

武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型  
作者： 薛树强, 杨诚, 卞加超, 杨文龙, 赵爽  
DOI: 10.13203/j.whugis20240131  
收稿日期: 2024-09-20  
网络首发日期: 2024-10-10  
引用格式: 薛树强, 杨诚, 卞加超, 杨文龙, 赵爽. 无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240131>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240131

### 引用格式：

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),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240131 (XUE Shuqiang, YANG Cheng, BIAN Jiachao, et al. Active Sonar Time Window Navigation and Positioning Model Without Appending External Navigation Information[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,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<sup>1</sup>, 杨诚<sup>2</sup>, 卞加超<sup>1</sup>, 杨文龙<sup>3</sup>, 赵爽<sup>1</sup>

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。忽略载体运动，可取 0.5 倍的信号往返程传播时间作为观测值进行定位，但这必然引入模型误差，特别是深海场景或载体高速运动情形。若使用多普勒测速或惯导等航位推算信息，则会导致声呐导航依存于外部信息。对此，本文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（TRDOP），以评估时间开窗导航定位构型强度。研究表明，TRDOP 可很好刻画时间开窗导航定位构型优劣，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 5m，且窗口中间时刻定位精度更高。

**关键词：**海底基准；水下导航；声学导航；状态估计；开窗估计

## Active Sonar Time Window Navigation and Positioning Model Without Appending External Navigation Information

XUE Shuqiang<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>2</sup>, BIAN Jiachao<sup>1</sup>, YANG Wenlong<sup>3</sup>, ZHAO Shuang<sup>1</sup>

1 China 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), Weihai 264200, China

收稿日期：2024-09-20

基金项目：国家自然科学基金重点基金(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，研究方向为海洋大地测量。xuesq@casm.ac.cn

通讯作者：卞加超，硕士生。bjc0539@163.com

**Abstract:** Objectives: Due to the inherent difficulty of time synchronization of submarine navigation beacons, underwater navigation usually adopts an active positioning model. However, the model is always ill-defined, that is, each observation corresponds to two waiting points at which the carrier signal is sent and received. When the carrier motion is ignored, half of the signal round-trip travel time can be used as the observed value to locate the signal, but this will inevitably introduce model errors, especially in deep-sea scenes or high-speed carrier motion. If the use of Doppler velocity measurement or inertial navigation and other dead reckoning information, it will lead to sonar navigation dependent on external information, but no longer independent. Methods: In this paper, a time-window navigation and positioning model with additional carrier kinematic parameters is proposed to realize the joint estimation of carrier position, velocity, acceleration and other information, which can not only output the carrier's current moment coordinates, but also obtain the carrier's motion information at any time, such as the carrier's position, velocity and acceleration at the middle of the window. Results: The problem of the inadequacy of the active positioning model is solved effectively. At the same time, the concept of geometric factor (KDOP) is proposed to evaluate the geometric strength of time-windowed navigation. The results show that the KDOP proposed in this paper can well describe the advantages and disadvantages of the time-windowed navigation and positioning configuration, and the time-windowed navigation and positioning model is significantly superior to the traditional spatial intersection positioning model. Conclusions: The test results on the Japanese public data set show that the navigation and positioning accuracy proposed in this paper is better than 5m, and the positioning accuracy at the middle time of the window is higher.

**Key words:** seafloor datum, underwater navigation, acoustic navigation, state estimation, window estimation

受水下时钟守时精度限制, 水下声学导航通常采用主动式定位模式<sup>[1-4]</sup>, 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<sup>[5,6]</sup>。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<sup>[7,8]</sup>。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<sup>[9,10]</sup>。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<sup>[11,12]</sup>。

解决上述不适定问题的另一种可行途径, 增加惯导传感器<sup>[13]</sup>, 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了主动式声呐导航的不适定性问题。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; 高精度惯导成本高, 体积大, 增加了水下导航系统的体积和成本。同时, 异质 PNT (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 信息存在各自的系统误差和模型误差, 上述模型误差势在多传感器融合过程中容易产生交叉污染问题<sup>[14]</sup>。此外, 通过增加声学多普勒测速 (Doppler velocity logger, DVL) 传感器获取载体运动速度信息, 亦可解决上述不适定问题<sup>[15]</sup>, 但多普勒测速传感器只适用于载体近海底场景。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<sup>[16]</sup>, 但其载体动力学模型的初值确定是困难的<sup>[17]</sup>。

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。该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，也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，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<sup>[18]</sup>：

$$L_j = T_j \times c_0 = F_j[x(t_{s,j}), y(t_{s,j}), z(t_{s,j}); x(t_{r,j}), y(t_{r,j}), z(t_{r,j})] + \varepsilon_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中， $L_j$  为距离观测值； $T_j$  为信号往返程传播时间， $c_0$  为信号传播有效速度， $t_{s,j}$  为对第  $j$  个信标发射声信号时刻， $t_{r,j}$  为接受第  $j$  个信标声信号时刻， $\varepsilon$  为随机噪声。 $n$  为导航定位信标数目， $F_j$  为非线性双程测距函数<sup>[19]</sup>：

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

具体为两个单程距离函数：

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

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

对于上述不适定问题，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  $[x(t_{s,j}), y(t_{s,j}), z(t_{s,j})] = [x(t_{r,j}), y(t_{r,j}), z(t_{r,j})]$ ，并将其记为  $(x, y, z)$ ，则主动式声学导航模型（1）在第  $i$  个历元的观测模型可退化为  $l_j = f_j(x, y, z) + \varepsilon'_j$ ，其中， $l_j = L_j / 2, \varepsilon'_j = \varepsilon_j / 2$ 。上述模型即传统空间交会定位模型<sup>[20]</sup>。然而，当载体在声呐应答期间若存在可观运动，则难免因存在模型误差导致定位精度下降。因此，我们建议采用以下附加载体运动参数的主动式声学导航定位模型，

$$L_j = F_j[\mathbf{x}(\mathbf{P}, t_{s,j}); \mathbf{x}(\mathbf{P}, t_{r,j})] + \varepsilon_j \quad j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{x}(\mathbf{P}, t) = \begin{bmatrix} x(\mathbf{p}_x, t) \\ y(\mathbf{p}_y, t) \\ z(\mathbf{p}_z, t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_x; \mathbf{p}_y; \mathbf{p}_z]$  为待估模型参数， $\mathbf{p}_k$  为  $K \in \{x, y, z\}$  方向的载体轨迹参数，在地震拖缆定位研究中，有学者曾提出类似定位模型<sup>[21]</sup>。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<sup>[22]</sup>。需要指出，上述轨迹参数包含载体的位置、速度、加速度等载体运动状态信息，例如，载体的速度信息  $\mathbf{V}$  为：

$$\mathbf{V}(t) = \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{P}, t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(\mathbf{p}_x, t) \\ \dot{y}(\mathbf{p}_y, t) \\ \dot{z}(\mathbf{p}_z, t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{P}, t)$  为对轨迹参数  $\mathbf{P}$  的 1 阶偏导数，显然，上述载体的速度、加速度信息对于实施自适应导航具有重要参考价值<sup>[23-26]</sup>，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  $\mathbf{P}^0$ ，对 (6) 进行线性化并舍去残余项，可得：

$$dL_j = \mathbf{a}_j d\mathbf{P} + \varepsilon_j \quad (7)$$

其中， $dL_j = L_j - F_j(\mathbf{P})$ ， $d\mathbf{P}$  为载体轨迹参数改正数，此时状态方程系数矩阵如下

$$\mathbf{a}_j = \frac{\partial F_j}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_j & \mathbf{e}_j & \mathbf{u}_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\mathbf{n}, \mathbf{e}, \mathbf{u}$  分别为将观测模型(7)记为矩阵形式  $\mathbf{Y} = \mathbf{A}d\mathbf{X} + \varepsilon$ ，则其最小二乘解为：

$$d\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (9)$$

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

借鉴 GNSS 中导航定位几何精度因子 (Geometric Dilution of Precision, GDOP) 的定义方式<sup>[27]</sup>，将轨迹精度几何因子 TRDOP (Trajectory Dilution of Precision, TRDOP) 定义为：

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

式中： $m$  为轨迹参数个数， $Q_{i,K}$  为第  $K \in \{x, y, z\}$  各坐标分量轨迹参数的协因数，即对应矩阵  $(\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1}$  的对角线元素。为了分类刻画不同性质轨迹参数的几何精度因子，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，则存在一下关系：

$$TRDOP = \sqrt{PDOP^2 + VDOP^2 + ADOP^2} \quad (11)$$

其中 PDOP (Position Dilution of Precision, PDOP) 为位置几何精度因子，与传统意义的定位精度因子含义相同，VDOP (Velocity Dilution of Precision, VDOP) 可用于刻画了载体速度参数的几何精度因子，ADOP (Acceleration Dilution of Precision, ADOP) 刻画了载体加速度参数的几何精度因子，可用于刻画载体时间开窗载体位置观测构型的优劣。

## 2 常速度/常加速度时间开窗导航定位模型

下面首先在载体常速度假设下，推导出最简单的载体时间开窗导航定位模型，然后再将其推广到任意多项式轨迹模型。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  $[x_c, y_c, z_c]^T$ ，则载体在任意时刻的位置可表示为：

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

其中,  $\mathbf{P}=[x_c \ y_c \ z_c \ v_x \ v_y \ v_z]^T$  为轨迹模型参数, 此时状态方程系数矩阵元素如下:

$$\mathbf{g}_j = h_{g,s,j} \begin{bmatrix} 1 & t_{s,j}-t_c \end{bmatrix} + h_{g,r,j} \begin{bmatrix} 1 & t_{r,j}-t_c \end{bmatrix} \quad g \in \{n, e, u\} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} h_{g,s,j} = \frac{x(t_{s,j}) - X_j}{f_{s,j}} \\ h_{g,r,j} = \frac{x(t_{r,j}) - X_j}{f_{r,j}} \end{cases} \quad (14)$$

分别为海底点到载体收、发时刻位置到导航参考点的方向余弦的代数和。

然而在实际应用中, 载体速度受载体控制、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。对此我们可建立常加速轨迹模型甚至采用  $q$  阶多项式轨迹模型。常加速轨迹模型可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x(t-t_c) \\ v_y(t-t_c) \\ v_z(t-t_c) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x(t-t_c)^2/2 \\ a_y(t-t_c)^2/2 \\ a_z(t-t_c)^2/2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{P}=[x_c \ y_c \ z_c \ v_x \ v_y \ v_z \ a_x/2 \ a_y/2 \ a_z/2]^T$  为轨迹模型参数, 此时:

$$\mathbf{g}_j = h_{g,s,j} \begin{bmatrix} 1 & t_{s,j}-t_c & (t_{s,j}-t_c)^2 \end{bmatrix} + h_{g,r,j} \begin{bmatrix} 1 & t_{r,j}-t_c & (t_{r,j}-t_c)^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

结合上述推导, 我们容易将上述观测模型推广为  $q$  阶多项式轨迹模型, 此时存在:

$$\mathbf{g}_j = h_{g,s,j} \begin{bmatrix} 1 & \dots & (t_{s,j}-t_c)^q \end{bmatrix} + h_{g,r,j} \begin{bmatrix} 1 & \dots & (t_{r,j}-t_c)^q \end{bmatrix} \quad (17)$$

显然, 多项式阶数选取是上述导航定位模型优化设计的关键。在现实中, 我们需要平衡窗口大小、模型复杂度以及计算成本的因素。采用高阶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, 我们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, 而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 样条模型则更为柔性, 可作为本文研究的后续改化模型。此外, 该模型对于被动声呐导航系统也是适用的, 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, 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, 若能融合多普勒测速、惯导加速度等外部导航信息, 有望进一步提高导航定位的可靠性和稳健性。

### 3 仿真、试验及数据分析

#### 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，通过对海底导航信标的连续观测即载体历史轨迹，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、海底导航信标坐标。

双程观测传播时间基于载体轨迹、海底导航信标坐标依据声线跟踪反问题原理<sup>[28]</sup>仿真得，并在其中加入 0.0001s 为标准差的高斯噪声（约 0.15m 测距噪声）。仿真海底导航信标网为深度 2500m、外接圆半径 750m 的正方形。载体以 10s 为采样间隔逐信标观测。约定观测海底四基准站两次为单历元时间窗口，则时间窗口 80s。累计时间窗口内所有观测为单历元导航数据。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，我们更关心载体在水平方向上的运动，因此本文仅解算载体水平方向位置、运动状态等。

##### 3.1.1 精度因子与解算误差相关性实验

为了检验载体轨迹精度几何因子 TRDOP 与轨迹参数解算误差的相关性，仿真载体运动 E 方向初速度为 4m/s，加速度为  $10e-6m/s^2$ ，N 方向初速度为 0，加速度为  $10e-6m/s^2$ ，U 方向速度、加速度均为 0。运动轨迹与海底导航信标网相对位置如图 1 所示：

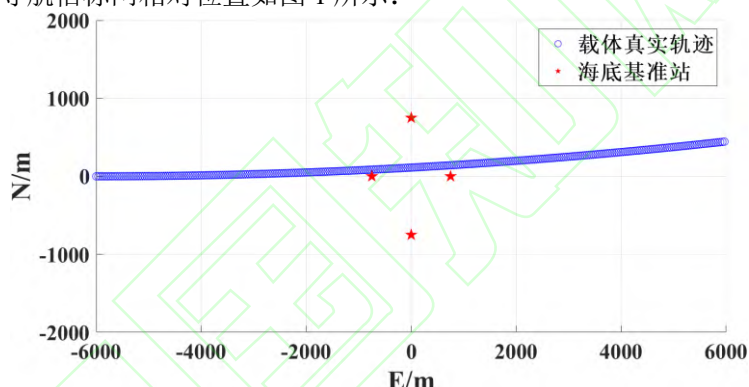


图 1 海底信标网导航轨迹示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulated submarine beacon network and navigation track

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位置与运动轨迹参数，并统计 PDOP、VDOP 与定位、速度误差如图 2 所示，计算对应的皮尔逊相关系数如表 1 所示：

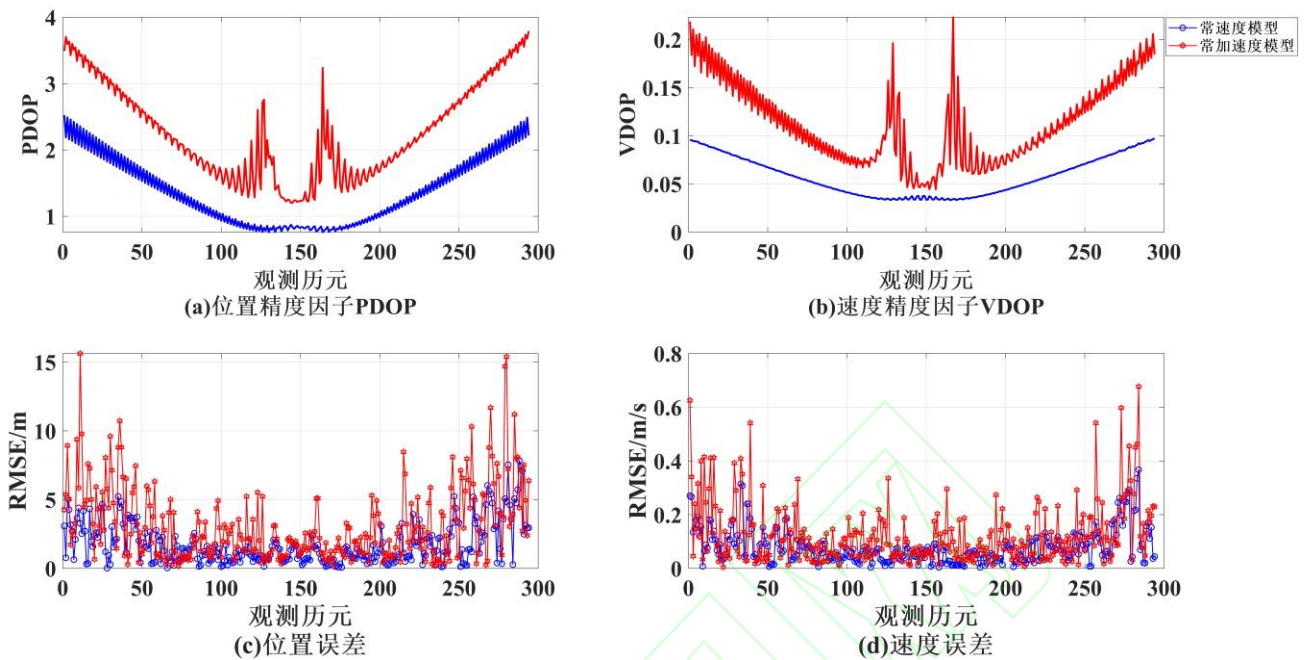


图2 精度因子与误差变化

Fig.2 Variation of precision factor and error

表1 相关系数统计

Tab.1 Statistical table of correlation coefficient

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

由表1、图2可知，位置精度与PDOP正相关，轨迹参数精度与VDOP正相关，即TRDOP可以很好评价导航定位构型的优劣。需要指出，后文测试中我们采用了更加靠近控制网的导航定位轨迹，此时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

仿真载体运动轨迹为匀速直线运动、匀加速直线运动和螺旋转弯运动。匀速直线轨迹仿真E方向速度3m/s，其余方向速度为0；匀加速直线轨迹仿真E方向初始速度1m/s，加速度0.004m/s<sup>2</sup>，其余方向速度、加速度均为0；螺旋转弯轨迹仿真角速度为 $2\pi/500$ m/s，螺距随采样时间线性增加。载体深度仿真为1000m，运动总时长1000s，采样间隔为10s。各运动轨迹与海底导航信标网相对位置如图3所示：

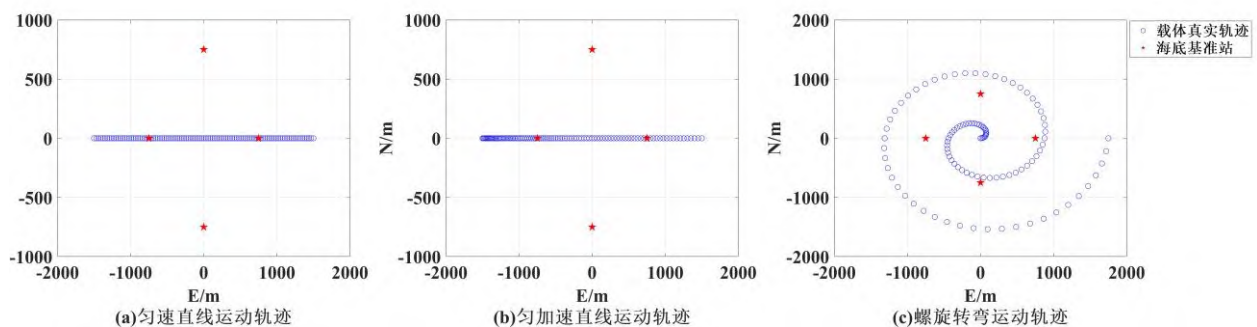


图3 仿真实海底信标网及导航轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulated submarine beacon network and navigation track

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，滑动解算时间窗中间时刻、当前时刻的载体位置，并计算TRDOP，同时采用均方根误差作为解算精度评定指标。TRDOP变化如



图 4 所示，空间交会模型的定位精度如表 2 所示，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。

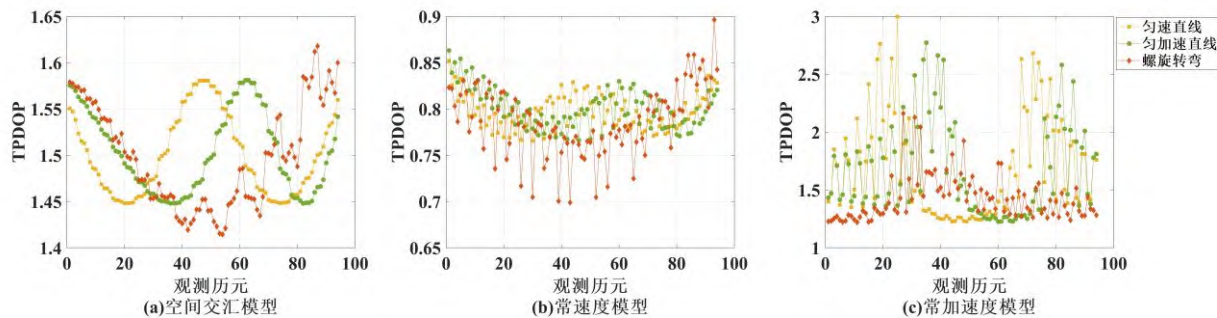


图 4 不同轨迹 TRDOP

Fig.4 Diagram of different trajectory TRDOP

表 2 空间交会模型精度统计表

Tab.2 Precision statistics table of space intersection model

轨迹	RMSE/m	平均 TRDOP
匀速直线	107.6066	1.5000
匀加速直线	114.8206	1.5029
螺旋转弯	431.0249	1.4982

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，传统空间交汇模型的载体静止假设存在较大模型误差，显著影响定位精度。显然，空间交汇模型误差与时间窗口、窗口内载体运动速度有关。这里我们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。仿真载体速度分别为 1m/s、3m/s、4m/s 的匀速直线运动轨迹，其余实验配置与 3.1.1 节实验相同。采用空间交会定位模型，解算精度如表 3 所示

表 3 不同速度空间交会定位模型精度统计表

Tab.3 Precision statistics table of accuracy of different velocity space intersection positioning models

速度	RMSE/m	平均 TRDOP
1m/s	34.7739	1.4510
3m/s	104.4979	1.4473
4m/s	147.6306	1.5368

由表 3 可知，在平均精度因子基本不变的前提下，空间交会模型误差与速度正相关。载体在窗口内运动速度越快，忽略窗口内载体运动位置差越大，导致定位误差对应提高。

表 4 常速度、常加速度定位模型精度统计表

Tab.4 Precision statistics table of constant velocity and constant acceleration positioning model

解算模型	仿真轨迹	解算时刻	RMSE/m	平均 TRDOP
常速度模型	匀速直线	中间时刻	1.3893	0.7975
		当前时刻	2.4948	
	匀加速直线	中间时刻	1.5879	0.8006
		当前时刻	2.9749	
常加速度模型	螺旋曲线	中间时刻	34.8994	0.7867
		当前时刻	85.3297	
	匀速直线	中间时刻	2.8209	1.6857
		当前时刻	7.7028	
	匀加速直线	中间时刻	2.3941	1.6747
		当前时刻	6.0391	
螺旋曲线	中间时刻	4.1545	1.4260	
	当前时刻	11.7369		

分析表 4 不难发现，常速度、常加速度时间开窗导航定位模型精度显著优于传统空间交汇模型，且滑动窗口中间时刻定位精度明显优于当前时刻，采用常加速度运动模型更为稳健，对于直线轨迹，

时间开窗导航定位模型可以取得米级的定位精度。然而，载体运动状态识别与运动模型选取问题还有待研究，这里给出载体匀加速轨迹情形下不同时间窗口大小时常速度、常加速度模型解算的位置 RMSE 变化如图 5 所示。

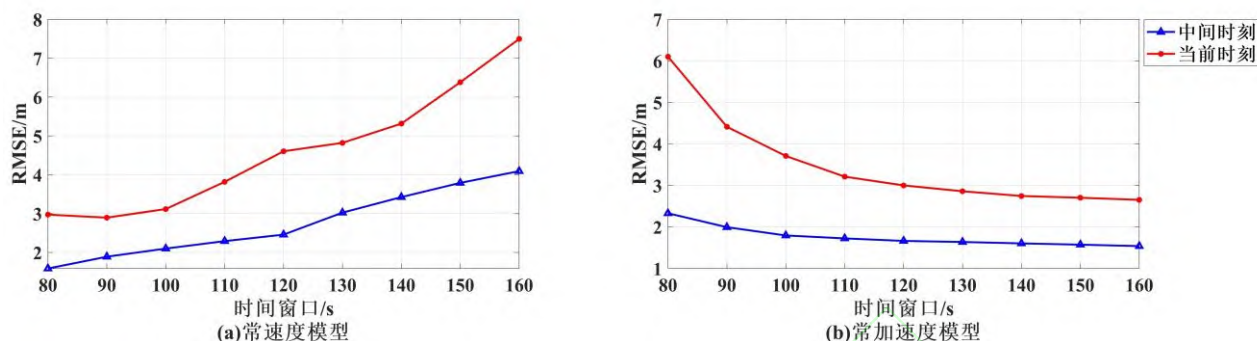


图 5 RMSE 变化

Fig.5 Diagram of RMSE changes

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，会对载体导航定位精度产生非常显著的影响。如图 5 (a) 所示，当采用常速度模型时，随着窗口的变大，窗口中间时刻的定位误差呈现近似线性增长，而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趋势，这主要是因为，随着时间窗口的变大，常速度导航模型误差逐渐增长所致。如图 5 (b) 所示，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，这主要是因为，当采用过小的窗口时，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

实测数据来源日本 2013 年 6 月在 CHOS 站和 MYGI 站采集的 GNSS-A 观测数据，根据 GNSS 天线坐标、臂长参数和姿态计算载体换能器实时位置作为载体参考位置<sup>[29]</sup>。4 个海底导航信标分布在外接圆半径约为 800m 的正方形角点，其中 CHOS 站深度约为 1500m，MYGI 站深度约为 1700m。需要说明的是，CHOS 站载体运动速度约为 4m/s，MYGI 站载体运动速度约为 3m/s。CHOS 站运动总时长约为 800s，MYGI 站运动总时长约为 1200s，采样间隔均为约 10s。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：

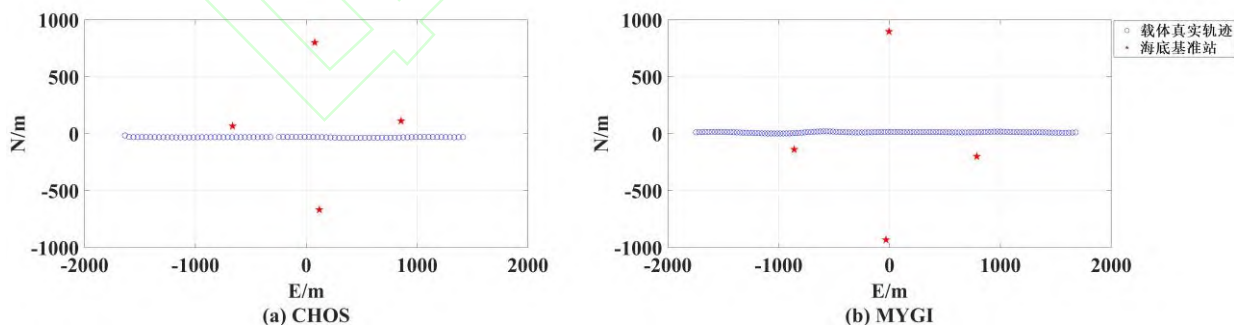


图 6 实测实验示意图

Fig.6 Schematic diagram of measured experiment

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 6 所示。常速度、常加速度时间开窗导航定位解算轨迹与参考轨迹如图 7 所示。

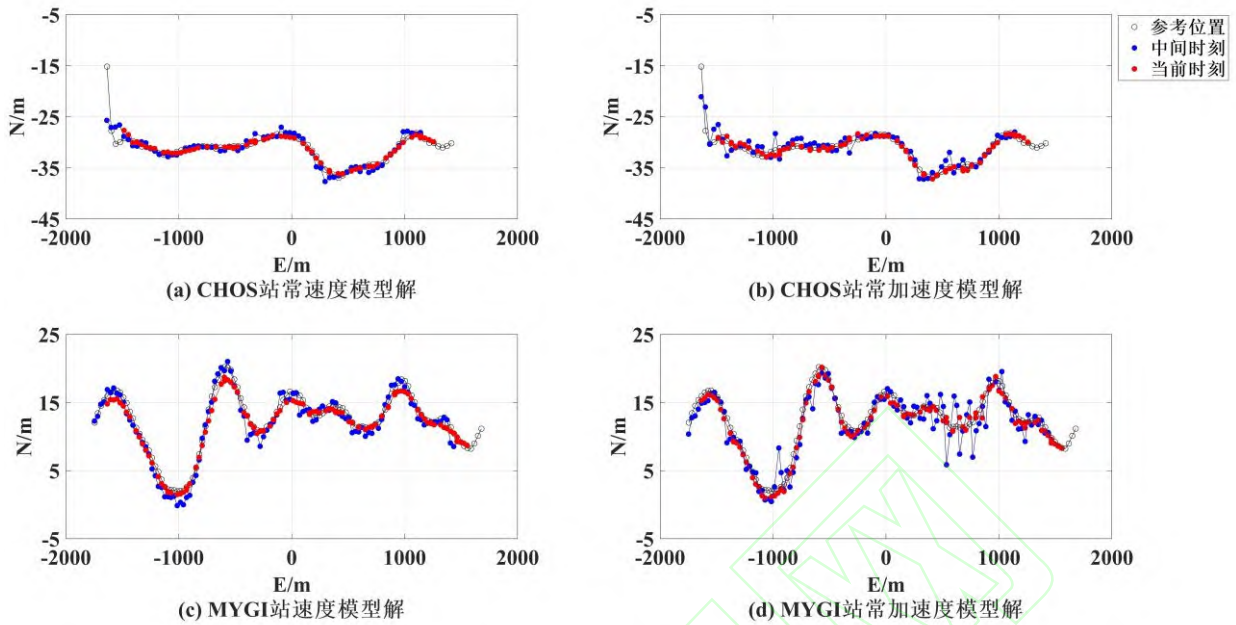


图 7 解算轨迹与参考轨迹示意图

Fig.7 Schematic diagram of the calculated trajectory and reference trajectory

表 5 不同定位模型精度统计表

Tab.5 Precision statistics table of constant acceleration model

解算模型	测站	解算时刻	RMSE/m	平均 TRDOP
空间交会模型	CHOS		137.926	1.5342
	MYGI		100.490	1.4136
常速度模型	CHOS	中间时刻	2.0873	0.8164
		当前时刻	2.6263	
	MYGI	中间时刻	2.2297	0.7529
		当前时刻	2.4142	
常加速度模型	CHOS	中间时刻	2.2269	1.6978
		当前时刻	2.7204	
	MYGI	中间时刻	2.4893	1.6655
		当前时刻	3.1026	

由图 7 知，CHOS 站与 MYGI 站实验在进行数据采集过程中载体在海面受海浪潮汐等影响，载体航迹虽整体沿 E 方向运动，但在 N 方向上存在随机运动。由表 5 可知，载体定位误差在窗口内随运动速度加快而增加。在 80s 时间窗口内，可取得米级导航定位精度，且中间时刻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，这主要是因为，虽然载体的运动轨迹整体呈现复杂的非线性运动，但其轨迹可以很好的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. 结论

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，特别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

参数估计,从而可解决单历声学观测导航秩亏问题,无需借助其他诸如 DVL、INS 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量测信息,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用于导航存在可观的模型误差,其随着载体运动速度的增大或信号传播时间的增长,其导航定位精度逐渐下降。仿真和实测导航观测均表明,采用双程观测的主动式声呐开窗导航定位模型,很好地解决了上述模型误差问题,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 5m。需要指出,主动式声呐开窗导航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研究。

### 参考文献:

- [1] 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(01): 1-8. (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(01):1-8.)
- [2] Zhang J, Han Y, Zheng C, 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, Li B, Xiao Z, et al. Centimeter-level-precision seafloor geodetic positioning model with self-structured empirical sound speed profile(accepted)[J]. *Satellite Navigation*, 2023.
- [5] Webster S E, Eustice M, Singh H, et al. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles[J/OL]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(8): 935-950. DOI:10.1177/0278364912446166.
- [6] Zhou Z, Li B. GNSS windowing navigation with adaptively constructed dynamic model[J/OL]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 37-48. DOI:10.1007/s10291-014-0363-y.
- [7] 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(01): 31-40.(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(01):31-40.)
- [8] Yang yuanxi, Liu Yanxiong, Sun Dajun, et al. Seafloor geodetic network establishment and key technologies[J]. *SCIENTIA SINICA Terrae*, 2020, 50(7): 936-945.(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.)
- [9] Wang J, Xu T, Liu Y, et al. Augmented Underwater Acoustic Navigation with Systematic Error Modeling Based on Seafloor Datum Network[J/OL]. *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/OL]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 4105. DOI:10.1038/s41598-023-31214-6.
- [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*,2022.
- [12] Sun Wenzhou, Zeng Anmin, Qiao Zhengming, et al. Approximate mathematical expression of ranging error for acoustic positioning of seafloor control points[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(1): 40-44. (孙文舟,曾安敏,乔正明,等.海底控制点水声定位测距误差的近似数学表达式[J].中国惯性技术学报,2023,31(1):40-44. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2023.01.006.)
- [13] LI Jingsen, XUE Shuqiang, XIAO Zhen, et al. Uncertainty Evaluation on the Arm Length Correction of GNSS-A Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis2022067. (李景森,薛树强,肖圳,等. GNSS/声呐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),2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220673.)
- [14] 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+48. DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20220401.(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+48. DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20220401.)
- [15] 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+1036.(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/OL].中国惯性技术学报,2023,31(10):1023-1029+1036. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2023.10.010.)
- [16] 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. (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.)
- [17] 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. (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. )
- [18] SPIESS F N. Suboceanic Geodetic Measurements[J]. IEEE Transactions on Geoenvironment and Remote Sensing, 1985, GE-23(4): 502-510.
- [19] 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(06): 8-21. (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(06): 8-21. )
- [20] 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(03): 1-7. (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(03): 1-7. )
- [21] Yu Wenshen, 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. (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. )
- [22] 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. (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. )
- [23] Yang Y, Zhang X, Xu J. Adaptively Constrained Kalman Filtering for Navigation Applications[J]. Survey Review, 2011, 43(322): 370-381.
- [24] Yang Y, Cui X. Adaptively robust filter with multi adaptive factors[J]. Survey Review, 2008, 40(309): 260-270.
- [25] Yang Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame. [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018,47(07):893-898. (杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. 测绘学报, 2018,47(07):893-898. )
- [26] Hu Xiaomei, Pan Xinlong, Liu Chengming. An Improved Sage-Husa Adaptive Filtering Algorithm for GNSS/SINS Integrated Navigation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(8): 791-794. (胡晓梅, 潘新龙, 刘成铭. GNSS/SINS 组合导航的改进 Sage-Husa 自适应滤波算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(8): 791-794. DOI:10.14075/j.jgg.2023.08.005. )
- [27] 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. (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. )
- [28] Yang W, Xue S, Liu Y. P-Order Secant Method for Rapidly Solving the Ray Inverse Problem of Underwater Acoustic Positioning[J/OL]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 3-15. DOI:10.1080/01490419.2021.1992547.
- [29] Watanabe S ichi, Ishikawa T, Yokota Y, et al. GARPOS: Analysis Software for the GNSS-A Seafloor Positioning With Simultaneous Estimation of Sound Speed Structure[J/OL]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 597532. DOI:10.3389/feart.2020.597532.

#### 网络首发:

标题: 无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型

作者: 薛树强, 杨诚, 卞加超, 杨文龙, 赵爽

收稿日期: 2024-09-20

DOI:10.13203/j.whugis20240131

#### 引用格式:

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240131 (XUE Shuqiang, YANG Cheng, BIAN Jiachao, et al. Active Sonar Time Window Navigation and Positioning Model Without Appending External Navigation Information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240131 )

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

#### 您感兴趣的其他相关论文:

不同水深层的 GNSS 信号特征分析及其导航场景聚类划分

陈惟杰, 朱锋, 郭斐, 张小红

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 139-145.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220048>

**基于重力场产品的水下匹配导航发展现状及影响因素分析**

万晓云, 吴云龙, 郭恒洋, 李明

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 879-890.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220568>

**多属性决策理论的重力匹配导航适配性分析**

肖云, 张锦柏, 曹杰, 陈培宁, 王宇康, 洪晓东

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1089-1099.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230073>

