

基于九轴 MIMU 的二级卡尔曼滤波在非稳态平台上的姿态研究^{*}

聂郡谿 康建军 荆珈璐 李虎林 刘超然

(国家海洋技术中心 天津 300112)

摘要: 海洋动力环境引发的平台运动,会降低海洋观测平台及测量仪器可靠性,并导致风、浪、流等海洋动力观测量出现测量误差。海洋观测平台从布放始全运行周期处于无规则运动状态,基于九轴微型惯性测量单元(MIMU)的卡尔曼滤波、互补滤波姿态估计算法无法保证其及时收敛,从而导致在姿态解算中会出现较为严重的误差。为此,本文设计了一种 MIMU 的二级扩展卡尔曼滤波系统。该系统首先采用加速度估计初始姿态角,提高了滤波器的收敛速度,其次通过分级处理横滚角、俯仰角和航向角,提高了系统的鲁棒性。实验室和海上现场试验表明,该方法实现了海洋观测平台在非稳定运动状态下姿态估计的快速收敛和高精度解算。

关键词: 微型惯性测量单元;二级扩展卡尔曼滤波;姿态解算;非稳态平台;海洋观测平台

中图分类号: TP212.6;TP29;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Attitude study of second-order Kalman filter based on nine-axis MIMU on unsteady platform

Nie Junxi Kang Jianjun Jing Jialu Li Hulin Liu Chaoran

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: The dynamic marine environment induces platform motions that compromise the reliability of ocean observation platforms and measurement instruments, leading to errors in the measurement of ocean dynamic parameters such as wind, waves and currents. Throughout its deployment and operational cycle, an ocean observation platform experiences irregular motions. Conventional attitude estimation algorithms based on a nine-axis Micro Inertial Measurement Unit (MIMU), such as Kalman filtering or complementary filtering, often fail to achieve timely convergence, resulting in significant errors in attitude computation. To address this issue, this study proposes a two-stage extended Kalman filtering system for MIMU-based attitude estimation. In the first stage, the system utilizes acceleration data to estimate the initial attitude angles, thereby improving filter convergence speed. In the second stage, it employs hierarchical processing of roll, pitch, and yaw angles to enhance system robustness. Laboratory and field experiments at sea demonstrate that the proposed method achieves rapid convergence and high-accuracy attitude estimation for ocean observation platforms operating under non-stationary motion conditions.

Keywords: miniature inertial measurement unit; second-order extended Kalman filter; posture solving; unsteady platform; ocean observation platform

0 引言

平台姿态测量是掌握海洋平台工作时运动状态的重要来源,关系到海洋平台上风、浪、流等观测数据姿态精准矫正和运动补偿,是海上平台高精度参数测量的重要关键技术^[1]。具体而言,俯仰角、横滚角和航向角分别服务于不

同的研究目标——剖面风、风速、流速和浪高的准确获取依赖于俯仰角与横滚角的精确测量;而风向、流向及浪向的准确获取则离不开航向角的精确测量。在复杂海况下,风、浪、流的耦合作用会引起观测平台姿态偏移,从而造成观测轴与参考系的不对准。研究表明,俯仰角或横滚角偏移 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,风速和风向误差可分别超过10%和8%^[2]。因

此,若未对姿态影响进行预测校正,将显著降低海洋动力参数的观测精度。由此可见,对非稳态平台例如浮标、无人船、自主水下载具等运动姿态的精确测量研究具有十分重要意义。

微惯性测量单元(micro-inertial measurement unit, MIMU)系统具有更少的部署约束与更广的平台适应性,可集成于小型平台或应用于水下环境,其核心挑战主要在于抑制磁力计的易扰性^[3-5]。国内外学者开展了不少相关研究。余博嵩等^[6]设计了漂流浮标运动姿态测量系统,融合四元法和比例积分(proportional integral, PI)调节算法进行姿态解算。Joybari 等^[7]在伊朗基什岛近海水域的浮标上获取了数据,通过多种算法对比证明了 Madgwick 算法和 Mahony 算法在输入参量一致的情况下,均优于互补滤波算法对于姿态信息的校正精度。侯庆余^[8]采用九轴 MIMU 获取了浮标载体姿态的冗余信息,通过有限脉冲响应数字滤波、扩展卡尔曼(extended Kalman filter, EKF)滤波、误差补偿等优化,实现多源数据的融合。

本文设计了一种基于九轴 MIMU 的二级 EKF 系统,首先通过加速度计估计初始姿态角,其次通过二级 EKF 分步估计俯仰角、横滚角和航向角。通过和 Mahony 算法、MTI-3 自主输出以及设定基准数据的实验室实验,模拟在非稳态环境下 3 种解算的结果,然后进行了海上现场实验,两个实验结果均表明该系统满足海洋平台姿态测量精度的需求。

1 非稳态平台测姿系统设计

1.1 二级扩展卡尔曼测姿系统设计

本文设计的姿态测量系统主要应用于长期在线运行海洋观测平台的姿态测量与识别,长期离线不受人为因素控制,因此 MIMU 需要具备小体积、轻重量、低功耗等特性。基于此,选用荷兰 XSENS 公司生产的 XSENS MTI-3 姿态航向参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)模块(后简称 MTI-3)负责三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计的数据采集。3 种传感器特性不同:1)陀螺仪短时精度高,但难以维持长期高精度输出。角度随机游走和高斯白噪声会导致原始数据积分误差的积累,影响姿态角的估计精度。2)加速度计在静态环境下输出稳定,可精确测量重力加速度在各轴方向的分量,但在动态过程中,线性加速度的引入会导致重力加速度与运动加速度难以有效分离。此外,加速度计对振动敏感,无法感知航向角

变化。3)磁力计通过测量地磁场矢量获取航向信息,在无磁干扰条件下地磁场稳定不变,但易受外部磁场干扰^[9]。

主流的传感器融合算法存在明显短板:互补滤波,对非线性运动及陀螺仪偏置的补偿能力有限^[10];标准卡尔曼滤波算法因其观测模型通常耦合了加速度计与磁力计数据,使得系统对磁力计污染极为敏感。显著影响实验的可重复性^[11-12]。针对上述不足,本研究的传感器融合算法基于非线性二级 EKF 框架构建。其中,一级 EKF 用于解算并输出俯仰角与横滚角,其输出作为倾斜补偿量被送入二级 EKF;进而,二级 EKF 在此基础上修正并输出航向角。二级滤波器协同,共同提供可靠的全姿态输出。二级机制设计,不仅有效抑制了姿态角耦合引发的误差累积,还通过深度融合各传感器的互补优势,确保了在复杂多变的海洋环境中姿态测量的精确性与稳定性。算法原理如图 1 所示。

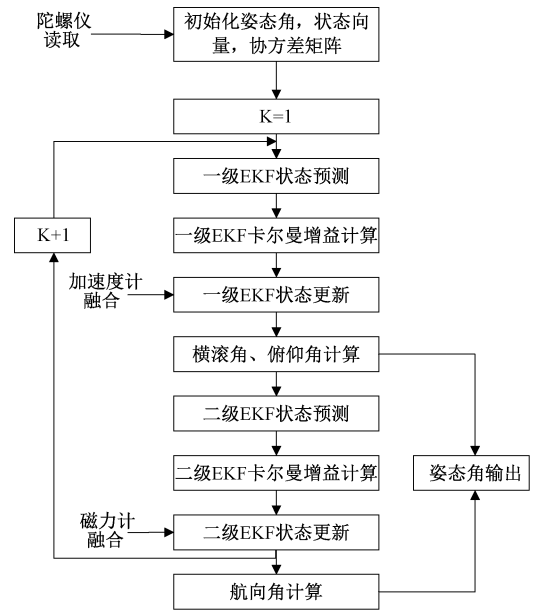


图 1 二级扩展卡尔曼滤波算法设计

Fig. 1 Design of the second-order extended Kalman filter algorithm

1.2 初始姿态角设定

本文采用东北天导航坐标系,通过将加速度计、陀螺仪和磁力计按照载体的右、前、上对齐统一的坐标系并遵循右手法则,采用 Z-Y-X 的旋转顺序的“航天航空次序欧拉角”,其中 ψ 为航向角(绕 Z 轴)、 θ 为俯仰角(绕 Y 轴)、 γ 为横滚角(绕 X 轴)^[13-14]。

从载体系旋转到参考系的旋转矩阵 R_n^b :

$$R_n^b = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta \sin\gamma - \cos\gamma \sin\psi & \sin\psi \sin\gamma + \cos\psi \cos\gamma \sin\theta \\ \cos\theta \sin\psi & \cos\psi \cos\gamma + \sin\psi \sin\gamma \sin\theta & \cos\gamma \sin\psi \sin\theta - \cos\psi \sin\gamma \\ -\sin\theta & \cos\theta \sin\gamma & \cos\gamma \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

测姿系统获取初值,在静态条件下通过 MIMU 加速度计和重力加速度的转换关系可以得到俯仰角 θ 和横滚角 γ ,其中 $[a_x \ a_y \ a_z]$ 是三轴加速度计的输出。通过磁力计和地磁场的转换关系可以得到载体轴相较于磁北的

航向角 ψ_m ,其中 $[m_x \ m_y \ m_z]$ 是三轴磁力计输出:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (2)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (3)$$

$$\phi_m = \left(\frac{m_x \cos\theta + m_y \sin\theta \sin\gamma + m_z \sin\theta \cos\gamma}{m_y \cos\gamma - m_z \sin\gamma} \right) \quad (4)$$

$\Delta\psi$ 是真北和磁北的夹角(磁偏角),载体相较于真北的航向角为 $\psi = \psi_m + \Delta\psi$ 。其中航向角 ψ 的取值范围为 $(-180^\circ, 180^\circ]$, 俯仰角 θ 的取值范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$, 横滚角 γ 的取值范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。

姿态解算方法为四元数。利用四元数不存在角度奇点问题,系统可以更好地线性化,为后续卡尔曼滤波流程做好铺垫。将上述求解的初始姿态角通过旋转矩阵转换为初始四元数:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\gamma}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\psi}{2}) + \sin(\frac{\gamma}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\psi}{2}) \\ \sin(\frac{\gamma}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\psi}{2}) - \cos(\frac{\gamma}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\psi}{2}) \\ \cos(\frac{\gamma}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\psi}{2}) + \sin(\frac{\gamma}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\psi}{2}) \\ \cos(\frac{\gamma}{2})\cos(\frac{\theta}{2})\sin(\frac{\psi}{2}) - \sin(\frac{\gamma}{2})\sin(\frac{\theta}{2})\cos(\frac{\psi}{2}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3 二级扩展卡尔曼滤波算法原理

如 1.1 节所述,二级 EKF 的第一步是根据获取的陀螺仪数据进行基于加速度计的第一级 EKF,主要用于俯仰角和横滚角的姿态估计,参考 Simone 等^[15]提出的公式。状态变量为四元数和陀螺仪偏置: $\mathbf{x}_{k1} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3 \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z]^T$, 先验状态估计:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k1}^- = \mathbf{A}_{k1} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)1} \quad (6)$$

其中,由陀螺仪测量的角速度向量 $\boldsymbol{\Omega}_{nb}^n$ 计算得到状态转移矩阵 \mathbf{A}_{k1} :

$$\mathbf{A}_{k1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}_{nb}^n T & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

先验误差协方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_{k1}^- = \mathbf{G}_k \mathbf{P}_{(k-1)1} \mathbf{G}_k^T + \mathbf{Q}_{k1} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{P}_{(k-1)1}$ 矩阵为前一次滤波迭代的误差协方差矩阵, \mathbf{G}_k 为状态转移方程的雅可比矩阵, \mathbf{Q}_{k1} 为过程噪声协方差矩阵,用于表征系统状态演化模型本身的不确定性。在本系统中, \mathbf{Q}_{k1} 主要反映了角速度随机游走与陀螺零偏随机游走等误差源所造成的影响。

加速度计的实际测量值和期望测量值之间的差称为残差。残差必须要用卡尔曼增益 \mathbf{K}_{k1} 加权,以获得校正因子。计算卡尔曼增益:

$$\mathbf{K}_{k1} = \mathbf{P}_{k1}^- \mathbf{H}_{k1}^T / (\mathbf{H}_{k1} \mathbf{P}_{k1}^- \mathbf{H}_{k1}^T + \mathbf{R}_{k1}) \quad (9)$$

其中, \mathbf{R}_{k1} 为观测噪声协方差矩阵,在本级滤波中主要由加速度计的测量噪声构成。 \mathbf{H}_{k1} 是观测方程的雅可比矩阵,其计算原理如下,加速度计的测量单位为 g,使用方向余弦来计算加速度计在载体坐标系下的投影可得到观测函数:

$$\mathbf{h}_1(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) = \begin{bmatrix} 2(q_1 q_3 - q_2 q_0) \\ 2(q_2 q_3 - q_1 q_0) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)只有在静止或准静止状态下才满足,当系统处于剧烈运动状态时,加速度计输出中除重力加速度外,还包含不可忽略的线性运动加速度,二者难以有效分离,为抑制运动加速度对姿态估计的影响,在滤波更新中需通过 \mathbf{K}_{k1} 加权,同时根据运动强度自适应调节加速度测量方程的测量噪声。通过 \mathbf{h}_1 和陀螺仪偏置求得得到雅可比矩阵:

$$\mathbf{H}_{k1} = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 & 0_{3 \times 3} \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 & 0_{3 \times 3} \\ 2q_0 & -2q_1 & -2q_2 & -2q_3 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

设当前观测变量即加速度计的实际测量值为 \mathbf{z}_{k1} , 则可通过下式对先验状态 $\hat{\mathbf{x}}_{k1}^-$ 估计进行修正,得到后验状态估计:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k1} = \hat{\mathbf{x}}_{k1}^- + \mathbf{K}_{k1} (\mathbf{z}_{k1} - \mathbf{h}_1(\hat{\mathbf{x}}_{k1}^-, 0)) \quad (12)$$

更新后验误差协方差矩阵 \mathbf{P}_{k1} , 用于后续滤波器的迭代:

$$\mathbf{P}_{k1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k1} \mathbf{H}_{k1}) \mathbf{P}_{k1}^- \quad (13)$$

第二步为基于磁力计的第二级 EKF, 尽管第一级 EKF 通过融合加速度计和陀螺仪能够获得稳定且准确的俯仰角和横滚角,但对航向角的估计仍需进一步校正,为此,设计了一个与第一级 EKF 并行的第二级 EKF,专门用于航向角的解算。该滤波器选取航向角和 Z 轴陀螺仪的偏置组成状态变量 $\mathbf{x}_{k2} = [\psi \ \epsilon_z]^T$, 其先验状态估计:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k2}^- = \mathbf{A}_{k2} \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)2} \quad (14)$$

其中状态转移矩阵为 \mathbf{A}_{k2} :

$$\mathbf{A}_{k2} = \begin{bmatrix} \psi_{k-1} + (\boldsymbol{\Omega}_{(k-1)z} - \epsilon_{(k-1)z}) T \\ \epsilon_{(k-1)z} \end{bmatrix} \quad (15)$$

先验误差协方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_{k2}^- = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{(k-1)2} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_{k2} \quad (16)$$

过程噪声协方差为 \mathbf{Q}_{k2} , \mathbf{F}_k 为 \mathbf{A}_{k2} 的雅可比矩阵。

计算卡尔曼增益:

$$\mathbf{K}_{k2} = \mathbf{P}_{k2}^- \mathbf{H}_2^T / (\mathbf{H}_2 \mathbf{P}_{k2}^- \mathbf{H}_2^T + \mathbf{R}_{k2}) \quad (17)$$

其中, \mathbf{R}_{k2} 观测噪声协方差矩阵,直接取决于磁力计的噪声,以及部分上级系统的其他噪声。由于直接观测的是航向角,观测值由航向角和观测噪声组成,观测值只与航向角有关,因此观测模型是线性的,观测矩阵为:

$$\mathbf{H}_2 = [1 \ 0] \quad (18)$$

其中, \mathbf{z}_{k2} 为基于第一级 EKF 输出的横滚角、俯仰角以及磁力计原始数据融合计算得到的航向角观测值,后验

状态估计更新为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k2} = \hat{\mathbf{x}}_{k2}^- + \mathbf{K}_{k2}(\mathbf{z}_{k2} - \mathbf{H}_2\hat{\mathbf{x}}_{k2}^-) \quad (19)$$

更新后验误差协方差矩阵 \mathbf{P}_{k2} , 用于第二级滤波器的后续迭代:

$$\mathbf{P}_{k2} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k2}\mathbf{H}_2)\mathbf{P}_{k2}^- \quad (20)$$

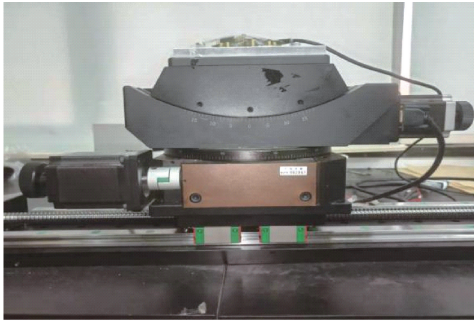
在第二级 EKF 完成状态更新后,为防止在强磁场扰动等极端环境下,磁力计观测值失准而导致陀螺仪偏置估计持续累积并最终引发滤波器发散,系统对偏置估计值施加约束,确保其始终处于合理的动态范围内:

$$\hat{\epsilon}_{kz} = \begin{cases} \epsilon_{\max}, & \hat{\epsilon}_{kz} > \epsilon_{\max} \\ -\epsilon_{\max}, & \hat{\epsilon}_{kz} < -\epsilon_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

2 实验平台及测试方法

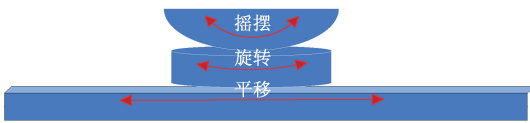
2.1 实验室测试平台

实验室测试台由 15° 量程摇摆台、360° 量程旋转台和 500 mm 量程的往复平移台垂直组成,控制台为一个四插口的电机,测试台和控制台通过数据传输线相连。控制台由 USB 连接至电脑,通过编写的 Python 程序可以同时控制 3 种运动平台的运动方式和周期。使用光学装置测试 3 种机械平台的误差精度,摇摆台为 0.04°, 旋转台为 0.0067°, 平移台为 0.5 mm。实验测试组合平台实物如图 2(a) 所示,运动方式如图 2(b) 所示。



(a) 实验测试组合平台实物图

(a) Physical photograph of the experimental test integrated platform



(b) 实验测试组合平台运动方式示意图

(b) Schematic diagram of the movement mode

图 2 实验测试平台运动方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental testbed movement method

2.2 实验室测试流程和方法

实验室测试流程如下:将 MTI-3 固定于组合实验平台上,上电启动后,首先将平台初始化至机械零点。随后,控制平台执行两种设定的复合运动模式。

摇摆台模拟海洋平台受风浪流综合作用的倾斜运动。为模拟海洋中涌浪与风浪的复合作用,其角运动由两个不

同周期的余弦函数叠加构成,周期分别设定为 $T_1 = 10$ s, $T_2 = 5$ s, 对应振幅分别为 5°、3°。位置函数定义为:

$$\phi_1(t) = 5\cos\left(\frac{2\pi t}{10}\right) + 3\cos\left(\frac{2\pi t}{5}\right) \quad t \in [0, 10) \quad (22)$$

旋转台模拟海洋平台的水平旋转运动。考虑到实际海洋平台受稳定海流和风的作用,通常不会发生短时大角度旋转,设定其旋转振幅为 45°,完整周期是 20 s,输入初始角度 ϕ_0 , 其位置函数定义为:

$$\phi_2(t) = -(\phi_0 + 45 \times (1 - \cos(\pi t/10))) \quad t \in [0, 10) \quad (23)$$

往复平移台模拟海洋平台随海浪的平移运动。周期设定为 $T = 20$ s,行程为 200 mm 的匀速往复运动。其位置函数定义为:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{cases} 20t, & t \in [0, 10) \\ 400 - 20t, & t \in [10, 20) \end{cases} \quad (24)$$

实验室测试方法如下:共进行 6 种模式的实验,包括 1 种静态实验、1 种平稳态到动态的过渡实验以及 4 种动态实验。MTI-3 的九轴传感器数据采集频率设定为 4 Hz,其内部解算输出的姿态角精度指标:静态条件下俯仰角与横滚角精度为 0.5°,动态条件下精度为 0.8°;航向角精度为 2°。为评估本文提出的二级 EKF 算法的性能,将其与 Mahony 算法、MTI-3 自主输出结果以及理论标准数据进行比较,并用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、最大绝对误差(maximum absolute error, MaxAE)进行评价。

各实验模式具体设置如下:

实验模式一为静态精度测试,MTI-3 平稳放置 500 s,评估 3 种方法测姿的零点稳定性与静态测量噪声。

实验模式二为静止到运动的动态响应测试,为同步评估横滚与俯仰角测量精度,将 MTI-3 的 Y 轴与摇摆台运动方向成 45° 夹角安装。在此配置下,摇摆台按式(22)进行周期性运动时,其运动将被分解至传感器 X 与 Y 轴,横滚角和俯仰角理论输入值为式(22)所描述角度的 $\sqrt{2}/2$ 倍,同时旋转台运动模式参考式(23),总时长 250 s。

后 4 种为非稳态的动态实验。实验模式三为专注俯仰角的动态测试,摇摆台按式(22)运动,总时长 250 s;实验模式四为俯仰角和航向角的复合运动测试,摇摆台与旋转台分别按式(22)与(23)同时运动,总时长 250 s;实验模式五的运动模式和运动模式 2 的运动态实验完全相同,但 MTI-3 不经历静止过程,直接进入该运动状态,总时长 250 s;实验模式六在模式五的基础上增加一台平移台进行周期为 20 s、行程为 200 mm 的往复运动,总时长 250 s。6 种实验的姿态角运动公式如表 1 所示。

2.3 海上试验平台

海上试验平台是一套 3 m 综合观测浮标,具有良好的随波性,浮体材料为泡沫外层包裹高分子聚脲,电子舱为

表 1 6 种实验模式运动公式

Table 1 Motion formulas for six experimental modes

实验模式	姿态角	公式
一	ϕ, θ, γ	静止
二	γ	$\gamma(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
	θ	$\theta(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
	ϕ	$\phi(t) = -(\psi_0 + 45 \times (1 - \cos(\pi t/10)))$
三	θ	$\theta(t) = 5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})$
四	θ	$\theta(t) = 5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})$
	ϕ	$\phi(t) = -(\psi_0 + 45 \times (1 - \cos(\pi t/10)))$
	γ	$\gamma(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
五	θ	$\theta(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
	ϕ	$\phi(t) = -(\psi_0 + 45 \times (1 - \cos(\pi t/10)))$
	γ	$\gamma(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
六	θ	$\theta(t) = (5\cos(\frac{2\pi t}{10}) + 3\cos(\frac{2\pi t}{5})) \times \frac{\sqrt{2}}{2}$
	ϕ	$\phi(t) = -(\psi_0 + 45 \times (1 - \cos(\pi t/10)))$

不锈钢材质,塔架为铝合金材质。试验海域选择位于山东省威海市的国家浅海试验场海域,浮标布放点在低潮时水深约 24 m。MTI-3 安装于浮标电器仓内,位于浮标中心点,和浮标钢性连接,保证了传感器可以准确测量浮标的运动状态。浮标实物如图 3 所示,布放位置于经度 122. 07°,纬度 37. 59°处,如图 4 所示。



图 3 海上试验平台

Fig. 3 Offshore test platform

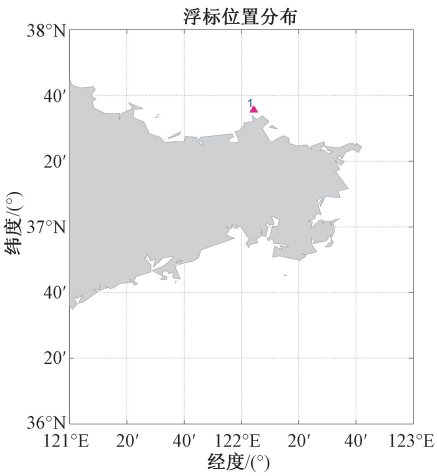


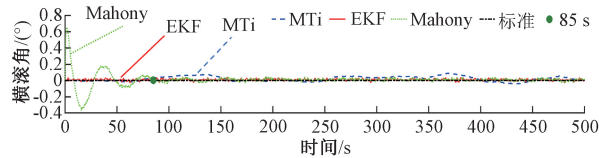
图 4 海上试验平台布放的经纬度

Fig. 4 The latitude and longitude of the offshore test platform deployment

3 实验结果与分析

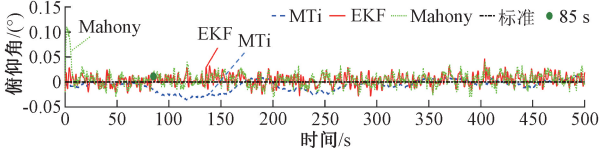
3.1 实验室测试结果分析

试验模式一结果如图 5(a)~(c)和表 2 所示,静止状态下 3 种方法在稳定性与静态噪声方面表现出明显差异。二级 EKF 能够快速收敛并保持在零点附近,输出稳定,噪声水平最低;MTI-3 整体稳定性较好,但存在轻微基准偏移和一定幅度的噪声抖动;Mahony 方法则在零点保持和噪声抑制方面均表现不足,出现明显漂移与较大波动,如图 5 所示,该解算在 85 s 后才达到稳定值,稳定后的精度



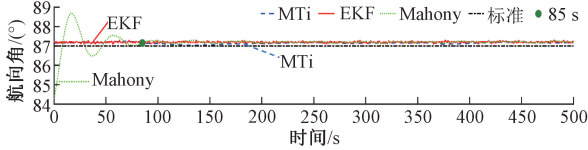
(a) 3 种方法的横滚角效果对比

(a) Comparison of roll angle effect of three methods



(b) 3 种方法的俯仰角效果对比

(b) Comparison of pitch angle effect of three methods



(c) 3 种方法的航向角效果对比

(c) Comparison of heading angle effect of three methods

图 5 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式一的对比

Fig. 5 Comparison of experimental mode one of the second-order EKF, MTI-3, and Mahony

有明显提升,重新计算 85 s 后的 RMSE、MAE、MaxAE 的 γ 为 0.0154° 、 0.0125° 、 0.0511° ; θ 为 0.0120° 、 0.0097° 、 0.0414° , ψ 为 0.0323° 、 0.0255° 、 0.0974° 。

表 2 实验模式一的 3 种方法效果对比
Table 2 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode one (°)

姿态角	方法	RMSE	MAE	MaxAE
γ	二级 EKF	0.014 4	0.011 7	0.040 6
	MTI-3	0.035 4	0.027 6	0.089 3
	Mahony	0.066 1	0.026 4	0.653 5
θ	二级 EKF	0.011 8	0.009 5	0.047 1
	MTI-3	0.018 1	0.015 1	0.045 5
	Mahony	0.013 9	0.010 3	0.099 6
ψ	二级 EKF	0.040 4	0.032 4	0.150 6
	MTI-3	0.063 3	0.052 0	0.171 2
	Mahony	0.271 8	0.086 7	2.939 5

实验模式二的结果如图 6 和表 3 所示,在静止态过渡至运动态的过程中,二级 EKF 在俯仰、横滚和航向角均保持低误差与高信噪比,实现了平稳过渡与准确跟踪。相比之下,MTI-3 虽能维持基本趋势,但航向角收敛较慢,在第 7 个运动周期才收敛,收敛后与二级 EKF 保持同等级精度;Mahony 方法则受噪声与积分残差影响,解算曲线震荡明显,稳定性最差。

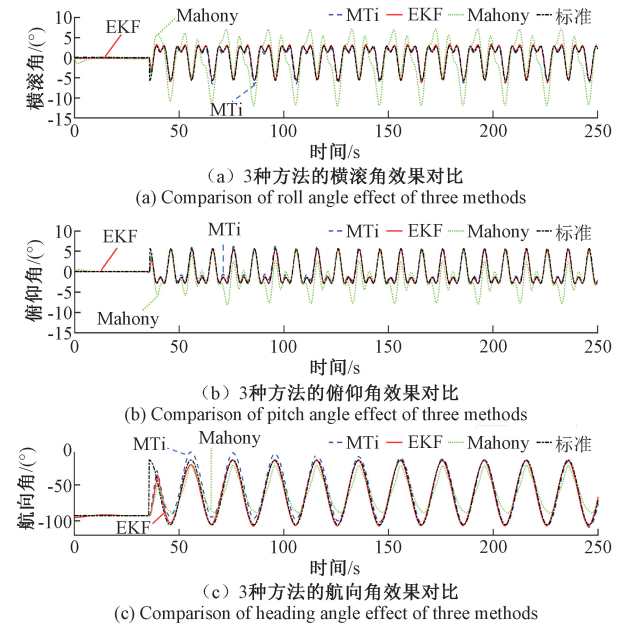


图 6 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式二的对比
Fig. 6 Comparison of the second-order EKF, MTI-3 and Mahony experimental mode two

下面 4 种实验模式为动态实验,主要模拟浮标在海上的实际运动状态。海上平台尤其是海面漂浮平台,从放入

表 3 实验模式二的 3 种方法效果对比
Table 3 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode two

姿态角	方法	SNR/dB	RMSE/(°)	MAE/(°)	MaxAE/(°)
γ	二级 EKF	23.091 0	0.256 9	0.216 5	0.667 1
	MTI-3	17.618 6	0.418 5	0.331 5	1.180 0
	Mahony	3.173 5	3.643 0	3.066 0	7.463 2
θ	二级 EKF	23.049 9	0.202 6	0.159 7	0.697 0
	MTI-3	18.805 9	0.377 9	0.303 2	1.100 1
	Mahony	4.478 4	2.395 9	1.845 5	5.295 9
ψ	二级 EKF	20.419 1	3.060 7	2.613 1	7.619 4
	MTI-3	11.602 9	8.692 5	7.143 2	19.163 0
	Mahony	4.233 5	13.036 7	11.589 3	20.895 7

海中的那一刻起就一直保持非平稳运动(非静止和匀速运动),几乎不存在平稳运动时间。另外,海上平台观测系统电量供给有限,观测设备常处于关机或低功耗运行,仅在观测时间段内进行观测。例如,海流观测为 3~5 min 测量数据的统计值,波浪观测为 17.05 min 测量数据的统计值,风速风向观测为 10 min 测量数据的统计值。因此,平台运动姿态观测初始时刻不确定,也就是说姿态估计无平稳运动收敛时间。

为验证二级 EKF 在典型海况下的有效性,本文在实验一、二建立的对照基础上,进一步进行了单 θ 周期性运动、 θ - ψ 复合周期性运动、 γ - θ - ψ 复合周期性运动以及叠加平动干扰运动,逐步趋近海洋平台真实“全程非稳态运动”场景。如图 7~10 以及表 4~7 所示,二级 EKF 在所有非稳态模式下,俯仰角与横滚角的 SNR 始终保持在 20 dB 以上, RMSE 与 MAE 稳定在 0.4° 以内, MaxAE 基本小于 1° 。即使在实验六叠加平动干扰的条件下,最大 MaxAE 也仅略微超过 1° ; MTI-3 在一半以上场景 SNR 低于 20 dB, RMSE 多在 0.4° 以上,最大 MAE 达到 1.77° ; Mahony 在绝大多数实验中, SNR 低于 10 dB, RMSE/MAE 普遍在 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$, 部分 MaxAE 超过 8° 。对比实验二的过渡场景可以发现,非稳态环境使横滚角和俯仰角的 MaxAE 相较平稳场景有所增大,这说明非稳态扰动确实提升了测姿难度。然而,二级 EKF 的 RMSE 与 MAE 表现优异,说明其在一级滤波器中通过显式估计陀螺零偏,有效抑制了长时间漂移,使俯仰与横滚在非稳态下依然保持稳定输出。相比之下, MTI-3 与 Mahony 均未对陀螺零偏进行专门建模,且滤波增益缺乏自适应调整,因而在精度与稳定性方面均不及二级 EKF。

航向角的差异更加明显,实验模式二中首次观察到 MTI-3 航向角存在缓慢漂移,随着实验复杂度提升,这一问题被逐步放大并量化。实验模式四 MTI-3 的 RMSE 和 MAE 分别达到 2.68° 和 2.48° , 而二级 EKF 这两项保持在

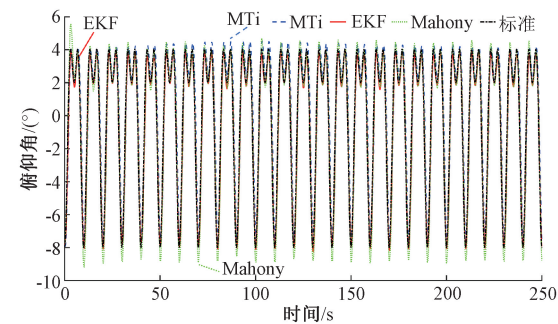


图 7 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式三的对比
Fig. 7 Comparison of the second-order EKF, MTI-3 and Mahony experimental mode three

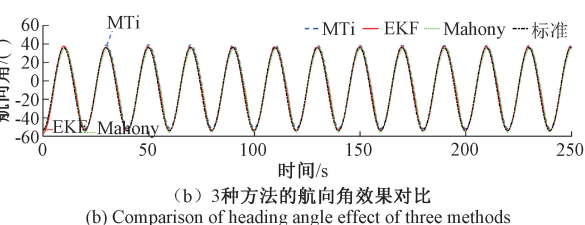
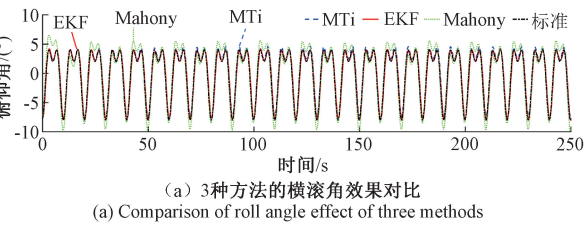


图 8 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式四的对比
Fig. 8 Comparison of the second-order EKF, MTI-3 and Mahony experimental mode four

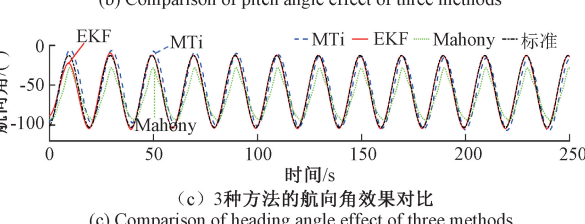
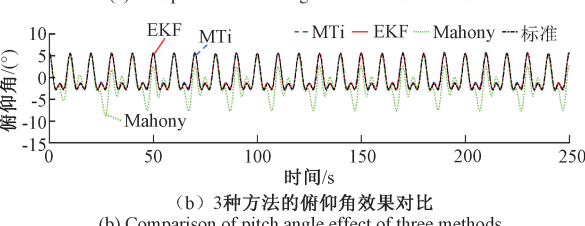
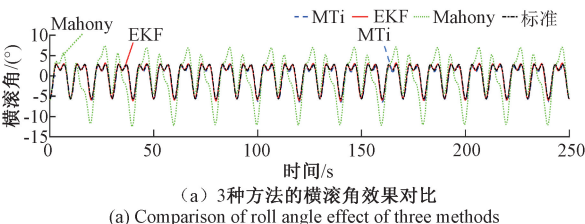


图 9 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式五的对比
Fig. 9 Comparison of the second-order EKF, MTI-3 and Mahony experimental mode five

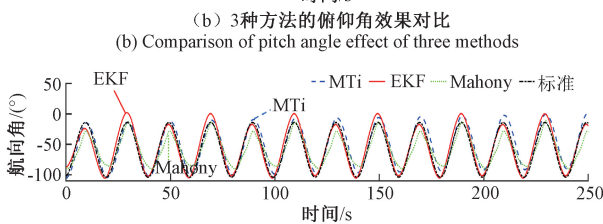
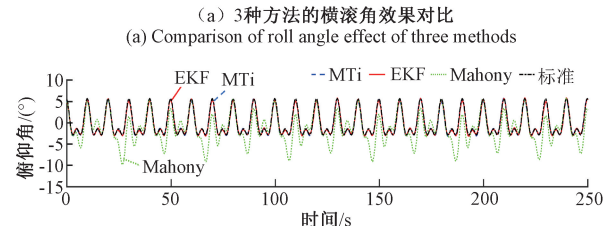
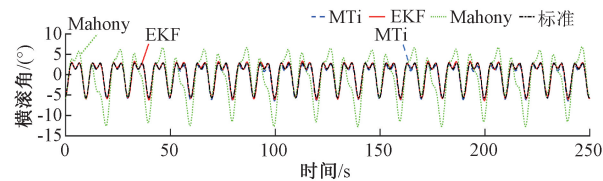


图 10 二级 EKF、MTI-3 和 Mahony 实验模式六的对比
Fig. 10 Comparison of the second-order EKF, MTI-3 and Mahony experimental mode six

表 4 运动模式三的 3 种方法效果对比

Table 4 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode three					
姿态角	方法	SNR/dB	RMSE/ (°)	MAE/ (°)	MaxAE/ (°)
θ	二级 EKF	21.455 8	0.396 8	0.323 6	0.916 8
	MTI-3	20.632 6	0.482 7	0.391 4	1.248 2
	Mahony	20.221 0	0.471 6	0.369 9	1.182 5

表 5 运动模式四的 3 种方法效果对比

Table 5 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode four					
姿态角	方法	SNR/dB	RMSE/ (°)	MAE/ (°)	MaxAE/ (°)
θ	二级 EKF	22.077 4	0.320 9	0.270 5	0.871 9
	MTI-3	17.612 5	0.634 8	0.523 4	1.468 7
	Mahony	9.801 7	1.558 3	1.347 7	3.438 4
ϕ	二级 EKF	30.696 5	1.194 8	1.028 7	3.201 9
	MTI-3	29.794 2	2.679 4	2.479 5	5.217 5
	Mahony	20.753 0	3.245 1	2.531 1	8.407 4

1°左右。实验模式五 MTI-3 的 RMSE 飙升至 11.4°, MaxAE 超过 22°, Mahony 更高达 16.9°/31.9°, 而二级 EKF 仍仅为 1.87°/4.05°。这表明在缺乏静止初始化时, MTI-3 与 Mahony 的航向解算偏差较大, 而二级 EKF 依然

表 6 运动模式五的 3 种方法效果对比
Table 6 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode five

姿态角	方法	SNR/dB	RMSE/(°)	MAE/(°)	MaxAE/(°)
γ	二级 EKF	21.322 0	0.256 4	0.202 8	0.800 6
	MTI-3	17.761 0	0.461 8	0.378 9	1.098 6
	Mahony	3.021 8	3.746 2	3.055 2	7.964 6
θ	二级 EKF	23.016 3	0.201 5	0.300 7	0.659 8
	MTI-3	18.602 9	0.353 5	1.771 7	0.809 0
	Mahony	4.438 6	2.328 9	0.933 0	5.959 8
ψ	二级 EKF	24.734 4	1.867 9	1.605 8	4.051 5
	MTI-3	8.888 3	11.440 1	2.344 7	22.286 1
	Mahony	3.001 6	16.882 3	5.027 5	31.854 0

表 7 运动模式六的 3 种方法效果对比
Table 7 Comparison of the effects of the three methods in experimental mode six

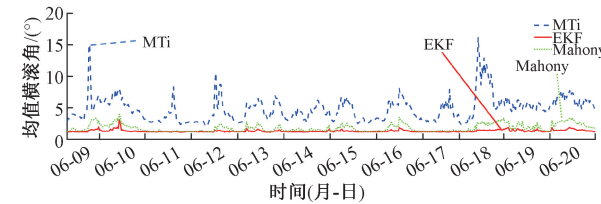
姿态角	方法	SNR/dB	RMSE/(°)	MAE/(°)	MaxAE/(°)
γ	二级 EKF	22.229 0	0.236 0	0.184 9	0.726 3
	MTI-3	22.772 3	0.418 1	0.364 2	0.916 5
	Mahony	3.500 0	3.545 5	2.761 3	8.565 0
θ	二级 EKF	22.159 4	0.241 8	0.188 9	1.002 1
	MTI-3	22.006 3	0.246 4	0.189 0	0.758 9
	Mahony	4.164 2	2.547 7	1.891 3	6.999 0
ψ	二级 EKF	13.923 7	7.775 9	6.350 0	16.254 8
	MTI-3	9.880 9	12.444 7	10.180 1	27.366 5
	Mahony	3.787 2	14.729 5	12.666 9	29.124 2

可靠。实验模式六的平动干扰成为航向角主要影响因素，二级 EKF 的 RMSE 上升至 7.78° ，SNR 降至 13.9 dB，但仍明显优于 MTI-3 的 $12.44^{\circ}/27.37^{\circ}$ 与 Mahony 的 $14.73^{\circ}/29.12^{\circ}$ 。航向角的可观测性弱，主要依赖磁力计约束，极易受线加速度、磁场扰动和陀螺零偏共同影响。MTI-3 内部多采用固定增益，对无静止初值与复杂扰动无法自适应；Mahony 的比例积分结构存在积分残差累积，导致动态下漂移严重。相比之下，二级 EKF 通过“分级修正”策略，即一级 EKF 稳定倾斜、二级 EKF 专注航向，显著降低了磁/加速度扰动的投影效应。实验六中航向精度下降，印证了平动干扰主要降低了水平磁观测的信噪比并加大了对 z 轴零偏的估计压力，引发航向误差累积，但即便如此，二级 EKF 的性能仍优于对照方法，能够保证姿态数据应用到风浪流等数值修正的有效性。

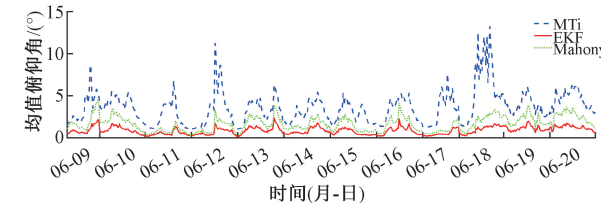
3.2 海上试验结果分析

为检验设计的二级 EKF 系统在非稳态海上平台的测量性能，选择直径 3 m 小型综合海洋观测浮标进行海上实

验，时间为 2025 年 6 月 9 日~2025 年 6 月 20 日，共计 12 天，实验地点是山东威海试验场。数据采集方式为 30 min 采集 1 组，一天采集 48 组。浮标的横滚角和俯仰角通过取每组数据的绝对值的平均数来展示在海上的测姿状况。航向角收集全部数据通过玫瑰图的数据占比展示在海上的测姿状况，为更好地展示效果，航向角的数据范围从 $(-180^{\circ}, 180^{\circ}]$ 更改为 $[0^{\circ}, 360^{\circ})$ 。结果如图 11(a) 和 (b)、图 12 所示。



(a) 3 种方法的横滚角效果对比
(a) Comparison of roll angle effect of three methods



(b) 3 种方法的俯仰角效果对比
(b) Comparison of pitch angle effect of three methods

图 11 海洋平台的俯仰角和横滚角的姿态数据
Fig. 11 Attitude data of the pitch and roll angles of the offshore platform

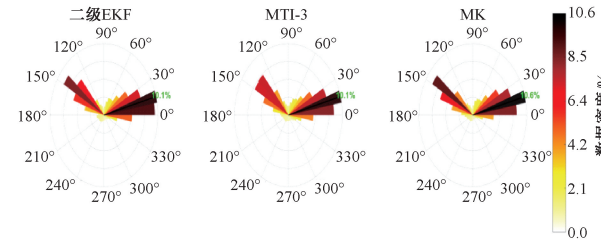


图 12 海洋平台的航向角的姿态数据
Fig. 12 Attitude data of the heading angle of the offshore platform

在横滚角与俯仰角的结果中可以看出，本文设计的二级 EKF 系统在海上环境下表现出优异的姿态测量性能，滤波输出较其他两种方法更加平滑稳定，能够有效抑制非稳态运动引起的干扰和噪声。相较之下，MTI-3 的结果存在大量峰值，反映其在非稳态运动下产生明显漂移且难以收敛，同时 Mahony 验证了实验室曲线震荡明显，可靠不足的结论。取图 11(a) 和 (b) 的 MTI-3 姿态角数值最高点如图 13(a)~(c) 中 6 月 18 日 8:30~9:00 的数据，MTI-3 的 3 个姿态角均出现显著漂移。在航向角方面，二级 EKF 输出的角度分布密度最为集中，方向性明确，更符合海洋平台受往复潮流主导时的实际运动特性；而 MTI-3 与

Mahony 的航向结果则明显分散,可靠性不足。综上所述,通过与不同方法的输出结果对比表明,二级 EKF 系统在非稳态海洋环境下对海洋平台的姿态测量中有较高的有效性和可靠性。

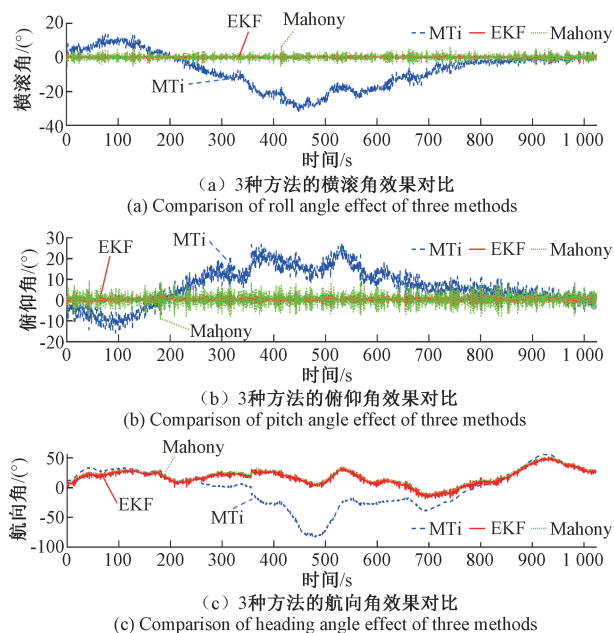


图 13 2025 年 6 月 18 日 8:30~9:00 海洋平台的姿态数据

Fig. 13 Attitude data of the offshore platform from 8:30 to 9:00 on June 18, 2025

4 结 论

本文针对海洋平台长期处于非稳态环境的特点,设计了一种基于九轴 MIMU 的二级 EKF 姿态解算系统。该框架通过两级滤波实现对九轴数据的分步融合,既充分发挥各传感器优势,又降低了通道间的误差传递。其设计具有模块化程度高、抗干扰能力强和计算效率优的特点:一方面,通过航向与水平姿态的解耦估计,有效隔离了磁干扰对俯仰和横滚的影响;另一方面,结合偏置约束机制,能够在磁异常条件下抑制误差积累;同时,两级滤波分担了计算负荷,更易移植于嵌入式平台。

在实验室构建的多种非稳态运动模式下,二级 EKF 在 SNR、RMSE、MAE 和 MaxAE 指标上均优于 MTi-3 与 Mahony 算法,特别是在航向角维度展现了显著的精度与稳定性优势。进一步的海上浮标试验验证了这一结论:二级 EKF 的横滚角与俯仰角输出平稳可靠,航向角分布集中且符合实际海洋动力学特征。

综上,本文提出的二级 EKF 系统不仅在非稳态环境下实现了高精度、可靠的全姿态测量,还兼具抗干扰、计算高效和易于部署的优势,可为多类型海洋平台的姿态解算及风浪流等动力要素的反演研究提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 王军成,厉运周,杨英东,等. 海洋资料浮标姿态信息测量技术研究现状及发展趋势[J]. 海洋与湖沼, 2023, 54(5): 1239-1247.
- [2] 薛帅宁,孔卫奇. 基于海洋气象漂流浮标的动态测风技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 12-18.
- [3] 卢艳军,陈雨获,张晓东,等. 基于扩展 Kalman 滤波的姿态信息融合方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 281-288.
- [4] 李永,赵正平. MEMS 陀螺仪的研究现状与进展[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(9): 757-768.
- [5] KEPPER J H, CLAUS B C, KINSEY J C. A navigation solution using a MEMS IMU, model-based dead-reckoning, and one-way-travel-time acoustic range measurements for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(3): 664-682.
- [6] 余博嵩,何姣,曹晓钟. 基于 MEMS 的海洋漂流浮标运动姿态测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 99-104.
- [7] JOUYBARI A, AMIRI H, ARDALAN A A, et al. Methods comparison for attitude determination of a lightweight buoy by raw data of IMU [J]. Measurement, 2019, 135: 348-354.
- [8] 侯庆余. 基于 MEMS 的资料浮标姿态传感器的设计与

- 实现[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- HOU Q Y. The design and implementation of data buoy posture sensor based on MEMS[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [9] 乔美英,杜衡,韩昊天,等. 基于扩展卡尔曼滤波的磁干扰解耦姿态估计算法[J]. 中国惯性技术学报,2025, 33(7):680-687,697.
- QIAO M Y, DU H, HAN H T, et al. Decoupling magnetic interference in attitude estimation algorithm with extended Kalman filter[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2025, 33(7): 680-687,697.
- [10] 吕印新,肖前贵,胡寿松. 基于四元数互补滤波的无人机姿态解算[J]. 燕山大学学报,2014,38(2): 175-180.
- LYU Y X, XIAO Q G, HU SH S. Attitude estimation based on quaternion complementary filter for UAV[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(2): 175-180.
- [11] 王晓初,李宾,刘玉县,等. 一种基于改进卡尔曼滤波的姿态解算算法[J]. 科学技术与工程,2019,19(24): 416-422.
- WANG X CH, LI B, LIU Y X, et al. An attitude solving algorithm based on improved Kalman filter[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 416-422.
- [12] 王文龙,田德艳,崔宝龙,等. 九轴 MEMS 微型 AHRS 设计及其在矢量水听器中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2024,32(5): 468-474.
- WANG W L, TIAN D Y, CUI B L, et al. Design of nine-axis MEMS miniature AHRS and its application in vector hydrophones[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2024, 32(5): 468-474.
- [13] 张强,吴志强,云启凡. 基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的姿态测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023,37(5): 230-239.
- ZHANG Q, WU ZH Q, YUN Q F. Research on attitude measurement method based on MIMU / magnetic sensor / dual antenna RTK[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 230-239.
- [14] 班朝,任国营,王斌锐,等. 基于 IMU 的机器人姿态自适应 EKF 测量算法研究[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(2): 33-39.
- BAN CH, REN G Y, WANG B R, et al. Research on self-adaptive EKF algorithm for robot attitude measurement based on IMU[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 33-39.
- [15] SIMONE S, MARCO G, ALESSANDRO F, et al. A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(3): 590-598.

作者简介

聂郡谿,硕士研究生,主要研究方向为海洋观测集成技术。

E-mail:niejunxi2024@163.com

康建军(通信作者),正高工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:kjjcowboy@126.com

荆珈璐,助理工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:15204666029@163.com

李虎林,副高工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:dzlhl8110@163.com

刘超然,工程师,主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail:crliu2008@163.com