

国产机载双频激光雷达探测技术研究进展

贺岩^{1,2,3*}, 胡善江^{1,2,4}, 陈卫标^{1,2}, 朱小磊^{1,2}, 王永星^{5,6},
杨忠⁶, 朱霞⁶, 吕德亮⁷, 俞家勇⁸, 黄田程⁹, 习小环¹⁰, 瞿帅¹¹, 姚斌³

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

² 中国科学院空间激光信息传输与探测技术实验室, 上海 201800;

³ 上海大恒光学精密机械有限公司, 上海 201800;

⁴ 中国科学院大学, 北京 100049;

⁵ 南京大学中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210023;

⁶ 中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310;

⁷ 杭州中科天维科技有限公司, 浙江 杭州 310026;

⁸ 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

⁹ 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012;

¹⁰ 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;

¹¹ 北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要 机载双频激光雷达探测技术利用双波长激光实现海陆一体化测绘, 从 1969 年至今, 国际上已经形成了成熟的商业产品, 应用于海洋、海岸带和岛礁的探测。中国科学院上海光学精密机械研究所从 1998 年开始, 先后研发了三代机载双频激光雷达, 完成了从原理样机阶段到产品样机阶段的转化。最新的 Mapper5000 系统在南海完成了 11 个架次的机载飞行试验, 获得南海岛礁的三维地形数据, 最大实测深度达到 51 m, 最浅水深达到 0.25 m, 测深精度为 0.23 m, 水平位置精度为 0.26 m, 海洋测点密度为 1.1 m×1.1 m, 陆地测点密度为 0.25 m×0.25 m。

关键词 双频激光雷达; Mapper5000; 海陆一体化测绘; 三维地形

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082801

Research Progress of Domestic Airborne Dual-Frequency LiDAR Detection Technology

He Yan^{1,2,3*}, Hu Shanjiang^{1,2,4}, Chen Weibiao^{1,2}, Zhu Xiaolei^{1,2}, Wang Yongxing^{5,6},
Yang Zhong⁶, Zhu Xia⁶, Lü Deliang⁷, Yu Jiayong⁸, Huang Tiancheng⁹,
Xi Xiaohuan¹⁰, Qu Shuai¹¹, Yao Bin³

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² Laboratory of Space Laser Information Transmission and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ Shanghai Daheng Optics and Fine Mechanics Co., Ltd., Shanghai 201800, China;

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵ Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University,
Nanjing, Jiangsu 210023, China;

⁶ South China Sea, Air-Borne Detachment of China Marine Surveillance, Guangzhou, Guangdong 510310, China;

⁷ Hangzhou Tianwei Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310026, China;

⁸ College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

收稿日期: 2018-03-19; **修回日期:** 2018-03-29; **录用日期:** 2018-04-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)

* **E-mail:** heyang@siom.ac.cn

⁹ Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

¹⁰ Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

¹¹ College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Airborne dual-frequency LiDAR detection technology collects simultaneous land and water-depth measurements using dual-wavelength laser. Since 1969, some commercial products have been formed for ocean, coastal zone and reef detection. Since 1998, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics has successively developed three generations of airborne dual-frequency LiDAR, transforming from principle sample machines to product sample machines. The 11 flights tests of latest Mapper5000 system have been completed in the area of the South China Sea. Topographic and hydrographic data of islands and reefs have been collected. The measured hydrographic range is from 0.25 m to 51 m. The measured hydrographic vertical and horizontal accuracy are 0.23 m and 0.26 m, respectively. The measured hydrographic and topographic spatial density are $1.1\text{ m} \times 1.1\text{ m}$ and $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$, respectively.

Key words dual-frequency LiDAR; Mapper5000; land and water-depth measurements; three-dimensional terrain

OCIS codes 010.3640; 280.3640

1 引言

由于海水对于电磁波的屏蔽作用,传统的海底地形探测采用船载声呐技术来实现,而在海水极浅的潮间带和岛礁区域,受船测平台的通行和速度限制,测绘效率极低,成为海岸带和海岛礁测绘的一个瓶颈。海水在蓝绿光波段存在一个透过窗口,在该窗口内的可见光具有一定的海水穿透能力,机载双频激光雷达探测技术正是利用这个透过窗口,由空中平台向海水发射蓝绿波段激光,根据激光在海表和海底反射的时间差来测量海水的深度。激光发射配合扫描和飞行平台的运动,可获得飞行路径上的三维海底地形图,为海底三维地形测绘提供了更加高效的技术手段。

目前,绝大部分机载双频激光雷达采用成熟的Nd:YAG激光器,穿透海水的532 nm激光是由该激光器的1064 nm基波倍频而来,因此,激光器能够同时输出1064 nm和532 nm双波长激光,形成海陆一体化的双频探测能力。其中,1064 nm激光形成地表和海表的回波,532 nm激光穿透海水形成海底的回波。

随着我国“海洋开发”和“一带一路”战略的实施,海岸带和海岛礁测绘的重要性日益凸显,相关的技术也成为国内各用户部门和研究机构的跟踪热点。本文综合介绍了国内外机载双频激光雷达探测技术的发展,重点介绍了中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称中科院上海光机所)在该技术领域的进展,最后,对该技术未来的发展提出了一些思考和建议。

2 机载双频激光雷达探测技术进展

2.1 国内外技术发展

机载双频激光雷达探测技术起源于20世纪60年代,工作原理如图1所示。1969年,Hickman和Hogg^[1]搭建了世界上第一个激光水深测量系统,从而验证了蓝绿激光探测水下目标的可行性。20世纪70~80年代,美国、加拿大、澳大利亚和瑞典的研究机构分别研制出具有水深探测能力的机载双频激光雷达AOL(Airborne Oceanographic LiDAR)^[2]、LARSEN500^[3]、WRELADS(Weapons Research Establishment Laser Airborne Depth Sounder)^[4]和FLASH^[5],90年代,各机构的系统继续升级,研制的SHOALS(Scanned Hydrographic Operational Airborne LiDAR Survey)^[6]、HAWKEYE^[7]和LADS^[8]就是如今主流商业化机载双频激光雷达产品的前身。这些系统采用高脉冲重复频率双波长激光、快速扫描和高速波形记录技术来提升激光雷达系统的探测性能,形成了具备测绘功能的机载双频激光雷达系统。2000年至今,激光器和高速采集技术的飞跃带动了机载双频激光雷达的快速发展,技

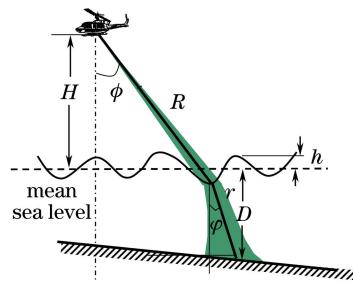


图1 机载双频激光雷达探测示意图

Fig. 1 Diagram of airborne dual-frequency LiDAR detection

术逐渐从研究机构转移到商业公司,形成了成熟的产品,易于安装在飞机上,具备航线规划软件和数据自动后处理程序,可同时采集水深和地形数据,实现陆地和海面的无缝测量。其中有代表性的产品是加拿大 Optech 公司的 CZMAIL (Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR)^[9]、瑞士 Leica 公司

的 HAWKEYE III 和荷兰 Fugro 公司 LADS HD,这些商业化系统不仅提升了激光发射的频率以提升测绘点密度,也增加了更多的接收通道以提升对不同水深的探测能力,同时,也可以融合可见光和高光谱相机来增加探测信息量,主要性能见表 1,其中 PRF 表示脉冲重复频率。

表 1 国际上主要的机载激光测深系统技术指标

Table 1 Parameters of international representative airborne laser sounding systems

Parameter	Leica Company in Switzerland HAWKEYE III system	Optech Company in Canada CZMIL system	Fugro Company in Netherlands LADS HD system
Application areas	ocean and land	ocean and land	ocean
Depth performance / m	0.15-50	0.15-50	0.15-50
Depth accuracy / m	0.36	0.36	0.36
Effective PRF / kHz	10 (Bathymetric) 500 (Topographic)	10 (Bathymetric) 70 (Topographic)	3 (Bathymetric)
Speed of aircraft / (km·h ⁻¹)	200-250	200-250	200-250
Altitude of aircraft / m	500	500	500
Scan angle / (°)	40	40	30
Surface grid / (m × m)	0.8×0.8 (Bathymetric) 0.1×0.1 (Topographic)	0.8×0.8 (Bathymetric) 0.3×0.3 (Topographic)	1.4×1.4 (Bathymetric)

我国的机载双频激光雷达探测技术始于 20 世纪 80 年代末,华中科技大学、中国海洋大学、中科院上海光机所等单位分别进行了相关的技术研究和系统研制^[10-20],其中有代表性的是中科院上海光机所研制的机载双频激光雷达,在预研项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)和国家重大科学仪器设备开发专项的持续支持下,经过三代的性能升级和改造,在激光波长数、激光脉冲重复频率、探测精度和测点密度等方面有较大提升,已经完成了从原理样机阶段到产品样机阶段的转化,产品性能达到国际同类产品水平。

2.2 中科院上海光机所技术进展

从 1998 年开始,中科院上海光机所牵头开发机载海洋测深系统(1064 nm 和 532 nm 双波长),2002 年,第一代机载双频激光雷达(LADM-I)研制成功,如图 2 所示。LADM-I 系统在南海完成了 4 个架次的机载飞行试验,获得了海底三维地形数据,其模型如

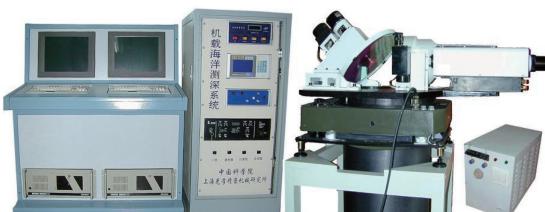


图 2 LADM-I 系统照片

Fig. 2 Photograph of LADM-I system

图 3 所示。最大实测深度达到 50 m(测深能力达到 $4/K_d$, K_d 为海水的漫射光学衰减系数,代表光辐照度在海水中传播衰减到 $1/e$ 能量的距离的倒数。),测深精度为 0.31 m,水平位置精度为 3 m,测点密度为 5 m×5 m,性能指标达到设计要求。LADM-I 系统开发和飞行试验的成功标志着我国独立自主开发的机载双频激光雷达能够应用于浅海的海洋测绘。

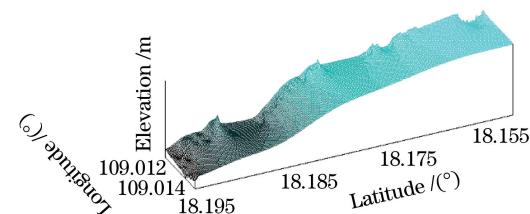


图 3 LADM-I 获得海底三维高程模型

Fig. 3 Bathymetric digital elevation model by LADM-I

LADM-I 系统组成如图 4 所示,LADM-I 采用了当时较先进的半导体抽运 Nd: YAG 全固态激光器技术,该激光器技术具有电光效率高、体积紧凑和重复频率高的优点,最终实现了高重复频率双波长激光输出。扫描采用镜面法线和旋转轴夹角为 7.5° 的圆形旋转反射镜扫描方式,扫描图案类似卵形,如图 5 所示,垂直飞行方向的幅宽角达到 $\pm 15^\circ$,该扫描方式在保证大口径通光的同时,实现了镜面连续同向旋转,可以实现较高的转速和稳定性,且激光入水的角度具有较好的一致性。通过动平衡设计,可

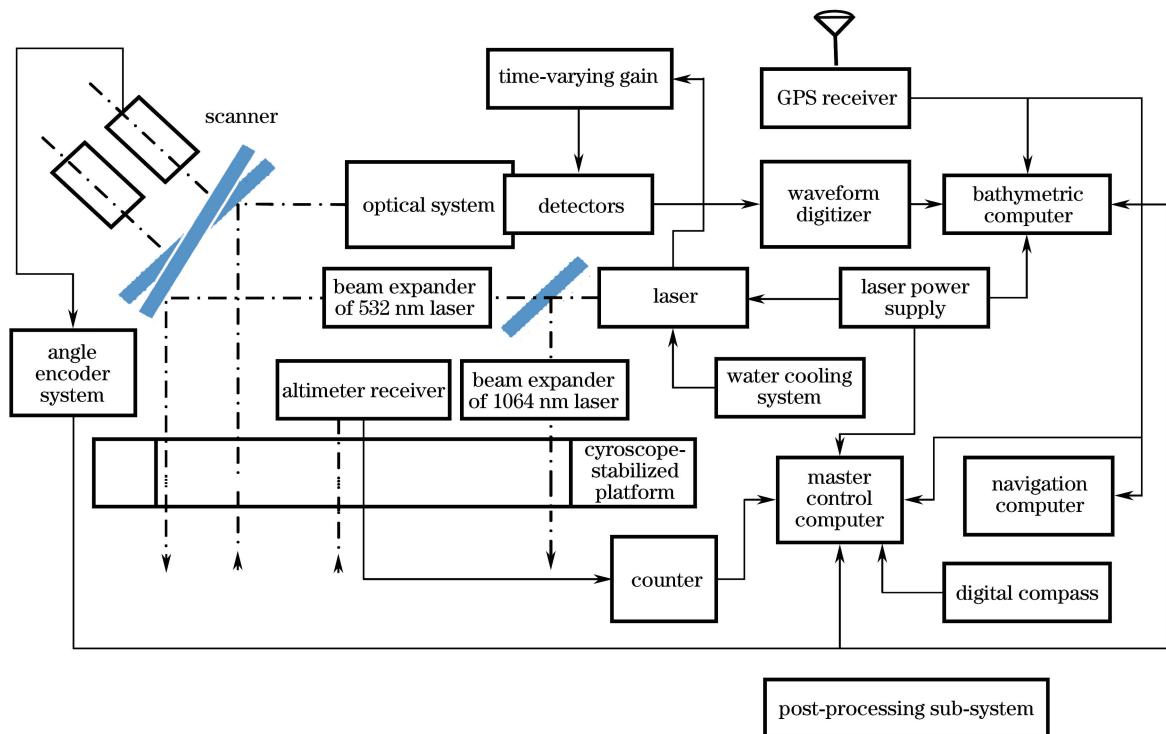


图 4 LADM-I 系统框图
Fig. 4 Block diagram of LADM-I system

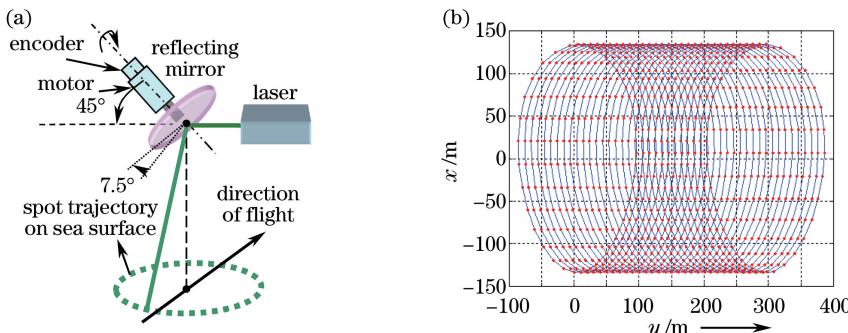


图 5 (a) 扫描方式;(b) 海面扫描光点轨迹
Fig. 5 (a) Scanning method; (b) spot trajectory on sea surface

以较好地补偿偏心造成的角度跳动,获得平稳的扫描角度输出。

LADM-I 的海面高度和水深测量分为两个光路,如图 6 所示,海面高度测量光路不经过扫描镜,垂直向下发射 1064 nm 激光,单独一个小口径接收望远镜接收海表面反射,采用雪崩光电二极管(APD)作为探测器实现回波的光电转换,通过脉冲时间计数测量平均海平面高度。水深测量光路经过扫描镜,旁轴发射 532 nm 激光,大口径非球面透镜接收水体和海底回波,可调光阑让系统改变接收视场以应对不同水质参数的测量。采用光电倍增管(PMT)作为探测器实现水体和海底回波的光电转换,通过全波形采样分析测量海底深度。海洋波形

采用高速波形数字化仪采集,该数字化仪的采样率达到 500 MSa/s,数字分辨率为 8 bit。

LADM-I 系统的技术指标如表 2 所示。

从 2001 年开始,中科院上海光机所和海洋测绘研究所在国家 863 计划支持下,共同开发性能更加先进的机载海洋测深系统(1064 nm 和 532 nm 双波长)。新系统设计解决了 LADM-I 系统在激光脉冲重复频率、波形采集速率、定位精度和水深测量动态范围等技术指标上的不足,2004 年,第二代机载双频激光雷达(LADM-II)研制成功,系统照片如图 7 所示。LADM-II 系统在南海完成了 5 个架次的机载飞行试验,获得了海底三维地形数据,如图 8 所示。最大实测深度达到 40 m(测深能力达到 $4/K_d$),最浅

水深达到 0.5 m, 测深精度为 0.3 m, 水平位置精度为 1 m, 测点密度为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, 整体性能指标有了较

大的提升, 尤其是浅水测量能力、测点密度和位置精度, 为今后的产品化奠定了较好的技术基础。

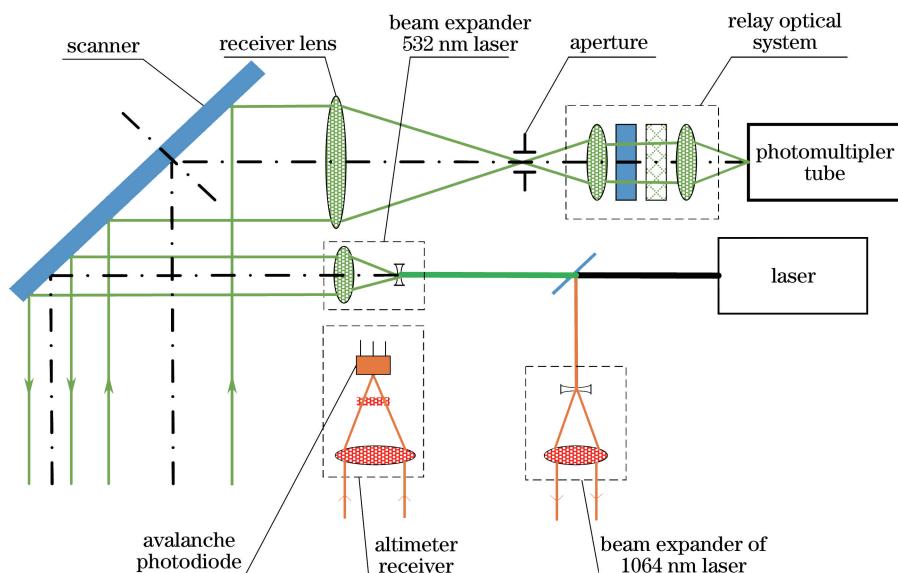


图 6 LADM-I 系统光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of optical system in LADM-I system

表 2 LADM-I 系统指标

Table 2 Parameters of LADM-I system

Parameter	Specification	Parameter	Specification
Laser wavelength /nm	1064, 532	Altitude of aircraft /m	100-1000
Laser peak power /MW	3 (@532 nm)	Elevation accuracy of sea surface /m	0.26
Laser pulse width /ns	8	Depth performance /m	50
Laser PRF /Hz	200	Depth accuracy /m	0.31
Telescope aperture /mm	200	Horizontal accuracy /m	3
Scan angle /($^{\circ}$)	± 15	Weight /kg	300



图 7 LADM-II 系统照片

Fig. 7 Photograph of LADM-II system

LADM-II 系统组成如图 9 所示, LADM-II 系统设计了脉冲重复频率为 1000 Hz 的半导体抽运 Nd:YAG 全固态激光器, 脉冲重复频率提升了 5 倍。为了扩大探测动态范围, 海洋探测通道采用比例分光和门控结合的技术, 将探测通道分成浅水和深水两个通道。浅水通道接收小比例分光, 实现 10 m 以内的海底回波探测, 深水通道接收大比例分

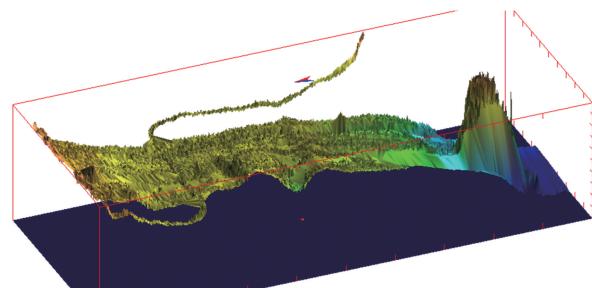


图 8 LADM-II 获得海底三维高程模型

Fig. 8 Bathymetric digital elevation model (DEM) by LADM-II

光, 实现 10 m 以外的海底回波探测, 深水通道采用时间增益门控技术抑制浅水的强散射回波, 避免探测器的饱和。扫描依然沿用卵形扫描方式, 系统配备了高精度码盘、高精度惯性测量单元(IMU)和差分全球定位系统(DGPS), 提升了系统的位置和角精度。

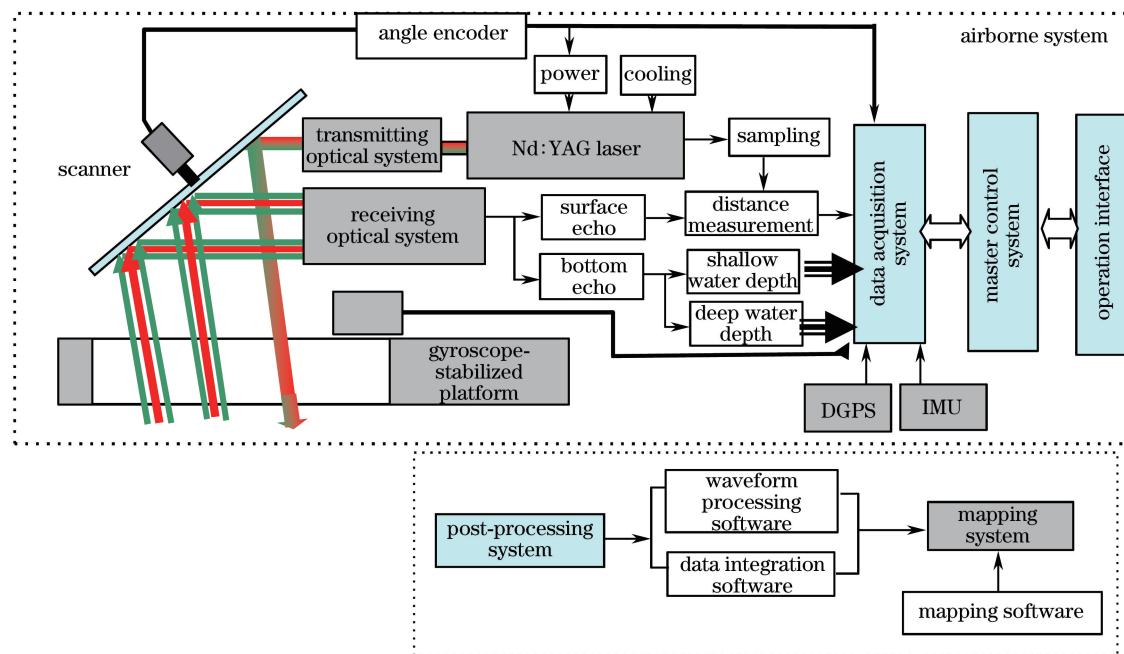


图 9 LADM-II 系统框图

Fig. 9 Block diagram of LADM-II System

LADM-II 的光路结构如图 10 所示, 激光发射接收采用同轴光路, 海面高度测量和水深测量均为同光路发射和扫描。接收望远镜采用更加轻质化的卡式结构, 该结构具有体积紧凑、焦距与波长无关的优点。在主镜聚焦光路上进行波长分光和比例分光, 采用 APD 探测器, 在 1064 nm 波长通道实现海面回波测量, 采用 PMT 探测器, 在 532 nm 波长通道实现水深回波测量。海面通道通过脉冲时间计数测量海面高度, 2 通道海洋波形由双通道高速波形采集卡采集, 每个通道采样率达到 1 GSa/s, 数字分辨率为 8 bit。

LADM-II 系统的技术指标如表 3 所示。

表 3 LADM-II 系统指标
Table 3 Parameters of LADM-II system

Parameter	Specification	Parameter	Specification
Laser wavelength /nm	1064, 532	Elevation accuracy of sea surface /m	0.19
Laser peak power /MW	1 (@532 nm)	Depth performance /m	0.5-50
Laser pulse width /ns	10	Depth accuracy /m	0.3
Laser PRF /Hz	1000	Horizontal accuracy /m	1
Telescope aperture /mm	240	Weight /kg	350
Scan angle /($^{\circ}$)	± 15	Power consumption /kW	2.5
Altitude of aircraft /m	100-1000		

从 2013 年开始, 在国家重大科学仪器设备开发专项支持下, 中科院上海光机所联合国内 6 家单位开展机载双频激光雷达产品开发工作, 目标是实现海陆一体化测绘的机载双频激光雷达产品开发和应

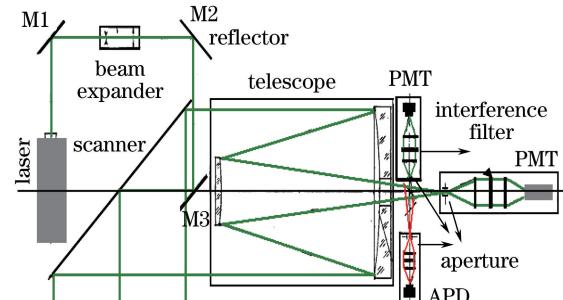


图 10 LADM-II 系统光路示意图

Fig. 10 Schematic diagram of optical system in LADM-II system

用开发, 并最终实现产业化。新系统采用模块化和网络化设计, 将不同的功能进行模块划分, 内置 IP 地址, 为以后的设备快速集成和网络控制提供了很好的接口。考虑到海洋和陆地测绘的特点, 新系统

在原有的 532 nm 和 1064 nm 双波长的基础上,增加了针对陆地高分辨率探测的 1550 nm 波长。

2015 年,新的机载双频激光雷达工程样机(Mapper5000-S)研制成功,系统照片如图 11 所示。该系统在南海完成了 3 个架次的机载飞行试验,获得了海陆一体化的三维地形数据,如图 12 所示,最大实测深度达到 35 m(测深能力达到 $4/K_d$),最浅水深达到 0.22 m,测深精度 0.11 m(20 m 水深的中误差),水平位置精度为 0.3 m,海洋测点密度为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,陆地测点密度为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 。新增的陆地通道提升了陆地测点密度,多通道接收和数据处理技术提升了浅水探测能力和海陆分类精度。



图 11 Mapper5000-S 系统照片

Fig. 11 Photograph of Mapper5000-S system

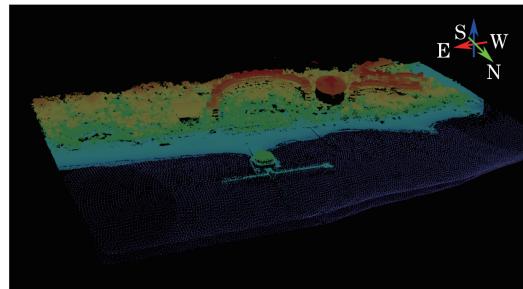


图 12 Mapper5000-S 海陆一体测量点云图

Fig. 12 Cloud points measured by Mapper5000-S

2017 年,项目组对系统进行了优化,海洋探测激光脉冲重复频率提升到 5000 Hz,增加了偏振探测通道,完成了 Mapper5000 的产品定型,如图 13 所示。Mapper5000 系统在南海完成了 11 个架次的机载飞行试验,获得南海岛礁的三维地形数据,如图 14 所示,最大实测深度达到 51 m,最浅水深达到 0.25 m,测深精度为 0.23 m(统计水深范围为 7~45 m),水平位置精度为 0.26 m,海洋测点密度为 $1.1 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$,陆地测点密度为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ 。海洋探测的高脉冲重复频率激光提升了系统的海洋测点密度,偏振探测通道提供了更多的海洋剖面信息和底质信息,结构优化和减重后的系统总质量降低到 98 kg,最大单模块质量为 60 kg,模块化的装配方式大大减轻了现场安装人员的工作量。



图 13 Mapper5000 系统照片

Fig. 13 Photograph of Mapper5000 system

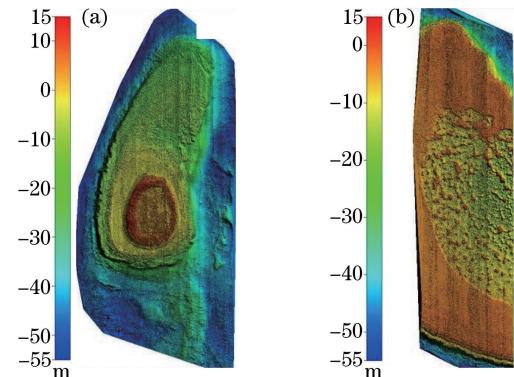


图 14 三维地形图。(a)海岛;(b)礁
Fig. 14 3D topographic map by Mapper5000 system.
(a) Island; (b) reef

Mapper5000 系统组成如图 15 所示,共包括 6 个模块,位置和姿态系统、飞行管理系统、航空摄影系统、陆地测绘系统、海洋测绘系统和数据后处理系统。其中飞行管理系统和数据后处理系统是 2 个软件模块,分别实现飞行导航、仪器控制、数据处理合成图。位置和姿态系统采用 GPS 和 IMU,航空摄影系统的核心是 H5D 相机,通过改造相机结构、电路和软件接口,航空摄影系统变成一个具有硬盘存储功能的网络模块。陆地测绘系统采用 1550 nm 波长光纤激光器、4 面塔镜扫描器和高速波形采集卡,可实现最大 60°、最远 1.5 km 的扫描探测。海洋测绘系统采用 1064 nm 和 532 nm 双波长固体激光器、卵形扫描器和高速波形采集卡,可实现最大 30°、最深 50 m 的扫描探测。位置和姿态系统向其他 3 个硬件测量模块提供秒同步信号和 POS 数据,航空摄影系统、陆地测绘系统和海洋测绘系统 3 个测量模块分别将测量数据打上统一的 GPS 时间标签,然后存储到内置可插拔硬盘上。飞行管理系统通过网络分别控制 3 个测量模块,实现指令执行和状态监控。数据后处理系统包括硬盘读出、波形解算、坐标变换等一套软件工具,完成 3 个测量模块硬盘原始数据到三维地形图的转换。

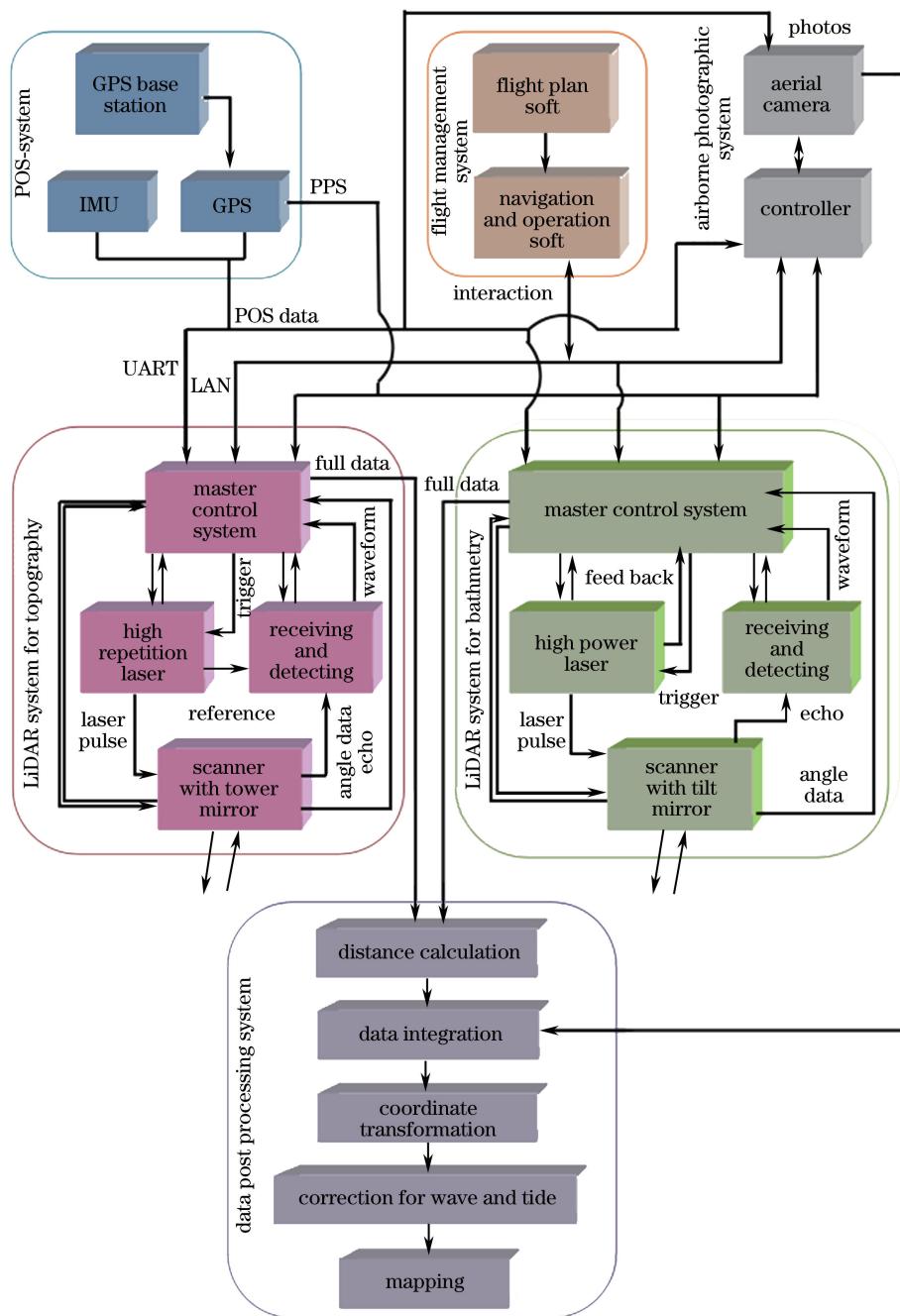


图 15 Mapper5000 系统框图

Fig. 15 Block diagram of Mapper5000 System

Mapper5000 的光路结构如图 16 所示, 激光发射接收采用同轴光路, 在主镜聚焦光路上进行视场分光、波长分光和偏振分光, 视场分光可以有效解决深水通道的海表饱和问题, 偏振分光可以获得更多的水体和底质信息, 1064 nm 波长通道采用 APD 探测器实现海面回波测量, 532 nm 波长通道采用 PMT 探测器实现水深回波测量。使用 4 通道高速波形采集卡完成海面回波和 3 通道海洋波形的采

集, 每个通道采样率达到 1 GSa/a, 数字分辨率为 10 bit。

Mapper5000 系统的技术指标如表 4 所示。

从 1998 年到 2017 年, 中科院上海光机所在机载双频激光雷达技术上不断改进和提升, 如表 5 所示, 系统的激光波长、激光脉冲重复频率、探测范围、探测精度、网格密度和仪器质量等关键指标得到较大提升。

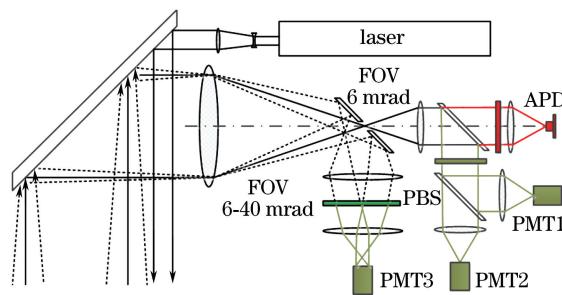


图 16 Mapper5000 系统光路示意图

Fig. 16 Schematic diagram of optical system in Mapper5000 system

表 4 Mapper5000 系统指标

Table 4 Parameters of Mapper5000 system

Parameter	Specification (Bathymetric)	Specification (Topographic)
Laser wavelength /nm	1064, 532	1550
Laser peak power /MW	1 (@532 nm)	0.001
Laser pulse width /ns	1 (@532 nm)	4
Laser PRF /kHz	5 (@532 nm)	100-400
Telescope aperture /mm	200	70
Scan angle /($^{\circ}$)	± 15	± 30
Altitude of aircraft /m		100-1500
Elevation accuracy of sea surface /m		0.12
Depth performance /m		0.25-51
Depth accuracy /m		0.23
Horizontal accuracy /m		0.26
Weight /kg		98
Power consumption /kW		1.2

表 5 三代机载双频激光雷达关键技术指标对照表

Table 5 Key technical parameters of three airborne dual-frequency LiDAR

Parameter	LADM-I	LADM-II	Mapper5000
Laser wavelength /nm	1064, 532	1064, 532	1550, 1064 and 532
Laser PRF /Hz	200	1000	5000
Elevation accuracy of sea surface /m	0.26	0.19	0.12
Depth performance /m	50	0.5-50	0.25-51
Depth accuracy /m	0.31	0.3	0.23
Horizontal accuracy /m	3	1	0.26
Surface grid /($m \times m$)	5×5	2.5×2.5	1.1×1.1 (Bathymetric) 0.25×0.25 (Topographic)
Weight /kg	300	350	98

3 总结与展望

机载双频激光雷达探测技术作为一个高效的海陆一体化探测技术,将在我国海洋开发、海岸带测绘和环境保护等领域发挥越来越大的作用。机载双频激光雷达 Mapper5000 产品开发和飞行试验的成功,标志着我国面向海洋领域的激光雷达装备已经趋于成熟,能够为我国海陆测绘提供高性能、高可靠

性的尖端产品。

目前的机载双频激光雷达探测技术主要是瞄准海陆测绘,随着我国对海洋探索和研究的深入,新的海洋探测领域将会对激光雷达提出更多的需求,包括海洋环境、海洋动力、海洋生物和海洋资源等。对于机载双频激光雷达探测技术的升级和扩展将成为未来技术的发展趋势,发展方向包括如下 6 个方面。

1) 小型化和低成本:系统进行模块化设计,减

小系统体积,适应无人机为代表的小型平台,降低系统的使用成本;

2) 处理速度的提升:将成熟的数据处理算法固化到硬件系统内,实现实时的数据处理,压缩数据成果的输出时间;

3) 探测能力的提升:包括测点密度和探测深度等,通过更高灵敏度的探测技术和更高性能的光源技术,提升系统的探测能力;

4) 探测波段的拓展:采用更加先进的激光器技术,在海水透过窗口内输出更多的波长,获取更加丰富的光谱剖面信息;

5) 数据产品的丰富:在测量地形的同时,提供海底底质、海洋光学参数、生物量等更加丰富的数据产品;

6) 探测机理的探索:开展激光与海洋光学量、生物量、环境要素和气象要素等相互关联关系的探索,为激光在海洋中的探测开辟新的研究领域。

未来的海洋探测平台将从船载提升到机载、星载,海洋遥感也将从表面观测深入到水下透视,以机载双频激光雷达探测技术作为起点的激光遥感将会凭借其不可取代的优势,在海洋探测领域发挥更加重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Hickman G D, Hogg J E. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1969, 1(1): 47-58.
- [2] Hoge F E, Swift R N, Frederick E B. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(6): 871-883.
- [3] Banic J, Sizgoric S, O' Neil R. Scanning LiDAR bathymeter for water depth measurement [J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 663: 187-195.
- [4] Penny M F, Abbot R H, Phillips D M, et al. Airborne laser hydrography in Australia [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13): 2046-2058.
- [5] Steinvall O, Klevebrant H, Lexander J, et al. Laser depth sounding in the Baltic Sea [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(19): 3284-3286.
- [6] Lillycrop W, Parson L, Estep L. Field testing of the US Army Corps of Engineers airborne lidar hydrographic survey system [C] // *Proceedings of the Unite States Hydrographic Conference*, 1994: 18-23.
- [7] Steinvall O K. Airborne laser depth sounding: system aspects and performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2258:392-412.
- [8] Setter C, Will, R J. LADS form development to hydrographic operations [C] // *Proceedings US Hydrographic Conference '94*, Norfolk USZ, 1994: 134-143.
- [9] Tuell G, Barbor K, Wozencraft J. Overview of the coastal zone mapping and imaging lidar (CZML): a new multisensor airborne mapping system for the US Army Corps of Engineers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7695: 76950R.
- [10] Chen W G, Huang T X, Lu Y M. Survey of airborne oceanic lidar [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(3): 147-152.
陈文革, 黄铁侠, 卢益民. 机载海洋激光雷达发展综述 [J]. 激光技术, 1998, 22(3): 147-152.
- [11] Zhu X, Yang K C, Li Z G. The experiment of airborne laser bathymeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1998, 25(5):470-472.
朱晓, 杨克成, 李再光. 机载激光测深试验 [J]. 中国激光, 1998, 25(5): 470-472.
- [12] Zhun C L. Ocean airbone laser remote sensing [C] // *Proceedings of 11 Province (Cities) Optics Science Conference*, 2002: 112-114.
褚春霖. 机载海洋激光遥感 [C] // 十一省(市)光学学术会议论文集, 2002:112-114.
- [13] Yao C H, Chen W B, Zang H G, et al. Accurate measurement of sea surface in an airborne laser bathymetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 351-355, 376.
姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统中的精确海表测量 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 351-355, 376.
- [14] Hu S J, He Y, Zang H G, et al. A new airborne laser bathymetry system and survey result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9):1163-1167.
胡善江, 贺岩, 臧华国, 等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果 [J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1163-1167.
- [15] Zhang K L. The system design and experiments of the airbone floorescence ocean lidar [D]. Qingdao: Chinese Marine University, 2005.
张凯临. 机载海洋激光荧光雷达软硬件设计与飞行 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [16] Zhang K L, He Y, Li Z G. Simulation and experiment for measuring chlorophyll-a with airborne fluorescence lidar [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(5): 790-794.
张凯临, 贺岩, 李志刚. 机载海洋激光荧光雷达叶绿

- 素 a 测量性能模拟和初步机载实验[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(5): 790-794.
- [17] Zhai G J, Huang M T, Ouyang Y Z, et al. Key technologies related to the development of airborne laser bathymetry system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(3): 73-76.
翟国君, 黄漠涛, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深系统研制中的关键技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 73-76.
- [18] Cheng Z, Xia M, Li W, et al. Target echo extraction method in underwater lidar system based on variable forgetting factor RLS algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 010101.
程藻, 夏珉, 李微, 等. 基于可变遗忘因子 RLS 算法的水下激光雷达回波提取[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 010101.
- [19] Li X L, Chen Y H, Yu F, et al. Comparison and analysis of inversion models for water optical property parameters by ocean lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001005.
李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001005.
- [20] Huang T C, Tao B Y, Mao Z H, et al. Classification of sea and land waveform based on multi-channel ocean lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610002.
黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610002.