

一种用于水深测量的 LiDAR 光机系统设计

周国清^{1,2*}, 周 祥^{1,2,3}, 胡皓程^{2,3}, 徐嘉盛^{2,4}

- (1. 天津大学 微电子学院, 天津 300072;
2. 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;
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)

摘 要: 采用公式推导和仿真优化相结合的方式, 设计了一种测量水深的 LiDAR 光机系统。该系统光源采用 532 nm 和 1 064 nm 双频激光器, 设计 532、647、1 064 nm 三个接收通道, 拟定飞行高度 140~500 m, 可变扫描角 9°~15°, 发散角小于 0.5 mrad, 水面点密度范围约为 0.687~4.170 点/m²。设计拉曼波段作为水深测量波段, 提高浅水区测量效果, 利用可变扫描角实现了不同高度下幅宽可固定、兼顾高分辨率和大视场角, 以适应不同应用场景。

关键词: 激光雷达; 双频激光; 光机系统; 水深

中图分类号: TG502.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203006

Design of LiDAR optical-mechanical system for water depth measurement

Zhou Guoqing^{1,2*}, Zhou Xiang^{1,2,3}, Hu Haocheng^{2,3}, Xu Jiasheng^{2,4}

- (1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 541006, 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)

Abstract: A combination of formula derivation and simulation optimization was used to design a LiDAR optical-mechanical system for measuring water depth. The light source of this system used 532 nm and 1 064 nm dual-frequency lasers. Three receiving channels of 532, 647 and 1 064 nm were designed. The planned flight height was 140–500 m, the variable scanning angle is 9°–15°, the divergence angle was less than 0.5 mrad, and the surface point density range was about 0.687–4.170 points/m². In this paper, Raman band was designed as a water depth measurement band to improve the measurement effect in shallow water. The variable scanning angle was used to realize the functions of variable resolution under a fixable width and the consideration of high precision and large field of view to adapt to different application scenarios.

Key words: LiDAR; dual frequency lasers; optical-machine system; water depth

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(41431179, 41961065); 广西创新驱动发展专项(AA18118038, AA18242048)

作者简介: 周祥(1987-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: zqx0711@glut.edu.cn

导师及通讯作者简介: 周国清(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事摄影测量与遥感和激光雷达技术方面的研究。

Email: gzhou@glut.edu.cn

0 引言

水力发电、开发河沙、土地利用和城市规划等人类活动都能影响水土流失和沉积物运移,进而改变河床地形地貌。目前,河流研究以水深信息作为数据来源研究河床地形地貌^[1]。海岸附近的海洋生物栖息地研究、海岸管理、洪水研究也同样用到水深数据^[2]。水深测量方法主要有声呐、摄影测量、Ground Penetrating RADAR(GPR)和 LiDAR(激光雷达)四种^[1]。特别地,在浅海和内陆水域地区, LiDAR 是一种高效的测深技术^[3]。其具体应用包括测量和绘制浅水沿岸地区(含沿海地区)以及内陆淡水体(如河流、湖泊、水盆地)的水深^[4]、缅甸州萨科河^[5]、加利福尼亚的三一河和克拉马斯河以及科罗拉多州的科罗拉多河^[6]、加拿大魁北克的 16 种海床类别^[7]等五个水深信息。Fernandez-Diaz, J. C 等人设计了一种新型单波长 LiDAR 传感器,工作波长为 532 和 1 064 nm,激光脉冲重复频率(PRF)为 33、50 和 70 kHz,水面点密度范围为 1~4 点/m²,水下面为 0.3~3 点/m²,可以无缝绘制 0.2~16 m,不同底部反射率和浑浊度的浅水湖泊、溪流、沿海水域、农村和城市地区连续水下地形^[8]。Allouis, T 等人基于绿色、拉曼和近红外光反射信号,提出了两种测深数据方法:第一种方法基于绿色和近红外信号的数学和启发式方法的组合,以交叉验证每个信号传递的信息;第二种方法是使用统计方法(例如主成分分析(PCA)和分类与回归树(CART)分析)从拉曼信号中提取水深。第一种方法可提供 42% 的点数,具有相等的平均误差(-4.2~-4.5 cm)和较小的标准偏差(25.3~33.5 cm)。第二种方法可提供非常分散的结果(标准偏差为 40.3 cm),平均误差最低(-3.1 cm),点数增加 40%。两种方法都改善了最小可探测深度,第一种方法约为 1 m,第二种方法约为 0.5 m^[9]。Pe'eri, S. 等人基于 ALB 数据,对陆水界面算法(绿色,红色和拉曼波形)进行了定量评估。结果显示,海岸线算法在区分水陆上均显示出良好效果,但性能最佳的算法只包含红外波段信息,而性能最差的算法只包含拉曼波段信息^[10]。另外,目前 LiDAR 不能兼顾高分辨率和大视场。

为了探测浅水区水深,兼顾高分辨率和大视场,文中设计了一种用于水深测量的 LiDAR 光机系统。

其中,该系统增加拉曼波段以探测浅水区水深^[9],采用可变扫描角以实现不同高度下可固定幅宽、兼顾高分辨率和大视场角^[11]。

1 系统整机

系统设计参数如下:测水深度 0.5~15 m,地面点密度范围约 0.687~4.170 点/m²。搭载平台拟采用直升机,飞行高度 140~500 m,飞行速度 30 m/s。系统光源采用 532 nm 和 1 064 nm 双频激光器,出瞳光斑 7 mm,发散角小于 0.5 mrad,可变扫描角 9°~15°,接收通道 532、647、1 064 nm。

LiDAR 测量水深原理见图 1,飞机上挂载的 LiDAR 向水体发射出 532 nm 和 1 064 nm 两束激光。532 nm 的激光到达水面后,一部分激光反射回去,另一部分入射水体中。入射水体中的 532 nm 激光一部分被散射,另一部分产生了拉曼效应,辐射出红光,还有一部分到达水体底部反射回去。1 064 nm 的激光达到水面后,较多部分被反射回去,一部分入射水体。入射水体部分的激光,一部分被水体吸收,另一部分反射回去。

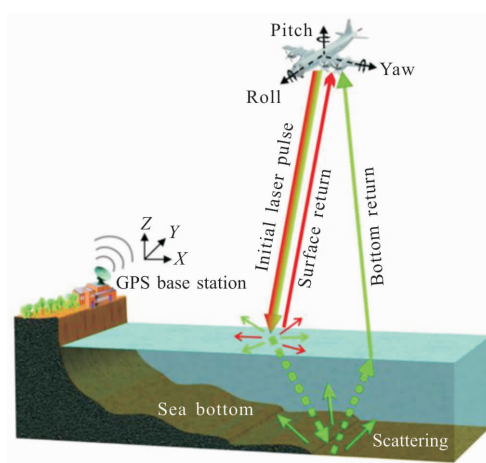


图 1 LiDAR 测量水深原理

Fig.1 Principle of LiDAR measuring water depth

系统整体结构见图 2, a 是航空电源, b 是双频激光器, c 是准直透镜, d 是反射镜, e 是直流伺服电机, f 是转盘, g 是角度微调控制器, h 是光楔, i 是消色差双胶合透镜, j 是入瞳光圈, k 是主通光通道, l 是双面 45°反射镜, m 是 647 nm 光通道, n 是 PMT 模块, o 是 1 064 nm 光通道, p 是 APD 模块, q 是 532 nm

光通道, r 是 PMT 模块, s 是外壳, t 是支撑柱, u 是连接杆, v 是支撑架, w 是三角支撑架。

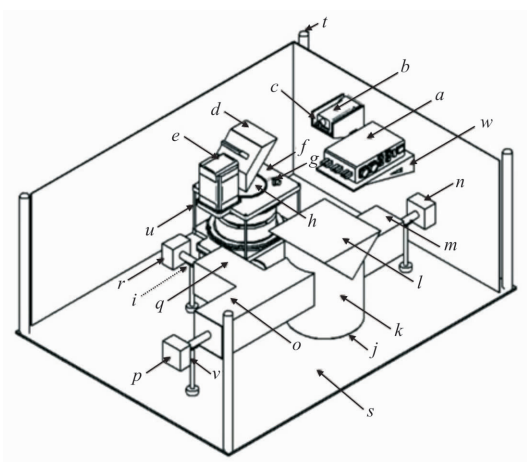


图 2 LiDAR 光机系统结构

Fig.2 Optical-mechanical system structure of LiDAR

下文结合系统设计、平台、光源、可变扫描角、接收通道参数以及整机结构,设计和优化发射光学、扫描单元、接收光学等部分,并进行系统评价。

2 发射光学

发射光学主要包括激光器、准直透镜。

2.1 激光器

为了实现水深测量,系统采用 532 nm 和 1 064 nm 双频激光器。其中,最大重复频率 5.5 kHz,脉冲能量 3 mJ,脉冲宽度 3 ns,光束直径 9.96 mm,发散角 2 mrad。其优点是激光能量稳定、抖动小、光束质量高,能长期稳定工作^[15]。

2.2 准直透镜

根据激光器发射光束直径 10 mm、发散角 2 mrad,透镜入瞳光束直径 9.96 mm,出瞳直径 7 mm,发散角 0.5 mrad,设计准直透镜。伽利略系统包括一个凸透镜和一个凹透镜,可以减少激光发散角,适合做激光准直^[15]。根据上述参数计算激光器与伽利略系统的距离、透镜的曲率半径(含凸、凹透镜),透镜间距离、透镜厚度。

(1) 激光器与伽利略系统的距离使用伽利略系统焦距公式、激光器与伽利略系统焦点距离公式和激光器与伽利略系统距离公式计算,分别对应公式(1)~(3)。

$$f = \frac{D}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

式中: f 为伽利略系统焦距; D 为出瞳直径, mm; θ 为弧度数, mrad^[11]。将 D 为 10 mm、 θ 为 2 mrad 代入公式(1),计算得 f 为 2 500 mm。

$$f_i = \frac{D_i}{f_i \cdot D_i} \quad (2)$$

式中: f_i 为激光器与透镜焦点距离, mm; D_i 为透镜直径, mm; f_i 为伽利略系统焦距, mm; D_i 为激光光斑直径, mm。根据该系统设计参数,将 D_i 为 10 mm、 f_i 为 2 500 mm、 D_i 为 9.96 mm 代入公式(2),计算得 f_i 为 2 490 mm。

$$d_i = f_i - f_i \quad (3)$$

式中: d_i 为激光器与伽利略系统距离, mm; f_i 为透镜焦距, mm; D_i 为激光光斑直径, mm。将 f_i 为 2 500 mm、 f_i 为 2 490 mm 代入公式(3),计算得 d_i 为 10 mm。

(2) 透镜曲率半径计算公式

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = f \quad (4)$$

式中: R_1 为凸透镜的曲率半径, mm; R_2 为凹透镜的曲率半径, mm; f 为伽利略焦距^[12]。 f 取 2 500 mm,由于 R_1 大于 R_2 , $|R_1| < |R_2|$,故随机取 R_1 初始值为 100, R_2 初始值为 -105,采用二分法,让 R_1 减小, R_2 增加,代入公式(4)逼近 2 500。最终, R_1 取 85.3 mm, R_2 取 -88.3 mm。

(3) 透镜间距离

伽利略透镜间距离分三个步骤计算,即凸镜焦距、凹镜到凸镜焦点距离、透镜间距。三个公式分别见公式(5)~(7)。

$$f = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (5)$$

式中: f 为凸镜焦距, mm; n 为折射率; r_1 为凸镜正面曲率; r_2 为凸镜背面曲率^[13]。凸镜材料采用BK7, n 为 1.516 8, r_1 为 85.3, r_2 为 ∞ ,代入公式(5),经计算得 f 为 165.29 mm。

$$D_{af} = \frac{D_a \cdot f_{ff}}{D_i} \quad (6)$$

式中: D_{af} 为凹镜到凸镜焦点距离, mm; D_a 为凹镜直径, mm; f_{ff} 为凸镜焦距, mm; D_i 为凹镜直径, mm。根据伽利略系统入瞳直径为 10 mm,出瞳直径为 7 mm, D_a 取 10 mm, f_{ff} 取 165.29 mm, D_i 取 7 mm,代入公

式(6), 计算得 D_{af} 为 115.7 mm。

$$D_m = f - D_{af} \quad (7)$$

式中: D_m 为透镜间距, mm; f 为凸镜焦距, mm; D_{af} 为凹镜到凸镜焦点距离, mm。根据上面计算结果, f 取 165.29 mm, D_{af} 取 115.7 mm, 代入公式(7), 计算得 D_m 为 49.59 mm。

(4) 透镜厚度

对于正透镜, 要保证边缘有一定厚度。对于负透镜, 要保证中心有一定厚度。正透镜直径为 10 mm, 负透镜直径为 7 mm。《中华人民共和国透镜边缘及中心最小厚度国家标准》(GB1205-75) 见表 1, 凸透镜边缘最小厚度取 0.6 mm, 凹透镜中心最小厚度取 0.8 mm。

表 1 透镜厚度经验表(单位:mm)

Tab.1 Lens' thickness experience (Unit:mm)

Lens diameter D	Minimum thickness of lens edge t	Minimum thickness of lens center D
[3, 6]	0.4	0.6
(6, 10]	0.6	0.8
(10, 18]	0.8-1.2	1-1.5
(18, 30]	1.2-1.8	1.5-2.2
(30, 50]	1.8-2.4	2.2-3.5
(50, 80]	2.4-3	3.5-5
(80, 120]	3-4	5-8
(120, 150]	4-6	8-12

综上所述, 准直透镜中激光器与伽利略系统的距离, 凸、凹透镜的直径, 曲率半径, 透镜间距离, 凸、凹透镜的最小厚度分别为 10、10、7、85.3、-88.3、49.59、0.6 和 0.8 mm。激光经过准直透镜如图 3 所示, 其中 a 是激光器, b 是凸透镜, c 是凹透镜。



图 3 激光准直结果

Fig.3 Laser collimation results

3 扫描单元

扫描单元包括双光楔、可变扫描角单元、消色差

透镜。

3.1 双光楔

为使 LiDAR 在不同高度实现大视场角和高分辨率扫描连续切换, 设计双光楔偏折角为 $9^\circ \sim 15^\circ$ 。

当两个光楔圆心共轴时, 会产生折光能力, 见公式(8)。

$$\gamma = 2(n-1)\alpha \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (8)$$

式中: γ 为偏折角; n 为光楔材料折射率; α 为单个光楔楔角; β 为双光楔夹角^[14]。光楔材料选用 K9, n 取 1.516 30, α 取 14.53, β 取值范围为 $0^\circ \sim 53.1^\circ$, 代入公式(8), 经计算得 γ 范围为 $9^\circ \sim 15^\circ$ 。

3.2 可变扫描角单元

根据双光楔特性, 设计了可变扫描角单元, 其原理见图 4。该系统由 b 反射镜、 c 角度调控制器、 d 上光楔、 e 下光楔、 g 上直流伺服电机、 h 下直流伺服电机组成。激光从 a 射出, 在 b 处偏转 90° , 经过双光楔后偏转一定角度($9^\circ \sim 15^\circ$)。其中, 在需要微调扫描角时, 角度微调控制器微调双光楔夹角。

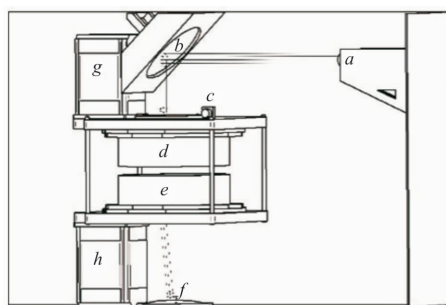


图 4 可变扫描角单元

Fig.4 Unit of variable scan angle

可变扫描角扫描单元仿真采用公式(9)和(10)。

$$y = vt + htan\theta \sin(2\pi nt) \quad (9)$$

式中: y 为纵坐标散点坐标; v 为飞机飞行速度, m/s; t 为时间, s; h 为航高, m; θ 为扫描角; n 为直流伺服电机转速。

$$x = htan\theta - htan\theta \cos(2\pi nt) \quad (10)$$

式中: x 为横坐标散点坐标; h 为航高, m; θ 为扫描角; n 为直流伺服电机转速; t 为时间, s。

为验证扫描可变角单元的效果, 拟定连续扫描 15 s, 制定的扫描仿真试验方案见表 2。

表 2 可变扫描方案

Tab.2 Scheme of variable scan

Plan	Flight altitude/m	Speed/m · s ⁻¹	Maximum repetition rate of laser/Hz	Scan width/m	Scan angle/(°)
1	140	30	5 500	44.3	9
2	140	30	5 500	75	15
3	500	30	5 500	160	9
4	500	30	5 500	267	15

系统扫描结果见图 5,图(a)为方案 1 的结果,

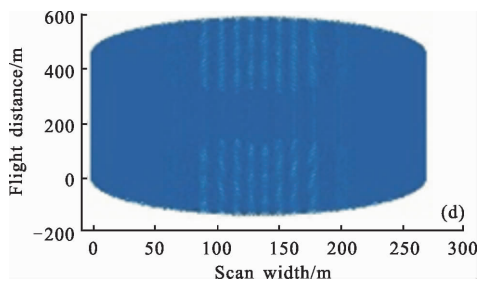
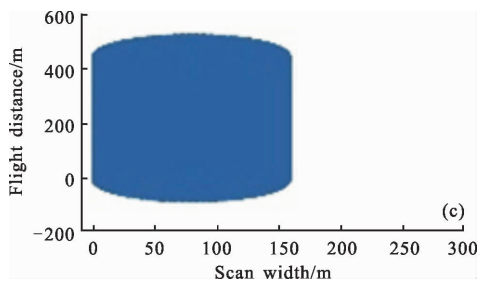
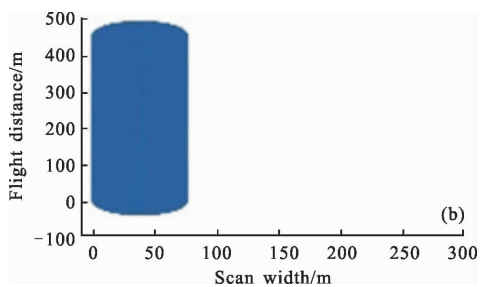
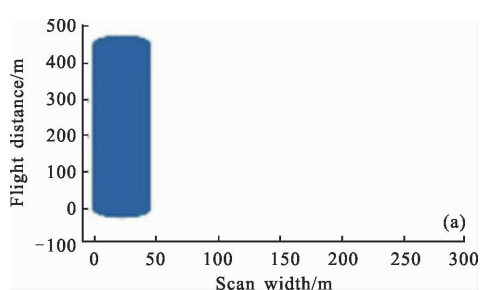


图 5 扫描仿真试验结果

Fig.5 Results of scan simulation test

图(b)为方案 2 的结果,图(c)为方案 3 的结果,图(d)为方案 4 的结果。从图(a)~图(d)可以看出:数据点密度从 4.170 点/m² 降低到 0.687 点/m²,带幅宽度由 44.3 m 提升到 267 m。

3.3 消色差系统

由于 1 064 nm 和 532 nm 波长不等导致其穿过玻璃的折射率不同,进而导致在远处不能传输到水域的同一点,所以需要采用双胶合透镜消除这两个波段穿过玻璃的色差。双胶合透镜消除色差原理是采用强色散玻璃和弱色散玻璃组合,使色散相互补偿,达到消除色差的目的。由于光楔采用材料为 K9,故选用阿贝系数为 64.167 3 的 BK7 和阿贝系数为 36.366 5 的 F2 作为双胶合透镜材料。未消色差前,1 064 nm 和 532 nm 波长传输到距离系统 500 m 远处,偏差为 3.146 m 左右(弥散斑),见图 6,严重影响系统精度。



图 6 弥散斑仿真

Fig.6 Simulation of dispersion spot

消色差一般利用材料进行消除。利用材料消除色差公式为:

$$\frac{1}{\lambda_1} \sum h_i \theta_i \phi_i = 0 \quad (11)$$

式中: $\theta = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \frac{1}{n-1}$, 称为消色差系数(阿坝数的倒数)。通常消色差系数为正,因此,正负透镜产生的 $h_i \theta_i \phi_i$ 正好相反,适当选择正负透镜的材料,使得系统的 $\frac{1}{\lambda_1} \sum h_i \theta_i \phi_i$ 等于 0 或者很小,就得到了消色差的

目的^[12]。图 7 为消色差效果。从图中可以看到,经过消色差后,由 Zemax 软件仿真 500 m 远处亮斑,相差

不超过 5 μm。

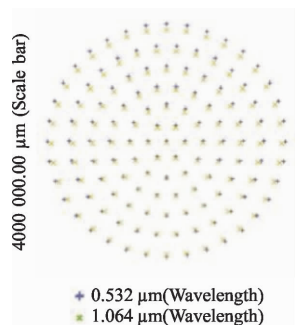


图 7 弥散斑消色差仿真

Fig.7 Simulation of dispersion spot achromatic

4 接收光学

接收光学包括光学接收通道、卡塞格林镜组及其优化。

4.1 光学接收通道

在水中,经常出现非弹性散射。作为最普遍非弹性散射之一的拉曼散射与水体浑浊度高度相关。当激光束与水分子交互时,会诱导水分子震动产生拉曼散射。H-O 键释放能量发射出与 532 nm 不同波长的光子。在拉曼效应中,再释放能量的波长见公式(12):

$$\lambda_R = \frac{\lambda_c}{1 - \Delta k_w \lambda_G} \quad (12)$$

式中:λ_G 为入射激光脉冲波长;Δk_w 为液态水引起的拉曼平移(大约 3 450 cm⁻¹)^[10]。

据此,接收光学设计 1 个主通道和 3 个分通道。其中主通道长 160 mm, 宽 160 mm。3 个分通道分别是 532、647、1 064 nm, 直径 80 mm。532 nm 激光穿入海水时,会产生拉曼光(以 647 nm 为峰值中心,范围为 640~660 nm),该信号极其微弱激光雷达难以检测。

4.2 卡塞格林镜组

卡塞格林镜组见图 8, a 为通光口, b 为主镜, c 为副镜, d 为开普勒准直系统。其优点是反射式系统不产生色差,结构紧凑。光学接收采用卡塞格林镜组将回波信号聚焦到 APD 或 PMT 光敏面上。按照 647、532 和 1 064 nm 回波信号分离顺序进行论述。647 nm 通道用于测量 0.5~1 m 的浅水。647 nm 信号是 532 nm 穿水时产生红移的回波信号,极其微弱,故应该最先分离,减少光学系统对其衰减。因此,647 nm 回波单独使用图 2 中的 m 为 647 光通道接收, n 为

PMT 模块进行信号处理。相反,532 nm 和 1 064 nm 回波信号相对较强,因此,532 nm 回波信号使用图 2 中的 q 为 532 光通道接收, r 为 PMT 模块进行信号处理,1 064 nm 回波信号使用图 2 中的 o 为 1 064 光通道接收, p 为 APD 模块进行信号处理。此外,由于 532 nm 回波信号小视场被卡塞格林系统副镜遮挡,故无法接收小于 0.5 m 的浅水回波信号。

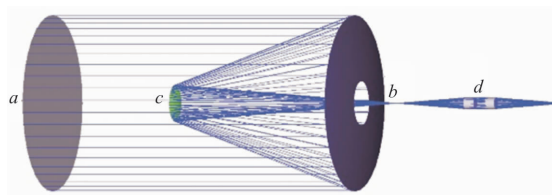


图 8 卡塞格林系统

Fig.8 Cassegrain system

4.3 卡塞格林镜组优化

卡塞格林镜组优化包括计算系统焦距、主、副镜曲率半径、主镜圆锥常数、副镜圆锥常数和 Zemax 优化。

为方便分光板工作,文中设计的通光区域为 8 080 mm 的方形区域。

系统焦距计算见公式(13)。

$$\begin{cases} b = B - D \\ F = \frac{Bf_1}{f_1 + b - B} \end{cases} \quad (13)$$

式中:b 为主镜到焦点的距离,mm;D 为主镜到副镜顶点距离,mm;B 为副镜到焦点距离,mm;f₁ 为主镜的焦距,mm;F 为卡塞格林系统焦距,mm。根据通道大小和取整原则,f₁ 取 120 mm, B 取 100 m, 根据 D 最高取 100 mm, 最低取 60 mm, 取中间值 80 mm, 经计算得 b 为 20 mm, F 为 330 mm。

主、副镜曲率半径计算见公式(14)。

$$\begin{cases} R_1 = -\frac{2DF}{F-B} \\ R_2 = \frac{2DF}{F-B-D} \end{cases} \quad (14)$$

式中:R₁ 为主镜曲率半径;R₂ 为副镜曲率半径;D 为主镜到副镜顶点距离,mm;F 为卡塞格林系统焦距,mm;B 为副镜到焦点距离,mm。将 D 为 80 mm、F 为 330 mm、B 为 100 mm 代入公式,得 R₁ 为 229.565, R₂ 为 106.667。

主镜圆锥常数为 k₁, 主镜圆锥常数为抛物面,所

以取 k_1 为 -1。

副镜圆锥常数计算过程包括副镜放大倍率公式(15)、 α 计算公式(16)、副镜圆锥常数公式(17)。

$$M = \frac{F-B}{D} \quad (15)$$

式中： M 为副镜放大倍率； F 为卡塞格林系统焦距，mm； B 为副镜到焦点距离，mm； D 为主镜到副镜顶点距离，mm。将 F 为 330 mm、 B 为 100 mm、 D 为 80 mm 代入公式，计算得 M 为 2.875。

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{4DBM}{(F+BM-DM)(F-B-D)} \right] \quad (16)$$

式中： α 为中间常数； D 为主镜到副镜顶点距离，mm； B 为副镜到焦点距离，mm； M 为副镜放大倍率； F 为卡塞格林系统焦距，mm。将 D 为 80 mm、 B 为 100 mm、 M 为 2.875、 F 为 330 mm 代入公式，得 α 为 1.2526。

$$k_2 = -1 - \alpha - \sqrt{\alpha(\alpha+2)} \quad (17)$$

式中： α 为常数； k_2 为双曲面圆锥常数。将 α 为 1.2526 代入公式，经计算得 k_2 为 -4.2711。

系统计算结果见表 3。

表 3 卡塞格林镜组优化后主要光学参数

Tab.3 Main optical parameters of optimized Cassegrain lens group

Total focal length of the system/mm	Curvature radius of main mirror/mm	Curvature radius of secondary mirror/mm	Conic constant of main mirror	Conic constant of secondary mirror
330	229.565	106.667	-1	-4.271

由于公式计算采用的数据是经验数据，因此不能保证精度。为提高系统精度，降低误差，需要进行仿真。经 Zemax 仿真，1 064 nm 反射光像平面半径为 0.497 mm，APD 光敏面半径为 0.5，532 和 647 nm 反射光像平面半径为 3.966 967 mm，PMT 光敏面半径为 4 mm，因此，优化数据在实际应用中基本达到要求^[15]。

1 064 nm 反射光仿真结果为：副镜半径 8197 048 mm，两个准直透镜半径分别为 2.541 750 和 2.734 949 mm。532 nm 和 647 nm 反射光仿真结果为：副镜半径 8.7192 55 mm，两个准直透镜半径分别为 6.866 535 mm 和 5.140 667 mm。由于副镜反射的光要透过主镜中心，因此，在主镜中心开直径为 10 mm 的孔，保证

光线通过。

5 系统评价

系统评价分别从发射光学、准直透镜、扫描单元、接收光学和光机整体 5 个角度进行评价。在发射光学中，选择脉冲重复频率 5.5 kHz、脉冲能量 3 mJ、脉冲宽度 3 ns、光束直径 9.96 mm、发散角 2 mrad 的激光器作为激光源。在准直透镜中，通过计算、设计和优化，实现了出瞳光斑为 7 mm，发散角小于 0.5 mrad 的出瞳激光。扫描单元中，双光楔设计实现幅宽 44.3~267 m、数据点密度 0.687~4.170 点/m² 的目标，可以实现大视场角和高分辨率扫描连续切换，消色差透镜保证 500 m 以内色差已基本消除。接收光学中，1 064 nm 反射光像平面半径为 0.497 mm，APD 光敏面半径为 0.5，532 和 647 nm 反射光像平面半径为 3.966 967 mm，PMT 光敏面半径为 4 mm。从光机系统整体上看，各个部分都达到设计要求，空间利用合理，系统能取得较好效果；综上所述，该系统基本达到光机系统设计目标。

6 结论

文中通过设计和优化发射光学、准直透镜、扫描单元和接收光学，实现了飞行高度 140~500 m，可变扫描角 9°~15°，出瞳光斑 7 mm，发散角小于 0.5 mrad，幅宽 44.3~267 m，地面点密度范围约为 0.687~4.170 点/m²，1 064、647、532 nm 三个接收通道的水深测量 LiDAR 光机系统，可用于测量水深。文中的创新点有两个：一是引入拉曼光谱作为计算水深波段之一，提高浅水区测量效果，二是利用可变扫描角实现了不同高度下幅宽可固定、兼顾高分辨率和大视场角，以适应不同应用场景。

参考文献：

[1] Allouis T, Bailly Jean-Stephane, Pastol Yves, et al. Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near-infrared and green signals [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(6): 640-650.

[2] Pe'eri S, Morgan Lynnette V, Philpot William D, et al. Land-water interface resolved from airborne LIDAR

- bathymetry (ALB) waveforms [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62: 75–85.
- [3] Saylam K, Hupp John R, Averett Aaron R, et al. Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica Chiroptera examples [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39 (8): 2518–2542.
- [4] Saylam K, Brown Rebecca A, Hupp John, et al. Assessment of depth and turbidity with airborne Lidar bathymetry and multiband satellite imagery in shallow water bodies of the alaskan north slope [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 191–200.
- [5] Irish J L, Lillycrop W J. Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2–3): 123–129.
- [6] Kinzel Paul J, Legleiter C J, Nelson J M, et al. Mapping river bathymetry with a small footprint green LiDAR: Applications and challenges [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2013, 49(1): 183–204.
- [7] Narayanan R, Sohn Gunho, Kim Heungsik B, et al. Soft classification of mixed seabed objects based on fuzzy clustering analysis using airborne LIDAR bathymetry data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, 5(1): 053534.
- [8] Fernandez-Diaz Juan Carlos, Glennie Craig L, Carter William E, et al. Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single-wavelength airborne LiDAR sensor [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(2): 623–635.
- [9] Allouis T, Bailly Jean-Stephane, Pastol Yves, et al. Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near-infrared and green signals [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(6): 640–650.
- [10] Pe'eri S, Morgan Lynnette V, Philpot William D, et al. Land-water interface resolved from airborne Lidar bathymetry (ALB) waveforms [J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62: 75–85.
- [11] Li Jianxin. Design and simulation of laser collimation and beam expansion [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2009(3): 28–31.
- [12] Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 295–297. (in Chinese)
- [13] Zhou Guoqing, Zhou Xiang. Imaging Principle Technology and Application of Area Array Lidar [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017: 56–57.
- [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] Zhou G, Zhou X, Yang J, et al. Flash lidar sensor using fiber coupled APDs [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2015, 45(5): 9–14.