红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

机载单频水深测量LiDAR光机系统设计

周国清　胡皓程　徐嘉盛　周祥　农学勤

Design of LiDAR optical machine system for airborne single frequency bathymetry

Zhou Guoqing, Hu Haocheng, Xu Jiasheng, Zhou Xiang, Nong Xueqin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20200297

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种用于水深测量的LiDAR光机系统设计

Design of LiDAR optical-mechanical system for water depth measurement

红外与激光工程. 2020, 49(2): 0203006-0203006　https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0203006

星载云气溶胶激光雷达光机系统结构及研究进展

Opto-mechanical system structure and research progress of space-borne lidar for cloud-aerosol

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20190501-1-20190501-18　https://doi.org/10.3788/IRLA20190501

基于卷积神经网络的反无人机系统图像识别方法

Image recognition method of anti UAV system based on convolutional neural network

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20200154-1-20200154-8　https://doi.org/10.3788/IRLA20200154

基于深度学习的机载激光海洋测深海陆波形分类

Classification of sea and land waveforms based on deep learning for airborne laser bathymetry

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1113004-1113004(8)　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1113004

光子计数激光测深系统

Photon counting laser bathymetry system

红外与激光工程. 2019, 48(1): 106002-0106002(5)　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0106002

机载激光雷达测深系统大规模应用测试与评估——以中国海岸带为例

Large-scale application test and evaluation of an airborne lidar bathymetry system-A case study in China′s coastal zone

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200317-20200317　https://doi.org/10.3788/IRLA20200317

机载单频水深测量 LiDAR 光机系统设计

周国清[1,2], 胡皓程[1,3], 徐嘉盛[1,4], 周 祥[1,2,3], 农学勤[5]

(1. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室，广西 桂林 541006；
2. 天津大学 微电子学院，天津 300072；
3. 桂林理工大学 机械与控制工程学院，广西 桂林 541006；
4. 桂林理工大学 地球科学学院 ，广西 桂林 541006；
5. 中国电子科技集团公司第三十四研究所，广西 桂林 541004)

摘 要：LiDAR 作为一种测深、水下地形绘制设备已在国外进入商用阶段。而我国 LiDAR 研制与应用相对缓慢，且主要集中在大型双频测水 LiDAR 的研制上。笔者所在团队在双频测水 LiDAR 设计的基础上，针对无人机，设计了单频 LiDAR 光机系统。首先分别设计了该系统的组成部分，即采用反射式光楔实现圆周扫描的扫描单元、采用 Kopilevich 模型计算的最佳接收视场角、采用广义开普勒系统设计的接收光学单元，然后集成整机，计算光学系统效率，仿真实验验证扫描效果，波形测试验证设计 LiDAR 可用性。该系统最佳接收视场角为 95 mrad，最佳飞行航高 150 m，飞行速度 10 m/s，最佳测量水深 25 m 以内，最大测量水深 50 m。该系统采用 Kopilevich 模型确定 LiDAR 最佳视场角，提升了 LiDAR 光机系统性能，并可切换两种不同扫描方式。

关键词：激光雷达； 水深测量； 光机系统； 开普勒系统； 无人机
中图分类号：TG502.33 **文献标志码：**A **DOI：**10.3788/IRLA20200297

Design of LiDAR optical machine system for airborne single frequency bathymetry

Zhou Guoqing[1,2], Hu Haocheng[1,3], Xu Jiasheng[1,4], Zhou Xiang[1,2,3], Nong Xueqin[5]

(1. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;
2. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;
4. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;
5. 34 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin 541004, China)

Abstract: LiDAR, as a kind of sounding and underwater terrain drawing equipment, has entered the commercial use stage abroad. In China, the development and application of LiDAR are relatively slow, and researchers mainly focused on the development of large-scale dual-frequency water measurement LiDAR. Based on the design of dual-frequency water measurement LiDAR, a single-frequency LiDAR opto-mechanical system for Unmanned Aerial Vehicle(UAV) was designed by author's team. Firstly, the system component was designed separately. Namely, a reflective optical wedge was used by a scanning unit to achieve transmission scanning, an optimal receiving angle of view was calculated by the Kopilevich model, and a receiver optical unit was designed with generalized Kepler system. Then, the whole machine was integrated, the efficiency of the optical system was

收稿日期:2020−12−15； **修订日期:**2021−01−25
基金项目:国家自然科学基金重点项目 (41431179); 国家自然科学基金 (41961065); 广西创新驱动发展专项 (AA18118038,AA18242048); 广西科技基地和人才专项 (AD19254002); 桂林市科学研究与技术开发计划项目 (20190210-2)

calculated, and a simulation experiment was used to verify the scanning effect, a waveform test was used to verify the usability of the designed LiDAR. The characters of this system are as follows: the optimal receiving view angle is 95 mrad, the best flight altitude is 150 m, flying speed is 10 m/s, the best depth of measured water within 25 m, the maximum depth of measured water is 50 m. The Kopilevich model is used to determine the best LiDAR field of view to improve the performance of the LiDAR opto-mechanical system, two different scanning methods can be switched.

Key words: LiDAR; bathymetry; opto-mechanical system; Kepler system; Unmanned Aerial Vehicle(UAV)

0 引 言

与传统多波束测量水深方法相比，LiDAR 测量水深精度高、速度快、灵活性好，广泛应用于测量河流、湖泊、近海岸等处的水深，获取水下地形数据和水质数据，服务于河流、湖泊和海洋管理、养殖等[1−4]。目前测水 LiDAR 因测水精度高已在国外进入商用阶段[5−6]。但是，我国测水 LiDAR 研究进展存在两个问题。一是研究重点集中在双频测水 LiDAR，其缺陷是体积大、重量重、需要有人机载才能测量水深。二是轻小型机载测水 LiDAR 研究较少，轻小型机载测水 LiDAR 的优点是方便、快速、灵活，搭载在无人机上即可测量水深。因此，笔者所在团队重点研究机载轻小型测水 LiDAR。

传统双频测深激光雷达系统其最小测深深度在 10 m 以上，需要挂载在有人机上，飞行高度通常在 500~1 000 m 左右，需要专业人士提前规划飞行路线[7]，流程繁琐。

为此，笔者所在团队设计了一种轻小型机载单频水深测量 LiDAR 光机系统。其优点是采用双接收通道，其体积小于三接收通道，机械结构易于加工。可进行两种扫描方式切换，可挂载于无人机上，方便操作。

单频测水 LiDAR 的原理见图 1，激光器发射 532 nm 脉冲激光，一部分激光无法穿透水面沿光路返回，被接收光学单元接收，另一部分激光穿透水面到达水底，反射后被接收光学单元接收。根据两部分激光返回的时间差、大气光学厚度、无人机航高、海表反射系数、海水折射率、海底反射系数、海水后向散射系数等综合参数计算海水深度。再结合 POS 数据，对回波信号进行 POS 解算，得到高精度水下地形数据。

文中内容包括设计目标、扫描单元、最佳接收视场角、接收光学单元和整机光机以及仿真实验验证。其中，设计目标说明系统及其组成部分所要实现的技术指标，扫描单元主要指通过伺服电机和反射式光楔实现圆周扫描，最佳接收视场是通过 Kopilevich 模型计算出来，接收光学单元是在最佳接收视场的基础上设计广义开普勒系统，整机是将上述部分组装成 LiDAR 光机系统并计算 PMT 和 APD 光学系统透过率，仿真实验验证用来验证系统扫描的结果，波形测试验证设计 LiDAR 可用性。

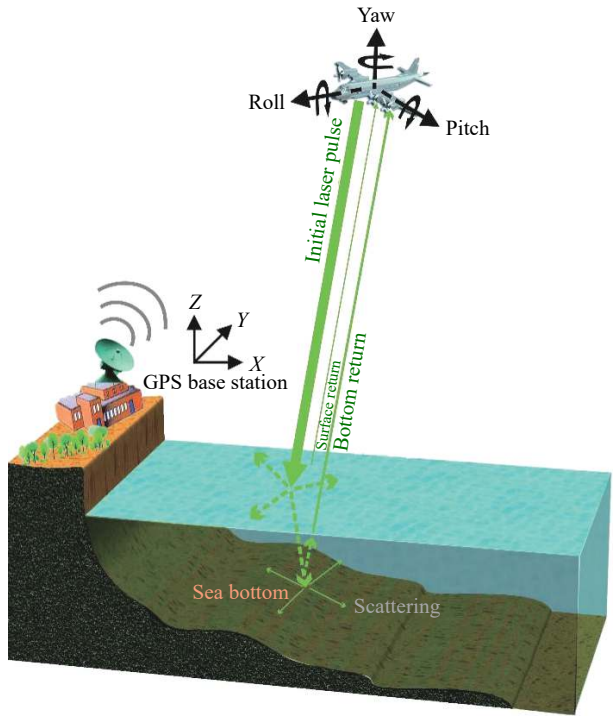

图 1 单频 LiDAR 测深原理

Fig.1 Single frequency LiDAR sounding principle

1 设计目标

LiDAR 光机系统是指由激光器、扫描单元、接收光学单元组成的用于 LiDAR 研制的光学机械系

统。其中，激光器作为光源可以选用已经准直扩束的激光器，扫描单元由电机、电机驱动器和光楔组成，接收光学单元由物镜组和目镜组组成的望远系统。文中设计的水深测量 LiDAR 光机系统集成综控单元、电源、电机驱动器、APD 和 PMT 及其后端电路、POS 系统[8-9]和面阵多光谱高分辨率 CCD 相机等模块后的整体及其分解结构见图 2。其中，综控单元 a、电源 b、532 nm 激光器 c、面阵多光谱高分辨率 CCD 相机 k、POS 系统 l 不属于光机系统，却是 LiDAR 研制的必须模块。电源给整个系统供电，综控单元控制整个系统运行及数据存储，激光器发射激光，电机驱动器驱动电机旋转，扫描发射的激光，照射到水面和水底后产生水面和水底回波信号，接收系统接收这些回波信号，传输给 APD 和 PMT，APD 和 PMT 后端电路将水表和水底反射回的激光信号转为电信号，传输给综控单元，记录在存储芯片中，POS 系统由 GPS 和 IMU 组成，获取 LiDAR 精确的定位和时间信息、飞行速度和航向、俯仰和翻滚等姿态信息，发送给综控单元，存储在存储芯片中，同时综控单元根据这些信息和导航信息控制飞行平台的飞行路线和姿态。面阵多光谱高分辨率 CCD 相机是记录海表面高分辨率影像数据，可用于分类、多元数据融合测深。

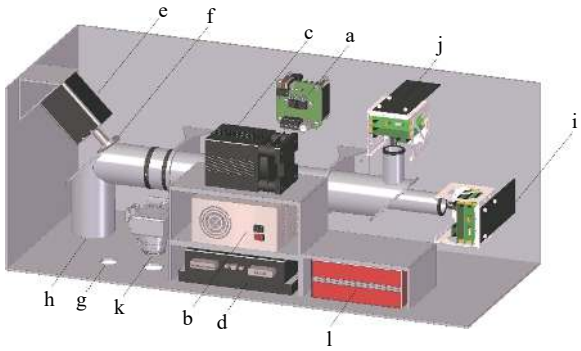

图 2 LiDAR 系统结构。a 为综控单元；b 为电源；c 为 532 nm 激光器；d 为电机驱动器；e 为 24 V 直流伺服电机；f 为反射式光楔；g 为光学发射通道；h 为光学接收通道；i 为 APD 及其后端处理电路；j 为 PMT 及其后端处理电路；k 为面阵多光谱高分辨率 CCD 相机；l 为 POS 系统

Fig.2 System structure of LiDAR. a-Integrated control unit; b-Power supply; c-532 nm laser; d-Motor driver; e-24V DC servo motor; f-Reflective wedge; g-Optical emission channel; h-Optical receiving channel; i-APD and its processing circuit; j-PMT and its processing circuit; k-Area array multispectral high resolution CCD camera; l-POS system

文中设计的 LiDAR 光机系统由激光器、扫描单元、接收光学单元等组成。其中，每个组成部分和整机都有其相应的技术指标，具体见表 1。

表 1 LiDAR 的技术指标

Tab.1 Overall technical index of LiDAR

Parts	Parameter	Value
Laser	Wavelength	532 nm
	Peak power	100 kW
	Pulse width	3 ns
	Repetition frequency	1 kHz
	Divergence angle	0.2 mrad
Scanning unit	Wedge angle	5º
	Wedge diameter	40 mm
	Wedge thickness	15 mm
	Angle between the bottom of wedge and vertical axis	45º
	Motor speed	540, 600 r/min
	Rated voltage of motor	24 V
	Rated power of motor	100 W
Receiving Optical unit	Receiving field angle	95 mrad
	Entrance pupil diameter	82 mm
	Exit pupil diameter	8 mm
	Magnification	10.25× and 42×
	Bandwidth	±1 nm
Overall system	Weight	25 kg
	Volume	1 050 mm×400 mm×460 mm
	Mode of delivery	UAV
	Flight speed	0-10 m/s
	Flight height	150 m
	Run time	20 min
	Scanning width	52.9 m
	Scanning point density	$1/m^2$
	Best measuring depth	25 m
	Maximum measuring depth	50 m

2 扫描单元

为了满足系统要求，文中选用已经扩束准直且发散角低于 0.5 mrad 的 532 nm 激光器作为脉冲激光光源[10-12]。

为获取较高的点密度，机载测水 LiDAR 普遍采用圆周扫描方式，即采用一块光楔绕轴中心旋转[13]。但该方法需要用到体积大、质量重的中空电机。为节省体积，减轻质量，文中设计一种基于伺服电机驱动的反射式光楔实现圆周扫描，仿真结果见图 3。其中，如定义图 (a) 为初始扫描位置，即电机旋转 0°时的扫描位置，图 (b) 代表电机旋转 90°时的扫描位置，图 (c) 代表电机旋转 180°时的扫描位置，图 (d) 代表电机旋转 270°时的扫描位置，其轨迹为圆。

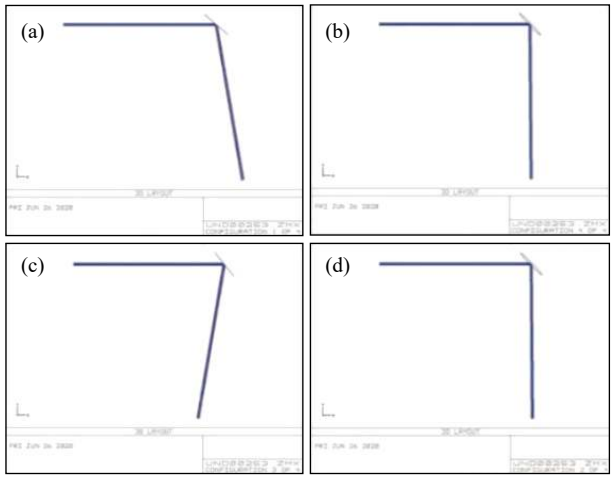

图 3 Zemax 仿真反射式光楔扫描单元

Fig.3 Zemax simulation reflection type wedge scanning unit

一般圆周扫描使用折射式光楔，见公式 (1)[14]：

$$\delta = (n_p - 1)\alpha \tag{1}$$

式中：δ 为扫描角；n_p 为光楔材料折射率；α 为楔角。

当公式 (1) 中 n_p 取−1 时，为反射式光楔关系式，文中采用反射式光楔，见公式 (2)：

$$\delta = -2\alpha \tag{2}$$

当光楔楔角取 α=5°时，根据公式 (2)，文中设计的反射式光楔扫描角 δ=10°。在航高 150 m 时，可实现扫描幅宽 52.9 m。

3 最佳接收视场角

为了保证在探测器可辨识的情况下实现最大测深，需要优化接收光学单元的性能。因此，需要综合考虑视场角和最大测深，计算最佳接收视场角。LiDAR 最佳接收视场角可以通过测水公式计算。目前，国外已采用 Dolin-Levin 和 Kopilevich 模型计算水深，常用于激光测深仪、水下定位和成像传感器等仪器性能计算中[15]。其中，Kopilevich 测深模型充分考虑多次前向散射和单次后向散射，比 Dolin-Levin 更加精确[16−17]。因此，文中选用 Kopilevich 测深模型计算 LiDAR 最佳接收视场角。

根据 Kopilevich 模型，海底和海水后向散射激光回波信号可分别用公式 (3) 和 (4) 计算：

$$P_{bot}(h) = P_0 \frac{\rho_{bot}}{\pi} \sum \eta \frac{\cos^2\theta_w}{(H+h)^2} \mathrm{e}^{\left[\frac{-2(a+b_b)h}{\cos\theta_w}\right]} F(h) \tag{3}$$

式中：$P_{bot}(h)$ 为海底回波信号功率；h 为水深；P_0 为激光发射峰值功率；ρ_{bot} 为海底反射率；$\sum$为孔径面积；η 为光学系统接收效率；θ_w 为激光进入海水后传播方向与垂直方向的夹角；H 为等效航高；a 为水体吸收系数；b_b 为水体后向散射系数；$F(h)$ 为视场损失因子；$a+b_b$ 一般取 0.08[18]。

$$P_{bw}(h) = P_0 \frac{c\tau_{\text{pulse}}}{2n_w} \beta_\pi \sum \eta \frac{\cos^2\theta_w}{(H+h)^2} \mathrm{e}^{\left[-\frac{2(a+b_b)h}{\cos\theta_w}\right]} F(h) \tag{4}$$

式中：$P_{bw}(h)$ 为海水后向散射信号功率；c 为空气中的光速；τ_{pulse} 为激光脉宽；n_w 为水体折射率；β_π为体积散射函数$\beta(\theta)$取 180°时的值。

为计算等效航高，需要用等效公式 (5) 计算：

$$\begin{cases} H = H_0 n \left(\dfrac{\cos\theta_w}{\cos\theta_a}\right)^3 \\ \theta_l = \dfrac{\theta_{l0}\cos\theta_a}{n\cos\theta_w} \\ \theta_r = \dfrac{\theta_{r0}\cos\theta_a}{n\cos\theta_w} \\ \sin\theta_a = n\sin\theta_w \\ r_l = \dfrac{r_{l0}\cos\theta_w}{\cos\theta_a} \\ r_r = \dfrac{r_{r0}\cos\theta_w}{\cos\theta_a} \end{cases} \tag{5}$$

式中：H_0 为飞行航高；θ_a 为激光扫描角；θ_l 为等效激光发散角；θ_{l0} 为激光发散角；θ_r 为等效接收视场角；θ_{r0} 为接收器视场角；r_l 为等效激光截面半径；r_{l0} 为激光截面半径；r_r 为接收器孔径半径；r_{r0} 为接收器孔径半径。

从公式 (3) 和 (4) 可知，海底回波信号功率和海水后向散射功率和视场损失因子成正相关，故研究视场

损失因子即可。

计算最佳接收视场角包括计算视场损失因子 $F(h)$ 与视场角关系，计算最大水深辨识力因子 D (通常 $D \geqslant 6$) 确定水深测量最佳视场角[18]。

3.1 计算视场损失因子

视场损失因子计算方法见公式 (6)[19]：

$$F(h)=\Psi m e^{\left(\frac{-2b_f h}{\cos\theta_w}\right)}\int_0^{\infty}(x+\sqrt{1+x^2})^{\frac{2b_f h}{x\cos\theta_w}} e^{\left\{-\frac{x^2m^2}{4}\left[\frac{(r_r^2+r_l^2)\cos^2\theta_w}{h^2}+\Theta a^2\right]\right\}} J_1(mx\Psi)\,\mathrm{d}x \tag{6}$$

式中：$\begin{cases}\Psi=\dfrac{\theta_r}{2}\dfrac{H+h}{h}\\ \Theta=\dfrac{\theta_l}{2}\dfrac{H+h}{h}\end{cases}$，其他参数见表 2。

将表 2 参数值代入公式 (6) 计算不同深度、不同接收视场 θ_r 对应的视场损失因子 $F(h)$，计算结果见图 4。从图中可知，随着水深的增加，视场损失因子经历了从凸曲线变化成平缓曲线的过程，说明随着水深的增加，视场损失因子是降低的。

表 2 视场损失因子公式参数表

Tab.2 Parameter table of FOV loss factor formula

Parameters	Parameters name	Parameters values	Calculation formula(Parameters see column 1)
θ_r	Equivalent receiving FOV		$\theta_r=\theta_{r0}\cos\theta_a/(n\cos\theta_w)$
H	Equivalent flight height	205.7814 m	H_0=150 m $H=H_0n(\cos\theta_w/\cos\theta_a)^3$
h	Water depth measurement	25 m	
m	Scattering angle mean cosine function	8	
b_f	Forward scattering coefficient	0.4	
θ_w	Angle between laser direction and vertical direction	6.74°	θ_a=10° $\sin\theta_a=n\sin\theta_w$
r_r	Equivalent radius	82.689 mm	r_{r0}=82 mm $r_r=r_{r0}\cos\theta_w/\cos\theta_a$
r_l	Equivalent radius of laser beam cross section	3.054 mm	r_{l0}=3 mm $r_l=r_{l0}\cos\theta_w/\cos\theta_a$
θ_l	Equivalent laser divergence angle	0.1492 mrad	θ_{l0}=0.2 mrad $\theta_l=\theta_{l0}\cos\theta_a/(n\cos\theta_w)$
n	Refractive	1.333	

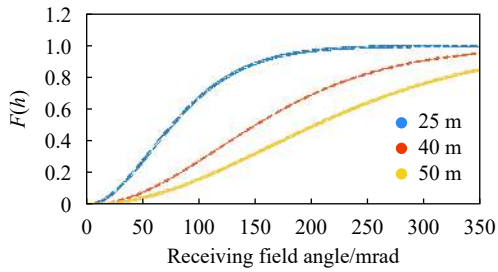

图 4 不同水深、不同接收视场对应的视场损失因子

Fig.4 Field loss factors corresponding to different water depths and receiving field of view

3.2 计算辨识力因子

辨识力因子 D 是检验扫描单元能否在自然噪声条件下工作指标，计算方法见公式 (7)：

$$D=\frac{P_{bot}A}{\sqrt{P_s\dfrac{e(1+g^q)}{S_\lambda\tau_{\text{pulse}}}}} \tag{7}$$

式中：D 为辨识力因子；A 为大气衰减系数；P_s 为太阳背景辐射功率；e 为电子电荷量；g 为噪声倍增因子；q 为附加噪声指数，S_λ为辐照灵敏度。其中，g 和 q 与 APD 或 PMT 性能有关。

大气衰减系数 A 由公式 (8) 计算得出：

$$A=e^{-\frac{7.828}{V}\left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q_c}2H_0} \tag{8}$$

式中：V 为大气能见度；λ 为激光波长；q_c 是常系数，与 V 有密切联系[20-21]。关系表见表 3。

P_s 为太阳背景辐射功率可由公式 (9) 计算得出：

$$P_s=\frac{\pi I_s\left[r_{r0}+H\tan\left(\dfrac{\theta_{r0}}{2}\right)\right]^2\lambda_d\sum\eta}{H^2} \tag{9}$$

式中：I_s为太阳背景辐射度；λ_d为带通滤波器半宽。

太阳背景辐射度 I_s 取 0.007 $\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot nm^{-1}}$[22]，其他参数值参照表 2，代入公式 (9)，计算得到太阳背景辐射功率 P_s=1.210×10^{-7} W。假设大气的能见度 V 取 25 km，q 取 1.3，H_0 取 150 m，代入公式 (8) 计算得

A=0.95。取表 2 参数值和水深随机分别为 25、40、50 代入公式 (6) 和 (3) 计算得水体底部回波信号功率 P_{bot}。根据 APD 性能[23], e 取 1.602×10^{-19}C, g 取 20, q 取 0.5, S_λ 为辐照灵敏度取 20 A/W, τ_{pulse} 为脉冲时间, 取 3 ns, 将上述计算参数代入公式 (7), 计算得到不同水深的 D, 如图 5 所示 (25 m 是设计测量水深, 40 m 和 50 m 是为了寻求最大测量水深)。根据 D>6, 可知在 50 m 以内系统都可辨识。

另外, 根据设计水深为 25 m, 由图 5 可知, 此时最佳测水视场角是 95 mrad。此时, 水深回波信号功率为 1.70×10^{-6} W。系统可接收到有效信号。根据图 6 可知, 在该视场角条件下, 50 m 水深回波信号功率为 4.12×10^{-9} W, 大于探测器最小灵敏度, 系统可接收到信号。且 D>11, 系统可辨识。

表 3 q_c 与大气能见度的关系

Tab.3 Relationship between q_c and atmospheric visibility

Value of q_c coefficient	Visibility range/km
1.6	V>50
1.3	10<V<50
0.16 V+0.34	0.5<V<10
0	V<0.5

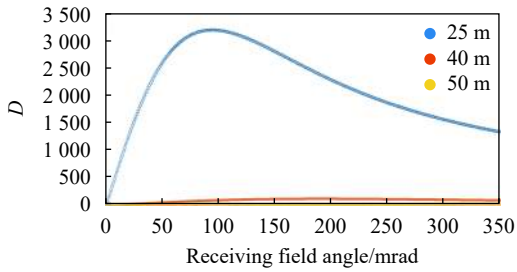

图 5 不同水深随视场变化的辨识力因子

Fig.5 Recognition factors for different water depths changing with field of view

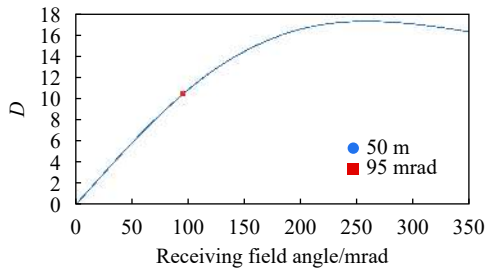

图 6 50 m 水深随视场变化的辨识力因子

Fig.6 Recognition factor of 50 m water depth changing with field of view

4 接收光学单元

在最佳视场角的基础上, 文中接收光学单元采用柯克三片型物镜组和改进的凯涅尔目镜组组成的广义开普勒系统实现。设计过程包括根据物镜组和目镜组关系选取物镜组和目镜组的基本结构, 设计柯克三片型物镜组、视场光阑、PMT 和 APD 改进的凯涅尔目镜组、物镜组和目镜组组合。

4.1 选取物镜组和目镜组的基本结构

物镜组和目镜组的关系见公式 (10):

$$\begin{cases} L = f_1' + f_2' < 600 \\ \Gamma = -\dfrac{f_1'}{f_2'} \end{cases} \tag{10}$$

式中: L 为筒长; f_1'为物镜组焦距; f_2'为目镜组焦距; Γ 为视场放大倍率。对于望远系统, 一般 $f_1'>f_2'$。

已知出瞳直径, 要求视场放大倍率, 可用公式 (11) 计算:

$$D_1' = -\frac{D_1}{\Gamma} \tag{11}$$

式中: D_1'为出光瞳直径; D_1 为入光瞳直径。

拟定物镜组入瞳直径 D_1=82 mm。PMT 和 APD 光敏面直径相当于目镜组出瞳直径 D_1'=8 mm 和 1.95 mm。根据入瞳直径和出瞳直径计算得视场放大倍率 Γ=−10.25×和 42×。根据公式 (10) 计算得 f_2'< 53.33 mm; f_1'<546.67 mm。考虑后端电路占用空间、镜片厚度, f_1'尽可能小于理论极限值。因此, 文中取 f_1'=505 mm, f_2'=49.27 mm 和 12.01 mm。物镜组选用柯克三片型物镜结构, 参数多, 理论上能矫正七种像差的最简单物镜组结构, 适合相对孔径 1/5~1/4 的物镜镜头, 与文中相对孔径接近。目镜组选用改进的凯涅尔目镜, 结构简单, 易于实现。

4.2 柯克三片型物镜组

柯克三片型物镜组由两片正透镜和一片负透镜组成, 结构见图 7。只考虑近轴光线时, 柯克三片型物镜可看作由六片焦距分别为 F_1'、F_2'、F_3'、F_4'、F_5'、F_6', 距离为 d_1、d_2、d_3、d_4、d_5 的薄透镜组成。

单片薄透镜计算焦距见公式 (12):

$$F_k' = (n' - n)\frac{1}{r_k} \tag{12}$$

式中：F_k'为像方焦距，n为物方折射率；n'为像方折射率；r_k为曲率半径 (k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 代表第 k 面薄透镜)。

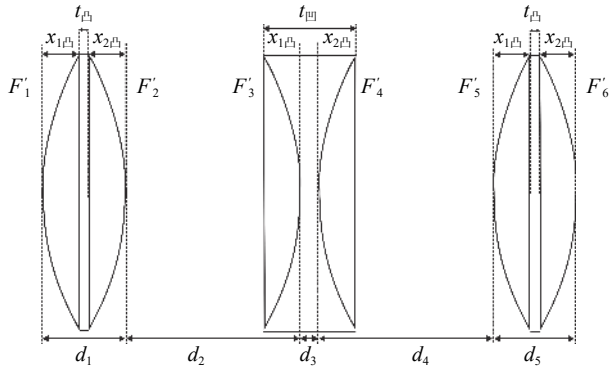

图 7 柯克三片型物镜组结构

Fig.7 Structure of Kirk three-piece objective lens set

六片薄透镜焦距 F_1'、F_2'、F_3'、F_4'、F_5'、F_6'可通过正切计算法[23] 公式 (13) 计算得到。

$$\begin{cases} \tan U_1' = \tan U_2 = \dfrac{h_1}{F_1'} \\ h_2 = h_1 - d_1 \tan U_1' \\ \tan U_2' = \tan U_3 = \tan U_2 + \dfrac{h_2}{F_2'} \\ h_k = h_{k-1} - d_{k-1} \tan U_{k-1}' \\ \tan U_k' = \tan U_k + \dfrac{h_k}{F_k'} \\ \quad\vdots \\ \tan U_6' = \tan U_6 + \dfrac{h_6}{F_6'} \end{cases} \tag{13}$$

式中：U_k'为第 k 面出射光线与光轴夹角；U_k 为第 k 面入射光线与光轴夹角；h_k 为第 k 面像高。

物镜组有效焦距计算见公式 (14)：

$$f_1' = \frac{h_1}{\tan U_6'} \tag{14}$$

式中：h_1 为第 1 面像高；U_6'为第 6 面出射光线与光轴夹角。根据设计f_1'取 505 mm。

考虑空间放置大小，物镜组总长不超过 490 mm。物镜组后焦距需要满足额外条件，见公式 (15)：

$$\begin{cases} BFL = \dfrac{h_6}{\tan U_6'} \\ BFL + d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \le 490 \end{cases} \tag{15}$$

式中：BFL 为物镜组后焦距；h_6 为最后一面薄透镜像高；d_1~d_5 为各薄透镜间距离。

另外，文中主要对球差和彗差进行矫正，故物镜组还需要满足像差参量，见公式 (16)：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{6} S_{\mathrm{I}} = h_k^4 \Phi_k^3 \boldsymbol{P}_k^{\infty} = 0 \\ \sum_{k=1}^{6} S_{\mathrm{II}} = J_k h_k^2 \Phi_k^2 \boldsymbol{W}_k^{\infty} = 0 \end{cases} \tag{16}$$

式中：S_{I} 为球差系数；Φ_k 为第 k 面光焦度；$\boldsymbol{P}_k^{\infty}$为第 k 面的像差参量；S_{II} 为彗差系数；J_k 为第 k 面拉赫不变量；$\boldsymbol{W}_k^{\infty}$为第 k 面的像差参量；k 为 $\boldsymbol{W}$ 参量的一次项系数。

$\boldsymbol{P}_k^{\infty}$和$\boldsymbol{W}_k^{\infty}$计算公式见公式 (17)：

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}^{\infty} = a_c Q^2 + bQ + c_c \\ \boldsymbol{W}^{\infty} = kQ + l \end{cases} \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{P}^{\infty}$为像差参量；$\boldsymbol{Q}$ 为形变系数；a_c 为 $\boldsymbol{P}$ 参量的二次项系数；b 为 $\boldsymbol{P}$ 参量的一次项系数；c_c 为 $\boldsymbol{P}$ 参量的常系数；l 为参量的常系数。

形变系数 Q 可分为 $Q_{入射面}$和 $Q_{出射面}$，计算方法见公式 (18)：

$$\begin{cases} \dfrac{F_k'}{r_k} = \dfrac{n'}{n'-1} + Q_{入射面} \\ \dfrac{F_k'}{r_k} = 1 + Q_{出射面} \end{cases} \tag{18}$$

式中：$Q_{入射面}$为入射面的形变系数；$Q_{出射面}$为出射面的形变系数。

由于柯克物镜组均为单透镜，故$\boldsymbol{P}_k^{\infty}$和$\boldsymbol{W}_k^{\infty}$相关参数可由公式 (19) 计算：

$$\begin{cases} a_c = 1 + \dfrac{2}{n'} \\ b = \dfrac{3}{n'-1} \\ c_c = \dfrac{n}{(n'-1)^2} \\ k = 1 + \dfrac{1}{n'} \\ l = \dfrac{1}{n'-1} \end{cases} \tag{19}$$

至此，物镜组需要满足的条件均用宏观量，如 F_k'、F、d、n'、n 等表示。

另外，负透镜一般选用较高色散玻璃。故文中假设第 1 片正透镜和第 3 片正透镜均为同种介质，第

2 片负透镜为另一种介质。为防止寻求最优解时，厚度不满足结构强度需求，所以镜片初始结构选取较厚的参数，最后通过最小阻尼二乘法进行优化。文中设计 d_1=12 mm, d_3=10 mm, d_5=12 mm。将 r_1、r_2、r_3、r_4、r_5、BFL、d_2、d_3、玻璃材料设置为变量，借助 Zemax 求最优解，寻得初始结构参数见表 4。

表 4 物镜组结构参数表

Tab.4 Structure parameters of objective lens

Lens	Radius of curvature/mm	Focal length/mm	Material	Refractive index (532 nm)	Distance	Surface/mm
1	198.543	213.098	ZF14	1.9317	12	air→ZF14
2	600.383	644.395	ZF14	1.9317	111.411	ZF14→air
3	−353.382	−564.779	F2HT	1.6257	10	air→F2HT
4	156.494	250.110	F2HT	1.6257	36.799	F2HT→air
5	513.419	551.056	ZF14	1.9317	12	air→ZF14
6	−481.289	516.571	ZF14	1.9317	307.790	ZF14→air

经过公式 (13)~(15) 的计算，物镜组的有效焦距 f_1'=505 mm，系统总长 490 mm。经过公式 (16)~(19) 的计算 S_{I}=0.003 038，S_{II}=0.000 698。球差、彗差基本消除，物镜组符合设计要求。

物镜组参数确定后，需要检验透镜中心厚度 d_1、d_3、d_4 是否合理。检验方法见公式 (20)[7]：

$$\begin{cases} 3d_{凸}+7t_{凸}\geqslant D_{凸} \\ 8d_{凹}+2t_{凹}\geqslant D_{凹} \end{cases} \tag{20}$$

式中：$d_{凸}$为凸透镜最小中心厚度；$t_{凸}$为凸透镜最小边缘厚度；$D_{凸}$为凸透镜底面直径；$d_{凹}$为凹透镜最小中心厚度；$t_{凹}$为凹透镜最小边缘厚度；$D_{凹}$为凹透镜底面直径。

凸透镜中心厚度和凹透镜边缘厚度分别与凸透镜最小边缘厚度和凹透镜最小中心厚度以及凸透镜和凹透镜两面的矢高 (见图 3 中$x_{1凸}$、$x_{2凸}$、$x_{1凹}$、$x_{2凹}$) 存在以下关系，见公式 (21)：

$$\begin{cases} t_{凸}-x_{2凸}+x_{1凸}=d_{凸} \\ t_{凹}-x_{2凹}+x_{1凹}=d_{凹} \end{cases} \tag{21}$$

式中：$x_{1凸}$为凸透镜入瞳面的矢高；$x_{2凸}$为凸透镜出瞳面的矢高；$x_{1凹}$为凹透镜入瞳面的矢高；$x_{2凹}$为凹透镜出瞳面的矢高。

为了得到凸透镜最小边缘厚度和凹透镜最小中心厚度，需要分别计算各自每个面的矢高，计算公式如下[24]：

$$x=r\pm\sqrt{r^2-(\frac{D_1}{2})^2} \tag{22}$$

式中：x为该面矢高；r为该面曲率半径，见表 3；D_1为该面的直径，即物镜组入瞳直径，取 80 mm。

将公式 (21) 和公式 (22) 计算出来每个面的矢高代入公式 (20)，得到公式 (23)，即可求得凸透镜最小边缘厚度和凹透镜最小边缘厚度。

$$\begin{cases} t_{凸}\geqslant\dfrac{D_{凸}-3(x_{1凸}-x_{2凸})}{10} \\ t_{凹}\geqslant\dfrac{D_{凹}-8(x_{1凹}-x_{2凹})}{10} \end{cases} \tag{23}$$

根据公式 (16) 计算得入瞳双凸镜$x_{1凸}$=4.28 mm，$x_{2凸}$=1.40 mm，$t_{凸}$=7.33 mm，d_1=12 mm。双胶合镜中的凸镜，$x_{1凸}$=−2.3 865 mm，$x_{2凸}$=5.4 663 mm，$t_{凸}$=14.4 822 mm，d_3=10 mm。双胶合镜的凹镜，$x_{1凹}$=1.63 m，$x_{2凹}$=−1.75 mm，$t_{凹}$=7.18 mm，d_5=12 mm。根据理论值小于设计值的要求，双凸镜、双胶合镜中的凸镜、凹镜分别对应$t_{凸}-x_{2凸}+x_{1凸}<d_1$ (即 d_1=12 mm>$d_{凸}$=10.21 mm)、$t_{凸}-x_{2凸}+x_{1凸}<d_3$ (即 d_3=10 mm >$d_{凸}$ =6.63 mm)、$t_{凹}-x_{2凸}+x_{1凸}<d_4$ (即 d_5=12 mm >$d_{凸}$=10.57 mm) 可知，入瞳双凸镜厚度 12 mm，双胶合镜中的凸镜厚度 10 mm、凹镜厚度 12 mm，符合设计要求。

至此，接收单元的物镜组结构已确定，见图 8，MTF 曲线见图 9。当空间频率为 100 lp/mm 时，全部视场 MTF 值大于 0.5 (工业标准是：当空间频率为 100 lp/mm 时，MTF>0.4)，且各个视场曲线族密集分布，物镜组符合设计要求。

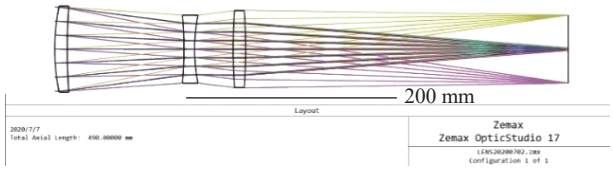

图 8 物镜组光路结构

Fig.8 Optical path of objective lens group

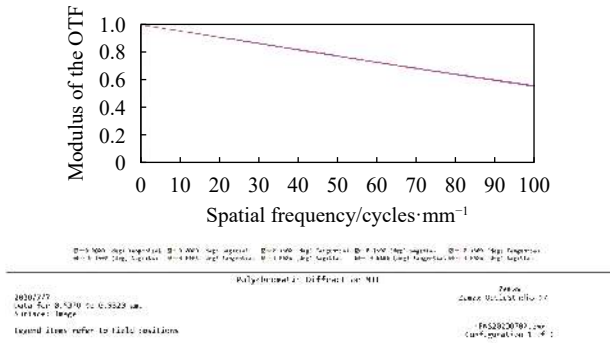

图 9 物镜组 MTF 曲线

Fig.9 MTF curve of objective lens group

4.3 视场光阑

视场光阑是一面高反射率镜片，中心开孔分离大视场和小视场。为了计算小视场区域面积，实现浅水激光信号和深水激光信号分离，需要计算视场光阑。根据最佳视场角，小视场 $2\omega_1$为 4 mrad，大视场 $2\omega_1$为 95 mrad。视场光阑计算见公式 (24)：

$$D_2 = 2\sqrt{2}f_1'\tan\omega \tag{24}$$

式中：D_2为中心开孔区直径；ω_1是半视场角。

根据公式 (24)，f_1'取 505 mm，ω_1取 2 mrad，计算小视场直径 D_2=2.86 mm。f_1'取 505 mm，ω_1取 47.5 mrad，计算大视场直径 D_2=67.90 mm。

4.4 改进的凯涅尔目镜组

目镜组的目的是将光斑会聚在 PMT 和 APD 上。由于 PMT 和 APD 直径分别为 8、1.95 mm，另外，焦距需要接近 49.27 mm，使出瞳光线尽可能保持平行。凯涅尔目镜可以满足上述两个要求，也可以缩短场镜和目镜间距。根据公式 (25)，可计算接收目镜组的接收视场角。

$$\tan\omega' = \Gamma\tan\omega \tag{25}$$

式中：ω'为目镜视组视场角；ω 为物镜接收视场角。

当 ω 分别取 95、4 mrad，Γ 取 10.25、42 时，可计算出目镜视场角 ω'分别为 25.98°、9.54°，$2\omega'$分别为 51.96°、29.07°。然而，凯涅尔目镜适合接收视场角为 40°~50°，因此，文中在凯涅尔目镜中间插入一片正焦度弯月透镜扩大接收视场角。改进后的凯涅尔目镜结构见图 10。

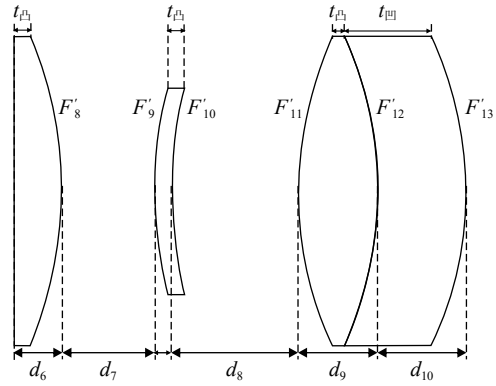

图 10 改进后的凯涅尔目镜结构

Fig.10 Improved Kenneth eyepiece structure

凯涅尔目镜第 1 面焦距 F_7'为无穷，因严格符合目镜组的解难以寻找，故牺牲目镜组部分出光平行度和整体筒长，约束有效焦距和光斑大小，寻求最优解。由于镜组空间位置关系，视场光阑到目镜组第 1 面透镜距离为 50 mm。用公式 (13) 对物镜和目镜整体进行光线追迹有约束条件，见公式 (26)：

$$\begin{cases} h_7 = h_6 - (BFL + 50)\tan U_6' \\ h_{13} - l_z\tan U_{13}' \leqslant 4 \end{cases} \tag{26}$$

式中：h_7为第 7 面薄透镜像高；h_6为第 6 面薄透镜像高；U_6'为第 6 面薄透镜出射角；h_{13}为第 13 面薄透镜像高；l_z为目距；U_{13}'为第 13 面薄透镜出射角。

为寻找目镜组初始结构，需要对单独对目镜组进行光线追迹，然后结合 Zemax 寻求最优解。单独对目镜组用正切及算法进行光线追迹要符合一定约束条件，见公式 (27)：

$$f_2' = \frac{h_{13}}{\tan U_7'} \tag{27}$$

式中：f_2'为目镜组系统焦距，PMT 和 APD 分别取 49.27 和 12.01；U_7'为第 7 面薄透镜出射角。

对目镜的有效焦距、光斑大小约束后，根据空间结构关系赋 d_6、d_8、d_{10}、d_{11} 初始厚度 10 mm。将 F_7'~F_{13}'、d_7、d_9、透镜材料设置为变量，用 Zemax 寻求最优解，寻得的 PMT 目镜结构参数见表 5、PMT 目镜结构参数见表 6。

经验证，目镜组实际焦距为 49.269 9 mm，接近拟定焦距值 49.27 mm，其透镜最小中心厚度满足公式 (20)，其中 PMT 光路结构见图 11，APD 光路结构见图 12，达到设计要求。

表 5 PMT 目镜组结构参数表

Tab.5 Structural parameters of PMT eyepieces

Lens	Radius of curvature/mm	Focal length/mm	Material/refractive (532 nm)	Distance to next side/mm	Surface
7	∞	∞	SF66/1.937 5	8	air→SF66
8	−135.530	144.565	SF66/1.937 5	19.907	SF66→air
9	48.617	51.858	SF66/1.937 5	7.990	air→SF66
10	92.216	−98.364	SF66/1.937 5	16.1	SF66→air
11	63.200	76.190	LASF14A/1.829 5	10	air→LASF14A
12	−316.269	−2 928.417	LASF14A/1.829 5	7.6	LASF14A→SF66
13	143.183	−152.728	SF66/1.937 5	17.172	SF66→air

表 6 APD 目镜组结构参数表

Tab.6 Structural parameters of APD eyepieces

Lens	Radius of curvature/mm	Focal length/mm	Material / refractive (532 nm)	Distance to next side/mm	Surface
7	∞	∞	SF66/1.937 5	4	air→SF66
8	41.854	−44.644	SF66/1.937 5	30.426	SF66→air
9	52.443	55.939	SF66/1.937 5	4.5	air→SF66
10	−47.173	50.318	SF66/1.937 5	1	SF66→air
11	15.276	18.416	LASF14A/1.829 5	7.5	air→LASF14A
12	−22.175	−205.324	LASF14A/1.829 5	4	LASF14A→SF66
13	19.558	−20.862	SF66/1.937 5	10.053	SF66→air

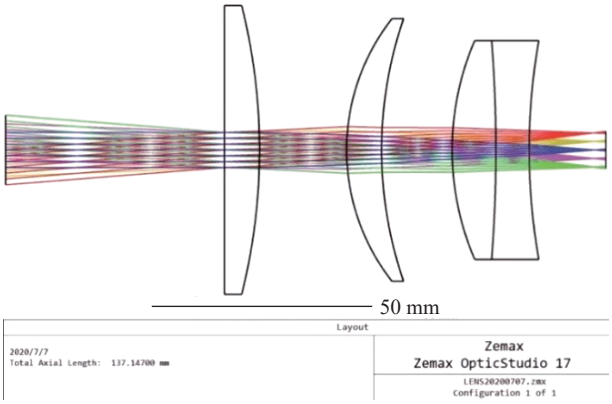

图 11 PMT 目镜组光路结构

Fig.11 Structure of PMT eyepiece group optical path

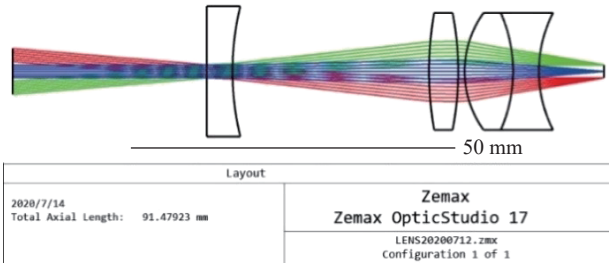

图 12 APD 目镜组光路结构

Fig.12 Structure of APD eyepiece group optical path

4.5 物镜组和目镜组组合

物镜组和 PMT、APD 目镜组设计以后，还需要组合才能形成接收单元。因此，文中将它们组合在一起，其光路见图 13。

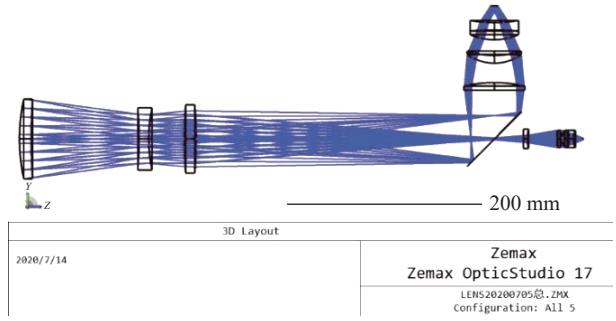

图 13 LiDAR 整机接收望远系统光路

Fig.13 Optical path of LiDAR overall receiving telescope system

最终接收系统整体筒长 L=626.77 mm，整体 S_{I} 系数为 0.014 5，S_{II} 系数为−0.020 2，基本消除球差和彗差，结构参数达到设计要求。

为验证接收单元设计的合理性，需要用 Zemax 生成弥散斑，通过可视化验证设计合理性。如果设计合

理，则弥散斑分布均匀且不会变形。LiDAR 各个视场弥散斑分布见图 14。其中，图 (a) 是 0°视场，图 (b) 是 0.113°视场，图 (c) 是−0.113°视场，图 (d) 是 2.721 8°视场，图 (e) 是−2.721 8°视场。5 个图表示的视场弥散斑分布均匀，仅存一些弧矢彗差，大视场通道使用 PMT 作为接收器件，在 8 mm 范围内弥散斑半径为 7.7 mm，小视场通道使用 APD 作为接收器件，在 1.95 mm 范围内，半径为 0.95 mm，达到设计要求。

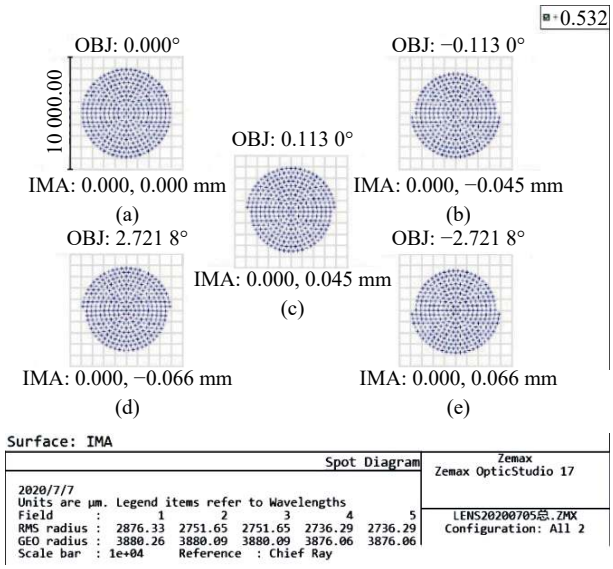

图 14 各个视场弥散斑分布

Fig.14 Distribution of diffuse spots in each field of view

5 光机系统集成

激光器、扫描单元和接收单元集成后的光机系统见图 15。

整个光学系统由于采用透镜，其光学损失分为材料表面反射和吸收引起的光能损失。

不同材料表面反射导致光能损失。表面反射光学透过率计算方法见公式 (28)：

$$\tau_1 = 1-\rho = 1-\left(\frac{n'-n}{n'+n}\right)^2 \tag{28}$$

式中：τ_1是表面反射光学透过率；ρ为光能损失率。物镜组和目镜组组成的整体光学系统各面光能透过率计算表见表 7。

由于透镜等采用的材料吸收损失光能，材料光学透过率计算方法见公式 (29)：

$$\tau_2 = (1-a_{\rm m})^d \tag{29}$$

式中：τ_2为材料光学透过率；d为透镜总体厚度；$a_{\rm m}$为材料光能吸收率。

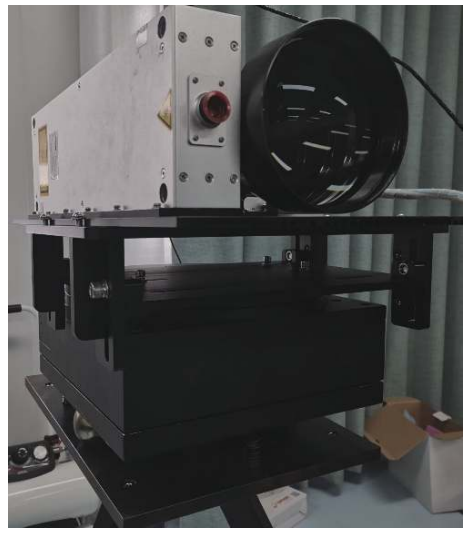

图 15 LiDAR 光机系统

Fig.15 Optical-mechanical system of LiDAR

表 7 PMT 和 APD 各面光学透过率

Tab.7 Optical transmittance of PMT and APD each surface

Lens	Optical transmittance	Surface
Objective 1	89.9%	air→ZF14
Objective 2	89.9%	ZF14→air
Objective 3	94.32%	air→F2HT
Objective 4	94.32%	F2HT→air
Objective 5	89.9%	air→ZF14
Objective 6	89.9%	ZF14→air
Eyepiece 7	89.8%	air→SF66
Eyepiece 8	89.8%	SF66→air
Eyepiece 9	89.8%	air→SF66
Eyepiece 10	89.8%	SF66→air
Eyepiece 11	91.41%	air→LASF14A
Eyepiece 12	99.9%	LASF14A→SF66
Eyepiece 13	89.8%	SF66→air

根据多数无色光学 1 cm 玻璃对白光的平均光能吸收率 $a_{\rm m}$ 约为 1.5%，透过率为 98.5%，$a_{\rm m}$ 取 0.015。结合表 5 和 6，d 取 6.759、5.4 cm。代入公式 (29)，计算得 PMT 和 APD 接收端镜组透过率分别为 90.29%、92.16%。

整体透过率计算方法见公式 (30)[25]：

$$\tau=\tau_2\prod_{i=1}^{9}\tau_{1i} \tag{30}$$

式中：τ为整体光学透过率；τ_{1i}为表面反射光学透过率

(其中 i=1, 2, ⋯, 13, 分别代表表 6 中的物镜组表面 1 的光学透过率, 物镜组表面 2 的光学透过率, ⋯, 物镜组表面 13 的光学透过率)。

将τ_2的计算结果 0.902 9、0.921 6, 表 6 中τ_{1i}的值分别代入公式 (30), 计算得 PMT 和 APD 接收端光学整体透过率为 27.98%、28.19%。

Zemax 软件由于考虑了视场、孔径、膜层和内部投射等效应以及非近轴光区域影响等, 其最终得到 PMT 和 APD 接收端光学透过率为 27.99%、27.02%, 可以实现水深测量, 达到设计要求。

文中设计的水深测量 LiDAR 光机系统集成综控单元、电源、电机驱动器、APD 和 PMT 及其后端电路、POS 系统和面阵多光谱高分辨率 CCD 相机等模块后的质量参数见表 8, 体积参数见表 9。

表 8 LiDAR 系统质量参数

Tab.8 Weight parameters of LiDAR system

Component	Weight/kg
Power source	5
532 nm laser	3
80 flange servo motor	0.75
Motor driver	0.75
Optical pipeline	2.1(7 series aluminum)
APD or PMT and its circuit	0.5
IMU	2.6
Integrated control system	3.5
CCD camera	0.35
Other	0.95
Outsourcing network	5 (PVC)
Total	25

表 9 LiDAR 系统体积参数

Tab.9 Volume parameters of LiDAR system

Component	Volume/mm^3
Power source	188×156×97.5
532 nm laser	104×104×166.5
80 flange servo motor	100×60×70
Motor driver	150×100×40
Optical pipeline	80(inside diameter)×660
IMU	200×116×80
Integrated control system	180×120×100
Outsourcing network	1 050×460×400

6 实验验证

6.1 仿真实验

为验证扫描效果, 文中基于扫描方程和大型无人机平台仿真扫描结果, 并给出不同扫描方案的效果和点密度。

建立无人机水面飞行扫描坐标系, 横轴为 x 轴, 纵轴为 y 轴, (x,y) 点对是激光落在坐标系上的位置。综合考虑无人机飞行速度、航高、电机转速、扫描角, 得扫描方程见公式 (31)[26−27]:

$$\begin{cases} y = vt + h_f \tan\theta \sin(2\pi n_1 t) \\ x = h_f \tan\theta - h_f \tan\theta \cos(2\pi n_1 t) \end{cases} \tag{31}$$

式中: y为激光点落在 y 轴上的位置; v为无人机的飞行速度; t为无人机的飞行时间; h_f是无人机飞行的行高; θ为扫描角, n_1为电机转速; x为激光点落在 x 轴上的位置。

大型无人机载载重 30 kg 以下, 连续续航 20 min, 飞行速度 0~10 m/s。扫描方案激光器最大重频 1 kHz, 无人机飞行时间t统一取 6 s, 扫描角 θ 统一取 10°, 栅形电机转速取 10 r/s, 李萨如扫描电机转速取 9 r/s。扫描方案根据飞行速度和航高可变, 分成 3 种方案, 每种方案又有 3 种扫描方式, 具体见表 10。公式 (32) 为李萨如扫描方程:

$$\begin{aligned} x &= A\sin(wt) \\ y &= A\sin(wt+\psi) \end{aligned} \tag{32}$$

当w为偶数时, 近似于栅形扫描。直流电机转速见公式 (33):

$$n_1 = \frac{(U - 2\Delta U_s - I_a R_a)}{C_e \Phi} \tag{33}$$

式中: U 为电枢电压; ΔU_s 为电刷压降; I_a 为电枢电流; R_a 为电枢电阻; C_e 为常系数; Φ 为气隙磁通量。从公式 (33) 可知, 直流电机转速和电枢电阻、电枢电压、电枢电流有关。由于电枢电阻与电枢电压、电枢电流相关, 且电枢电阻和电枢电流可调节范围小, 达不到理想效果。因此, 文中设计通过控制电枢电压, 控制直流电机转速, 其电路见图 16。如图所示, VCC 为脉冲电路电源, 当开关 S1 接 2 时, 电机转速 n_1=10 r/s。当开关接 1 时, 多个延时器使电源占空比增大, 平均电压下降, 电机转速 n_1 变为 9 r/s。

图 17 为文中设计的 LiDAR 接收和发射系统示意图。

表 10 扫描方案

Tab.10 Scanning scheme

Plan	Order number	Flight speed/m·s^{-1}	Flight height/m	Scanning point density/m^{-2}	Scanning width/m	Distance/m	Area/m^2
1	a	6	100	2.42	35.26	36	1 269.36
	b	8	100	2.07	35.26	48	1 692.48
	c	10	100	1.81	35.26	60	2 137.20
2	a	6	150	1.29	52.89	36	1 904.04
	b	8	150	1.14	52.89	48	2 538.72
	c	10	150	1.02	52.89	60	3 173.40
3	a	6	200	0.81	70.53	36	2 539.08
	b	8	200	0.73	70.53	48	3 385.44
	c	10	200	0.66	70.53	60	4 231.80

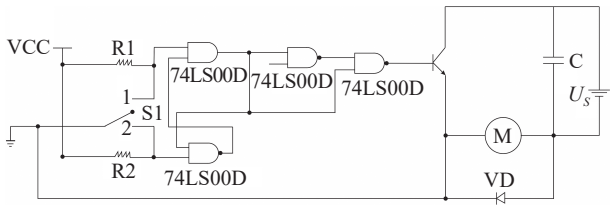

图 16 直流电机调速电路

Fig.16 DC motor speed regulation circuit

当采用栅形扫描时，按照上述扫描方案进行的扫描结果见图 18，图中 1-a、1-b、1-c、2-b、2-c、2-d、2-c、3-a、3-b、3-c 分别与方案 1-a、1-b、1-c、2-a、2- b、2-c、3-a、3-b、3-c 相对应。从图中可知，行高高于 150 m，速度低于 10 m/s，将会出现间隙，导致扫描数据缺失。因此，无人机行高最好低于 150 m，飞行速度采用 10 m/s。这样既能实现最大面积的扫描，也能达到系统要求。但是从图中可知，采用该方法还是会出现间隙，导致扫描点密度降低。因此，通过研究扫描相关参考文献，发现采用李萨如提出的扫描方法能有效解决上述问题。

当采用李萨如扫描时，按照上述扫描方案进行的扫描结果见图 19，图中 1-a、1-b、1-c、2-b、2-c、2-d、2-c、3-a、3-b、3-c 分别与方案 1-a、1-b、1-c、2-a、2- b、2-c、3-a、3-b、3-c 相对应。从图中可知，李萨如扫描也是行高高于 150 m，速度低于 10 m/s，将会出现间隙，导致扫描数据缺失。但是，在行高低于 150 m、速度低于 10 m/s 的情况下，李萨如扫描解决了间隙问题，不存在数据缺失。

由于行高越高、速度越快，扫描的面积越大，李萨如扫描的确能够解决间隙问题[27]。加上点密度达到 1 点/m^2 符合文中要求。因此，无人机行高 150 m，速度 10 m/s，将既能够取得最大扫描面积，又能消除间隙问题，结果见图 20。

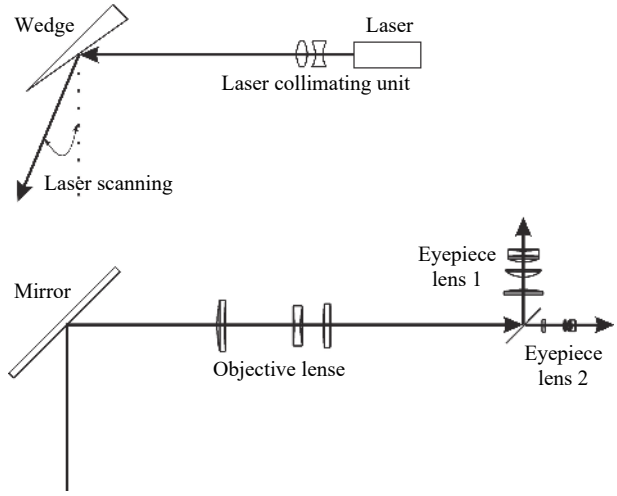

图 17 接收和发射光线系统示意图

Fig.17 Schematic diagram of receiving and transmitting light system

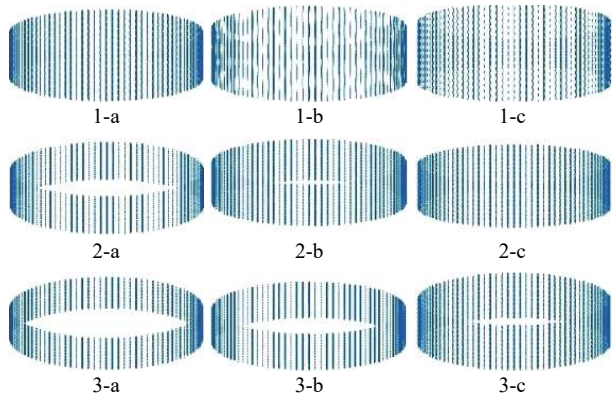

图 18 栅形扫描方案

Fig.18 Grid scanning pattern

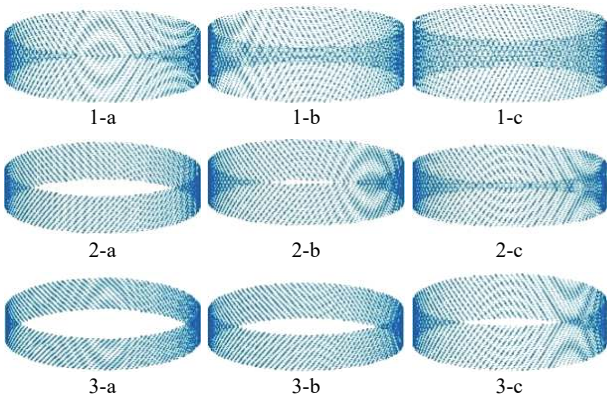

图 19 李萨如扫描方案

Fig.19 Lissajous scanning pattern

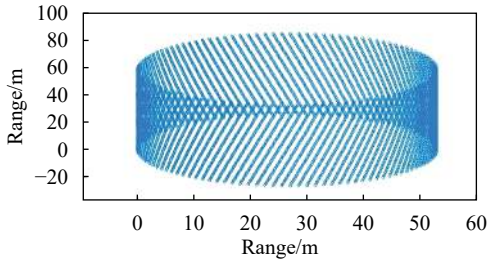

图 20 李萨如最优扫描

Fig.20 Lissajous optimal scan

另外，结合表 7 可知，在飞行时间 6 s，高度为 100~150 m，飞行速度为 6~10 m/s 的条件下，扫描面积和点密度可以根据飞行速度和行高进行调整。扫描面积范围为 1 269.36~3 173.40 m^2，点密度范围为 1.02~2.42 点/m^2。

6.2 波形数据测试

图 21 为 LiDAR 所测波形数据。可看出水面信号与水底信号时间差为 12 ns。由公式 (34)[28] 可计算水深为 1.32 m：

$$h=\frac{1}{2}t\frac{c}{n}\cos\theta \tag{34}$$

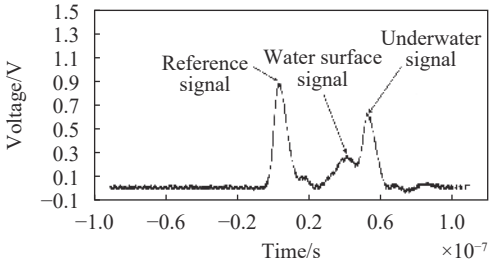

图 21 实测波形数据

Fig.21 Measured waveform data

式中：h 为水深；t 为时间差；c 为光速；n 为水体折射率；θ 为激光入射角。

7 结 论

文中设计了机载单频 LiDAR 光机系统，主要用于测量河流、湖泊和近海岸水深，最佳测水深度为 25 m 以内，最大测水深度为 50 m。根据该设计目标，设计了扫描单元、最佳接收视场角、接收光学单元、整机，最后通过搭载在大型无人机平台仿真验证了不同飞行航高和速度下，如何获取适合的扫描面积和点密度，同时测试了波形数据，验证文中设计的 LiDAR 可用。结果表明，在飞行高度为 100~150 m，飞行速度为 6~10 m/s 的条件下，扫描面积和点密度可以根据飞行速度和行高进行调整。扫描面积范围为 1 269.36~3 173.40 m^2，点密度范围为 1.02~2.42 点/m^2。文中将 Kopilevich 模型应用到激光雷达测深领域中，有效地确定 LiDAR 的最佳视场角，提升 LiDAR 的光机系统性能。此外，实现了两种不同的扫描方式相互切换，可供用户选择。

参考文献：

[1] Li Qinghui, Chen Liangyi. Airborne blue green laser bathymetry [J]. ***Acta Optica Sinica***, 1996, 25(11): 1008-1015. (in Chinese)

[2] Li Kai, Zhang Yongsheng, Liu Xiaodi, et al. Study on airborne laser bathymetric system receiver field of view [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(7): 40-48. (in Chinese)

[3] Qin Haiming, Wang Cheng, Xi Xiaohuan, et al. Development of airborne laser bathymetric technology and applications [J]. ***Remote Sensing Technology and Application***, 2016, 31(4): 617-624. (in Chinese)

[4] Shu Lei. Design and hardware implementation of SAR flood image change detection algorithm based on FPGA [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

[5] Zhang Yuanyu, Huang Rongyong, Yu Kefu, et al. Estimation of shallow water depth based on satellite hyperspectral images [J]. ***Journal of Geo-Information Science***, 2020, 22(7): 1567-1577. (in Chinese)

[6] Liu Y, Guo K, He X, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology [J]. ***Geomatics and Information Science of Wuhan University***, 2017, 42(9): 1185-1194. (in Chinese)

[7] Hu Shanjiang, He Yan, Chen Weibiao, et al. Design of airboren dual-frequency laser radar system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(9): 0930001. (in Chinese)

[8] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, et al. Three dimensional orientation eatimation for ladar target [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)

[9] Hu Feng, Hu Chunsheng, Wang Shengshu, et al. Calibration of external relation between imaging laser radar and camera [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2011, 19(4): 938-943. (in Chinese)

[10] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. ***Chinese Optics***, 2012, 5(3): 242-247. (in Chinese)

[11] Xie Shiyong, Wang Jiuwang, Sun Yong, et al. VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd:YAG laser [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2020, 28(3): 558-564. (in Chinese)

[12] Zhou Guoqing, Zhou Xiang, et al. Flash lidar sensor using fiber coupled APDs [J]. ***IEEE Sensor Journal***, 2015, 15(9): 4758-4768.

[13] Yuan Guangfu, Ma Xiaoyu, Liu Shuang, et al. Research on Lidar scanning mode [J]. ***High Power Laser and Particle Beam***, 2020, 32(4): 65-70. (in Chinese)

[14] Zhu Jingguo, Li Feng, Huang Qitai, et al. Design and implementation of dual wedge scanning system for airborne lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(5): 0502001. (in Chinese)

[15] Feigels V I, Gilbert G D. Lidars for oceanological research: criteria for comparison, main limitations, perspectives[C]//SPIE, 1992, 1750(XI): 473-484.

[16] Zhou Guoqing, Zhou Xiang, Hu Haocheng, et al. Design of LiDAR optical-mechanical system for water depth measurement [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2020, 49(2): 0203006. (in Chinese)

[17] Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian, et al. Parameter design and maximum detection depth capability analysis of airborne ocean laser sounding system [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2003, 23(10): 1255-1260. (in Chinese)

[18] Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 295-297. (in Chinese)

[19] Xu Peituo, Tao Yuting, Liu Zhipeng, et al. Comparison of oceanic lidar experimental and simulation results [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2020, 49(2): 0203007. (in Chinese)

[20] Brown W L, Polcyn F C, Sellman A N, et al. Water-depth measurement by wave refraction and multispectral techniques. Report No. 31650-31-T[R]. Michigan: Willow Run Laboratories of the Institute of Science and Technology, The University of Michigan, 1971.

[21] Qu Yi. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring [J]. ***Chinese Optics***, 2013, 6(6): 834-840. (in Chinese)

[22] Zhou Guoqing, Zhou Xiang. Imaging Principle Technology and Application of Area Array Lidar[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017: 56-57. (in Chinese)

[23] Zhu Jinyi, Xie Yongjun. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(5): 0518001. (in Chinese)

[24] Ma J, Lu T, He Y, et al. Compact dual-wavelength blue-green laser for airborne ocean detection LiDAR [J]. ***Applied Optics***, 2020, 59(10): 87-91.

[25] Cui Enkun, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of initial structure of infrared zoom optical system with PW solution [J]. ***Journal of Applied Optics***, 2014, 35(4): 586-591.

[26] Ge Xianying. Design and optimization of opto-mechanical structure for high accuracy weak signal detection lidar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[27] Zhu Xiaokai. Structure design and precision analysis of a laser radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)

[28] Zhou Guoqing, Huang Wei. Timing discrimination with third-order high-pass filtering [J]. ***Bulletin of Science and Technology***, 2020, 36(1): 99-104.

第一作者简介： 周国清 (1965−)，男，教授，博士，桂林理工大学和天津大学博士生导师，广西空间信息与测绘重点实验室主任，天津大学遥感研究中心主任。国家特聘专家、国家“十二五”863 主题专家、国家有突出贡献的中青年专家，获中国地理信息科技进步一等奖、广西技术发明一等奖、广西自然科学一等奖、美国 Talbert Abrams 奖、德国洪堡基金奖等奖励，长期从事 LiDAR 三维地形测绘装备和高分辨率遥感影像处理方面研究和技术开发，出版专著 8 部 (含 2 本英文)，发表 SCI、EI 检索论文 400 余篇，获 70 余件专利 (含美国 2 件专利、澳大利亚 7 件专利) 和 26 项软件著作权。