

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.020

深度约束的海底控制网点坐标确定方法

赵建虎¹, 邹亚靖¹, 吴永亭², 方守川³

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 中国石油东方地球物理公司, 河北 涿州 072751)

摘要: 为解决传统水下控制网解算中基于三维空间距离交会确定控制点坐标存在的垂直解不稳定问题, 借助压力传感器提供的深度信息, 提出了融合深度差的二维平差方法和附加深度的三维约束平差方法。融合深度差的二维平差方法将深度差作为已知值, 将三维空间交会问题转换为二维平面交会问题, 在二维平面构建平差模型, 确定水下控制点坐标; 附加深度的三维约束平差方法将深度作为高精度观测值和约束条件, 并与空间距离方程联合解算, 确定水下控制点坐标。在松花湖水域进行实验, 结果表明, 两种方法均将水下控制点解算精度提高了2~5倍, 说明在水下控制网解算过程引入深度信息构建平差模型, 有助于提高控制网点坐标三维解的稳健性和精度。

关键词: 水下控制网; 圆走航; 空间距离交会定位法; 约束平差; 深度差

中图分类号: P229

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)10-0137-05

Determination of underwater control point coordinate based on constraint of water depth

ZHAO Jianhu¹, ZOU Yajing¹, WU Yongting², FANG Shouchuan³

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. BGP INC., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, Hebei, China)

Abstract: This paper proposes a two-dimensional constrained adjustment method with fused depth difference and a three-dimensional constraint adjustment method with additional depth by using the depth information from pressure transducer, in order to solve the problem of unstable vertical solutions in traditional underwater control network solutions. The considered problem exists in a control point coordinate that is determined based on a three-dimensional space distance intersection. Applying the former method with a given depth difference, the underwater control point coordinate can be determined by transforming the three-dimensional space intersection problem into a two-dimensional plane intersection problem and then constructing an adjustment model in the two-dimensional plane. Applying the latter method, the underwater control point coordinate is determined by solving the space distance equation combined with high precision observations and constrained conditions of the depth. We carried out experiments in Songhua Lake, and the experiment results show that the calculation precision of underwater control point coordinates is improved 2 ~ 5 times by applying both two methods. It implies that introducing the depth information into the calculation process of underwater control network and then constructing adjustment model can be helpful to improve the stability and precision of the three-dimensional solutions of the control network coordinates.

Keywords: underwater control network; circle sailing; space ranging intersection method; constrained adjustment; depth difference

海底控制网对于水下固定目标监测和运动目标的定位和导航具有重要的作用。控制网点布设完成后, 需要借助声学交会方法确定各网点的坐标^[1]。传统方法采用两步法确定控制点坐标, 即基于三维空间距离交会、采用双三角锥法确定控制点的平面坐

标^[2], 采用三叶法或四叶法确定控制点垂直坐标。两步法需多艘测量船同步作业, 费时费力, 且受潮位、风浪等因素影响较大, 控制点垂直解精度不高^[3]。近年来, 国外一些学者提出了一种圆走航方法, 即利用测量船在水面围绕水下控制点绕圆航行, 借助每个时刻 GPS 提供的船位、船载换能器到水下控制点间的测距值, 交会得到海底控制点坐标^[4-5]。该方法充分利用了距离观测值的冗余度和对称性, 实现水下控制点平面坐标的高精度确定, 但因船舶观测点在垂直方向上对海底控制点非对称分布, 常出现垂直

收稿日期: 2015-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(41376109); 国家重点研发计划(2016YFB0501703)

作者简介: 赵建虎(1970—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 邹亚靖, 914580788@qq.com

解质量不高甚至不稳定问题.圆走航方法解决了坐标从水面到海底的传递问题,但存在费时费力等不足.近年,随着应答器间相互测距功能的实现,基于海底应答器间观测距离,结合圆走航提供的部分控制点绝对坐标,借助约束平差,可以快速、高精度地实现海底所有控制网点的二维平面坐标的确定^[6-8],但该方法不足的是,由于声速误差对测距的影响无法消除以及海底控制网点在垂直方向分布的不均匀性问题在实际布网时无法很好解决,海底控制网点的垂直解精度不高和不稳定问题仍然存在.由于水下控制点是后续水下导航定位平面和垂直解确定的参考,若上述问题存在,必然会给后续水下导航定位解的成果精度带来较大影响.基于此,本文借助水下应答器内置压力传感器提供的深度信息,提出了融合深度差的二维约束平差方法和附加深度的三维约束平差方法,以期解决上述问题,实现海底控制网点三维坐标的高精度、稳健确定.

1 约束平差模型

1.1 三维约束平差

欲将海底三维自由网约束在绝对坐标框架内,须为其提供 1 个三维绝对坐标基准及 3 个方位基准,即至少需要 3 个已知坐标的控制点^[9-10].假设水下控制网由 m 个控制点组成,其中 m_1 个为已知控制点, m_2 个为待求控制点.则观测边总个数为 $C = C_m^2 - C_{m_1}^2$,必要观测数为 $3(m - m_1)$,多余观测数为 $r = C_m^2 - C_{m_1}^2 - 3(m - m_1)$ ^[11-12].

设第 i 条观测边的两端点分别为 A_i 和 B_i ,声波在两端的应答器间的单程传播时间为 t_i ,由于应答器在海底的深度近似相等,传播过程中速度 v 可近似认为相等,则观测斜距 $S_i = vt_i$;若两端点应答器的初始坐标分别为 \mathbf{x}_{A_i} 和 \mathbf{x}_{B_i} ,则观测方程为

$$S_i = f(\mathbf{x}_{A_i}, \mathbf{x}_{B_i}) + \delta S_{vi} + \delta S_{ti} + \varepsilon_i.$$

式中: $f(\mathbf{x}_{A_i}, \mathbf{x}_{B_i}) = \|\mathbf{x}_{A_i} - \mathbf{x}_{B_i}\|^2$,为两端点应答器间几何距离,由两端点应答器坐标反算得到; δS_{vi} 、 δS_{ti} 分别为声速等效误差和时延等效误差; ε_i 为随机误差.

由于两端点应答器基本处于同温层,声线传播速度基本不变^[13-14], δS_{vi} 可忽略, δS_{ti} 经过外部设备改正后,观测边的误差方程为

$$v_i = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_{A_i}} \mathbf{d}\mathbf{x}_{A_i} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_{B_i}} \mathbf{d}\mathbf{x}_{B_i} - [S_i - f(\mathbf{x}_{A_i}, \mathbf{x}_{B_i})]. \quad (1)$$

三维约束平差模型中的观测方程总个数为 $C = C_1 + C_2$,其中:

$$C_1 = C_{m_2}^2, \\ C_2 = C - C_1 = C_m^2 - C_{m_1}^2 - C_{m_2}^2.$$

式中: C_1 为两端点 A_i 和 B_i 均为待求控制点的观测边个数,则第 i 条边的误差方程如式(1)所示; C_2 为只有一端 A_i 为待求控制点的观测边个数,则根据式(1)其误差方程为

$$v_i = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_{A_i}} \mathbf{d}\mathbf{x}_{A_i} - [S_i - f(\mathbf{x}_{A_i})]. \quad (2)$$

综合上述两种情况可建立 C 个误差方程,其矩阵形式如

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{x} - \mathbf{l}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{B} 为系数矩阵; \mathbf{V} 为观测值改正数向量; \mathbf{l} 为观测值与反算距离的差向量.

根据 $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$, 水下控制点坐标可确定为

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{d}\mathbf{x} = \mathbf{Q} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}, \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{d}\mathbf{x}. \quad (6)$$

式中: \mathbf{P} 为观测值权阵, \mathbf{Q} 为待求坐标的协因数阵.

多次迭代直至 $\|\mathbf{d}\mathbf{x}\|^2$ 小于设定限差 eps , 即可获得其余应答器的高质量定位解.

第 j 个水下应答器的内符合精度可用下式来评估:

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{r}, \quad (7)$$

$$\sigma_j = \sigma_0 \sqrt{\mathbf{Q}(3j - 2, 3j - 2) + \mathbf{Q}(3j - 1, 3j - 1) + \mathbf{Q}(3j, 3j)}. \quad (8)$$

1.2 融合深度差的二维约束平差

基于上述三维约束平差模型确定水下控制网点时,存在如下两个方面的不足^[15-16]:

1) 假设海底控制点间高差较小,认为声速近似相同,采用常声速或平均声速计算海底控制网点间空间距离^[17].该假设对于深海是非常有效的,因为深海等温层声速变化非常小;但对于布设在浅水或温跃层的控制网,由于点间传播声速变化显著,即使控制点间深度差较小,上述假设也会给点间距离计算带来较大偏差^[18].

2) 上述约束平差中,已知的控制点坐标由圆走航法确定.圆走航法借助三维距离交会确定海底控制点坐标,如 GPS 定位一样,在垂直方向上,水面船舶观测点只位于海底控制点的一侧,这种定位方式必将导致平面解精度高,垂直解精度较低,甚至出现不稳定情况.

为此,本文给出一种融合深度差的海底控制网点坐标二维约束平差方法.

海底控制点上的应答器均内置压力传感器,可提供 0.1% 水深精度的深度 Z , 远高于测距精度.借助两控制点间的深度差 ΔZ , 可将观测斜距 S 改正为平距^[19-20], 则以上三维约束平差问题则可转换为二维

约束平差问题,不但可以简化海底控制网点坐标确定的数据处理流程,且能够提高三维点位的确定精度.如图 1 所示,两控制点间的观测平距为

$$D_i = \sqrt{S_i^2 - \Delta Z_{A_i B_i}^2}$$

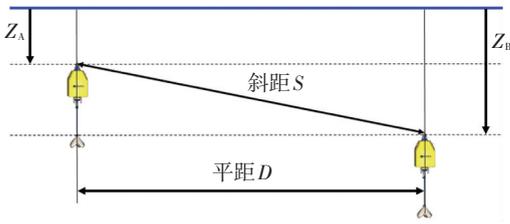


图 1 控制点间斜距到平距的归算

Fig.1 Calculation from slant distance to horizontal distance between control points

欲将二维自由网约束在绝对框架内,须为其提供一个二维坐标基准及一个方位基准,即至少需要两个已知坐标的控制点.已知坐标的控制点二维坐标仍由圆走航法来提供.观测方程总个数为 $C = C_m^2 - C_{m_1}^2$,必要观测数为 $2(m - m_1)$,多余观测数为 $r = C_m^2 - C_{m_1}^2 - 2(m - m_1)$.二维约束平差模型中的观测方程总个数仍为 $C = C_1 + C_2$,其中 C_1 是两端点 A_i 和 B_i 均为待求控制点的观测边个数, C_2 是只有一端 A_i 为待求控制点的观测边个数.

分别建立 C_1 个类似式(1)的误差方程、 C_2 个类似式(2)的误差方程,不同的是其中的 x_{A_i} 和 x_{B_i} 均为二维平面坐标.待求点的平面坐标 x 仍可借助式(4)~(6)确定,对于第 j 个水下控制点,其平面坐标精度可用下式来评估,垂直坐标精度可由压力传感器精度来提供.

$$\sigma_j = \sigma_0 \sqrt{Q(2j - 1, 2j - 1) + Q(2j, 2j)}. \quad (9)$$

1.3 附加深度的三维约束平差

控制点上应答器内置压力传感器尽管可以提供具有较高精度的深度,但根据其测量原理,实测深度为瞬时海面到应答器中心之间的垂直距离,波浪影响必然夹杂在其中^[20].因此,应答器提供的深度 Z 实则为包含误差的观测量.若海面相对平静,则两点观测深度包含的误差较小,即点间深度差 ΔZ 较小,可将其视为已知量,采用如上所述的二维约束平差模型处理观测边;反之,若海面不平静, ΔZ 较大,内含有深度相关误差,不能视为已知量,上述融合深度约束的二维约束平差结果必然不准确.为此,本文给出一种附加深度的三维约束平差方法.其基本思想是,将应答器提供的深度作为新的观测量,与应答器测距观测量联合建立误差方程,构建附加深度的三维约束平差模型.

欲将此模型约束在绝对框架内,至少需要 2 个已知坐标的控制点.

设观测方程总个数为 $C = C_m^2 - C_{m_1}^2 + (m - m_1)$,必要观测数为 $3(m - m_1)$,多余观测数为 $r = C_m^2 - C_{m_1}^2 - 2(m - m_1)$.其中 $C = C_1 + C_2 + (m - m_1)$,分别根据式(1)建立 C_1 个误差方程,式(2)建立 C_2 个误差方程,对于第 j 个未知控制点,将其深度值作为观测量建立 $m - m_1$ 误差方程:

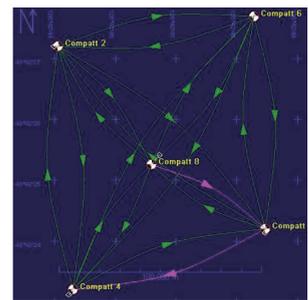
$$v_j = dZ_j - (Z_j - Z_j^0)$$

式中: Z_j 为第 j 个未知控制点的深度观测值, Z_j^0 为其深度初始值.

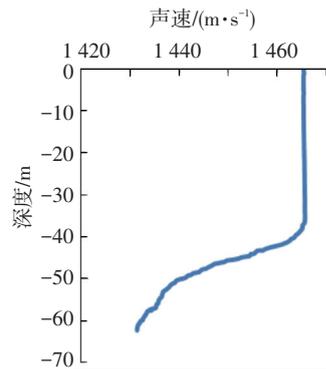
水下应答器的坐标 x 仍可借助式(4)~(6)确定,第 j 个水下应答器的内符合精度仍可用式(7)~(8)评估.

2 实验及分析

为了比较和验证上述平差模型,在松花湖开展了水下控制网布设和施测实验.松花湖实验水域平均水深约为 60 m,试验水域大小为 150 m × 110 m.分别将 C2、C4、C5、C6 和 C8 应答器(控制点)布设在水下.水底地形相对平坦,应答器深度差较小.应答器布设位置如图 2(a)所示,实验水域声速剖面 SVP 结构如图 2(b)所示.在水下控制网测量前,严格测定了长基线水下定位系统(long baseline, LBL)的船载换能器、GPS RTK 天线中心在船体坐标系下的坐标;此外,所有水下应答器时延误差均借助外部设备进行了有效改正.完成上述准备工作后,开展水下控制网测量.



(a) 水下控制网点布设



(b) 测量水域声速剖面

图 2 水下控制网点布设及测量水域声速剖面

Fig.2 Deployment of underwater control points and sound velocity profile in survey area

2.1 水下控制网测量

为了将绝对坐标基准从水面引入水下以及检验上述 3 种模型确定水下控制网点坐标的有效性,首先开展圆走航测量.采用一艘测量船,围绕不同水下应答器以半径 30 m 的圆周测距.在圆周上每个航迹点,获取船载换能器的 GPS 坐标及船载换能器到水下应答器之间距离,并利用压力传感器获得船载换能器的在航深度和水下应答器的深度.将船载换能器与水下应答器的深度差作为附加约束,采用距离交会定位原理确定每个控制点的三维坐标.完成上述测量后,借助水下控制点上应答器,开展应答器间相互测距,获得控制点间的三维距离观测值.获得所有观测信息后,将开展水下控制网点的坐标确定.

2.2 水下控制网点坐标确定

基于以上控制点间距离 S 、各控制点上的深度观测值 Z ,以及圆走航提供的部分水下已知坐标,分别采用本文给出的 3 种数据处理方法,计算水下控制网点坐标.在数据处理中,测量船投放应答器时 RTK 提供的平面坐标及水下地形图提供的深度坐标用作各待求点的初始坐标或近似坐标.

1)方法 1(三维约束平差).采用三维约束平差

方法,以已知点坐标为约束,利用点间观测距离 S ,借助水下控制网测量所述方法,计算各待求点坐标并对其进行精度评估.开展 2 个试验:(1-A) C2、C4 和 C5 为已知点,C6 和 C8 为待求点;(1-B) C5、C6 和 C8 为已知点,C2 和 C4 为待求点.

2)方法 2(融合深度差的二维约束平差).采用融合深度差的二维约束平差方法,利用各水下控制点的深度观测值 Z ,借助式(8)将控制点间空间观测距离 S 转换为水平距离 D ,以部分已知点平面坐标为约束,在二维空间构建观测方程及误差模型,基于融合深度差的二维约束平差所述的融合深度差的二维约束平差模型,计算其余应答器的坐标.开展 2 个试验:(2-A) C2 和 C4 为已知点,C5、C6 和 C8 为待求点;(2-B) C6 和 C8 为已知点,C2、C4 和 C5 为待求点.

3)方法 3(附加深度的三维约束平差).采用附加深度的三维约束平差方法,方法 1 的基础上,将各控制点的深度作为观测量,增加式(9)所示观测方程,以部分已知点平面坐标为约束,在三维空间开展待求点坐标的确定.开展 2 个试验:(3-A) C2 和 C4 为已知点,C5、C6 和 C8 为待求点;(3-B) C6 和 C8 为已知点,待求点为 C2、C4 和 C5.本文给出的 3 种方法的处理结果见表 1.

表 1 不同方法下 5 个应答器的定位结果

Tab.1 Positioning results of five transponders by different methods

坐标 差/m	C2			C4			C5				C6			C8		
	1-B	2-B	3-B	1-B	2-B	3-B	2-A	2-B	3-A	3-B	1-A	2-A	3-A	1-A	2-A	3-A
dx	0.05	0.05	0.04	-0.07	-0.05	-0.05	-0.04	0.05	-0.04	0.05	-0.08	-0.08	-0.08	0	0	0
dy	-0.08	0.04	0.04	0.04	-0.02	-0.01	0.03	-0.07	0.03	-0.06	-0.03	0.01	-0.02	-0.06	0.01	0.02
dz	-0.47	0.08	0.08	-0.25	0.07	0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.32	0.12	0.12	0.23	-0.09	-0.09

2.3 比较及分析

由于圆走航方法具有较多的冗余边观测量,其空间交会确定的平面坐标准确可靠;此外,为避免测量点与被测量点几何分布导致的垂直解精度不高和不稳定问题,基于控制点上应答器提供的深度信息和圆走航船载换能器提供的深度信息,将其深度差作为附加约束,最终可获得高精度的水下控制点垂直解.以圆走航方法获得的各水下控制点坐标为参考点,各数据处理方法所得结果与之比较,可得各点的外符合精度如表 1 所示,尽管低于借助协方差传播律计算得到的内符合精度^[21],但更能客观地评价本文方法.由表 1 可以看出:

1)3 种方法的平面定位精度均较高,为厘米级;相对方法 1,方法 2,3 的平面定位精度略高,但不显著.

2)3 种方法所得控制点垂直解精度差异较大.方

法 1 垂直解误差大于 0.23 m,小于 0.47 m,定位精度为分米级,进一步验证了交会定位存在的垂直解精度不高问题;相对方法 1,方法 2,3 无论是平面和垂直解,精度均在厘米级,定位精度一致且稳定,表明本文提出的基于深度约束的水下控制网点确定方法是正确的.

3)从各点的垂直定位精度来看,方法 2,3 的垂直解误差最大为 0.12 m,最小为 0.07 m,2 种方法的定位精度基本一致.分析认为,由于试验在湖上进行,风浪相对海上小的多,波浪因素对深度观测量的影响非常小,无论是每个控制点上的深度观测值还是控制点间的深度差观测值,精度均比较高,因此基于深度差的二维约束平差方法与附加深度的三维约束平差方法几乎是等价的.尽管前者具有简单、方便和易于实施等优点,但考虑海上作业实际,建议采用

附加深度的三维约束平差方法.

3 结 论

1) 本文提出的 2 种基于深度约束的海底控制网点坐标确定方法,有效地解决现有数据处理方法的不足,实现了海底控制网点三维坐标,尤其是垂直解的高精度、稳健确定,并在松花湖实验中得到了检验和验证.

2) 无论是提出的融合深度差的二维约束平差方法还是附加深度的三维约束平差方法,均将三维约束平差解的精度提高 2~5 倍,且实现了平面解与垂直解精度的同量级;考虑海上实际,建议在数据处理中采用附加深度的三维约束平差方法,即将深度值作为附有误差的观测量,与测边观测量一并平差,可有效消除波浪误差的影响,提高海底控制点三维解的精度,同时,增强本文方法的适用性.

参 考 文 献

[1] WOODWARD B, SARI H. Digital underwater acoustic voice communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(2):181-192. DOI: 10.1109/48.486793.

[2] 张群良,刘海军. 基于双圆锥阵的水下目标被动定位方法[J]. 探测与控制学报,2010, 32(2):26-29. DOI:10.3969/j.issn.1008-1194.2010.02.007.

[3] ZHANG Liming, LI Fei, CHEN Wu, et al. Height datum unification between Shenzhen and Hong Kong using the solution of the linearized fixed-gravimetric boundary value problem[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(5):411-417. DOI: 10.1007/s00190-008-0234-9.

[4] LLORET J. Underwater sensor nodes and networks[J]. Sensors, 2013, 13(9):11782-11796. DOI: 10.3390/s130911782.

[5] ALDHARRAB S, UYSAL M, DUMAN T M. Cooperative underwater acoustic communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7):146-153. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6553691.

[6] 白鑫,钱志博,陈洁. 一种水声应答器电子系统的设计[J]. 电子测量技术, 2009,32(10):8-11.
BAI Xin, QIAN Zhibo, CHEN Jie. Design of underwater acoustic transponder electronic system [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(10): 8-11.

[7] 宋阳. 海底应答器阵列测量系统若干技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

[8] 吴永亨,周兴华,杨龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. 海洋测绘,2003,23(4):18-21.DOI:10.3969/j.issn.1671-3044.2003.04.006.
WU Yongting, ZHOU Xinghua, YANG Long. Underwater acoustic positioning system and its application[J]. Hydrographic Surveying and Charting,2003,23(4):18-21.DOI:10.3969/j.issn.1671-3044.2003.04.006.

[9] 陶本藻,唐诗华,皮新. 具有约束的自由网平差及其应用[J]. 测绘学报, 1984, 13(1): 60-68.

TAO Benzao, TANG Shihua, PI Xin, et al. Application of free net adjustment with conditions [J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 1984, 13(1): 60-68.

[10] 乔雨,王波兴,向文. 基于自由度分析的三维几何约束推理求解[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002, 14(6):557-561. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9775.2002.06.014.
QIAO Yu, WANG Boxing, XIANG Wen. Solving 3D geometric constraints based on freedom analysis[J]. Journal of Computer-aided DESIGN & Computer Graphics,2002, 14(6):557-561. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9775.2002.06.014.

[11] 冯国强,刘根友,孙秀云. GPS 网参数约束平差法研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(5):25-26. DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2007.05.008.
FENG Guoqiang, LIU Genyou, SUN Xiuyun. GPS network adjustment based on parameter constraint adjustment[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5):25-26. DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2007.05.008.

[12] 余学祥,吕伟才. GPS 网空间无约束平差的抗差解法[J]. 勘察科学技术,1997,(4):43-47.

[13] CANDY J V, SULLIVAN E J. Sound velocity profile estimation; a system theoretic approach[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3):240-252. DOI: 10.1109/JOE.1993.236362.

[14] PREISIG J. Acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development[C]//Proceedings of the First ACM International Workshop on Underwater Networks. Los Angeles, CA: ACM, 2007:2-10. DOI:10.1145/1161039.1161041.

[15] 赵建虎,张红梅. 水下地形测量技术探讨[J]. 测绘信息与工程, 1999,(4):22-26. DOI:10.3969/j.issn.1007-3817.1999.04.007.

[16] 何祚镛,何元安,商德江. 双水听器水声声强测量系统的误差分析和校准[J]. 声学学报,2000,(3):235-241. DOI: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2000.03.007.
HE Zuoyong, HE Yuan'an, SHANG Dejiang. Investigation of system for underwater sound intensity measurement, their calibration and analysis of measuring error[J]. Acta Acustica, 2000,(3):235-241. DOI: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2000.03.007.

[17] 苏林,马力,宋文华,等. 声速剖面对不同深度声源定位的影响[J]. 物理学报, 2015, 64: 24302-024302. DOI:10.7498/aps.64.024302.
SU Lin, MA Li, SONG Wenhua, et al. Influences of sound speed profile on the source localization of different depths[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64: 24302-024302. DOI:10.7498/aps.64.024302.

[18] 刘贞文,杨燕明,许德伟,等. 海水声速直接测量和间接测量结果分析[J]. 海洋技术学报, 2007, 26(4): 44-46.
LIU Zhenwen, YANG Yanming, XU Dewei, et al. The analysis of sound speed in seawater between indirect-measurement data and direct measurement data[J]. Ocean Technology, 2007, 26(4):44-46.

[19] 任国晶. 深度传感器的研制与实验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2012.

[20] TEYMORIAN A Y, CHENG W, MA L, et al. 3D underwater sensor network localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12):1610-1621. DOI: 10.1109/TMC.2009.80.

[21] 吴永亨. LBL 精密定位理论方法研究及软件系统研制[D]. 武汉:武汉大学, 2013.

(编辑 张 红)