

文章编号: 0258-7025(2004)01-0101-04

# 机载激光水深测量精度分析

陈卫标<sup>1</sup>, 陆雨田<sup>1</sup>, 褚春霖<sup>1</sup>, 翟国君<sup>2</sup>, 黄漠涛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 海军海洋测绘研究所, 天津 300061)

**摘要** 分析了机载激光水深测量系统中的深度反演方法,着重讨论波浪潮汐改正法和利用动态全球定位系统-相位模糊度解算技术(KGPS-OTF)所测参量进行归算的方法(无修正法)。综合分析影响机载激光测深精度的各项参量,并利用机载激光雷达的技术参数,定量估算了两种方法的水深提取精度。结果表明,波浪潮汐改正法的精度略高于无修正法,但是无修正方法更加简单明了,数据后处理的计算量也可大大减小。

**关键词** 海洋测绘;机载激光测深;波浪校正;动态全球定位系统-相位模糊度解算技术;测深精度;潮汐校正

中图分类号 P 229.1;TN 249 文献标识码 A

## Analyses of Depth Accuracy for Airborne Laser Bathymetry

CHEN Wei-biao<sup>1</sup>, LU Yu-tian<sup>1</sup>, CHU Chun-lin<sup>1</sup>, ZHAI Guo-jun<sup>2</sup>, HUANG Mo-tao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Ocean Mapping Institute of Navy, Tianjin 300061, China)

**Abstract** Depth retrieval method for airborne laser bathymetry is discussed. The corrected method using sea wave and tide and the non-corrected method using KGPS-OTF are introduced. The facts affecting the depth error in airborne laser bathymetry are analyzed. The depth retrieval errors of airborne laser bathymetry using the two methods are evaluated. The accuracy from the corrected method is little higher than that from the non-corrected method, while the non-corrected method is more simple and fast for data processing.

**Key words** ocean mapping; airborne laser bathymetry; correction of sea wave; KGPS-OTF; depth accuracy; correction of tide

## 1 引言

机载激光测深仪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、动态全球定位系统(DGPS)定位、飞机姿态测量以及信号处理、成图等技术于一体。主要应用于海岸带水下地形测量<sup>[1]</sup>。激光测深系统能否真正应用于沿岸带海底地形测图,取决于其测量精度。

通常通过测量瞬时水深信息和平均海平面高度,通过波浪改正和潮汐改正,可获得相对平均海平面的水深信息<sup>[2]</sup>。但是,在实际使用时,测量区域的潮汐控制范围是有限的,且在河流入海口等区域,潮汐经常快速变化。而这些会造成平均海平面的不正

确估计。最近,利用载波相位技术的动态全球定位系统(KGPS)和无初始化的相位模糊度解算技术(OTF),可以获得飞机相对 WGS-84 参考椭球面的高精度垂直位置信息<sup>[3]</sup>。美国的机载激光测深系统-SHOALS 开始改用 KGPS-OTF 相结合的技术进行深度提取方法<sup>[4]</sup>,这种方法无需精确测量平均海平面,无需进行波浪和潮汐改正。

根据这两种方法,在综合分析水深提取精度的过程中,充分考虑到平均海平面确定精度,激光测距精度、飞机姿态、扫描天顶角的定位精度以及激光水中脉冲展宽等对深度提取的影响,为正在研制的机载激光测深系统提供理论参考。

收稿日期:2002-08-15;收到修改稿日期:2002-10-15

基金项目:国家 863 项目(863-2001AA613010)资助课题。

作者简介:陈卫标(1969—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士,主要从事激光遥测研究。E-mail:wbchen@mail.shcnc.ac.cn

## 2 分析模型

机载激光测深系统的几何关系如图 1 所示,图中的符号定义为:  $A$ : 扫描天顶到参考椭球面的高度;  $B$ : 扫描天顶到海底的距离;  $C$ : 平均海平面到参考椭球面的高度;  $E$ : 海底到参考椭球面的高度;  $T$ : 大地水准面到参考椭球面的距离;  $H$ : 扫描天顶到平静海面的高度;  $H'$ : 扫描天顶到瞬时海面的高度;  $R$ : 扫描天顶到瞬时海面的斜距;  $r$ : 瞬时海面到海底的斜距;  $\theta$ : 空气中的扫描天顶角;  $\phi$ : 水中的扫描天顶角;  $h_s$ : 海面波高;  $h_t$ : 潮汐高度;  $D$ : 瞬时海面到海底的深度;  $D_t$ : 平均海面到海底的深度。

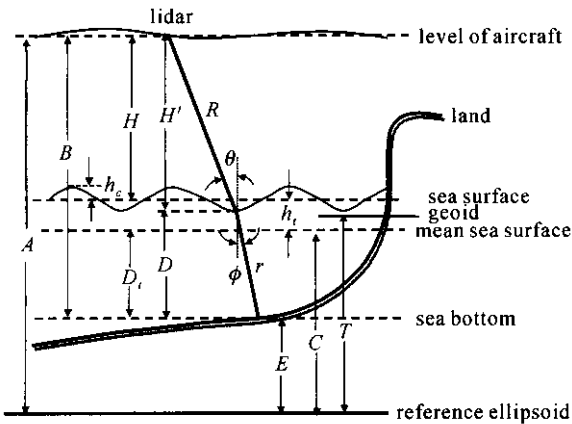


图 1 机载激光测深几何关系图

Fig. 1 Geometry of airborne laser bathymetry

传统方法通过测量  $R, r$ , 计算  $h_s, h_t, D_t$ , 而不用全球定位系统(GPS)的高度数据,称为波浪、潮汐修正法;KGPS-OTF 的方法通过测量  $A, R, r$ , 计算  $B, E$ , 然后利用大地水准面模型和海面模型计算平均海平面高度到参考椭球面的高度  $C$ , 这样海底到平均海平面的深度  $D_t = C - E$ , 称为无修正法。

### 2.1 波浪、潮汐修正法

根据图 1 的几何关系,平均海平面到海底的深度可以表示为

$$D_t = D + h_s - h_t = r \cos \phi + h_s - h_t \quad (1)$$

其中,瞬时海底  $D$  的测量精度,即  $r \cos \phi$  的精度可以表示为

$$(\sigma D)^2 = (\sigma r)^2 \cos^2 \phi + (\sigma \phi)^2 (r \sin \phi)^2 \quad (2)$$

式中,  $\sigma r$  为水下斜距测量精度,  $\sigma \phi$  为扫描折射角的测量精度。这样,总的水深标准偏差为几个参量的标准偏差累积和

$$\sigma D_t = \sqrt{(\sigma D)^2 + (\sigma h_s)^2 + (\sigma h_t)^2} \quad (3)$$

这里假设海面是平坦的,因此由海底倾斜引起

的深度误差不考虑。海面波高的估计根据文献[2]的理论模型,通过测量一段时间的扫描天顶到瞬时海面的斜距数据,消除飞机本身的垂直起伏(由垂直加速度计获得),然后根据几何关系获得的(4)式进行线性拟合,其交流项即为海浪波高信息。

$$R \cos \theta - \iint a_v du dv = H(t_0) + (t - t_0) \bar{H}(t_0) + \epsilon \cos \theta + \Delta - h_s \quad (4)$$

式中,  $t_0$  为某个观测时刻,  $H(t_0)$  为  $t_0$  时刻的高度,  $\bar{H}(t_0)$  为  $t_0 - t$  时刻的平均值,  $\epsilon$  为  $R$  的测量误差,  $\Delta$  为飞机垂直姿态的积分误差,  $h$  为波高数据。由图 1 可见,  $h_s = R \cos \theta - H$ , 波高的估计误差是  $R \cos \theta$  和  $H$  的标准偏差的累积和,而  $R \cos \theta$  的标准偏差包含斜距  $R$  和角度  $\theta$  的标准误差和,即  $R \cos \theta$  的误差可以表示为  $\sigma(R \cos \theta) = \sqrt{(\sigma R)^2 \cos^2 \theta + (\sigma \theta)^2 (R \sin \theta)^2}$ 。  $H$  的标准偏差可以从垂直加速度测量误差中估计,根据(4)式,在时刻  $T_0$  的前后  $j$  间隔内,垂直加速度积分的误差  $\sigma d = 0.55 \sigma a T \Delta T$ , 其中,  $\sigma a$  为姿态引起的总误差,  $\Delta T$  为采样间隔,  $T$  为平均时间。根据上述分析,波高的标准偏差可以表示为

$$\sigma h_s = \sqrt{[\sigma(R \cos \theta)]^2 + (\sigma a)^2 + (\sigma d)^2} \quad (5)$$

水中的激光回波信号由高速数字化仪采样,然后根据波形确定水表和海底的时间位置,水深是两者时间差计算获得的,因此水中斜距的精度也取决于海面到海底时间差的精度。水中斜距的测量误差与采用的具体算法有关,图 2(a)为典型的水中激光飞行时间间隔的确定方法。目前,在飞行时间间隔  $\Delta t$  的确定上,还存在一定分歧,关键在于取海表和海底上升沿的某一点,还是峰值所在位置。首先需要确定海表时间,海表波形具有最小的上升时间和高的信噪比(SNR)<sup>[5]</sup>,因而可以得到高的精度。但是海底回波脉冲的宽度取决于激光脉冲在水中的展宽情况,而激光脉冲的展宽与海水参数、扫描天顶角、接收视场角有关。这里取上升沿的一半作为时间阈值,来确定两者间的时间差  $\Delta t$ , 其精度取决于脉冲的上升时间。根据 Guenther 的估计,在扫描天顶角  $15^\circ \sim 20^\circ$  范围内,散射深度  $< 6$  时,传播导致的深度偏差小于  $5 \text{ cm}$ <sup>[6]</sup>。海水折射率的估计偏差也会造成水中斜距的精度误差,但是海水折射率可以通过观测海域的常年实测值估计获得,因此其造成的误差不在这里考虑。水中折射角  $\phi$  对  $r$  的误差也是很明显的,这取决于海面波高的斜率谱分布。图 2(b)表示折射角引起的误差。Steinvall 等估计了在海面风速  $10 \sim 12 \text{ m/s}$  (机载测深系统的最大海况)

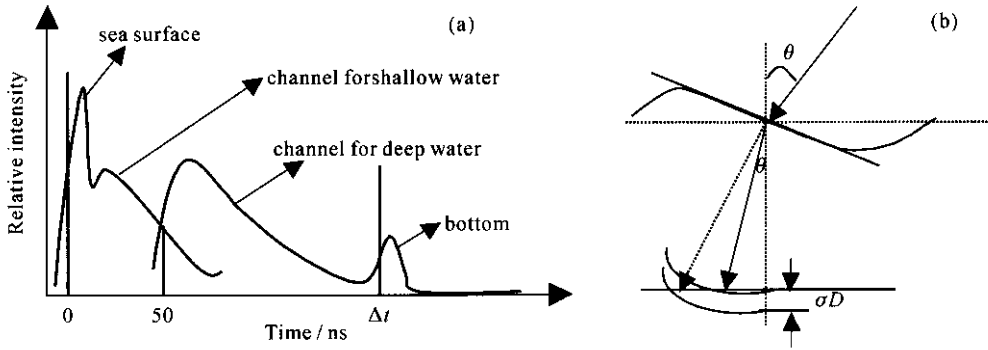


图 2 水中斜距确定方法 ( $r = c\Delta t/2n$ ) (a) 和海浪斜率造成的深度误差 (b)

Fig. 2 Diagram of retrieving range under water from waveform (a) and depth error due to sea wave (b)

时,如果没有波浪校准,由于海浪斜率造成的深度误差是水深的 1%~2% 间,但海浪改正后,引起的误差很小<sup>[7]</sup>。

空中的斜距测量采用时间间隔测量仪测定,因此其精度取决于计数器的量化误差、激光脉冲的有限上升时间引起的误差的积分和,两者的误差分别为

$$\sigma_1 = \frac{c}{4\sqrt{3}f_c}, \quad \sigma_2 = \frac{ct_{\text{rise}}}{4\sqrt{3}} \quad (6)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2$  分别为计数器的量化误差和有限上升时间误差, $f_c$  为计数频率, $t_{\text{rise}}$  为脉冲上升时间。

## 2.2 无修正法

根据图 1,在无修正法中,相对平均海平面的水深  $D_i = C - (A - B)$ ,同时三者是相互独立的,因此水深的误差可以看成各项误差的平方和,即

$$\sigma D_i = \sqrt{(\sigma A)^2 + (\sigma B)^2 + (\sigma C)^2} \quad (7)$$

式中, $B = H' + D = R\cos\theta + r\cos\phi$ ,因此  $B$  的标准偏差可以从  $R\cos\theta$  和  $r\cos\phi$  的标准偏差中得出,两者的误差可延用上节的结果。从(7)式看出,水深的误差与波浪和潮汐无关。平均海平面相对参考椭球面的高度是通过大地水准面高度与海面地形模型计算获得的,目前,利用卫星高度计技术,在我国近海获得的平均海平面的测量精度在 20~30 cm 范围内<sup>[8]</sup>;这种方法的另一误差源是飞机到参考椭球面的测量误差。

## 3 结果和讨论

作者正参与联合研制我国新一代机载激光测深系统,系统指标为:最大测深能力 50 m,测量精度 0.3 m,激光发射重复率 1000 Hz,飞行高度大于 250 m,海面测带宽度为飞行高度的一半。为此,采

用 1000 Hz 激光二极管抽运的、电光调 Q 的倍频 Nd:YAG 激光器为发射光源,绿光输出峰值功率达 2 MW,以满足最大深度和测点密度要求;在测量精度方面,空中测距采用 2 GHz 的计数器,海面和海底的激光回波由 1 GHz 的高速数字化仪采样。系统同时配备高精度的飞机姿态和定位测量装置,飞机的俯仰、偏航和滚动的姿态角实时测量精度优于  $0.03^\circ$ ,后处理的精度将高达  $0.008^\circ$ 。机载激光测深系统的精度验证是比较复杂的,国外采用在水库或者近海设置参考目标的方式<sup>[9]</sup>。而一般采用与单波束或多波束声纳进行比测的方法,而比测方法只针对结果,无法确定各个误差源,因此在系统研制前,对系统测量精度进行估算,可以有助于系统的设计。表 1 列出了与深度精度估算相关的系统参数,然后利用第 2 节的分析方法综合比较一下两种方法在深度提取中的精度。在估算过程中,海水的折射率取 1.34,最大深度假设为 50 m。

表 1 深度精度估算用的机载激光测深仪参数  
Table 1 Parameters of airborne laser bathymetry for evaluation of depth accuracy

|   |   |
|---|---|
| Resolution of time interval unit<br>(above water)     | 0.5 ns                                    |
| Resolution of digitizer<br>(under water)              | 1 ns                                      |
| Altitude of aircraft                                  | 300 m                                     |
| Nadir angle of scanner                                | $15^\circ$                                |
| Altitude accuracy due to<br>vertical accelerometer    | 0.1 m                                     |
| Sample rate and interval of<br>vertical accelerometer | 1/200 s, 10 s                             |
| Angle accuracy of attitude<br>of aircraft             | $0.03^\circ$                              |
| Error of tide-correction                              | 10 cm (model<br>of tide <sup>[10]</sup> ) |

首先估算一下海浪改正法中各项参数的测量误差,各个因素对精度的影响量列在表2中。可看出,50 m水深的最终误差在0.23 m,其中波浪引起的误差是主要的,而波浪误差因素中,飞机的姿态测量精度是主要误差项,因此如果提高飞机姿态测量精度,系统整体精度会更高。表中忽略了海浪斜率影响造成折射角变化引起的误差以及系统误差,因此实际误差会略大些,但是只要严格控制各个误差源,达到0.3 m的深度精度还是可行的。

表2 海浪校正法估算的水深精度

Table 2 Results of depth accuracy evaluated by method of sea wave correction

| $\sigma D$ / m |               | $\sigma h_s$ / m      |                 |            | $\sigma h_t$ / m | $\sigma D_t$ / m |
|----------------|---------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------|------------------|
| $\sigma r$     | $\sigma \phi$ | $\sigma(R\cos\theta)$ | $\sigma\alpha$  | $\sigma d$ |                  |                  |
| $\Delta r$     | $\epsilon^a$  | $\sigma R$            | $\sigma \theta$ |            |                  |                  |
| 0.11           | 0.05          | 0.14                  | 0.03°           |            |                  |                  |
| 0.12           |               | 0.14                  | 0.1             | 0.02       |                  |                  |
| 0.12           |               | 0.17                  |                 |            | 0.1              | 0.23             |

$a$ : error due to propagation-induced pulse stretching in the water.

表3 无修正法的估算结果

Table 3 Result obtained by non-correction method

| $\sigma B$ / m        |                    | $\sigma A$ / m | $\sigma C$ / m | $\sigma D_t$ / m |
|-----------------------|--------------------|----------------|----------------|------------------|
| $\sigma(R\cos\theta)$ | $\sigma(rcos\phi)$ |                |                |                  |
| 0.14                  | 0.12               | 0              |                |                  |
| 0.18                  |                    | 0.1            | 0.2            | 0.29             |

无修正法的估算结果见表3。根据目前选用的GPS精度,表中飞机到参考椭球面的精度设为0.1 m;根据我国南海平均海平面数学模型的结果,平均海面到参考椭球面的模型精度为0.2 m;另外参数B的误差主要是空中和水中的斜距测量精度,因此50 m水深对应的综合误差为0.29 m,略逊于海浪校正法的结果。

上述两种方法得到的深度精度基本一致,海浪潮汐修正法略高于无修正法,而无修正法更加简单明了,数据后处理的运算量也会大大减小。海浪潮

汐修正法需要在所测海域设定几个潮汐站提供同步潮汐数据,另外提高激光发射的重复频率,使得在拟合时间内的测量数据点更多,也有助于海浪信息的提取。KGPS-OTF方法的测量精度很大程度上取决于大地水准面到参考椭球面,以及海面地形与大地水准面的模型精度,因此如果在测量海域附近建立地面基准站,精确估算平均海平面到参考椭球面的高度精度,可以提高系统的整体精度。对远离海岸的海域,两种方法都会存在一定问题,海浪潮汐修正法无法获得准确的潮汐信息,而对无修正法而言,KGPS的精度将大幅度降低。

## 参 考 文 献

- J. L. Irish, T. E. White. Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry [J]. *Coastal Engineering*, 1998, **35**(1~2):47~71
- R. W. L. Thomas, G. C. Guenther. Water surface detection strategy for an airborne laser bathymeter [C]. *SPIE*, 1990, **1302**:597~611
- W. B. Krabill, C. F. Martin. Aircraft positioning using global positioning system carrier phase data [C]. *Navigaton: J. Inst. of Navigation*, 1987, **34**:1~21
- G. C. Guenther, M. W. Brooks, P. E. LaRocque. New capabilities of the "SHOALS" airborne lidar bathymeter [J]. *Remt. Sens. of Environ.*, 2000, **73**:247~255
- G. C. Guenther, R. W. L. Thomas, P. E. LaRocque. Design considerations for achivving high accuracy with the SHOALS bathymetric lidar system [C]. *SPIE*, 1996, **2964**:54~71
- G. C. Guenther, R. W. L. Thomas. Effects of propagation-induced pulse stretching in airborne laser hydrography [C]. *SPIE*, 1984, **489**:287~296
- O. Steinvall, K. Koppari, U. Karlsson. Airborne laser depth sounding; system aspects and performance [C]. *SPIE*, 1994, **2258**:392~412
- Wang Haiyin, Wang Gangyun. Mean sea surface determination from Geosat/ERM altimeter data in the China sea and its vicinity [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, **25**(1):25~30  
王海瑛,王广运. 利用 Geosat/ERM 卫星测高数据计算中国近海海平面[J]. *测绘学报*, 1996, **25**(1):25~30
- O. Steinvall, K. Koppari, U. Lejdebriink *et al.*. Depth sounding lidar-performance and models [C]. *SPIE*, 1996, **2748**:18~38
- Zhai Guojun, Huang Motao, Xie Xujun *et al.*. Theory and Method of Satellite Altimeter Data Processing [M]. Beijing: Press of Geodesy Cartography, 2000  
翟国君,黄谟涛,谢锡君等. 卫星测高数据处理的理论与方法[M]. 北京:测绘出版社, 2000