

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03314>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 罗皓, 刘锡祥, 刘剑威, 等. 基于两个点集间参数估计的 DVL 标定方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 344–352.
LUO H, LIU X X, LIU J W, et al. A method for DVL calibration based on parameter estimation between two point sets[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 344–352 (in Chinese).

基于两个点集间参数估计的 DVL 标定方法



扫码阅读全文

罗皓¹, 刘锡祥^{*1}, 刘剑威², 吴小强², 程相智¹

1 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210018

2 江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061

摘要: [目的] 为了提高无人艇 (USV) 捷联惯性导航 (SINS) 与多普勒计程仪 (DVL) 组合导航的精度, 需要对 DVL 误差进行精确标定。[方法] 首先, 对 DVL 的安装误差角、杆臂、比例因子进行误差建模, 着重分析舰船中杆臂误差项对组合导航定位产生的影响; 然后, 提出一种基于两个点集间参数估计的 DVL 误差标定方法, 即将 SINS/GNSS 导航参数与 DVL 输出参数视为两个点集, 将标定问题转换为两个点集间差值的估计问题, 再利用卡尔曼滤波器对两个点集间的误差参数进行估计; 最后, 利用基于奇异值分解 (SVD) 的可观测性分析, 对不同运动条件下滤波器的可观测性定量分析, 给出标定过程中载体的运动策略。[结果] 数学仿真和海试试验结果表明, 标定后的 SINS/DVL 算法全局相对精度可达到 0.122% 航程; 在角机动时, 杆臂会导致 SINS/DVL 定位突变; 补偿杆臂后的定位误差更加平滑, 且整体上具有更小的定位误差。[结论] 所提方法可为包括杆臂在内的各项 DVL 误差标定提供可行的途径。

关键词: 无人艇; SINS/DVL 组合导航; 多普勒计程仪标定; 杆臂误差; 可观测性分析

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03314

A method for DVL calibration based on parameter estimation between two point sets

LUO Hao¹, LIU Xixiang^{*1}, LIU Jianwei², WU Xiaoqiang², CHENG Xiangzhi¹

1 College of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China

2 Jiangsu Institute of Automation, Lianyungang 222061, China

Abstract: [Objective] In order to improve the combined navigation accuracy of unmanned surface vehicles (USVs) by strapdown inertial navigation system (SINS) and doppler range finder (DVL), the DVL error needs to be accurately calibrated. [Methods] This paper carries out error modeling of the installation error angle, lever arm, and scale factor of the DVL, and focuses on the analysis of the impact of the lever arm error term on the combined navigation positioning in the vessels, pointing out the necessity of its calibration; proposes a DVL error calibration method based on the parameter estimation between two point sets, which treats the SINS/GNSS navigation parameters and DVL output parameters as two point sets, converting the calibration problem into an estimation problem of the difference between the two point sets, and using the Kalman filter to estimate the error parameters between the two point sets; using the SVD (singular value decomposition)-based observability analysis to quantify the observability of the filter in different motion conditions, giving the motion recommendations of the carrier during the calibration process. [Results] The results of mathematical simulation and real ship experiments show that the global relative accuracy of the calibrated SINS/DVL algorithm can reach a voyage of 0.122%. During cornering maneuvers, the lever arm causes abrupt changes in SINS/DVL positioning. After compensating for the lever arm, the positioning errors become smoother and the overall positioning error is reduced. [Conclusion] The proposed method provides a feasible way to calibrate each DVL error including the lever arm.

Key words: unmanned surface vehicles; SINS/DVL combined navigation; DVL calibration; lever arm error; observability analysis

收稿日期: 2023-04-06 修回日期: 2023-06-01 网络首发时间: 2023-09-15 12:19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51979041, 61973079)

作者简介: 罗皓, 男, 1999 年生, 硕士生。研究方向: 水下组合导航技术。E-mail: 220213654@seu.edu.cn

刘锡祥, 男, 1976 年生, 博士, 教授。研究方向: 惯性测量与导航技术。E-mail: scliuseu@163.com

*通信作者: 刘锡祥

0 引言

海洋是人类生存和发展的重要资源宝库,在维护国家安全、促进经济增长、保护生态环境等方面具有不可替代的作用^[1]。海洋的合理开发和利用有着重要的战略及军事意义,而无人艇(USV)作为高效的水面自主载体,可在人类难以到达的地方或危险区域执行各种任务,是未来战争中信息对抗、精确打击、完成特殊作战使命的重要手段^[2]。自主导航技术是 USV 的关键核心技术之一^[3],而全球定位系统(如 GNSS)在恶劣环境中易受到干扰或遮挡,导致信号中断或失锁,故研究其他类型的组合导航系统有着重要意义,其中自主性强的捷联惯性导航(SINS)/多普勒计程仪(DVL)的组合导航系统成为当前研究的热点^[4]。

DVL 是一种基于声学原理的水下速度测量设备,其通过向水底或水层发射声波并分析回波的多普勒频移解算载体相对于参考坐标系(海底或洋流)的速度^[5]。DVL 作为 SINS/DVL 组合导航系统中的重要传感器,可提供高精度、低漂移的速度信息,有效抑制惯性导航系统误差累积^[6]。SINS/DVL 组合导航精度主要取决于 SINS 初始对准精度与传感器标定精度,其中标定是对 DVL 因安装不一致和海水介质等因素所产生的误差(安装误差角误差、比例因子误差、杆臂误差)进行标校,提高标校精度是提高 SINS/DVL 组合导航精度的关键之一^[7]。

诸多学者对 DVL 标定问题展开了研究,早期的研究^[8]主要标定航向安装误差角而忽略了其他两个方向的安装误差角,但在实际载体的运动中各方向均存在速度,因此单纯依赖航向安装误差角标定已不能满足要求。为此,文献[9]利用长基线提供的位置信息作为参考,将安装误差角标定扩展为三维误差角估计问题,但仍未考虑比例因子这一重要误差,此外,恶劣复杂的海上环境和传感器之间的噪声也会影响标定效果。文献[10]通过 SINS/GNSS 组合导航建立了 DVL 误差下的卡尔曼滤波模型,将安装误差角和比例因子作为状态量进行实时估计,该方法可以同时估计两种误差,以及屏蔽一些白噪声的影响,但估计过程较冗长、估计精度有限,还需要载体进行多次机动。近年来,有研究发现 DVL 标定问题可以转化为两个点集之间最优矩阵估计的 Wahba 问题,后者是一个应用数学中的问题,也即寻求找到一个旋转矩阵,使 2 个坐标系下的一组向量观测值能够对齐^[11]。在 SINS/DVL 标定过程中,分别使用

SINS/GNSS 导航速度和 DVL 速度构造两个点集,就可以将安装误差角和比例因子的标定问题转化为两个点集间最优矩阵估计的 Wahba 问题。其中,文献[12]利用基于奇异值分解(SVD)的最小二乘法,估计 2 个点集之间的最优矩阵,则可以在 30 km 的航程内将误差保持在 0.2%D(D 为航程)以下,但受限于 SINS/GNSS 的组合精度,以及对噪声的敏感,该文献并未分析轨迹对标定效果的影响。文献[13]根据上述思路,针对两个点集问题,通过使用粒子群优化(PSO)算法来获取最佳旋转矩阵,不需要特定的机动同样可以快速收敛误差,但计算量大,因此既无法应用在与自主水下航行器(AUV)类似的小型系统中,也无法用于估计大的安装误差角。文献[14]引入了一种遗传算法(GA)来估计两个点集间的关系,其考虑了 SINS 和 DVL 二者数据之间存在的时间不同步问题,并通过引入三次样条插值统一时间基准予以解决,采用该方法所得结果精度较高,但需频繁机动,算法稳定性还需进一步予以验证。

综上所述,多数文献中的研究存在如下问题:1)针对大安装误差角标定的研究较少,实际应用安装时必然存在安装误差角大的情况,造成标定算法模型精度损失;2)多以 AUV 为背景,在分析 SINS/DVL 标定问题时,AUV 中 SINS 与 DVL 安装距离较近,杆臂信息易被获取,但在分析某些船舶时,杆臂较长将不易直接测量,且对于真实环境下的杆臂效应鲜有文献予以探讨^[15]。

本文将研究杆臂对 SINS/DVL 组合导航定位精度的影响,提出一种利用卡尔曼滤波器(Kalman filter, KF)对两个点集之间的差值进行参数估计的标定方案,其可标定安装误差角、比例因子和杆臂这 3 种误差,同时定量分析不同运动轨迹与滤波器可观测度间的关系。最后,通过仿真与海试验证所提理论及标定方案的可行性。

1 DVL 误差分析与建模

基于 DVL 测速误差模型进行了标定方案设计。本节将对 DVL 误差进行分析与建模。DVL 按误差来源可分为安装误差角、比例因子和杆臂三种。表 1 列出了各误差的成因及影响。

设 DVL 测量值为 \tilde{v}_{DVL} , SINS 质心速度矢量在 SINS 坐标系(b 系,也称载体系)下的投影表示为 v^b (即 DVL 理想的输出速度)。测量值 \tilde{v}_{DVL} 与理想值 v^b 满足式(1)所示关系^[16]。

$$\tilde{v}_{DVL} = (1 + \delta K)(I + \alpha \times)(v^b + \omega_{ib}^b \times I^b) \quad (1)$$

式中: $\alpha = [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z]^T$, 为 DVL 系与 SINS 系的安

表1 DVL误差成因及影响

Table 1 Causes of DVL error and resultant effects

误差	误差成因	误差影响
安装误差角	SINS坐标系与DVL坐标系指向不一致	DVL向导航坐标系(n系)投影时产生投影误差
比例因子	声速为常值这一假设不成立	DVL测量速度呈比例变化
杆臂	SINS质点与DVL质点不重合	角运动机动下DVL产生测速杆臂误差

装误差角; $\boldsymbol{l}^b = [l_x^b \ l_y^b \ l_z^b]^T$, 为杆臂在 b 系下的投影; δK 为比例因子; $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 为 b 系绕惯性坐标系(i系)的角速率在 b 系下的投影; $\boldsymbol{\alpha} \times$ 表示由矢量 $\boldsymbol{\alpha}$ 构成的反对称阵; \boldsymbol{I} 为单位阵。

将(1)式展开并略去误差二次项, 可得

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{DVL} = \boldsymbol{v}^b + \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{v}^b + \delta K \boldsymbol{v}^b + \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b \quad (2)$$

式(2)即为 DVL 测速误差模型, 其中安装误差角所引起的误差项为 $\boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{v}^b$, 比例因子所引起的误差项为 $\delta K \boldsymbol{v}^b$, 这 2 项误差会随着载体线速度的变大而变大; 杆臂误差引起的误差项为 $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b$, 该误差项会随着载体角运动的变大而变大。各误差源均为线性关系, 后续将在式(2)的基础上建立 KF 的标定模型。

2 海面运动假设下杆臂对定位误差影响的分析

SINS/DVL 在真实环境下必然存在杆臂误差, 但鲜有文献分析该误差对算法精度产生的影响。本节针对该问题, 配合第 1 节推导的 DVL 测速误差模型, 以船舶在海面上的运动为背景, 对杆臂误差项与算法的定位误差进行建模, 分析其规律。

式(2)中的误差项分别包括由安装误差角、比例因子、杆臂引起的误差项, 本节仅考虑杆臂误差项 $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b$, 则上述误差模型可简化为

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{DVL} = \boldsymbol{v}^b + \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b \quad (3)$$

由于 SINS/DVL 系统包含滤波器, 难以定量建模分析杆臂对定位误差的影响, 但考虑到 SINS/DVL 系统输出的速度本质上为 SINS 速度与航位推算速度这 2 个来源的加权平均, 而且杆臂误差主要通过影响航位推算速度进一步影响 SINS/DVL 系统速度, 因此只要分析杆臂对航位推算模型带来的影响, 即可将这种影响映射到 SINS/DVL 系统中。在此条件下, 认为 SINS/DVL 组合导航完全依赖 DVL 速度, 模型等价于航位推算模型, 则 SINS 计算的导航系下的速度 $\tilde{\boldsymbol{v}}_{SINS}^n$ 为 DVL 测量速度经过 SINS 姿态的投影, 即

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{SINS}^n = \boldsymbol{C}_b^n \tilde{\boldsymbol{v}}_{DVL} = \boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{v}^b + \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b) = \boldsymbol{v}^n + \boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b) \quad (4)$$

式中: \boldsymbol{C}_b^n 为 SINS 姿态阵; \boldsymbol{v}^n 为 SINS 速度在导航系

投影的真实值。

式(4)中, 速度误差项为 $\boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b)$, 本节以船舶在海面上的运动为前提, 在此前提下 SINS 的俯仰角 θ 与横滚角 γ 这 2 个姿态角较小, 可以近似为 0, 展开速度误差项, 得到

$$\begin{aligned} \boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b) &= \\ \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &\begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ib}^{bz} & \omega_{ib}^{by} \\ \omega_{ib}^{bz} & 0 & -\omega_{ib}^{bx} \\ -\omega_{ib}^{by} & \omega_{ib}^{bx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_x^b \\ l_y^b \\ l_z^b \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \omega_{ib}^{bz} (-l_y^b \cos \psi - l_x^b \sin \psi) + l_z^b \omega_{ib}^{bx} \sin \psi + l_z^b \omega_{ib}^{by} \cos \psi \\ \omega_{ib}^{bz} (-l_y^b \sin \psi - l_x^b \cos \psi) - l_z^b \omega_{ib}^{bx} \cos \psi + l_z^b \omega_{ib}^{by} \sin \psi \\ l_y^b \omega_{ib}^{bx} - l_x^b \omega_{ib}^{by} \end{bmatrix} & \quad (5) \end{aligned}$$

式中: ω_{ib}^{bx} , ω_{ib}^{by} , ω_{ib}^{bz} 为陀螺仪三轴角速率; ψ 为 SINS 航向角。

因为位置误差由速度误差引起, 所以此时定位误差源于速度误差项 $\boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b)$ 的累计。考虑到姿态角与角速率可以近似为导数关系, 即

$$\omega_{ib}^{bx} \approx \frac{d\theta}{dt}, \quad \omega_{ib}^{by} \approx \frac{d\gamma}{dt}, \quad \omega_{ib}^{bz} \approx \frac{d\psi}{dt}$$

则对式(5)中的时变变量 ψ 和 ω_{ib}^{bx} , ω_{ib}^{by} , ω_{ib}^{bz} 进行积分, 即可得杆臂所产生的定位误差:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \int_0^t \boldsymbol{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times \boldsymbol{l}^b) dt = \\ \int_0^t &\begin{bmatrix} \omega_{ib}^{bz} (-l_y^b \cos \psi - l_x^b \sin \psi) + l_z^b \omega_{ib}^{bx} \sin \psi + l_z^b \omega_{ib}^{by} \cos \psi \\ \omega_{ib}^{bz} (-l_y^b \sin \psi - l_x^b \cos \psi) - l_z^b \omega_{ib}^{bx} \cos \psi + l_z^b \omega_{ib}^{by} \sin \psi \\ l_y^b \omega_{ib}^{bx} - l_x^b \omega_{ib}^{by} \end{bmatrix} dt = \\ &\begin{bmatrix} \sqrt{(l_x^b)^2 + (l_y^b)^2} \sin \left(\psi + \arctan \left(\frac{l_x^b}{-l_y^b} \right) \right) \\ \sqrt{(l_x^b)^2 + (l_y^b)^2} \sin \left(\psi + \arctan \left(\frac{l_x^b}{l_y^b} \right) \right) \\ l_y^b \theta - l_x^b \gamma \end{bmatrix} + \\ &l_z^b \int_0^t \begin{bmatrix} \omega_{ib}^{bx} \sin \psi + \omega_{ib}^{by} \cos \psi \\ \omega_{ib}^{bx} \cos \psi + \omega_{ib}^{by} \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} dt + C \quad (6) \end{aligned}$$

式中, C 为常数。

根据(6)式, 定位误差可分为 3 个部分, 分别对应于(6)式中的 3 项。其中, 第 1 项主要由 x, y 轴杆臂激励, 该项的东向和北向定位误差与航向角间存在正弦规律变化的关系, 而天向定位误差则与横滚角和俯仰角相关; 第 2 项为 z 轴杆臂激励的定位误差, 该项难以积分求解, 且 x, y 轴角速

率与航向角没有明确的物理关系,难以分析。因此,本文利用一次 SINS/GNSS 组合导航海试数据对第 2 项进行数值积分,结果如图 1 所示。

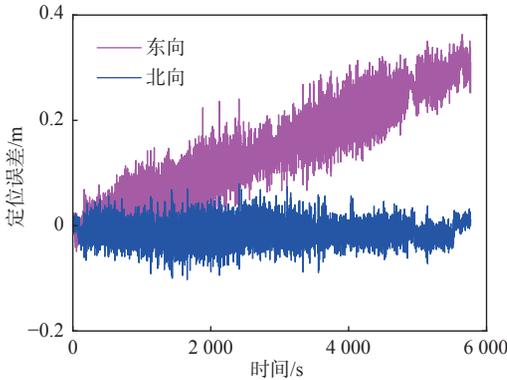


图 1 杆臂误差式(6)的第 2 项数值积分结果

Fig. 1 Results of numerical integration performed on the second term of Eq.(6) for lever arm error

从图 1 中可以看出,在此次试验设备、外在环境、试验轨迹下,东向误差呈持续发散的趋势,而北向误差则在 0 附近波动,一般该项与船舶实际运动情况相关,不同的试验结果可能呈现出不同的误差。第 3 项为常数项,与 SINS 的初始状态有关。上述分析结果如表 2 所示。

表 2 式(6)中 3 项定位误差的变化规律

Table 2 The variation law of three positioning errors in Eq. 6

定位误差	第1项	第2项	第3项
东向	与航向角呈正弦变化	与实际运动情况相关	常值
北向	与航向角呈正弦变化	与实际运动情况相关	常值
天向	与横滚角、俯仰角呈线性变化	-	常值

综上,对于船舶的 SINS/DVL 导航系统而言,杆臂所引起的定位误差主要取决于 SINS 的姿态角,并且还存在着可忽略不计的发散误差。在实际工程中,若忽略杆臂所引起的定位误差,会出现在转弯过程中定位误差突然增大或减小而再转向时定位误差突然减小或增大的现象。虽然突变的误差一般与杆臂同为一个量级,不会过多地影响 SINS/DVL 导航系统整体的定位精度,但对于 USV 这种需要航路控制的系统,导航信息的突变会使控制链路产生振荡,导致船体发生抖动、打转等现象,不利于船体稳定航行。因此,需要尽可能地对杆臂误差予以补偿,如此才能使导航定位输出更加平滑、连续,从而更好地控制船体机动。

3 基于两个点集参数估计的滤波方案设计

首先,设计标定方案。在第 1 节推导的误差

模型的基础上,将 SINS/GNSS 组合导航的载体速度输出视为理论的载体速度 v^b 并作为一个点集,再将 DVL 输出的速度 \tilde{v}_{DVL} 视为另一个点集。然后,利用 KF 滤波器估计两个点集之间的参数,对于大安装误差角,采用对估计值进行阈值检测、预先补偿的策略,将其化为残余误差角予以估计。最后,采用基于 SVD 的可观测分析方法分析滤波器的可观测性,定量分析包括洋流运动在内的静止、匀速、匀加速、匀速转弯这 4 种运动状态下的奇异值,比较 4 种运动对误差的可观测性影响。方案设计框图如图 2 所示。

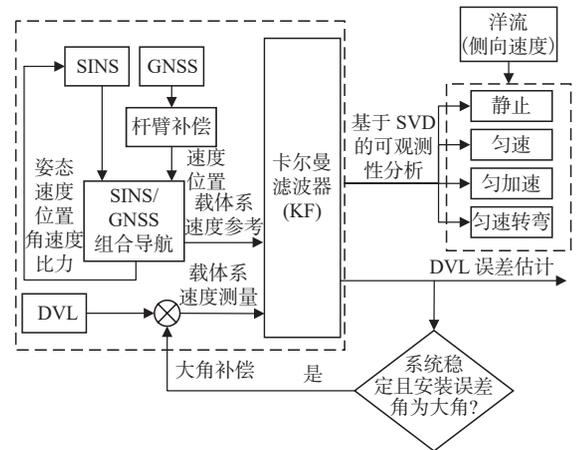


图 2 标定方案设计框图

Fig. 2 Block diagram of calibration scheme design

3.1 卡尔曼滤波器(KF)设计

在 KF 中选取 DVL 的安装误差角、比例因子和杆臂这几个参数作为状态量,并表示为

$$X = [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ \delta K \ l_x^b \ l_y^b \ l_z^b]^T \quad (7)$$

当 SINS 与 DVL 相对安装位置固定时,安装误差角与杆臂大小也将保持不变。在同一海域,比例因子基本保持不变,也可近似为一个常数,即

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_x = 0, \dot{\alpha}_y = 0, \dot{\alpha}_z = 0, \delta \dot{K} = 0 \\ \dot{l}_x^b = 0, \dot{l}_y^b = 0, \dot{l}_z^b = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

因此,系统的状态方程为

$$\dot{X} = FX \quad (9)$$

式中, $F = \mathbf{0}_{9 \times 9}$ 。

量测方程根据第 1 节推导的误差模型表示为

$$Z = \tilde{v}_{DVL} - v^b = -(v^b \times) \alpha + v^b \delta K + (\omega_{ib}^b \times) l^b \quad (10)$$

式中, v^b 由 SINS/GNSS 组合导航获取,即式(11)所示。

$$v^b = (C_n^b)_{SINS/GNSS} v_{SINS/GNSS}^n \quad (11)$$

式中, $(C_n^b)_{\text{SINS/GNSS}}$ 和 $v_{\text{SINS/GNSS}}^n$ 分别为 SINS/GNSS 组合导航获得的姿态阵与速度。

量测方程的矩阵形式表示为

$$Z = HX + V \quad (12)$$

式中: H 为量测矩阵, $H = [-v^b \times \quad v^b \quad \omega_b^b \times]$; V 为量测方程的白噪声, 其方差根据 DVL 测量噪声与 SINS/GNSS 组合精度综合考虑设置。

3.2 基于 SVD 的可观测度分析

为分析上节所提滤波器的可观测性, 本节将提出基于 SVD 的可观测性分析理论。

KF 可被视为分段线性定常系统 (piecewise constant system, PWCS), PWCS 可观测性分析的主要思路是将系统整个运行时间分为多段, 每段 H 阵与 F 阵变化缓慢, 可近似为一个常量^[7], 将系统分为多段后, 系统在第 i 个时间段的可观测性矩阵为

$$Q_i = \begin{bmatrix} H_i \\ H_i F_i \\ \vdots \\ H_i F_i^{n-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: H_i 为系统第 i 个时段的量测矩阵; F_i 为系统第 i 个时段的状态矩阵。

系统从第 1 个时间段到第 i 个时间段的提取可观测矩阵为

$$Q_s = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

基于 PWCS 理论的可观测分析只能通过判断提取可观测矩阵 Q_s 的秩是否为 n (状态维数), 从而判断系统是否完全可观测, 但是无法确定哪些状态量可观测, 且可观测度如何, 所以引入基于 SVD 可观测性分析方法^[16] 将 Q_s 进行 SVD 分解如下:

$$Q_s = USW^T \quad (15)$$

$$S = \begin{bmatrix} D_n \\ \mathbf{0}_{(l-n) \times n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: D_n 为矩阵 Q_s 奇异值构成的对角阵; U 与 W 分别为 n 维和 l 维的酉矩阵。

每个状态量的可观测度通过 D_n 中的各奇异值表现所决定, 奇异值越大, 该状态量的观测效果越强。但是, 对于不同量纲的状态量, 其奇异值表现的可观测性也不同, 所以这种比较仅对同一量纲的状态量有意义。

3.3 不同运动状态下的可观测性仿真分析

为定量分析不同机动情况对各误差量的可观测度, 这里, 针对静止、匀速、匀加速和匀速转弯这 4 种机动进行仿真, 并利用 3.2 节理论进行可观测度分析, 仿真参数如下所示。

为了模拟更真实的海况, 引入洋流概念, 设置洋流速度为东向 0.2 m/s。洋流的引入可引起载体速度的变化, 从而更好地激励误差的形成。

- 1) 静止状态: 载体处于漂浮状态, 仅受洋流影响。
- 2) 匀速状态: 载体以 4 m/s 的速度向北匀速直航。
- 3) 加速状态: 载体以 0.1 m/s² 的加速度加速至 4 m/s 向北匀加速直航。
- 4) 转弯状态: 载体以 4 m/s 的速度、10 (°)/s 的角速度进行逆时针绕圈运动。

表 3 所示为不同运动状态下各误差的可观测度结果。

对表中结果进行分析:

1) 载体处于静止状态时, 由于洋流速度在载体系投影恒定且较小, 载体角速度近似为 0, 每次获得的量测信息基本不变, 导致各状态变量之间无法解耦, 均难以被观测。

2) 匀速状态可类比于静止状态, 各时刻的量测信息基本不变, 且载体不发生角运动, 无法激励杆臂误差, 各状态可观测性较差。

3) 匀加速机动体现在载体 y 轴的速度变化, 从而改变量测矩阵, 可以激励涉及到 y 轴投影的安装误差角。此外, 加速机动可使比例因子系数大幅度变化, 从而提高该状态量的可观测性。因此, 从表 3 中可以看出, 安装误差角 x 、安装误差角 z 与比例因子的观测性较强。

4) 匀速转弯机动时, 载体系速度变化主要体

表 3 不同机动条件下各误差可观测性分析

Table 3 Observability analysis of errors in different manoeuvring conditions

船舶状态	α_x	α_y	α_z	δK	l_x^b	l_y^b	l_z^b
静止	3.13×10^{-20}	7.39×10^{-17}	7.80×10^{-21}	4.49×10^{-20}	1.42×10^{-18}	9.76×10^{-19}	4.73×10^{-23}
匀速	1.83×10^{-19}	3.42×10^{-16}	6.30×10^{-19}	1.41×10^{-20}	1.03×10^{-18}	9.85×10^{-19}	3.14×10^{-23}
加速	0.017	2.17×10^{-4}	0.097	0.011	2.94×10^{-15}	8.88×10^{-16}	8.09×10^{-22}
转弯	2.95×10^{-3}	9.24×10^{-3}	0.013	4.16×10^{-3}	0.27	0.46	4.03×10^{-15}

注: 加粗数据表示该列数据的最大值, 即可观测度最高的机动。

现为洋流投影的周期性变化, 导致量测矩阵变化; 同时, z 轴角速度可以很好地激励水平面的杆臂误差, 故杆臂误差 x, y 的观测性较强; 另外, 洋流投影的周期性变化使得安装误差角 y 的观测性相比匀加速机动时的有所提高, 此时比例因子前的系数会随着洋流发生缓慢而微小的变化, 但变化幅度远小于加速机动时的变化幅度, 因此此时比例因子的可观性相比加速机动时的也有所减弱。

综上所述, 若要提高标定系统的可观性, 需要对载体的运动进行控制, 这可通过引入纵向速度和侧向速度的变化或角运动来实现。纵向速度的变化可以通过载体的加速和减速来实现, 而侧向速度的变化则需要利用洋流, 通过转弯机动来实现其投影周期性的变化。不同的机动也可以组合在一起(例如变速的转弯机动), 这样可以更好地提高标定系统误差的收敛速度。

4 标定方案的仿真实验与海试试验

4.1 仿真实验

为了验证第 3 节模型的建立与标定精度, 进行了仿真标定实验。仿真参数如下:

1) 初始位置: 东经 108.91°, 北纬 34.24°, 高度 0 m; 初始姿态角均为 0°, 初始速度为 0 m/s。

2) 船舶轨迹: 首先, 以 1 m/s² 的加速度直线匀加速, 直至达到速度 4 m/s; 随后, 在匀速直航状态下维持 100 s 的时间; 然后, 再开始以 2 (°)/s 的角速率向左转弯, 并在转弯状态下持续 45 s; 接着, 再次进行 100 s 的匀速直航, 之后以 9 (°)/s 的角速率向右转弯, 持续 50 s 之后, 再次进行 100 s 的匀速直航, 并再以 9 (°)/s 的角速率向右转弯, 持续 50 s; 最后, 以 -1 m/s² 的加速度开始直线匀减速运动, 直至停止。图 3 所示为船舶轨迹图。同时, 为模拟真实海况, 设置洋流速度为 [0.1 0.1 0]^T (m/s); 设置船舶俯仰角、横滚角的摇摆振幅均为 4°, 频率为 2 Hz。

3) 惯性传感器的参数设置: 陀螺仪常值零偏为 0.02 (°)/h, 陀螺仪输出噪声为 0.000 5 (°)/√h; 加速度计常值零偏为 50 ug, 加速度计输出噪声为 25ug/√Hz; 惯性测量单元数据输出频率为 100 Hz, 捷联惯性导航解算周期为 10 ms; GNSS 数据输出频率为 5 Hz, 水平位置测量标准差为 0.5 m, 高度测量标准差为 1 m, 速度测量标准差为 0.1 m/s; DVL 测速精度 0.2%*V (载体速度), 数据频率为 5 Hz; 比例因子误差为 0.005; DVL 与 SINS 间的杆臂误差设置为 $l^b = [1 \text{ m } 1.2 \text{ m } 1.4 \text{ m}]^T$; DVL 与 SINS 间

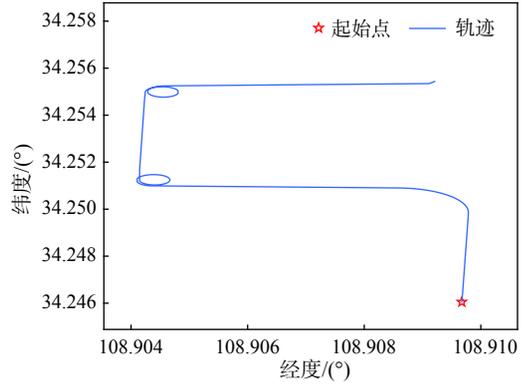


图 3 仿真轨迹图

Fig. 3 Simulation trajectory

的安装误差角设置为 $\alpha = [2^\circ \ 2^\circ \ 30^\circ]^T$; SINS/GNSS 组合导航系统初始失准角为 [0.5° 0.5° 2°]^T; 速度误差均为 0.1 m/s; 位置误差均为 3 m。

仿真实验对各误差参数的估计曲线与估计值如图 4 和表 4 所示。

仿真结果表明, 模拟海况下的船舶运动可以

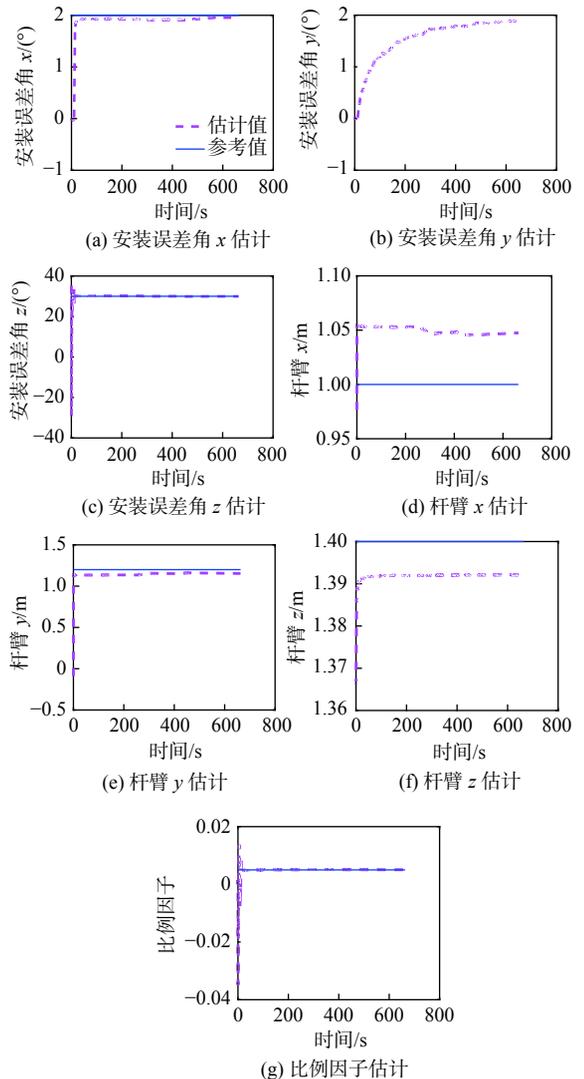


图 4 仿真实验对各误差参数的估计曲线

Fig. 4 Estimation curves of each error parameters by simulation experiment

表4 仿真实验对各项误差参数估计值

Table 4 Estimated values of each error parameter by simulation

参数	估计值	参考值	精度/%
$\alpha_x/(^\circ)$	1.937	2	96.85
$\alpha_y/(^\circ)$	1.897	2	94.85
$\alpha_z/(^\circ)$	29.941	30	99.80
δK	0.005 067	0.005	98.66
l_x^b/m	1.047	1	95.30
l_y^b/m	1.153	1.2	96.08
l_z^b/m	1.392	1.4	99.10

对各项误差进行准确估计。其中,俯仰角与横滚角的周期性运动可以激励杆臂误差 z ; 安装误差角 y 的估计可能受 DVL 噪声的影响,且侧向速度较小,曲线收敛较慢,需较长时间估计;比例因子与杆臂的估计曲线存在恒定偏移,恒定偏移的现象在 KF 中不可避免,但可以通过设置 KF 参数适当予以减小。

4.2 海试试验

为验证本文所提 DVL 标定方法的可行性,2022 年 10 月在黄海某海域进行了海试试验。表 5 所示为陀螺仪、加速度计、RTK-GNSS 和 DVL 传感器的性能指标,图 5 所示为各传感器与船体的配置。其中, SINS 和 GNSS 接收机与电脑固定在船舱内部,通过上位机对导航参数实时采集, DVL

表5 传感器性能指标

Table 5 Sensor performance indicators

传感器	参数	指标
陀螺仪	零偏稳定性	$<0.02 (^\circ)/h$
	输出噪声	$0.000 5 (^\circ)/\sqrt{h}$
加速度计	零偏稳定性	$<50 \mu g$
	输出噪声	$25 \mu g/\sqrt{Hz}$
RTK-GNSS	HDOP	$\pm(10+1\times 10^{-6}*D) mm$
	VDOP	$\pm(20+1\times 10^{-6}*D) mm$
DVL	测速精度	$0.2\%*V$
	数据频率	5 Hz

注: D 代表RTK与基站间的距离, V 代表载体速度, HDOP与VDOP 分别代表水平定位精度和垂直定位精度。



图5 船体设备安装情况

Fig. 5 Installation of hull equipments

安装在船体外侧,通过船体加装的不锈钢连接钢管固定在船体左前侧,用三角形焊接固定方式保证 DVL 工作时与船体刚性连接,且保证 DVL 与 SINS 之间存在 1~2 m 的杆臂。

本次海试试验首先进行在线的 DVL 标定,标定完成后,将标定后的航位推算算法与 GNSS 位置信息进行对比,以验证标定结果。然后,通过物理测量方法获取杆臂,并将其与估计的杆臂值进行对比。标定总时长为 4 800 s,各误差估计曲线与估计结果如图 6 和表 6 所示。航位推算验证试验总时长为 4 000 s,试验结果如图 7 所示。

从表 6 可以看出,杆臂误差的标定结果与采

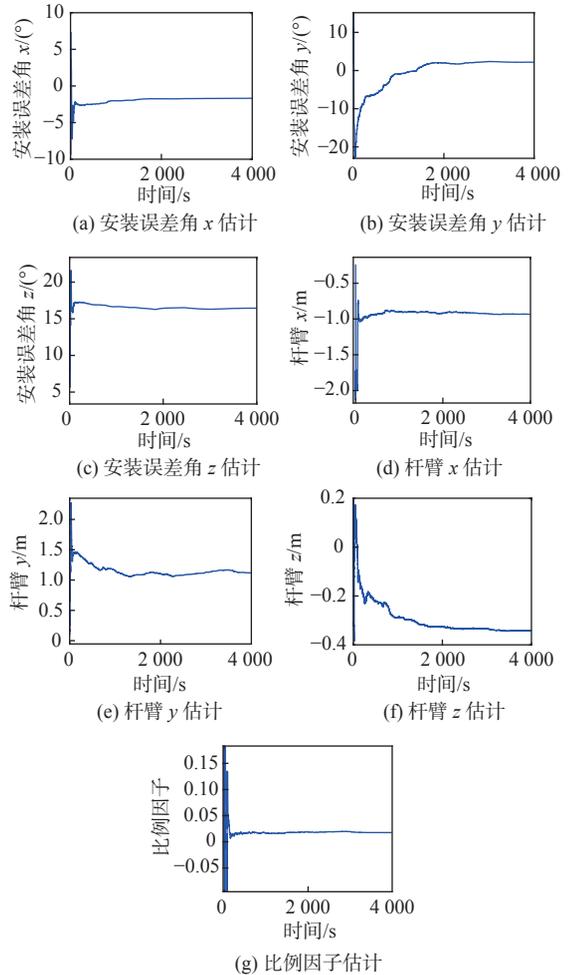


图6 海试试验下 DVL 误差估计曲线

Fig. 6 DVL error estimation curves under sea trial conditions

表6 海试试验下各项误差参数估计值

Table 6 Estimated values of each error parameter under sea trial conditions

参数	x轴	y轴	z轴
$\alpha/(^\circ)$	1.680	2.097	16.450
l^b/m	-0.934	1.120	-0.342
δK	0.017 7		
物理测量的 l^b/m	-0.840	1.230	-0.410

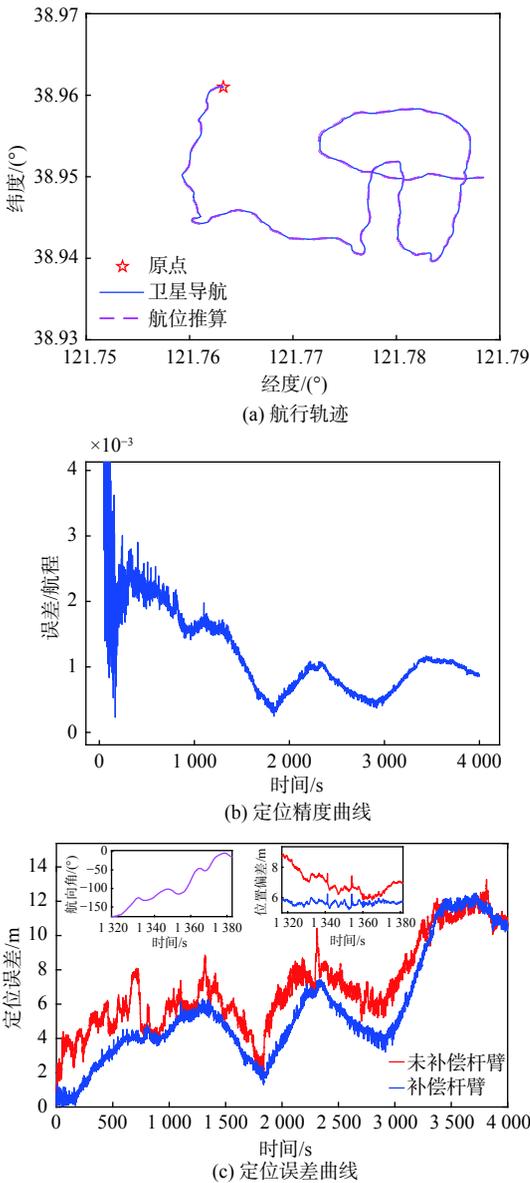


图 7 标定结果验证

Fig. 7 Validation of calibration results

用物理测量方式得到的杆臂误差基本一致, 可以认为该算法对杆臂的估计精度与物理测量的精度一致。此外, 从图 7(c)中可以看出, 补偿杆臂的定位曲线除了 GNSS 定位误差的噪声与毛刺外, 更平滑且无大尖刺, 总体上具有更小的定位误差, 验证了第 2 节的结论。同时, 根据第 2 节的分析, 船体在未校正杆臂误差时, 航向机动会导致定位误差迅速改变, 在 1320~1380 s 之间, 航向角发生约 180°的变化, 对于未补偿杆臂的定位曲线, 其定位误差发生了约 3 m 的变化, 而补偿杆臂的定位误差则基本稳定维持在一条直线, 表明该标定方法可以有效估计杆臂。

对于其他误差参数的标定, 利用标定前后航位推算算法的相对定位精度验证。标定前后的终点相对精度与全局相对精度如表 7 所示。

对于未标定前的航位推算算法, 其终点、全

表 7 标定前后导航定位精度

Table 7 Navigation positioning accuracy before and after calibration

	定位精度/%	
	标定前	标定后
终点相对精度	7.95	0.087
全局相对精度	12.79	0.122

局相对精度均远高于标定补偿后的相对精度。标定后, 定位能力均大幅提高, 从而验证该标定方案能在大安装误差角下有效估计各项 DVL 误差。

5 结 语

本文针对 SINS/DVL 的标定问题, 建立了杆臂对 SINS/DVL 组合导航的影响模型, 通过模型分析, 发现在角机动情况下导航会出现定位误差突变和定位曲线不平滑的现象, 使得控制系统产生了振荡等不利影响; 设计了一种基于两个点集参数估计的标定方案, 通过仿真实验验证了在洋流和风浪摇摆的情况下, 所提方案能够对各误差予以估计, 平均估计精度达 97.36%; 通过海试试验, 在线标定 DVL, 使用航位推算法得到在 4000 s 时长和 20 km 航程下的全局相对精度可以达到 0.122% 航程; 通过对比补偿/未补偿杆臂的实验结果, 验证了杆臂误差与姿态角之间的相关性, 同时, 经杆臂标定后的算法具有更小、更平滑的定位误差曲线。

参考文献:

- [1] 杨波, 刘烨瑶, 廖佳伟. 载人潜水器——面向深海科考和海洋资源开发利用的“国之重器”[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 622-631.
YANG B, LIU Y Y, LIAO J W. Manned submersibles—deep-sea scientific research and exploitation of marine resources[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 622-631 (in Chinese).
- [2] 李家良. 水面无人艇发展与应用 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(6): 203-207.
LI J L. Development and application of unmanned surface vehicle[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(6): 203-207 (in Chinese).
- [3] 胡常青, 朱玮, 何远清. 无人水面艇自主导航技术 [J]. 导航与控制, 2019, 18(1): 19-26, 90.
HU C Q, ZHU W, HE Y Q, et al. Autonomous navigation technology of unmanned surface vehicle[J]. Navigation and Control, 2019, 18(1): 19-26, 90 (in Chinese).
- [4] 李亮. SINS/DVL 组合导航技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
LI L. Research of integrated navigation system of SINS/

- DVL[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009 (in Chinese).
- [5] BELLINGHAM J G, ZHANG Y, BAGGEROER A B. A Doppler velocity log (DVL) aided inertial navigation system (INS) for an autonomous underwater vehicle (AUV) [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1992, 17(3): 264–271.
- [6] LI W L, CHEN M J, ZHANG C, et al. A novel neural network-based SINS/DVL integrated navigation approach to deal with DVL malfunction for underwater vehicles [J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020: 1–14. [2020-07-26]. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/2891572/>
- [7] 刘静晓, 李海兵, 马思乐, 等. AUV 组合导航系统中的 DVL 误差标定技术综述 [C]//中国惯性技术学会惯性技术发展动态发展方向研讨会论文集—前沿技术与惯性技术的融合与应用. 辽宁, 大连: 中国惯性技术学会, 2021: 354–359.
- LIU J X, LI H B, MA S L, et al. A review of DVL error calibration techniques in AUV combined navigation systems[C]//Proceedings of the CSIT Workshop on Dynamic Directions in Inertial Technology Development – Integration and Application of Frontier Technologies and Inertial Technologies. Dalian, Liaoning, China: Society of Inertial Technology, 2021: 354–359 (in Chinese).
- [8] JOYCE T M. On in situ "calibration" of shipboard ADCPs [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(1): 169–172.
- [9] KINSEY J C, WHITCOMB L L. Adaptive identification on the group of rigid-body rotations and its application to underwater vehicle navigation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 124–136.
- [10] LV Z P, TANG K G, WU M P. Online estimation of DVL misalignment angle in SINS/DVL integrated navigation system[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Chengdu, China: IEEE, 2011, 2: 336–339.
- [11] 刘一麟, 吴美平, 郭妍, 等. 多矢量姿态测量算法综述 [J/OL]. 北京航空航天大学学报. [2022-11-21]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0325>.
- LIU Y L, WU M P, GUO Y, et al. A survey of algorithms for multi-vector attitude determination [J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. [2022-11-21]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0325> (in Chinese).
- [12] LI W L, ZHANG L D, SUN F P, et al. Alignment calibration of IMU and Doppler sensors for precision INS/DVL integrated navigation[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 3872–3876.
- [13] LI D, XU J N, ZHU B, et al. A calibration method of DVL in integrated navigation system based on particle swarm optimization[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110325.
- [14] LIU J X, LI H B, MA S L, et al. Simultaneous calibration method for Doppler velocity log errors based on a genetic algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(10): 9558–9567.
- [15] 卢道华, 宋世磊, 王佳, 等. SINS/DVL 水下组合导航技术发展综述 [J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(7): 1159–1170.
- LU D H, SONG S L, WANG J, et al. Review on the development of SINS/DVL underwater integrated navigation technology[J]. *Control Theory and Applications*, 2022, 39(7): 1159–1170 (in Chinese).
- [16] WANG D, XU X S, YANG Y, et al. A quasi-Newton quaternions calibration method for DVL error aided GNSS [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2465–2477.
- [17] 周广涛, 邵剑波, 韩少卫, 等. SVD 可观测度分析方法的改进及组合导航中的应用 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(4): 52–57.
- ZHOU G T, SHAO J B, HAN S W, et al. Improvement of observable degree analysis method based on SVD and application in integrated navigation[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(4): 52–57 (in Chinese).