海底大地基准建设技术及其研究进展

刘焱雄[1,2,3], 李梦昊[1,2,3], 刘 杨[1,2], 何秀凤[3],
陈冠旭[1,2], 张林虎[1,2], 唐秋华[1,2]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
2. 自然资源部 海洋测绘重点实验室，山东 青岛 266061；
3. 河海大学 地球科学与工程学院，江苏 南京 211100）

摘 要：海底大地基准网将是新一代国家综合 PNT（Positioning, Navigation and Timing）系统建设的重要组成，也是未来海洋立体观测系统的基础设施。联合全球卫星导航定位系统和声学测距的 GNSS-声学定位技术可用于高精度水下定位，直接服务于海底大地基准网建设。本文聚焦海底大地基准建设技术，简要梳理了国内外水下声学导航定位技术及系统背景，分析总结了海底大地基准建设的站址勘选及布放技术要点，在讨论 GNSS-声学观测平台和数据采集技术基础上，重点探讨了 GNSS-声学定位的数据处理方法研究进展，最后简单介绍了 GNSS-声学的当前主要应用并展望了未来海底大地基准建设的技术需求和应用问题。

关键词：海底大地基准网；水下声学导航定位；GNSS-声学定位

中图分类号：P229 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2022）04-0684-17

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220522002

引用格式：刘焱雄, 李梦昊, 刘杨, 等. 海底大地基准建设技术及其研究进展[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4)：684-700.
LIU Y X, LI M H, LIU Y, et al. Research progress of seafloor geodetic datum construction technology[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4)：684-700.

我国是海洋大国，海域面积十分辽阔。认识海洋、经略海洋，探索海洋奥秘、发展海洋经济、深耕蓝色国土，需要建设海底观测网等基础设施；海底观测网已是继地面/洋面、空间之后，观测地球系统的第三个平台[1]。海底大地基准网是海底观测网的重要组成，是国家大地基准网由陆域向海域的自然延伸[2-3]，也是构建陆海空天一体化空间基准的国家基础设施。海洋空间基准是一切海洋活动的前提和基础，大力发展海洋大地测量技术，加快布设海底大地基准网，满足国防安全保障和经济社会发展需求，对推动海洋导航定位技术进步、推进我国海洋强国战略实施具有重要支撑作用。

海底大地基准网建设是当今世界大国必争的高技术战略领域。美国、加拿大、俄罗斯等海洋强国早已开启海底大地基准网的研究[2,4-6]，日本也建立了海底大地基准网[7-8]。目前，我国仅仅在南海 3 000 m 水深的海域开展了海底大地基准网试验，但尚未大规模布设海底大地基准网[2]。研究海洋大地测量技术，完善自主海底大地基准基础设施，对支撑我国 2035 年前建成国家综合 PNT（Positioning, Navigation and Timing）系统意义重大。

海底大地基准网由若干海底大地基准站组成，需要首先确定这些基准站的准确位置。联合全球导航卫

收稿日期：2022-05-22

资助项目：国家重点研发计划项目——国家 PNT 体系弹性化架构设计与关键技术示范验证（2020YFB0505805）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——广播式远程精密水下导航定位技术与方法研究（2022S03）；国家自然科学基金项目——顾及声速水平梯度影响的海底大地基准点 GNSS-A 精密定位方法研究（42004030）；青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费“问海计划”项目——水下通信导航核心关键技术研究（2021WHZZB1002）；山东省技术创新引导计划项目——海洋弹性 PNT 试验系统构建与应用示范（2020YFB0505800）

作者简介：刘焱雄（1968—），男，研究员，博士，博士生导师，主要从事海洋测绘、GNSS/声学定位技术方面研究. E-mail: yxliu@fio.org.cn

（陈 靖 编辑）

星系统(Global Navigation Satellite System，GNSS)和水下声学定位系统(GNSS-声学或 GNSS-A)，可实现海底大地基准站的位置标定，可以将全球统一的时空基准传递到海底[3]。稳定的海底大地基准站是海底大地基准网的基础和构成，海底大地基准站建设需要历经站址勘选、设备布放回收、站址位置标定等流程。鉴于此，本文聚焦海底大地基准建设技术，首先梳理水下声学导航定位系统及技术背景，然后总结海底大地基准建设的关键技术要点，最后探讨 GNSS-A 定位数据处理方法，并对未来海底大地基准网建设技术及应用进行了展望。

1　水声导航定位系统及技术

1.1　水下声学导航定位系统

水下声学定位系统依据声学单元的距离分为超短基线系统(＜1 m)、短基线系统(1～50 m)、长基线(100～6 000 m)系统等类型[9]。国外声学定位系统的研发较为成熟，产品呈现多样化和系统化。挪威 Kongsberg Simrad 公司研发了 HiPAP 系列和 μPAP 系列水下声学定位系统，作用距离可达 10 000 m，测距精度达到 0.02 m[10]；法国 iXBlue 公司的 GAPS 系列产品集成了惯导设备，定位精度可达到 0.2% 斜距，Posidonia 超短基线定位系统最大作用距离超过 10 000 m[11]；英国 Sonardyne 公司研发的水下声学定位系统，如 Fusion 系列、Ranger 系列、Scout 系列以及 Marksman 系列等，囊括了长基线、短基线、超短基线定位系统以及组合定位系统[12]。

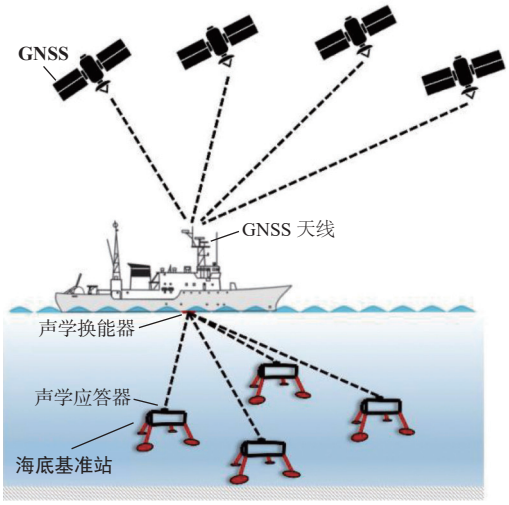
美国、俄罗斯等国家已开启新型水下导航系统研发[13]。2015 年, 美国国防高级研究计划局(DARPA)提出构建“深海导航定位系统”，开始研究在海床上安装声学信号源，组成类似全球定位系统(GPS)的水下 GPS；2016 年，美国在菲律宾海开展海洋声学深水计划，验证水下 GPS；俄罗斯也开展了水下导航定位系统研制，并通过低频、被动接收的水声定位方式进行水下导航误差校准。

我国水声定位技术研究和系统研发起步较晚，目前进入快速发展期。哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、西北工业大学和自然资源部第一海洋研究所等单位对水下声学导航定位技术进行了深入研究[6,9,14]，经过近 20 a 的努力，国内具备了全海深高精度声学导航定位能力。在国家“十一五”“国家高技术研究发展计划”的支持下，中国测绘科学研究院和中船重工 715 研究所研制了“水下 GPS 高精度导航定位系统”。哈尔滨工程大学牵头、自然资源部第一海洋研究所合作研制了“长程超短基线定位系统”，工作水深超过 3 700 m，作用距离达到 8.6 km，定位精度为 0.2%～0.3% 斜距，达到国际先进水平，并获得国家技术发明二等奖。

1.2　GNSS-A 定位技术研究背景及进展

全球导航卫星系统和声学组合的定位方法(GNSS-A)由美国斯克利普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)率先提出[4,15]，是一种将海面平台上的动态 GNSS 定位和水下声学测距(海面平台与海底声学信标之间)相组合的技术。通过 GNSS-A 定位，可以实现国际椭球参考框架(International Terrestrial Reference Frame，ITRF)下海底信标的位置测定(图 1)。美国 Scripps 海洋研究所采用 GPS-A(GNSS-A 的早期形式)定位系统同时对 3 个海底信标进行声学测量，24～48 h 连续测量的点位精度达到厘米级，80 h 连续测量的点位误差则小于 1 cm[16-17]。日本东京大学于 1987 年首次尝试在 Sagami 湾进行海底定位实验[18]。在 20 世纪 90 年代中期，日本海上保安厅海洋水文部开始研发 GPS-A 定位系统，2000 年在日本南部海槽 2 000 m 水深的熊野盆地部署了海底大地基准点[19]。目前，日本已采用 GNSS-A 定位系统，获取了许多重要的海底大地测量结果，包括探测地震之间的关系、同震以及震后与地震周期有关的俯冲区变形，和山脊变形边界附近的板块运动等[5,20]。近年来，在国家重点研发计划项目“海洋大地测量基准与海洋导航新技术”的支持下，

杨元喜院士带领国内相关科研团队，开展了海洋大地基准的技术攻关，采用 GNSS-A 进行了海底大地基准站位置标校试验，并布设了 3 000 m 水深的海底大地基准点，实现了分米级精度的海底定位和米级精度的水下声学导航[2]，取得了系列研究成果。



注：船只的图片引自文献[5]。

图 1 GNSS-A 定位原理

Fig. 1 Schematic of GNSS-A positioning

目前，我国 GNSS-A 定位技术方面主要集中于定位模型和算法研究，包括误差处理、随机模型和函数模型优化等。为了提高定位效率，Yang 等[21]、Zhao 等[22]研究了利用声速剖面的先验信息反演声速进行定位解算的方法；孙文舟等[23]利用经验正交函数（Empirical Orthogonal Function，EOF）反演了声速剖面信息，张林虎等[24]研究了基于分层 EOF 函数的区域声速场模型构建方法。为了提高定位精度，Chen 等[25]针对杆臂矢量垂向偏心误差与海底基准点高程间的耦合问题，提出了基于样本搜索法的偏心误差解算方法；Chen 等[26]、Chen 等[27]、赵建虎等[28]、曾安敏等[29]分析了圆形航迹的定位优势。针对声速结构时空变化，Yang 等[30]结合 Fujita 等[31]方法，从定位残差中拟合声速长期时域变化项、声速周期性变化项；刘杨等[32-33]通过构建声速时变引起的水声垂向总时延，联合估计了声速时域变化和海底大地基准点位置，估计改正的声速与实测声速的偏差小于 0.13 m/s，提高了海底大地基准点坐标的准确度；Wang 等[34]采用两步估计法，分别估计了海底大地基准点的位置、系统误差，以及声速长周期项误差。关于随机模型优化，Zhao 等[35-36]、王薪普等[37]提出了与声线入射角相关的分段指数随机模型，马越原等[38]指出了海洋环境的复杂性影响随机模型的效果。考虑函数模型对定位的影响，Li 等[39]、闫凤池等[40]研究了基于单向、双向声学传播时间的定位观测方程；邝英才等[41-42]研究了联合解算船载换能器与海底大地基准点位置的方法；Xu 等[43]基于 GNSS 差分定位思路，提出了水下定位差分观测方程；Chen 等[26]、孙文舟等[44]研究了附加深度约束的差分定位算法；Xue 等[43]进一步证明了水下定位差分解和非差解的等价性。赵建虎等[45-46]提出了基于绝对标校+相对测量的海底网平差思路，实现海底大地基准网的整体解算。面对复杂海洋环境，为了增加海底大地基准测量的可用性、可靠性、精确性，需要进一步完善定位算法，建立海洋场景的自适应弹性随机模型、弹性函数模型[30]。

2 海底大地基准建设关键技术

海底大地基准站包含水下潜标和海床基两类。水下潜标基站一般由浮球、观测设备、缆绳、声学释放器、配重等组成[47-48]。随着潜标离海底高度的增加，可以有效扩大基准站的服务范围。由于水下潜标随着海水运动而晃动，潜标通常需要搭载压力计、姿态传感器等设备以实时修正其位置，因此这种类型的海底基准站技术难度大、位置精度低。海床基是主要的海底基准站布放方式，具有稳定性好、集成度高等优势[49]。海床基基站通常包括坐底平台（包括配重）、声学释放器、水下电源、回收浮体，以及搭载的各种传感器等。常见的浅海海床基基站外观主要以圆形和多边形为主，圆形尺寸一般以直径 1～6 m 为主，如加拿大“海王星”海底观测网（NEPTUNE）使用的海床基直径约 6 m；意大利 PROTECOSUB 公司的海床基以圆形结构为主，美国伍兹霍尔海洋研究所研制的海床基则以多边形结构为主。深海海床基基站通常配备支撑框架，框架中间部分集成有观测仪器、电池仓等设备，框架支撑腿与脚部配重盘则作为坐底的配重。

稳定的海底大地基准站是海底大地基准网的基础，“放得稳、测得准、待得久”是海底大地基准站的建设目标。“待得久”主要涉及电源能量供应问题，这里暂不讨论；本文按照“放得稳”和“测得准”的要求，从海底基准的站址勘选、布放回收、位置标校等关键技术，讨论海底大地基准建设的研究进展。

2.1　站址勘选

海底大地基准站的站址尤为关键。由于海底环境复杂，极易造成基准站失稳，导致海底大地基准网失准，进而影响水下导航定位精度。为此，海底大地基准站的站址选择一般遵循大范围(面)→局部区域→布放点(点)的总原则，需要开展桌面研究和现场勘测等工作，涉及到海底地形、地貌、底质、水文、声学等观测技术。由于水深地形、地貌底质、水文环境调查属于通用技术，这里不再赘述，只介绍相关工作和技术要求。

2.1.1　桌面研究

收集历史调查资料，包括水深地形地貌、工程地质、水文环境、声速环境等资料，分析海底地形地貌特征，考虑海底浅表层底质分布及其工程地质特征，了解海底底流和声学传播状况，获取海底平整度、浅表地层活动性与稳定性，以及水动力特征，同时依据海底大地基准站的外部形态、重量、工作方式与性能指标[2,50]。初步甄选海床自身稳定性较好的局部区域作为海底大地基准站布放海区，保证站址选择的合理性与科学性。桌面研究主要考虑如下因素。

1) 地形坡度

收集水深地形数据，生成海区坡度 DEM(Digital Elevation Model)和坡度等值线。以 3°和 5°为阈值进行划分，按坡度将海区划分为小于 3°区域、3°～5°区域、大于 5°区域。尽量选取坡度小于 3°海区。

2) 动力地貌类型

选取海区海底地貌应具有地形平坦、起伏小等特征，如深海平原地貌，其底部流场相对稳定，且具有地面平坦或无起伏等特征。

3) 表层沉积物承载力

选取海区表层沉积物类型应以粉砂和黏土为主；以粉砂(包含粉质黏土和黏土质粉砂等类型)的承载力满足地层稳定和承载力条件。

4) 地质灾害

不管是具有活动能力的破坏性地质灾害，还是不具有活动能力的地质灾害，都是对海底稳定性造成影响的潜在因素。因此，海区的选择要避开各种海底地质灾害的分布区域，如断层、滑坡、冲刷槽、海底峡谷、沙波沙丘、麻坑、浅层气、易液化砂层、软弱地层等。

5) 试验成本

除了上述从自然环境条件进行布放位置的考虑，同时从交通便利性角度出发，对距离和通航条件进行分析。考虑试验成本，确定试验海区。

2.1.2　现场勘测及定址

现场勘测采用多波束测深系统(Multi-beam Echo Sounder System)、侧扫声呐仪(Sidescan sonar)、浅地层剖面仪(Sub-bottom Profiler)等高分辨声学探测系统，利用高频和低频声呐，对目标海域进行全覆盖水深、海底地形地貌测量、工程地质调查和水文环境调查，查明目标海域的详细环境信息[50]。其中，多波束测深系统从海面换能器发射声波束条带，通过水听器接收海底反射回波, 以获取高精度水深信息、海底地形数据，如德国 L-3 ELAC Nautik 公司的 SeaBeam 3012 全海深型多波束，发射频率为 12 kHz，测量水深为 50～11 000 m[51-52]；多波束测深系统还能获取海底的反向散射强度数据，用于海底底质分类[53]。侧扫声呐的发射频率范围为 50～500 kHz，可用于海底地形地貌测量[54]。浅地层剖面仪的发射频率较低，具有较强的穿透力，

能够有效地穿透海底数十米的地层，通过反射波的走时、振幅、频率等信息，连续探测水下浅部地层结构、构造和底质等信息[55]。

勘测期间，配合多波束测深、侧扫声呐扫测等需要，采用声学多普勒流速剖面仪（Acoustic Doppler Current Profiler，ADCP）、重力取样仪等进行海洋流场测量、底质取样调查也是重要的勘测内容。海底大地基准站的背景声速场是站址勘选需要考虑的重要因素，需要开展声速剖面现场测量。

对现场勘测数据进行精细处理和系统分析，获得调查区域的水深地形地貌、沉积物类型、工程地质特征、水文环境和声速环境等成果。根据这些成果，选取海底起伏度、海底坡度、沉积物类型分布、构造稳定性、工程地质力学性质、地层冲淤特征与地层稳定性等作为站址勘选主要评价指标。在遵循选址总原则的基础上，基准站需布放安全、运行稳定，满足作业要求，由此确定海底大地基准站站址勘选的 5 级标准，其中 1 级最优、3 级适宜、5 级最差（表 1）。

表 1 海底大地基准站站址勘选指标集与评价标准

Table 1 Index set and evaluation criteria of station site survey

分 级	地形坡度/(°)	地貌破碎度（平整度）	浅表底质特性	地质灾害因素	底流流速/(cm·s^{-1})
1	＜0.5	平整、无起伏海底平原	硬黏土，强度＞30 kPa	无	＜5
2	0.5～＜1.5	破碎度为 0	强度为 20～30 kPa	地层中有基岩、古河道等	5～＜10
3	1.5～＜3	轻微起伏、小型凹凸微地貌	中等强度，10～20 kPa	高压浅层气水合物	10～＜20
4	3～＜5	小型沙波与沙脊中型凹凸微地貌	强度为 5～10 kPa	软弱夹层、易液化层	20～＜30
5	≥5	陡坎、陡崖	淤泥土，强度＜5 kPa	滑坡	≥30

2.2 布放与回收

海底大地基准站的布放包括直接投放方法、吊装布放法、ROV（Remote Operated Vehicle）布放法等。直接投放方法针对浅海及简单水下环境的场景，通常在贴近水面上方将脱钩打开，利用基准站自重下沉到海底[56]。该方法操作简单、投放速度快，但受海水动力影响，基准站的实际坐底地点与预期位置容易出现较大偏差。吊装布放法是在调查船甲板由绞车进行吊装布放[48,56]（图 2a）；布放时绞车以 0.5～1.0 m/s 的速度下放基准站，为避免触碰海底，基准站距海底约 10～20 m 时，由声学释放器甲板单元向水下发送释放指令，命令声学释放器脱钩，基准站自由落体坐底。吊装布放法容易受到涌浪及海流的共同作用，吊放状态下基准站的摆动幅度可达十多米，无法实现精准定点布放。ROV 布放法可将海底大地基准站精准布放于预定位置[57]，该方法首先通过 ROV 将海底大地基准站运送到近海底位置并悬停，然后操作 ROV 移动到目标位置后释放海底大地基准站。加拿大科学潜水设施的海洋科学遥控操作平台（Remotely Operated Platform for Ocean Science，ROPOS），采用 ROV 布放法，先后实现了加拿大和美国的观测网设备的精确定位布放。ROV 布放法操作复杂，且需要多种设备同时作业，成本较高。

海底大地基准站回收主要有 2 种方式[48-49]。一种方式是水面甲板单元向海床基声学释放器发送释放指令，海床基释放器打开，丢掉配重，浮体携带仪器上浮海面并打捞回收。另一种方式是利用浮体携带的回收绳索将海床基打捞回收，这种方式只适合于浅海，通常，仪器设备回收后可抛弃海床基。



(a) 吊装布放　　(b) 海底大地基准站结构示意图

图 2　海底大地基准站布放示例

Fig. 2　Example of seafloor geodetic station deployment

2.3　位置标校

位置标校即获得海底大地基准站的绝对位置，需要通过 GNSS-A 定位系统将陆地的绝对基准传递到海底大地基准站。采用海床基方式布放的海底大地基准站，一般需在海床基上搭载一个声学应答器，应答器的相位中心即为海底大地基准站位置(图 2b)。另外，海底大地基准站也需配备电池以供长期、稳定地运行[58]，也可搭载其他传感器，如自容式温盐深测量仪、压力传感器等设备[59]。海底大地基准站在布放时，一般按照组网的方式，通常由 3～6 个基准站组成三角形或方形的基准网[60-62]；位置标校时通常采用圆形标校线路，圆形经验半径一般采用 1.414 倍水深。

2.3.1　GNSS-A 定位系统

GNSS-A 定位系统主要包括 GNSS 天线/接收机、水下声学传感器、姿态传感器等[60,63]。位置标校首先通过秒脉冲信号或 GPS 时间完成 GNSS-A 定位系统的时间同步，然后使用 GNSS 测量海面平台上 GNSS 天线的位置，利用 GNSS 天线和声学换能器之间的相对位置，以及海面平台的姿态(航向、俯仰和横滚角)，确定海面平台上声学传感器的位置，接着基于声学传感器发射声学信号并接收来自海底声学应答器的反射信号，获得海面声学传感器和海面应答器之间的往返传播时间 (Time of Flight，TOF)，最后，通过最小化 TOF 观测值和计算值之间的偏差，估计海底应答器的位置。

GNSS-A 定位系统使用的海面观测平台种类较多，主要包括调查船、无人艇、浮标等观测平台[64-67]。

1)调查船观测平台

调查船观测平台根据观测方式主要包括船舷悬挂方式、船底固定方式两种[60]。船舷悬挂方式将设备安装在船舷的一根杆子上，GNSS 天线和姿态传感器安装在杆的顶部，声学换能器安装在杆的底部。每次采集数据时，连接杆需要单独安装；连接声学换能器的一端放入海水中，为避免干扰、保证观测质量，需尽量远离螺旋桨和发动机，远离船底 1 m 以上。为了避免船只螺旋桨引起的噪音和水中负荷过大而导致的杆子变形，要求在船只漂流或低速运行时进行声学测量[31]。船舷悬挂方式需要花费 2～4 d，才能够获得足够多的声学观测数据。船底固定方式将设备固定安装在船上，如声学传感器安装在船底月池内，GNSS 天线安装在主桅杆顶部。船底固定方式能够在船只沿预定航迹航行的情况下进行声学观测，并且观测时间可缩短至 16～24 h。为了进一步提高观测频次、减少观测时间，开发了多声测距换能器，可在一个观测序列中进行多次信号发射和接收[60]。这种新的换能器连续发射声学信号，一次性接收所有的回波信号，可以在 3～4 h 内完成声学观测。

调查船观测平台能达到厘米级海底定位精度，可以获取高分辨率、长周期的海底基准站位置变化，但

需投入大量资金和人力，且作业期间一旦船体安装的换能器发生故障，无法及时进入船坞修复，使得长期连续观测变得困难[68]。由于观测频次的不足，调查船观测平台难以检测到海底基准站短期位置变化，需要提高 GNSS-A 观测的时间分辨率，理想解决方案是使用海面无人平台进行连续观测，如浮标、海面无人艇等[58,65-66,69]。

2）无人艇观测平台

Kido 等[65]测试了使用海面无人艇（Autonomous Surface Vehicle，ASV）搭载的 GNSS-A 定位系统，其配备导航和声学测距系统的 ASV，可以获得与调查船观测平台同等质量和精度的结果，有助于降低调查成本、增加 GNSS-A 观测频次[70-71]。与调查船观测平台相比，ASV 动力系统由大型电池提供电力，并由船上的柴油发电机充电，推进器噪音可以忽略不计；且 ASV 在定点位置可保持 3 m 以内，沿着预定航迹航行的路径差异小于 2 m。因此，ASV 可作为 GNSS-A 定位的候选平台。Sakic 等[72]将 GNSS-A 定位系统安装在美国 L3 Harris 公司设计的小型双体船上，系统主要包括 GNSS 天线/接收机，超短基线模块，并集成惯性系统来校正船体位置；该 GNSS-A 定位系统对浅水应答器的定位实现了 5 cm 的可重复性。Linuma 等[68]证明了波浪滑翔器（Wave Glider，WG）同样具备搭载 GNSS-A 定位系统的能力。波浪滑翔器可以依靠太阳能电池板产生足够的电力，实现自动导航、卫星通信和 GNSS-A 观测；该 GNSS-A 定位系统的设计目标是进行实时数据处理，目前，仍需完善声学传播时间的实时检测问题[73]。无人艇观测平台受海面风浪的影响较大，平台姿态精密测量、及由此带来的声信号传播与定位的影响也是需要考虑的问题。

3）浮标观测平台

锚系浮标作为海面平台，能利用 GNSS-A 定位系统对海底地壳形变进行连续的实时测量[66]。Imano 等[67]验证了使用浮标进行 3 000 m 深度海底定位的准确性，但是由于浮标是锚系的，在黑潮洋流影响下，浮标在半径 4 000 m 的范围内漂移。Tadokoro 等[58]基于一个直径为 8 m 的大型锚系浮标开发了 GNSS-A 定位系统，浮标的漂移范围在 150～200 m 内。该系统的 GNSS 天线和卫星通信天线安装在浮标的顶部，声学传感器用一根不锈钢柱子连接并安装在水下约 1.7 m 处。使用浮标观测平台进行了 106 d 测试，GNSS-A 定位系统能够获得高质量的声学数据。日本东北大学在 2010 年采用小型浮标进行了海上试验，由于电力供应问题，试验仅持续了 2 d 时间[65]。在此基础上，日本东北大学改用大型锚系浮标，并在熊野滩进行了 2 次实时的 GNSS-A 观测试验，成功获取了近 10 个月的观测数据。目前，浮标观测平台仍需解决电气系统问题，以满足系统运行的电力需求。

2.3.2 数据采集方法

GNSS-A 定位系统的测量值为声学信号从换能器到应答器的往返传播时间。声学信号传播时间与海水中的声波传播速度密切相关，需要利用声速剖面仪 (Sound Velocity Profiler，SVP)、温盐深测量仪 (Conductivity-Temperature-Depth profiler, CTD) 和抛弃式温盐深测量仪 (Expendable Conductivity-Temperature-Depth profiler, XCTD）等设备采集现场声速剖面，每隔几小时进行一次。系统同时收集动态 GNSS 数据，船只的姿态由姿态传感器测量，GNSS 天线和换能器之间的相对位置在船坞通过地面测量确定，用于确定换能器相对于 GNSS 天线的坐标。

1）测量策略

GNSS-A 定位系统的测量策略按海面观测平台与海底大地基准站的位置关系，可分为静态测量和动态测量。静态测量将海面观测平台维持在海底大地基准网中心上方连续进行声学测量，其主要应用代表为美国 Scripps 海洋研究所和日本东北大学[17,74]。静态测量需要事先确定海底大地基准站之间的相对位置和深度，只能获得海底大地基准网中心的水平位移[4]。在此基础上，日本海上保安厅、东京大学以及名古屋大学开发了动态测量策略，通过海面平台按预定航迹围绕海底大地基准站动态观测声学数据，动态测量策略还可以进行垂直方向定位[19]。与 GNSS 卫星分布对定位影响类似，空间分布良好的声学数据可以减少估计基准站的位置偏差。通过航行观测收集几何对称的数据，GNSS-A 定位精度和观测效率都得到了提高[60,63]。为了

提高定位的稳定性，通常假设在整个观测期海底大地基准网的几何形状是恒定的[75-76]。Honson 等采用了兼容的测量策略，同时使用静态和动态测量模式采集 GNSS-A 数据来确定海底大地基准网中心位移[74,77-78]。对于海底大地基准网的标校，也可采用静态和动态测量策略。考虑标校效率和精度，可以采用对单个海底大地基准站进行绝对校准，对海底大地基准网(站)进行相对测量，即绝对校准+相对测量策略[45-46,79]。前者实现绝对基准从海面传递到海底大地基准站(时间长且受全水深声速误差影响)，海底大地基准网点之间相对测距(海底等温层，声速的影响非常小，相对测量精度高)，类似于 GNSS 控制网测量方法，采用网平差技术实现整体解算。

2)声学观测

GNSS-A 定位的核心是声学观测，需要精确测量声学信号在换能器和应答器之间的往返传播时间。海面换能器向海底应答器发送声学信号，海底应答器作为信号转发射器，接收并返回从海面平台发出的声学信号。东京大学开发的 GNSS-A 定位系统中，换能器发射 2 个双相调制的声学信号，分别用于信号识别和测距信号，载波频率为 10 kHz；系统中使用的调制序列码是 8 阶、9 阶 M 序列码(M-sequence)。名古屋大学开发的 GNSS-A 定位系统则采用了 5 阶 M 序列码[58,60]。如果应答器识别信号，应答器就会记录下后续的测距信号，并在设定的间隔时间后，应答器将重新编码的测距信号与新的识别信号一起发送海面。在声学测距期间，利用 M 序列码的特性，可以通过检测合成信号和接收的声学信号之间的互相关函数(Cross-Correlation Function，CCF)峰值，确定精确的信号传播时间[19,73]。

GNSS-A 测量的声学信号传播时间需要转换为换能器与应答器之间的空间距离。空间距离计算值由声线跟踪确定，需要海水中的声速剖面，利用 SVP 测量数据，或者利用 CTD 测量的温盐深数据采用经验公式转换为声速[80]。采用线性或方形方式布设声速剖面测量站位，声速剖面测量采用定点 SVP 为主、CTD 为辅的方式，适当补充 XCTD 测量。调查区内影响声速的水文条件(温度、盐度等)变化较大时，需增加声速剖面的测量次数，在 XCTD 作业时，船速必须降至适当航速。

2.3.3　标校线路设计

空间分布良好的声学数据可以提高 GNSS-A 定位精度。静态测量策略中，海面观测平台保持在海底大地基准网中心上方，观测平台与基准站形成一个圆锥形对称结构；动态测量策略中，海面观测平台通常围绕海底大地基准站沿圆形航迹航行，观测平台与基准站形成倒圆锥形对称结构，圆形航迹被认为是定位精度最高的标校线路[28,81]。考虑到船舶姿态和海水湍流对声学测量的影响，海面平台最大航行速度为 6～7 n mile/h[82]。因此，往往需要相对较长的观测时间，而且很难通过提高船速来减少观测时间。

为了提高定位精度和效率，赵建虎等[27]利用几何精因子(Geometric Dilution Of Positioning，GDOP)表示定位精度，通过寻求 GDOP 的最小值，给出圆形航迹最佳半径。如果修正了声速误差，航行半径为海底大地基准站深度的 1.414 倍时，定位精度最高；若考虑声速影响，航行半径为深度的 1.045 倍时，定位精度最高。另外，海面观测平台与海底大地基准站形成的几何结构决定了 Fisher 信息量，航行半径为深度的 1.414 倍时，Fisher 准则矩阵表征的定位精度也达到最佳[26]。

由于 GNSS-A 定位中平面方向的几何对称性，平面定位精度有了很大的提高[81]，但海面观测平台与海底大地基准站的高度差几乎是相同的，导致 GNSS-A 定位在垂直方向上存在固有的几何缺陷，需要增加垂直方向的约束，如海底深度传感器测量的深度[26,79]。另外，增加一个过顶的十字交叉航迹也可以提高垂直方向定位精度[26]。考虑声速空间变化，同时利用多条声学路径可以实现高精度的声学观测[71]。因此，设计空间对称的圆形和十字交叉标校线路是合理和科学的(图 3)。

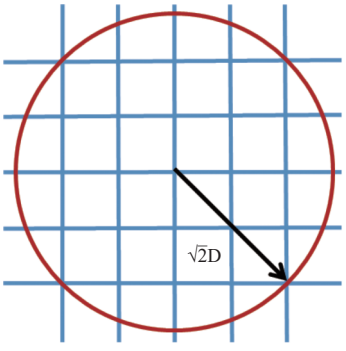


图 3　标校线路设计

Fig. 3　Design of survey line

3 GNSS-A 数据处理技术

3.1 误差来源分析

GNSS-A 定位误差源包括 2 类：一类是海面换能器有关的误差，如 GNSS 定位误差、GNSS 天线与海面换能器相对位置偏差、姿态偏差等；另一类是声学信号传播有关的误差。声学换能器位置通过 GNSS 定位获取，如 Hexagon 公司的 VeriPos、NavCom 公司的 Starfire、Fugro 集团的 OmniSTAR 等实时定位服务，以及后处理精密单点定位（Precise Point Positioning，PPP），前者可提供分米量级的实时导航定位服务，后者则能够实现厘米级的动态定位精度[83-84]；惯性测量单元的姿态测量精度可达 0.01°[72]；GNSS 天线与海面换能器相对位置可通过全站仪精确测定，也可作为待估参数参与定位解算[25]。声学信号传播有关的误差有 2 种：一种是传播时间的量测误差，一种是声速误差。

GNSS-A 定位系统可以精确测量直达波声学信号传播时间，时间量测误差约为 3～10 μs，海水中声学信号若以 1 500 m/s 的速度传播，声学测距的分辨率优于 1.5 cm[43,59,80]。直达波声学信号经常受到海面反射波的影响，在互相关波形时序中，波峰与直达信号到达时刻存在偏差[64]。反射波表现为多重峰值，若将反射波错误识别为直达波，会导致声学信号传播时间的量测误差[58,85]。Honsho 等[86] 考虑了声学信号入射角与互相关波形的关系，提出了一种相位互相关法（Phase-Only Correlation，POC），以减少传播时间测量的不确定性；Tadokoro 等[58] 引入了能量比概念（Energy Ratio，ER）检测识别直接波。由于 Tadokoro 等设计了浮标平台搭载 GNSS-A 定位系统，直接波和海面反射波之间存在 1.3～1.8 ms 的时间延迟，即使声学信号被海面反射污染，也可以有效地分辨出反射波。此外，动态测量策略中海面观测平台与海底大地基准站的相对运动会引起声学信号的多普勒频移，通常在声学信号的探测与识别过程中需移除多普勒效应影响[63,87]。

声速误差是 GNSS-A 定位的主要误差，来源于沿声学信号传播路径的海洋声速结构（Sound Speed Structure，SSS）的时空变化。海洋声速主要与海水温度、盐度和静压力有关[88]。海表面混合层的存在改变了层内的温度和盐度分布，而温度和盐度主要影响上层海洋的声速值，随着深度增加，海水混合作用减弱，温度和盐度分布趋于稳定，压力随着深度的增加而增加，声速也呈单向增加趋势。因此，从海表面到海底的 SSS 主要呈垂向分层[89]，SSS 的时空变化主要体现在海洋上层。此外，SSS 具有混合的时空异质性，声速的时间、空间变化尺度均有所不同[61,90]。相比声学信号传播时间，海洋声速变化具有更大的空间和时间尺度，难以实现声速的连续测量以表征声速时空变化，而且声速测量准确度通常是相对的，由于声速测量设备的校准误差，可能每秒会出现几米的偏差，一个恒定的声速偏差也可作为未知参数参与定位解算[89]。基于实测声速数据，使用经验正交函数反演的声速存在时空分辨率不足等问题[23]。声学信号传播时间包含了声学信号路径的声速变化信息[89]，因此，在 GNSS-A 定位中，可以同时估计声速的变化和海底大地基准站的位置[31,77,89]。

3.2 参数估计方法

结合 GNSS 和声学的观测数据可以估计海底大地基准站的位置。理想情况下，如果海底大地基准站位置的估计值与真实值一致，那么计算出的两个单程传播时间之和应该等于观测的往返传播时间；当海底大地基准站位置的估计值与真实值有偏差时，计算的传播时间与观测时间也存在偏差。海底大地基准站位置最优估计的过程，是使传播时间测量值和计算之间的时间偏差（Observation Minus Computed，OMC）平方和最小的过程[31,87,91]，即

$$\sum_{i=1}^{N}\left(T_i^{\mathrm{Obs}}-t_i^{\mathrm{Cal}}(\boldsymbol{x}_0;\boldsymbol{x};c)-\delta t_i-\varepsilon_i\right)^2\rightarrow \text{minimize}, \tag{1}$$

式中：T_i^{Obs}为观测的往返传播时间；t_i^{Cal}为计算的 2 个单程传播时间之和；δt_i为声速误差引起的时间延迟误差；ε_i为偶然误差，$\boldsymbol{x}_0$、$\boldsymbol{x}$分别为海面换能器位置和海底大地基准站位置；c为参考声速剖面。

3.2.1　解算策略

GNSS-A 定位用于获取海底大地基准站的位置，其参数估计策略分为整体解和历元解两类。整体解算方法通过长期观测的 GNSS-A 测量数据来完成定位解算[31,76-77]，24 h 的观测数据可获得±1.5 cm 的定位精度，3～4 d 的观测数据可获得亚厘米级定位精度[5]。历元解算则利用 1 组声学观测数据完成定位解算[61]，由于海洋声速结构的时空变化，历元解算存在几十厘米的定位误差[91-92]。通常利用静态测量策略的观测数据进行定位解算，即在海底大地基准网的中心上方采集 GNSS-A 数据，其定位精度随距离海底大地基准网中心越远会逐渐下降[64,67,71]。基于海洋声速结构具有垂向分层特征假设，利用对称分布的长时间声学观测数据，可以削弱声速时域变化对海底大地基准站位置估计的影响，提高海底大地基准网中心的水平方向位置精度，但是静态测量策略无法获取精确的垂直方向位置[31,87]。因此，静态测量策略需要额外的观测，如压力传感器观测的深度信息，以增加垂直方向的约束。将声学信号到达方向和声学信号传播时间观测数据同时纳入最优化反演，可以提高定位解算精度[72]。动态测量策略按预定航迹动态采集 GNSS-A 数据，可以获得海底大地基准站的水平和垂直方向位置。部分学者通过 GNSS-A 动态测量策略的观测数据估计单个海底大地基准站的位置[32-33,77,87]，进而确定海底大地基准网几何形状。在假设海底大地基准网几何形状是恒定的情况下，约束基准网的几何形状，然后根据静态测量策略的观测数据，可精确估计基准网的中心位置[4,75,77,91]。对于海底大地基准网的绝对校准+相对测量策略，可以采用网平差技术实现整体解算。受海底大地基准网的网形结构影响，海底大地基准站的垂线解精度不高，甚至出现解算不稳定问题，因此同样需要引入外部约束，如压力传感器测量的深度/深度差[45-46]。

3.2.2　声速误差估计

参数估计策略受到海洋声速结构时域变化的影响。在声速结构具有垂向分层特征的基础上，Fujita 等[31]、Ikuta 等[87] 提出了同时估计海底大地基准站的位置和声速时域变化的方法，前者利用定位残差提取多项式拟合的声速时域变化，迭代修正位置参数，后者则基于 B 样条函数参数化表示平均声速时域变化，联合位置参数迭代计算；进一步地，GNSS 定位中“天顶对流层延迟”（Zenith Total Delay，ZTD）[93] 的概念被引入，Kido 等[89]、Honsho 等[77] 提出了用“垂向总延迟”（Nadir Total Delay，NTD）表示平均声速时域变化，联合解算 NTD 和位置参数的方法。

实际海洋声速结构同时存在时间和空间变化。Yasuda 等[94] 假设 1 000 m 以浅水层的声速结构受黑潮的影响向一个方向倾斜，构建了包含声速时域及其水平梯度变化的模型；Yokota 等[95] 从直接估计的声速时域变化中提取了浅水层的声速水平梯度变化，但与海底大地基准站位置有关的深水层梯度变化无法用声速时变模型表示，结合 Fujita 等[31] 的方法从定位残差中可以提取这部分声速变化；Honsho 等[78] 在 NTD 的基础上，考虑了更为普遍的方向性声速梯度（Direction NTD Gradient），主要与海底大地基准站位置有关。Tomita 等[61]、Watanabe 等[96] 分别测试了静态、动态测量策略的海底大地基准站位置、声速时域变化和声速水平梯度参数联合估计方法。

海洋声速结构还具有混合的时空异质性，包括短周期（短波长）的异质性以及长周期（长波长）的异质性。通过空间对称分布的长时间 GNSS-A 数据，整体解算策略可以成功消除声速结构的长周期异质性[78]。而受到声速结构的短周期异质性影响，历元解算策略的定位结果较差[74]。刘杨等[32-33] 指出定位的声速残余误差主要来自海流、内波等引起的声速水平梯度变化，通过联合估计声速垂向结构和声速水平梯度的时域变化，降低了声速残余误差，提高了海底大地基准站坐标精度。目前仍缺乏深入的海流、内波引起声速变化物理机制探究，需要进一步了解其时空特征（如时间、空间范围）[71,90]。除了更密集频繁的船载 GNSS-A 定位，结合多个观测平台的协同观测方式，可以更加有效地建立短周期异质性模型[60-61,90]。

3.3 精度评定方法

GNSS-A 定位结果精度评价通过比较不同解算结果的可重复性，如考虑不同策略观测之间的重复性[63,97]。Sato 等[63] 对比了不同观测策略的定位结果，动态观测策略的重复性约为 2 cm，比静态观测策略平均降低了 30%。GNSS-A 定位精度也可以通过对斜距残差的统计分析间接描述[98]。而 Chen 等[59] 设计了 1 套海底声学应答器系统（Seafloor Acoustic Transponder System，SATS）来直接评估 GNSS-A 定位的准确性。SATS 有 3 个应答器和 1 个姿态传感器，可以提供应答器基线的真实长度和真实姿态信息，以确保对 GNSS-A 定位评估的可靠性和有效性。使用 GNSS-A 定位数据估计 SATS 上 3 个应答器的位置，并计算基线长度和姿态角，通过比较真实基线和姿态与计算结果，可以直接评估 GNSS-A 海底定位的准确性。Chen 等[59] 还进行了敏感性分析，以研究 GNSS-A 定位结果对声速变化的稳健性。在声速偏差很大的情况下会严重恶化 GNSS-A 定位的质量，敏感性分析同样可以证实 GNSS 和声学测量是可靠的。

4 应用及展望

4.1 海底大地基准建设技术主要应用

海底大地基准建设技术除满足水下潜航器导航定位需求外，目前主要应用于海底精密工程测量、海底形变监测。近几十年来，陆地大地测量手段，如合成孔径雷达（InSAR）和全球定位系统（GNSS），提供了近地空间、海洋表面高时空分辨率的定位和监测能力[5,99-100]。然而，InSAR 或 GNSS 无法适用于水下、海底场景。采用 GNSS 和声学测距的海底定位技术可以应用于海底精密工程测量，包括大型海洋平台安装和稳定性监测、海底大型沉管隧道对接等。监测海底地壳形变对于掌握全球地质构造运动至关重要，自 20 世纪 80 年代提出声学方法监测海底形变的概念以来[4]，基于 GNSS-A 定位技术已实现了在全球参考框架内对海底点的精确测量[5]，海底水平构造运动监测的分辨率达到了厘米级[17]，并成功应用于揭示大洋构造板块的运动和变形、俯冲带和其他板块的地震过程，以及海底火山和扩张中心的变形[101-102]。

基于海底大地基准测量技术的海底形变监测应用在日本取得了较好的发展[8]。日本水文和海洋局 (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard) 已经在日本太平洋一侧的海底部署了 15 个以上的海底大地基准站，用以检测和监测由大洋板块俯冲引起的海底地壳形变[31]。2011 年日本东北 9.0 级 (M_w) 地震后，日本开发了一种新型的海底大地基准站，可以在 5 000 m 以深的海底工作，其声学通信范围大于 15 km[65]。2012 年沿日本海沟建造了 20 个新的 GNSS-A 海底大地基准站，大部分站点位于海沟轴线两侧，深度大于 5 000 m。

4.2 海底大地基准网建设展望

海底大地基准网是新型海洋观测平台。虽然以 GNSS-A 为代表的海底大地测量技术已取得了显著的进步，海底大地基准网的建设工作仍然任重道远，面对新一代国家综合 PNT 系统的建设需求和水下导航定位实时应用需求，需要进一步开展海底大地测量技术的海洋声速误差处理、时间同步及标校方法等方面的技术研究，也需要在分级组网和立体观测方面开展应用研究。

4.2.1 技术层面

1）声速误差处理

GNSS-A 定位精度受声速时空变化影响，需要精细化处理声速。通过海洋环境信息构建区域/全球海洋声速场模型，采用同步观测方式反演声速误差、生成并播发声速误差改正产品，提高水下导航定位精度。

2）时间同步

海底大地基准网的空间基准可统一至国际椭球参考框架，但是在时间基准统一方面差距巨大，需要重

点解决海底大地基站间的时间同步以及水下用户与基准网之间的时间同步，海底大地基准网的时间基准统一方法将是建设海洋综合 PNT 的难点和关键。

3)标校方式

调查船沿预定航迹航行标校海底大地基准站位置观测时间长、观测频次低，且耗费大量人力物力，需要进一步优化 GNSS-A 定位方法。一方面可发展多种观测手段，如联合船舶、浮标、无人艇、水下滑翔器等平台，优化观测航迹及观测采样频率，实现快速实时标校；另一方面可借助立体组网优势，综合多源信息，提高 GNSS-A 位置标校的效率、精度，增加海底大地基准测量技术的可用性、可靠性、精确性。

4.2.2　应用层面

1)分级布设

考虑到我国海底大地基准网建设的需要和巨大的经费需求，需进一步探索海底大地基准网的分级布设方法。由于海底大地基准网使用率低且不易长期保存，在布设海底大地基准站时，应采用“分级布设”原则，先在大范围内布设首级网，然后在建成区域或急需提供水下导航定位服务区域布设次级网。这样既能达到合理布网、满足急需急用的目的，又能方便大地基准网的扩展和加密。考虑不同用户的应用需求，在布设海底大地基准站时，还应采用“低频引导，高频定位”原则，通过在海底大地基站搭载低频信号声呐设备提供远距离位置引导服务，布设高频信号声呐设备提供近距离高精度导航定位服务。

2)立体组网

面向大范围、高精度、多领域的海洋观测需求，需进一步发展海底大地基准组网和服务方式，也需要综合海底观测网和海底大地基准网的统一建设问题。通过构建海面、水下、海底一体化立体观测网络，进一步优化网型设计、布放回收、位置标校等方法，扩大服务范围、提高定位精度；同时，支持多传感器协同作业，实现大范围、多领域的海洋观测。

参考文献 (References):

[1] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125-130, 122. WANG P X. Seafloor observatories: the third platform for earth system observation[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130, 122.

[2] 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 等. 海底大地基准网建设及其关键技术[J]. 中国科学(地球科学), 2020, 50(7): 936-945. YANG Y X, LIU Y X, SUN D J, et al. Seafloor geodetic network establishment and key technologies[J]. Science China(Earth Sciences), 2020, 50(7): 936-945.

[3] 李林阳, 柴洪洲, 李姗姗, 等. 海洋立体观测网建设与发展综述[J]. 测绘通报, 2021(5): 30-37. LI L Y, CHAI H Z, LI S S, et al. Summary of the establishment and development of marine stereoscopic observation network[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 30-37.

[4] SPIESS F N, CHADWELL C D, HILDEBRAND J A, et al. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies[J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 1998, 108(2): 101-112.

[5] BURGMANN R, CHADWELL D. Seafloor geodesy[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2014(42): 509-534.

[6] 刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 等. 海洋时空基准网的进展与趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 17-37. LIU J N, CHEN G X, ZHAO J H, et al. Development and trends of marine spcae-time frame network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(1): 17-37.

[7] SATO M, ISHIKAWA T, UJIHARA N, et al. Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. Science, 2011, 332: 1395.

[8] YOKOTA Y, ISHIKAWA T, WATANABE S, et al. Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone[J]. Nature, 2016, 534(7607): 374.

[9] 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 等. 水声定位导航技术的发展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 331-338. SUN D J, ZHENG C E, ZHANG J C, et al. Development and prospect for underwater acoustic positioning and navigation technology[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 331-338.

[10] Acoustic positioning systems[EB/OL]. [2022-05-20] https://www.kongsberg.com/maritime/products/Acoustics-Positioning-and-Communication/acoustic-positioning-systems/.

[11] Subsea Positioning[EB/OL]. [2022-05-20] https://www.ixblue.com/maritime/subsea-positioning/#Products.

[12] sonardyne products[EB/OL]. [2022-05-20] https://www.sonardyne.com/products/.

[13] 许江宁, 林恩凡, 何泓洋, 等. 水下PNT技术进展及展望[J]. 飞航导弹, 2021(6): 139-147. XU J N, LIN E F, HE H Y, et al. Progress and prospect of underwater PNT[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(6): 139-147.

[14] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321-330. LI F H, LU Y G, WANG H B, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330.

[15] SPIESS F N. Suboceanic geodetic measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985(4): 502-510.

[16] CHADWELL C D. Shipboard towers for Global Positioning System antennas[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(12): 1467-1487.

[17] GAGNON K, CHADWELL C D, NORABUENA E. Measuring the onset of locking in the Peru−Chile trench with GPS and acoustic measurements[J]. Nature, 2005, 434(7030): 205-208.

[18] FUJIMOTO H, KANAZAWA T, OSADA Y. Monitoring seafloor crustal movements: progress report of relative positioning on the seafloor[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Underwater Technology, 1998. DOI: 10.1109/UT.1998.670044.

[19] ASADA A, YABUKI T. Centimeter-level positioning on the seafloor[C]//Proceedings of the Japan Academy: Series B Physical And Biological Sciences, 2001.

[20] 乔学军, 王伟, 林牧, 等. 海底地壳形变监测现状与启示[J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4355-4363. QIAO X J, WANG W, LIN M, et al. Current situation and enlightenment of seafloor crustal deformation monitoring[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(12): 4355-4363.

[21] YANG F L, LU X S, LI J B, et al. Precise positioning of underwater static objects without sound speed profile[J]. Marine Geodesy, 2011, 34(2): 138-151.

[22] ZHAO J H, LIANG W B, MA J Y, et al. A self-constraint underwater positioning method without the assistance of measured sound velocity profile[J/OL]. Marine Geodesy, 2022[2022-05-30]. https://doi.org/10.1080/01490419.2022.2079778.

[23] 孙文舟, 殷晓冬, 暴景阳, 等. 声速剖面EOF表示的第一模态解析[J]. 海洋测绘, 2019, 39(3): 31-35. SUN W Z, YIN X D, BAO J Y, et al. The first model analysis of sound speed profile represented by EOF[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(3): 31-35.

[24] 张林虎, 刘杨, 刘焱雄, 等. 基于分层EOF的深海声速剖面时变特征建模[J]. 海岸工程, 2022, 41(3): 209-222. http://www.ce-journal.org.cn/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=2&file_no=202201260000001&journal_id=hagc. ZHANG L H, LIU Y, LIU Y X, et al. Time-varying characteristics modeling of deep-sea sound velocity profile based on layered-EOF[J]. Costal Engineering, 2022, 41(3): 209-222. http://www.ce-journal.org.cn/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=2&file_no=202201260000001&journal_id=hagc.

[25] CHEN G X, LIU Y, LIU Y X, et al. Adjustment of Transceiver Lever Arm Offset and Sound Speed Bias for GNSS-Acoustic Positioning[J]. Remote Sensing, 2019, 11(13): 1606.

[26] CHEN G X, LIU Y, LIU Y X, et al. Improving GNSS-acoustic positioning by optimizing the ship's track lines and observation combinations[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(6): 61.

[27] CHEN X H, ZHANG H M, ZHAO J H, et al. Positioning accuracy model of sailing-circle GPS-acoustic method[J]. Earth and Space Science, 2021(8): 1-23.

[28] ZHAO J H, ZOU Y J, ZHANG H M, et al. A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(2): 216-226.

[29] 曾安敏, 杨元喜, 明锋, 等. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析[J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 939-952. ZENG A M, YANG Y X, MING F, et al. Positioning model and analysis of the sailing circle mode of seafloor geodetic datum points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(7): 939-952.

[30] YANG Y X, QIN X P. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(7): 79.

[31] FUJITA M, ISHIKAWA T, MOCHIZUKI M, et al. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application[J]. Earth, Planets and Space, 2006, 58(3): 265-275.

[32] LIU Y, LIU Y X, CHEN G X, et al. Seafloor single point positioning using GNSS-Acoustic technique with horizontal sound speed gradient estimation[C]//Scientific Assembly of the International Association of Geodesy, Beijing, China, 2021 .

[33] 刘杨, 刘焱雄. 顾及声速变化建模的GNSS-声学海底单点定位技术[C]//第四届中国大地测量和地球物理学学术大会, 2021. LIU Y, LIU Y X. GNSS-Acoustic seafloor single point positioning technique considering sound speed variation modeling[C]//4th Congress of China Geodesy and Geophysics, Qingdao, China, 2021.

[34] WANG J T, XU T H, LIU Y F, et al. Kalman filter based acoustic positioning of deep seafloor datum point with two-step systematic error estimation[J]. Applied Ocean Research, 2021(114): 102817.

[35] ZHAO S, WANG Z J, NIE Z X, et al. Investigation on total adjustment of the transducer and seafloor transponder for GNSS/Acoustic precise underwater point positioning[J]. Ocean Engineering, 2021(221): 108533.

[36] ZHAO S, WANG Z J, HE K F, et al. Investigation on underwater positioning stochastic model based on acoustic ray incidence angle[J]. Ap-

plied Ocean Research, 2018(77): 69-77.

[37] 王薪普, 薛树强, 曲国庆, 等. 水下定位声线扰动分析与分段指数权函数设计[J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 982-989. WANG X P, XUE S Q, QU G X, et al. Disturbance analysis of underwater positioning acoustic ray and design of piecewise exponential weight function[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(7): 982-989.

[38] 马越原, 曾安敏, 许扬胤, 等. 声线入射角随机模型在深海环境中的应用[J]. 导航定位学报, 2020, 8(3): 65-68. MA Y Y, ZENG A M, XU Y Y, et al. Application of incidence angle stochastic model of acoustic lines under deep sea environment[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(3): 65-68.

[39] LI T, ZHAO J H, MA J Y. A precise underwater positioning method by considering the location difference of transmitting and receiving sound waves[J]. Ocean Engineering, 2022, 247: 110480.

[40] 闫风池, 王振杰, 赵爽, 等. 顾及双程声径的常梯度声线跟踪水下定位算法[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 31-40. YAN F C, WANG Z J, ZHAO S, et al. A layered constant gradient acoustic ray tracing underwater positioning algorithm considering round-trip acoustic path[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(1): 31-40.

[41] 邝英才, 吕志平, 王方超, 等. GNSS/声学联合定位的自适应滤波算法[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 854-864. KUANG Y C, LÜ Z P, WANG F C, et al. The adaptivefiltering algorithm of GNSS/acousticjoint positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7): 854-864.

[42] 邝英才, 吕志平, 王方超, 等. 不同作业模式下的GNSS/声学联合定位模型[J]. 导航定位学报, 2020, 8(3): 40-46,57. KUANG Y C, LÜ Z P, WANG F C, et al. Study on GNSS/acoustic joint positioning model under different measurement schemes[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(3): 40-46,57.

[43] XU P L, ANDO M, TADOKORO K. Precise, three-dimensional seafloor geodetic deformation measurements using difference techniques[J]. Earth, Planets and Space, 2005, 57(9): 795-808.

[44] 孙文舟, 殷晓冬, 曾安敏, 等. 附加深度差和水平距离约束的深海控制点差分定位算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1190-1196. SUN W Z, YIN X D, ZENG A M, et al. Differential positioning algorithm for deep-sea control points on constraint of depth difference and horiontal distance constraint[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1190-1196.

[45] 赵建虎, 邹亚靖, 吴永亭, 等. 深度约束的海底控制网点坐标确定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 137-141. ZHAO J H, ZOU Y J, WU Y T, et al. Determination of underwater control point coordinate based on constraint of water depth[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(10): 137-141.

[46] 赵建虎, 陈鑫华, 吴永亭, 等. 顾及波浪影响和深度约束的水下控制网点绝对坐标的精确确定[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 413-421. ZHAO J H, CHEN X H, WU Y T, et al. Determination of absolute coordinate of underwater control point taking waves and depth's constraint into account[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(3): 413-421.

[47] 张羽, 倪佐涛, 赵飞达. 关于坐底式潜标的设计与布放回收[J]. 科技创新与生产力, 2018(5): 44-47. ZHANG Y, NI Z T, ZHAO F D. Design and launching and retrieval about bottom-supported subsurface buoy[J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2018(5): 44-47.

[48] 季春生, 贾永刚, 朱俊江, 等. 深海海底边界层原位观测系统研发与应用[J]. 地学前缘, 2022, 29(5)-265-274. JI C S, JIA Y G, ZHU J J, et al. Development and application of in-situ observation system for bottom boundary layer in abyssal sea[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5)-265-274.

[49] 于凯本, 刘珂. 国外抗拖网海床基技术现状与进展[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(2): 116-119. YU K B, LIU K. Technical status and development of trawl resistant bottom mount abroad[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2013, 30(2): 116-119.

[50] 邵关, 丁涛. 海底地磁日变观测站安全布放技术[J]. 海洋测绘, 2013, 33(1): 69-71. SHAO G, DING T. Technology for Safety Laying the Geomagnetism Observation Mooring System on the Seafloor[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(1): 69-71.

[51] 张同伟, 秦升杰, 唐嘉陵, 等. 深水多波束测深系统现状及展望[J]. 测绘通报, 2018(5): 82-85. ZHANG T W, QIN S J, TANG J L, et al. Technical Status and Development Trend of Deep-sea Multi-beam Bathymetry System[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(5): 82-85.

[52] 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. 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.

[53] 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. TANG Q H, JI X, DING J S, et al. Research Progress and Prospect of Acoustic Seabed Classification Using Multibeam Echo Sounder[J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 1-10.

[54] 周杨锐, 吴秋云, 董明明, 等. 深水工程勘察技术研究现状与展望[J]. 中国海上油气, 2017, 29(6): 158-166. ZHOU Y R, WU Q Y, DONG M M, et al. Current status and development outlook of deep water geotechnical investigation and survey technology[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(6): 158-166.

[55] 杨国明, 朱俊江, 赵冬冬, 等. 浅地层剖面探测技术及应用[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 147-162. YANG G M, ZHU J J, ZHAO D D, et al. Development and application of sub-bottom profiler technologies[J]. Marine Sciences, 2021, 45(6): 147-162.

[56] 于新生, 阎子衿, 朱明亮, 等. 自主式深海海底溶质通量原位观测站研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(6): 150-161. YU X S, YAN Z J, ZHU M L, et

al. Review of seabed landers for monitoring solute fluxes in deep sea[J]. Marine Sciences, 2017, 41(6): 150-161.

[57] 王澍初, 张飞. 海底观测网深水设备精准定点布放方法研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(1): 39-44. WANG S C, ZHANG F. Research of Precision Deployment for Equipment of Seafloor Observatory Network in the Deep Sea[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(1): 39-44.

[58] TADOKORO K, KINUGASA N, KATO T, et al. A Marine-Buoy-Mounted System for continuous and Real-Time Measurment of seafloor crustal deformation[J]. Frontiers in Earth Science, 2020(8): DOI: 10.3389/feart.2020.00123.

[59] CHEN H H, WANG C C. Accuracy assessment of GPS/Acoustic positioning using a Seafloor Acoustic Transponder System[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(13): 1472-1479.

[60] ISHIKAWA T, YOKOTA Y, WATANABE S, et al. History of on-board equipment improvement for GNSS-A observation with focus on observation frequency[J]. Frontiers in Earth Science, 2020(8): DOI: 10.3389/feart.2020.00150.

[61] TOMITA F, KIDO M, HONSHO C, et al. Development of a kinematic GNSS-Acoustic positioning method based on a state-space model[J]. Earth, Planets and Space, 2019, 71(1): 1-24.

[62] LI M H, LIU Y, LIU Y X, et al. Simulative evaluation of the underwater geodetic network configuration on kinematic positioning performance[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1939.

[63] SATO M, FUJITA M, MATSUMOTO Y, et al. Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship's track line[J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(9): 825-842.

[64] IMANO M, KIDO M, OHTA Y, et al. Improvement in the accuracy of real-time GPS/acoustic measurements using a multi-purpose moored buoy system by removal of acoustic multipath[C]//MANABU H. Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards(GENAH). Cham: Springer International Publishing, 2017.

[65] KIDO M, FUJIMOTO H, HINO R, et al. Progress in the project for development of GPS/acoustic technique over the last 4 years[C]//MANABU H. Proceedings of the International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards(GENAH). Cham: Springer International Publishing, 2017.

[66] KATO T, TERADA Y, TADOKORO K, et al. Development of GNSS buoy for a synthetic geohazard monitoring system[J]. Journal of Disaster Research, 2018, 13(3): 460-471.

[67] IMANO M, KIDO M, HONSHO C, et al. Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2019, 6(1): 1-14.

[68] IINUMA T, KIDO M, OHTA Y, et al. GNSS-Acoustic observations of seafloor crustal deformation using a wave glider[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.600946.

[69] TAKAHASHI N, ISHIHARA Y, OCHI H, et al. New buoy observation system for tsunami and crustal deformation[J]. Marine Geophysical Research, 2014, 35(3): 243-253.

[70] HINO R, TADOKORO K, WALLACE L. Editorial: frontiers in seafloor geodesy[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.744217.

[71] KIDO M. Detecting horizontal gradient of sound speed in ocean[J]. Earth, Planets and Space, 2007, 59(8): e33-e36.

[72] SAKIC P, CHUPIN C, BALLU V, et al. Geodetic seafloor positioning using an unmanned surface vehicle—contribution of direction-of-arrival observations[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.636156.

[73] AZUMA R, TOMITA F, IINUMA T, et al. Development and examination of new algorithms of traveltime detection in GPS/acoustic geodetic data for precise and automated analysis[J]. Earth, Planets and Space, 2016, 68(1): 143.

[74] TOMITA F, KIDO M, OHTA Y, et al. Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake[J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700113.

[75] CHEN H H, IKUTA R, LIN C H, et al. Back-arc opening in the western end of the Okinawa Trough revealed from GNSS/acoustic measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(1): 137-145.

[76] YOKOTA Y, ISHIKAWA T, WATANABE S. Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations[J]. Science Data, 2018(5): 180-182.

[77] HONSHO C, KIDO M. Comprehensive analysis of traveltime data collected through GPS-acoustic observation of seafloor crustal movements[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2017, 122(10): 8583-8599.

[78] HONSHO C, KIDO M, TOMITA F, et al. Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku earthquake revisited: application of an improved GPS-acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2019, 124(6): 5990-6009.

[79] 赵建虎, 梁文彪. 海底控制网测量和解算中的几个关键问题[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1197-1202. ZHAO J H, LIANG W B. Some key points of submarine control network measurement and calculation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1197-1202.

[80] CHADWELL C D, SWEENEY A D. Acoustic ray-trace equations for seafloor geodesy[J]. Marine Geodesy, 2010, 33(2): 164-186.

[81] GAGNON K L, CHADWELL C D. Relocation of a seafloor transponder—sustaining the GPS-acoustic technique[J]. Earth, Planets and Space, 2007, 59(5): 327-336.

[82] NAKAMURA Y, YOKOTA Y, ISHIKAWA T, et al. Optimal transponder array and survey line configurations for GNSS-A observation evaluated by numerical simulation[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.600993.

[83] 周东旭, 唐秋华, 张化疑, 等. 星站差分与PPP技术在深远海调查中的位置服务精度分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(2): 215-222. ZHOU D X, TANG Q H, ZHANG H Y, et al. Accuracy analysis of location service of Star Station Differential and PPP in deep sea investigation[J]. Marine Science Bulletin, 2020, 39(2): 215-222.

[84] GENG J H, TEFERLE N, MENG X L, et al. Kinematic precise point positioning at remote marine platforms[J]. GPS Solutions, 2010(14): 343-350.

[85] TADOKORO K, IKUTA R, WATANABE T, et al. Interseismic seafloor crustal deformation immediately above the source region of anticipated megathrust earthquake along the Nankai Trough, Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(10): 1-5.

[86] HONSHO C, KIDO M, ICHIKAWA T, et al. Application of phase-only correlation to travel-time determination in GNSS-Acoustic positioning[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.600732.

[87] IKUTA R, TADOKORO K, ANDO M, et al. A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: application to the Nankai Trough[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2008(113): B02041.

[88] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics [M]. New York: Springer, 2011.

[89] KIDO M, OSADA Y, FUJIMOTO H. Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and in situ measurements[J]. Earth, Planets and Space, 2008, 60(3): 229-234.

[90] MATSUI R, KIDO M, NIWA Y, et al. Effects of disturbance of seawater excited by internal wave on GNSS-acoustic positioning[J]. Marine Geophysical Researches, 2019, 40(3): 541-555.

[91] KIDO M, FUJIMOTO H, MIURA S, et al. Seafloor displacement at Kumano-nada caused by the 2004 off Kii Peninsula earthquakes, detected through repeated GPS/acoustic surveys[J]. Earth, Planets and Space, 2006, 58(7): 911-915.

[92] TOMITA F, KIDO M, OSADA Y, et al. First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS/acoustic technique[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(20): 8391-8397.

[93] MARINI J W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile[J]. Radio Science, 1972, 7(2): 223-231.

[94] YASUDA K, TADOKORO K, TANIGUCHI S, et al. Interplate locking condition derived from seafloor geodetic observation in the shallowest subduction segment at the Central Nankai Trough, Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(8): 3572-3579.

[95] YOKOTA Y, ISHIKAWA T, WATANABE S. Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography[J]. Marine Geophysical Research, 2018, 40(4): 493-504.

[96] WATANABE S, ISHIKAWA T, YOKOTA Y, et al. GARPOS: analysis software for the GNSS-a seafloor positioning with simultaneous estimation of sound speed structure[J]. Frontiers in Earth Science, 2020(8): DOI: 10.3389/feart.2020.597532.

[97] SAKIC P, BALLU V, ROYER J-Y. A multi-observation least-squares inversion for GNSS-Acoustic seafloor positioning[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 448.

[98] SWEENEY A D, CHADWELL C D, HILDEBRAND J A, et al. Centimeter-level positioning of seafloor acoustic transponders from a deeply-towed interrogator[J]. Marine Geodesy, 2005, 28(1): 39-70.

[99] 何秀凤, 高壮, 肖儒雅, 等. 多时相Sentinel-1A InSAR的连盐高铁沉降监测分析[J]. 测绘学报, 2021, 50(5): 600-611. HE X F, GAO Z, XIAO R Y, et al. Monitoring and analysis of subsidence along Lian-Yan railway using multi-temporal Sentinel-1A InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(5): 600-611.

[100] 张勤, 黄观文, 杨成生. 地质灾害监测预警中的精密空间对地观测技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1300-1307. ZHANG Q, HUANG G W, YANG C S. Precision space observation technique for geological hazard monitoring and early warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1300-1307.

[101] CHEN H H, IKUTA R, HSU Y, et al. A decade of global navigation satellite system/acoustic measurements of back-arc spreading in the southwestern Okinawa Trough[J]. Frontiers in Earth Science, 2021(9): DOI: 10.3389/feart.2021.601138.

[102] SAKIC P, PIÉTÉ H, BALLU V, et al. No significant steady state surface creep along the North Anatolian Fault offshore Istanbul: results of 6 months of seafloor acoustic ranging: formatted article[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(13): 6817-6825.

Research Progress of Seafloor Geodetic Datum Construction Technology

LIU Yan-xiong[1,2,3], LI Meng-hao[1,2,3], LIU Yang[1,2], HE Xiu-feng[3],
CHEN Guan-xu[1,2], ZHANG Lin-hu[1,2], TANG Qiu-hua[1,2]

(1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China;
2. *Key Laboratory of Oceanic Surveying and Mapping*, *MNR*, Qingdao 266061, China;
3. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Hohai University*, Nanjing 211100, China)

Abstract: Seafloor geodetic datum network will be an important component of the new generation of national comprehensive PNT (Positioning, Navigation and Timing) system construction and the infrastructure of the future marine stereoscopic observation system. Global Navigation Satellite System-Acoustic (GNSS-Acoustic) technology can be used for high-precision underwater positioning and directly serves the construction of the submarine geodetic datum network. Focusing on the seafloor geodetic datum construction technology, this work summarizes the underwater acoustic navigation and positioning technologies and systems, and the key points of the station site selection and its deployment and recycling for the construction of seafloor geodetic datum are also analyzed. Based on the discussion of the GNSS-Acoustic observation platform and data acquisition, the research progress of the data processing methods of GNSS-Acoustic positioning is emphasized. Finally, the current main applications of GNSS-Acoustic positioning are briefly summarized, and the technical requirements and application problems of future seafloor geodetic datum construction are presented.

Key words: seafloor geodetic datum network; underwater acoustic navigation and positioning; GNSS-Acoustic positioning

Received: May 22, 2022