

机载 LiDAR 在海岸带地形测量中的应用

毕世普^{1,2}, 别君³, 张勇^{1,2}

(1 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 3 中国海监北海航空支队, 青岛 266033)

摘要:介绍了机载 LiDAR 的工作原理、数据处理流程和在海岸带地形测量中的主要应用。其中近红外机载 LiDAR 在滩涂、孤立海岛以及其他恶劣环境地区可快速、准确地获取地表信息;而双波段机载 LiDAR 则可解决海岸带 5 m 水深线以浅的测量难题。

关键词:机载 LiDAR;海岸带调查;地形测量;数字地面模型

中图分类号: P237

文献标识码: A

海岸带是大陆和海洋之间的过渡带,兼受陆地和海洋两大动力系统的作用,自然生态环境脆弱多变。海岸带地形测量是保护、开发和管理海岸带的前提和基础,但由于海岸带的种种特殊性,其地形测量工作的开展面临着重重困难。首先,许多地方不具备施测条件,比如孤立或偏远的海岛、环境恶劣的大河三角洲,测量人员和仪器设备难以到达,测量工作难以有效开展;其次,在条件较为优越的沿海地区,由于近年来经济发展迅速,沿海一带的变化趋于频繁和显著,经济的发展与环境的多变也给海岸带的测量工作在效率方面提出了更高的要求。

传统航空摄影测量可以解决水面以上施测困难区的地形数据获取问题,但缺点在于数据处理的效率和准确度较差。更为突出的一个问题集中在水面以下、5 m 以浅的浅海地区,2~5 m 水深

区域可采用小型船只搭载多波束开展测量,但所获取的数据极其零星,最困难的 2 m 以浅的水深区几乎为测量空白区域,而此类浅海在我国从北至南呈带状分布,且分布面积广泛,如我国环渤海区域,大部分岸滩的坡度都很小,其中黄河入海处的水上及水下三角洲的平均坡度仅为 0.5°,5 m 以浅的浅海可宽至 10 多千米,苏北辐射沙洲 5 m 以浅的海滩宽达 15 km。因此,迫切需要新的技术手段和设备来改善这一现状。

近年来,机载 LiDAR 技术在我国受到越来越多的关注。其中近红外机载 LiDAR 技术已在国内得到了多方面的成功应用,利用该技术开发水面以上的海岸带地形测量,可大幅度提高测量的效率和准确度,缓解海岸带快速发展的需求与技术手段跟不上的矛盾。而双波段机载 LiDAR 的蓝绿激光可以穿透水体,快速探测水下地形,是实现浅海地形测量、弥补浅海地形数据空白的一种有效手段,在我国尚待普及发展。

1 机载 LiDAR 技术概述

机载 LiDAR (Light/Laser Detection and Ranging), 又称机载雷达, 是激光探测及测距系

收稿日期:2012-09-11

基金项目:1:25 万青岛幅海洋区域地质调查(试点)(GZH200900501);沿海经济带多目标区域地球化学系列图件编制(1210820508);国土资源部油气资源和环境地质重点实验室开放基金资助(MRE201108)

作者简介:毕世普(1979—),男,助理研究员,主要从事 GIS 与遥感应用研究工作。E-mail:bishipu@126.com

统的简称。机载 LiDAR 技术是利用返回的激光脉冲获取探测目标高分辨率的距离、坡度、粗糙度和反射率等信息,无需大量地面控制点即可快速、准确的获取地表信息,是极具潜力的海岸带地形测量手段。

1.1 系统组成

机载 LiDAR 系统是激光测距技术、计算机技术、高精度动态载体姿态测量技术和高精度动态 GPS 差分定位技术迅速发展的集中体现^[1]。

系统主要由飞机平台、激光扫描仪、定位与惯性测量单元以及中心控制单元 4 个部分组成。其中飞行平台可以是固定翼飞机或直升飞机,定位与惯性测量单元由 GPS(Global Positioning System)和 IMU(Inertial Measurement Unit)组成,中心控制单元由同步、记录和控制 3 部分组成,其

核心是保持系统同步^[2]。

此外,机载 LiDAR 系统还可与其他技术手段集成使用,一方面增加数据源,提高对探测目标的识别能力,另一方面可对激光点云数据的处理结果进行质量评价。当前比较成熟的几种商业系统多将高分辨率的数码相机集成到 LiDAR 系统中,比如美国 Leica 公司的 ALS70、加拿大 Optech 公司的 ALTM 等系统。

1.2 数据组成及数据处理流程

加入了数码相机的 LiDAR 系统在数据获取时总共有 3 部分数据组成^[3]:①原始定位定向数据:来自机载 GPS 及 IMU;②原始激光数据:来自激光扫描仪;③原始数字相片数据:来自数码相机。机载 LiDAR 数据处理流程(图 1)如下:

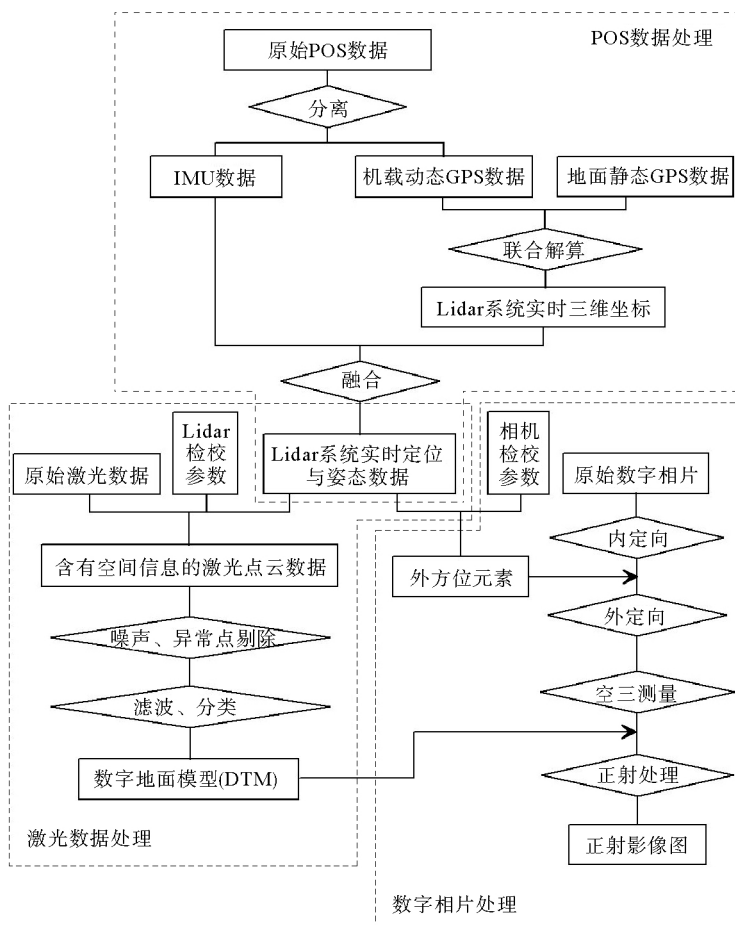


图 1 LiDAR 数据处理流程

Fig. 1 Flow chart for LiDAR data processing

(1)数据预处理 机载 LiDAR 系统数据预处理的目的在于给原始激光数据以及原始数字相片数据添加上地理信息,预处理过程主要包括定位定向数据处理过程及加载地理定位信息的过程。

定位定向数据处理分为 3 步:首先进行数据分离,其主要目的在于分离出 GPS 数据和 IMU 数据;其次进行 GPS 差分解算,将地面基站 GPS 数据与机载 GPS 数据进行动态差分,重采样得到离散的机载 GPS 定位数据;最后将差分解算后的机载 GPS 数据与 IMU 数据进行融合。得到的结果一方面提供给激光数据计算各测点的 (X, Y, Z) 三维坐标,另一方面提供给数字相片,确定每张相片的外方位元素。

(2)数据后处理 包括激光数据处理和数字相片处理 2 部分。

激光数据处理:经过预处理后的激光数据带有三维空间信息,表现为大量悬浮在空中的没有属性的离散的点阵数据,通常称之为“点云”。一般的激光点云数据都具有高程信息、强度信息、回波信息等,根据这些信息可开展多方面工作,比如地形信息提取、林木信息提取、建筑物三维重建等。在提取海岸带地形信息时,主要处理过程包括:① 噪声和异常值剔除;② 激光数据滤波、分类;③ 输出用于建立地面模型的点云数据,生成数字地面模型(DTM)。

数字相片的处理主要是正射、拼接,对数字相片进行内定向、外定向处理以及空间三角测量,并结合 DTM 生成正射影像图。

2 近红外机载 LiDAR 应用于陆地地形探测

2.1 探测原理

用于探测陆地地形的机载 LiDAR 系统向地面发射近红外波段的激光脉冲,其工作示意图(图 2)如下。

机载 GPS 按设定频率记录系统的空间坐标,后期通过与地面架设的 GPS 数据差分解算得到激光扫描仪中心坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ;IMU 连续记录系统在飞行过程中的 3 个姿态角 $(\omega, \varphi, \kappa)$;激光扫描仪发射激光脉冲,并利用返回的激光脉冲

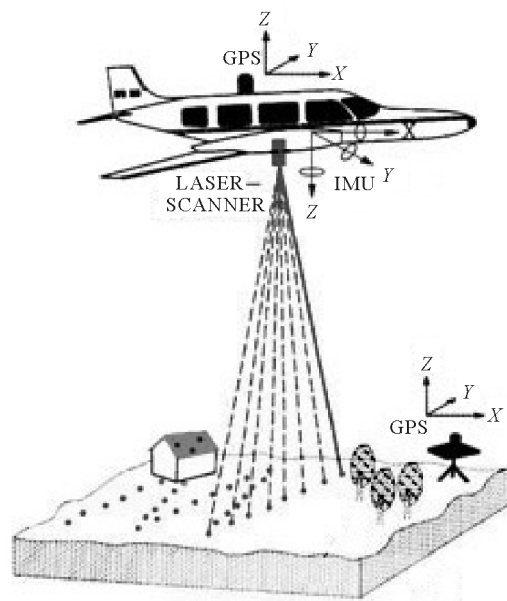


图 2 机载 LiDAR 系统工作示意图(据文献[4])

Fig. 2 Working principle of the airborne LiDAR system
(from reference [4])

获取激光扫描仪中心与被探测目标间的距离 D 。利用这些即可计算出打在被探测目标上的相应激光点 (X, Y, Z) 的空间坐标为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D \end{bmatrix}$$

经过计算之后的激光雷达点云数据分布在不同的目标上(图 3),激光点主要分为 3 大类:噪声点、落在地形表面上的点(即地面点)、落在非地形表面上的点(即地表覆盖物,例如图 3 中落在汽车上、植被上以及落在房屋上的点)。机载 LiDAR 除利用返回的激光脉冲记录被探测目标的高程信息之外,还记录探测目标高分辨率的激光回波信息和反射率信息等。



图 3 激光探测地面点分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the distribution of laser detecting ground points

2.2 突出优点及专业应用

与传统的通过立体相对来采集地形点的技术相比,近红外机载 LiDAR 技术探测海岸带地形的一个突出优点在于获取数据时无需大量的地面控制点。这个优点在很大程度上减轻了地面工作量,尤其对孤立海岛及环境恶劣的地区进行调查时,在保证 GPS 测量精度的前提下,无需登岛或身临其境,即可获得高质量的测量数据,便利之处更得以彰显。对于滩涂等地面特征不明显的区域,控制点难找,而利用 LiDAR 技术正好可以回避这个问题,将大大提高此类地区地形测量工作的效率和准确度。

机载 LiDAR 数据还可进一步应用于海岸带地区的地形分析,包括:

(1)生成基于高分辨率的数字正射影像图,可根据实际需要十分便利的提取矢量信息,制作专题要素图件。

(2)在由 LiDAR 数据获取了数字地面模型(DTM)之后,可在其基础上进一步进行等高线的

提取,海岸、岛礁地形坡度的计算等工作。

(3)将 DTM 与数字正射影像图叠加,还可逼真的模拟数据获取区域的三维场景,方便用户从不同角度、不同高度获取对兴趣区域的感官信息。

3 双波段机载 LiDAR 应用于水下地形探测

3.1 探测原理

用于探测水下地形的机载 LiDAR 系统向水体发射 2 个波长的激光脉冲:近红外激光和蓝绿波段激光,近红外波段激光探测水面,蓝绿波段激光探测海底,从而获得被测点的水深值。该技术基于海水中存在一个类似于大气的探测窗口,即海水对 $0.47 \sim 0.58 \mu\text{m}$ 之间波长范围内的蓝绿光的衰减系数最小^[5],蓝绿波段的激光在通过海水时,不仅穿透能力强,而且方向性极好。水下地形探测如图 4 所示。

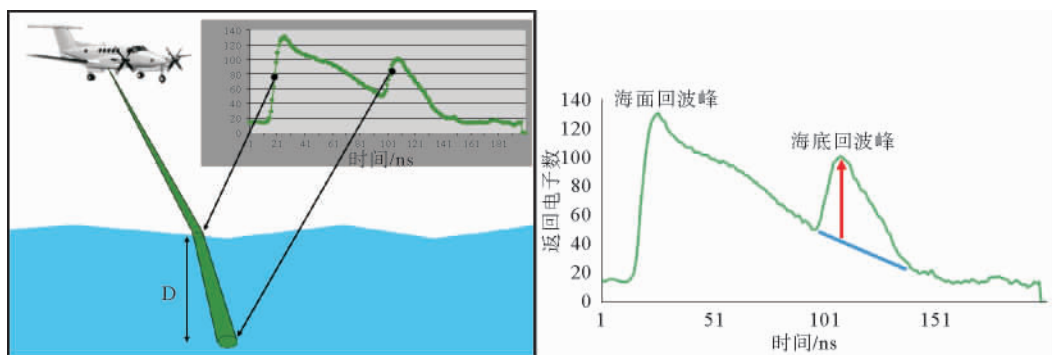


图 4 水下探测激光回波波形

Fig. 4 Echo waveform diagram of underwater detection laser

3.2 优缺点分析

双波段机载 LiDAR 的优点主要表现在 2 个方面:

(1)可以高效的获得由陆上到水下完整统一的滩涂测量数据。在以往的海岸带地形测量中,陆地部分的测量有多种方式可选,水下一般采用船测声纳进行,水上水下 2 部分由于测量方式的差异,只能分别进行,造成数据格式、数据分辨率、

定位精度、数据基准等多方面的差异,且尽管陆地部分尽量选在低潮时开展,水下部分尽量选在高潮时开展,但由于船测对水深的限制,两部分数据很难实现无缝衔接。无法衔接的空白区域地形通常采用推估模式计算得出,实际上水陆交互处的地形特征与陆地和深海不同,采用这种推估的方式存在很大的误差。

利用双波段机载 LiDAR 开展海岸带地形测量,近红外激光获取陆地及水面高程,蓝绿激光探

测水底。水面以上部分的数据获取和近红外机载 LiDAR 相同;对于水下地形的测量,机载 LiDAR 技术与船测声纳在数据采集形式上是类似的,但效率高出许多。

(2)可以解决海岸带 5 m 水深线以浅的测量难题。海岸滩涂及浅海地区(5 m 以浅)是海洋测量的难点区域,如今的方法是水面以上的滩涂部分采用近红外的激光测距采集数据,2~5 m 水深区域采用小型船只搭载多波束开展测量,效率极低,2 m 以浅则基本无法进行测量。双波段激光雷达具备探测陆地和浅水地形的双重功能,采用该设备进行海岸滩涂及浅海地形测量,可解决 2 m 以浅无法施测的难题,也提高了 2~5 m 甚至更深区域的测量效率,且所获取的数据完整一致,省却了将多手段获取的数据进行再整合的工序。

机载 LiDAR 双波段相比近红外激光也有一些缺点:由于水体的散射厉害,为使激光到达水底并返回,这就要求激光器具有很高的发射功率,因此造成了双波长机载 LiDAR 的发射频率较近红外机载 LiDAR 要低很多。因此,双波段测量精度低于近红外,在相同工作高度上,利用双波段机载 LiDAR 所获取的激光点密度要远不及近红外机载 LiDAR。

3.3 双波段机载 LiDAR 在海岸带方面的主要应用

(1)海岸侵蚀监测 海岸侵蚀是威胁岸滩稳定性的一个重要因素,利用双波段机载 LiDAR 获取海岸、河口及水下一定范围内的高分辨率地形数据,可实现对海岸及河口区域岸上部分和水下部分的整体侵蚀淤积的监视监测,并有助于研究水下泥沙的运移等特征。

(2)海陆坐标体系的联系与统一 陆地数据和海洋数据的坐标体系是不一致的,利用双波段机载 LiDAR 同时获取陆上及水下地形数据,将陆地的高程与平面体系延伸至浅海,与海洋数据形成交集,可建立更为精细的海陆体系转换联系。

(3)风暴潮预警与数值模拟 风暴潮灾害的形成与成灾范围受浪、潮、风、地形等多方面因素

影响,不同地形特点区域的承灾能力各异,利用双波段机载 LiDAR 获取风暴潮多发区域的陆上及水下一定范围内的地形数据,一方面为风暴潮灾害预警与数值模拟提供底质模型,一方面可用于灾害区域的承灾风险等级评估,为制定防灾减灾方案提供支持服务。

4 结论与展望

机载 LiDAR 技术是极具潜力的海岸带调查手段,利用该手段所获取的数据结果具有高精度,能够满足 1:10 000 甚至更大比例尺的成图精度要求;与传统手段相比,机载 LiDAR 技术在海岛海岸带,尤其在滩涂、孤立海岛以及其他环境恶劣地区的调查中展现出了极大的优越性。

尽管如此,LiDAR 技术作为一种新兴的航空遥感技术仍存在着许多局限性;如数据种类不够丰富、激光脉冲的重复频率有待提高、增加地面采样点的密集度等。如今近红外 LiDAR 的发展方向是实现高密度的激光点云;双波段 LiDAR 由于发射频率较低,发射功率高,水体的散射问题是一个瓶颈,其发展方向是解决激光的穿透力问题。相信随着机载激光雷达技术的逐步完善,机载 LiDAR 在海岛海岸带调查以及其他领域将发挥出更大的作用。

参考文献:

- [1] 刘经南,张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(2):132-137.
- [2] 吴华意,宋爱红,李新科. 机载激光雷达系统的应用与数据后处理技术[J]. 测量与空间地理信息,2006,29(3):58-63.
- [3] 罗志清,张惠荣,吴强,等. 机载 LiDAR 技术[J]. 信息技术,2006(2):20-25.
- [4] BC-CARMS. LiDAR-overview of technology, applications, market features & industry [R]. Victoria: Centre for Applied Remote Sensing, Modeling and Simulation, University of Victoria, 2007.
- [5] 昌彦君,朱光喜,彭复员,等. 机载激光海洋测深技术综述[J]. 海洋科学,2002,26(5):34-36.

APPLICATION OF AIRBORNE LIDAR TO COASTIAL TOPOGRAPHIC SURVEY

BI Shipu^{1,2}, BIE Jun³, ZHANG Yong^{1,2}

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology,
Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3 North Sea Branch, SOA, Qingdao 266033, China)

Abstract: The near infrared airborne LiDAR can quickly and accurately obtain earth's surface information in beaches, isolated islands and other abominable environments; and the double wave band airborne LiDAR can measure the topographic features in a coastal zone less than 5 meters in water depth. Working principles, data processing procedures and the application of airborne LiDAR to topographic survey in coastal zones are discussed in this paper.

Key words: airborne LiDAR; coastal survey; topographic survey; DTM

~~~~~  
(上接第 42 页)

## HEAVY METAL DISTRIBUTION PATTERNS IN CHINESE COASTAL SEDIMENTS AND ENVIRONMENT QUALITY ASSESSMENT

ZHANG Yong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xianrong<sup>1,2</sup>, BI Shipu<sup>1,2</sup>,

LIU Shanshan<sup>1,2,3</sup>, LIN Manman<sup>1,2,3</sup>

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

3 Shijiazhuang University Of Economics, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** Geochemical data of heavy metal, such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, from 6 094 stations of Chinese coastal surface sediments and 1 495 stations of deep sea sediments were collected for environmental quality assessment. The data were processed with multivariate statistics and other mathematical methods in order to better reveal the distribution pattern of heavy metal elements. Following the quality criteria of marine sediments setting up by the GB18668—2002, a comprehensive index method was adopted to evaluate the ecological vulnerability of heavy minerals in the coastal sediments. Results suggest that the clean areas for 79%, slightly polluted areas for 14%, and heavily polluted areas for 7% in China's coastal waters. The heavily polluted areas are located near Huludao, Liaoning Province and the Pearl River estuary, the slightly polluted area is near the Yangtze River estuary. Pollutants are mainly from human activities.

**Key words:** sediments; heavy metals; ecological assessment