

SeaBeam 全海深多波束测深系统及应用

李治远, 豆虎林, 张海泉

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:为更好地发挥 SeaBeam 深水多波束系统在深远海海洋调查中获取高精度地形地貌数据的作用、方便广大调查和研究人员使用,本文以 SeaBeam3012 多波束为例,较系统地分析介绍了其测量技术原理。开展了该系统的硬件组成、设备功能和技术特点等方面的介绍,从声学 and 信号处理等角度对其 Swept Beam 技术进行分析,并以“向阳红 01”船某次调查任务为例,验证了该系统在深远海海洋调查中的应用效果。实例结果表明:SeaBeam3012 系统可获得宽条带、高精度测量结果,性能更优于传统的分扇区扫描发射方式的多波束系统;SeaBeam3012 系统采用 Swept Beam 技术实现了全水深范围内实时精确补偿船体横摇、纵摇和艏摇,使得测深条带在海底几乎平行排列;同时 SeaBeam3012 系统也极大地利用了低频带宽资源,提高了测深分辨率。

关键词:SeaBeam;多波束测深系统;Swept Beam;波束形成;波束控制

中图分类号:P229

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)01-0059-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.01.007

引用格式:LI Z Y, DOU H L, ZHANG H Q. SeaBeam full-depth multi-beam echo-sounder system and its application[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(1): 59-67. 李治远, 豆虎林, 张海泉. SeaBeam 全海深多波束测深系统及应用[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 59-67.

多波束测深系统发射换能器从海面发射较窄的波束条带,通过水听器同时接收从海底不同角度反射的多个回波,得到整个条带的离散水深值^[1]。20 世纪 50 年代,多波束测深系统的出现逐渐取代了单波束系统,极大提高了水深测量的效率和精度,降低了测量成本。多波束测深系统被广泛应用于航道测量、港口测绘、海底路由规划、海洋石油勘探和 underwater 矿产资源寻找等领域^[2-3]。SeaBeam 系列多波束是海洋调查中的主流深水多波束之一,其波束形成采用米尔斯十字技术^[4-7],具备先进的声波发射技术即 Swept Beam 技术。同时,通过采纳更先进的底部算法,可使 SeaBeam 系列多波束实现船体横摇、纵摇和艏摇等姿态^[5-7]的实时补偿。目前我国最新一代综合科考船,如“向阳红 01”、“向阳红 03”、“科学号”、“雪龙 2”等科考船均装备了 SeaBeam 系列多波束,但是国内针对该设备可借鉴的文献较少,本文以“向阳红 01”船安装的 SeaBeam3012 多波束(SeaBeam 系列中的全海深型多波束)系统为例分析了其测量技术原理,以期帮助设备操作人员和研究人员更好地发挥该设备测量功能,改善数据处理方法,获取最佳测量成果。

1 系统介绍

1.1 系统组成

SeaBeam3012 系统属于深水多波束测深系统,相比浅水多波束测深系统,系统组成更复杂,主要包括:波束发射阵列;水听器阵列;发射控制机柜 TCU;接收控制机柜 RCU;辅助设备,如 GNSS 定位设备、艏向和姿态设备、表层声速计和声速剖面仪等,如图 1 所示。

收稿日期:2020-11-23

资助项目:国家自然科学基金项目——海底地形地貌信息高精度分辨率快速获取理论与方法(41576107)

作者简介:李治远(1993—),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: lizy@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

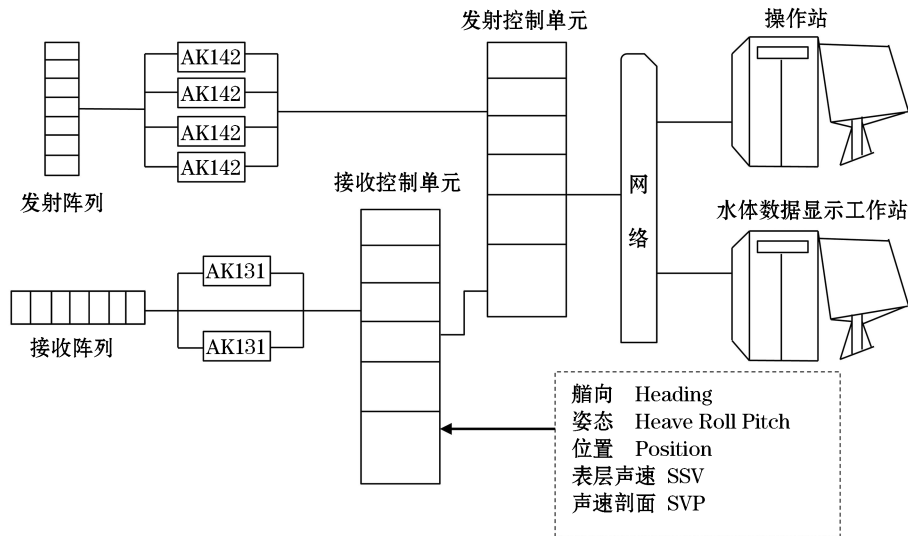


图 1 SeaBeam3012 多波束系统组成示意图

Fig.1 Composition diagram of the SeaBeam3012 multi-beam system

1.2 收发阵列

波束发射阵列由 25 个沿着龙骨方向排列且完全相同的模块组成,每个模块包含 48 个发射元件,按照 4 列 12 行分布,行列之间分别相互平行。此阵列可产生指向性声波,在既定角度下的海底回波更强,易于被水听器检测。接收阵列由 11 个完全相同的模块组成,垂直于航迹方向固定安装,每个模块包含 8 个陶瓷元件,在 2 个方向采用屏蔽技术压制旁瓣波束。

1.3 控制机柜和辅助传感器设备

发射机柜主要包括功率放大器、电容模块、高/低压供电单元、网络交换机和电路板等,为所有发射阵列提供触发信号。在控制声波发射的同时,发射单元给水听器阵列和回波处理单元触发信号,使整个系统同步开始工作。高压供电单元在声波发射前为电容模块蓄能,发射时电容模块为功率放大器提供能量,每个发射阵列都有各自的电路系统,每个功率输出通道都是相互分离的,可输出不同级别的能量,产生不同频率和相位的声波信号。

GNSS 定位设备为系统提供精确的地理坐标和速度信息,目前在深远海作业中使用星站差分技术可实现高精度定位结果,例如英国 Veripos 和荷兰 Fugro 等设备的定位精度可达到亚米级。运动姿态传感器提供发射阵元和接收阵元随船体运动时的横摇、纵摇和艏摇等信息,用于系统姿态实时补偿,法国 IXBlue 生产的 PHINS 和 OCTANS 等光纤罗经系统、挪威 Kongsberg 生产的 MRU5+ 以及加拿大 Applanix 生产的 POSMV 系统均可提供高精度、高频率的姿态信号。GNSS 双天线定位设备和光纤罗经系统可提供艏向数据。表层声速计仅提供发射阵和水听器阵列表面的声速,声速剖面仪提供整个水体不同深度层的声速用于声线跟踪。SeaBeam3012 对接入的表层声速计和声速剖面数据实时处理,节约了数据后处理时间。

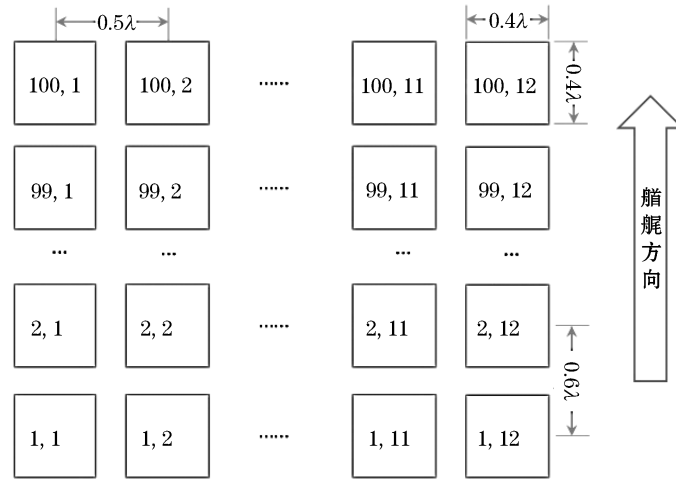
2 Swept Beam 技术

Swept Beam 技术是一种在波束发射过程中能够实时补偿发射阵列随船体的姿态和位置变化的条带式扫测技术。发射阵列包含大量阵元,且等间距排成多行和多列,Swept Beam 技术使每个阵元均可发射不同于其他阵元且频率和相位特定的声波。在初始状态时,相同列阵元发射声波的频率和相位是一致的,但与其

他列不同,一旦开始发射后,每个阵元将根据船体姿态和位置的变化改变各自的频率和相位,从而达到实时补偿的效果。SeaBeam3012 使用二维发射阵列实时补偿纵摇(pitch)和艏向(yaw),沿垂直航迹方向每行有 12 个阵元,每次扫测产生的波束在垂直于阵列平面内横向约 11° ,纵向(航迹方向)约 1.5° 。扫测发射最初从条带的某一端开始,然后连续向另一端扫测,最终在 1 ping 内覆盖整个条带,在扫测过程中会根据不断接收的姿态数据对一个条带内未完成扫测的部分实时补偿纵摇和艏向^[8]。

2.1 Swept Beam 技术

Swept Beam 技术得以实现的原因在于其独特的换能器结构和电路设计。Swept Beam 发射阵列相关参数如图 2 所示,单个阵元的尺寸是 0.4λ 的正方形,2 个相邻阵元横向间距 0.5λ ,纵向间距 0.6λ 。发射阵每次发射声波脉冲的宽度是指主瓣扫过某个给定角度所需要的时间,在条带中央时即为主瓣扫过约 11° 角时所需的时间。越到条带边缘时波束宽度越大,在平面阵列中,波束宽度的变化与主瓣方向的余弦值成反比。在一个条带内为保持相同的脉冲宽度,扫测速率应随主瓣角度的改变而变化。当主瓣轴与竖直方向的夹角 $\theta=60^\circ$ 时,波束横向宽度是 $\theta=0^\circ$ 时的 2 倍,约为 22° 。相应地,当 $\theta=60^\circ$ 时,主瓣扫测速率也应为 $\theta=0^\circ$ 时的 2 倍,这样才能维持脉冲宽度不变。



注:正方形框表示单个发射阵元,数字分别表示阵元行列数; λ 为声波波长

图 2 发射阵列示意图

Fig.2 Schematic diagram of transmit array

在一个条带中,每个角度的波束都是由某一系列阵元相干生成,每一列阵元的声波频率和相位不断变化才能实现波束主瓣不断改变方向,达到扫测目的。相移正是通过改变每一行中相邻阵元间的相位差 $\Delta\varphi$ 来补偿 2 个阵元到达海底某点的波程差引起的相位差。从条带一端扫测到另一端时,相位差 $\Delta\varphi$ 从最大 $\Delta\varphi_{\max}$ 变为 0,再变为最小 $-\Delta\varphi_{\max}$,或与之相反。实现不断改变相位差的简便方式便是改变线性阵列每个阵元发射声波的频率。

发射阵列相邻两阵元间距为 $\lambda/2$,则当主瓣轴方向为角度 θ 时,相邻阵元 A 和阵元 B 的波前到达两阵元的波程差造成的相移为 $180^\circ \times \sin(\theta)$,如图 3a 所示。当时间为 t_1 时,波束主瓣指向最左端,此时阵元 B 与阵元 A 的相位差为 $\Delta\varphi_1$;由于阵元 A 的声波频率比阵元 B 更高,到达时间 t_2 前,两阵元相位差逐渐减小,直至时间 t_2 时,两阵元相位差 $\Delta\varphi_2 = 0$,此时两阵元声波在竖直方向干涉加强,其合成波束主瓣轴竖直向下 ($\theta=0^\circ$);当时间为 t_3 时,两阵元相位差 $\Delta\varphi_3 = -\Delta\varphi_1$,此时合成波束主瓣轴指向最右端(图 3b)。扫测过程中,合成波束频率为两阵元发射声波的平均值。将声呐频率带宽等间隔对称分为 12 组,可将此方法扩展至 12 个阵元的线性阵列。

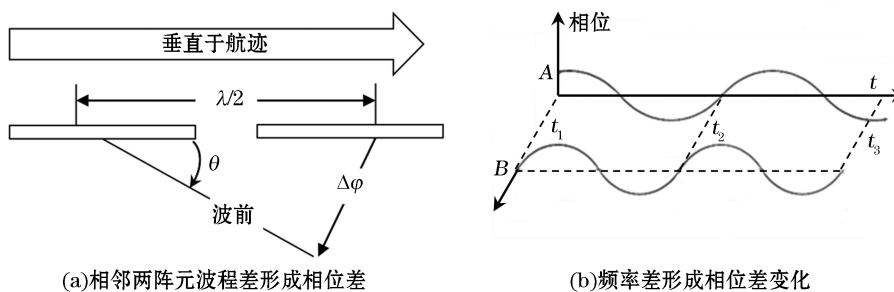


图3 发射阵列相移示意图

Fig.3 Schematic diagram of phase shift and frequency shift at transmit array

波束发射前,设计好各阵元的频率。发射过程中,相邻阵元间的频率差在沿航迹和垂直于航迹的方向上线性变化,这样便可实现波束主瓣在一段时间内从初始角度平滑地扫测至下一角度,这一过程称作一个扫测片段。接着,重新计算阵元声波的后续发射频率,继续向下一个角度扫测。重复该过程,直至完成 1 ping 扫测。SeaBeam3012 发射波束在竖直方向时扫测波束宽度约为 11° ,若此时设定的脉冲宽度为 2 ms,则通过增加阵元间的频率差和相位差,使波束在 1 ms 内从竖直位置 $\theta = 0^\circ$ 处向一侧扫测至 $\theta = 5.5^\circ$ 。因为相邻阵元间距为 $\lambda/2$,相位差为 180° ,所以使波束主瓣扫测至 $\theta = 5.5^\circ$ 所需要相邻阵元间的相位差为 $180^\circ \times \sin(5.5^\circ) \approx 17.25^\circ$,相当于 2 ms 所需相位差变化 34.5° ,即所需频率差变化 47.9 Hz。如果以垂直于航迹方向的发射器阵列中间元件为中心,将此频率差对称分布在两侧,则可以实现合成波束扫测至 $\theta = 5.5^\circ$ 。

在波束横向扫测过程中,可根据船体姿态传感器的横摇值调节主瓣轴方向,同时也要进行纵摇和艏向的补偿,波束在沿航迹和垂直于航迹方向都进行扫测,因此每个阵元都有各自的频率和初始相位。各阵元的初始频率和相位能够使波束按照特定的速率扫测,由姿态传感器数据和船体位移确定。一个条带内的不同扫测片段需要不同更新速率的姿态数据,为此,将一个条带的扫测过程分为多个扫测片段,至少进行 12 次姿态数据更新。因为每个扫测片段开始前都会顾及船体的实时姿态和位移,所以每个扫测片段末端的主瓣指向都在一条线上,最终所有 ping 都基本平行排列,且宽度一致。

2.2 测深分辨率

典型的分扇区扫描系统需要将频率带宽划分给每个扇区,且为便于回波检测,扇区之间的频率需要一定间隔,这意味着将整个可用的频率带宽划分到所有扇区后,每个扇区仅能得到很小的频率子带宽。以可用带宽 2 kHz、每 ping 7 扇区的双条幅系统为例,整个带宽可产生 $2 \times 7 = 14$ 个频率子带宽,减去子区间间隔,获得每个子带可获得的带宽约 100 Hz,则脉冲宽度约为 10 ms。随着现在模/数转换器的发展,制约系统测深分辨率的不再是转换器的采样率,而是波束宽度和频率带宽^[9]。SeaBeam3012 系统基于 Swept Beam 技术,每个阵元都使用所有频带资源,在扫测过程中,最小脉冲宽度为 2 ms,频宽为 500 Hz,则相应的测深分辨率为 1.5 m。

3 系统安装和校准

SeaBeam3012 系统发射阵和接收阵尺寸较大,呈“T”型分布安装。发射阵列长 7.7 m,由 25 个模块构成;接收阵列长 5.5 m,由 11 个模块组成。其换能器只能采用船载固定方式安装,例如船底嵌入式、船底贴装式和 Gondola 安装方式^[9]。“向阳红 01”船的 SeaBeam3012 多波束系统是采用嵌入式方法安装在船底的。安装过程中,要严格控制各模块之间的平整度,同时应确保换能器阵列与船底之间的平整度。安装结束后,应精确测量收发阵列在船体坐标系中的位置和安装倾角^[10],输入采集软件中做波束归位计算。

多波束系统校准是执行测量作业中最重要的内容之一。校准的目的在于量化并改正换能器和船体坐标系的残余安装偏差,以获得更精确的水深值并使水深值对应正确的地理坐标。校准之前,应将各传感器与收发换能器的相对位置精确测量。校准内容包括换能器横摇、纵摇和艏摇安装偏角残余误差,SeaBeam3012 属于深水测量系统,因此定位系统和测深系统之间的时延对测量结果影响较小,不必校准。校准不同的偏差角,要选择相适宜的地形和地物,以致波束脚印能够分辨出目标地物,尺寸大于波束脚印且边缘凸出的目标物能获得更佳的校准效果^[11]。“向阳红 01”船配置的 SeaBeam3012 系统的波束脚印大小与波束指向及水深的关系如表 1 所示。

表 1 波束脚印大小与波束指向角和水深的关系($\theta_{ac}=1.5^\circ$, $\theta_{al}=1.0^\circ$)

Table 1 Relationship between the footprint size and the beam pointing angle and water depth ($\theta_{ac}=1.5^\circ$, $\theta_{al}=1.0^\circ$)

水深 /m	$\theta = 0^\circ$		$\theta = 10^\circ$		$\theta = 20^\circ$		$\theta = 30^\circ$		$\theta = 40^\circ$		$\theta = 50^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m	横向/m	纵向/m
100	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	4	3	7	4
400	7	7	7	7	8	7	9	8	12	7	17	11	27	14
800	14	14	14	14	16	15	18	16	23	14	33	22	54	28
1 000	17	17	18	18	20	19	23	20	29	18	41	27	68	35
1 500	26	26	27	27	29	28	35	30	44	27	62	41	102	52
2 000	35	35	36	35	39	37	46	40	59	35	83	54	136	70
2 500	44	44	45	44	49	46	58	50	73	44	103	68	169	87
3 000	52	52	54	53	59	56	69	60	88	53	124	81	203	105
3 500	61	61	63	62	69	65	81	71	103	62	145	95	237	122

注: θ_{ac} 为波束垂直于航迹方向的开角大小, θ_{al} 为波束沿着航迹方向的开角大小

SeaBeam3012 系统用于深水测量,其校准时选择的水深对校准结果影响较大。当校准横摇时,选择水深 500~2 000 m 为宜;当校准纵摇和艏摇时,选择水深 1 500~3 000 m 为宜。利用美国 Teledyne CARIS HIPS 等商业软件对校准过程采集的数据进行处理,可以获得最佳校准结果。收发阵列是分离的,理论上接收阵列和发射阵列都存在残余安装偏差,但是校准结果应当输入在船型文件的接收阵列中,因为波束坐标系是以接收阵列为参考中心的。“向阳红 01”船按照校准流程获得的安装偏角校准结果:横摇偏角为 0.59° ,纵摇偏角为 -0.39° ,艏摇偏角为 0.42° 。

4 实例应用

SeaBeam3012 多波束系统在深远海海底地形地貌调查中应用较多,在调查作业过程中,测深和覆盖宽度之间的对应关系及水深测量准确度是调查人员最为关注的两方面内容,也是评价多波束性能优劣的关键指标。多波束测量结果不仅受系统结构、安装偏差等因素影响,同时也受外部传感器的测量精度以及海洋环境噪声、海况、船速和地质情况等因素影响^[12]。本文以“向阳红 01”船在南海某海域执行调查任务的应用为例,介绍分析 SeanBeam3012 系统的实际应用效果。本次测量实例中,系统配套使用的外部传感器有:英国 Veripos 公司生产的 LD7 高精度星站差分定位系统、法国 IXsea 公司生产的 PHINS 光纤姿态传感器、加拿大 AML 公司生产的 Minos 声速剖面仪和 Micro SV 表层声速计。这些传感器都是市场上各类调查设备中

的主流产品,基本代表了行业产品的最高水平,完全满足 SeaBeam3012 系统对辅助传感器设备的性能要求,最大程度地降低了外部传感器对多波束测深的影响。调查实施前,测量在不同航行速度下“向阳红 01”船的噪声级,当船速为 2~12 kn 时,测得背景噪声为 43~50 dB。本次调查作业过程中,海况为三级,同时多波束测量期间开启浅地层剖面测量仪,结果显示测量区域属于泥质底质。测量过程中截取的部分采集画面中显示的条带空间分布如图 4 所示。

由图 4 可以看出,各条带内的波束脚印几乎是相互平行排列的,每个条带垂直于航迹分布,且同水深的条带覆盖宽度几乎一致。基于 Sector Scan 技术的多波束测深系统往往会产生条带内各扇区间前后重叠或左右覆盖不连续等现象,SeaBeam3012 基于 Swept Beam 技术进行实时姿态补偿,实现了波束脚印在沿航迹方向等间隔分布,有效地保障了测深分辨率沿着航迹方向的一致性。

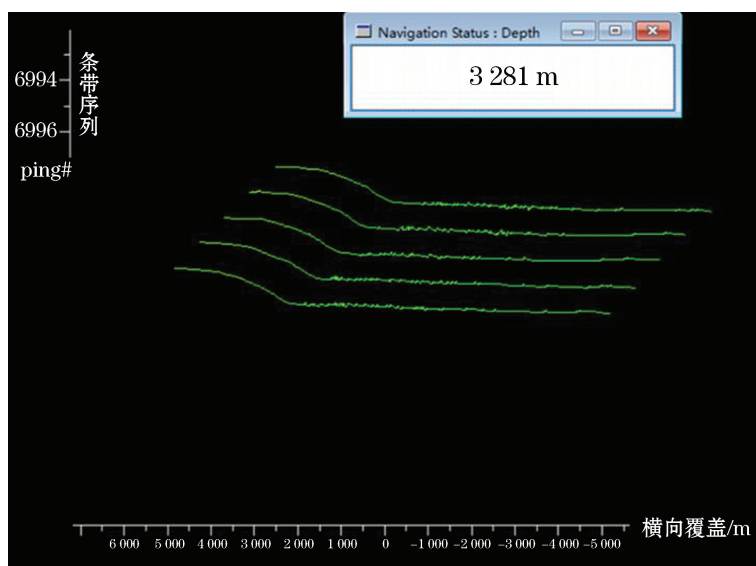


图 4 SeaBeam3012 采集时条带空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the time swaths acquired by SeaBeam3012

多波束测深系统的测深值与对应覆盖宽度之间的关系是进行测线间距布设的重要依据。在本次测量过程中,统计了 1 000~4 000 m 水深范围内 SeaBeam3012 系统的测深值与对应覆盖宽度数据并绘制成图,与设备制造商德国 ELAC Nautik 公司提供的 SeaBeam3012 多波束系统的测深(Z)与覆盖宽度(W)关系图进行对比,结果如图 5 所示。

由设备制造商提供的测深和覆盖宽度的对应关系(图 5)可知,覆盖宽度约为对应测深值的 5.5 倍,而本次实际测量的覆盖宽度约为测深值的 3.5 倍,这是因为:设备商提供的测深和覆盖宽度对应关系并非实测结果,而是在背景噪声为 40 dB、脉宽为 10 ms、吸收损失为 1.2 dB/km 且在最大能量和最大发射开角(150°)等理想条件下的模拟结果;本次实际测量中,船速为 10~12 kn,背景噪声为 45~50 dB,发射开角为 120° (为抑制边缘波束的噪声),加之采用嵌入式安装的换能器,它受气泡影响较大,所以最终实际测量的宽深比较小。

水深测量准确度评估指标是检验多波束测深系统测量精度的重要依据。在《海洋调查规范:第 10 部分 海底地形地貌调查》^[13]中,水深测量准确度评估指标的定义为:

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}}, \quad (1)$$

式中, M 是重合点水深不符值中误差, d_i 是主测线和联络测线在重合点 i 处的水深不符值, n 是主测线和联络测线的重合点数^[13]。本次测量过程中按照测量规范布设了主测线和联络测线,选择其中的 5 条联络检查

测线(I~V),经过粗差别除后进行准确度评估指标计算,结果如表2所示。

由表2可知,SeaBeam3012多波束测深系统的超限点占比结果均小于4%,这完全符合《海洋调查规范:第10部分 海底地形地貌调查》^[14]中对测量准确度评估的要求(超限点占比的限差为10%,水深大于30 m时的主检不符值的限差为水深的2%)。

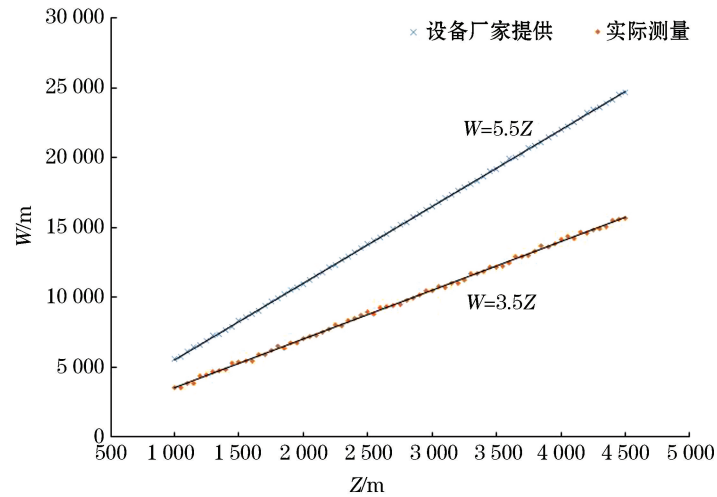


图5 SeaBeam3012系统测深与覆盖宽度关系

Fig.5 Relationship between the bathymetry and the covering width of the SeaBeam3012 system

表2 测深值准确度评估结果

Table 2 Results of the accuracy assessment

检查测线	Z_{Mean}/m	$n/\text{个}$	M/m	$M:Z_{\text{Mean}}/\%$	超限点占比/%
I	3 432	180 604	16	0.46	1.44
II	3 576	22 3641	17	0.47	2.03
III	3 698	101 453	18	0.48	2.67
IV	3 256	156 788	15	0.46	3.01
V	3 880	120 768	21	0.54	2.57

注: n 为重合点数; Z_{Mean} 为检查测线的平均水深值, $M:Z_{\text{Mean}}$ 为主检不符值

5 结 语

首先介绍了 SeaBeam3012 全海深多波束测深系统的硬件组成,结合硬件组成深入研究了 Swept Beam 技术,分析了该技术采用频移和相移方式实现波束在整个条带内的扫测并进行姿态实时补偿的过程。然后,对 SeaBeam3012 多波束测深系统的安装和校准方法开展分析讨论,进而分析波束脚印大小与波束角、水深的关系,该关系可作为校准时选择适宜地形地貌的参考。最后,以“向阳红 01”船安装的 SeaBeam3012 多波束测深系统在南海某海域执行测量任务为例,分析了实际测量过程中系统测深与覆盖宽度的对应关系及系统的测深准确度评估指标。得出结论:

1)在水深 1 000~4 000 m 范围内,SeaBeam3012 多波束测深系统的测深和覆盖宽度的对应关系与设备商给出的结果存在较大差异,该现象是由海况、设备安装方式、船体噪声、海底地质和发射能量及开角等多方

面因素造成的。

2) SeaBeam3012 多波束测深系统的准确度评估指标远小于《海洋调查规范:第 10 部分 海底地形地貌调查》中要求的限差,完全符合测量规范中的要求。

3) SeaBeam3012 多波束测深系统获得的测深条带在空间排列整齐,完整均匀的覆盖效果十分有利于测量船按照前期的测线规划开展调查,避免后期补测造成的船时浪费和成本增加。

参考文献 (References):

- [1] WAITE A D. Sonar for practising engineers[M]. 3rd ed. WANG D S, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 35-38. WAITE A D. 实用声呐工程[M]. 3 版. 王德石, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 35-38.
- [2] TANG Q H, JI X, DING J S, et al. Research progress and prospect of acoustic seabed classification using multibeam echosounder[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 1-10. 唐秋华, 纪雪, 丁继胜, 等. 多波束声学底质分类研究进展与展望[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 1-10.
- [3] WANG N, XU Y C, TAO C F. Research on 3D visualization of multi-beam seabed terrain[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 203-209. 王楠, 徐永臣, 陶常飞. 多波束海底地形三维虚拟仿真研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 203-209.
- [4] TIAN T, LIU G Z, SUN D J. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2000: 35-40. 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000: 35-40.
- [5] MANDAYN S, KEERTHIYASAN M B, MARTIN D R, et al. Radial streak artifact reduction using phased array beamforming[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2019, 81(6): 3915-3923.
- [6] CHEN H S. The calibration method and standard device for sound source location system based on beamforming method[D]. Yiwu: China Jiliang University, 2016: 7-15. 陈杭升. 基于波束形成原理的声源定位系统校准方法和校准装置[D]. 义乌: 中国计量大学, 2016: 7-15.
- [7] ZHAI C Y. Research on beamforming and its application in underwater acoustic communication[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 10-26. 翟昌宇. 波束形成技术及其在水声通信中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 10-26.
- [8] L-3 ELAC Nautik. Operator manual multibeam system SeaBeam3012[EB/OL]. [2021-02-07]. <https://download.csdn.net/download/LZY819483484/15452965>.
- [9] LI Z Y, ZHANG D J, WANG H Y, et al. Layout and optimization of investigation equipment on marine research vessel[J]. Ship & Boat, 2017, 28(Suppl.1): 92-100. 李治远, 张道建, 王海员, 等. 海洋综合科考船调查装备的布局与优化[J]. 船舶, 2017, 28(增刊 1): 92-100.
- [10] LI Z Y, WU Y T, HU J, et al. The method to measure the installation location and misalignment angle of sensors on a research vessel [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(21): 81-85. 李治远, 吴永亭, 胡俊, 等. 科考船传感器安装位置及偏角测定方法[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(21): 81-85.
- [11] HUANG K. Seafloor bathymetry tracking with multi-beam echo sounder[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. 黄凯. 多波束测深系统地形跟踪技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [12] ZHAO J H. Modern marine surveying and charting[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 153-165. 赵建虎. 现代海洋测绘[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008: 153-165.
- [13] National Center of Ocean Standards and Metrology. Specification for oceanographic survey: Part 10 Submarine topography and geomorphology: GB/T 12763.10—2007[S]. Tianjin: National Center of Ocean Standards and Metrology, 2008: 7-12. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 10 部分 海底地形地貌调查: GB/T 12763.10—2007[S]. 天津: 国家海洋标准计量中心, 2008: 7-12.

SeaBeam Full-Depth Multi-beam Echo-sounder System and Its Application

LI Zhi-yaun, DOU Hu-lin, ZHANG Hai-quan

(*First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: To make the SeaBeam3012 multi-beam echo-sounder system play a better role in the deep sea and obtain precise topographic and geomorphologic data, the hardware compositions, equipment functions and technical features of the system are introduced, and the “Swept Beam” technology of the system is analyzed from the aspects of acoustics and signal processing. Through the surveys by using research vessel “Xiang Yang Hong 01”, the application effects of the system in the deep ocean investigation have been verified. The practice results have showed that the SeaBeam 3012 system can obtain wide swaths and highly precise results and has the performances much better than those of the traditional multi-beam system which uses a sector scanning method. With the application of “Swept Beam” technology, the SeaBeam3012 system can compensate the roll, pitch and yaw of the vessel in real time and precisely in the range of full water depth, making the bathymetric swaths arrange nearly parallel on the seafloor. In addition, the SeaBeam3012 system uses to the most extent the low-frequency band resource, thus improving the bathymetric resolution.

Key words: SeaBeam; multi-beam system; Swept Beam; beam-forming; beam-steering

Received: November 23, 2020