

文章编号:0494-0911(2012)02-0007-04

中图分类号:P229

文献标识码:B

表层声速对多波束系统测量的影响

董庆亮

(海军91561部队,广东广州510320)

Influence of Surface Sound Velocity in Multibeam Echo Sounding

DONG Qingliang

摘要:根据多波束系统通过声线跟踪反演波束测点的空间位置。在声线弯曲改正中换能器表层声速对波束指向角、波束脚印在船体坐标系下的平面位置和水深、测量覆盖宽度等都有着直接的影响,尤其是对边缘波束的测量精度影响特别大。在从理论上分析表层声速对多波束系统测量影响的基础上,利用实际测量的数据论述表层声速对多波束系统的重要性,以及在实际测量中应实时采集表层声速的必要性。

关键词:多波束系统;表层声速;波束指向角

一、引言

多波束系统采用广角度定向发射、多阵列信号接收和多个波束形成处理等技术,并依赖海水介质完成对声波的传播和海底的反射、散射。由于声波在海水介质传播的非直线性,为了得到波束脚印的真实位置,就需要沿着波束的实际传播路径跟踪波束,并通过波束到达角(即波束指向角)、往返时间和声速剖面数据来进行声线弯曲改正,从而完成计算波束脚印在船体坐标系下的平面位置和水深。

在此过程中声速改正是影响多波束测量精度的外部因素中最重要,同时也是最难控制的影响因素。由于介质声速不仅受水团运动而经常发生复杂变化,而且不同的声速结构将直接影响波束射线的空间路径^[1]。另外由于受到季节性变化和昼夜温差的影响,换能器表层声速的变化又是整个声速剖面变化中最活跃的部分,对测量精度的影响最大,尤其是对边缘波束的影响一般要大一个数量级^[2]。当表层声速的误差达到一定程度时,反映到测量的地形上将会导致测量地形发生凹凸不平的波浪形假地形,严重影响测量工程的质量,因此表层声速在保障多波束系统测量的高精度方面扮演着十分重要的角色。本文在分析了表层声速对多波束系统测量影响的基础上,利用实际测量的数据论证了表层声速对多波束系统的重要性,以及在实际测量中应实时采集换能器表层声速的必要性。

二、表层声速对多波束测量的影响

多波束系统通过声线跟踪反演波束测点的空间位置。在计算过程中,换能器表层声速对波束指向角、波束脚印的平面位置和水深,以及测量覆盖宽度等都有着直接的影响,尤其是对边缘波束的测量精度影响特别大。

1. 表层声速对波束指向角的影响

换能器是多波束的核心元件,为了实现波束扇面发射和海底测量的全覆盖,整个换能器采用了很多单元,并按照一定的排列方式组成一个换能器阵列进行波束的发射和接收。由于发射和接收是多个波束,而且这些波束必须形成一个同航向方向正交的扇面,因而对于每一个波束的指向性必须进行规定,多波束换能器根据声学原理,对每个单元的指向性进行了定义。

多波束换能器基阵的构成特点虽然满足了形成波束扇面的要求,但为了使每个方向的测量信号较强,在波束形成时,必然会产生时延。为了解决这个问题,多波束采用了FFT波束形成技术,保证了在各个方向波束信号的强度。

当换能器阵列由 N 个基元组成时,基元之间的间隔为 l ,波束以一定的频率 f 从 θ 方向入射到波阵面时,第 k 个波束的波束指向角计算方程经过FFT变换后为^[3]

$$\theta_0(k) = \arcsin(k\lambda/Nl) \quad (1)$$

将 $\lambda = v_0/f$ 代入式(1)可得

$$\theta_0(k) = \arcsin(kv_0/Nlf) \quad (2)$$

收稿日期:2011-03-15

作者简介:董庆亮(1972—),男,山东曲阜人,高级工程师,主要从事海洋测量和数据后处理方面的研究。

式中, v_0 为换能器表层声速。由式(2)可看出, 当波束发射频率一定时, 换能器波束指向角 θ_0 只是表层声速 v_0 的函数, 当表层声速 v_0 误差增大时, 会造成波束指向角 θ_0 的误差同时增大。根据反正弦函数的特点, 随着波束指向角的增大, 表层声速误差增大对波束指向角带来的误差并不均匀增大, 当波束指向角大于 60° 时, 表层声速误差对波束指向角的影响会迅速增大。据 SIMRAD 公司计算, 在 $\pm 60^\circ$ 指向角以外, 波束指向角对声速具有较强依赖性, 表层声速差 1 m/s 则会影响边缘波束指向角误差大于 0.1° ^[4]。因此表层声速对波束指向角有着很大的影响。

2. 表层声速对水深测量的影响

波束脚印船体坐标的计算需要用到 4 个参量, 即垂直参考面下的波束指向角、传播时间、换能器表层声速和声速剖面, 其中, 表层声速起着十分重要的作用。

在声学投射平面内, 根据垂直参考系下的波束指向角、旅行时计算波束测点的侧向中心距离 X 和换能器以下的水深 H , 各波束的指向角不同, 其在介质中旅行的路径也各不相同。非均匀介质中各波束测点的空间位置反演遵循 Snell 定律^[5]

$$\frac{v}{\sin \theta} = \frac{v_0}{\sin \theta_0} \quad (3)$$

$$H = \int v \cos \theta dt \quad X = \int v \sin \theta dt \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, dt 为计算点单程旅行时的微分; θ 是计算点声线切线与垂线之间的夹角; v_0 为换能器表层声速; θ_0 为波束指向角; t_0 是指向角为 θ_0 的声线的单程旅行时。根据 Snell 定律, 式中积分项 θ 可根据声速剖面 v 、指向角 θ_0 和 v_0 确定, 即 θ 是声速剖面 v 、 θ_0 和 v_0 的函数, 因此在确定各波束的 θ_0 和 t_0 后, 可根据实际的声速剖面完成公式的积分。由于实际的声速剖面均为离散形式, 因此在已知波束射线的到达角、旅行时、表层声速和声速剖面进行波束测点的空间位置反演时, 采用的方法也为离散形式。将式(3)、式(4)综合在一起得

$$H = \int v \cos \left[\arcsin \left(\frac{v \sin \theta_0}{v_0} \right) \right] dt \quad (5)$$

$$X = \int \frac{v^2 \sin \theta_0}{v_0} dt \quad (6)$$

由式(5)可更直观地看出, 水深数据 H 与表层声速有着直接和间接的关系, 表层声速对水深测量来说是十分重要的。

3. 表层声速对定位精度的影响

式(6)中, 相对于中心波束, 波束测点的侧向中

心距离 X 与波束指向角、表层声速、声速剖面和旅行时有直接的关系, 表层声速误差增大时, 波束指向角误差增大, 造成侧向中心距离误差增大。如果多波束系统波束角偏差为 0.2° , 波束角为 60° , 水深在 100 m 处引起的波束定位误差为 1.4 m , 仅此一项就占 IHO S-44 标准中一级精度指标的 70% ^[2]。当仪器使用的表层声速值比实际的表层声速大时, 则侧向中心距离变小, 同时测量的覆盖宽度也变窄; 当仪器使用的表层声速值比实际的表层声速小时, 则侧向中心距离变大, 同时测量的覆盖宽度也变宽。因此表层声速直接影响了水深测量的定位精度。

4. 声线弯曲改正中对表层声速误差的积累

根据声速剖面数据的分层, 在进行分层求解时误差的传递也是积累的。

设层 i 内表层入射参数 V_{i-1} 、 θ_{i-1} 没有误差, V_i 的测量误差为 dV_i , 根据 Snell 法则, dV_i 对该层折射角的影响为

$$d\theta_i = \frac{\sin \theta_{i-1}}{\cos \theta_i V_{i-1}} dV_i \quad (7)$$

dV_i 对 $i+1$ 层折射角的影响 $d\theta_{i+1}$ 为^[3]

$$d\theta_{i+1} = \frac{V_{i+1}}{V_i \cos \theta_{i+1}} \left(\frac{\sin \theta_{i-1}}{V_{i-1}} - \frac{\sin \theta_i}{V_i} \right) dV_i \quad (8)$$

式(8)中声速测量误差不但对本层的折射参数产生影响, 还影响着下一层的折射参数, 这种影响对于整个波束传播产生的误差是积累性的, 尤其对于表层声速的测量误差影响最大。因为表层声速从首层开始影响着波束指向角和次层的波束折射, 这种影响又通过声速剖面的分层而一层层传递下去, 一直影响到最后一层, 微小的表层声速误差, 在传递中就会给水深数据和定位数据带来较大的误差。由于目前多波束系统大多采用 150° 广角度发射, 边缘波束处在倾斜收发状态, 声线遇不同声速界面的折射加大了, 因此边缘波束受这种误差传递的影响是很大的。表层声速对多波束水深测量的影响相对于直线形换能器来说, 对弯曲形换能器的影响要更为严重。

三、实例与分析

在某一海底平坦的区域, 利用 EM1002 型多波束系统测量两个实例, 来说明表层声速对多波束测量的重要性。在测量之前对 EM1002 型多波束系统进行了严格的参数校正, 各项指标符合测量要求 (EM1002 型多波束的换能器是弯曲形)。

1. 同一声速剖面数据, 不同表层声速

在测量前用声速剖面仪测量海水的声速剖面

数据 V7,编辑好后输入工作站,使用 150°覆盖角进行测量。图 1 为声速剖面 V7 的曲线图。测量中,在工作站参数设定对话框里分别输入表 1 中不同的表层声速,使用同一无误差的声速剖面数据,不同的表层声速进行测量,来观测表层声速对测量的影响,并将各种测量数据记录在表 1 中,其中表层声速 1555.5 m/s 是表层声速仪实际测量的声速数据。

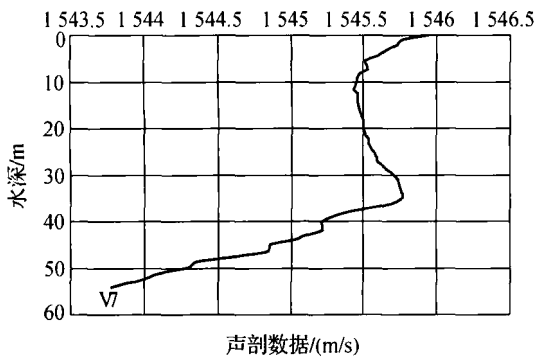


图 1 声速剖面 V7 的曲线图

表 1 不同表层声速对测量的影响

表层声速	地形形状	中心波束	边缘波束	边缘测深误差/(%)	宽深比
1540.5	凹形	55.0	50.0	9.09	6.3
1545.5	凹形	53.3	50.0	6.19	6.3
1549.5	凹形	53.6	52.5	2.05	6.3
1555.5	水平	54.1	54.3	0.37	6.2
1561.5	凸形	54.5	57.2	4.95	6.1
1565.5	凸形	54.8	58.5	6.75	6.1
1567.5	凸形	54.8	60.0	9.48	6.1

表 1 中,表层声速为 1555.5 m/s 时测量的地形是平坦的,各种数据也符合 IHO S-44 标准的要求,而使用其他表层声速时,测量的地形都发生了变形,各种测量数据都超限。表层声速比实际值小时,波束指向角变大,测量覆盖宽度变大,边缘波束测量的水深比中心波束测量的水深值要小,测得的地形中间深,两端对称浅,也就是凹形假地形,如图 2 所示;表层声速比实际值大时,波束指向角变小,测量覆盖宽度变小,边缘波束测量的水深比中心波束测量的水深值要大,测得的地形中间浅,两端对称深,也就是凸形假地形。而且表层声速的误差越大,边缘波束测量的水深误差也越大,对覆盖宽度的影响也越大。虽然当表层声速比实际值小时,波束指向角变大,测量覆盖宽度变大,但边缘波束测量的误差增大,因此测量覆盖宽度变大并没有实际的价值。

图 2 为用表 1 中表层声速 1540.5 m/s、声速剖

面 V7 在平坦海区测量时质量实时监控窗口显示的凹形假地形;图 3 为 EM1002 型多波束系统表层声速仪出现故障时测量的地形,由于表层声速误差大,测量的地形中出现凸凹不平的波浪形假地形。

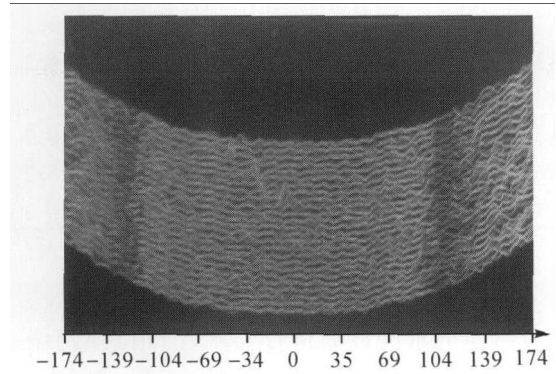


图 2 质量监控窗口显示的凹形假地形

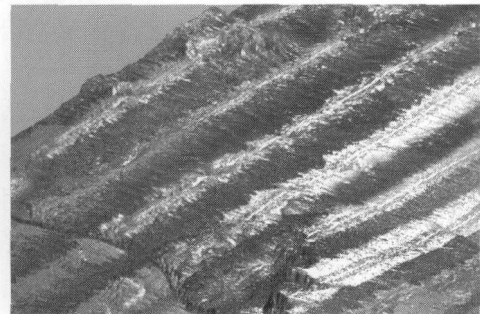


图 3 表层声速误差大测得的凸凹假地形

2. 同一表层声速,不同声速剖面数据

用表层声速仪实际测量的换能器表层声速数据为 1553.5 m/s,覆盖角为 150°。首先使用当时测量的声速剖面数据 V7 进行测量,记录测量的数据;然后分别将图 4 中不同时间测量的声速剖面数据输入工作站,仍然使用同一个表层声速数据 1553.5 m/s,150°覆盖角进行测量。图 4 为 7 个不同时间测量的声速剖面数据曲线图。表 2 为测量中记录的参数数据,其中测量时间“8.28 19”的意思是 8 月 28 日 19 时。

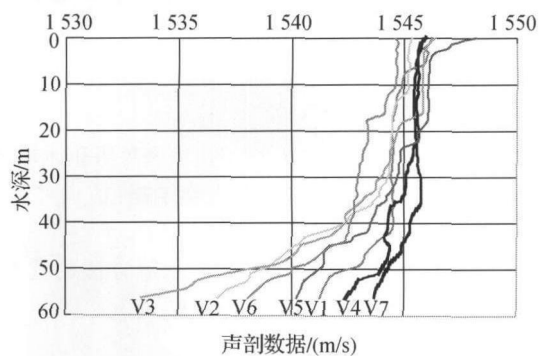


图 4 7 个不同声速剖面数据的曲线图

表2 同一表层声速、不同声速剖面

声速文件	测量时间	中心波束	边缘波束	边缘测深误差 / (%)	宽深比
V1	8.28 19	56.8	58.5	2.99	6.3
V2	8.31 07	56.6	58.0	2.47	6.3
V3	9.03 13	56.5	58.0	2.65	6.2
V4	9.05 21	56.5	57.0	0.88	6.3
V5	9.06 13	56.4	57.0	1.06	6.3
V6	9.09 12	56.2	57.0	1.42	6.2
V7	9.10 13	56.2	56.3	0.18	6.3

表2中使用当时测量的声速剖面V7和表层声速数据测量的水深数据符合要求,而用其他不是当时测量的声速剖面数据测得的数据则不符合要求。但波束覆盖宽度没有很大的变化,边缘波束测量水深误差明显不如同一声速剖面数据不同表层声速时测量的大,这也看出表层声速对边缘波束的影响要比声速剖面数据的影响大。表层声速的正确确保了波束指向角的正确,但不同的声速剖面结构影响了波束在海水介质中不同的传播路径,在声线弯曲改正中造成侧向中心距离和水深的误差,因此声速剖面也是影响多波束测量数据精度的主要因素之一。精确水深数据的获得也与正确的声速剖面数据是分不开的,因此在测量中必须确保声速剖面数据的真实获得,声速剖面数据的平均误差不得大于0.5 m/s。

四、结束语

由于换能器表层声速主要受温度的影响,而温度在一天中的变化是最大的,再加上海水运动和层化的改变,即使同一地点在不同时间表层声速也有较大的变化。表层声速的差异将直接影响海底探测精度,导致海底形态的畸变。因此在换能器附近安装一个表层声速仪是十分必要的,尤其对于弯曲形换能器来说,在测量中可以实时连续获得真实的表层声速。由于声速仪是固定安装在船底,经常受海生物或淤泥等原因造成声速仪故障,因此在测量中,要注意表层声速的变化。当在质量实时监控窗口发现边缘波束测得的地形相对于中心波束发生凸或凹的形状时,应首先判断表层声速仪是否正常,如表层声速没问题,应及时进行声速剖面的测量。

参考文献:

- [1] 李家彪,郑玉龙,王小波,等. 多波束测深及影响精度的主要因素[J]. 海洋测绘,2001(1):26-32.
- [2] 吴英姿. 多波束测深系统地形跟踪与数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2001:80-91.
- [3] 赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学,2002.
- [4] 丁宇. EM950&EM3000 多波束测深系统性能及其应用[J]. 海洋石油,2000(4):29-35.
- [5] 李家彪. 多波束测深原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社,1999.

(上接第3页)

对于精度要求比较高的导航定位则可以通过不同拟合或插值方法拟合精密星历来得到高精度的卫星坐标,Chebyshev 拟合方法是目前最常用的方法。在实际应用中,可根据精度的要求来选择不同的数据处理方式,并以能满足定位精度需求,又可最大限度地提高效率 and 降低成本为标准。

参考文献:

- [1] 洪婴,欧吉坤,彭碧波. GPS 卫星精密星历和钟差三种内插方法的比较[J]. 武汉大学学报: 信息科学版,2006,31(3):516-518.
- [2] 魏二虎,柴华. GPS 精密星历插值方法的比较研究[J]. 全球定位系统,2006(5):13-15.

- [3] 李明峰,江国焰,张凯. IGS 精密星历内插与拟合法精度比较[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(4):77-80.
- [4] 孔巧丽. 用切比雪夫多项式拟合 GPS 卫星精密坐标[J]. 测绘通报,2006(8):1-3.
- [5] 邱蕾,廖远琴,花向红. 基于 IGS 精密星历的卫星坐标插值[J]. 测绘工程,2008,17(4):15-18.
- [6] 韦建超. GPS 精密单点定位的数据处理研究[D]. 长沙:中南大学,2007.
- [7] 涂克楠. GPS 精密单点定位数据处理[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
- [8] 霍夫曼·韦伦霍夫,利希特内格尔,瓦斯勒. 全球卫星导航系统 GPS, GLONASS, Galileo 及其他系统[M]. 程鹏飞,等,译. 北京:测绘出版社,2009:326-327.