用能力的关键组成部分。因此,面向水下广域探测需求开展单光子激光雷达光学系统设计是具有重要的研究意义和应用价值。

随着海洋强国战略深入实施与水下光电探测技术快速发展^[4-5],水下单光子激光雷达系统由传统窄视场、光束质量受限以及非紧凑构型转向大视场扫描、高质量光束传输与系统小型化协同设计的发展方向。在水下单光子激光雷达发展初期,为压缩系统发射光束发散角、提高远距离传输过程中的能量利用率和回波信噪比,程藻等^[6]设计了一种收发分置结构的水下目标探测系统,采用平板隔水视窗结构,通过望远系统对发射激光的发散角进行压缩,将光束发散角从 37 mrad 降至 10 mrad 。随着高性能脉冲激光器和单光子探测器技术的发展,系统探测灵敏度和远距离弱回波探测能力不断提升,研究重点逐渐由光束质量优化转向大视场扫描、小型化结构及工程适应性协同设计。华康健等^[7]通过平板隔水视窗方案与振镜扫描方式设计一种扫描视场为 $\pm 40^\circ$ 、光束发散角为 0.6 mrad 的水下光子计数激光雷达,系统尺寸为 $360\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。

然而,振镜扫描依靠反射镜机械往复摆动实现光束偏转,其扫描视场受限于反射镜惯量及偏转角范围^[8]。此外,采用平板视窗和长方体耐压舱构型会导致水下密封、耐压设计难度增加,且相同参数下系统体积较大。Mingjia Shangguan 等^[9]聚焦系统小型化及深水适应性需求,采用平板视窗与圆柱体耐压舱结构形式,研制了直径为 180 mm 、长度为 680 mm 的紧凑型水下单光子激光雷达,但未介绍扫描视场。

目前,水下光学系统多采用平板隔水视窗方案,一方面是其结构形式简单、视窗加工工艺成熟,密封和耐压设计方案成熟;另一方面,平板隔水视窗理想情况下,不会引入额外的像差,使其光束质量退化。然而,随着扫描视场的增加,所需平板隔水视窗尺寸将呈非线性增长,导致密封、耐压设计难度增大。并且系统体积随平板隔水视窗尺寸增加而增加,难以兼顾大视场与设备小型化的迫切需求。相比之下,环形隔水视窗凭借周向连续曲面结构,可充分利用径向空间实现大范围扫描,其结构尺寸受扫描视场扩展影响较小,有利于实现大视场扫描与系统小型化协同设计,但激光光束经曲面跨介质传输会引入方向不对称的光束偏折和像差,降低出射光束质量。

针对上述问题,本文提出了一种基于转镜扫描与环形视窗密封的发射光学系统构架。通过建立扫描角度、光束口径与转镜尺寸之间的几何关系,推导不切光条件下转镜最大扫描角的理论公式,并确定了扫描视场下的最小转镜尺寸;结合环形隔水视窗密封技术方案,在实现大扫描视场的同时兼顾系统小型化设计;利用柱面光学元件成像与补偿原理,结合光线追迹方法构建光学系统初始结构,并采用望远发射系统进行一体化优化设计,提升系统出射光束质量,解决环形隔水视窗引入不对称光束偏折和像差的难题。该方案实

现了水下单光子激光雷达广域探测中大扫描视场、结构小型化与水下密封适应性协同优化设计。

2 光学系统设计方案及其性能指标

水下单光子激光雷达广域探测系统需要在有限结构尺寸内实现较远距离探测、大角度扫描和较高能量利用效率^[10]。因此,发射光学系统应同时满足小发散角、一定出射口径、大扫描视场、高传输效率以及结构小型化等要求。

激光在海水中传输时会受到吸收和散射的共同影响,其中 400~550 nm 蓝绿波段在海水中的衰减相对较小,是水下激光探测常用的传输窗口^[11-12]。结合系统工作波段要求、激光器输出能量、脉冲宽度以及器件成熟度,本文选用中心波长 532 nm 激光器作为发射光源,其光束束腰为 0.8 mm,发散角为 1.05 mrad,光束质量因子 1.25。

在不同初始束腰参数下,激光传输不同距离的光斑尺寸变化规律如图 1 所示。当发射端束腰尺寸为 10 mm 时,光束衍射发散效应受到抑制,传输距离远近对其光斑尺寸影响较弱。为使发射光束达到其 10 mm 束腰尺寸,该系统采用望远系统进行扩束准直,在扩束出射光束口径的同时压缩光束发散角。通过望远系统压缩激光光束发散角原理可知,系统出射光束发散角应小于 0.1 mrad。

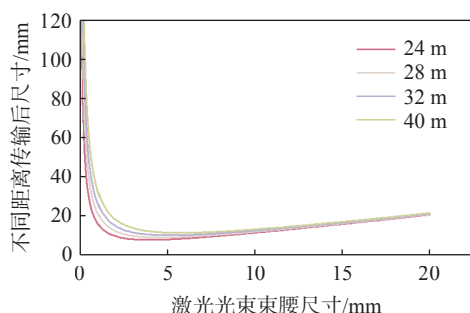


图 1 不同束腰激光光束传输不同距离后的光斑大小

Fig. 1 The spot size of different waist laser beams after transmitting at different distances

综合水下广域探测需求,本文所设计的水下单光子激光雷达光学系统主要技术指标如表 1 所示。

表 1 水下单光子激光雷达光学系统指标

Tab. 1 Optical system index underwater single photon lidar

指标	参数
工作波段	532±1nm
发散角	<0.1mrad
口径	≥10mm
探测距离	>24m
扫描角度	0°~110°
传输效率	>90%
尺寸	220mm-450mm(直径-长度)

图 2 为水下单光子激光雷达光学系统布局图。激光器输出光束首先进入望远发射系统,通过扩束准直压缩光束发散角,使光束在目标距离处保持较小光斑尺寸和较高能量集中度。随后,准直后的光束经方形转镜反射偏转,实现大角度扫描输出,以满足水下广域探测对扫描视场的要求。由于系统工作于水下环境,发射光路需要通过密封视窗完成由舱内空气介质到外部水介质的传输。为适应转镜扫描光束的出射路径,本文采用环形隔水视窗密封结构,以保证扫描光束在较大角度范围内均可有效出射。由于环形隔水视窗会导致激光光束质量退化,采用柱面光学元件进行补偿。需要说明的是,图 2 中接收通道仅用于说明水下单光子激光雷达系统的整体布置关系,本文研究重点集中于发射光学系统设计,后续主要围绕发射望远系统、环形隔水视窗补偿以及转镜扫描尺寸约束展开分析。

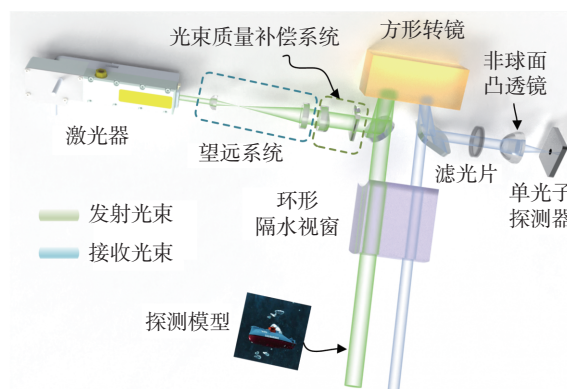


图 2 水下单光子激光雷达光学系统整体结构图

Fig. 2 The overall structure diagram of the optical system of the underwater single-photon laser radar

3 大视场转镜扫描系统设计

3.1 大视场转镜扫描系统工作原理

转镜由多面反射镜组成,通过绕其中心轴高速旋转实现光束大视场扫描。当激光垂直入射到转镜旋转中心轴上时,转镜每偏转 θ 度,光束会偏转 2θ 度,基于此可有效拓展激光光束的扫描视场^[13]。为实现 110° 大扫描视场,综合考虑高速扫描工况下转镜的动力学稳定性,在维持反射面有效扫描宽度恒定的约束条件下,多面扫描棱镜构型随面数增加导致结构尺寸增大,本文选用具有对称结构的四反射面方形转镜设计。

当激光光束沿转镜中心轴入射至其反射面时,随着转镜旋转角度连续变化,在特定转角区间会产生光束切光现象,进而导致发射激光能量密度不均,使系统无法完全旋转到下一反射面后再进行新一轮扫描。因此,转镜的扫描角度与激光光束口径和转镜尺寸有关。该方式下转镜最大扫描角度原理如图3(a)所示。

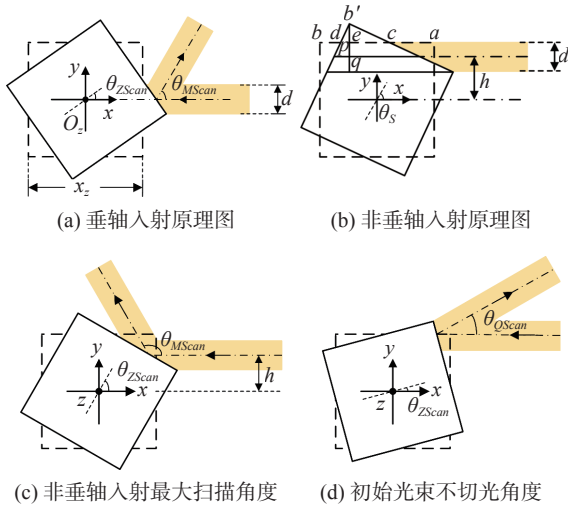


图3 激光光束在不同位置时转镜扫描角度原理图

Fig. 3 The principle diagram of scanning angle of rotating mirror when laser beam is in different positions

当激光光束沿转镜的中心线垂直入射到转镜的旋转中心轴上时,在不切光条件下,该转镜的最大扫描角度应如公式(1)所示。

$$\theta_{Scan} = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}d}{2X_z} \right), \quad (1)$$

其中, d 为激光光束口径, X_z 为方形转镜尺寸。

激光光束在转镜中心轴上方垂直入射到转镜

时,其最大光束扫描角度与沿转镜中心轴入射时有一定差异。当光束在转镜中心轴上方入射时,其原理如图3(b)所示。

建立入射光束位置 h 、转镜旋转角度 θ_s 、光束口径 d 与转镜尺寸 X_z 之间的几何关系如公式(2)所示。

$$\begin{cases} X_z = ac + \frac{b'c}{\sin \theta_s} + db \\ X_z = \frac{(b'e + ep + pq)}{\cos \theta_s} \end{cases}, \quad (2)$$

通过几何关系可以知 $ac = b'c$ 、 $db = ac / \tan \theta_s$ 、 $b'e = b'c \cdot \cos \theta_s$ 、 $ep = X_z/2 - h$ 、 $pq = d/2$, 带入上述参数,可把公式(2)变换为转镜尺寸 X_z 与 θ_s 关系表达式,如公式(3)所示。

$$X_z \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta_s + \cos \theta_s + 1} = X_z - \frac{X_z - 2h + d}{2 \cos \theta_s}, \quad (3)$$

激光光束在转镜中心轴上方入射时,在不产生切光的条件下,转镜实际最大扫描角度原理如图3(c)所示;当入射光束位置 h 大于 $X_z - d/2$ 时,激光入射至转镜反射面的初始位置时会发生切光现象,其转镜不发生切光现象的初始位置如图3(d)所示。

通过公式(3)可推导出在转镜反射面不切光条件下,该转镜的实际最大扫描角度如公式(4)所示。当入射光束位置 h 大于 $X_z - d/2$ 时,激光光束切光入射至转镜反射面上。当转镜扫描角度为 θ_{Qscan} 时,激光光束在转镜反射面上不会发生切光现象。

$$\begin{cases} \theta_{MScan} = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{2}d - 2\sqrt{2}h}{2X_z} \right) \left(0 < h \leq X_z - \frac{d}{2} \right) \\ \theta_{QScan} = 2 \arcsin \left(\frac{d + 2h}{X_z \sqrt{2}} \right) - \frac{\pi}{2} \left(X_z - \frac{d}{2} < h \right) \end{cases}, \quad (4)$$

在转镜启动扫描的初始阶段,系统内部反射元件与相对应的机械结构会对入射光束产生遮挡效应,导致由公式(4)推导得到的转镜最大扫描角度无法充分利用。为获取精确的系统有效扫描视场,需在理论最大扫描角度的基础上扣除初始遮光角度。以发射光束直径 10 mm、系统内部反射元件尺寸为 20 mm 确定其初始遮光角度为 24° 。根据图4可知,对不同转镜尺寸与光束入射位置的分析,得出扫描视场 110° 时的最佳转镜尺寸为 32 mm。

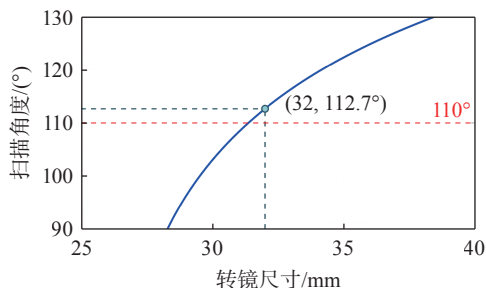


图4 转镜尺寸与扫描角度之间关系图

Fig. 4 The relationship between the size of the rotating mirror and the scanning angle

3.2 大视场转镜扫描系统仿真分析

将转镜模型与发射望远光学系统模型导入, 通过 ZEMAX 非序列仿真、多重结构编辑器改变转镜转角, 分别得出未添加隔水视窗情况下, 扫描初始 0° 位置(转镜旋转 12°)、扫描角度为 55° 位置(转镜旋转 39.5°)与扫描终止 110° 位置(转镜旋转 67°), 仿真如图 5 所示。由仿真分析可知, 本文所设计的系统在有效扫描范围 110° 时, 转镜没有发生切光现象, 满足设计指标要求。

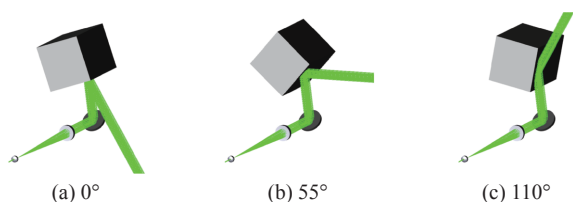


图5 无视窗时转镜扫描角度仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of scanning angle of rotating mirror without window

为分析平板隔水视窗与环形隔水视窗对其系统体积的影响, 分别添加平板视窗与环形视窗进行分析, 结果如图 6、7 所示。

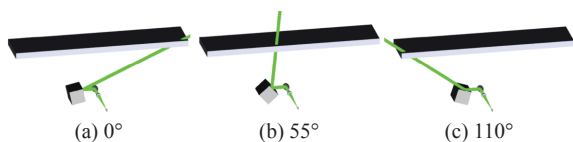


图6 平板视窗转镜扫描角度仿真图

Fig. 6 Flat window mirror scanning angle simulation diagram

由图 6 可得出扫描视场为 110° 时, 所需平板视窗尺寸为 $440 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 由图 7 可得, 所需环形视窗尺寸为 $200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (直径 $\times$ 宽度)。经分析结论可知, 采用环形视窗可解决水下单光子激光雷达大扫描视场与小型化难

以兼顾的问题。

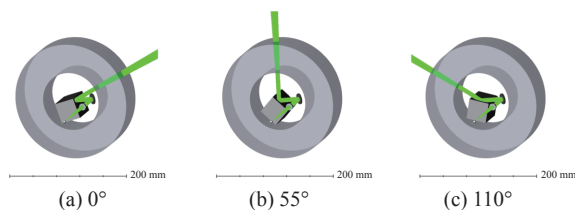


图7 环形视窗转镜扫描角度仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of scanning angle of annular window rotating mirror

当激光光束经过环形隔水视窗时会引入激光光束质量退化问题, 其退化光束效果主要表现为光束发散角增大与光斑形状椭圆化, 后续将针对上述问题进行激光光束质量补偿设计。

4 激光光束质量补偿系统设计

4.1 激光光束补偿系统设计原理

4.1.1 激光光束准直程度补偿原理

当准直光束透过环形隔水视窗时, 光束会向 X 方向或者 Y 方向压缩尺寸, 导致光束发散角增大、光斑能量集中度和利用率下降。为改善激光光束经过环形隔水视窗跨介质传输后使光束质量退化的问题, 本文通过分析柱面光学元件工作原理, 利用光焦度匹配方法改善光束准直程度, 其原理如图 8 所示。

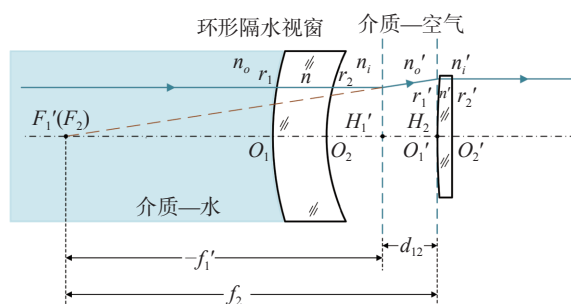


图8 激光光束准直程度补偿原理图

Fig. 8 Laser beam collimation degree compensation schematic diagram

环形视窗作为隔水材料, 窗口前的介质是水体, 窗口后的介质为空气。其光学系统像方焦距 f' 与物方焦距 f 之比为相应折射率之比的负值。

环形隔水视窗以及柱面光学元件参数可参考厚透镜计算公式, 厚透镜焦距计算公式如下^[14]:

$$f' = -\frac{n_i}{n_o} f$$

$$= \frac{n_i r_1 r_2 n}{d(n-n_o)(n-n_i) - nr_1(n-n_i) + nr_2(n-n_o)} \quad (5)$$

其中, n_i 为像方介质折射率; n_o 为物方介质折射率; r_1 为第一个面的曲率半径; r_2 为第二个面的曲率半径; n 为镜片折射率。

为满足小型化设计要求, 本文选用外径为 200 mm、内径为 100 mm 的蓝宝石环形隔水视窗, 根据公式 (5) 可计算得出该环形隔水视窗焦距为 -109.975 1 mm。

其厚透镜主平面位置与基点位置计算公式如下:

$$\begin{cases} l_{H'} = -f' \frac{n-n_o}{nr_1} d \\ l_H = -f' \frac{n-n_i}{nr_2} d \\ l_{F'} = f' \left(1 - \frac{n-n_o}{nr_1} d \right) \\ l_F = -f' \left(1 + \frac{n-n_i}{nr_2} d \right) \end{cases} \quad (6)$$

其中, d 为镜片厚度, $l_{H'}$ 为像方主平面, l_H 为物方主平面, $l_{F'}$ 为像方基点, l_F 为物方基点。

为分析环形隔水视窗的聚散能力, 根据视窗焦距可推导出该透镜的光焦度 ϕ , 光焦度为负数时证明该系统具有发散效应, 反之具有会聚效应^[15]。光焦度计算方法如公式 (7) 所示。经计算可得环形隔水视窗光焦度为 -0.009 093 D, 该数值表明隔水视窗会导致光束发散。

$$\phi = \frac{n_i}{f'}$$

$$= \frac{d(n-n_o)(n-n_i) - nr_1(n-n_i) + nr_2(n-n_o)}{r_1 r_2 n} \quad (7)$$

为补偿环形隔水视窗的发散效应, 提高发射激光光束的准直程度, 通过组合系统光焦度原理进行分析, 如公式 (8) 所示^[16]:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - D_o \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \quad (8)$$

其中, ϕ_1 为隔水视窗光焦度; ϕ_2 为补偿柱面透镜光焦度; D_o 为隔水视窗像方主平面位置至补偿柱面透镜物方主平面位置距离。其中 $D_o = d_{12} - l_{H_1'} + l_{H_2}$, d_{12} 为隔水视窗与补偿柱面光学元件的光学间隔。

将公式 (6) 与 (7) 带入公式 (8) 中即可得到柱面光学元件补偿环形隔水视窗发散效应的理论公

式 (9)。

$$f_1' \left(n_o' - n_i n_o' - n_i n_o' \frac{n-n_o}{nr_1} d_1 \right)$$

$$= f_2 \left(n_i + n_i n_o' + n_i n_i' \frac{n'-n_i'}{n' r_2'} d_2 \right) \quad (9)$$

其中, f_1' 为环形隔水视窗焦距, f_2 为柱面光学元件焦距, r_1 为环形隔水视窗与水介质接触面的曲率半径, r_2' 为补偿柱面光学元件后表面曲率半径, n_o' 、 n_i 、 n_i' 均为空气介质折射率 1, n_o 为水介质折射率 1.333, n 为环形隔水视窗材料折射率, n' 为柱面光学元件材料折射率, d_1 为环形隔水视窗厚度, d_2 为补偿柱面透镜厚度。

根据上述参数对其公式 (9) 化简可得公式 (10)。

$$f_1' \left(-\frac{n-1.333}{nr_1} d_1 \right) = f_2 \left(2 + \frac{n'-1}{n' r_2'} d_2 \right) \quad (10)$$

公式化简后, 仅需代入环形隔水视窗的光学参数及部分补偿柱面光学元件参数, 即可求解补偿系统全部光学参数。

环形隔水视窗将引入子午-弧矢非对称像差, 采用柱面光学元件可实现光束发散程度的定向补偿。通过补偿倍率控制发散角校正幅度, 结合转镜扫描结构, 补偿柱面光学元件与环形隔水视窗的光学间隔应控制在 1.5 倍~2 倍环形隔水视窗内径之间。选取平凸柱面光学元件材料为 H-ZLAF4LB, 折射率 ($\lambda=532$ nm) $n'=1.9108$, 厚度为 5 mm。柱面光学元件的焦距与光束准直程度补偿系统的倍率、光学间隔关系如图 9 所示。经上述分析及公式 (10) 计算可知, 补偿柱面光学元件前表面曲率 $r_1'=166.942$ 1 mm、焦距 $f_2=183.291$ 8 mm, 该焦距所对应的光学系统间隔为 87.013 7 mm。

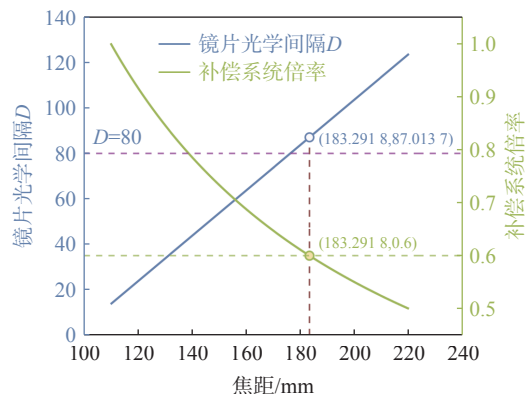


图 9 柱面镜补偿系统

Fig. 9 Cylindrical mirror compensation system

4.1.2 光斑形状补偿原理

激光光束准直程度补偿系统可降低环形隔水视窗引入的光束发散效应, 由于补偿系统倍率不为 1, 导致补偿后激光光斑从圆形光斑变成椭圆光斑(X 方向直径为 10 mm、Y 方向直径为 16.67 mm), 光斑形状变化明显。本文采用反向光线追迹方法, 利用柱面光学元件的光学参数, 使望远系统与补偿发散角系统的光斑大小匹配, 其原理如图 10 所示。

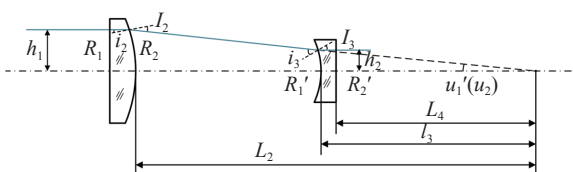


图 10 光线追迹法补偿光斑形状原理图

Fig. 10 The principle diagram of light spot shape compensation by ray tracing method

反向光线追迹利用平凸柱面光学元件和平凹柱面光学元件的光学间隔、入射光束尺寸以及出射光束尺寸等参数, 通过光线追迹公式依次求解光线在系统每一折射面处的变化情况, 得出光斑补偿系统的光学元件参数。

光束从无限远位置入射时, 其光线追迹原理如公式 (11) 所示^[17]:

$$\begin{cases} \sin i = \frac{h_1}{R} \\ n' \cdot \sin I = n_1 \cdot \sin i \\ u' = i - I \\ L = R + R_2 \cdot \frac{\sin I}{\sin u'} \end{cases}, \quad (11)$$

其中: u 和 u' 分别为物空间、像空间光线与光轴间的夹角, n_1 物方空间折射率, n' 表示像方空间折射率, i 为入射光线与法线的夹角, I 为折射光线与法线的夹角, l 表示物方截距, L 表示像方截距, R 为透镜曲率半径, h_1 为光束半宽度。

为便于后续装调, 光斑补偿系统光学间隔设定为 20 mm。入射光束尺寸为 16.67 mm、出射光束尺寸为 10 mm, 经计算像空间光线与光轴的夹角为 9.467° 。通过公式 (11) 计算可知, 其第一片透镜曲率 R_2 为 47.68 mm, 第二片透镜曲率分别为 R_3 为 28.22 mm, R_4 为 ∞ 。

经上述分析可知, 补偿隔水视窗发散角作用的柱面光学元件后表面为平板, 补偿光斑形状的

第一块柱面光学元件前表面为平板。光束在两片光学元件间是平行出射至平行入射, 在数值上可合成一块光学元件。综上所述, 仅用两片柱面光学元件即可补偿环形隔水窗口对激光光束质量退化的影响, 使发射激光光束达到一个近似理想状态。

4.2 激光光束质量补偿系统仿真结果

为验证激光发射光束质量, 对构建的光学系统初始结构进行波前优化。通过优化后的光学系统模型对发射激光发散角以及光斑形状进行仿真分析, 实现对系统输出激光光束质量的综合评价。

4.2.1 激光光束准直程度补偿系统及仿真结果

为验证激光发射光束的发散角, 对光学系统点列图、圈入能量图以及几何光斑图进行分析^[18]。由点列图 11(a) 可知, 该系统能量集中度较高, 且像面光线均在艾里斑半径内。采用环围能量曲线来衡量系统光束质量的变动情况, 如图 11(b) 可知, 在环围能量为 83.6% 时聚焦光斑与衍射极限光斑的比值为 1.12, 证明光束质量良好。

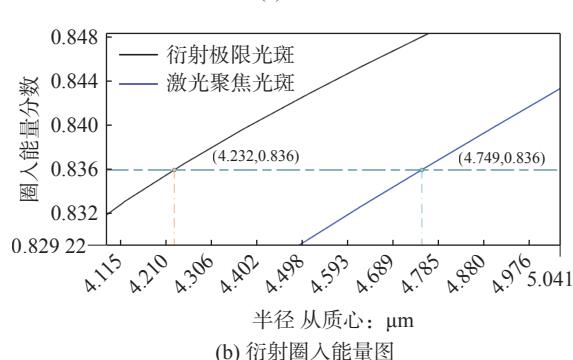
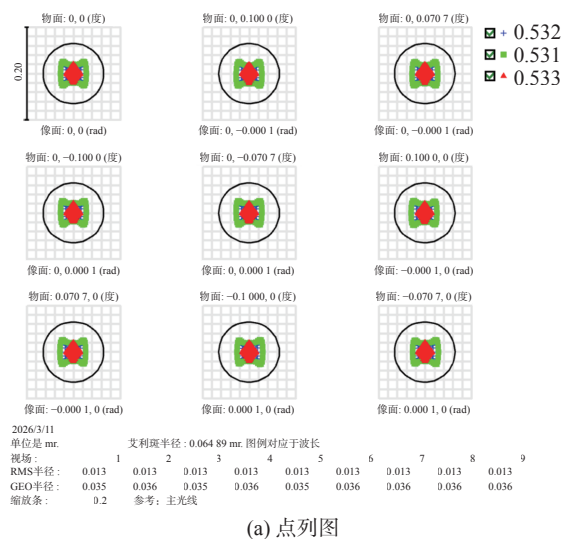


图 11 激光光束准直程度仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of laser beam collimation degree

根据几何光斑图 12 可知, 激光通过环形隔水

视窗后经过发散角补偿系统,使其光斑变为椭圆形,为了保证发射激光光束质量,通过光斑形状补偿原理对其发射激光光斑形状进行补偿。

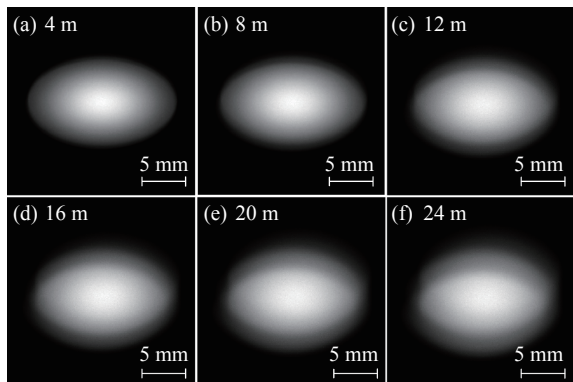


图 12 补偿发散角后不同距离下的几何光斑图

Fig. 12 Geometric spot diagrams at different distances after compensating the divergence angle

4.2.2 激光光束光斑形状补偿系统及仿真结果

为验证激光发射光束的光斑形状,对激光光束光斑形状补偿系统优化后的几何光斑图进行分析。由几何光斑图 13 可知,该系统光斑大小为 10 mm,传输 24 m 后光斑大小约为 12 mm。

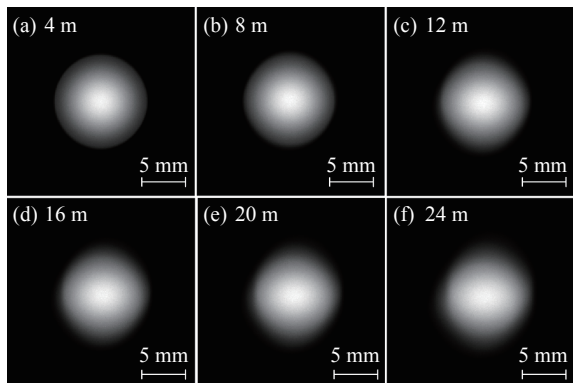


图 13 补偿光斑形状后不同距离下的几何光斑图

Fig. 13 Geometric spot diagram at different distances after compensating spot shape

由于该系统镜片布局复杂,若不镀增透膜,则发射光束出视窗前因各个光学面的反射使其光束产生较大的能量损耗,影响探测精度^[19]。利用 Zemax 查看未镀膜、0.99 增透膜与 0.995 增透膜对像面能量的影响,镀膜与未镀膜的传输效率如表 2 所示。

由表 2 可看出,未镀膜时因各表面反射造成能量损失导致激光从视窗传输后的能量不足初始能量的 50%,因此镀膜是必要的。镀 0.99 增透膜

后传输效率可达 85% 以上;镀 0.995 增透膜后传输效率可达 90% 以上。为满足设计要求,该镜组需镀 99.5% 增透膜保证激光传输效率。

表 2 系统传输效率

Tab. 2 System transmission efficiency

膜系	传输效率
未镀膜	41.06%
0.99 增透膜	85.12%
0.995 增透膜	90.43%

5 实验结果与分析

5.1 大视场扫描角度测试实验

在实验测试中,对搭建的水下单光子激光雷达系统开展光束发散角、扫描视场及最远探测距离性能测试,系统整机外形尺寸为 220 mm×450 mm(直径×长度)。

水下单光子激光雷达的扫描角度是反映系统探测覆盖能力的关键指标,决定水下探测空间的有效覆盖范围与环境信息探索能力^[20]。

本次实验采用徕卡 TS60 全站仪,其测角精度为 0.5"^[20]。将该系统放置光学平台上,采用高度尺测量系统出光位置高度,将全站仪放置在系统回转中心后方 200 mm 位置处,打开全站仪激光指示灯,用高度尺测量全站仪出光位置并且使用升降位移台调至与系统出光位置一致。其原理如图 14(a) 所示,实验装置如图 14(b) 所示。

使用水下单光子激光雷达系统扫描,利用光束尺寸卡在墙上记录初始位置点与最终位置点,并用全站仪测得两点之间的角度。通过公式 (12) 即可通过全站仪扫描角度 θ_w 计算得出水下单光子激光雷达的扫描角度 θ_s 。

$$\theta_s = \arctan\left(\left(1 + \frac{L_H}{L_x}\right)\tan\theta_w\right), \quad (12)$$

其中, L_x 为扫描点至水下单光子激光雷达转镜回转中心距离 3 000 mm; L_H 为水下单光子激光雷达转镜回转中心与全站仪扫描中心的距离,其距离为 200 mm。

根据扫描视场计算与非序列仿真结果,对系统扫描视场角进行测量,根据全站仪测量数据测

试 10 次取平均值。将其平均值代入公式 (14) 即可得出该系统扫描视场角, 其扫描视场角测试实验结果如图 15 所示。实验结果表明, 该系统扫描视场角为 $110^{\circ}54'10''$, 满足其设计指标要求。

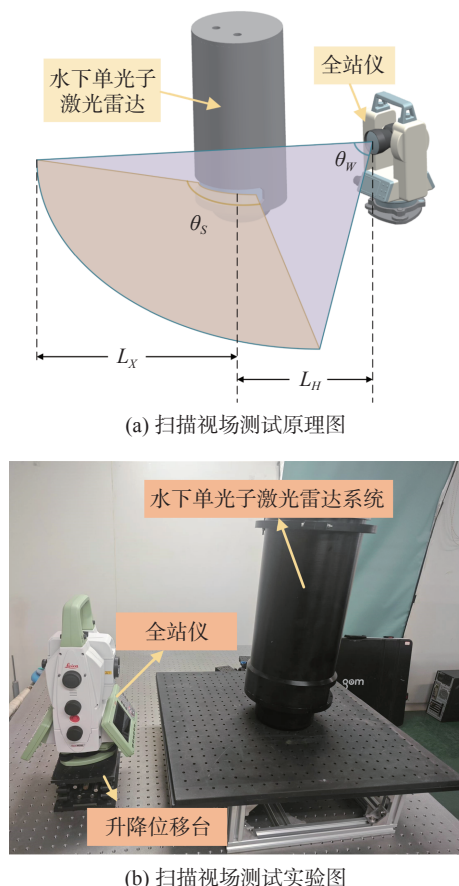


图 14 扫描视场实验图

Fig. 14 Scanning field of view experimental diagram

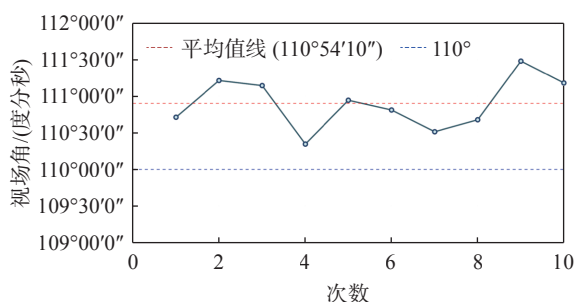


图 15 视场测试结果图

Fig. 15 Field of view test result diagram

5.2 激光发散角及其光束质量测试实验

激光光束发散角能反应光束在长距离传输过程中的发散特性, 是检验水下单光子激光雷达的一个重要参数。

为验证水下单光子激光雷达发射光束准直程

度, 采用焦斑法进行测试^[21]。由于水下测试条件有限, 本次实验将采用替代法, 利用激光光束补偿原理计算出在空气中所需的补偿柱面光学元件参数, 将补偿柱面光学元件放入水下单光子激光雷达系统中进行测试, 实验装置如图 16 所示。由于激光光束能量较高, 为防止相机遭到不可逆的损坏, 本次实验将在试验样机与相机之间添加一个衰减片。

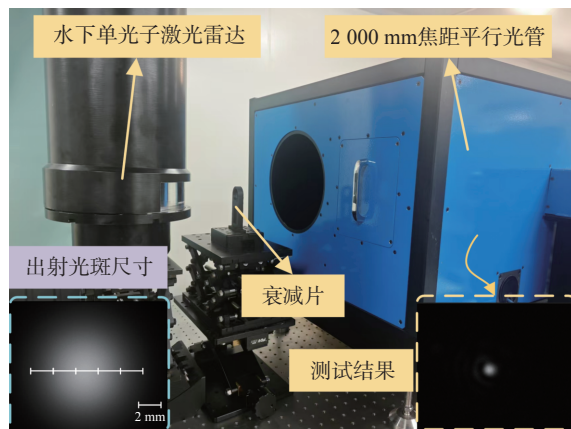


图 16 发散角测试实验及结果图

Fig. 16 Divergence angle test experiment and result diagram

实验结果表明, 采集图像的像斑尺寸为 $168 \mu\text{m}$, 经计算该系统发散角为 0.084 mrad , 小于 0.1 mrad , 满足技术指标要求; 该激光光束其汇聚理论艾里斑大小为 $130 \mu\text{m}$, 经计算可知激光发射光束质量因子优于 1.3 倍衍射极限, 满足技术指标要求。

5.3 系统传输效率测试实验

系统传输效率是衡量激光传输能力损耗的关键指标。其光学系统传输效率可直接决定激光器的能量利用率, 增强水下激光能量强度与目标回波光子数, 提升水下单光子激光雷达的有效探测距离。由于激光在传输过程中受光学元件界面反射、介质本体吸收、微粒散射等多重效应共同作用产生能量衰减, 为验证该系统的光学镜组透过率及其传输效率, 将采用激光经过光学系统后的出射光功率与激光器初始功率的比值进行评估。具体实验如图 17 所示。

本实验采用 Thorlabs PM100D 功率计对激光功率进行测量。实验结果表明, 激光器输出功率为 110.24 mW , 激光经过光学系统后出射激光功率为 100.32 mW , 经计算可知系统传输效率为 91.00% , 满足其设计指标要求。

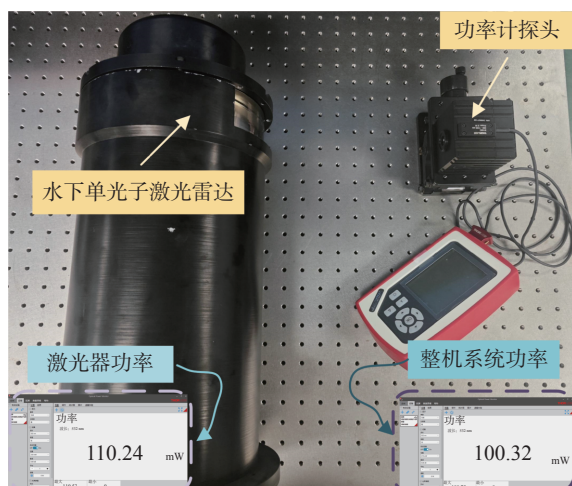


图 17 系统传输效率测试实验

Fig. 17 Optical system transmittance test experiment

5.4 水下最大探测距离实验

水下单光子激光雷达的探测距离实验在长 50 m 宽 25 m 的水池中进行实验,其水质衰减系数为 0.184 m^{-1} 。将水下单光子激光雷达放置水池边后,在另一侧放置目标反射板,其目标反射率为 16%。分别在不同距离位置依次进行测距,通过观察探测回波光子计数直方图分析该系统的探测最远距离,并观察光斑形态即可验证环形隔水视窗对激光光束质量影响的补偿效果。表 3 为水下单光子激光雷达系统参数。

表 3 水下单光子激光雷达系统参数

Tab. 3 Parameters of underwater single-photon laser radar system

指标	参数
脉冲能量	$>5\mu\text{J}$
重复频率	$>20\text{kHz}$
脉宽	$<0.85\text{ns}$
平均输出功率	$>100\text{mW}$
单脉冲峰值功率	$>7\text{kW}$
接收孔径	25mm
探测效率	25%@532nm
暗记数	0.7Mcps

其未添加补偿柱面光学元件的系统探测光斑如图 18(a) 所示,添加补偿柱面光学元件的系统探测光斑如图 18(b) 所示。根据图 18 可知,该系统对环形隔水视窗影响激光光束质量的补偿较好。

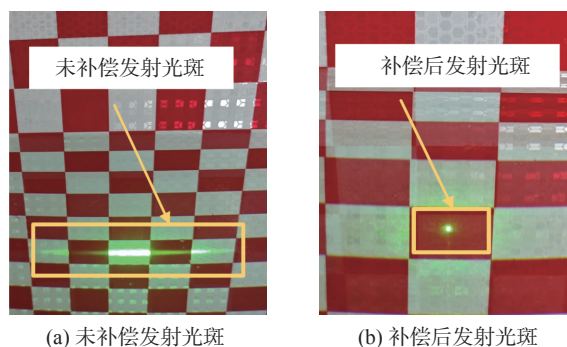


图 18 水下测距实验光斑补偿前后对比图

Fig. 18 Comparison diagram before and after spot compensation in underwater ranging experiment

通过记录不同距离下目标探测回波光子计数直方图,该系统在水质衰减系数为 0.184 m^{-1} 下最大测试距离为 24 m。其该系统在 24 m 下的回波光子计数直方图如图 19 所示。其中未添加补偿柱面光学元件的探测效果如图 19(a) 所示,添加补偿柱面光学元件的探测效果如图 19(b) 所示。

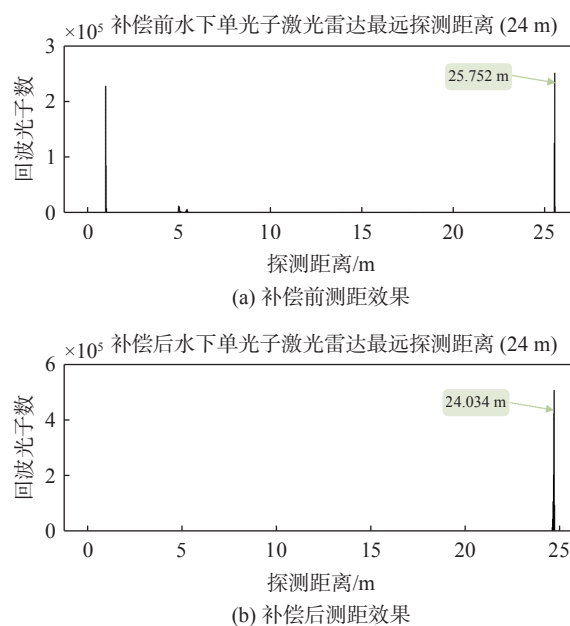


图 19 水下最大探测距离实验结果

Fig. 19 Experimental results of maximum underwater detection distance

由图 19 可知,未经柱面光学元件补偿前,该系统在 24 m 处探测距离为 25.752 m;经柱面光学元件对激光光束进行补偿后,该系统在 24 m 处探测距离为 24.034 m。其测距误差由 7.3% 降至 0.14%,由此可知经柱面光学系统补偿后,系统光束传输质量得到有效优化,对目标探测精度显著提升,同时在该水质环境下,探测距离可达 24 m,

满足设计指标。

6 结 论

本文提出了一种基于转镜扫描与环形隔水视窗密封相结合的水下单光子激光雷达光学系统设计方法。该系统采用方形转镜扫描方式,通过建立扫描角度、光束口径与转镜尺寸之间的几何关系,得出激光光束在转镜中心轴上方入射时转镜反射面不切光的理论最大扫描角度,结合系统扫描视场 110° 的技术指标,确定转镜最小尺寸为 32 mm;为实现大视场扫描性能的同时有效减小系统整机结构体积,针对不同隔水视窗构型进行仿真分析,在相同激光光束扫描角度的前提下,平板视窗尺寸为 $440\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),环形

视窗尺寸为 $200\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ (直径 $\times$ 宽度),根据分析结果,选取环形视窗作为隔水视窗;为改善激光光束经环形隔水视窗跨介质传输后易发生光束质量退化的问题,采用柱面光学元件的成像与补偿原理与光线追迹的方法,并结合望远系统开展一体化优化设计,进一步提升发射光学系统性能。实验结果表明,系统扫描视场为 110° ,发射激光光束质量因子优于 1.3 倍衍射极限,发射激光光束发散角为 0.084 mrad,传输效率为 91.00%,在水质衰减系数为 0.184 m^{-1} 环境中的最大探测距离为 24 m,经柱面光学元件补偿后测距误差由 7.3% 降至 0.14%。本文提出的相关设计与分析结果,可为在有限体积条件下水下单光子激光雷达光学系统实现大扫描视场提供具有参考意义的设计思路。

参考文献:

- [1] 李晓亮, 刘荣科, 王建军, 等. 基于单光子探测器的深空激光通信阵列[J]. 光学精密工程, 2022, 30(13): 1534-1541. LI X L, LIU R K, WANG J J, *et al.*. Deep-space laser communications telescope array based on single photon detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(13): 1534-1541. (in Chinese).
- [2] 宗思光, 杨劲鹏, 张鑫, 等. 复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(3): 560-571. ZONG S G, YANG S H P, ZHANG X, *et al.*. Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 560-571. (in Chinese).
- [3] CARESS D W, MARTIN E J, RISI M, *et al.*. The MBARI low-altitude survey system for 1-cm-scale seafloor surveys in the deep ocean[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2025, 50(3): 1573-1584.
- [4] 刘广平, 杨靖, 金永平, 等. 深海生物采样技术研究进展与发展趋势[J/OL]. 中国机械工程, 2026: 1-17 (2026-01-29). <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260128.1751.003>. (查阅网上资料,未找到本条文献引用日期信息,请确认). LIU G P, YANG J, JIN Y P, *et al.*. Progress and perspective of deep-sea biological sampling technology[J/OL]. *China Mechanical Engineering*, 2026: 1-17 (2026-01-29). <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20260128.1751.003>. (in Chinese).
- [5] SHANGGUAN M J, GUO Y R, LIAO ZH Y. Shipborne single-photon fluorescence oceanic lidar: instrumentation and inversion[J]. *Optics Express*, 2024, 32(6): 10204-10218.
- [6] 程藻. 基于自适应后向散射滤波技术的激光雷达水下目标探测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. CHENG Z. *Research on underwater lidar detection based on adaptive backscattering filtering technique*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016. (in Chinese).
- [7] 华康健. 水下光子计数激光雷达关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021. HUA K J. *Research on key technologies of underwater photon-counting LIDAR*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese).
- [8] LI ZH, HAN Y Q, WU L C, *et al.*. Towards an ultrafast 3D imaging scanning LiDAR system: a review[J]. *Photonics Research*, 2024, 12(8): 1709-1729.
- [9] SHANGGUAN M, LI Y, MO Y C, *et al.*. Compact underwater single-photon imaging lidar[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(6): 1957-1960.
- [10] 王宇航, 王新宇, 张景辉, 等. 水下三维光学成像探测技术综述及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 2200003. WANG Y H, WANG X Y, ZHANG J H, *et al.*. Review and prospect of underwater 3D imaging detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(22): 2200003. (in Chinese).

- [11] SOLOMONENKO M G, MOBLEY C D. Inherent optical properties of Jerlov water types[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5392-5401.
- [12] WENG ZH W, SUN J X, YANG ZH F, *et al.*. Measurement of inherent optical properties of water based on multiple scattering profiles using underwater off-axis single-photon lidar[J]. *Optics Letters*, 2024, 32(27): 48035-48050.
- [13] HAN W H, LEE S W, LIM J, *et al.*. Design and feasibility study on a compact wide-field LiDAR optical system using polygonal mirrors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 195: 109273.
- [14] 周广鹏. 水下连续光成像关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2025.
- ZHOU G P. *Research on essential technologies in underwater continuous optical imaging*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2025. (in Chinese).
- [15] 李国浩, 王凌云, 桂云霆, 等. 紧凑型、大视场可见长波红外共孔径制导光学系统设计[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2026: 1-18 (2026-04-10). <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260409.0933.084>.
- LI G H, WANG L Y, GUI Y T, *et al.*. Common-aperture guidance optical system with a compact size and wide field of view for visible and long-wave infrared bands[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2026: 1-18 (2026-04-10). <https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN.20260409.0933.084>. (in Chinese) (查阅网上资料,未找到本条文献引用日期信息,请确认).
- [16] 王文生, 刘冬梅. 应用光学[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019.
- WANG W SH, LIU D M. *Applied Optics*[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2019. (in Chinese).
- [17] YU X, DONG L ZH, LAI B H, *et al.*. Automatic low-order aberration correction based on geometrical optics for slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(6): 1730-1739.
- [18] 刘才, 于信, 潘国涛, 等. 大口径多波段光束质量检测系统设计[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(4): 932-942.
- LIU C, YU X, PAN G T, *et al.*. Design of large-aperture multi-band beam quality detection system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 932-942. (in Chinese).
- [19] 钟昆, 苏伟, 彭波, 等. 水下激光周视扫描 4f 发射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 202002.
- ZHONG K, SU W, PENG B, *et al.*. Design of 4f emission optical system for underwater laser circumferential scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 202002. (in Chinese).
- [20] 熊芝, 钟陈小鹏, 张昊, 等. 基于多位姿标靶的激光跟踪姿态测量系统参数标定[J]. 光学精密工程, 2025, 33(1): 13-24.
- XIONG ZH, ZHONG CH X P, ZHANG H, *et al.*. Parameter calibration of laser tracking attitude measurement system based on multi-position targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(1): 13-24. (in Chinese).
- [21] 董大鹏, 于信, 汪逸群, 等. 0.05~0.1MPa 宽气压环境下校准光源光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(8): 1124-1135.
- DONG D P, YU X, WANG Y Q, *et al.*. Optical system design of calibration light source in 0.05-0.1MPa wide atmospheric pressure environment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(8): 1124-1135. (in Chinese).

作者简介:



于信(1988—), 男, 吉林四平人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2018 年于电子科技大学获得光学工程专业工学博士学位, 主要研究方向包括: 像差检测、校正及精密仪器设计方面的研究。

E-mail: 41213100@qq.com