

DOI:10.13203/j.whugis.20150779



文章编号:1671-8860(2017)09-1185-10

机载激光测深技术及其研究进展

刘焱雄^{1,2} 郭 锴¹ 何秀凤¹ 徐文学² 冯义楷²

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,210098

2 国家海洋局第一海洋研究所,山东 青岛,266061

摘 要:水下地形测量是进行海洋科学研究的基础,也是海洋测绘的重要工作内容。近年来,机载激光测深技术的提出与应用有效地弥补了以舰船为载体的传统声学测深方法在近海浅水区作业存在的技术缺陷,也为相关工程问题的解决提供了新的技术手段。详细介绍了机载激光测深技术的基本原理与误差来源,概括与总结了国内外研究机构在系统研制及其有关算法研究方面的进展情况,并在此基础上分析了该技术在近海浅水区域的作业优势与所存在的关键性问题,以供相关研究参考。最后,结合机载激光测深技术目前的研究现状对未来该技术可能的发展方向进行了展望。

关键词:机载激光测深;水下地形;浅水区域;海洋测绘

中图法分类号:P229;TP732 **文献标志码:**A

常规区域性水深测量方法主要是指以舰船等水面移动载体为平台的声学探测技术(单波束测深系统,多波束测深系统)。水深值小于 10 m 的潮间带地区由于受海洋潮汐的影响,往往存在滩浅、泥淤、礁多等较为复杂的作业环境,多数情况下只能依靠人工或小船乘潮作业的方式进行水深数据的采集,效率低、难度大,有一定危险性,故近海岸区域内长期以来存在大量测深数据空白。

与声学探测相比,多光谱遥感技术或微波遥感技术可有效地避开地形因素的影响,这在一定程度上起到抑制海浪的作用,但被动式的光学遥感技术对水体透明度有着较为苛刻的要求,且测深范围有限(≤ 20 m)。微波遥感虽然可以探测较深的水域,但对海流和风速条件较为敏感。此外,多光谱遥感和微波遥感测深技术均需要建立复杂的海洋与大气环境模型,而由于实测环境的不确定性因素所造成的模型误差使相对测深精度甚至无法达到 10%。因此,二者均难以推广到复杂的水体环境中,无法满足工程应用的成果要求^[1]。

1968 年,首台激光水深测量系统由美国 Syracuse 大学的 Hickman 和 Hog 研制成功,验证了激光测量水深的可行性,奠定了该技术在海洋科

学领域中的研究基础^[2]。近年来,以航空平台为载体的激光测深技术有效地克服了传统测深方式周期长、机动性差、测深精度低、测区范围有限等缺点,受到了广泛关注。目前,机载激光测深技术已成功实现了产品化,其可靠、高效的作业特点不仅能满足海岸带区域的水深探测需求,同时也为相关工程问题的解决提供了全新的思路。

本文从机载激光测深的基本原理与发展概况出发,对比分析了当前国内外机载激光测深系统的研发现状、数据处理与信号提取研究进展,全面总结了该技术在近海浅水水域地区的作业优势、关键技术以及所存在的难点问题,并对未来该技术研究与发展前景进行了分析与展望。

1 机载激光测深系统及其研究现状

1.1 机载激光系统测深原理

按照光波在海水中的传播特性,0.47~0.58 μm 的蓝绿光波段存在一个能量衰减程度相对较小的透射窗口。同时,为了克服入射角所造成的干扰,通常采用较低功率的宽波束脉冲(红外光)探测水面,采用大功率的窄波束脉冲(蓝绿光)探测水底^[3]。

收稿日期:2016-07-25

项目资助:国家自然科学基金(41401537);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2015P13)。

第一作者:刘焱雄,博士,研究员,主要从事 GNSS 数据处理理论及应用、海陆一体化测量研究。yxliu@fio.org.cn

通讯作者:郭锴,博士生。gk45@fio.org.cn

如图1所示,机载激光测深技术的原理可表示为:

$$R_g = \frac{c\Delta t K(\theta)}{2n} \quad (1)$$

式中, R_g 为水中激光的传播斜距; Δt 为回波时间差; c 表示光在空气中的传播速度; $K(\theta)$ 为入射角 θ 的光径因子; n 为海水折射率,随海水环境的具体情况(如盐度、温度、压强等因素)的变化而有所不同,可沿光路积分计算^[4]。为了简化计算,常不顾及海水深度与水质问题,直接采用 $n=1.341$ 代替^[5]。通过平面及深度归算,求得各个激光测点的空间位置信息及其相对于某一海水基准面的深度值。

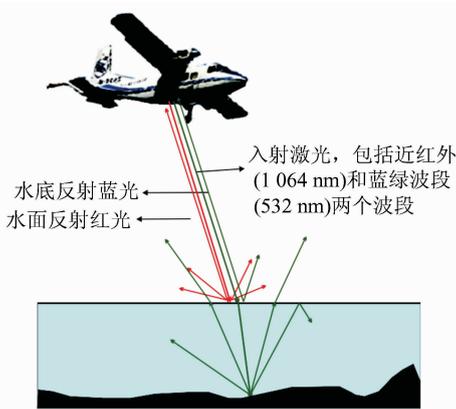


图1 机载激光测深原理示意图

Fig. 1 Principle Schematic Drawing for Airborne Laser Bathymetry

1.2 机载激光测深系统误差

机载激光测深系统是一个复杂的联合技术系统,削弱系统误差的影响是确保该技术有效性的基础。按照系统误差来源可分为量测误差和集成误差^[4],见表1。

表1 机载激光测深系统主要误差

Tab. 1 Main Errors of Airborne Laser Bathymetry

量测误差	集成误差	
	设备安装误差	数据处理误差
激光测深误差	偏心距	时间同步误差
导航定位误差	照准误差	数据内插误差
扫描角误差	角度步进误差	坐标转换误差
波浪与潮汐测量误差	扭矩误差	深度归算误差

1.2.1 量测误差

量测误差由激光测深系统在数据获取阶段产生。除了由于设备固件本身所造成的不可避免的生产误差,激光测距和导航定位所产生的误差被认为是量测误差的主要来源。

1) 激光测深误差

按照式(1)和误差传播率,测深精度可表示为:

$$M_{R_g}^2 = \left(\frac{\partial R_g}{\partial c}\right)^2 M_c^2 + \left(\frac{\partial R_g}{\partial \Delta t}\right)^2 M_{\Delta t}^2 + \left(\frac{\partial R_g}{\partial K(\theta)}\right)^2 M_{K(\theta)}^2 + \left(\frac{\partial R_g}{\partial n}\right)^2 M_n^2 \quad (2)$$

式中, M_{R_g} 为深度测量误差; M_c 为真空中的光速误差; $M_{K(\theta)}$ 为光径因子计算误差; M_n 表示折射率误差; $M_{\Delta t}$ 为回波时间误差。实际情况下 M_c 很小,可以忽略,因此机载激光测深系统的测深误差可以表示为:

$$M_{R_g}^2 = \left(\frac{\partial R_g}{\partial \Delta t}\right)^2 M_{\Delta t}^2 + \left(\frac{\partial R_g}{\partial K(\theta)}\right)^2 M_{K(\theta)}^2 + \left(\frac{\partial R_g}{\partial n}\right)^2 M_n^2 \quad (3)$$

该式反映了常规状态下,几种系统量测误差对测深结果所造成的影响^[5]。

受到大气环境的影响,激光的指向性将发生改变,造成测距误差。激光照射对象的几何与物理性质是造成反射强度变化和传播时延的主要原因。另外,激光在海水中的散射、折射、反射特性往往难以精确确定,这是斜距测量的主要障碍之一,也是造成测深误差的主要原因^[6]。

2) 导航定位误差

高精度机载定位定向系统(position and orientation system, POS)作为机载激光测深系统的重要组成部分,主要功能在于精确获取激光发射点的实时位置与激光光束的姿态信息。目前广泛采用的POS由GNSS(global navigation satellite systems)和IMU(inertial measurement unit)两个相互独立的模块所组成,其各自存在的误差将随着深度与位置归算传递到结果数据中。对IMU而言,主要是陀螺仪和加速度计误差,也包括初始对准误差等。一般而言,差分GNSS的水平定位精度可达cm级,但高程精度相对较差约为水平精度的一半。

1.2.2 集成误差

机载激光测深系统整体由不同功能的设备组成,各设备之间的匹配程度对测深结果的影响很明显,如设备的空间位置校准和时间同步匹配^[7-9]。不同设备的功能和观测要求不同,安装在飞机上的空间位置也不同,故作业前需要进行位置校准测量,由此产生的误差称为设备安装误差。

除以上误差外,为了能得到精确的水深信息,还必须考虑瞬时波浪和潮汐等对测深数据的影响。如图2,红外光所得的斜距为 R , R_g 为蓝绿光在水中的传播距离,由平台A到海底B,激光所穿过的距离 R_b 为:

$$R_b = R + R_g = (H+h)\sec\theta + (D-h+\epsilon_b)\sec\varphi \quad (4)$$

可得深度值:

$$D = h + \frac{1}{\sec\phi} [R_b - (H + h) \sec\theta] - \epsilon_b \quad (5)$$

式中, θ 和 ϕ 分别为入射角和折射角; h 为波浪高; ϵ_b 为未被模型化的测深误差。式(5)说明,在不考虑过程误差的情况下,海面浪高估计以及潮汐改正对测深精度的影响十分明显,因此,提高水面浪高估计精度,减小潮汐改正误差,在此基础上进行精确的误差补偿与修正是机载激光测深领域的重点研究方向之一^[10]。

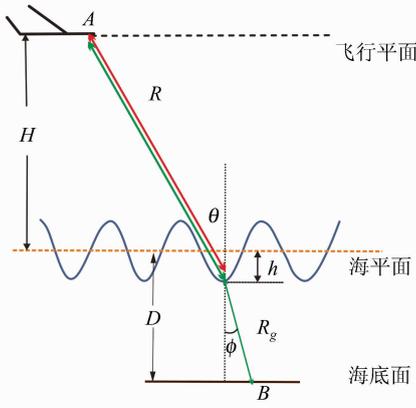


图 2 机载激光测深几何原理

Fig. 2 Geometry Principle Schematic Drawing of Airborne Laser Bathymetry

1.3 国外研究概况

机载激光测深系统的研制始于 20 世纪 60 年代,该阶段为技术发展的初级阶段。1969 年, Hickman 和 Hog 进行了初步的激光测深试验,主要以技术试验与理论论证为主。20 世纪 60 年代末到 90 年代初,随着卫星定位技术与惯性导航技术的成熟,机载激光测深系统很快被广泛地应用于陆地和海洋地形测量中。这一阶段分为形成阶段(20 世纪 60 年代末至 70 年代末)和成熟阶段(20 世纪 90 年代至 90 年代初),后者以采用更加可靠的导航定位系统与数据高速记录模块为标志。另外,早期的激光测深系统受到信号采集和存储空间的制约,一般只能记录首次和最后一次回波信号。第一台具备可操作性的机载激光测深系统是 20 世纪 80 年代设计制造的 LARSEN-500。

目前,国内外众多机构、企业相继投入大量成本到机载激光测深系统的有关研制中。数据的全波形记录已成为系统的基本要求,在测深精度与范围方面也有了进一步提高。长期跟进该技术的主要国家包括,美国、俄罗斯、加拿大、澳大利亚、瑞典、法国、荷兰、奥地利、中国等。

表 2 机载激光测深系统发展过程

发展阶段	时间	典型系统
初级阶段	1960s	—
形成	20 世纪 60 年代末~70 年代末	美国: ALB, AOL 澳大利亚: WRELADS-I 瑞典: HOSS 加拿大: MK-1
		美国: ABS, NOROA, OWL, SHOALS
提升阶段	20 世纪 80 年代初~90 年代初	澳大利亚: WRELADS-II 瑞典: FLASH, HAWKEYE 加拿大: LARSEN-500 前苏联: Chaika, Makrel-II 瑞典: HAWKEYE-II, HAWKEYE-III
		加拿大: Aquarius, CIZML 奥地利: VQ-820-G, VQ-880-G 荷兰: LADs Mk3
实用阶段	90 年代初至今	—

CZMIL Nova 系统是加拿大 Optech 公司在美国陆军工程兵团和机载激光测深技术联合研究中心共同赞助开发的新型机载激光测深系统,主要由 Optech 公司和南密西西比大学研制并试验,系统集成高光谱成像系统和数码量测相机,可同时生成无缝高分辨率 3D 数据以及海岸带浅水水底地形影像,对于水深较浅,水质浑浊的区域, CZMIL 采用高功率激光脉冲和较大的接收孔径,结合有效的波形探测算法,从而获取目标水域精确的水深信息。产品配备 Optech 公司开发的 Optech HydroFusion 软件,用于实现多源数据的融合处理^[11]。

HawkEye 系列产品最早可追述到 20 世纪 90 年代 Saab 公司向瑞典海军和瑞典海岸线管理局提供的两套 HawkEye 激光雷达系统。之后该系统由瑞典 AHAB(Airborne Hydrography AB)公司继承并进一步开发,目前 AHAB 已被 Leica 公司并购。AHAB 公司于 2005 年成功研制了 HawkEyeII 系统,在采用全波形激光测深通道的基础上增加了 Leica RCD30 RGB 相机,从而实现了 50 m 以浅区域激光回波数据与航空影像的同步采集。HawkEyeIII 系统加载了高性能水深激光测量单元,其高程测量精度符合国际海道测量 1A 级测量规范。此外,该系统可自动进行折射校正,并拥有更高的数据捕获性能^[12]。

Chiroptera II 是由 AHAB 公司研制的另一款作用于 15 m 以浅水域的激光航测系统,其基本性能与 HawkEye 系列类似,均采用了倾斜扫描和全波形捕获的方式,不同于 HawkEyeIII,只加载了 35 kHz 的蓝绿光波段的脉冲激光扫描器,故其对水下测深范围相对有限,主要应用于水质较

好的海岸、河道、湿地等区域的相关监测。

Fugro公司于1992年开始推出自己的激光测深设备。LADs Mk3系统于2011年研制并生产,其最大的特点在于可以通过激光在海底的反射率对海床进行分类。另外,LADs Mk3系统仅适用于水下探测,故要实现海陆一体化测量,必须与其他陆地激光测量系统同步使用^[13]。

2011年,由Riegl公司和Innsbruck大学联合制造的VQ-820-G系统完成海上测试。该系统

在整体设计上减小了设备的体积与重量,同时提高了设备作业续航时间。系统配备的原厂软件包RiPROCESS可用于复杂回波数据与激光折射数据的处理。另外,该系统标称具有一定程度的浑水探测能力,可用于条件较好的内陆水域探测^[16]。2015年,Riegl公司在VQ-820-G的基础上发布了新的机载激光测深系统VQ-880-G,测深性能方面有了进一步提高。表3对比了当前流行的几种主要机载激光测深系统及其相关参数^[17]。

表3 主要机载激光测深系统参数对比^[11-15]

Tab. 3 Comparison of Main Parameters of Airborne Laser Bathymetry System^[11-15]

主要参数	CZMIL	HawkEyeIII	Chiroptera II	LADs Mk3	VQ-820-G	VQ-880-G
研制机构	Optech	Leica AHAB	Leica AHAB	Fugro	Riegl	Riegl
扫描方式	圆形	椭圆形	倾斜式	直线	椭圆形	圆形
作业航高/m	400~1 000	水深测量: 400~600 陆地测量: 400~1 600	水深测量: 400~600 陆地测量: 400~1 600	360~900	水深测量: 600 陆地测量: 1 500~2 500	水深测量: 600 陆地测量: 2 200
浅水脉冲频率/kHz	70	35	35	—	520	550
浅水模式最大测深 (水底反射率>15%)	$2/k_d$	$2.2/k_d$	$2.2/k_d$	—	1 Secchi	1.5 Secchi
深水脉冲频率/kHz	10	10	—	1.5	—	—
深水模式最大测深 (水底反射率>15%)	$4.2/k_d$	$4/k_d$	—	2.5 Secchi	—	—
测深精度/m	$\sqrt{[0.3^2 + (0.013 d_p)^2]}$ (2σ)	浅水频道: 0.15 (2σ) 深水频道: $\sqrt{[0.3^2 + (0.013d_p)^2]}$ (2σ)	0.15(2σ)	<0.5(2σ)	0.025(σ)	0.025(σ)
测点密度	—	水深测量: 1.5 pts/m ² 地形测量: >12 pts/m ²	水深测量: 1.5 pts/m ² 地形测量: >12 pts/m ²	(2 m×2 m) ~ (5 m×8 m)	10~50 pts/m ²	
扫描角	±20°	前后:±14° 左右:±20°	前后:±14° 左右:±20°	前后:7°	20°椭圆	20°~40°椭圆
幅宽	作业高度的70%	作业高度的70%	作业高度的70%	79~585 m	—	—
陆地脉冲频率/kHz	80	500	500	1.5	520	550

注: k_d :扩散衰减系数,一般来说只有在(0.1,0.3)区间内激光能够有效地穿透水体; d_p :测量目标深度;Secchi:透明度的量,采用具有黑白分隔的Secchi disk沉入水中直至肉眼无法辨认时的距离。

为了提高测深系统的水深渗透性能,实现不同系统之间优势互补,可采用多系统协同作业模式。Fugro公司2015年4月公布了旗下LAD Mk3系统与Riegl公司生产的VQ-820-G系统在新西兰北部Motiti岛周边海域进行组合试验的相关情况。由表3和图3看出,VQ-820-G具有较好的测深精度,但其测深能力有限,可用于近海浅水区以及陆地表面地形测量;LAD Mk3系统的测深指标虽然优于VQ-820-G,但测深精度较低且缺乏陆地地形数据。此外,两系统安置于同

一平台上,具有各自独立的惯性测量单元,并采用相同的工作波段(532 nm)。系统组合后可由一台笔记本电脑同时运行各自的控制软件。

该试验表明,组合后的激光测深系统在浅水与近海岸区域最大限度地减少了航带间的缝隙,并同时得到地形以及水深数据,这在一定程度上提高了水深测量结果的覆盖范围。此外,由于该组合系统的功率与发射频率较高,且可在多种轻型飞机平台进行搭载,因此在各种复杂测区环境条件下的测深结果优于其他低能源替代系统和单

传感器系统,具有更高的适用性和灵活性^[18]。

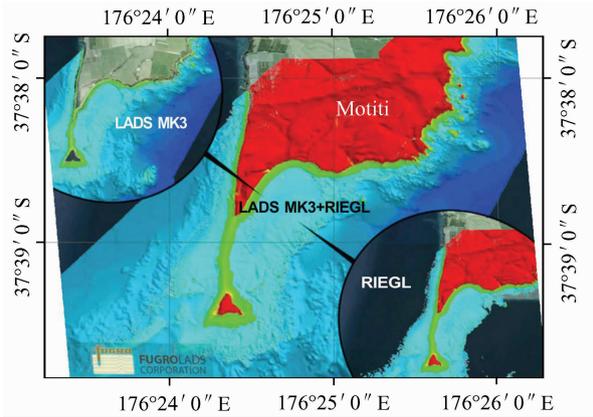


图 3 LADs Mk3 与 VQ-820-G 系统组合数据融合^[18]

Fig. 3 Data Fusion of Mk3 LADs and VQ-820-G Composite System^[18]

1.4 国内研究概况

20 世纪 80 年代到 90 年代末,中国逐步展开了对机载激光测深技术的相关理论研究,虽然起步较晚,且暂时还没有成熟的商业化产品面世,但该技术得到了各相关领域研究人员的广泛关注。华中理工大学、上海光机所、长春光机所、西安光机所、中国海洋大学、西安测绘研究所等单位最早开展了激光水下探测设备的论证与研制工作。1996 年 5 月,华中理工大学对其所研制的机载海洋激光雷达系统进行了海上试验,成功接收到了 80~90 m 的海底回波信息;2002 年,中国上海光机所研制出了第一代机载激光测深系统,2004 年在中国国家 863 计划支持下,与中国海军海洋测绘研究所合作完成了系统样机的研制。胡善江等^[19]对中国自主研发的新型机载激光测深系统的飞行试验结果进行了分析,得出了该激光测深系统在测深精度和测量效率等方面已经接近实用化的结论。2013 年中国上海光机所在相关专项支持下开展了新一代机载激光测深系统的研制,中国国家测绘地理信息公益性科研专项基金支持了相关技术研究^[20]。中国国家海洋局第一海洋研究所通过先后与加拿大 Optech 公司、瑞典 AHAB 公司协商,分别于 2012 年 12 月和 2013 年 8 月引入 Optech 公司的 Aquarius(水瓶座)系统和 AHAB 公司的 HawkEye II 系统,在中国南海海域进行了测深试验,试验结果表明,机载激光测深系统在中国南海能够达到标称的测深精度,证实了该技术在中国南海海域具有广阔的应用前景^[21]。通过对当前主流机载激光测深系统的分析研究,翟国君等^[22,23]结合中国机载激光测深技术的研究实际,分析了系统研制过程中所存在的

4 项难点与关键技术,并阐述了该技术在海洋测绘中的重要意义与作用。

2 机载激光全波形数据处理与信息提取

多数机载激光测深系统均已装备小光斑扫描仪,小光斑波形数据的分解是当前机载激光技术的热点和难点问题。主流激光测深系统均采用全波形分析技术作为信号分析的主要方法。全波形分析的主要目的包括目标物的特征提取和目标物的位置确定。

激光回波数据容易受到海水水质、海水基底、泥沙、鱼群等影响,信号衰减严重,接收到的回波信号往往埋没于噪声之中^[24]。经海洋基底反射的信号,在时间方向被拉宽,造成所谓海底回波上升沿不确定性问题,如图 4 所示,由于垂线所标示的回波上升沿的存在,无法准确判断得到回波的时间差。

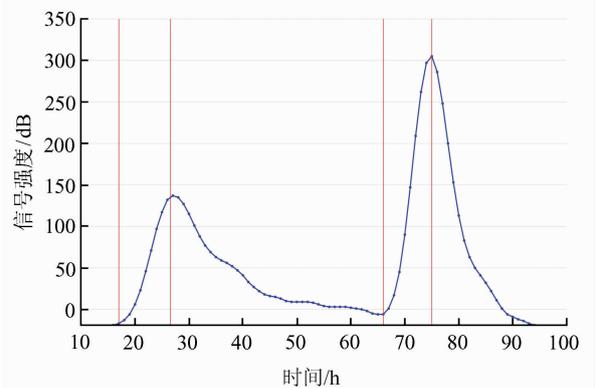


图 4 海底回波上升沿示意图

Fig. 4 Schematic Drawing for Rising Edge of a Sea Bottom Echo

汪驰升等^[25]将常用的波形处理方法分为 3 类:回波探测、数学模拟以及去卷积,本文对几种方法对单波段激光数据的处理结果进行对比分析。

1) 波峰探测方法

根据原始波形数据直接从中探测出目标物的反射位置,计算过程简单。需要注意的是,由于受到介质散射的影响,波形振幅表现出逐渐衰减的特性,其真实回波的位置与波形极值之间存在一定偏移,波峰的选取标准也不相同,如阈值、局部最大值以及二阶微分过零值判断等方法。

2) 波形分解

利用数学方法对全波形数据的各部分进行分解,从而得到各回波准确的位置。Hofton^[26]指出

波形数据应理解为若干高斯分量的叠加。Zwally 和 Wagner^[27-28]指出对波形信号采用高斯分解可适用于多领域应用需求。普遍采用的高斯分解方法有几种,如 Wagner^[28]提出的基于非线性最小二乘的分层高斯函数波形拟合,Jutzi 和 Stilla^[29]实现的高斯-牛顿法,Persson 和 Mallet^[30]的 EM 算法,李奇和马洪超^[31]改进的 EM 算法波形分析技术等。波形分解的优势在于数学过程明确,缺点是建模过程复杂,涉及到非线性模型的参数估计和初值的选取,因此虽然效果明显但效率不高。

3) 波形去卷积

去卷积方法在传统图像处理领域已经有比较成功的应用,该方法认为原始波形数据是由真实的回波波形与使波形能量发生衰减的扩展函数部分相互卷积而成,因此如果采用去卷积技术得到相应的补偿函数,就可以将真实的回波信号进行复原。有效的去卷积方法很多,如傅里叶去卷积方法,Richardson-Lucy 方法,Wiener 滤波方法,以及小波分解方法等。

为提高水深测量的效率和准确性,围绕如何使激光回波信号的提取更加合理可靠的问题,Billard B^[32,33]提出了回波信号中探测海底反射信号的运算法则,包括在回波信号中应用高通滤波剔除信号的低频部分和两种高频脉冲的识别和进一步处理。Guenther G C^[34,35]等论述了回波信号波形的处理方法,并使用了启发式规则识别海表和海底的回波信号,该规则包括应用回波信号的振幅和上升时间等信息,同时采用极限检测法估算水深;Wong H 等^[36]指出信号重叠是水底回波信号产生偏移的主要原因,最不理想的情况是水底反射能量较低时,或者水深较浅时,水底反射信号完全嵌入到水面回波当中,致使水深的估算变得更加复杂。徐启阳等^[24]提出必须对光电倍增管(PMT)施行变增益控制,即当接收水面激光回波时,由于反射信号能量较强,可将 PMT 调节为低增益状态,而当接收水底激光回波时,其反射信号强度较弱,此时 PMT 采用高增益模式,该方法从硬件角度对信号采集过程中对回波信号的质量进行了有效的控制,为进一步的波形分析提供了有力保障。

针对回波波形模拟与分解时参数优化的问题,Lin 等^[37]对波峰时间位置间距小于脉冲发射长度时的情况提出假设并通过试验证实,分解过程中所得波峰位置如果小于一个脉冲长度时为来自噪声的影响,应予以剔除。赵泉华等^[38]针对常规波形分解方法中先要预定波形数量的问题,提出了一种

自动确定波形分解数的方法,并使用可逆跳转马尔科夫链蒙特卡洛(reversible jump Markov chain Monte Carlo,RJMCMC)方法确定波形分解数完成分解。李鹏程等^[39]对高斯分解过程中采用传统 Levenberg-Marquardt 方法进行参数优化时容易陷入局部最优解的情况,提出一种全局收敛的 LM 全波形数据分解方法,与传统方法相比该方法更具有鲁棒性。

对于波形处理方法难以适应较深水域的问题。叶修松^[1]采用基于不变矩理论提取机载激光测深回波信号,经过试验分析得出,其信号提取过程中受到海水深浅影响减小,且对测深结果起到一定的改善作用。

目前,加拿大 Optech 公司已成功解决了回波信号确定问题,但其采用的具体方法并未公开^[5]。根据推测,可能的方法是通过大量的海上试验,按照海底地质分类建立回波上升沿数据库,再通过信号处理及其它一些误差改正技术,最终使测深精度达到 10 cm 左右^[1]。

3 机载激光测深系统关键技术研究

正常状态下,为使相关技术指标达到 IHO-I 类标准^[40]的基本要求,同时满足系统实际工程的任务需要,机载激光测深技术研究的关键还包括多个方面。

3.1 定位定向技术研究进展

激光发射点的位置与激光波束的方向测定主要依靠 POS 系统所提供的精确卫星定位数据和惯性导航数据,如加拿大 APPLANIX 公司研制的高精度航空遥感运动补偿姿态系统 POS / AV610,可应用于机载 SAR、相机、激光雷达等航空遥感系统^[41]。但类似设备对中国属于禁运产品,这严重制约了中国在该方面的研究进展。李建利等^[42]设计了一种对称八点减振惯性敏感组件结构,提出了基于滤波器建模的时延补偿方法,成功研制出高分辨率机载小型高精度环形激光陀螺(RLG)的系统样机,经过测试该 POS 系统具有较高的精度和良好稳定性。

考虑到 POS 系统中 GNSS 单元和 IMU 单元的组合方式,洪海斌^[43]提出了一种利用伪距和伪距率的紧耦合导航系统,试验证明该方法具有较高的内符合精度。此外,刘帅等^[44]针对信号失锁后模型收敛较慢这一问题提出了一种适用于 PPP/INS 紧密组合的前后平滑算法,用以提高 GNSS 信号遮挡段和重新收敛段的导航精度。

3.2 波浪与潮汐环境下测深值归算与修正

机载激光测深得到的海水深度是所测海域的瞬时海水深度,起算面是瞬时海面,为了提高测深精度,需要对水深观测结果进行波浪和潮汐改正,同时解决瞬时海面与标准起算面(深度基准面)的相互转换关系^[6]。目前,国外比较成熟的机载激光测深系统一般配有原厂开发的数据处理软件包及后处理模块,但没有明确给出具体归算方法,关于激光测深归算方法的理论研究相对较少。黄卫军等^[45]对风浪条件下不同扫描方式的回波信号接收概率及其变化规律进行了研究,提出了机载激光测深系统参数与扫描方式的最优选择方案;根据海洋测深空间几何结构,欧阳永忠等^[46]提出了 3 种波浪改正计算方案,经过详细分析,得出 3 种归算方案虽然具有不同的适用环境和应用范围,最终归算精度都在±25 cm 左右,可满足海道测量规范中±30 cm 的精度要求。3 种归算方案使用了不同的技术途径,各方案之间可互为检核。陈卫标等^[8]研究了机载激光水深测量系统的深度反演问题,着重分析了基于相位模糊度解算技术的动态卫星定位系统和传统波浪潮汐改正法,得出波浪潮汐改正法的精度略高于无修正法,但无修正法计算更加简便的结论。

3.3 系统测深结果的精度评估方法

测深结果的误差校正及精度评定是该领域研究的重要问题。黄谟涛等^[47]推导了深度测量点位置归算公式以及相应的精度评价方法,以自主研制的激光测深系统为例详细讨论了海洋水体的动态效应和载体工作过程中的姿态对作业结果的影响,并对机载激光测深的平面位置归算改正值按照式(6)进行精度评定:

$$e_p^2 = e_0^2 + \sum_{i=1}^{11} d_i^2 e_i^2 \quad (6)$$

式中, e_p^2 为点位误差方差; e_0^2 为平台定位系统误差方差; e_i^2 代表第 i 个归算参数的误差方差,与其对应相关的归算参数(11 个)包括姿态改正参数(R, P, A)、测深系统天线偏心改正参数(x_a, y_a, z_a)、不同系统间的时间归算误差 Δt 、时间归算误差内激光器的速度 v 、扫描角(x 轴方向) θ 、扫描角(y 轴方向) U 、激光器到测点的距离(斜距) U 、各项系数 d_i ,可按照参考文献[40]中机载激光测深系统对测点平面位置的归算过程求得。

深度归算精度概括为两种方法,分别对应不同的估算参数,即:

$$\sigma_{H_m} = \sqrt{(\sigma_{h_m}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_{h_1}^2 + \sigma_{h_2}^2)} \quad (7)$$

$$\sigma_{H_m} = \sqrt{(\sigma_{h_2}^2 + \sigma_{h_1}^2 + \sigma_{\Delta h}^2 + \sigma_{h_i}^2)} \quad (8)$$

式中, H_m 为海底所测激光点相对于平均海平面的深度; h_m 为平均海平面高度; h 为激光器中心大地高,可由系统定位模块求得; h_1 为激光中心到瞬时海面垂直高度, \bar{h}_1 表示在一定时间范围内 h_1 的平均值; h_2 为瞬时海面到海底所测激光点的深度; Δh 为某段时间内激光发射器中心的高度变化值; h_i 为潮汐改正数。

通过以上平面位置及深度归算精度评估方法,可以初步得到机载激光测深系统的测深质量,为评价系统的有效性与稳定性提供相应的指标参考。

3.4 航带拼接与数据融合技术

机载激光测深系统在作业过程中采用航线排列的方法覆盖测区,不同航带间有一定的重合度,在数据处理中需要对相邻航带的数据进行拼接,由于海上缺乏陆地上明显的标志物,给整个拼接工作带来了一定难度,其拼接效果根据不同算法也有所不同,如何减小拼接中的系统性偏差仍缺乏有效的方法。黄谟涛等^[48]在对多波束与单波束测深数据自身特点进行详细分析后提出了将单波束数据作为控制的多波束测深数据整体精度提高方案,并指出该方法对机载激光测深数据的处理结果同样有效。陆秀平等^[49]对不同测深方法间存在系统性偏差的问题,提出以单波束成果为控制,对机载激光测深系统偏差进行精度补偿的方案,该方案以平差方法为基础实现了声学测量与机载激光测深的深度融合。

为满足航空平台的搭载需要,便于作业过程中的运输与安装,需要在确保高系统稳定性的条件下,将系统的体积和重量控制在一定范围内,这是机载激光系统设计与制造过程中必须考虑的重要环节。尽管近年来机载激光测深技术日趋成熟,但由于水体环境、软件算法、技术固有缺陷等具体问题所造成的不确定性和复杂性,使得该技术在实用化过程中依然存在有较多难点,值得进一步思考与研究。

4 结 语

中国拥有 300 多万 km^2 的辽阔海域,海岸线长达 18 000 多 km ,而水深在 50 m 以内的海域面积多达 50 万 km^2 ,这些区域是国防与民用建设最为重要和活跃的地区,机载激光测深技术的发展对于海岸带调查及相关研究的开展具有重要意义。目前,国际上相应的产品与服务已经成功应用到生产领域,并获得了较好的效果。通过以往的试点研究表明,该技术在中国近海岸地区有着广阔的应用前景,但就系统设备的研制方面,我国尚处于跟踪

研究阶段,虽已有一些尝试,但还没有相对成熟和稳定的实用性产品推出。围绕机载激光测深系统的关键技术与重点难点问题,本文对当前相关领域研究的现状与代表性进展进行了系统性总结。通过分析看出,机载激光测深系统的是一个多系统相互组合的联合系统,而将系统误差限制在一定范围内是系统研制首要考虑的问题。此外,全波形数据处理方法的研究一直以来都是该技术研究的热点,特别在回波探测与信号的提取方面的仍有较大的提升空间。总而言之,随着未来我国对海洋的开发与保护意识的提高,机载激光测深及其关键技术的研究必将受到更为广泛的关注。

参 考 文 献

- [1] Ye Xiusong. Research on Principle Data Processing Methods of Airborne Laser Bathymetric Technique [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010. (叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州:信息工程大学测绘学院, 2010)
- [2] Hickman G D, Hog J E. Application of an Airborne Pulsed Laser for Near Shore Bathymetric Measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1969, 1(1): 47-58
- [3] Huang J, Hu X, Chen W. Electro-optically Q-switched 946 nm Laser of a Composite Nd: YAG Crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(2): 49-52
- [4] Lai Xudong. Basic Principle and Application of Airborne Laser Radar[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 25-34 (赖旭东. 机载激光雷达基础原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010: 25-34)
- [5] Liu Jiyu, Li Song. Application on Error Sources Surveying Sea-Water Depths with an Airborne Laser Sounding System [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(6): 491-494 (刘基余, 李松. 机载激光测深系统测深误差源的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 491-494)
- [6] Wang Yue. Current Status and Development of Airborne Laser Bathymetry Technology [J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(3): 38-42 (王越. 机载激光浅海测深技术的现状和发展 [J]. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 38-42)
- [7] Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and Sorting of Impacts of Measurement Errors on Positioning Accuracy of Laser Point Cloud Obtained from Airborne Laser Scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 247-252 (王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 247-252)
- [8] Chen Weibiao, Lu Yutian, Chu Chunlin, et al. Analyses of Depth Accuracy for Airborne Laser Bathymetry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(1): 101-104 (陈卫标, 陆雨田, 褚春霖, 等. 机载激光水深测量精度分析[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 101-104)
- [9] Ye Xiusong, Zhang Chuanding, Wang Aibing, et al. Analysis of the Airborne Laser Scanning Bathymetry Errors [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(6): 400-406 (叶修松, 张传定, 王爱兵, 等. 机载激光水深测量误差分析[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(6): 400-406)
- [10] Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo, et al. Accurate Measurement of Sea Surface in an Airborne Laser Bathymetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 351-355 (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)
- [11] Teledyne Optech. CZMIL-Nova Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR [OL]. <http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/CZMIL-Nova-Intro-Brochure-150626-WEB>, 2015
- [12] Teledyne Optech. Software-Optech Hydro Fusion [OL]. <http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/optech-hydrofusion>, 2015
- [13] Fugro LADS Corporation. Fugro LADS Mk 3 ALB System [OL]. <http://www.fugrolads.com/download/datasheets/fugro-lads-Mk3>, 2015
- [14] Fugro LADS Corporation. Fugro LADS Mk3 and Riegl VQ-820-G Combined [OL]. <http://www.fugrolads.com/lads-mk3/Fugro-lads-technology/lads-mk3-riegl-vq-combined>, 2015
- [15] Airborne Hydrography A B. Leica AHAB HawkEye III Topographic & Bathymetric LiDAR System [OL]. <http://www.airbornehydro.com/sites/default/files/Leica%20AHAB%20HawkEye%20DS>, 2015
- [16] Li Jianli, Fang Jiancheng, Kang Taizhong. RLG Position and Orientation System Used for Motion Compensation in Airborne InSAR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1 497-1 504 (李建利, 房建成, 康泰钟. 机载 InSAR 运动补偿用激光陀螺位置姿态系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1 497-1 504)
- [17] RIEGL. RIEGL VQ-820-G [OL]. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/datasheet_VQ-820-G_2015-03-24, 2015
- [18] Fugro LADS Corporation. Fugro Set for South West Pacific Campaign With Additional Airborne Laser Bathymetry Survey Capability [OL]. <http://www.fugrolads.com/news/>, 2015

- [19] Hu Shanjiang, He Yan, Zang Huaguo, et al. A New Airborne Laser Bathymetry System and Survey Result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1 163-1 167(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):1 163-1 167)
- [20] 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(李凯, 张永生, 刘笑迪, 等. 机载激光海洋测深系统接收 FOV 的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7):40-48)
- [21] Peng Lin, Liu Yanxiong, Deng Cailong, et al. Experiment of Airborne Laser Bathymetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 4(34): 35-38(彭琳, 刘焱雄, 邓才龙, 等. 机载激光测深系统试点应用研究[J]. 海洋测绘, 2014, 4(34):35-38)
- [22] Zhai Guojun, Wu Taiqi, Ouyang Yongzhong, et al. The Development of Airborne Laser Bathymetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2012, 32(2):67-70(翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(2):67-70)
- [23] Zhai Guojun, Wang Keping, Liu Yuhong. Technology of Airborne Laser Bathymetry [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(2):72-74(翟国君, 王克平, 刘玉红. 机载激光测深技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2):72-74)
- [24] Xu Qiyang, Yang Jun, Zhu Xiao, et al. Processing and Research of Airborne Laser Echo Signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(9):788-792. (徐启阳, 杨军, 朱晓, 等. 机载激光测深回波信号的处理和研究[J]. 光子学报, 1996, 25(9):788-792)
- [25] Wang C S, Li Q, Liu Y, et al. A Comparison of Waveform Processing Algorithms for Single-Wavelength LiDAR Bathymetry [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 101(101): 22-35
- [26] Hofton M, Minster J B, Blair J B. Decomposition of Laser Altimeter Waveforms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(4):1 989-1 996
- [27] Zwally H J. ICESat Laser Measurements of Polar ice, Atmosphere, Ocean, and Land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2003, 34(1):337-341
- [28] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, et al. Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 60(2):100-112
- [29] Boris J A, Uwe S B. Waveform Processing of Laser Pulses for Reconstruction of Surfaces in Urban Areas [J]. *Measurement Techniques*, 2005, 36:(Part 8/W27)
- [30] Persson A, Soederman U, Toepel J, et al. Visualization and Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanner Data [J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2005, 36:103-108
- [31] Li Qi, Ma Hongchao. The Study of Point-cloud Production Method Based on Waveform Laser Scanner Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3):349-354(李奇, 马洪超. 基于激光雷达波形数据的点云产生[J]. 测绘学报, 2008, 37(3):349-354)
- [32] Billard B. Remote Sensing of Scattering Coefficient for Airborne Laser Hydrography [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13):2 099-2 108
- [33] Billard B, Wilsen P J. Sea Surface and Depth Detection in the WRELADS Airborne Depth Sounder [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13):2 059
- [34] Guenther G C, Brooks M W, Larocque P E. New Capabilities of the “SHOALS” Airborne LiDAR Bathymeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(2):247-255
- [35] Guenther G C, Cunningham A G, Larocque P E, et al. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Bathymetry [J]. *Proc. Earsel Symp. Workshop on Lidar Remote Sensing of Land & Sea*, 2000(1):1
- [36] Wong H, Antoniou A. Characterization and Decomposition of Waveforms for Larsen 500 Airborne System [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1991, 29(6):912-921
- [37] Lin Y C, Mills J P, Smith-Voysey S, et al. Rigorous Pulse Detection from Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(5):1 303-1 324
- [38] Zhao Quanhua, Li Hongying, Li Yu. Gaussian Mixture Model with Variable Components for Full Waveform LiDAR Data Decomposition and RJMCMC Algorithm [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12):1 367-1 377(赵泉华, 李红莹, 李玉. 全波形 LiDAR 数据分解的可变分量高斯混合模型及 RJMCMC 算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(12):1 367-1 377)
- [39] Li Pengcheng, Xu Qing, Xing Shuai, et al. Full-Waveform LiDAR Data Decomposition Method Based on Global Convergent LM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8):2 262-2 267(李鹏程, 徐青, 邢帅等. 全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法[J]. 红外与激光工程 2015, 44(8):2 262-2 267)
- [40] IHO S-44. IHO Standard for Hydrographic Surveys Special Publication No. 44 [S]. Monaco: the International Hydrographic Bureau, 2008
- [41] Applanix. POS /AV510 Specification Sheet [M].

- Canada: Applanix, 2007
- [42] Li Jianli, Fang Jiancheng, Kang Taizhong. RLG Position and Orientation System Used for Motion Compensation in Airborne InSAR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1 497-1 504(李建利, 房建成, 康泰钟. 机载 InSAR 运动补偿用激光陀螺位置姿态系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1 497-1 504)
- [43] Hong Haibin, Guo Hang, Teng Changsheng, et al. Method of Improving Solution Precision After GPS Outages by Using GPS/INS Tightly Coupled System [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(1): 14-17(洪海斌, 郭杭, 滕长胜, 等. GPS/INS 紧耦合系统提高 GPS 失锁后解算精度的方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(1): 14-17)
- [44] Liu Shuai, Sun Fuping, Li Haifeng, et al. Forward-Backward-Smoothing Algorithm with Application to Tightly Coupled PPP/INS Data Post-Processing [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(1): 85-91(刘帅, 孙付平, 李海峰, 等. 前后向平滑算法在精密单点定位/INS 紧组合数据后处理中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(1): 85-91)
- [45] Huang Weijun, Li Song. The Perfect Scanning Configurations of Laser-Based Airborne Hydrographic System [J]. *Laser Journal*, 2001, 22(6): 54-56 (黄卫军, 李松. 基于表面回波的机载激光测深系统的最佳扫描方案[J]. 激光杂志, 2001, 22(6): 54-56)
- [46] Ouyang Yongzhong, Huang Motao, Zhai Guojun, et al. On the Depth Reduction in Airborne Laser Hydrography [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, 23(1): 1-5(欧阳永忠, 黄谟涛, 翟国君, 等. 机载激光测深中的深度归算技术[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 1-5)
- [47] Huang Motao, Zhai Guojun, Xei Xijun. The Influence of Carrier's Attitude and the Position Reduction in Multibeam Echosounding and Airborne Laser Depth Sounding [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(1): 84-90 (黄谟涛, 翟国君, 谢锡君, 等. 多波束和机载激光测深位置归算及载体姿态影响研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(1): 84-90)
- [48] Huang Motao, Zhai Guojun, Ouyang Yongzhong, et al. Data Fusion Technique for Single Beam and Multibeam Echosoundings [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 299-303(黄谟涛, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 多波束与单波束测深数据的融合处理技术[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 299-303)
- [49] Lu Xiuping, Bian Shaofeng, Ye Xiusong, et al. Exterior Check Methods of Airborne Laser Bathymetric Precision [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(2): 1-3. (陆秀平, 边少锋, 叶修松, 等. 机载激光测深精度外部检核方法[J]. 海洋测绘, 2011, 31(2): 1-3)

Research Progress of Airborne Laser Bathymetry Technology

LIU Yanxiong^{1,2} GUO Kai¹ HE Xiufeng¹ XU Wenxue² FENG Yikai²

¹ School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

² The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

Abstract: An underwater topography survey is a basics part of marine science research, and the main task of hydrographic surveying and charting. The traditional underwater acoustics method that uses a survey boat as a carrier can have difficulties in coastal zones or shallow water. In recent years, the emergence and application of airborne laser bathymetry technology has made up for the technical defects of traditional underwater acoustics, providing a new method to solve the practical engineering problems. This paper introduces the basic principles and error sources in airborne laser bathymetry, and summarizes the current progress and developments. The advantages and problems of airborne laser bathymetry technology in the offshore shallow water areas are identified and analyzed for reference. This paper concludes with a discussion of developing trends in this technology.

Key words: airborne laser bathymetry; underwater topographic survey; shallow water; hydrographic surveying

First author: LIU Yanxiong, PhD, professor, specializes in the theory and application of GNSS, the sea and land integration measurement. E-mail: yxliu@fio. org. cn

Corresponding author: GUO Kai, PhD candidate. E-mail: gk45@fio. org. cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41401537; the Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. 2015P13.