海底大地基准网建设及其关键技术

杨元喜^{1*}, 刘焱雄², 孙大军³, 徐天河⁴, 薛树强⁵, 韩云峰³, 曾安敏¹

1. 地理信息工程国家重点实验室, 西安测绘研究所, 西安 710054;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001;

4. 山东大学(威海)空间科学研究院, 威海 264209;

5. 中国测绘科学研究院, 北京 100830

* 通讯作者, E-mail: yuanxi_yang@163.com

收稿日期: 2019-10-11; 收修改稿日期: 2020-02-29; 接受日期: 2020-03-24; 网络版发表日期: 2020-04-17

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFB0501700)和国家自然科学基金项目(批准号: 41931076、41874016、61801137)资助

摘要 海底大地基准网建设涉及基准信标方舱研制、网型设计、遴选布放、观测策略、观测模型建立与优化、数据处理策略等。文章试图较全面地描述海底大地基准网建设的主要技术问题, 并探索其技术途径; 分别描述了浅海海底方舱和深海海底方舱建设的基本构想, 提出了适用于水下定位导航的海底大地基准网整体建设准则和用于地壳运动监测的整体网型设计准则。为了提高海底大地基准网的应用效能, 海底网型以对称网型为主; 海底基准点定位的海面观测也以对称观测构型为主, 建议采用圆形观测和交叉十字(或井字型)观测相结合的海底定位模式; GNSS相位中心与声学换能器的偏移改正, 建议采用外部测定与模型参数估计相结合的方法进行; 声速误差影响改正建议采用观测值改正与参数化模型改正相结合的方式, 并以模型改正为主削弱声线误差对海底定位的影响。利用文章的基本设计, 分别进行了浅海和深海定位试验。在浅海充分验证海底方舱性能的基础上, 建立了3000m水深的长期海底基准点, 该基准点初步定位结果内符精度优于5cm。

关键词 海底大地测量, 海底大地控制网, 海底方舱, 水下导航, 声呐定位

1 引言

海底大地基准网是一组布放在海底的声学基准站, 组建类似GNSS星座的定位系统, 既可以对水面及水下的各类设备提供时间和空间信息, 也可用来监测海底板块及水体环境的动态变化(杨元喜等, 2017; 刘经南等, 2019; 李林阳等, 2018)。海底大地基准网是国家大地基准网的重要组成部分, 不包含领海基准控制

的大地基准网不是真正意义上的国家大地基准网, 至少是不完备的国家大地基准网。海底大地基准网是水下导航定位的基础, 是海洋安全、海洋经济开发、海洋环境监测的重要基础设施, 也是海洋地质研究与海底资源勘探的重要支撑。

中国陆地大地基准网建设相对完善, 并长期复测维持, 具备厘米级精度(陈俊勇等, 2007; 杨元喜, 2009; Wei, 2008; 魏子卿等, 2011), 但是海底大地基准网建设

中文引用格式: 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 徐天河, 薛树强, 韩云峰, 曾安敏. 2020. 海底大地基准网建设及其关键技术. 中国科学: 地球科学, 50: 936–945, doi: 10.1360/SSTe-2019-0242

英文引用格式: Yang Y, Liu Y, Sun D, Xu T, Xue S, Han Y, Zeng A. 2020. Seafloor geodetic network establishment and key technologies. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9602-3>

尚属空白. 这是因为海底大地基准网建设难度极大, 技术要求高, 而且海底大地基准网设备昂贵, 设备自主可控还存在一定差距; 建设周期相对较长, 而海底大地基准网设备的工作寿命又相对较短; 此外, 海底大地基准网数据处理理论和方法还不完善, 无论是声纳观测模型, 还是海底多源观测数据的处理都不够完善. 为此, 国际大地测量协会(IAG)于2019年正式设立了海洋大地测量工作组, 推动海洋空间基准与水下定位技术发展.

美国、加拿大、俄罗斯等发达国家早已开启海底大地基准网的研究, 并已基本掌握海底大地基准网建立与维护技术(Spiess等, 1998, 2000; Favali和Beranzoli, 2006; Matsumoto等, 2008). 为了监测地壳运动和地震活动, 日本已经建立了海底大地基准网(Mochizuki等, 2003; Fujita 等, 2006), 并取得了系列研究成果.

针对海洋定位与导航等特殊场景以及复杂环境下的安全定位导航和授时(PNT)问题, 美国提出了国家综合PNT长远发展计划(National Security Space Office, 2008). 2015年, 美国国防高级研究计划局(DARPA)又提出构建“深海定位导航系统”(Defense Advanced Research Projects Agency, 2016), 采用声学信号装置, 在海床上布设声纳信标基准网, 组成类似于GNSS星座的水下定位声纳阵列, 水下潜器只需接收海床声纳装置(假设坐标已知)发出的信号, 或者向海床信标发出声纳信号接收其应答信号, 即可测定载体的精确位置信息. 中国学者在声学定位模型和算法方面有不少研究成果, 在水下短基线差分定位(刘焱雄等, 2006)、长基线差分定位(韩云峰等, 2017; 李莉, 2007; 宁津生等, 2014)、声速误差修正(赵建虎和王爱学, 2015; 张居成等, 2013)和声速误差模型改化(严俊等, 2016; Zhao等, 2016)等方面都有探索性成果. 在构建综合PNT框架和弹性PNT框架方面也有初步研究, 且二者都涉及海底PNT服务(杨元喜, 2016, 2018; 杨元喜等, 2017); 中国学者也开启了海洋导航定位理论与方法的研究(吴永亭, 2013; 杨元喜等, 2017; 韩云峰等, 2017; 赵爽等, 2018; 孙大军等, 2018). 但是, 暂时还未建成海底长期稳定工作的水下大地基准网, 水下导航定位技术单调、手段匮乏(杨元喜和李晓燕, 2017; Yang 等, 2018).

构建海底大地基准网面临众多难题. 首先要研制适应复杂海洋环境的声纳信标装置, 解决能源供给与原位维护关键技术问题, 使其具备稳定性、可测性、

抗压性、防腐性等特点; 其次, 必须解决大范围海底大地基准网优化布设问题, 而且要确保海底大地基准网与国家陆地大地基准网形成一个整体; 海底基准点的观测策略也是海底大地基准网建设的关键问题之一; 不同环境下多类观测的模型精化、多源海洋观测的数据融合等数据处理问题, 也是海底大地基准网建设必须要解决的问题. 尽管我们很难短期内给出所有问题的最优答案, 但是, 对以上问题进行适当探索和分析, 对构建海底大地基准网具有重要意义.

2 海底大地基准网信标装置关键技术

2.1 方舱设计

建设海底大地基准网首先要解决海底基准点装置研制问题. 海底基准点装置包括声学定位信标、能源装置、深度计、基座、防护装置和稳定配重结构等.

基于声学原理研制的海底方舱和海底基准点装置要具备“抗压、防腐和长距离信号传输”能力, 同时海底基准点装置还应具备“放得稳、呆得久、定得精”等能力, 而且能够在水下大部分区域进行快速布放与回收维护.

考虑到中国大部分海域水深不超过4000m, 全球大部分海域水深不超过7000m, 为了适应大部分海床深度布放, 海底基准点装置应能承受6000m以上水深压力, 如此可用于绝大部分海域的海底大地基准网建设.

综合上述各类因素, 海底基准点方舱一般选择不锈钢或钛合金等高强度耐压防腐材料, 并附加稳定基座设计(如图1). 此外, 深海基准点方舱需要考虑防海底时变流场和海底沉积物的影响, 于是整体结构应采用溢流设计和稳定坐底设计(如图1a); 浅海基准点方舱还需要考虑防拖拽设计, 于是应采用溢流型防拖拽结构, 避免人为或其他因素破坏(如图1b). 整体结构设计时, 为了减少与海水密切接触的插件数量, 应采用穿舱件设计以提高可靠性. 由于整体结构组装后体积较大, 需采用分离式标准结构装配组成, 能够有效节省空间, 提升海上作业效率.

目前, 国际上采用的大部分基准方舱结构都本着布放简易、使用方便和稳定可靠的原则(David和Spiess, 2008; McGuire和Collins, 2013; Sakic等, 2016). 未来利用水下遥控无人潜水器(ROV)有望实现声纳信

图1 深海溢流型方舱结构(a)和浅海防拖拽方舱结构(b)

标原位维护, 以确保基准点多期复测时间序列的连续性.

2.2 信标信号设计

基于声学原理的信号设计需要考虑波形、声学频段选择和带宽设计等要素. 声信号波形设计需要考虑波形的稳定性和分辨率两方面因素. 信号波形带宽越宽, 相同声源的谱级越低, 因此在相同声源级条件下宽带信号的谱级低于单频信号, 而且低于海洋环境噪声, 不易被监测; 此外, 声波信号时间分辨率越高, 测距精度也越高(刘伯胜和雷家煜, 2010; 田坦, 2010; 惠俊英和生雪莉, 2007). 信号波形设计还要考虑信号的编码设计, 既要确保检测的便利性, 也要考虑增加编码破解难度. 通常采用直扩序列或跳频编码方式, 提高检测信噪比和编码的复杂性(刘波, 2008; Han等, 2016; Cheng, 2004).

在频段选择方面, 目前成熟的定位系统产品主要分为低频(8~16kHz)和中频(20~30kHz)两个频段. 注意到低频频段的最大作用距离一般为10km左右, 于是在装置设置时要考虑信号的通达性、信号传播特性和时变噪声的影响控制等(孙大军等, 2019; 李守军等, 2005).

2.3 海底基准点工作寿命设计

海底基准点装置的寿命是海底大地基准网长期可用性的核心指标之一. 这不仅涉及海底方舱本身的可靠性设计, 更取决于方舱持续工作的能源补给. 目前锂电池因安全性最好、比容量最大、自放电率最低且

性价比最高, 是海底方舱电池选用的主流产品. 锂源电池贮存寿命通常为5年(容量>90%)(中国人民解放军总装备部, 2011), 综合考虑放电率和现有测试数据(6年失效率<3%, 容量>98%), 通过多组并联和分组管理, 海底方舱及其信标的5年可用性可达99.9999%. 在方舱设计时, 能源替换的便捷性也必须纳入海底基准装置的设计框架内.

在方舱研制方面, 根据以上设计, 我们研制了单信标方舱和双信标方舱, 并在青岛灵山岛海域和胶州湾海域进行了海底基准定位试验, 测试了布放和回收规程, 基准站点位坐标各分量的内符精度优于2cm(Chen等, 2019), 较全面地验证了浅海和深海方舱性能. 2019年7月成功进行了深海方舱的布放和回收试验, 其中图1a所示的深海溢流型方舱置于海底长期运行.

3 海底基准点布放与网型优化

海底大地基准网布设技术复杂、代价高昂, 所以海底大地基准网一般不能建成像陆地大地基准网那样的连续基准网. 为了使得海底大地基准网效能最大化, 需要研究海底大地基准网精细布设策略, 优化海底基准点(既是坐标框架, 也是导航参考点)的密度和分布.

3.1 海底基准点建设等级

考虑建设的经济性, 中国陆地大地基准网一般都按不同等级进行建设, 经典大地基准网有一等网、二等网, GNSS大地控制网有连续基准站网、一级网(A级网)、二级网(B级网). 同样海底大地基准点建设也

应考虑等级划分. 我们认为, 海底基准网建设应该按用户对基准点点位精度要求进行分级. 海底基准精度分厘米级网、分米级网和米级网, 不同精度对应不同应用. 厘米级海底基准网主要用于海底地壳运动监测, 例如美国的海底大地网重复精度北方向0.9cm、东方向3.9cm(Spiess等, 1998); 分米级网主要服务于海底油气工程和海底光缆铺设等工程; 而米级以上网主要为水下PNT提供基准. 依据电力供应方式, 海底基准点又可分为有缆基准点和无缆基准点. 有缆基准点通过电缆进行供电和光缆进行信息传输, 可长期连续工作和进行大量信息传输; 而无缆基准点靠电池供电, 工作次数有限, 可定期复测, 通常每年1~2次, 例如, 日本建立的海底大地基准网每年观测2次(Mochizuki等, 2003; Fujita 等, 2006).

3.2 海底基准点位置选择

在海底大地基准网建设中, 首先要解决海底基准点装置的布放问题, 不仅要放得稳, 而且要确保相邻基准点的通视性(Fujimoto等, 1997), 于是, 必须根据水深、地形、底质和水文条件确定布放位置. 为了更合理布放海底基准点装置, 我们从地形地貌和海底稳定性两个方面初步梳理了海底基准点遴选的主要技术指标, 列于表1.

如果仅考虑作为海底基准点使用, 海底基准点的位置应放置在地形平坦区域, 并且确保其稳定; 如考虑用于海底地壳运动监测, 则基准点组应较均匀地分布运动板块内, 用于监测海床随海底板块构造运动, 并确保在板块内的稳定性; 对于监测海底板块扩张的点, 应在板块交接带布放点组, 通过其与板块内的基准点组进行声学测距或海面联测, 测定其板块的相对运动. 由于受供电限制, 远离大陆(或岛礁)的海底基准点几乎不可能连续持久观测, 应该定期(或不定期)重复观测(观测策略后文详细叙述), 以监测其随海底板

块构造运动.

3.3 海底基准点的网型设计

仅考虑海底基准点的稳定性和可观测性还不够, 还必须考虑基准点的网型设计. 如果仅考虑水下PNT服务, 则需要根据水下载体自带惯性导航设备的误差累积情况, 设计基准点组的相隔距离, 建成接力型海底大地基准网. 若载体自带惯性导航设备的精度为0.1%, 最大容许误差为100m, 则在水下航道上声纳基准点组相距应小于100km, 以便及时标校水下载体的惯导误差, 实现水下载体的精确定位; 如果水下潜器的导航最大容许误差为500m, 则航道上相距500km就应该设置基准点组.

此外, 不仅要考虑各海底基准点组之间的距离, 而且要考虑各基准点组的可观测性和几何结构. 在可观测条件下, 一般3个声纳信标点即可确定水下潜器的三维位置, 如此等边三角形应该是最优构型; 如果考虑到时间同步需要, 则至少4个必要的基准点和1个冗余基准点构成最简网型, 则等边五边形应该是最优网型(如图2a); 实践中往往采用一个基准站作为主站, 其余基准站作为辅站, 构成基准站组, 主站置于中间, 辅站成四边形布置(如图2b). 对于特定区域的水下PNT应用需求而言, 海底大地基准网可通过对上述基本网型进行扩展或加密实现.

当受海底地形条件、沉积物条件所限无法布设规则多边形网型时, 可在基准网设计覆盖范围的几何中心位置, 依据精度衰减因子GDOP构建网型优化设计准则, 即要求:

$$\min \text{GDOP} = \min \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}},$$

式中, $\mathbf{A}$ 为用户水下导航定位模型的设计矩阵. 当然, 以区域GDOP均值构建优化准则更切合海底大地基准网的水下PNT应用服务实际.

表 1 海底基准点装置布防风险与应对策略

地形地貌风险类别	应对策略	地质风险类别	应对策略
稳定性风险	非沙波或沙脊区	冲淤风险	水动力平缓, 无松散软积物
陡坡风险	地形坡度不大于5°	滑动风险	避开古滑坡、高陡斜坡显著地区
地貌风险	避开浅滩、火山、冲沟、峡谷、沟槽、珊瑚礁等地形	沉降风险	避开疏松底质沉积物区域

图2 5个基准站布网形式(a)和1个主基站、4个辅基站布网形式(b)

4 海底基准点的观测策略与误差影响控制

海底大地基准网必须与国家陆地大地基准网构成一个整体, 陆地大地基准网与海底大地基准网之间必须进行联测, 从而实现陆地大地基准到海底大地基准网的精密传递。这种基准传递联测包含了空中无线电信号和水下声学信号的观测, 需要顾及这两类观测的误差传递特性。海底基准点定位的原理是利用海面已知点(类似于卫星星座)与海底声纳信标装置之间的几何测距交会计算海底基准点的三维坐标(Matsumoto等, 2008)。海面已知点一般采用GNSS确定其GNSS接收机天线相位中心的位置, 再通过精密工程测量方法测定的GNSS天线到换能器偏差参数和载体姿态观测, 将GNSS天线坐标归算到换能器信标中心位置, 然后通过换能器到海底基准点的距离计算海底信标的三维位置。显然, 这种传递式定位的主要误差来自于测量船航迹测定误差、GNSS天线到换能器偏差参数测量误差、姿态测量误差以及声学测距误差。

海底大地基准网与陆地大地基准网的基准统一是依赖海面测量载体实现的。测量载体的位置测定通常采用GNSS技术, 即可采用星基差分、精密单点定位(PPP)、RTK或后处理差分定位等方式获得接收机天线相位中心的位置。星基差分可实时获得测量载体位置, 其位置精度可达20~30cm; PPP仅依赖载体GNSS接收机的观测, 采用IGS提供的精密轨道和精密钟差实施载体后处理动态定位, 精度可达10cm; RTK或后处理差分定位不仅需要载体GNSS观测, 还需与陆地

(或岛礁)卫星定位基准站(CORS)进行联合观测和解算, 获得载体的高精度位置, 精度可优于5cm。

海底基准点信标定位构型具有天然的观测不对称性(Bürgmann和Chadwell, 2014; 刘焱雄等, 2006; 赵建虎等, 2018), 即由于已知点在海面, 未知点在海底, 观测在高程分量存在几何不对称性, 系统误差抵偿能力较弱, 故高程分量定位精度较低。为了减弱垂向误差影响, 海底基准点往往配置深度计, 以便获取高精度的水深信息。目前, 海水压力计的测深精度最高可达1/10000(Polster等, 2009)。在船载换能器和海底信标处分别安装压力传感器, 可获取各历元海面到海底声学设备间的垂向距离。利用该深度观测信息建立观测方程, 通过对定位过程进行约束, 可提升高程分量测定精度。

利用GNSS/声学技术进行海底基准点定位, 需要解决换能器相对于GNSS天线的归心改正(或称偏移参数)。换能器的归心改正参数的测定误差会对海底基准点坐标测定产生系统性影响。偏移参数在船载坐标系下通常为定值, 可采用全站仪等设备预先测定, 并在观测中施加改正; 也可以作为未知参数与海底基准站坐标参数一并计算, 但其垂直分量与海底基准站的高程参数强相关, 将其作为待估参数与海底基准站坐标一起解算, 会导致观测方程不适定(病态甚至秩亏)。有学者提出利用样本搜索算法, 先固定归心改正矢量的垂直分量, 然后将偏心改正的水平分量与基准点三维位置一同设为待求参数, 可明显提升解算效果(Chen等, 2019)。我们认为采用先测定归心参数, 并将归心参数测定值及其不确定信息作为先验信息, 采用贝叶

斯估计法(Yang, 1991), 与海底基准点坐标一同解算. 上述策略一方面可以避免归心参数的垂直分量与海底基准点坐标的垂直分量之间的强相关导致的观测方程出现不适定问题, 又能提升换能器的偏移参数解算精度.

假设声学换能器与GNSS天线的偏心参数已解算得到, 海底深度计的测深辅助观测也已具备, 剩下的问题是如何最优测定海底基准点的三维位置. 大量研究表明, 海面载体GNSS天线位置的测定精度可以达到厘米级, 因此可先不考虑海面载体GNSS定位误差影响, 仅考虑海面观测载体的航迹几何结构对海底基准点测定结果的影响. 水面载体的航迹决定了观测值集合中所蕴含的几何强度(Chadwell等, 2002; McIntyre, 1989), 大量试验分析和理论研究表明, 海面观测载体采用 $\sqrt{2}$ 倍水深值的圆形航迹围绕海底基准点环形观测(薛树强等, 2014; Zhao等, 2016; Zou等, 2017), 可获得优化的海底基准点观测几何结构. 进一步考虑系统误差影响和差分定位需要, 可在海底基准点正上方附加十字航迹, 这种圆形观测加交叉十字观测可进一步优化观测几何结构, 并削弱系统误差的影响. 之前, 日本学者提出的船迹网型也具有借鉴意义(Fujita等, 2006; Sato等, 2013). 注意到圆形观测加十字观测, 都属于对称型观测, 也有利于削弱归心参数、声速误差、声线弯曲等系统误差的影响.

5 声纳观测模型精化与海底定位

因海洋声纳观测受制于海水温度、盐度、密度、海流等复杂海洋环境影响(Osada等, 2003; Li等, 2016), 水下高精度声纳定位存在极大挑战. 针对高精度的水下定位问题, 国内外学者对其函数模型和随机模型进行了深入研究. 水声定位中最主要的误差是由声速时空变化和声纳信号延迟引起的系统误差和偶然误差. 而观测模型的精化又与观测方式和观测信息的组合方式密切相关, 不同的观测组合模式具有不同的误差影响. 在浅海定位中, 还需要考虑线性化误差对定位的影响(薛树强等, 2014).

声速不确定性是声纳定位主要误差源之一. 声速测量值包含设备的标校误差和时空代表性误差(Yamada等, 2002). 为削弱以声速误差为代表的系统误差对定位的影响, 可以采用类似于GNSS差分定位技术(Xu

等, 2005; Yang等, 2011). 差分方法可以削弱观测值中的共性误差, 但也抵消了非差观测值中的垂向信息, 进而也弱化了海底基准点的垂向测定精度. 十字航迹可改善定位的垂向几何结构, 且观测数据量远小于圆航迹数据量. 对圆形航迹数据组建差分观测方程, 而对十字航迹构建非差观测方程, 利用这种组合观测方式一方面削弱了声速误差的影响, 又支持了垂向定位信息.

与上述空间差分模式削弱空间代表性误差类似, 也可以采用历元间差分模式(相邻观测之间的差分)削弱与时间相关联的系统误差影响. 有学者将抗差估计与历元间差分模式结合, 提出基于抗差估计的历元间单差和双差定位模式(赵爽等, 2018; 高茹茹, 2018). 基于抗差估计的历元差分不仅可以削弱时间关联误差的影响, 还能有效控制异常误差的影响.

声线弯曲和声速误差是两类最主要的定位系统误差来源. 声线弯曲误差既与复杂多变的海洋观测环境有关, 也与声纳观测入射角有关. 当使用测区声速剖面观测数据进行声线跟踪定位, 理论上可以完全消除声线弯曲影响, 但如前所述, 声速剖面观测往往具有很强的不确定性和时空代表误差问题. 为此, 建议海底大地基准网数据处理采用常声速定位观测模型, 并在基础上施加声线弯曲与延迟改正, 或进行模型化参数估计补偿. 声纳定位模型的先验声速值可采用经验声速(赵建虎和刘经南, 2008)或加权平均声速(易昌华等, 2009); 时变声速误差影响是高精度声纳定位的棘手问题, 可借鉴GNSS大气误差处理, 发展海底基准网动态数据处理模型予以消除. 此外, 神经网络学习法(Nguyen和Widrow, 1990)、等效声速法(Geng, 1997)、有效声速法(孙万卿, 2007)和声线修正法(王燕等, 2009)等都可削弱声速误差的影响.

对声纳距离观测值施加声线误差改正, 必须获取相应观测时间窗口和海域内的声速场信息. 利用实测离散声速剖面观测资料构建声速场, 通常采用空间内插法和经验正交函数法 EOF(吴永亨, 2013). EOF函数被认为是描述声速剖面最有效的基函数(Davis, 1976), 一般只需要前2~3阶经验正交函数就能较精确地表示测区内任意声速剖面. 将EOF函数与遗传模拟退火算法相结合开展了浅海声速场反演(张之猛和刘伯胜, 2006). 利用所得声速剖面进行声线跟踪即可获取声线误差改正量(Takahashi等, 2000; Sakic等, 2018;

王振杰等, 2016). 可以想象, 声线跟踪算法会因分层过多而影响其计算效率, 于是有人提出声速剖面自适应分层法(李圣雪等, 2015; 张居成等, 2013). 利用先验声速模型和实测声速数据也可采用自适应滤波算法(杨元喜和曾安敏, 2009).

在实际的水下定位中, 声线弯曲误差随着入射角变大而变大, 于是顾及声线入射角的水下定位也是函数模型研究的内容之一(Yang等, 2011). 也有学者将声线误差纳入随机模型(韩云峰等, 2017; 赵爽等, 2018), 通过降低误差较大的声信号的权值削弱其影响. 关于随机模型构建和相应参数估计方法将另文讨论, 这里不再细述.

6 深海试验与初步分析

利用本文论述的海底基准方舱的研制策略和海底基准点勘选准则以及基准网的布网策略, 2019年7月在水深3000m的海域进行了布网及观测试验. 图3为海底基准网和海面测线分布图, 5个海底基准点采用图2b构型, 每个点进行一次圆半径约为0.5倍水深的圆走航观测. 此外, 对5号点还进行一个半径为1.5倍水深的圆走航观测和交叉十字观测.

相对于陆地观测环境, 海洋环境相对恶劣, 观测数据异常误差偏多, 这种异常误差对点位最小二乘估计结果有较大影响. 为抑制异常误差影响, 计算中采用IGGIII方案抗差估计法(杨元喜等, 2002; Yang等, 2002)进行数据处理. 为比较不同的观测策略对结果的影响, 采用如下观测方案数据进行计算: 方案1, 采用圆半径约为0.5倍水深的圆走航观测; 方案2, 采用圆半径

约为1.5倍水深的圆走航观测; 方案3, 采用十字观测; 方案4, 圆形测量加十字观测.

表2和表3中, m_X 、 m_Y 和 m_H 分别为平面分量 X 和 Y 及高程分量 H 的中误差.

表2为方案1中圆走航5个点的定位结果的内符合精度; 5号基准点还进行不同半径圆走航观测和交叉十字观测, 其结果见表3的方案3; 由于无法找到更高精度的外部参考值, 我们以其不同观测图形计算结果的均值为参考, 给出了各方案计算结果与参考值的差异(见表4). 表2表明, 这次海底定位试验的基准点坐标分量内符合精度在1.2~4.7cm. 表3和表4表明, 不同观测方案计算的点位坐标结果差异较小, X 分量最大差异为0.007", Y 分量最大差异为0.008", 在 H 分量最大差异为-0.182m. 由于不同观测方案是在不同天进行的, 互为独立观测, 可以进行相互检核. 如果进一步优化函数模型, 改化算法, 有望获得更优的坐标精度. 优化处理模型和改化算法涉及面较多, 将另文讨论, 这里不再细述.

海底基准点测定完成后, 再同时跟踪五个海底控制点进行海面导航定位, 与海面载体的GNSS测量结果进行对比评价声纳导航定位精度. 声纳导航验证采

表 2 海底基准点坐标内符精度(方案1)

点号	$m_X(m)$	$m_Y(m)$	$m_H(m)$
1	0.018	0.012	0.019
2	0.029	0.020	0.030
3	0.019	0.013	0.020
4	0.045	0.034	0.047
5	0.032	0.025	0.042

图 3 深海海底基准点观测(a)和导航验证(b)示意图

表 3 不同观测图形计算海底基准点坐标及其内符精度

方案	坐标			精度		
	$X(^{\circ})$	$Y(^{\circ})$	$H(m)$	$m_X(m)$	$m_Y(m)$	$m_H(m)$
方案1	0.06	0.613	-72.67	0.032	0.025	0.042
方案2	0.054	0.622	-72.42	0.018	0.02	0.018
方案3	0.067	0.607	-72.43	0.026	0.018	0.026
方案4	0.06	0.615	-72.43	0.022	0.015	0.023

表 4 不同观测图形计算海底基准点坐标差

方案	$X(^{\circ})$	$Y(^{\circ})$	$H(m)$
方案1	0.000	-0.001	-0.182
方案2	-0.006	0.008	0.068
方案3	0.007	-0.007	0.058
方案4	0.000	0.001	0.058

用格网型检测图形(图3b), 最远点离海底基准网中心 11km. 结果表明, 海底基准点覆盖范围内导航精度(RMS)优于3m, 边缘区域精度也优于10m.

7 结束语

(1) 海底大地基准网是海洋大地基准框架建设的重要内容. 建设海底大地基准网首先要研制适合于深水置放的信标装置, 该装置不仅需要抗压、防腐, 还需要防拖拽、防溢流, 同时还必须具备长期工作能力; 频段选择尽量低频、宽带, 并采用直扩序列或跳频编码方式, 提高信号检测能力.

(2) 海底基准点必须布放在海底地形平缓、海底地质稳定性好、无松散淤积地段. 如果仅用于水下导航定位, 则网的整体布局必须考虑水下载体自带惯性导航累积误差的最大容许范围, 在误差允许边缘建设接力型海底大地基准网; 如果用于海底地壳运动监测, 则整体网型设计必须顾及海底板块的分布, 每一块体都应该有相对独立的海底大地基准网. 为了抵偿部分系统误差影响, 每个局部网型尽量对称分布.

(3) 观测策略优化是削弱系统误差影响的一种有效途径. 实际观测过程中, 先测定GNSS天线的相位中心到换能器的偏差改正(归心改正)矢量, 并将其作为具有先验信息的待估参数与海底控制点坐标联合解

算, 这一方面可以避免方程不适定, 又能提高偏差参数的解算精度. 水压测深应该作为海底定位的重要辅助观测信息, 可以与声纳观测一并处理. 为了削弱某些系统误差的影响, 每一个海底点应进行走圆观测, 辅之以交叉十字观测, 进行整体解算, 既可以改进高程分量定位精度, 又能削弱系统误差对水平分量的影响.

(4) 声纳观测误差随着海洋环境变化而变化, 声纳观测模型必须尽量补偿这些系统误差影响. 系统误差补偿可以采用空间差分 and 历元差分法, 分别削弱与空间位置相关联和与时间相关联的误差. 声线误差改正法是常用的方法之一, 但是必须首先计算出系统误差的具体量值, 才能改正到观测中. 函数模型误差补偿是更有效的方法之一, 即将系统误差作为待估参数, 与模型参数一起进行解算.

实际应用中, 构建水下多传感器观测的弹性函数模型、弹性随机模型以及海面观测与水下观测弹性融合, 仍然是海底大地基准网建设与应用的重要方向.

参考文献

- 陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 张燕平, 唐颖哲, 李辉, 程鹏飞, 孙凤华, 张鹏, 郭春喜. 2007. 2000国家大地控制网的构建和它的技术进步. 测绘学报, 36: 1-8
- 高茹茹. 2018. 水下声学定位关键技术问题研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学
- 韩云峰, 郑翠娥, 孙大军. 2017. 长基线声学定位系统跟踪解算优化方法. 声学学报, 42: 14-20
- 惠俊英, 生雪莉. 2007. 水下声信道. 北京: 国防工业出版社
- 李莉. 2007. 长基线阵测阵阵列技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学
- 李林阳, 吕志平, 崔阳. 2018. 海底大地测量控制网研究进展综述. 测绘通报, 1: 8-13
- 李圣雪, 王振杰, 聂志喜, 王毅, 吴绍玉. 2015. 一种适用于深海长基线定位的自适应分层声线跟踪法. 海洋通报, 34: 491-498

- 李守军, 包更生, 吴水根. 2005. 水声定位技术的发展现状与展望. 海洋技术学报, 24: 130–135
- 刘波. 2008. MIMO雷达正交波形设计及信号处理研究. 博士学位论文. 成都: 电子科技大学
- 刘伯胜, 雷家煜. 2010. 水声学原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社
- 刘经南, 陈冠旭, 赵建虎, 高柯夫, 刘焱雄. 2019. 海洋时空基准网的进展与趋势. 武汉大学学报(信息科学版), 44: 20–40
- 刘焱雄, 彭琳, 吴永亨, 周兴华. 2006. 超短基线水声定位系统校准方法研究. 武汉大学学报(信息科学版), 31: 610–612
- 宁津生, 吴永亨, 孙大军. 2014. 长基线水声定位系统发展现状及其应用. 海洋测绘, 23: 72–75
- 孙大军, 郑翠娥, 崔宏宇, 张居成, 韩云峰. 2018. 水下传感器网络定位技术发展现状与若干前沿问题. 中国科学: 信息科学, 43: 1121–1136
- 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 韩云峰, 崔宏宇. 2019. 水声定位导航技术的发展与展望. 中国科学院院刊, 34: 331–338
- 孙万卿. 2007. 浅海水声定位技术及应用研究. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学
- 田坦. 2010. 声呐技术(第2版). 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社
- 王燕, 林旺生, 梁国龙, 付进. 2009. 声线弯曲对同步水声定位系统影响分析及修正. 声学技术, 28: 123–124
- 王振杰, 李圣雪, 聂志喜, 王毅, 吴绍玉. 2016. 水声定位中一种大入射角声线跟踪方法. 武汉大学学报(信息科学版), 41: 1404–1408
- 魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2011. 2000中国大地坐标系: 中国大陆速度场. 测绘学报, 40: 403–410
- 吴永亨. 2013. LBL精密定位理论方法研究及软件系统研制. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学
- 薛树强, 杨元喜, 党亚民. 2014. 测距定位方程非线性平差的封闭牛顿迭代公式. 测绘学报, 43: 771–777
- 严俊, 张红梅, 赵建虎, 孟俊霞. 2016. 多波束声呐后向散射数据角度响应模型的改进算法. 测绘学报, 45: 1301–1307
- 杨元喜, 曾安敏. 2009. 顾及几何观测信息和地球物理模型形变参数自适应滤波解. 中国科学: 地球科学, 39: 437–442
- 杨元喜, 李晓燕. 2017. 微PNT与综合PNT. 测绘学报, 46: 1249–1254
- 杨元喜, 宋力杰, 徐天河. 2002. 大地测量相关观测抗差估计理论. 测绘学报, 31: 95–99
- 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 2017. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. 测绘学报, 46: 1–8
- 杨元喜. 2009. 2000中国大地坐标系. 科学通报, 54: 2271–2276
- 杨元喜. 2018. 弹性PNT基本框架. 测绘学报, 47: 893–898
- 杨元喜. 2016. 综合PNT体系及其关键技术. 测绘学报, 45: 505–510
- 易昌华, 任文静, 王钊. 2009. 二次水声定位系统误差分析. 石油地球物理勘探, 44: 136–139
- 张居成, 郑翠娥, 孙大军. 2013. 用于声线跟踪定位的自适应分层方法. 哈尔滨工程大学学报, 34: 1497–1501
- 张之猛, 刘伯胜. 2006. 遗传模拟退火算法用于浅海声速反演的仿真研究. 哈尔滨工程大学学报, 27: 505–508
- 赵建虎, 陈鑫华, 吴永亨, 冯杰. 2018. 顾及波浪影响和深度约束的水下控制网绝对坐标的精确确定. 测绘学报, 47: 413–421
- 赵建虎, 刘经南. 2008. 多波束测深及图像数据处理. 武汉: 武汉大学出版社
- 赵建虎, 王爱学. 2015. 精密海洋测量与数据处理技术及其应用进展. 海洋测绘, 35: 1–6
- 赵爽, 王振杰, 刘慧敏. 2018. 顾及声线入射角的水下定位随机模型. 测绘学报, 47: 1280–1289
- 中国人民解放军总装备部. 2011. 军用锂源原电池通用规范. 中华人民共和国国家军用标准GJB916B-2011, 2011-11-25
- Bürgmann R, Chadwell D. 2014. Seafloor geodesy. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 42: 509–534
- Chadwell C D, Hildebrand J A, Spiess F N. 2002. Seafloor geodetic monitoring with the plate boundary observatory. <http://www.sceec.org/news/00news/images/pbominiproposals/Chadwellpbo24.pdf>
- Chen G, Liu Y, Liu Y, Tian Z, Liu J, Li M H. 2019. Adjustment of transceiver lever arm offset and sound speed bias for GNSS-Acoustic positioning. *Remote Sens*, 11: 1606
- Cheng W H. 2004. A study of increasing the precision of navigation position for submerged body. *Ocean Eng*, 31: 693–707
- Chadwell C D, Spiess F N. 2008. Plate motion at the ridge-transform boundary of the south Cleft segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic data. *J Geophys Res*, 113: B04415
- Davis R E. 1976. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr*, 6: 249–266
- David C C, Spiess F N. 2008. Plate motion at the ridge-transform boundary of the South Cleft Segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-acoustic data. *J Geophys Res*, 113: B04405
- Defense Advanced Research Projects Agency. 2016. Department of Defense Fiscal Year (FY) 2017 President's Budget Submission. February 2016[EB/OL]
- Favali P, Beranzoli L. 2006. Seafloor observatory science: A review. *Ann Geophys*, 49: 515–567
- Fujimoto H, Kanazawa T, Murakami H. 1997. Seafloor acoustic ranging and the effect of temperature variation. In: Segawa J, Fujimoto H, Okubo S, eds. Gravity, Geoid and Marine Geodesy. Tokyo: Springer. 690–695
- Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, Sato M, Toyama S, Katayama M, Kawai K, Matsumoto Y, Yabuki T, Asada A, Colombo O L. 2006. GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: Method of data analysis and its application. *Earth Planet Space*, 58: 265–275
- Geng X. 1997. Precise acoustic bathymetry. Dissertation for Master's Degree. Victoria B C: University of Victoria
- Han Y, Zheng C, Sun D. 2016. Signal design for underwater acoustic

- positioning systems based on orthogonal waveforms. *Ocean Eng*, 117: 15–21
- Li Z, Dosso S E, Sun D. 2016. Joint inversion for transponder localization and sound-speed profile temporal variation in high-precision acoustic surveys. *J Acoust Soc Am*, 140: EL44–EL49
- Matsumoto Y, Ishikawa T, Fujita M, Sato M, Saito H, Mochizuki M, Yabuki T, Asada A. 2008. Weak interpolate coupling beneath the sub-duction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/Acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planet Space*, 60: 9–12
- McGuire J J, Collins J A. 2013. Millimeter-level precision in a seafloor geodesy experiment at the discovery transform fault, east pacific rise. *Geochem Geophys Geosyst*, 14: 4392–4402
- Mcintyre M C. 1989. Design and Testing of a Seafloor Geodetic System. San Diegom C A: University of California
- Mochizuki M, Sato M, Katayama M. 2003. Construction of seafloor geodetic observation network around Japan. Tokyo: Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology. 591–600
- National Security Space Office. 2008. National positioning, navigation, and timing architecture study. The executive summary of the PNT architecture study final report. National Security Space Office. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16923/dot_16923_DS1.pdf
- Nguyen D, Widrow B. 1990. Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights. San Diego: International Joint Conference on Neural Networks. 21–26
- Osada Y, Fujimoto H, Miura S, Sweeney A, Kanazawa T, Nakao S, Sakai S, Hildebrand J A, Chadwell C D. 2003. Estimation and correction for the effect of sound velocity variation on GPS/Acoustic seafloor positioning: An experiment off Hawaii Island. *Earth Planet Space*, 55: 17–20
- Polster A, Fabian M, Villinger H. 2009. Effective resolution and drift of Paroscientific pressure sensors derived from long-term seafloor measurements. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: 1–19
- Sakic P, Pit H, Ballu V, Royer J Y, Kopp H, Lange D, Petersen F, zeren M S, Ergintav S, Geli L, Henry P, Deschamps A. 2016. No significant steady state surface creep along the North Anatolian Fault offshore Istanbul: Results of 6 months of seafloor acoustic ranging. *Geophys Res Lett*, 43: 6817–6825
- Sakic P, Ballu V, Crawford W C, Wppelmann G. 2018. Acoustic ray tracing comparisons in the context of geodetic precise off-shore positioning experiments. *Mar Geodesy*, 41: 315–330
- Sato M, Fujita M, Matsumoto Y, Saito H, Ishikawa T, Asakura T. 2013. Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship’s track line. *J Geodesy*, 87: 825–842
- Spiess F N, Chadwell C D, Hildebrand J A, Young L E, Purcell Jr. G H, Dragert H. 1998. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys Earth Planet Inter*, 108: 101–112
- Spiess F N, Chandwell C D, Hildebrand J A, Dragert H. 2000. New geodetic reference stations on the Juan de Fuca Plate. *Eos Trans, AGU* 81(48), Fall Meet, Suppl, Abstract, G11C-09
- Takahashi N, Futa K, Tsuchiya T, Kikuchi T. 2000. Calculation of eigenray with equi-sound-speed division of sound speed profile. *Acoust Sci Technol*, 21: 153–161
- Wei Z. 2008. China geodetic coordinate system 2000 and its comparison with WGS84. *J Geodesy Geody*, 28: 1–5
- Xu P, Ando M, Tadokoro K. 2005. Precise, three-dimensional seafloor geodetic deformation measurements using difference techniques. *Earth Planet Space*, 57: 795–808
- Yamada T, Ando M, Tadokoro K, Sato K, Okuda T, Oike K. 2002. Error evaluation in acoustic positioning of a single transponder for seafloor crustal deformation measurements. *Earth Planet Space*, 54: 871–881
- Yang F, Lu X, Li J, L Han, Z Zheng. 2011. Precise positioning of underwater static objects without sound speed profile. *Mar Geol*, 34: 138–151
- Yang Y X, Song L, Xu T H. 2002. Robust estimator for correlated observations based on bifactor equivalent weights. *J Geodesy*, 76: 353–358
- Yang Y X. 1991. Robust Bayesian estimation. *Bull Geod*, 65: 145–150
- Zhao J, Zou Y, Zhang H, Wu Y, Fang S. 2016. A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement. *J Mar Sci Technol*, 21: 216–226
- Zou Y, Wang C, Zhu J, Li Q. 2017. Optimal sensor configuration for positioning seafloor geodetic node. *Ocean Eng*, 142: 1–9

(责任编辑: 熊熊)