引文格式:薛树强,杨诚,卞加超,等.无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):296-305.DOI:10.13203/j.whugis20240131

Citation: XUE Shuqiang, YANG Cheng, BIAN Jiachao, et al. Active Sonar Time-Window Navigation and Positioning Model Without External Information Assistance[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2):296-305.DOI:10.13203/j.whugis20240131

无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型

薛树强[1] 杨 诚[2] 卞加超[1] 杨文龙[3] 赵 爽[1]

1 中国测绘科学研究院,北京,100039

2 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京,100083

3 山东大学空间科学与物理学院,山东 威海,264200

摘 要:受限于海底导航信标时间同步的固有难度,水下导航通常采用主动式定位模型。然而,该模型总是不适定的,即每个观测对应载体信号收发时刻的两个待定点。若忽略载体运动,可取0.5倍的信号往返程的传播时间作为观测值进行定位,但这必然引入模型误差,特别是在深海场景或载体高速运动的情形下;若使用多普勒测速或惯性导航等航位推算信息,则会导致声呐导航依存于外部信息。因此,提出了一种附加载体运动学参数的主动式声呐时间开窗导航定位模型,实现了载体位置、速度、加速度等信息的联合估计,在实时输出载体当前时刻坐标信息的同时实现了载体任意时刻运动状态信息的获取,解决了主动式定位模型的不适定性问题。同时,提出了时间开窗导航定位精度几何因子(trajectory dilution of precision, TRDOP),以评估时间开窗导航定位构型的强度。结果表明,TRDOP可以很好地刻画时间开窗导航定位构型的优劣,且时间开窗导航定位模型显著优于传统空间交会定位模型。在日本公开数据集上的测试结果显示,主动式声呐时间开窗导航定位模型的导航定位精度优于5 m,且窗口中间时刻的定位精度更高。

关键词:海底基准;水下导航;声学导航;状态估计;开窗估计

中图分类号:P229 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-19

DOI:10.13203/j.whugis20240131 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0296-10

Active Sonar Time-Window Navigation and Positioning Model Without External Information Assistance

XUE Shuqiang[1] *YANG Cheng*[2] *BIAN Jiachao*[1] *YANG Wenlong*[3] *ZHAO Shuang*[1]

1 Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

2 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264200, China

Abstract: **Objectives**: Underwater acoustic navigation predominantly employs active positioning models due to the inherent challenge of achieving precise time synchronization among seafloor navigation beacons. A fundamental limitation of this model is its ill-posed nature, where each observation corresponds to two unknown states of the carrier vehicle. A common simplification assumes the carrier is stationary during the signal's round-trip travel time, allowing the use of half this duration for positioning via spatial intersection. However, this assumption inevitably introduces model errors, which become significant in deep-sea environments or during high-speed carrier motion. Alternative approaches integrate external information from sensors such as Doppler velocity logger (DVL) or inertial navigation system (INS) to resolve the ambiguity, but it compromises the independence of system and introduces complexities related to cross-sensor error contamination. The primary objective is to develop a self-contained navigation and positioning model that ef-

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41931076);崂山实验室科技创新项目(LSKJ202205100,LSKJ202205105)。

第一作者:薛树强,博士,研究员,主要从事海洋大地测量研究。xuesq@casm.ac.cn

通信作者:卞加超,硕士。bjc0539@163.com

fectively resolves the inherent ill-posedness of active sonar systems without relying on external aiding information, thereby enhancing both accuracy and autonomy in underwater navigation. **Methods:** To address the aforementioned challenge, a novel time-window navigation and positioning model for active sonar is proposed. The core innovation lies in the incorporation of the carrier's kinematic parameters directly into the observation model. Instead of estimating only a single position per epoch, the proposed model treats the carrier's trajectory over a short, sliding time window as a polynomial. This allows for the joint estimation of key motion states, including position, velocity, and acceleration, using only the accumulated two-way travel time measurements from multiple pings within the window. The proposed method leverages the principle of windowed estimation, analogous to techniques used in satellite orbit determination, to overcome the rank deficiency of single-epoch solutions. Furthermore, to quantitatively assess the geometric strength and reliability of the positioning configuration within the time-window framework, a new metric termed the trajectory dilution of precision (TRDOP) is introduced. **Results:** The performance of the proposed time-window model and the effectiveness of TRDOP are rigorously validated through both simulation and real data experiments. The simulation results demonstrate a strong positive correlation between the calculated position dilution of precision and acceleration dilution of precision values and the corresponding root mean square errors in estimated position and velocity, confirming that TRDOP is a reliable indicator of navigation configuration quality. The comparative analysis reveal that the traditional spatial intersection model, which ignores carrier motion, produces substantial errors in simulated scenarios with moving carriers. In contrast, the proposed time-window model can achieve positioning accuracy at the meter level. A key finding is that the positioning accuracy at the mid-point of the time window is consistently higher than that at the current epoch. The tests conducted on a publicly available Japanese global navigation satellite system-acoustic dataset show that the time-window navigation model successfully achieves positioning accuracy better than 5 m. The constant-velocity model generally yield slightly better and more stable results for the tested trajectories, which could be effectively approximated as piecewise linear. **Conclusions:** We present a significant advancement in active sonar-based underwater navigation by introducing a time-window positioning model that intrinsically resolves the system's ill-posedness. The proposed model successfully eliminates the dependency on external sensors like DVL or INS for fundamental disambiguation, enabling the generation of independent, high-rate estimates of the carrier's full kinematic state solely from acoustic ranging observations. The proposed TRDOP metric provides a valuable tool for designing and evaluating the geometric strength of such time-window navigation scenarios. The experimental results conclusively demonstrate the superiority of the proposed model over the conventional spatial intersection approach, particularly under dynamic carrier motion. The achieved sub-5-meter accuracy on real data highlights its practical potential.

Key words: seafloor datum; underwater navigation; acoustic navigation; state estimation; windowed estimation

受水下时钟守时精度的限制,水下声学导航通常采用主动式定位模式[1-4],即载体发射导航定位请求信号后,水下潜标或海底导航信标收到该信号后立刻转发给载体,载体通过测量信号双程传播时间确定载体自身的空间位置[5-6]。显然,由于每次双程信号传播时间观测均对应信号收发时刻的载体状态信息,无论存在多少个已知参考点,均难以采用常规空间交会定位模型实时获取载体的状态信息,即该问题总是不适定的。

解决上述不适定问题最简单的途径是假设在信号传播期间载体处于静止状态,则可直接取往返程时间的一半作为导航定位观测值,采用空间交会原理实现载体定位[7-8]。然而,该假设势必会引入模型误差,且载体运动速度越大,信号传播时间越长,上述假设导致的定位模型误差越大[9-10]。对于基于主动式声呐的海底控制网定位问题,由于海面载体信号收发时刻的位置已知,仅将海底控制点坐标作为未知量,可利用椭球交会原理的主动式双程定位模型予以解决[11-12]。

解决上述不适定问题的另一种可行途径是增加惯性导航传感器[13],得到载体速度和姿态变化信息,与主动式声呐观测信息进行融合,利用惯性

导航技术的短时稳定性解决主动式声呐导航的不适定问题。然而,低成本惯性传感器的系统误差和噪声成分复杂,难以独立工作;高精度惯性导航系统成本高、体积大,增加了水下导航系统的体积和成本。同时,异质定位、导航与授时(positioning, navigation and timing, PNT)信息存在各自的系统误差和模型误差,上述模型误差在多传感器融合过程中容易产生交叉污染问题[14]。此外,通过增加声学多普勒测速仪(Doppler velocity logger, DVL)传感器获取载体的运动速度信息亦可解决上述不适定问题[15],但DVL传感器只适用于载体近海底的场景。构建载体动力学模型并采用卡尔曼滤波模型亦可解决上述不适定问题[16],但其载体动力学模型的初值确定是困难的[17]。

综上所述,借鉴动力学模型误差探测的开窗自适应滤波思想,通过向后开窗累积一定的声呐导航观测信息,实现对载体位置、速度甚至加速度等运动状态信息的联合估计,无论对于主动式声呐导航系统本身,还是对于载体动力学模型初始化,都具有重要意义。因此,本文借鉴卫星时间开窗导航定位原理,在主动式声学导航模型的基础上加入载体时间开窗导航定位模型,即通过滑动窗口内载体多历元观测实时确定载体的轨迹信息。所提模型不仅可以输出载体当前时刻的位置、速度和加速度等状态信息,还可以输出历史任意时刻载体的状态信息,甚至允许观测模型附加声速误差参数,以提高导航模型的弹性。

1 主动式声学导航时间开窗导航定位模型

设载体声呐发射时刻t_s的待定坐标为$(x(t_s),y(t_s),z(t_s))$,信号到达第j个海底导航信标的空间坐标为(X_j,Y_j,Z_j),在信号接收时刻t_r的待定坐标为$(x(t_r),y(t_r),z(t_r))$,则主动式声呐观测方程为[18]:

$$L_j=T_j\times c_0=F_j[x(t_{s,j}),y(t_{s,j}),z(t_{s,j});x(t_{r,j}),y(t_{r,j}),z(t_{r,j})]+\varepsilon_j \tag{1}$$

式中,L_j为距离观测值;T_j为信号往返程的传播时间,其中$j=1,2,\cdots,J$;c_0为信号传播的有效速度;$F_j[]$为非线性双程测距函数[19];$t_{s,j}$为向第j个信标发射声询问信号的时刻;$t_{r,j}$为接收第j个信标声应答信号的时刻;ε_j为随机噪声;n为导航定位信标数目。F_j的计算公式为:

$$F_j=f_{s,j}[x(t_{s,j}),y(t_{s,j}),z(t_{s,j})]+f_{r,j}[x(t_{r,j}),y(t_{r,j}),z(t_{r,j})] \tag{2}$$

式中,$f_{s,j}[]$、$f_{r,j}[]$具体为两个单程距离函数,计算公式为:

$$\begin{cases} f_{s,j}=\sqrt{[x(t_{s,j})-X_j]^2+[y(t_{s,j})-Y_j]^2+[z(t_{s,j})-Z_j]^2} \\ f_{r,j}=\sqrt{[x(t_{r,j})-X_j]^2+[y(t_{r,j})-Y_j]^2+[z(t_{r,j})-Z_j]^2} \end{cases} \tag{3}$$

即使不考虑声速误差参数,当存在J个观测值时,式(1)观测模型存在$6\times J$个未知数。因此,上述导航定位模型总是不适定的。

对于不适定问题,若假设水下载体在收发海底信标导航服务信号期间处于静止状态,则存在$(x(t_{s,j}),y(t_{s,j}),z(t_{s,j}))=(x(t_{r,j}),y(t_{r,j}),z(t_{r,j}))$,将其记为$(x,y,z)$,则主动式声学导航模型式(1)在第$j$个历元的观测模型可退化为$l_j=f_j(x,y,z)+\varepsilon_j'$,其中,$l_j=L_j/2$,$\varepsilon_j'=\varepsilon_j/2$。上述模型即传统的空间交会定位模型[20]。然而,若载体在声呐应答期间存在可观测的运动,则会因存在模型误差而导致定位精度下降。因此,建议采用附加载体运动参数的主动式声学导航定位模型,计算式为:

$$L_j=F_j[\boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t_{s,j});\boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t_{r,j})]+\varepsilon_j \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t)$为载体空间三维坐标,可表示为:

$$\boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t)=\begin{bmatrix} n(p_K,t) \\ e(p_K,t) \\ u(p_K,t) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{P}$为轨迹参数;t为载体获取导航信息的时刻;$n(p_K,t)$、$e(p_K,t)$、$u(p_K,t)$分别为载体在N、E、U方向上的坐标分量,其中p_K为K方向的载体轨迹参数,在地震拖缆定位研究中,有学者曾提出类似的定位模型[21]。此外,上述导航载体轨迹定位模型与卫星定轨原理也有类似之处[22],轨迹参数包含载体的位置、速度、加速度等运动状态信息,载体的速度信息$\boldsymbol{V}$为:

$$\boldsymbol{V}(t)=\dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{P},t)=\begin{bmatrix} \dot{n}(p_K,t) \\ \dot{e}(p_K,t) \\ \dot{u}(p_K,t) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中,$\dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{P},t)$为对轨迹参数$\boldsymbol{P}$的一阶偏导数;$\dot{n}(p_K,t)$、$\dot{e}(p_K,t)$、$\dot{u}(p_K,t)$分别为载体在N、E、U方向上的速度分量。显然,上述载体的速度、加速度等信息对于实施自适应导航具有重要参考价值[23-26],即可利用更加丰富的量测信息对动力

学模型信息实施质量控制,以提高导航定位的精度和可靠性。

对于给定载体轨迹参数初值$\boldsymbol{P}^0$,对式(6)进行线性化并舍去残余项,可得:

$$\mathrm{d}L_j=\boldsymbol{a}_j\mathrm{d}\boldsymbol{P}+\varepsilon_j \tag{7}$$

式中,$\mathrm{d}L_j=L_j-F_j(\boldsymbol{P})$为观测残差;$\mathrm{d}\boldsymbol{P}$为载体轨迹参数改正数;$\boldsymbol{a}_j$为状态方程系数矩阵,计算公式为:

$$\boldsymbol{a}_j=\frac{\partial F_j}{\partial \boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t)}\frac{\partial \boldsymbol{x}(\boldsymbol{P},t)}{\partial \boldsymbol{P}}=\left[\boldsymbol{N}_j\ \boldsymbol{E}_j\ \boldsymbol{U}_j\right] \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{N}$、$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{U}$为设计矩阵在3个方向上的方向余弦。将观测模型式(7)记为矩阵形式$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}\mathrm{d}\boldsymbol{X}+\varepsilon$,则其最小二乘解为:

$$\mathrm{d}\hat{\boldsymbol{X}}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{Y} \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{A}$为主动式声学导航定位模型的设计矩阵;$\boldsymbol{W}$为观测权阵。当初值精度不高时,可采用高斯-牛顿迭代来获取非线性模型的最小二乘估计。

借鉴全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)中导航定位几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)的定义方式[27],将轨迹精度因子(trajectory dilution of precision, TRDOP)定义为:

$$Y_{\mathrm{TRDOP}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(Q_{i,x}+Q_{i,y}+Q_{i,z})} \tag{10}$$

式中,m为轨迹参数个数;$Q_{i,x}$、$Q_{i,y}$、$Q_{i,z}$分别为各坐标分量轨迹参数的协因数,即对应矩阵$(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{A})^{-1}$的对角线元素。为了分类刻画不同性质轨迹参数的GDOP,可将上述轨迹参数分为参考时刻的位置参数、速度参数和加速度参数,则存在以下关系:

$$Y_{\mathrm{TRDOP}}=\sqrt{Y_{\mathrm{PDOP}}^2+Y_{\mathrm{VDOP}}^2+Y_{\mathrm{ADOP}}^2} \tag{11}$$

式中,PDOP(position dilution of precision)为位置强度因子,与传统意义的定位精度因子含义相同,Y_{PDOP}为PDOP对应的值;VDOP(velocity dilution of precision)为速度参数强度因子,Y_{VDOP}为其对应的值;ADOP(acceleration dilution of precision)为加速度参数强度因子,Y_{ADOP}为其对应的值。

2　常速度与常加速度时间开窗导航定位模型

首先,在载体常速度运动的假设下,推导给出最简单的载体时间开窗导航定位模型,然后,将其推广到任意多项式轨迹模型中。设载体在时间窗口$[t_1\ t_m]$内的速度不变,t_1为窗口开始时刻,t_m为窗口结束时刻。在窗口中间时刻$t_c=(t_m-t_1)/2$处的载体位置设为(x_c,y_c,z_c),则载体在任意时刻t的位置可表示为:

$$\begin{bmatrix}x(t)\\y(t)\\z(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_c\\y_c\\z_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_x(t-t_c)\\v_y(t-t_c)\\v_z(t-t_c)\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中,v_x、v_y、v_z分别为x、y、z方向上的速度。此时状态方程系数矩阵向量$\boldsymbol{K}_j$可表示如下:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{K}_j=&\frac{x(t_{s,j})-X_j}{f_{s,j}}\left[1\quad t_{s,j}-t_c\right]+\\&\frac{x(t_{r,j})-X_j}{f_{r,j}}\left[1\quad t_{r,j}-t_c\right]\end{aligned} \tag{13}$$

在实际应用中,载体速度受载体控制和外部环境等多种因素的影响而变化,理想化的速度不变假设难以成立。对此,可建立常加速度轨迹模型或者采用q阶多项式轨迹模型进行解算。常加速度轨迹模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix}x(t)\\y(t)\\z(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_c\\y_c\\z_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_x(t-t_c)\\v_y(t-t_c)\\v_z(t-t_c)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}a_x(t-t_c)^2/2\\a_y(t-t_c)^2/2\\a_z(t-t_c)^2/2\end{bmatrix} \tag{14}$$

式中,a_x、a_y、a_z分别为x、y、z方向上的加速度,此时状态方程系数矩阵向量$\boldsymbol{K}_j$的计算公式为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{K}_j=&\frac{x(t_{s,j})-X_j}{f_{s,j}}\left[1\quad (t_{s,j}-t_c)\quad (t_{s,j}-t_c)^2\right]+\\&\frac{x(t_{r,j})-X_j}{f_{r,j}}\left[1\quad (t_{s,j}-t_c)\quad (t_{s,j}-t_c)^2\right]\end{aligned} \tag{15}$$

结合上述推导,可将上述观测模型推广为q阶多项式轨迹模型,此时存在:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{K}_j=&\frac{x(t_{s,j})-X_j}{f_{s,j}}\left[1\quad (t_{s,j}-t_c)\cdots\quad (t_{s,j}-t_c)^q\right]+\\&\frac{x(t_{r,j})-X_j}{f_{r,j}}\left[1\quad (t_{s,j}-t_c)\cdots\quad (t_{s,j}-t_c)^q\right]\end{aligned} \tag{16}$$

显然,多项式阶数的选取是上述导航定位模型优化设计的关键。在现实中,需要平衡窗口大小、模型复杂度以及计算成本等因素。采用高阶段多项式模型会出现轨迹龙格现象且影响计算效率,进而影响载体时间开窗导航定位的精度,特别是会制约载体状态的窗口外推精度。为了降低模型的复杂度和计算成本,建议对载体运动轨迹进行分段线性模型或分段常加速度模型描述,尽量避免高阶多项式模型。

相比于多项式模型、三角函数模型,B样条模型更为柔性,可作为本文研究的后续改化模型。

此外,本文时间开窗导航模型对于被动声呐导航系统同样适用,当海底导航定位信标数目满足实时单历元导航定位要求时,仍可采用本文的模型算法。需要指出的是,本文提出的主动式声呐时间开窗导航定位模型主要是为了解决主动式声学导航定位存在的秩亏问题,若能融合外部惯性导航信息,有望进一步提高导航定位的可靠性和稳健性。

3 仿真与实测实验及数据分析

3.1 仿真实验

本文对水下载体主动式声学导航定位进行仿真实验,通过对海底导航信标的连续观测,构造附加载体运动轨迹参数的观测方程。仿真生成导航观测数据主要包括声信号收发时刻及载体对应位置、载体对基准站的双程声学观测传播时间和海底导航信标坐标。

双程声学观测传播时间可由载体轨迹和海底导航信标坐标依据声线跟踪反问题原理[28]仿真取得,并在其中加入以0.000 1 s为标准差的高斯噪声(约0.15 m测距噪声)。仿真海底导航信标网是深度为2 500 m、外接圆半径为750 m的正方形。载体以10 s为采样间隔对信标进行逐次观测,单历元时间窗口设定为重复观测海底四信标两次的时间,则时间窗口大小为80 s。需要注意的是,时间窗口的选取应至少满足窗口内观测信息个数大于模型参数个数。在导航过程中深度计可以取得精确的深度信息,本文更关心载体在水平方向上的运动,因此仅解算载体在水平方向的位置、运动状态等。

3.1.1 精度因子与解算误差相关性实验

为了检验载体TRDOP与轨迹参数解算误差的相关性,仿真载体运动在东(east, E)方向的初速度为4 m/s,加速度为1×10^{-6} m/s^2,在北(north, N)方向的初速度为0 m/s,加速度为1×10^{-6} m/s^2,在天(up, U)方向的速度、加速度大小均为0。运动轨迹与海底导航信标网相对位置如图1所示。

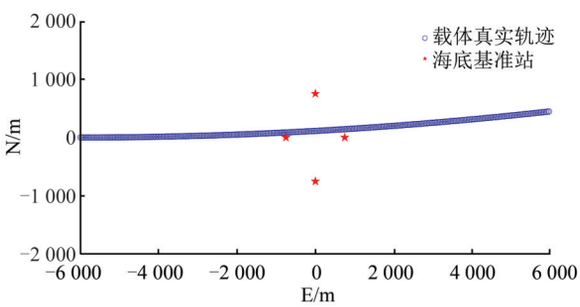


图1 海底信标网导航轨迹示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Navigation Trajectory Based on Seafloor Beacon Network

分别采用常速度、常加速度时间开窗导航定位模型,滑动解算时间窗口中间时刻载体的位置与运动轨迹参数,并统计PDOP、VDOP与定位、速度的均方根误差(root mean square error, RMSE),结果如图2所示。同时,计算对应的皮尔逊相关系数,结果如表1所示。

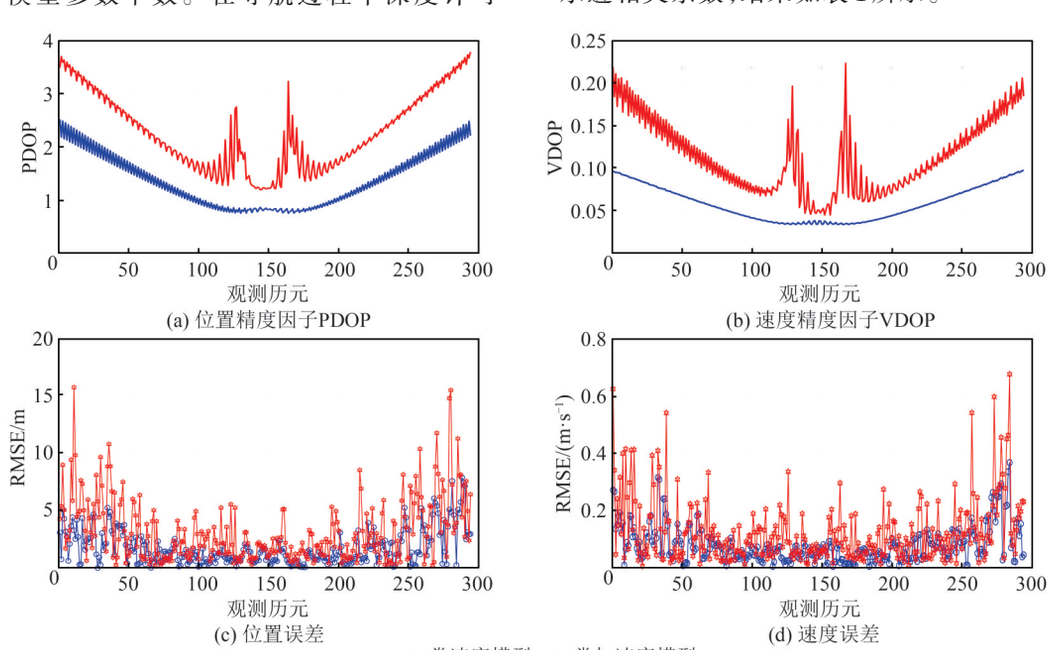


图2 精度因子与误差变化

Fig. 2 Variation of Dilution of Precision and Error

表 1　相关系数统计

Table 1　Statistics of Correlation Coefficient

解算模型	位置相关系数	速度相关系数
常速度模型	0.627	0.568
常加速度模型	0.531	0.455

由表 1 可知,皮尔逊相关系数均为正数,说明位置精度、速度精度分别与 PDOP、VDOP 正相关。图 2 同样展示出相似的变化趋势,即精度因子可以很好地评价解算模型精度水平。需要指出的是,下文测试中采用了更加靠近控制网的导航定位轨迹,此时时间开窗导航定位精度几何因子(trajectory dilution of precision,TRDOP)随载体运动变化率降低,定位误差与 TRDOP 的相关性减弱。

3.1.2　载体不同运动轨迹实验

仿真载体匀速直线运动、匀加速直线运动和螺旋转弯运动。其中,匀速直线运动过程中,载体在 E 方向上的速度为 3 m/s,其余方向上的速度均为 0 m/s;匀加速直线运动过程中,载体在 E 方向上初始速度为 1 m/s,加速度为 0.004 m/s^2,其余方向上的速度、加速度大小均为 0;螺旋转弯运动过程中,载体的角速度为 2π/500 rad/s,螺距随采样时间线性增加。载体运动深度统一仿真为水下 1 000 m,运动总时长为 1 000 s,采样间隔为 10 s。各运动轨迹与海底基准站位置如图 3 所示。

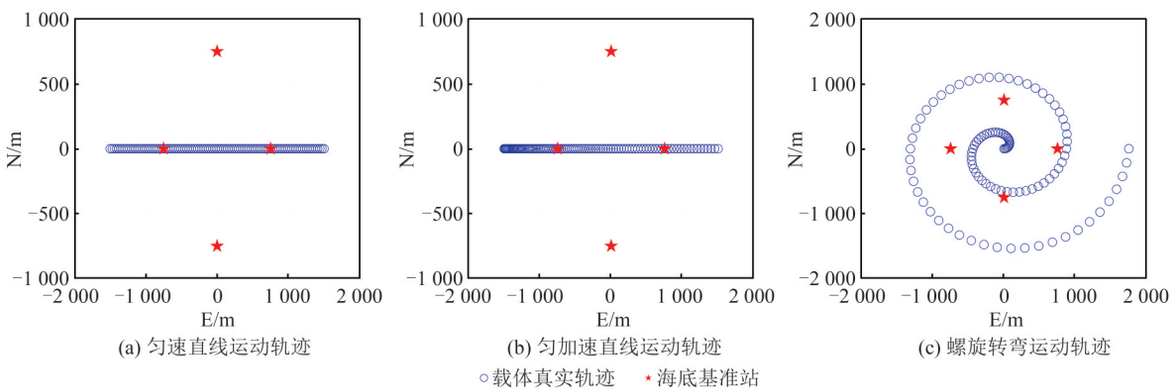


图 3　仿真实验海底信标网及导航轨迹示意图

Fig. 3　Schematic Diagram of Seafloor Beacon Network and Navigation Trajectory in Simulation Experiment

分别采用空间交会模型、常速度、常加速度时间开窗导航定位模型,滑动解算时间窗口中间时刻、当前时刻的载体位置并计算 TRDOP,同时采用 RMSE 作为解算精度的评定指标。TRDOP 变化如图 4 所示,空间交会模型的定位精度如表 2 所示。

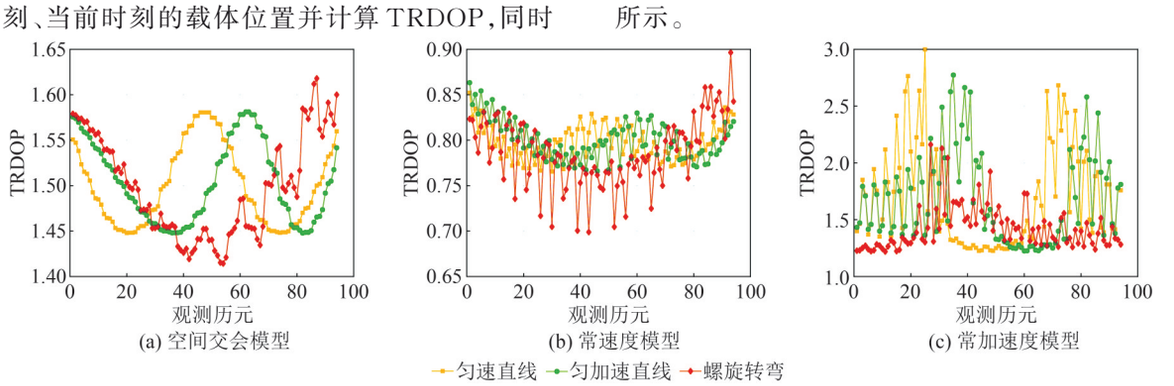


图 4　不同轨迹的 TRDOP 变化

Fig. 4　Variation of TRDOP of Different Trajectories

表 2　空间交会模型的定位精度统计

Table 2　Statistics of Positioning Accuracy for Space Rendezvous Model

运动轨迹	RMSE/m	平均 TRDOP
匀速直线	107.606 6	1.500 0
匀加速直线	114.820 6	1.502 9
螺旋转弯	431.024 9	1.498 2

由图 4 与表 2 可知,3 种运动轨迹的平均 TRDOP 近似,表明观测几何强度无实质差异。当采用传统空间交会模型解算时,由于载体在时间窗口内存在可观运动,传统空间交会模型的载体静止假设存在较大的模型误差,会显著影响定位精度。显然,空间交会模型的误差与时间窗口、窗口内载体的运动速度有关。这里仅给出相同时间窗口下,载体不同运动速度所引起的定位误差。仿真载体以 1 m/s、3 m/s、4 m/s 的速度做匀速直线运动,其余实验配置与§3.1.1 实验相同。采用传统空间交会定位模型,其定位精度如表 3

所示。由表3可知,在平均TRDOP基本不变的前提下,空间交会模型的误差与速度呈正相关。载体在窗口内运动速度越快,忽略窗口内载体运动位置误差越大,导致定位误差对应提高。

表3 不同速度的空间交会定位模型的解算精度统计

Table 3 Statistics of Solution Accuracy for Space Rendezvous Positioning Models at Different Velocities

速度/(m·s^{-1})	RMSE/m	平均TRDOP
1	34.773 9	1.451 0
3	104.497 9	1.447 3
4	147.630 6	1.536 8

上述3种运动轨迹下,常速度、常加速度时间开窗导航定位模型的定位精度如表4所示。由表4可知,常速度、常加速度时间开窗导航定位模型的精度显著优于传统空间交会模型,且滑动窗口中间时刻的定位精度明显优于当前时刻。匀速直线和匀加速直线运动轨迹时,常速度模型优于常加速度模型;而对于螺旋曲线等复杂运动轨迹,常加速度模型表现更优。对于直线运动轨迹,时间开窗导航定位模型可以取得米级的定位精度。然而,载体运动状态的识别与运动模型的选取问题还有待研究,这里给出载体匀加速运动轨迹情形下不同时间窗口大小的常速度、常加速度模型解算位置的RMSE变化,结果如图5所示。

表4 常速度与常加速度定位模型的精度统计

Table 4 Statistics of Accuracy for Constant-Velocity and Constant-Acceleration Positioning Models

解算模型	仿真运动轨迹	解算时刻	RMSE/m	平均TRDOP
常速度模型	匀速直线	中间	1.389 3	0.797 5
		当前	2.494 8	
	匀加速直线	中间	1.587 9	0.800 6
		当前	2.974 9	
	螺旋曲线	中间	34.899 4	0.786 7
		当前	85.329 7	
常加速度模型	匀速直线	中间	2.820 9	1.685 7
		当前	7.702 8	
	匀加速直线	中间	2.394 1	1.674 7
		当前	6.039 1	
	螺旋曲线	中间	4.154 5	1.426 0
		当前	11.736 9	

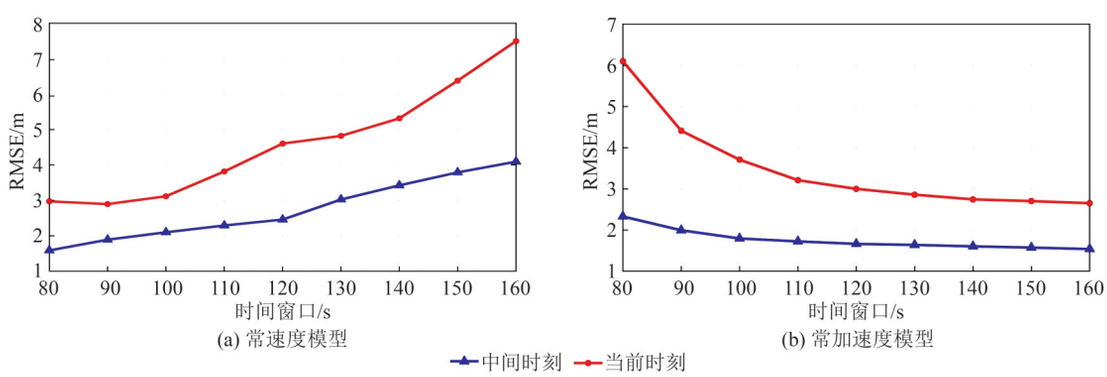


图5 常速度与常加速度模型解算位置的RMSE变化

Fig. 5 Variations of RMSE of Positions of Constant-Velocity and Constant-Acceleration Models

由图5可知,不同的时间窗口大小和运动模型选取的准确性会对载体导航的定位精度产生显著影响。由图5(a)可知,当采用常速度模型时,随着时间窗口的变大,窗口中间时刻的定位误差呈现近似线性增长;载体当前时刻的导航误差经过相对平稳变化后也呈现出近似线性上升的趋势,这是因为随着时间窗口的变大,常速度导航模型的误差逐渐增长。由图5(b)可知,当采用常加速度模型时,随着时间窗口的变化,导航定位精度均呈现出增长趋势,这是因为当采用过小的时间窗口时,载体在参考时刻的位置、速度和加速难以实现精确估计。在现实中,由于载体运动状态本身具有时变性,如何精确识别载体的运动状态并选取合理的导航定位模型和时间窗口是一个有待深入研究的课题。

3.2 实测实验

实测数据为日本于2013年6月在CHOS站和MYGI站采集的声学观测数据,根据船载天线、臂长参数和姿态可实时输出载体的参考位置。4个海底导航信标分布在外接圆半径约为800 m的正方形角点,CHOS站的深度约1 500 m,MYGI站的深度约为1 700 m。CHOS站载体的运动速度约为4 m/s,MYGI站载体的运动速度约为3 m/s。CHOS站的运动总时长约为800 s,MYGI站的运动总时长约为1 200 s,采样间隔均为10 s左右。载体轨迹均为过海底导航信标网中心的直线轨迹,载体轨迹与海底导航信标相对位置如图6所示。常速度与常加速度时间开窗导航定位的解算轨迹与参考轨迹如图7所示,空间交会定位模型、常速度、常加速度时间开窗导航定位解的精度评定结果如表5所示。

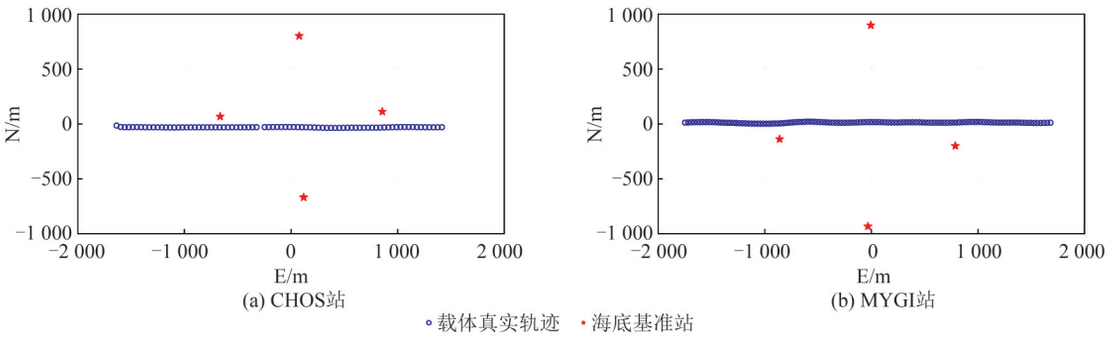


图 6　CHOS 和 MYGI 站仿真实验海底信标网及导航轨迹示意图

Fig. 6　Schematic Diagram of Seafloor Beacon Network and Navigation Trajectory of CHOS Station and MYGI Station in Simulation Experiment

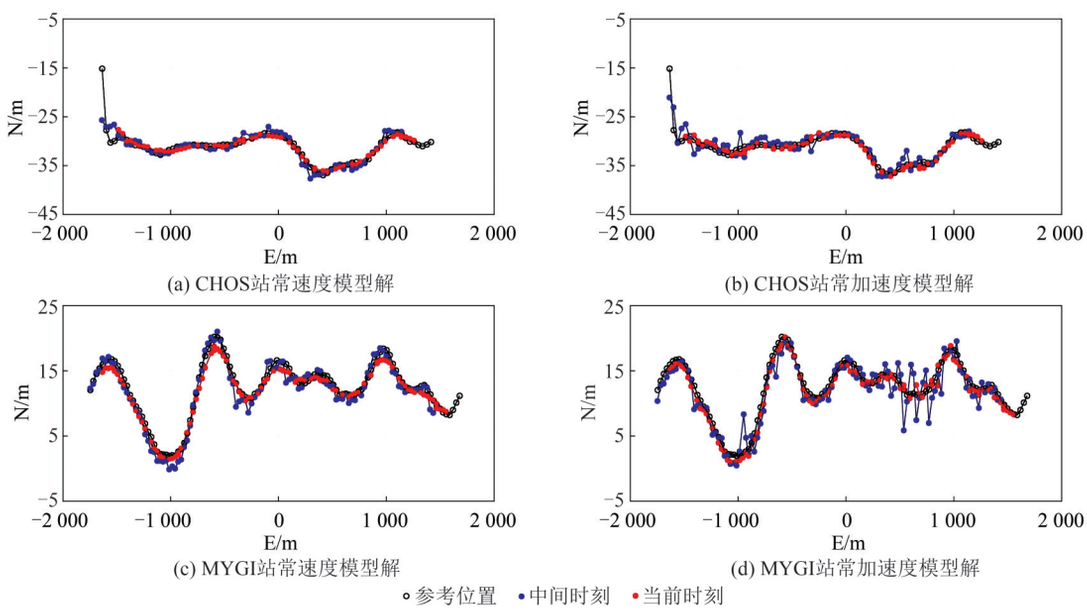


图 7　解算轨迹与参考轨迹示意图

Fig. 7　Schematic Diagram of the Calculated Trajectory and Reference Trajectory

表 5　不同定位模型的精度统计

Table 5　Statistics of Accuracy for Different Positioning Models

解算模型	测站	解算时刻	RMSE/m	平均 TRDOP
空间交会模型	CHOS	—	137.926 0	1.534 2
	MYGI	—	100.490 0	1.413 6
常速度模型	CHOS	中间	2.087 3	0.816 4
		当前	2.626 3	
	MYGI	中间	2.229 7	0.752 9
		当前	2.414 2	
常加速度模型	CHOS	中间	2.226 9	1.697 8
		当前	2.720 4	
	MYGI	中间	2.489 3	1.665 5
		当前	3.102 6	

由图 7 可知,CHOS 站与 MYGI 站在进行数据采集过程中,载体在海面受海浪、潮汐等影响,载体整体上沿 E 方向运动,但在 N 方向上存在随机运动。由表 5 可知,当采用空间交会模型解算时,由于 CHOS 站载体的运动速度约为 4 m/s,MYGI 站载体的运动速度约为 3 m/s,载体定位误差在窗口内随运动速度的加快而增加。而当采用常速度、常加速度开窗模型解算时,两个站均可取得优于 5 m 的导航定位精度,且中间时刻的定位精度优于当前时刻。此外,MYGI 站的导航定位精度水平整体低于 CHOS 站,这主要是因为 MYGI 站深度大于 CHOS 站,信号往返时间更长,其载体导航信号收发时刻的位置差异及其对导航定位的影响更为显著。此外,常加速度模型精度低于常速度模型精度,这是因为虽然载体的运动轨迹整体上呈复杂的非线性运动,但其轨迹可以很好地通过多个滑动窗口进行分段线性近似。由此可见,由于常速度模型具有更好的可靠性,可采用较小的窗口实现载体运动轨迹的分段线性近似。

4 结 语

传统载体状态时间开窗估计一般在参数域内进行,即通过加工载体的历史状态信息对载体的动力学模型实施反馈控制,从而构建自适应导航定位算法。本文探讨的附加载体运动状态参数的时间开窗导航定位模型,可视为在观测域内实施的载体动力学状态的开窗估计,适合于主动式声学导航系统。

时间开窗声学导航定位模型采用了类似于卫星定轨的思想,通过累计一段声学观测实现载体轨迹参数的估计,从而可解决单历声学观测导航的秩亏问题,无需借助其他诸如DVL、INS(inertial navigation system)等外部导航信息或载体动力学模型假设,可构建完全独立的载体状态测量信息,更有利于实施水下声学、INS、DVL等多传感器融合导航。

主动式声呐的空间交会定位模型由于存在载体位置运动的模型误差,其导航定位精度随着载体运动速度的增大或信号传播时间的增长而下降。仿真和实测导航观测结果均表明,采用双程观测的主动式声呐开窗导航定位模型可很好地解决上述模型的误差问题,且窗口中间时刻的导航定位精度明显优于当前时刻。当采用4个海底导航信标时,本文构建的声学导航定位模型精度优于5 m。需要指出的是,主动式声呐开窗导航定位模型的最佳窗口选取、单信标导航以及多传感器组合导航模型仍有待开展进一步研究。

参 考 文 献

[1] 杨元喜,徐天河,薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. 测绘学报,2017,46(1):1-8.
YANG Yuanxi, XU Tianhe, XUE Shuqiang. Progresses and Prospects in Developing Marine Geodetic Datum and Marine Navigation of China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 1-8.

[2] ZHANG J C, HAN Y F, ZHENG C E, et al. Underwater Target Localization Using Long Baseline Positioning System[J]. *Applied Acoustics*, 2016, 111: 129-134.

[3] BINGHAM B, SEERING W. Hypothesis Grids: Improving Long Baseline Navigation for Autonomous Underwater Vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(1): 209-218.

[4] XUE S Q, LI B J, XIAO Z, et al. Centimeter-Level-Precision Seafloor Geodetic Positioning Model with Self-Structured Empirical Sound Speed Profile[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 30.

[5] WEBSTER S E, EUSTICE R M, SINGH H, et al. Advances in Single-Beacon One-Way-Travel-Time Acoustic Navigation for Underwater Vehicles[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(8): 935-950.

[6] ZHOU Z B, LI B F. GNSS Windowing Navigation with Adaptively Constructed Dynamic Model[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 37-48.

[7] 闫凤池,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 Fengchi, WANG Zhenjie, ZHAO Shuang, 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.

[8] 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 Yuanxi, LIU Yanxiong, SUN Dajun, et al. Seafloor Geodetic Network Establishment and Key Technologies[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2020, 50(7): 936-945.

[9] WANG J T, XU T H, LIU Y F, et al. Augmented Underwater Acoustic Navigation with Systematic Error Modeling Based on Seafloor Datum Network[J]. *Marine Geodesy*, 2023, 46(2): 129-148.

[10] YOKOTA Y, KANEDA M, HASHIMOTO T, et al. Experimental Verification of Seafloor Crustal Deformation Observations by UAV-Based GNSS-A[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 4105.

[11] 肖圳,薛树强,韩保民,等. 参考声速剖面误差对主动式声呐定位影响仿真分析[J]. 地球物理学报,2023,66(12):4889-4899.
XIAO Zhen, XUE Shuqiang, HAN Baomin, et al. Simulation Analysis on Reference Sound Velocity Profile Error Influence on Active Acoustic Positioning[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(12): 4889-4899.

[12] 孙文舟,朱忆,曾安敏,等. 深水目标定位声速剖面自适应分层方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2025,50(12):2401-2407.
SUN Wenzhou, ZHU Yi, ZENG Anmin, et al. A Self-Adaptive Layering Method of Sound Velocity Profile for Deep-Water Object Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(12): 2401-2407.

[13] 李景森,薛树强,肖圳,等. GNSS/A组合观测臂

长改正不确定度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(3): 535-544.
LI Jingsen, XUE Shuqiang, XIAO Zhen, et al. Uncertainty Evaluation on Arm Length Correction of GNSS/A Combined Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3): 535-544.

[14] 明锋, 曾安敏. 弹性PNT最新进展及相关问题研究[J]. 导航定位学报, 2022, 10(4): 1-10.
MING Feng, ZENG Anmin. Recent Advancement and Research on Related Issues for Resilient PNT [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2022, 10(4): 1-10.

[15] 王迪, 王冰, 黄浩乾, 等. 复杂水下环境中自适应粒子群优化的SINS/DVL组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(10): 1023-1029.
WANG Di, WANG Bing, HUANG Haoqian, et al. SINS/DVL Integrated Navigation Method Based on Adaptive Particle Swarm Optimization in Complex Underwater Environment[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(10): 1023-1029.

[16] 高为广, 杨元喜, 张双成. 基于当前加速度模型的抗差自适应KALMAN滤波[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 15-18.
GAO Weiguang, YANG Yuanxi, ZHANG Shuangcheng. Adaptive Robust Kalman Filtering Based on the Current Statistical Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(1): 15-18.

[17] 葛志敏, 江金光, 张超, 等. 改进抗差自适应EKF算法在GNSS/INS组合导航中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(7): 740-744.
GE Zhimin, JIANG Jinguang, ZHANG Chao, et al. Application of Improved Robust and Adaptive EKF Algorithm in GNSS/INS Integrated Navigation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(7): 740-744.

[18] SPIESS F N. Suboceanic Geodetic Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(4): 502-510.

[19] 薛树强, 杨诚, 赵爽, 等. 海底大地控制网无人观测系统研究进展[J]. 导航定位学报, 2023, 11(6): 8-21.
XUE Shuqiang, YANG Cheng, ZHAO Shuang, et al. Review of Unmanned Observation Systems for Seafloor Geodetic Network[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, 11(6): 8-21.

[20] 薛树强, 杨文龙, 赵爽. 主动式定位的椭球交会原理及其2种解法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(3): 1-7.
XUE Shuqiang, YANG Wenlong, ZHAO Shuang. The Ellipsoid Intersection Principle of Active Positioning and Its Two Solutions[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2024, 12(3): 1-7.

[21] 余文坤, 吴佩达, 张昊楠, 等. 基于多项式曲线拟合的海上地震勘探拖缆定位[J]. 测绘学报, 2022, 51(5): 772-780.
YU Wenkun, WU Peida, ZHANG Haonan, et al. Offshore Towed-Streamer Seismic Positioning Based on Polynomial Curve Fitting[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(5): 772-780.

[22] 闫志闯, 徐新强, 赵德军, 等. 低轨卫星约化动力法定轨参数变换的高效算法[J]. 测绘学报, 2018, 47(S1): 28-37.
YAN Zhichuang, XU Xinqiang, ZHAO Dejun, et al. An Efficient Algorithm with Reduced Dynamic Orbit Determination for LEOs Based on Parameter Transforming[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(S1): 28-37.

[23] YANG Y X, ZHANG X D, XU J Y. Adaptively Constrained Kalman Filtering for Navigation Applications[J]. *Survey Review*, 2011, 43(322): 370-381.

[24] YANG Y X, CUI X Q. Adaptively Robust Filter with Multi Adaptive Factors[J]. *Survey Review*, 2008, 40(309): 260-270.

[25] 杨元喜. 弹性PNT基本框架[J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 893-898.
YANG Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898.

[26] 林雪原, 刘丽丽, 董云云, 等. 改进的GNSS/SINS组合导航系统自适应滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 127-134.
LIN Xueyuan, LIU Lili, DONG Yunyun, et al. Improved Adaptive Filtering Algorithm for GNSS/SINS Integrated Navigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 127-134.

[27] 卞加超, 薛树强, 肖圳, 等. 海面非对称航迹对海底定位精度影响分析[J]. 海洋测绘, 2023, 43(6): 46-50.
BIAN Jiachao, XUE Shuqiang, XIAO Zhen, et al. Analysis of Asymmetrical Effects of Surface-to-Seafloor Control Networks[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2023, 43(6): 46-50.

[28] YANG W L, XUE S Q, LIU Y X. P-Order Secant Method for Rapidly Solving the Ray Inverse Problem of Underwater Acoustic Positioning[J]. *Marine Geodesy*, 2023, 46(1): 3-15.