

文章编号: 0258-7025(2006)09-1163-05

新型机载激光测深系统及其飞行实验结果

胡善江, 贺岩, 臧华国, 崔雪梅, 朱小磊, 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 新研制的机载激光测深系统与第一代机载激光测深系统相比,在探测信号采集率、浅水测量能力、测点定位精度和系统的自动化方面都有较大的提高。新系统采用1000 Hz激光器以提高测量密度,分设深水浅水双通道接收回波信号以提高浅水探测能力,装配高精度的惯性导航系统(IMU)和全球定位系统(GPS)提高了测点的定位精度和深度精度,数据后处理进行了潮汐改正和波浪改正提高深度测量的精度。系统在某海域进行了多次飞行实验,实验数据经过分析和处理,得到了比较满意的结果,表明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。

关键词 激光技术;机载激光测深;海底数值高程;海浪波高;浅水测量;测量密度

中图分类号 TN 959.73;TN 249 **文献标识码** A

A New Airborne Laser Bathymetry System and Survey Result

HU Shan-jiang, HE Yan, ZANG Hua-guo, CUI Xue-mei, ZHU Xiao-lei, CHEN Wei-biao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new airborne laser bathymetry system is developed. Compared with the previous one, the new system is improved in data-acquisition rate, accuracy of measuring point position, ability of shallower water detecting and automatic operating. 1000 Hz laser is used to improve density of points grid, backward signals are separated into two channels of deep water and shallow water to enhance the ability of detecting signal from shallow water, high accuracy inertial measurement unit (IMU) and global positioning system (GPS) are equipped to improve the measuring point accuracy of orientation and depth. In addition, tide correcting and wave correcting are applied to improve the depth accuracy in data processing. The new system has been tested several times over a sea. The obtained results show that the new system can be practical in ocean survey with good depth accuracy and efficiency.

Key words laser technique; airborne laser bathymetry; digital elevation model of depth; sea wave height; shallow water measurement; density of measurement

1 引言

机载激光测深系统是利用激光测距技术获取水深信息的主动遥测装置,系统集激光发射、微弱信号光电探测、动态全球定位系统定位、飞机姿态校正以及实时信号采集和处理等技术于一体,主要应用于海岸带水下地形的测量^[1]。

20世纪70年代以来,世界各临海大国投入大量人力、物力发展机载激光海水测量系统,国外最具

代表性的机载激光测深系统是美国的 SHOALS 系统^[2]、澳大利亚的 LADS 系统、加拿大的 LARSEN 系统和瑞典的 HAWKEYE 系统^[3];我国的研究从20世纪80年代末期开始,主要的研究单位有华中理工大学^[4]和中国科学院上海光学精密机械研究所。中国科学院上海光学精密机械研究所于2002年研制成功第一代机载激光测深系统^[5],并进行了机载航测实验,获得较好的实验结果。于2002年开

收稿日期:2006-01-10;收到修改稿日期:2006-03-06

基金项目:国家863计划(2001AA613010)资助项目。

作者简介:胡善江(1981—),男,河南信阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事机载激光测深数据分析处理方面的研究。E-mail:hushanjiang@sohu.com

导师简介:陈卫标(1969—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事激光遥感、遥测、激光雷达方面的研究工作。E-mail:wbchen@mail.shcnc.ac.cn

始研制的新型机载激光测深系统 LADM-II，和第一代系统相比，在指标、性能和实用性上都有很大的提高，机载航测实验结果显示，该系统的测量精度、数据密集度等有了显著提高。

2 系统装置

新型机载激光测深系统主要分为机上和机下两部分：机上部分包括激光发射系统、信号接收采集系统、数据存储系统、扫描系统、姿态定位系统和综合

控制系统；机下部分包括数据后处理系统和成图系统(如图 1 所示)。

激光发射系统提供 532 nm 和 1064 nm 的双波长激光同时分别探测海底和海面；信号接收采集系统对返回的激光信号进行光电转换和信号采集数字化；数据存储系统存储海量的存储数据；扫描系统通过旋转反射镜改变光束的天顶角以实现扫描测量；姿态定位系统提供飞机的姿态和位置信息；综合控制系统进行测量的各种自动控制。但是也有以下重要的改进。

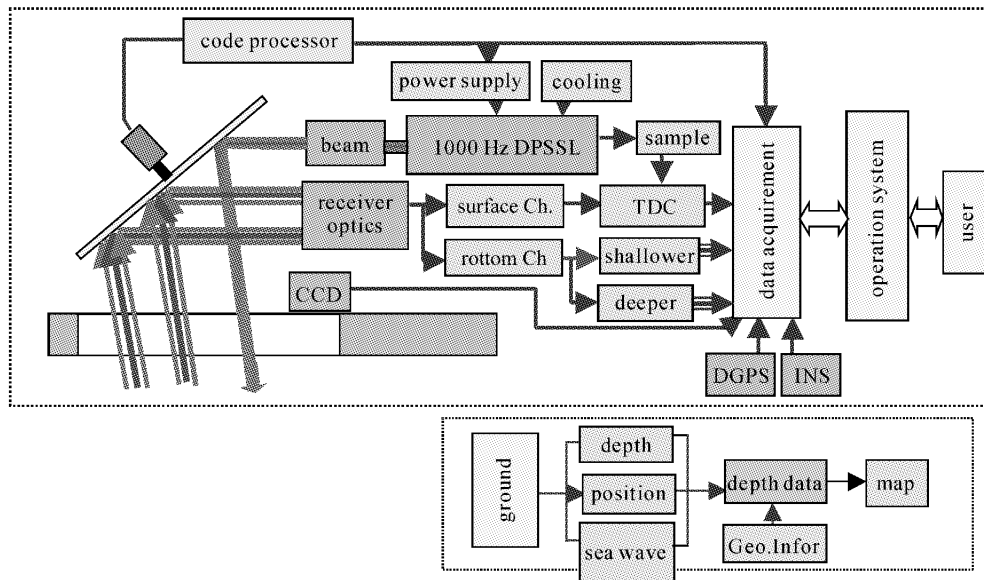


图 1 新型机载激光测深系统原理图

Fig. 1 Block diagram of developed airborne laser bathymetry

2.1 激光器性能

在激光脉冲峰值功率不变的情况下，将激光工作重复频率由第一代的 200 Hz 提高到 1000 Hz。实际探测中，海面的测点分布越密，分辨率越高，就可以获得更详细的海底地貌。随着新系统激光器工作频率的提高，使系统的扫描效率提高了 4 倍多，具备实现快速大范围机载测量能力。如果适当地降低飞行速度，可以进一步提高测点的密度，从而可以探测到更小的岛礁，获得更详细的海图。

2.2 信号采集通道

新系统将浅海通道和深海通道信号分离，独立测量。这是因为在实际测量过程中，激光的水体散射信号具有很大的动态范围，浅海和深海的散射能力相差很大，而电子学上很难实现对这么大的动态范围信号兼顾测量，难以兼顾深海和浅海的信号。新系统浅海通道只对水深小于 10 m 水域的海底信

号进行测量，而深海通道则可以更加于专注对深水信号的测量，从而提高系统的最大测深能力。

2.3 光学接收系统

设计结构为更紧凑的反射式卡塞格伦望远镜，增大望远镜口径，将旁轴光路改为同轴光路。由于测量时采用的飞机是直升机，机舱的空间比较小，通过改变望远镜的结构，可以减少系统的整体体积，同时结构紧凑的望远镜在安装调试和实用化上有更大的优势。尽管信号通道的分离会造成一定的信号损失，但通过增大望远镜的口径，可以提高信号的接收能力；测带边缘测点的光束天顶角比较大，增大的口径就很利于对这部分信号的接收。采用同轴光路望远镜系统的好处还在于其视场角和激光的发射视场角不会受到航高和水深的影响。

2.4 同步控制

采用自适应延时触发数据采集系统取代固定延

时法触发数据采集技术。其具体实现是利用红外光通过 TDC 实时测量飞机到海面的高度,利用这个高度控制下一次延时的长短。由于飞机的航高毕竟是连续变化的,上一次的航高决定的延时是可以满足需要的。这种自适应的延时方式非常有利于根据具体的海面状况来调整飞机的航高从而调整测点的分布。

2.5 数据采集

A/D 卡由单通道 500 M 采样率升级到双通道 1 GHz,双通道可以同时双通道的信号进行测量;1 GHz 的采样率将采样间隔由 2 ns 减少到 1 ns,提高了对信号的分辨率从而提高了测深的精度。

2.6 姿态定位系统

新系统集成成了高精度的惯性导航系统(IMU)和差分全球定位系统(DGPS)进行姿态的测定和坐标定位。由于飞机定位精度和飞机姿态精度的提高,确保了对测点的水平定位精度和波浪改正精度的改善。

3 飞行实验及实验结果

用新型机载激光测深系统在中国某海域进行了初次飞行实验,飞行实验包括 5 架次 21 条航线,每条航线的长度接近 20 km。整个系统在全部飞行实验中工作稳定,获得了大量的数据。通过对实验数据的统计和处理,获得了可靠的测绘数据。

3.1 激光信号回波率良好

本次实验红外信号的回波率在 85% 以上,绿光信号回波率为 98%。由于该系统红外光和绿光信号同轴扫描到测点,红外信号在海表面反射比较强,但红外信号是用来测定航高和进行波浪改正的,15% 的红外信号丢失不会对波浪改正产生很大的影响^[6];而绿光信号回波率明显高于第一代系统的 78%。

回波率数据显示,1000 Hz 激光器在重复率大幅上升的情况下能量依然达到系统的要求,重新设计的光学接收系统也工作良好。

此外,数据处理后测点的位置数据表明,测点的密度可以达到 3 m × 3 m,第一代系统的测点密度为 10 m × 10 m,实验时飞机型号和速度都一样。1000 Hz 重复率较大地提高了测点的密度。图 2 为一条航线上激光扫描点的轨迹图。

3.2 浅海探测能力提升

改进的双通道测深设计,浅海通道的测量范围

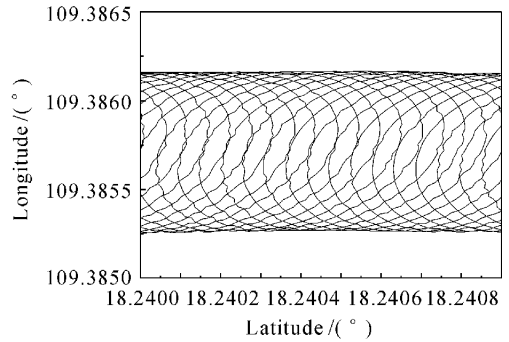


图 2 海表面激光扫描点的位置信息

Fig. 2 Position of scanning laser point on sea surface

为小于 10 m 的深度,深海通道为大于 6 m 的深度。飞行实验首次成功地实现了 0.8 m 的最浅可探测能力,比第一代系统的 2 m 有大幅度提高。

图 3 为一浅海回波波形,测点所在的海底深度小于 1 m,由浅水通道给出,而此时的深水通道由于距离选通隔离没有海底信号;图 4 为两个通道同时获得海底回波,测点位置在两个通道的测量范围交叉的地方,两个通道的海底回波都比较明显,图中信

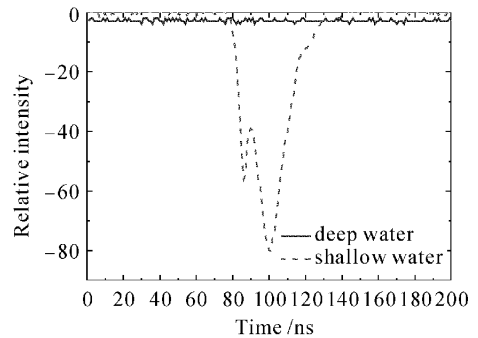


图 3 浅水测量能力(最浅深度 0.8 m)

Fig. 3 Shallow water measurement by first channel (the minimum depth is about 0.8 m)

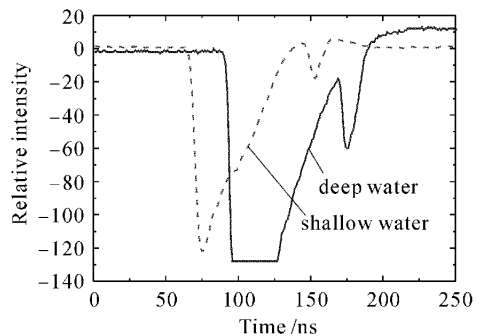


图 4 双通道同时测量到的海底波长 (水下距离约为 8 m)

Fig. 4 Backward wave for both measurements of two channel (the range is about 8 m)

号峰所在位置不一致是由于两个通道探测器的时延不同,在数据处理的时候进行修正即可。

3.3 新的全球定位系统/惯性导航系统实现测点定位精度和深度精度的提高

新系统装配了 APPLANiX 公司的 POS AV™ 310,由一个全球定位系统单元和一个惯性导航系统单元组成。全球定位系统定位精度由第一代系统的 4~6 m 提高到现在的 0.5~0.2 m,但由于远离地面基站,实际精度为 2 m。

第一代系统的姿态由电子罗盘提供,精度为 1°,新的惯性导航系统精度为 0.1°。出射光束以 15°~11° 的天顶角进行扫描,飞机的姿态变换必然会影 响天顶角的大小,由图 5 可以看出,在进行测点的坐标转换和水深的计算时,这个角度精度对计算结果有很大的影响。

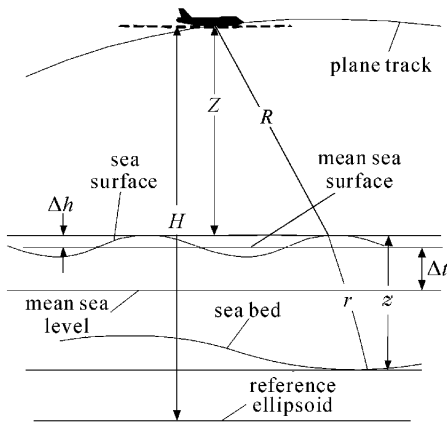


图 5 机载激光测深系统几何关系示意图

Fig. 5 Position relationship of airborne laser bathymetry

在第一代系统的姿态精度为 1° 情况下,飞机的航高为 500 m 时,水平坐标定位精度为 9.3~9.0 m;水上光束的斜程为 500 m (航高为 480 m 左右)时,垂直高度精度为 2.18~1.59 m;水下光束的斜程为 50 m 的情况下(水深约 48 m),垂直水深的精度为 0.218~0.159 m。

在第二代系统的姿态精度为 0.1° 情况下,飞机的航高为 500 m 时,水平坐标定位精度为 0.93~0.90 m;水上光束的斜程为 500 m (航高为 480 m 左右)时,垂直高度精度为 0.23~0.17 m;水下光束的斜程为 50 m 的情况下(水深约 48 m),垂直水深的精度为 0.023~0.017 m。

飞机的航高一般在 150~500 m 之间,定位精度和姿态精度对计算结果的影响也会有相应的变化。

定位精度和姿态精度的提高,必然提高测点水平定位精度和深度测量精度。本次实验得到的水平定位精度为 2 m,第一代系统为 5 m。

3.4 数据处理中新增加的波浪改正可以提高水深精度的精度

系统增加的同时参与扫描的红外激光可以返回每个测点所在的瞬时斜程,从而可以进行波浪改正。

图 5 为激光测深的几何关系图,Z 为飞机到海面测点的垂直高度,R 为飞机到海面测点的斜程,H 为飞机到椭球大地参考面的高度,z 为海面测点到海底的垂直高度,r 为海面测点到海底的斜程,Δh 为波浪高度,Δt 为潮汐。从图中可以看出,波浪和潮汐的存在会影响测量到的水深的精度,所以必须进行潮汐和波浪改正。潮汐改正通过飞行实验时的临时验潮站的记录数据来改正,波浪改正则很复杂,需要利用海面红外信号结合惯性导航系统输出的飞机加速度信息计算得到飞机的航高变化量,再通过求去掉飞机航高变化后的系统到海面的瞬时高度的平均值来获得平均海面从而得到波浪的信息^[6],再从水深数据中改正掉这个波浪信息,这样就可以获得高精度的水深信息。图 6 为最终获得的波浪高度。

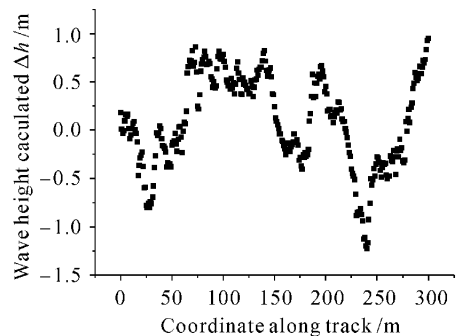


图 6 计算出的波浪高度

Fig. 6 Obtained height of sea wave

3.5 飞行测绘结果与船载声纳数据的对比

图 7 为飞行测绘获得的其中一段海底的三维数字高程,并与同海域船载声纳的测量数据进行比较。

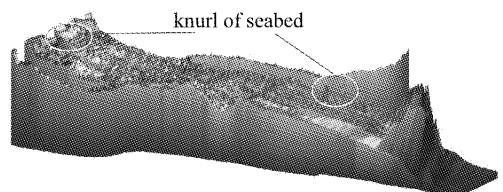


图 7 新的机载激光测深系统获得的海底变化

Fig. 7 Sea depth topography measured by the new airborne laser bathymetry

选取机载激光测深和船载声纳的测量数据2.5万个，其中误差为0.3432，标准差为0.2975 m。说明机载激光测深系统的测量精度已经达到海道测量 1 级标准。

4 结 论

飞行实验良好的工作状况和后续的数据处理的结果都表明，新设计的机载激光测深系统在测点密度、测深精度、测深范围和自动化方面都已接近实用化。

参 考 文 献

1 J. L. Irish, T. E. White. Coastal engineering applications of

high-resolution lidar bathymetry [J]. *Coastal Engineering*, 1998, **35**(1-2):47~71

2 W. J. Lillycrop, L. E. Parson, J. L. Irish. Development and operation of the SHOALS airborne lidar hydrographic survey system [C]. *SPIE*, 1996, **2964**:26~37

3 O. Steinvall, K. Koppari, U. Karlsson. Airborne laser depth sounding; system aspects and performance [C]. *SPIE*, 1994, **2258**:392~412

4 Zhu Xiao, Yang Kecheng, Li Zaiguang. The experiment of airborne laser bathymeter [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(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, **A25**(5):470~472

5 Chu Chunlin. Airborne laser remote sensing [C]. Proc. Eleven Provinces (Cities) Optics Sciences Conference, 2002. 112~114

褚春霖. 机载海洋激光遥感[C]. 2002 十一省(市)光学学术会议论文集, 2002. 112~114

6 R. W. L. Thomas, G. C. Guenther. Water surface detection strategy for an airborne laser bathymeter [C]. *SPIE*, 1990, **1302**:597~611



2006 第五届亚太激光研讨会征文通知

第五届亚太激光研讨会(APLS2006)定于2006年11月23~27日在广西桂林帝苑酒店举行。这是亚太地区激光领域最重要、最具影响的国际学术会议之一。亚太激光研讨会由中国光学学会、韩国光学学会和日本激光学会共同发起的系列国际会议，每两年召开一次，自1998年以来，已连续举办了四届。本届会议由中国科学院上海光学精密机械研究所主办。

大会主席：朱健强

共 主 席：周炳琨 In Won Lee (Korea) Shuji Sakabe (Japan)。

本次会议的主要议题包括：

- 高功率激光及其应用
- 飞秒激光和光纤激光
- 半导体激光
- 激光材料加工/激光测量/激光镀膜
- 激光等离子体/粒子相互作用与激光聚变能源
- 医学激光及其应用
- 激光光谱和非线性光学
- 衍射和微光学加工
- 高能辐射和激光加速
- 激光化学

论文摘要提交截止时间：2006年9月15日。

会议论文提交截止时间：2006年10月15日。

本届会议收录论文将由 *Chinese Optics Letters* 以增刊形式出版。

国内代表的论文请按照投稿要求，同样 Email 到会议秘书处：apls2006@siom. ac. cn；有关投稿、注册、会议安排等详细信息请查阅会议专用网站 <http://www.siom. ac. cn/apls2006>

联系人：林红香 电话：021-69918209 传真：021-69918006