

文章编号: 1000-050X(2000)06-0491-05

机载激光测深系统测深误差源的研究

刘基余¹ 李 松²

(1 武汉测绘科技大学地学测量工程学院, 武汉市珞喻路 129 号 430079)

(2 武汉测绘科技大学光电工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要 机载激光测深系统将作为 21 世纪精细测绘海底地形和探测水下目标的高新技术设备。本文论述了影响机载激光测深精度的附设误差和海水深度的测量误差两大误差源。

关键词 机载激光测深; 海水深度; 精度; 误差

分类号 P229.3; P225.2 文献标识码 A

统计表明, 全球海洋水深为 30m 以下的面积是 690 万 km² 左右; 我国海域水深为 5 ~ 50m 的面积约为 50 万 km²。当用机载激光测深系统测绘上述浅水海域的海底地形时, 若飞机的飞行高度为 500m, 飞行速度为 103m/s, 测绘行宽为 250m, 采用 1:5 万的测图比例尺, 机载激光测深系统一年内仅作 150h 的海底地形测绘数据采集, 就相当于水面测量船在上述条件下 10a 所采集的海底地形测绘数据, 而机载激光测深所需要的费用仅为水面测量船测量费用的 1/6。此外, GPS 三维姿态参数测量提供了更精确、实用的技术。在称为海洋世纪的 21 世纪, 机载 GPS/激光测深系统将成为精密快速地测绘海底地形和探测水下目标的高新技术设备。因此, 研究机载激光测深系统的测深精度是极有实用价值的。本文论述了影响机载激光测深精度的两大误差源: 机载激光测深的附设误差和海水深度的测量误差, 即

$$M_{D_w} = \left[\left(\frac{M_{\Delta t_w}}{\Delta t_w} \right)^2 + \left(\frac{M_{K(\theta)}}{K(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{M_{n_w}}{n_w} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot D_w$$

1 平均海平面的确定

机载激光测深系统所载的 Nd:YAG 激光器向海面发射波长为 1 064nm 的红外激光及其倍频后波长为 532nm 的绿色激光。两束激光作共线扫描, 以天顶角 Ψ 入射到起伏的海水表面。红外激光因无法穿透海水而被海面反射, 该反射光

由光学接收系统接收后可用于测定海面高度; 绿色激光因处于海水窗口而大部分能量穿透海面到达海底, 它经海底反射后将沿入射路径返回在航飞机, 被光学接收系统接收。根据红外激光与绿色激光返回的时间差, 即可计算出被测点的海水深度。由此可见, 利用上述原理而探测到的海水深度是瞬时海水深度, 这种深度的起算面是受波浪和潮汐等因素影响的瞬时海面, 而在任何一张海图中, 海水深度都应该是指某一指定的标准起算面到海底的距离, 所以必须将机载激光测深系统测得的瞬时水深转化成为相对某一标准起算面的水深。这就需要解决瞬态海面与标准起算面的相互关系。

在水深测量和编制海图时, 通常采用低于平均海面的一个面作为海图深度基准面, 它与平均海面的距离一般由当地的潮差大小而定。世界各国采用的海图深度基准面很不一致, 深度基准面的计算方法也不一样, 如英国采用最低天文潮面, 即潮汐预报中出现的最低水位面作为海图深度基准; 法国、西班牙、巴西等国家均采用观测的最低潮面作为基准; 美国东海岸、荷兰、瑞典等采用平均低潮面作为基准面; 而美国西海岸、菲律宾则采用平均低潮面作为基准面; 而我国一般用弗拉基米尔斯基法计算深度基准面, 较常用的基准面有最低低潮面和理论深度基准面。因此, 无论采用何种深度基准面作为起算面, 都必须求出平均海面^[1]。一旦平均海面的位置得以确定, 再参考各地的潮汐数据, 即可推算出深度基准面的位置。

所以,由瞬时测得的海水深度计算当地水深的关
键,就在于确定平均海平面。

机载激光测深系统确定平均海平面有两种不
同的方案:①发射系统发射的红外激光
(1 064nm)和绿色激光(532nm)作共线扫描,红外
激光用于确定瞬时海面的位置。由于海浪的波动
可看作是一均值为零的随机运动,因而可根据一
个扫描周期内若干个扫描点的波高确定平均海平
面的位置,这种方法在美国的 LARSEN 系统中得
到了应用。②在发射系统发射的两束激光中,仅
绿色激光作矩形扫描,红外激光扩束后垂直投射
到海面,在海面的作用范围大约为 25m,由红外激
光的表面回波可以确定 25m 范围内的平均海面。
这种构想在澳大利亚的 LAD 系统中得到了实
用^[2]。这两种方案各有利弊,比较而言,第一种
方案的优越性较为明显^[3]。因此,笔者主要分析
了共线扫描系统中平均海平面的位置确定方法。

在共线扫描系统中,飞机上装有加速度计,它
可以按一定的采样频率给出飞机在垂直方向上的
加速度,因而,可以了解飞机在垂直方向上的运动
以及在有限的时间内,飞机相对于平均海面的高
度。加速度计的这种功能可使机载激光测深系统
在各种条件下有效工作,特别是在红外激光表面
回波丢失情况下仍能正常作业。

设 R_b 是飞机到海底被测点之间的表观斜
距, $R_b = ctrz/2$ 。其中, c 是空气中光速; trz 是激
光从发射到经海底后返回的时间,则

$$R_b = (H - h) \sec \Psi + n_w (D_w + h + \epsilon_d) \sec \varphi \quad (1)$$

式中, H 是飞机相对于平均海平面的高度; h 是
被测点的海浪高度; D_w 是被测点海水深度; n_w
是海水折射率; φ 是由 Snell 定律计算出的折射
角; ϵ_d 则是由传输过程引进的深度误差^[4]。如果
能知道 H 、 h 的值,即可从式(1)中解得被测点相
对平均海平面的海水深度。

扫描光束测得的斜距为:

$$R = (H - h) \sec \Psi + \epsilon \quad (2)$$

式中, ϵ 为斜距测量中包含的误差。式(2)中的 H
其实就是一个扫描周期中各扫描点的 $R \sec \Psi$ 的
均值,因而是可以确定的。一旦 H 被求出,各扫
描点的波高 h 就是可求的了。所以,只要扫描线
足够长,便可求出飞机到平均海平面的高度 H 和
各测点的波高 h 。显然,海水深度 D_w 即可求定。

事实上,由于一个扫描周期往往长达数百 m,
在此过程中飞机本身的航高不可能始终固定不
变。当考虑这种变化对测深的影响时,就要用到

加速度计的测量数据的双重积分对飞机航高的变
化影响,从而可将飞机到平均海面的高度描述为:

$$H = H(t_0) + (t - t_0)H'(t_0) + \iint a_v du dv + \Delta \quad (3)$$

式中, t 是在时刻 t_0 附近的某一时刻; a_v 是飞机
的垂直加速度; Δ 表示加速度双重积分的误差;
 $H'(t_0)$ 表示在 t_0 时刻飞机高度随时间的变化率;
 u 、 v 均代表从 t_0 到 t 时刻的双重积分的时间变
量。 $H(t_0)$ 是两个未知的积分常数,确定了这两
个积分常数,任意时刻的飞机航高即可求出。

由式(2)、(3)联立可得:

$$R \cos \Psi - \iint a_v du dv = y_m = H(t_0) + (t + t_0)H'(t_0) + \epsilon \cos \Psi + \Delta - h \quad (4)$$

式(4)表明,在不计测量误差项 $\epsilon \cos \Psi$ 、 Δ 的情
况下,若不考虑波高 h 、 y_m 与 t 呈线性关系,如可
观测 y_m 与 t 不呈线性关系,则它对直线的偏离量
大小即为被测点的波高。所以,可以求出一个时
间段内各点波浪高度,进而确定平均海平面的位置。

2 机载激光测深的附设误差

在上述分析中,已经得出了利用测深数据解
算被测点相对平均海平面的海水深度的方法,并
可以看出机载激光测深精度主要受下列附设误差
的影响。

2.1 垂直加速度误差

加速度的测量误差来源于以下几个方面:

①飞机在飞行过程中有一定的航姿,飞机的垂直
方向与铅垂方向不一定保持一致,而加速度计测
量的是在垂直于飞机方向上的加速度,其在水平
方向上的分量不为零,因而用它来确定飞机相对
于平均海平面的高度变化有一定的误差;②加速
度计的采样频率与机载激光测深系统的采样频率
是不一致的,一般而言,机载激光器发射激光脉
冲的频率大约在 168Hz~500Hz,而加速度计的采
样频率仅为几个 Hz,所以要对测量数据进行内
插,这种内插也会使求解飞机的高度有误差;③垂
直加速度计本身的测量误差,由于垂直加速度的
误差最终是以双重积分的形式对飞机相对于平均
海平面的高度发生影响,故它对系统测深精度
的影响是较大的。

2.2 Ψ 角的测量误差

Ψ 角是扫描激光束的天顶角。 Ψ 角的大小
一方面与飞机的航姿(航向角、侧滚角、俯仰角)有

关;另一方面与扫描角有关。 Ψ 角是上述参数的函数,其关系随扫描方法的不同而异,其计算过程比较复杂。由于海面回波的时间展宽、斜距 R 的测量有一定误差,而 $R\cos\Psi$ 才是最终用于确定平均海平面位置的因素,所以 Ψ 角的误差也会对测深精度造成影响。

除上面提到的诸因素外,系统的扫描范围也会影响测深精度。扫描范围大,显然对波浪的平均作用就好,由它所确定的平均海平面的位置就比较准确,但由此引起的其他问题,如表面回波的丢失、影响信噪比等问题也大;扫描范围小,则对波浪的平均作用也就差些,当海面上有波长较大的波浪时,由此确定的平均海洋平面位置会有较大误差。

3 海水深度的测量误差

机载激光测深系统所测定的海水深度,是通过测量绿色激光在海水的传播时间而求得的,亦即

$$D_w = \frac{\Delta t_w c_0 K(\theta)}{2n_w} \quad (5)$$

式中, D_w 为机载激光测深系统测得的海水深度; Δt_w 为绿色激光(532nm)在海水中的传播时间; c_0 为光在真空中的传播速度; $K(\theta)$ 为取决于绿色激光入射海水角度 θ 的光径因子; n_w 为海水的光波折射率。

根据误差传播定律,由式(5)可知海水深度的测量误差为:

$$M_{D_w}^2 = \left[\frac{\partial D_w}{\partial c_0} \right]^2 M_{c_0}^2 + \left[\frac{\partial D_w}{\partial \Delta t_w} \right]^2 M_{\Delta t_w}^2 + \left[\frac{\partial D_w}{\partial K(\theta)} \right]^2 M_{K(\theta)}^2 + \left[\frac{\partial D_w}{\partial n_w} \right]^2 M_{n_w}^2 \quad (6)$$

考虑到上式中的各个偏导数,则有:

$$M_{D_w}^2 = \left[\left(\frac{M_{c_0}}{c_0} \right)^2 + \left(\frac{M_{\Delta t_w}}{\Delta t_w} \right)^2 + \left(\frac{M_{K(\theta)}}{K(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{M_{n_w}}{n_w} \right)^2 \right] \cdot D_w^2 \quad (7)$$

由上式可见,海水深度的测量误差(M_{D_w})取决于真空光速测量误差(M_{c_0})、传播时间测量误差($M_{\Delta t_w}$)、光径因子求定误差($M_{K(\theta)}$)和光波折射率误差(M_{n_w})。在较长时间内,人们一直采用(299 792.5 \pm 0.4)km/s作为真空光速值。但是,1975年8月国际大地测量协会(IAG)第16届会议建议,采用激光技术测得的真空光速值,即

$c_0 = (299\ 792\ 458 \pm 1.2)\text{m/s}$ 。由此可见, M_{c_0}/c_0 分别为 $\pm 1.67 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 4.00 \times 10^{-9}$ 。因此,对于机载激光测深而言,可以忽略真空光速测量误差的影响,以致海深测量误差可写为:

$$M_{D_w} = \left[\left(\frac{M_{\Delta t_w}}{\Delta t_w} \right)^2 + \left(\frac{M_{K(\theta)}}{K(\theta)} \right)^2 + \left(\frac{M_{n_w}}{n_w} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot D_w \quad (8)$$

3.1 光波折射率的非实径性误差

在现行的机载激光测深系统中,均取波长为532nm的绿色激光的海水折射率 $n_w = 1.341$,亦即,既不顾及海水深浅,也不顾及不同海域的海水盐度和浑浊度,一律采用 $n_w(532\text{nm}) = 1.341$,称之为常数折射率。实际上,随着海水深度和水质之异,海水折射率随之而变化。理论上,激光在海水介质中传播时的实径折射率应为:

$$n_w(D_w) = \frac{1}{D_w} \int_0^{D_w} n_w^p \text{d}D^p \quad (9)$$

式中, n_w^p 为沿测深路径任一点 p 的海水折射率; $n_w(D_w)$ 为测深路径的积分折射率。

从上可知,当用常数折射率(1.341)代替积分折射率 $n_w(D_w)$ 时,必将导致海深测量误差。从式(7)可见,若暂不顾及其他各项误差,仅考虑折射率误差时,海深测量误差为:

$$(M_{D_w})_{n_w} = \frac{M_{n_w}}{n_w} D_w \quad (10)$$

由上式可知,即使 M_{n_w}/n_w 仅为5‰,当 $D_w = 50\text{m}$ 时,5‰相对折射率误差将导致25cm的海深测量误差,因此,海水折射率误差是机载激光测深中一项极重要的误差源。

文献[5]提出了用双色激光测量沿海水路径折射率的科学思想和设计方案(Liu J Y, 1992)。对于机载激光测深而言,用双色激光测量光波在海水中的折射率,是消除上述海水折射率误差的最佳选择,这对于精细海底地形测绘具有更为重大的实用价值。

3.2 绿色激光在海水中的传播时间测量误差

机载激光测深系统测量海水深度是通过测量海水回波与海底回波的时间差 Δt_w 实现的。事实上,无论是海面回波还是海底回波,其返回时刻都不是一个确定的量。这是因为:①海水受风流和潮汐的影响,表面起伏不定,凸凹不平,入射到海面的激光束经这样的海水表面反射,即使不考虑本身的脉冲宽度,也不可能在同一时刻返回接收器;②绿色激光透射进入海水后,将不可避免地

与海水中的悬浮粒子等相互作用,发生多重散射。因而,不同的光子具有不同的路径,它们不可能在同一时刻返回接收器而发生严重的时间/空间展宽。因此,时间差 Δt_w 只能是统计意义上的回波之间的时间差。由于传输过程光子的多路径,必然给海水深度测量带来较大的不确定性^[4]。有多种方法可以估计由传输过程引进的测深误差,其中 Monte Carlo 方法是较为常见的一种。

此外, Δt_w 的测量误差不仅取决于测量设备的分辨率和量测噪声,而且取决于脉冲宽度和噪声光子数等诸多因素。例如,激光回波的强烈涨落也影响着测深精度;机载激光测深系统所接收到的绿色激光回波,经历了以下 8 个界面的传输:

- 机载激光发射至海面的大气界面;
- 激光射入海水的大气—海水界面;
- 激光射向海底的海水界面;
- 激光射达海底的海水—海底界面;
- 激光被海底漫反射的海底—海水界面;
- 激光返回海面的海水界面;
- 激光回波穿出海面的海水—大气界面;
- 激光回波到达机载激光测深系统的大气界面。

红外激光虽只经历上述界面中 4 个界面的传输,但海面上大气的强烈抖动和海面地形的强烈起伏,导致了红外激光回波幅度的异常变化。经过上述 8 个界面传输的绿色激光回波,其幅度涨落远比红外激光异常。两者均将产生脉冲展宽,前后沿变缓,绿色激光脉冲更为明显。正如前述,机载激光测深是基于绿色激光在海水中的往返传播时间的测量。假定在测深点 A 时,激光回波取样点均处于脉宽中心点,但在后续的测深点 p 时,回波取样点发生偏移。例如,处于脉冲前沿或处于脉冲后沿,其差值在极端情况下将达到一个脉宽,且被吸收到绿色激光传播时间测量值之内,而等效于引入一个脉宽的测时误差。若脉宽为 5ns,则取样测深误差为 0.75m;若脉宽为 6ns,取样测深误差便是 0.90m。由此可见,机载激光测深系统采用较窄的激光脉冲,还有益于在回波幅度强烈涨落的情况下获取较高的测深精度。

在脉冲式激光测深(距)的模式下,脉冲宽度所引起的测深(距)误差为^[6]:

$$M_w = \frac{\tau_p k_p}{\sqrt{N_r}} \quad (11)$$

式中, τ_p 为激光脉冲的半电平全带宽(FWHM); N_r 为机载激光测深系统光电转换器所接收的光子数; K_p 为取决于不同探测模式的系数。

从式(11)可知,激光测深精度的高低与激光脉冲宽度的宽窄成正比。为了获得较高的测深精度,宜用较窄的激光脉冲。但在机载激光测深时,激光脉冲重复率采用 168 ~ 500Hz。对于数百 Hz 重复率的激光器,应该充分考虑到热瞬态影响光学谐振腔的精密平衡和高峰值功率非线性效应导致激光棒等不可逆转的击穿,以致脉冲宽度难以达到 ns 级^[7]。因此,机载激光测深系统的脉冲宽度宜选为小于等于 5ns。

参 考 文 献

- 1 陈永奇,李裕忠,杨仁.海洋工程测量.北京:测绘出版社,1992
- 2 Billard B. Estimation of a Mean Sea Surface Reference in the WRELADS Airborne Depth Sourder. Applied Optics, 1986, 25; 2 067 ~ 2 073
- 3 Thomas R W L, Guenther G C. Water Surface Detection Strategy for an Airborne Laser Bathymeter. SPIE, 1990, 1 302(Ocean Optics X); 597 ~ 611
- 4 Guenther G C, Thomas R W L. Effects of Propagation-Induced Pulse Stretching in Airborne Laser Hydrography. SPIE Ocean Optics VII, 1984, 489; 287 ~ 296
- 5 Liu J Y. GPS/ Laser Synergistic System for Seafloor Surveys. Marine Geodesy, 1992, 15(5); 271 ~ 276
- 6 Liu J Y. Satellite Laser Ranging Errors. The 6th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Antibes, France, 1986
- 7 刘基余.卫星激光测距对激光器的某些特殊要求.激光与红外,1987(8); 17 ~ 21
- 8 刘基余.机载激光测深系统.电子科技导报,1998(10); 22 ~ 24
- 9 李松,刘基余.激光海水测深系统中激光器的选择.测绘信息与工程,1998(2); 43 ~ 46

刘基余,男,64岁,教授,博士生导师,美国纽约科学院院士。现主要从事 GPS 卫星导航和机载/星载激光测量的研究。他在 25 种中文期刊以及美国、英国、德国、加拿大、澳大利亚等国家的英德文期刊上共发表了 128 篇学术论文,其中,英文学术论文共 25 篇。

E-mail: jyliu@wutsm.edu.cn

Application on Error Sources Surveying Sea-water Depths with an Airborne Laser Sounding System

LIU Jiyu¹ LI Song²

(1 School of Geoscience and Surveying Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

(2 School of Photoelectric Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract The airborne laser sounding system will become an advanced equipment in surveying water depths and detecting underwater targets and possible hazards in the water in 21 century. It is being made cooperatively by Chinese research units to survey Chinese sea-water territories. When making the airborne laser sounding system it is necessary to distribute carefully the accuracy specifications for its subsystems. According to our research the accuracy surveying sea-water depths relates not only to the self-system errors, but also to error sources from the airborne auxiliary equipment. This paper focuses on two error sources influencing on a sounding accuracy:

- 1) auxiliary errors resulting from the airborne accelerometer and sweep equipment;
- 2) errors surveying sea-water depths by means of the airborne Laser sounding system.

Especially, it is pointed out that multicolor laser can be used to determine effectively the refractive corrections in the sea-water, so as to mitigate an influence of the refraction index error on the sounding accuracy.

Key words airborne laser sounding; sea-water depth; accuracy error

LIU Jiyu, male, 64, professor, Ph.D supervisor, distinguished member of New York Academy of Sciences (USA). He is most interested in GPS satellite navigation and air borne and satellite borne laser surveying. He has published 103 papers in 25 Chinese journals and 25 papers in English and German journals.

Email: jyliu@wtusm.edu.cn