

# 机载激光测深中的波浪改正技术

黄谟涛<sup>1</sup> 翟国君<sup>1</sup> 欧阳永忠<sup>1</sup> 陆秀平<sup>1</sup>

(1 天津海洋测绘研究所, 天津市友谊路 40 号, 300061)

**摘要:** 基于我国新研制的机载激光测深系统基本配置, 提出了 3 种可供选择的波浪改正计算方案(也称为深度值归算方案), 具体分析了 3 种方案的适用条件和应用范围, 并从理论上对 3 种改正模型的计算精度进行了估算。

**关键词:** 机载激光测深; 波浪改正; 潮汐改正; 深度归算

**中图法分类号:** P229.3; P228.42

机载激光测深系统是集 DGPS 定位技术、惯性导航技术、激光测距技术、计算机数字信号处理技术、数据后处理技术和图形处理技术等多种高新技术于一体的新型机载集成型遥感信息获取与处理系统<sup>[1]</sup>。目前国际上具有代表性的商用机载激光测深系统, 首推瑞典的 Hawk Eye、美国的 Shoals、澳大利亚的 Lads 以及加拿大的 Larsen 500<sup>[2]</sup>。我国开展机载激光测深技术研究始于 20 世纪 80 年代, 目前仍处于试验改进探索阶段, 还未形成商品化研究成果<sup>[3~6]</sup>。

目前, 机载激光测深系统中海洋测量环境改正和误差分析处理问题已经受到系统研制与开发人员的高度重视, 国际上一些比较成熟的商用型机载激光测深系统均为此配备了功能比较完善的辅助测量设备和相应的信息处理软件系统。波浪改正为机载激光测深技术中最重要的测量环境改正项之一, 这项改正计算的精度直接决定测深系统的整体测量精度水平。

本文在概述激光测深基本原理的基础上, 基于我国新研制的机载激光测深系统配置, 提出了 3 种可供选择的波浪改正计算(即深度值归算)方案, 具体分析了 3 种方案的适用条件, 并从理论上对 3 种改正模型的计算精度进行了估算。

## 1 波浪改正计算方案

为了实现海洋测深的基本功能要求, 机载激光测深系统必须包含以下几个主要组成部分: 激

光信号发射与接收子系统, 数据采集与监控子系统, 动态定位与测姿子系统, 地面数据分析与处理子系统, 飞行作业保障子系统。其中, 动态定位与测姿子系统的核心是 DGPS 和 INS, 其主要功能是实时提供激光发射点的空间位置和激光扫描光束的姿态, 并将这些信息准确传送到主控计算机或数据记录装置。这一子系统提供的高精度大地高和飞机平台高度变化信息, 是本文后续分析确定深度测量波浪改正数的必要条件。

### 1.1 第一方案

如图 1 所示, GPS RTK 提供飞机平台高精度的三维坐标。设经天线偏心归算后求得激光发射器中心的大地高为  $h$ , 通过发射红外和蓝绿光束分别测得激光发射器中心至瞬时海面的高度(非激光发射器中心垂足点由两点之间的斜距转换获得)为  $h_1$ , 瞬时海面激光入射点至海底的深度为  $h_2$ ; 又设大地水准面与多年平均海面的差异(即海面地形)为  $\zeta$ , 大地水准面高度(即大地水准面至参考椭球面的距离)为  $N$ , 平均海面与深度基准面的差异为  $L$ , 以深度基准面起算的海底深度为  $H$ 。根据图 1 中各个量的几何关系, 可将波浪改正第一计算方案确定如下。

1) 由  $h$ 、 $h_1$  和  $h_2$  计算海底点的大地高  $h_d$ :

$$h_d = h - (h_1 + h_2) \quad (1)$$

2) 利用大地水准面模型<sup>[7]</sup>和海面地形模型<sup>[8]</sup>计算平均海面高度(即平均海面至参考椭球面的距离)  $h_m$ :

$$h_m = N - \zeta \tag{2}$$

或直接由卫星测高手段求得  $h_m$ <sup>[9]</sup>, 还可以通过在沿岸验潮站附近的水准点上进行 GPS 高程测量, 间接求得当地的  $h_m$ 。

3) 由  $h_d$  和  $h_m$  计算海底点相对于平均海面的深度  $H_m$ :

$$H_m = h_m - h_d \tag{3}$$

4) 由  $H_m$  和  $L$  计算海底点相对于深度基准面的深度  $H$ :

$$H = H_m - L \tag{4}$$

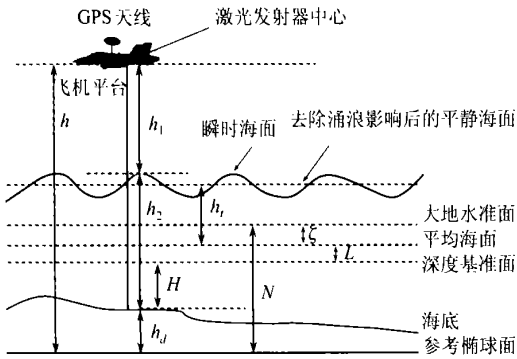


图 1 机载激光测深空间结构图

Fig. 1 Space Structure of Airborne Laser Hydrography

### 1.2 第二方案

在第一方案中, 由于采用海底作为过渡面, 深度归算过程完全避开了波浪改正项和潮汐改正项的干扰, 因此这样的计算方案又称为无波浪和潮汐改正测深方案。作为这种方案的检核手段, 提出第二种深度值归算方案。

1) 根据  $h$  和  $h_1$ , 计算瞬时海面的大地高  $h_s$ :

$$h_s = h - h_1 \tag{5}$$

2) 在一定时间间隔 (如  $\Delta t$ ) 内求  $h_s$  的平均值 (设参加平均值计算的样本个数为  $n$ ), 即获得去除涌浪影响后的相对平静海面的大地高  $\bar{h}_s$ :

$$\bar{h}_s = \sum h_s / n \tag{6}$$

3) 由  $h_s$  和  $\bar{h}_s$  计算波浪改正数  $\Delta h_s$ :

$$\Delta h_s = h_s - \bar{h}_s \tag{7}$$

4) 利用水位观测值或潮汐数值预报方法<sup>[9]</sup> 计算潮位改正数  $h_t$ 。

5) 从  $h_2$  中扣除波浪改正数  $\Delta h_s$  和潮位改正数  $h_t$ , 得海底点相对于平均海面的深度  $H_m$ :

$$H_m = h_2 - \Delta h_s - h_t \tag{8}$$

6) 由  $H_m$  和  $L$  计算海底点相对于深度基准面的深度  $H$ :

$$H = H_m - L \tag{9}$$

### 1.3 第三方案

第一和第二方案都是建立在定位系统能够提供高精度大地高观测值  $h$  基础之上的, 如果这一先决条件不成立, 那么, 前面介绍的两种计算方案都无法投入实际使用, 必须寻求第三种解决方案。下面以安装在飞机平台上的惯性导航系统能够提供载体在高度方向上的高精度变化量  $\Delta h$  为前提条件, 提出第三种深度值归算方案。

1) 以某个时间段  $\Delta t = [t_1, t_2]$  的开始时刻  $t_1$  为基准, 计算激光发射器中心在  $t (t_1 \leq t \leq t_2)$  时刻的高度变化量  $\Delta h$ 。

2) 在激光发射器中心至瞬时海面高度观测值  $h_1$  中扣除载体相应时刻的高度变化量  $\Delta h$ , 得反映瞬时海面起伏变化的高度值  $h'_1$ :

$$h'_1 = h_1 - \Delta h \tag{10}$$

3) 在时间段  $\Delta t$  内求  $h'_1$  的平均值  $\bar{h}'_1$  (设参加平均值计算的样本个数为  $m$ ):

$$\bar{h}'_1 = \sum h'_1 / m \tag{11}$$

4) 由  $h'_1$  和  $\bar{h}'_1$  计算波浪改正数  $\Delta h_b$ :

$$\Delta h_b = \bar{h}'_1 - h'_1 \tag{12}$$

5) 利用水位观测值或潮汐数值预报方法计算潮位改正数  $h_t$ 。

6) 从瞬时海面至海底的高度值  $h_2$  中扣除波浪改正数  $\Delta h_b$  和潮位改正数  $h_t$ , 得海底点相对于平均海面的深度  $H_m$ :

$$H_m = h_2 - \Delta h_b - h_t \tag{13}$$

7) 由  $H_m$  和  $L$  计算海底点相对于深度基准面的深度  $H$ :

$$H = H_m - L \tag{14}$$

## 2 方案适用条件分析及精度估计

由文献 [1] 得知, 尽管由美国国家航空与航天局 (NASA) 喷气推进实验室开发的新型全球差分 GPS (GDGPS) 系统, 已经能够实现双频 GPS 接收机的无缝全球实时定位, 精度优于 20cm, 但在当前的技术条件下, 我们要想获得精度优于 10cm 的大地高观测值, 还必须借助于 GPS RTK 技术, 且有效作用距离只限于 10km 以内。这就意味着, 前面提出的第一和第二种计算方案都只适用于沿岸附近海域作业, 其应用范围将受到一定的限制。使用专门的后处理软件可使 GPS RTK 的作用距离扩大到 40km, 这是有效提高第一和第二种计算方案适用性的惟一途径。因此, 在实践中

应优先考虑配备 GPS RTK 后处理软件, 实施测后解算, 以利于在更大范围内也能获得高精度的大地高成果。

具有相同的应用前提是第一和第二种计算方案惟一的共同点。由前面的论述得知, 两种计算方案的根本区别主要体现在, 第一种方案是一种无需进行潮汐观测的深度归算方案, 这种方案不需要具体计算出波浪改正数和潮汐改正数, 这意味着可以减少或撤销传统方法中用于瞬时水位改正而设立的短期及临时验潮站(除用于确定深度基准面的外)。这种方案的核心已经转变为精密求定平均海面高度。在第一种方案中, 可通过三种途径获取平均海面高度: ① 求大地水准面高与海面地形的差值; ② 直接采用卫星测高获得的平均海面高度; ③ 在验潮站附近的永久水准点上进行 GPS 高程测量, 根据已知的水准点与平均海面高度差, 间接求得当地的平均海面高度。不难看出, 第一种途径的关键是精确构建大地水准面和海面地形模型, 在海陆交界地带, 由于缺少实测重力资料, 通过重力测量方法确定的大地水准面模型难以满足精度要求, 全球尺度的海面地形模型也不适合这种类型的局部应用。要想提高重力大地水准面模型的计算精度, 必须适当增加沿岸大地测量控制点高精度 GPS /水准大地水准面信息的控制作用<sup>[12]</sup>, 并通过内插或外推方法求得测量海区的大地水准面高度。通过沿岸验潮站水准联测方法可相应提高海面地形的求定精度。当 GPS /水准观测点与验潮站水准点取得一致时, 第一种途径就转变为第三种途径。第二种途径是直接采用卫星测高平均海面高度, 由于卫星测高在海岸附近受地形地物影响较大, 观测精度明显下降, 在这些地区, 卫星测高平均海面高度将失去可靠性<sup>[13]</sup>, 因此, 这种途径显然不能作为首选方案。

根据当前的技术发展水平, 我们认为, 上面提到的第三种计算平均海面高度的技术方案更具有可行性。因为根据海道测量规程要求, 验潮站必须首先解决水尺零点的高程问题, 即要求通过水准联测的方法, 测出水尺零点相对国家高程基准面的高程, 从而确定水位零点、平均海面及深度基准面的相互关系。由此得知, 验潮站附近水准点与当地平均海面之间的高程差是已知的, 因此, 只要在验潮站水准点上进行 GPS 大地高观测, 就可以很容易求得当地平均海面相对于参考椭球面的高度  $h_m$ , 其计算精度不会低于 10cm。下面粗略估计按第一和第二方案归算海洋深度的精度。

对于第一方案, 由式(1)和式(3)得知, 海底点

相对于平均海面的深度值  $H_m$  可表示为:

$$H_m = h_m - h + (h_1 + h_2) \tag{15}$$

设  $h_m$  的计算精度为 10cm, GPS RTK 大地高  $h$  的观测精度为 10cm, 激光器到瞬时海面高度  $h_1$  的观测精度为 20cm, 瞬时海面至海底深度  $h_2$  的观测精度为 10cm, 则由式(15)得  $H_m$  的归算精度为:

$$M_{H_m} = \pm \sqrt{10^2 + 10^2 + 20^2 + 10^2} = \pm 26\text{cm} \tag{16}$$

对于第二方案, 将式(5)和式(7)代入式(8)得:

$$H_m = h_2 - (h - h_1) + \bar{h}_s - h_t \tag{17}$$

由式(6)知,  $\bar{h}_s$  的精度与计算平均值的样本个数  $n$  值有关, 当  $n$  取足够大时,  $\bar{h}_s$  的误差影响可以忽略不计。在验潮站有效控制范围内, 潮汐改正数  $h_t$  的计算精度不低于 10cm。由此得知, 按式(17)进行深度归算的最终精度与式(15)基本相当, 即也在  $\pm 26\text{cm}$  左右。实际上, 根据  $\bar{h}_s$  和  $h_t$  的几何定义,  $(\bar{h}_s - h_t)$  就等于平均海面相对于参考椭球面的高度  $h_m$ 。从这个意义上讲, 第二方案只是第一方案中从另一种途径确定平均海面高度的一种特例, 两者之间应该是等价的, 有互为检核的作用。

本文提出的深度值归算第三方案的应用前提是, 安装在飞机平台上的惯性导航系统能够提供载体在高度方向上的高精度变化量  $\Delta h$ 。这种方案不要求已知载体的大地高度, 不需要配备高精度的 GPS RTK 定位系统, 其应用范围较为灵活, 既可用于沿岸附近海域测量, 又可用于远离大陆的岛礁海域作业(以使用广域差分 GPS 解决平面定位问题为前提)。比较第三和第二方案不难看出, 它们之间的共同点是, 在深度值归算过程中, 都要求具体求出波浪改正和潮汐改正数, 区别在于它们使用了不同的波浪改正推求方法, 就这一点而言, 两者之间同样具有互为检核的作用。

将式(10)和式(12)代入式(13)得:

$$H_m = h_2 - \bar{h}_1 + h_1 - \Delta h - h_t \tag{18}$$

根据我们选用的惯性导航系统技术指标要求,  $\Delta h$  的测量精度优于 5cm。又由式(11)知,  $\bar{h}_1$  的计算精度与求平均值的样本数  $m$  有关, 当  $m$  取得足够大时,  $\bar{h}_1$  的误差影响可以忽略不计。当在沿岸附近海域实施测量时, 潮位改正数  $h_t$  可通过当地验潮站观测资料进行计算, 计算精度优于 10cm; 当在远离大陆的岛礁附近海域作业时,  $h_t$  可通过潮汐数值预报方法求得, 推值精度在南中国海优于 15cm。将以上各项误差估计代入式(18), 得:

$$M_{H_m} = \pm \sqrt{10^2 + 20^2 + 5^2 + 15^2} = \pm 27\text{cm} \tag{19}$$

在式(19)中,  $h_t$  的精度是以 15cm 代入计算的, 如果以 10cm 代替 15cm, 则有:

$$M_{H_m} = \pm \sqrt{10^2 + 20^2 + 5^2 + 10^2} = \pm 25\text{cm} \tag{20}$$

### 3 结 语

本文提出的三种归算方案虽然具有不同的应用环境和应用范围, 但粗略估计, 它们应当具有几乎相等的归算精度水平, 其最终归算精度都在  $\pm 25\text{cm}$  左右, 能够满足海道测量规范对这类测深系统提出的  $\pm 30\text{cm}$  的精度指标要求。由于三种归算方案使用了不同的技术途径, 因此, 它们之间具有互为检核的作用。

鉴于目前我国自行研制的机载激光测深系统还未进行海上试验, 深度归算方案的实际验证工作无法如期完成, 有待下一阶段再作补充。

### 参 考 文 献

1 Andrew A A , Lloyd C H , Gerl F G , et al. New Technology for Shallow Water Hydrographic Surveys. International Hydrographic Review , 1998 , 65(2): 27~41

2 Baltsavias E P. Airborne Laser Scanning Existing Systems and Firms and Other Resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999 , 54(2/3): 164

~ 198

3 汤晓涛, 胡广伦. 浅谈我国机载激光测深系统的发展前景. 军事测绘, 1998(2): 55~57

4 管 铮, 翟国君, 黄谟涛, 等. 机载激光测深系统的发展. 军事测绘, 1999(3): 58~61

5 刘基余, 李 松. 机载激光测深系统测深误差源的研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 491~495

6 刘经南, 张小红, 李征航. 影响机载激光扫描测高精度的系统误差分析. 武汉大学学报 \ 5 信息科学版, 2002, 27(2): 111~117

7 黄谟涛, 管 铮, 翟国君, 等. 海洋重力测量理论方法及其应用. 北京: 海潮出版社, 1997

8 管泽霖, 管 铮, 翟国君. 海面地形与高程基准. 北京: 测绘出版社, 1996

9 翟国君, 黄谟涛, 谢锡君, 等. 卫星测高数据处理的理论与方法. 北京: 测绘出版社, 2000

10 孟德润, 田光耀, 刘雁春. 海洋潮汐学. 北京: 海潮出版社, 1993

11 高建新. 高精度全球差分 GPS 的应用. 测绘信息与工程, 2002, 27(2): 16~18

12 陈俊勇. 高精度局域大地水准面对布测 GPS 水准和重力的要求. 测绘学报, 2001, 30(3): 189~191

13 黄谟涛, 翟国君, 管 铮, 等. 利用卫星测高数据反演海洋重力异常研究. 测绘学报, 2001, 30(2): 199~184

第一作者简介: 黄谟涛, 高级工程师。现主要从事海洋重力场及海洋测量数据处理研究。代表成果: 海洋重力测量理论与方法; 中国海洋重力数据库等。  
E-mail: Zhaigj@163.com

## Wave Correction in Airborne Laser Hydrography

HUANG Motao<sup>1</sup> ZHAI Guojun<sup>1</sup> OUYANG Yongzhong<sup>1</sup> LU Xiuping<sup>1</sup>

(1 Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road, Tianjin, China, 300061)

**Abstract** Three areas of technology are thought to be the newest technology for shallow water hydrographic surveys owing to their high speed and high resolution: airborne laser hydrography (ALH), shallow water multibeam sonars (SWMB) and digital side scan sonar. The wave correction is one of the most important depth reductions for marine environment. Based on the configuration of the first set of ALH system in China, three ways available for the wave correction are proposed, and their suitability is discussed in detail. Finally, the accuracy of the correction models is estimated in theory.

**Key words:** airborne laser hydrography; wave correction; tide correction; depth reduction

**About the first author:** HUANG Motao, senior engineer. He is engaged in the studies of marine gravity field and data processing for marine surveying. His representative achievements are the theory and method of marine gravity measurement, the establishment and application of China marine gravity data base system, etc.

E-mail: Zhaigj@163.com

(责任编辑: 袁丰)