

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311703

高精度海洋观测浮标运动测量系统设计与试验*

厉运周^{1,2,3}, 孔庆霖², 杨英东², 王军成^{1,2,3}, 刘世萱²

(1. 国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所
青岛 266061; 3. 崂山实验室 青岛 266237)

摘要:海洋浮标受海洋动力环境影响产生运动,会对平台及仪器的可靠性产生影响,甚至会导致测量误差,影响海洋观测浮标工作安全性和数据质量,因而浮标运动姿态的精确测量研究具有重要价值和意义。本文通过搭建微型惯性测量单元(MIMU)与全球导航卫星系统(GNSS)结合的硬件系统,获取浮标运动姿态相关数据,并采用载波相位平滑滤波模型进行数据预处理,融合最小二乘降相关算法(LAMBDA)解算浮标姿态数据,获取高精度动态浮标姿态。经过摇摆台模拟比对实验,系统姿态角均方根误差小于 0.5° ,水平速度均方根误差小于 0.05 m/s 。通过实际海试实验,尤其是台风过境期间系统的测试结果,证明该系统工作稳定可靠,无数据发散现象,整体有效数据达到了95%以上。

关键词:微型惯性测量单元;全球导航卫星系统;最小二乘降相关算法;比对实验与海试;浮标运动测量

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and experiment of a high precision ocean observation buoy motion measurement system

Li Yunzhou^{1,2,3}, Kong Qinglin², Yang Yingdong², Wang Juncheng^{1,2,3}, Liu Shixuan²

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Qingdao 266061, China; 3. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China)

Abstract: Ocean buoys generate six degrees of freedom motion due to the influence of marine dynamic environment, which can affect the reliable operation of observation platform and instruments, and even lead to measurement results errors, affecting the safety and data quality of ocean buoys. Therefore, the accurate measurement of buoy motion is of great practical significance. This article establishes a hardware system by integrating a micro inertial measurement unit with a global navigation satellite system to obtain buoy motion-related data. A carrier phase smoothing filter model is used for data preprocessing, and a least squares redundancy algorithm is fused to calculate the buoy attitude data, obtaining high-precision dynamic buoy attitude. After comparing the results of a swaying platform simulation of motion, the root mean square error of attitude angle is less than 0.5° , and the root mean square error of horizontal velocity is less than 0.05 m/s . Additionally, through practical sea trials experiments, especially during the passage of a typhoon, the test results show that the system works stably and reliably without divergence phenomenon, with over 95% overall valid data.

Keywords: micro inertial measurement unit; global navigation satellite system; least square descent correlation algorithm; comparative experiments and sea trials; buoy motion measurement

收稿日期: 2023-07-21 Received Date: 2023-07-21

* 基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023ZLYS01)、国家重点研发计划项目(2022YFC3104200)、中国工程院战略研究与咨询项目(2022-DFZD-35, 2023-XBZD-09, 2021-XBZD-13)、山东省泰山学者项目、山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MD058)、青岛市博士后基金项目(QDBSH20220201041)资助

0 引言

随着我国海洋战略的逐步推进,海洋观测作为海洋探索及开发活动的基础,重要性日益提升^[1]。海洋资料浮标是当前我国主要的海洋观测平台之一^[2],由于浮标平台受风浪流作用力影响产生六自由度运动,会对浮标及仪器设备的可靠性及测量结果准确性产生影响^[3],所以需对浮标运动特性进行测量,以便对浮标工作安全性进行评估,以及利用浮标运动状态数据对环境参数测量结果进行补偿校正^[4-5]。因而,对浮标平台运动姿态的精准测量研究具有十分重要的价值和意义。

目前浮标运动姿态测量主要分为两个大的类别,分别是基于微型惯性测量单元^[6] (micro inertial measurement unit, MIMU)与全球导航卫星系统^[7-8] (global navigation satellite system, GNSS)。各国研究者在这两个方向分别做了很多工作。

在采用 MIMU 进行浮标运动姿态测量方面:余博嵩等^[9]设计漂流浮标运动姿态测量系统,融合四元法和比例积分调节算法解算姿态数据,并使用椭圆拟合以及阈值滤波的误差补偿方法校正测量误差;Joybari 等^[10]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;苟艳妮等^[11]探索了模拟退火算法对多基地声呐浮标水下目标定位的作用,证实了退火算法对多基地浮标目标定位具有可行性;刘宁等^[12]对 MIMU 加速度与姿态角信号进行预处理,获得主值方向加速度,并基于离散傅里叶逆变换将空投波浪浮标位置的测量误差控制在 10% 以内;侯庆余^[13]利用三轴加速度传感器、三轴磁阻传感器以及三轴陀螺仪获取浮标载体姿态的冗余信息,并通过优化算法融合多源数据,提升海洋资料浮标姿态信息的测量精度;周金金等^[14]通过卡尔曼滤波确定 MIMU 测得的浮标姿态,获得航向角以及俯仰角信息,对成像结果进行补偿获得稳定图像。在基于 GNSS 进行浮标运动姿态测量方面:Xue 等^[15]设计了一种自适应参数卡尔曼滤波器估算不同报告间隔的浮标漂移轨迹,并对 4 个漂移浮标的实测轨迹进行测量,获得不错的效果;Lei 等^[16]提出了一种用于姿态估算的自适应增益互补滤波器,基于模糊神经网络,通过寻找最优解对位置进行预测。

然而,无论是基于 MIMU 还是基于 GNSS 的浮标运动姿态测量系统,都有各自的局限性^[17]。因此,将二者耦合,设计组合系统,克服各自的缺点,形成优势互补,成为大方向。MIMU 和 GNSS 测姿单元两部分互相提供初始化信息和误差消除信息,专门研究针对浮标运动特点的算法,提高浮标运动系统的测量精度、数据更新率。耦合系统具有实现成本低、动态性能好、自主性强、精度高

等优点,已在国民经济和国防建设等方面得到广泛的应用。

本文采用 MIMU 与双天线 GNSS 测姿单元结合的硬件设计,基于 MIMU 的载波相位平滑器滤波模型,在考虑浮标复杂工作环境导致的长期无规则运动以及海面多径干扰频繁情况的基础上,融合最小二乘降相关法 (least-squares ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)^[18-20]设计数据处理单元,进行 MIMU 辅助 GNSS 测姿系统设计,以此达到降噪目的,提升系统在浮标平台上的解算成功率。通过六自由度摇摆台比对实验和海上试验,分别验证了系统的测量精度以及稳定性。

1 浮标运动姿态组合测量系统设计

1.1 理论模型

海上浮标运动复杂,除浮标整体的 3 个平动自由度之外,还有 3 个转动自由度,因此浮标运动可以通过 6 个自由度来进行表示。

在进行 MIMU 姿态融合的过程中,互补滤波器和卡尔曼滤波器在进行融合滤波时需要保证三轴加速度传感器测量值接近重力加速度,方可保证加速度传感器的姿态测量尽可能准确,且加速度传感器测量的干扰噪声最小,从而对姿态融合的过程也是最有效的。为了对复杂波浪场环境下的浮标随浪运动干扰进行准确辨识,本文设计了有 15 个自由度的惯性姿态测量算法和结构。通过将 3 个三轴加速度传感器分别按照倾斜 60° 的空间夹角,安装在一个金字塔形的多面体结构上,结合三轴陀螺仪测量信息一同构成卡尔曼滤波器的运动状态收敛模型。惯性姿态测量多面体模型如图 1 所示。

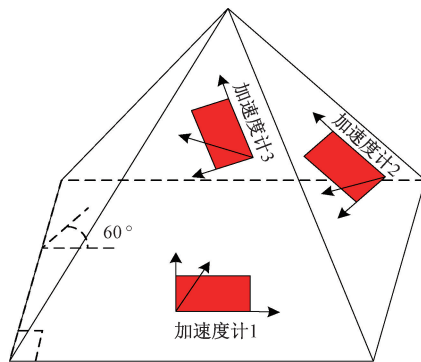


图1 基于金字塔结构的多面体模型

Fig. 1 Polyhedron model based on pyramid structure

这种设计可保证浮标在复杂的随波运动中,至少会有一个面上的三轴加速度传感器运动轴上的加速度能够较为明显的测得,因而避免小幅渐变加速度测量的遗漏,进而防止运动姿态计算误差过大。同时由于 3 个加速度

传感器在空间上处于不同的位置点,当浮标进行旋转运动时,由于各位置点的旋转半径不同,会造成同轴方向的加速度传感器测量值差异;反之,当同轴方向上不同位置点的加速度测量值一致时,说明该方向上的向心加速度干扰为零,利用这一瞬时的过程可以捕捉到加速度传感器所测定水平面的某一轴所关联的角度信息(俯仰角或横滚角),帮助陀螺姿态进行误差补偿,避免长时间积分而造成误差累积。

已知 MIMU 姿态融合的卡尔曼滤波状态微分方程中重力场分量运动状态微分方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{g}_x^b \\ \dot{g}_y^b \\ \dot{g}_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbz}^b & \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b & 0 & -\omega_{nbx}^b \\ -\omega_{nby}^b & \omega_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_x^b \\ g_y^b \\ g_z^b \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁场分量的运动状态微分方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{M}_x^b \\ \dot{M}_y^b \\ \dot{M}_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbz}^b & \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b & 0 & -\omega_{nbx}^b \\ -\omega_{nby}^b & \omega_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x^b \\ M_y^b \\ M_z^b \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{g}^b = [g_x^b \ g_y^b \ g_z^b]^T$ 为浮标坐标系(b 坐标系)下加速度传感器输出值对应重力加速度在 x^b 轴、 y^b 轴和 z^b 轴的投影分量, $\mathbf{M}^b = [M_x^b \ M_y^b \ M_z^b]^T$ 为浮标坐标系(b 坐标系)下磁传感器输出值对应磁场矢量在 x^b 轴、 y^b 轴和 z^b 轴的投影分量。

三轴陀螺仪角速度 $\omega_{nb}^{bk} = [\omega_{nbx}^b \ \omega_{nby}^b \ \omega_{nbz}^b]^T$ 构造的反对称矩阵为:

$$\omega_{nb}^{bk} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbz}^b & \omega_{nby}^b \\ \omega_{nbz}^b & 0 & -\omega_{nbx}^b \\ -\omega_{nby}^b & \omega_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

加速度传感器输出的观测方程表示为:

$$\mathbf{f}^b = \mathbf{a} - \mathbf{g}^b + \mathbf{n}_1 \quad (4)$$

其中, $\mathbf{f}^b$ 为加速度计测量的比力向量 $[f_x^b \ f_y^b \ f_z^b]^T$, $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{g}^b$ 分别为浮标坐标系下的浮标运动加速度向量和重力加速度向量, $\mathbf{n}_1$ 为观测方程的测量噪声。磁传感器输出对应的观测方程可表示为:

$$\mathbf{M}^b = \mathbf{M}_n^b + \mathbf{n}_2 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{M}_n^b$ 和 $\mathbf{n}_2$ 分别为浮标平台坐标系下的磁场强度向量 $[M_x^b \ M_y^b \ M_z^b]^T$ 和测量噪声。根据运动状态微分方程式(1)、(2)和观测方程式(4)、(5),进行滤波器设计构建滤波器的基本模型。

这里采用空间不同位置的 3 个加速度计针对浮标运动产生的测量差异,作为检测浮标运动状态基本条件,并通过以下步骤使运动状态收敛:

1) 设立阈值(通常为所选加速度计测量噪声的 2~4 倍),比较 3 个加速度计的测量值与重力加速度的测量

值,将浮标运动干扰的辨识过程缩小到一定范围;

2) 通过映射同轴方向的不同位置加速度计测量差异,来辨识坐标轴方向上的运动干扰情况,确定作为卡尔曼滤波方程中的 $\mathbf{K}_k$ 矩阵对角线上的系数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$),以此调整卡尔曼滤波方程的信息量,帮助陀螺姿态进行误差补偿,避免长时间积分而造成误差累积。

以上卡尔曼滤波器模型的统一结构设为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k-1} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{Q}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{R}_k \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x}_k$ 为状态量, $\mathbf{z}_k$ 为观测量, $\mathbf{Q}_{k-1}$ 、 $\mathbf{R}_k$ 分别为过程噪声 $\mathbf{w}_{k-1}$ 和测量噪声 $\mathbf{v}_k$ 的协方差矩阵,则式(6)中卡尔曼滤波器模型算法更新过程如图 2 所示。

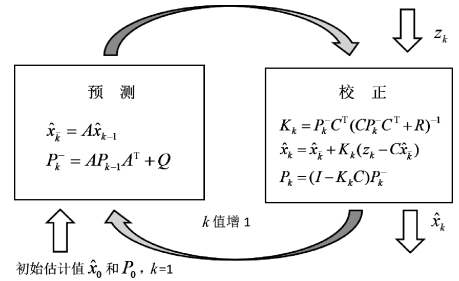


图 2 卡尔曼滤波器算法更新过程

Fig. 2 Update process of Kalman filter algorithm

通过对输入的初始输入值进行估算并通过构造矩阵 $\mathbf{K}_k$, 进行迭代校正,获取最终的输出量,其中:

$$\mathbf{K}_k = \begin{bmatrix} \alpha_1 k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & \alpha_2 k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & \alpha_3 k_{33} \end{bmatrix}。$$

依据上述建模,多面体微惯性姿态测量装置系统包括 3 个三轴加速度计、1 个三轴陀螺仪和 1 个三轴磁强计,以及由算法处理与控制单元组成的处理器控制模块。多面体微惯性姿态测量装置的物理结构如图 3 所示,由多面体结构台体和微惯性测量单元电路以及固定器件组成,其中 1 是多面体结构台体为类金字塔结构的斜面为 60° 倾角的铝制四棱锥六面体。而微惯性测量单元电路则由 4 块电路板组成,分别是:2 顶层电路板,主要包含 3 三轴陀螺仪和 4 三轴磁强计;7 和 11 为斜面电路板,8 和 10 均为三轴加速度计;12 底层电路板上主要包含 13 算法处理器和 14 三轴加速度计;固定器件主要包含 5 和 15 的无磁的螺丝及 6 和 16 的螺柱,每一个微惯性测量单元电路板分别由 4 个无磁螺丝和螺柱固定在铝制六面体台体的面上。

1.2 GNSS 测量与惯性组合校正设计

1) GNSS 姿态测量的基本模型

相较于基于 MIMU 的测量方法,基于 GNSS 的姿态测量具有不需标校和不受漂移影响等优点,在空旷环境

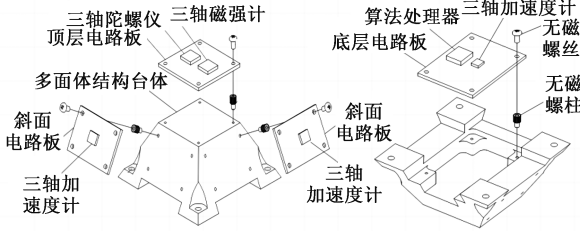


图3 多传感器微惯性测量模块物理结构

Fig. 3 Physical structure diagram of multi-sensor micro-inertial measurement module

的姿态测量方面应用较为广泛。姿态测量的3个变量主要是方位角、俯仰角和横滚角,其中方位角和俯仰角这两个姿态角可以由两个全球导航卫星系统卫星接收天线所组成的一条基线矢量得到,而方位角、俯仰角、横滚角3个姿态角需要由3个全球导航卫星系统卫星接收天线所组成的两条非平行基线矢量得到。两个全球导航卫星系统卫星接收天线的载波相位差是GNSS姿态测量最基本的测量数据,由于基线长度要大于载波的波长,导致在姿态计算中包含未知的整周波长,称为整周模糊度。目前已有多种GNSS姿态解算方法被提出,但是无法同时兼顾解算的复杂度、自由度和成功率,解算中姿态矩阵分解的复杂度非常高。

GNSS全球导航卫星系统载波相位的基本观测方程表示为:

$$\varphi = \frac{1}{\lambda}(\rho + c\delta t_r - c\delta t_s + \delta\rho_i - \delta\rho_j) - N + \varepsilon \quad (7)$$

式中: λ 、 N 和 φ 分别为GNSS载波波长、载波相位测量值的整周波长部分和载波相位测量值中不足整周部分; ρ 为GNSS卫星到接收天线的距离; δt_r 和 δt_s 分别为接收机钟差和GNSS卫星钟差; $\delta\rho_i$ 和 $\delta\rho_j$ 分别为大气电离层延时误差和大气对流层延时误差; ε 为系统误差(包含测量噪声和多径误差等)。

通过距离相近的两个GNSS卫星接收天线同时接收同一颗卫星的信号时,两个信号的卫星钟差相同,同时信号传输过程中的电离层延时误差和对流层延时误差基本相同,通过单差计算可以消除卫星钟差和延时误差的影响。GNSS载波相位的单差观测方程可以表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\lambda}(\Delta\rho + c\Delta\delta t_r) - \Delta N + \Delta\varepsilon \quad (8)$$

图4给出了GNSS载波相位单差模型的空间几何意义,图中 $\vec{b} = |\vec{b}|(\cos\theta\sin\psi, \cos\theta\cos\psi, \sin\theta)$ 是基线向量,

ψ, θ 是用基线向量表示的方位角和俯仰角; $\vec{s}^i = (\cos\beta^i\sin\alpha^i, \cos\beta^i\cos\alpha^i, \sin\beta^i)$ 是接收天线到GNSS卫星方向的单位矢量, α^i, β^i 是其矢量表示的方位角和俯仰角, η^i 是基线矢量与卫星矢量的夹角,载波相位单差观测

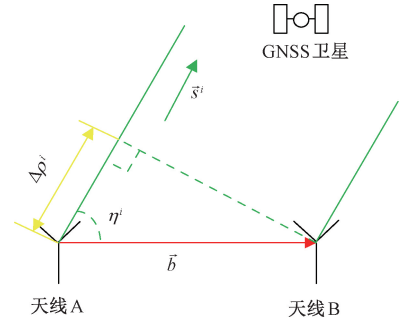


图4 载波相位单差测量图

Fig. 4 Single difference measurement of carrier phase

方程表达式为:

$$\lambda(\Delta\varphi^i + \Delta N^i) - c\Delta\delta t_r + \Delta\varepsilon = \vec{b} \times \vec{s}^i = |\vec{b}| |\vec{s}^i| \cos\eta^i$$

即:

$$\lambda(\Delta\varphi^i + \Delta N^i) - c\Delta\delta t_r + \Delta\varepsilon = |\vec{b}| [\sin\beta^i \sin\theta + \cos\beta^i \sin\theta \cos(\alpha^i - \psi)] \quad (9)$$

式中: $\Delta N^i, \Delta\varphi^i$ 和 $\Delta\varepsilon$ 分别为载波相位单差整周部分,不足整周部分和单差测量系统误差。根据式(9)每组单差观测方程均包含接收机钟差 $\Delta\delta t_r$,因此不同GNSS卫星的差分处理可以消除全球卫星定位系统接收机时钟误差的影响。载波相位双差观测方程表达式为:

$$\lambda(\nabla\Delta\varphi^{ij} + \nabla\Delta N^{ij}) + \nabla\Delta\varepsilon = |\vec{b}| |\vec{s}^j - \vec{s}^i| \cdot [\sin\beta^{ij} \sin\theta + \cos\beta^{ij} \sin\theta \cos(\alpha^{ij} - \psi)] \quad (10)$$

式中: $\vec{b}$ 为基线向量; $\vec{s}^j - \vec{s}^i$ 为接收天线到不同GNSS卫星方向的单位矢量差; $\nabla\Delta N^{ij}, \nabla\Delta\varphi^{ij}$ 和 $\nabla\Delta\varepsilon$ 分别为载波相位双差整周部分,不足整周部分以及双差测量系统误差。

2) 载波相位平滑器滤波模型

基于MIMU的平滑器滤波模型,组合运动测量系统的载波相位平滑器模型数学公式为:

$$\hat{r}_k^{ij} = \frac{N}{M} r_k^{ij} + \frac{M-N}{M} \left\{ \hat{r}_{k-1}^{ij} + \frac{|\vec{b}|}{\lambda} |\vec{s}_k^j - \vec{s}_k^i| \cdot [\cos(\eta_{k-1}^{ij} + \Delta\delta_{ahrs}(t_k - \Delta t_k)) - \cos(\eta_{k-1}^{ij})] \right\} \quad (11)$$

式中: $\hat{r}_k^{ij}$ 为 k 历元时刻双差载波相位的原始输出; M, N 分别为平滑时间和自适应衰减因子; $\hat{r}_k^{ij}$ 和 $\hat{r}_{k-1}^{ij}$ 分别为 k 历元时刻和 $k-1$ 历元时刻双差载波相位的平滑输出; $\vec{s}_k^j, \vec{s}_k^i$ 分别为 k 时刻定位卫星J和定位卫星I相对于接收天线方向的单位矢量; η_{k-1}^{ij} 为 $k-1$ 历元时刻基线向量 $\vec{b}$ 和卫星向量 $\vec{s}^j - \vec{s}^i$ 之间的夹角; Δt_k 是不同测量系统的时间延迟; $\Delta\delta_{ahrs}(t_k - \Delta t_k)$ 为 $k-1$ 历元到 k 历元的姿态信息角 η^{ij} 变化量。

3) 带基线约束的 LAMBDA 法

当前 GNSS 姿态测量理论体系中最完善、成功率最高的算法是基线约束 LAMBDA 算法。根据式(11),载波相位双差分方程可以将多个双差分测量方程的模型写成以下线性矩阵形式:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{N} + \mathbf{B}\mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为载波相位双差测量值,期望为 $\mathbf{E}(\mathbf{y}) = \mathbf{A}\mathbf{N} + \mathbf{B}\mathbf{b}$,方差为 $D(\mathbf{y}) = \mathbf{Q}_y$; $\mathbf{N}$ 为双差整周模糊度向量; $\mathbf{b}$ 为未知的基线向量; $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 为常数系数矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为双差载波相位观测噪声矢量。在观测数据达到一定数量后,利用最小二乘法求解浮点解 $[\hat{\mathbf{b}} \ \hat{\mathbf{N}}]^T$ 和协方差矩阵

$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{N}}} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{b}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} \end{bmatrix}$ 。最小二乘法的目标函数可以表示为:

$$\min_{\mathbf{b}, \mathbf{N}} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{N} - \mathbf{B}\mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 \quad (13)$$

式中: $\|\mathbf{L}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 = (\mathbf{L})^T \mathbf{Q}_y^{-1} (\mathbf{L})$; 对于模糊度浮点解 $\hat{\mathbf{N}}$:

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{B}\hat{\mathbf{b}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 = \|\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 \quad (14)$$

对于模糊度固定解 $\tilde{\mathbf{N}}$ (值为整数):

$$\|\mathbf{y} - \mathbf{A}\tilde{\mathbf{N}} - \mathbf{B}\tilde{\mathbf{b}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 = \|\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 + \|\hat{\mathbf{N}} - \tilde{\mathbf{N}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 \quad (15)$$

根据式(14)和(15),整周模糊度估计最优解可以表示为:

$$\min_{\mathbf{N}} \|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2, \mathbf{N} \in \mathbf{Z}^n \quad (16)$$

将满足式(16)的整数解 $\mathbf{N}$ 作为模糊度固定解 $\tilde{\mathbf{N}}$ 时,基线向量的固定解 $\tilde{\mathbf{b}}$ 为:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \tilde{\mathbf{N}}) \\ \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{b}}} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}} - \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}\hat{\mathbf{b}}} \end{cases} \quad (17)$$

如果载波相位双差测量值之间的权重相差太大,式(16)的椭球形搜索空间就会被拉长,使得浮点解与固定解可能相距较远,需要进行遍历搜索,解算成功率也会有所降低。为了解决这个问题,LAMBDA 算法使用 $\mathbf{Z}$ 变换去除协方差矩阵的相关性,得到的搜索空间为:

$$(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}) \leq \chi^2 \quad (18)$$

式中: $\mathbf{z} = \mathbf{Z}^T \mathbf{N}$, $\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{Z}^T \hat{\mathbf{N}}$, $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{z}}} = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{Z}$, χ^2 表示搜索空间的大小。式(18)中,矩阵 $\mathbf{Z}$ 的行列式值为 1,所有元素均为整数。满足此条件的矩阵很难将 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1}$ 对角化。此时,只能使用一系列整数转换来完成对 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}^{-1}$ 近似对角化,然后采用基于 $\mathbf{LDL}^T$ 分解的序贯条件最小二乘法进行搜索。转换过程如下:

首先对 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}$ 进行 $\mathbf{LDL}^T$ 分解得到 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} = \mathbf{L}_1 \mathbf{D} \mathbf{L}_1^T$,其中 $\mathbf{L}_1$ 为单位下三角矩阵, $\mathbf{D}$ 为对角阵,得到 $\mathbf{D} = \mathbf{L}_1^{-1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} \mathbf{L}_1^{-T}$ 。矩阵 $\mathbf{Z}$ 的所有元素都必须均为整数,对 $\mathbf{L}_1^{-1}$ 、 $\mathbf{L}_1^{-T}$ 进行取整得到 $\mathbf{Q}_m = [\mathbf{L}_1^{-1}] \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}} [\mathbf{L}_1^{-T}]$ 。

然后对 $\mathbf{Q}_m$ 进行 $\mathbf{UDU}^T$ 分解得到 $\mathbf{Q}_m = \mathbf{U}_1 \mathbf{D} \mathbf{U}_1^T$,其中 $\mathbf{U}_1$ 单位上三角矩阵, $\mathbf{D}$ 为对角矩阵,得到 $\mathbf{D} = \mathbf{U}_1^{-1} \mathbf{Q}_m \mathbf{U}_1^{-T}$ 。矩阵 $\mathbf{Z}$ 中所有元素都要为整数,对 $\mathbf{U}_1^{-1}$ 、 $\mathbf{U}_1^{-T}$ 进行取整得到: $\mathbf{Q}_f = [\mathbf{U}_1^{-1}] \mathbf{Q}_m [\mathbf{U}_1^{-T}]$ 。

最后,重复以上的转换过程,直到分解产生的 $[\mathbf{L}_1^{-1}]$ 和 $[\mathbf{U}_1^{-1}]$ 为单位矩阵为止,迭代过程停止。假设最终的迭代次数为 n ,则最终的 $\mathbf{Z}$ 变换矩阵为:

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{U}_n^{-1}] [\mathbf{L}_n^{-1}] [\mathbf{U}_{n-1}^{-1}] [\mathbf{L}_{n-1}^{-1}] \cdots [\mathbf{U}_1^{-1}] [\mathbf{L}_1^{-1}] \quad (19)$$

停止迭代后,对式(19)进行搜索得到变换后的固定解 $\tilde{\mathbf{z}}$,进而得到模糊度固定解 $\tilde{\mathbf{N}}$:

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{Z}^T \tilde{\mathbf{z}} \quad (20)$$

考虑到 GNSS 姿态测量系统一般都是固定基线,可以增加基线约束条件。假设基线长度为 $\|\mathbf{b}\|_{l_3} = l$,式(19)的观测量可以表示为:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{y}) &= \mathbf{A}\mathbf{N} + \mathbf{B}\mathbf{b}, \\ D(\mathbf{y}) &= \mathbf{Q}_y, \\ \|\mathbf{b}\|_{l_3} &= l, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{a} \in \mathbf{Z}^m, \mathbf{b} \in \mathbf{R}^3$$

最小二乘的目标函数为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{b}, \mathbf{N}, \|\mathbf{b}\|_{l_3}=l} \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{N} - \mathbf{B}\mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 = \\ \|\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 + \min_{\mathbf{b}, \mathbf{N}, \|\mathbf{b}\|_{l_3}=l} (\|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2 + \|\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N}) - \mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})}}^2) = \\ \|\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}\|_{\mathbf{Q}_y}^2 + \min_{\mathbf{N}} (\|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2 + \min_{\mathbf{b}, \|\mathbf{b}\|_{l_3}=l} \|\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N}) - \mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})}}^2) \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})$ 为 $\mathbf{b}$ 的最小二乘解。假设 $\mathbf{N}$ 已知,整周模糊度搜索空间可以表示为:

$$\begin{aligned} \psi(\chi^2) = \{\mathbf{N} \in \mathbf{Z}^m \mid (\|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2 + \\ \|\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N}) - \mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})}}^2) \leq \chi^2\} \end{aligned} \quad (23)$$

采用标准 LAMBDA 算法来搜索所有的整周变量组合,利用基线约束条件限制搜索空间,提高搜索效率。基线约束关系为:

$$\|\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N}) - \mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})}}^2 \leq \chi^2 - \|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2 \quad (24)$$

通过基线约束关系可以限制搜索空间,提高搜索效率。选择使 $\|\hat{\mathbf{N}} - \mathbf{N}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{N}}}}^2 + \|\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N}) - \mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}(\mathbf{N})}}^2$ 最小的 $\mathbf{N}$ 作为整周模糊度的固定解 $\tilde{\mathbf{N}}$,获得基线向量的固定解 $\tilde{\mathbf{b}}$,最终转化为向量姿态角。

2 实验系统及测试方法

2.1 实验系统设置

本运动姿态测量系统算法处理结构以非线性卡尔曼滤波器为主框架,其中惯性器件中的陀螺仪输出值组成滤波器状态方程的更新矩阵,加速度计、磁传

传感器和 GNSS 测姿测速系统的输出值组成滤波器的观测方程部分,系统输出方位角、俯仰角、横滚角、速度 N(北向)、速度 E(东向)和速度 D(垂向)。在浮标运动姿态测量系统设计中,MIMU 为 GNSS 系统提供初始约束空间,以及载波相位平滑滤波器。GNSS 系统

为 MIMU 系统提供陀螺零位误差和磁方位角数据的在线校准以及卡尔曼滤波观测方程的校准量,两方面构成的组合运动姿态测量系统,保证提供高速、实时、可靠的姿态和速度(北东地 NED)数据。算法原理如图 5 所示。

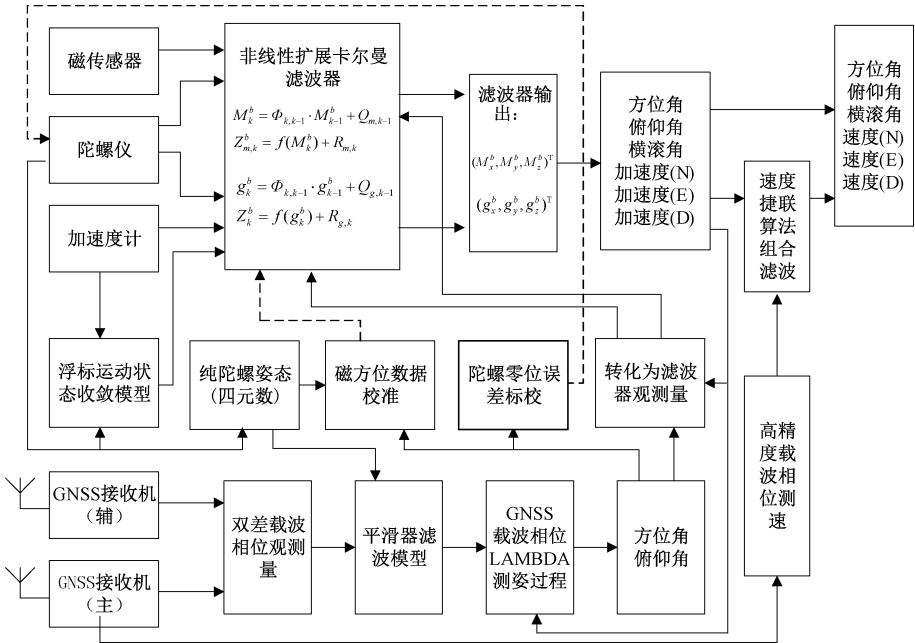


图 5 海洋浮标运动测量系统内部的算法原理

Fig. 5 Schematic diagram of the algorithm inside the motion measurement system of the ocean buoy

相应的,整个系统的数据交互流程如图 6 所示。

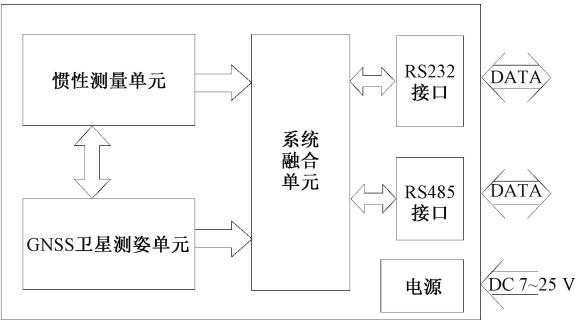


图 6 系统数据交互流程

Fig. 6 System data interaction flow

浮标运动姿态测量系统样机图,如图 7 所示。

本实验在崂山实验室场地上,利用六自由度摇摆台对浮标组合运动测量系统开展了动态测试,实验目的是模拟浮标运动条件下组合运动测量系统的姿态和速度准确度。本实验中所采用的六自由度摇摆台技术指标如表 1 所示。

为了对本文设计的运动姿态系统测量精度进行量化评估,引入 SBG 系统公司的双 GNSS INS 运动测量系统



图 7 海洋浮标运动测量系统样机

Fig. 7 Prototype of motion measurement system for ocean buoy

(Ellipse3-D),将其所获取的高精度运动姿态信息作为标准值,Ellipse3-D 的技术参数如表 2 所示。

本文的浮标运动姿态测量系统设计指标为姿态角(俯仰角、横滚角、方位角)均方根误差小于 0.5°,水平速度均方根误差小于 0.05 m/s,垂直速度均方根误差小于 0.1 m/s,输出频率大于 30 Hz。

Ellipse3-D 运动测量系统经过软件处理后指标可以达到姿态角均方根误差 0.05°,速度均方根误差 0.02 m/s,

表 1 六自由度运动摇摆台技术参数

Table 1 Technical parameters of six-degree-of-freedom motion swaying platform

名称	范围	名称	范围
横摇/(°)	-30~+30	摇摆周期/s	1~30
纵摇/(°)	-30~+30	摇摆幅度/(°)	-30~+30
角位置精度/(′)	-5~+5	最大角加速度/(°·s ⁻²)	100
前后自由度位移/mm	-500~+500	失真度/%	≤15
左右自由度位移/mm	-500~+500	台面平面度/mm	≤0.05
上下自由度位移/mm	-300~+300	台面跳动/mm	≤0.05
定位精度/mm	-0.5~+0.5	承重/kg	≤100

表 2 Ellipse3-D 的技术参数

Table 2 Ellipse3-D technical parameters

名称	指标
姿态	0.1°/0.05°(PPK)
航向	0.1°(双天线,>2 m 基线) 0.08°(双天线,>3 m 基线)
水平速度	0.03 m·s ⁻¹
位置	单点 L1/L2:1.2 m RTK:2 cm±2 ppm PK:1 cm
垂向/升沉	5 cm 或者 5%(二者取大者),周期最高 15 s 自适应

输出频率 100 Hz。通常情况下,比测设备精度应当高于设计标准一个数量级,本比测设备基本满足该要求,且该设备为适应海洋应用,设置了海洋版系统。同时,经横向比较同类设备,并充分考虑经济因素,Ellipse3-D 为本实验最优选择,固以其作为模拟浮标海上运动实验对照比测设备。

2.2 实验流程和测试方法

将六自由度摇摆台置于周围环境空旷无遮挡的室外环境,且保证 GNSS 处于良好的接收状态。利用六自由度摇摆台模拟浮标运动条件,将实验系统和对照系统置于该平台上同步进行数据采集。实验装配如图 8 所示。



图 8 六自由度摇摆台运动比测实验

Fig. 8 Motion comparison experiment of six-degree-of-freedom swaying platform

测试流程和方法如下:将六自由度摇摆台放置室外空旷的环境,浮标组合运动测量系统与双 GNSS INS 运动测量系统(Ellipse3-D),一起固定在刚性结构的横杆上,将横杆固定在六自由度摇摆台的上台面,在开阔的环境下系统上电启动六自由度摇摆台,将平台运行到中位,然后分别进行多轴复合运动设置,复合运动主要有如下两种形式:

- 1) 纵摇幅度:10°,横摇幅度:10°,摇摆周期(5 s/8 s/12 s);
横移幅值:150 mm,前冲幅值:150 mm,升降幅值:100 mm;
- 2) 纵摇幅度:20°,横摇幅度:20°,摇摆周期(5 s/8 s/12 s);
横移幅值:200 mm,前冲幅值:200 mm,升降幅值:150 mm;

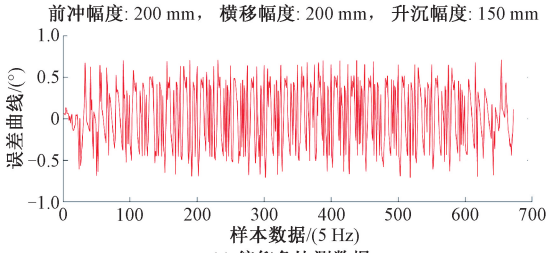
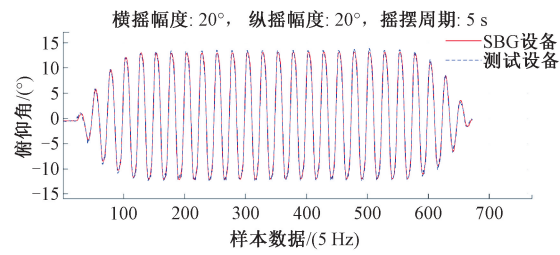
通过上位机软件分别记录本文设计的组合运动测量系统与 Ellipse3-D 系统的运动姿态和速度输出值,并将记录的数据进行分析和处理。上述给出参数中,运动周期越短,姿态变化速度越快。

3 结果分析

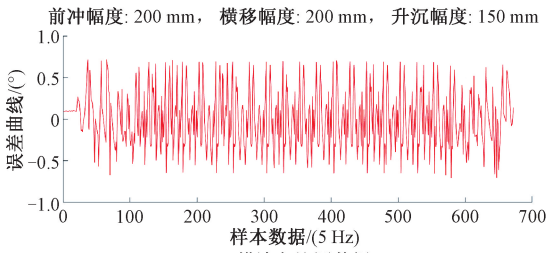
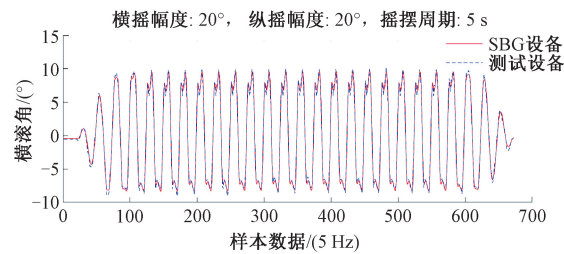
将记录的数据通过 MATLAB 进行计算,并将对照组与实验组设备的俯仰角、横滚角、方位角以及东向、北向、垂向速度分别记录,并计算两组数据中对应部分之间的差值。选取纵摇幅度:20°,横摇幅度:20°,摇摆周期 5 s;横移幅值:200 mm,前冲幅值:200 mm,升降幅值:150 mm;浮标运动姿态测量系统作为实验组测试设备和对照组 SBC 设备的运动姿态曲线及差值曲线,如图 9 所示。

图 9(a)~(f)分别对应俯仰角、横滚角、方位角以及东向、北向、垂向速度。图 9 中各图上方位子图为实验设备及对照设备采集的各物理量原始数据,其中虚线为实验系统测试数据,实线为对照系统测得标准数据;下方子图为两个系统所测对应物理量的差值曲线。为了更加清晰地对比测结果进行量化评估,本文将 2.2 小节中提到的两种复合运动形式,各 3 种运动周期下,分别计算共计 6 种情况下全部物理量的均方根误差,将得到的结果列入表 3。

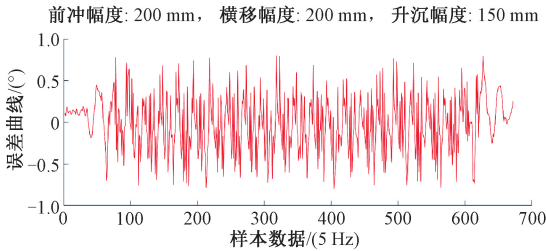
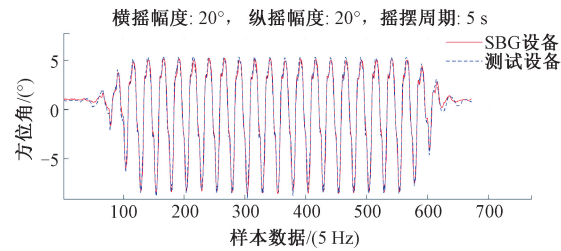
根据表 3 和 4 的数据能够看出,在六自由度摇摆台模拟浮标运动的测试中,测试设备与比对设备保持了良好的一致性,角度相关量的均方根误差可以达到 0.23~0.49°之间,速度相关量的均方根误差可以达到 0.032~0.094 m/s 之间,其中姿态角(俯仰角、横滚角、方位角)均方根误差小于 0.5°,水平速度均方根误差小于 0.05 m/s,垂直速度均方根误差小于 0.1 m/s,输出频率大于 30 Hz。通过对比测试,可见组合运动姿态测量系统达到了设计指标,能够很好实现运动姿态精准测量。



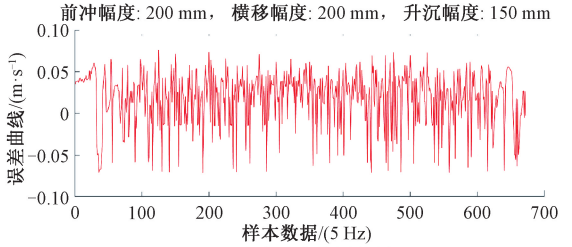
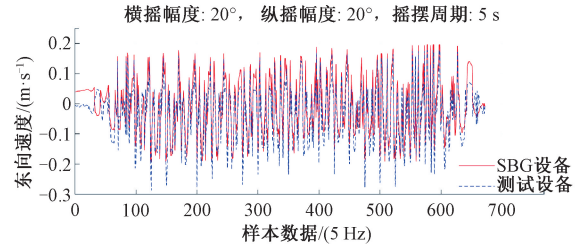
(a) 俯仰角比测数据



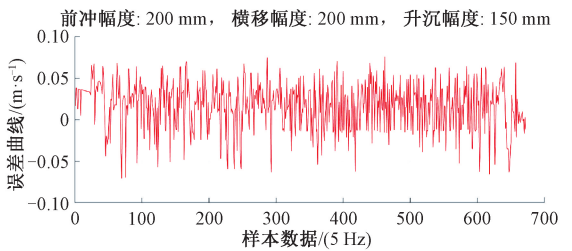
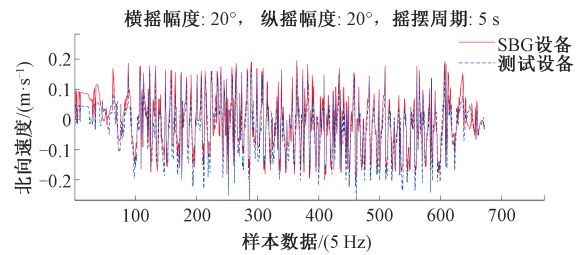
(b) 横滚角比测数据



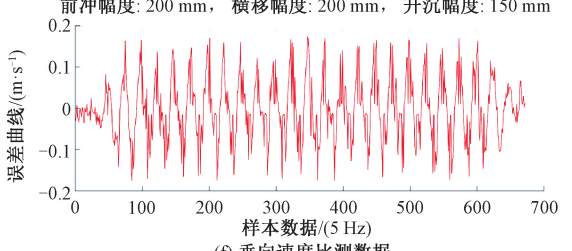
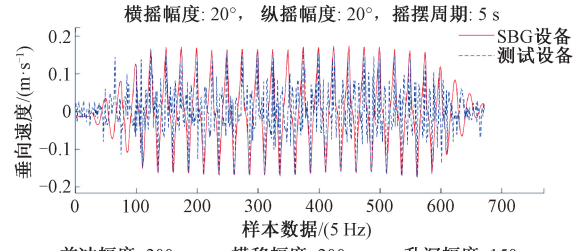
(c) 方位角比测数据



(d) 东向速度比测数据



(e) 北向速度比测数据



(f) 垂向速度比测数据

图9 复合运动形式5 s周期下测量曲线及差值曲线

Fig. 9 Measurement curve and difference curve under 5 s cycle of the composite motion form

表 3 六自由度复合运动模式设置

Table 3 Settings of six-degree-of-freedom composite motion mode

运动设置	摇摆幅度/(°)	横移/前冲/mm	升降/mm	摇摆周期/s
模式 1	10	150	100	5
模式 2	10	150	100	8
模式 3	10	150	100	12
模式 4	20	200	150	5
模式 5	20	200	150	8
模式 6	20	200	150	12

表 4 六自由度复合运动实验测试数据均方根误差

Table 4 RMSE of test data for six-degree-of-freedom composite motion experiment

运动设置	俯仰角	横滚角	方位角	东向速度	北向速度	垂向速度 RMSE
模式 1	0.428 172	0.452 296	0.444 358	0.048 142	0.046 621	0.060 453
模式 2	0.364 591	0.292 910	0.390 941	0.045 258	0.040 243	0.054 225
模式 3	0.454 175	0.232 864	0.412 542	0.041 355	0.032 597	0.043 290
模式 4	0.432 344	0.465 574	0.436 927	0.049 192	0.049 248	0.093 606
模式 5	0.483 132	0.422 068	0.465 523	0.037 595	0.045 170	0.093 998
模式 6	0.355 335	0.400 485	0.465 564	0.044 498	0.036 206	0.065 856

4 台风天气海上试验

为检验设计的组合运动测量系统在浮标上的测量性能,选取直径 10 m 大型锚泊激光雷达浮标进行了海上试验。海上试验时间从 2021 年 12 月 13 日~2022 年 1 月 29 日,共计 48 天。其中在 2021 年 12 月 17 日~2021 年 12 月 23 日,共计 7 天期间发生了超强台风“雷伊”来袭。台风来袭时浮标上传感器测量的气压、风速以及波高数据如图 10~12 所示。

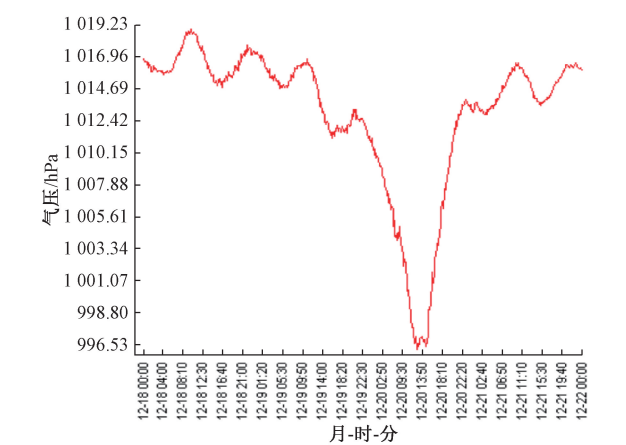


图 10 台风来袭时的气压数据

Fig. 10 Barometric data during the typhoon

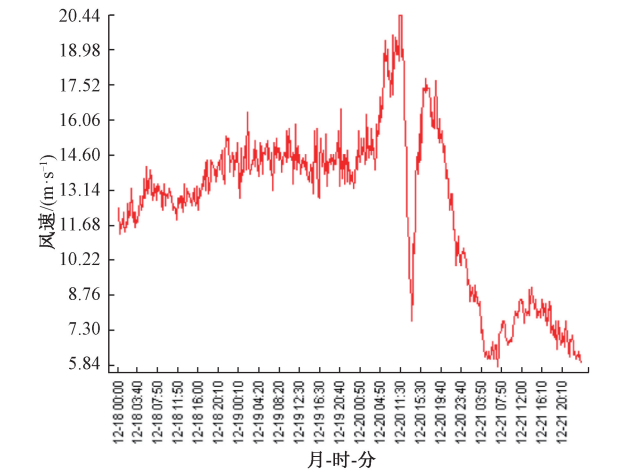


图 11 台风来袭时的风速数据

Fig. 11 Wind speed data during the typhoon

将组合运动测量系统在浮标上进行安装联调测试,如图 13 所示。

本次海上试验过程中,搭载组合运动测量系统的浮标布放在南海东沙群岛海域,期间实现了浮标运动姿态信息的全时段采集,其中台风中心风圈经过浮标所在位置时,海况恶劣,浮标运动姿态变化大,因此选取台风经过浮标时对运动姿态测量值进行分析。根据气象记录,台风中心风圈于 2021 年 12 月 20~21 日经过浮标所在位置,因此取当天浮标测量的数据进行分析。组合运动测量系统实测数据如图 14 和 15 所示。

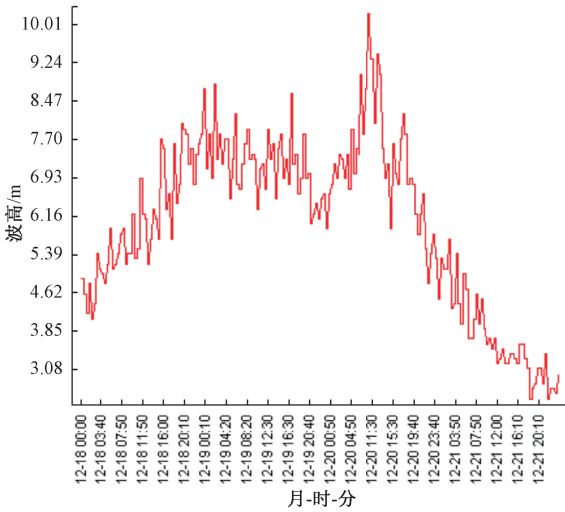


图 12 台风来袭时的波高数据

Fig. 12 Wave height data during the typhoon



图 13 组合运动测量系统联调测试

Fig. 13 Combined motion measurement system test

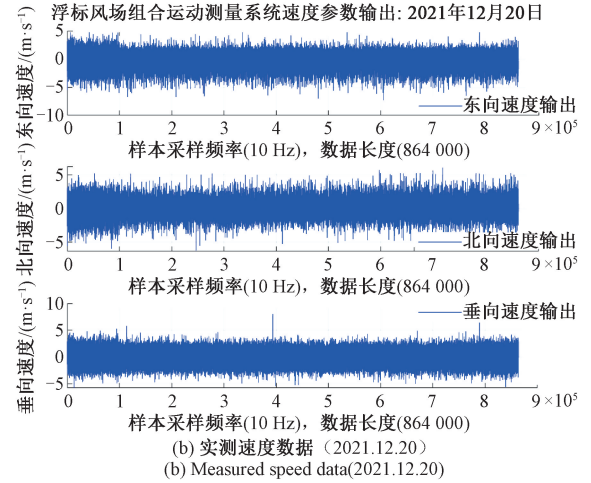
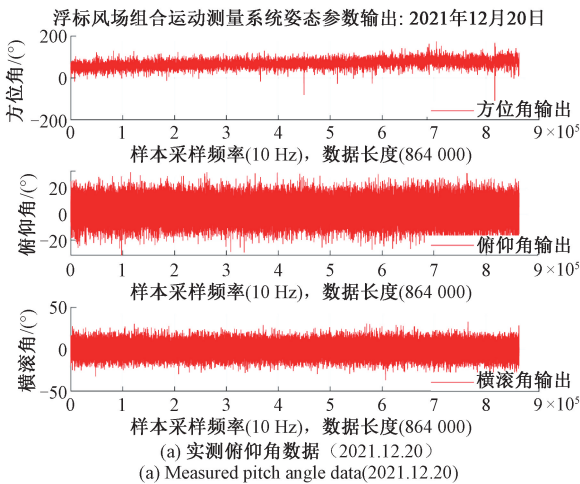


图 14 组合运动测量系统实测数据 (2021. 12. 20)

Fig. 14 Measured data of combined motion measurement system (2021. 12. 20)

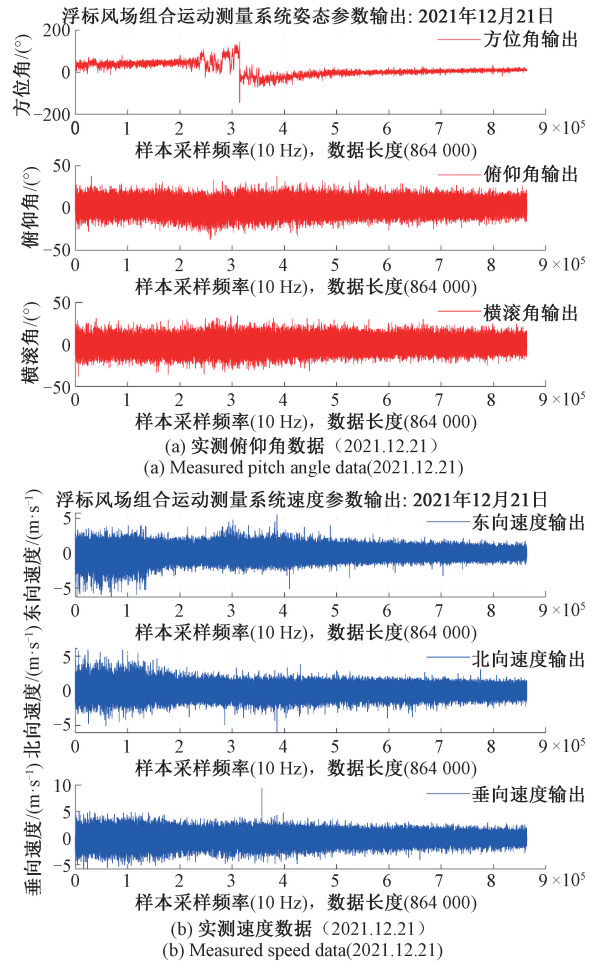


图 15 组合运动测量系统实测数据 (2021. 12. 21)

Fig. 15 Measured data of combined motion measurement system (2021. 12. 21)

从图 14(a) 和(b)以及图 15(a) 和(b)可以看出,在台风经过浮标期间,组合运动测量系统样机工作正常,俯仰角和横滚角均在 $\pm 25^\circ$ 以内,方位角数据平滑稳定,同时,东向、北向和垂向速度在 10 m/s 以内,所有数据均并未出现发散现象,只在少量地方出现了毛刺点。由于浮标体运动是具有一定周期性质的渐变过程,即使在摇摆中幅度逐渐增大或减小也是渐进过程,因此可以认为突然出现的毛刺点为无效数据,除去非正常奇异数据,数据有效率在 95% 以上,表明浮标组合运动测量系统能够在海上恶劣环境下正常工作,并输出可靠和稳定的运动姿态测量数据。

5 结 论

本文在充分考虑浮标恶劣工作环境条件基础上,通过采用 MIMU 和 GNSS 结合的硬件系统设计方案,并融合基于 MIMU 的载波相位平滑器滤波模型及 LAMBDA 算法设计数据处理单元对浮标运动姿态数据进行高精度测量。通过采用六自由度摇摆台对浮标海上运动状况进行实验模拟,使用本文提出的数据处理方法对实验获得的不同测量时长、不同运动状态下俯仰角、横滚角、方位角以及东向、北向、垂向速度的测量结果进行处理,并与高精度的 Ellipse3-D 系统所测结果进行比对,六自由度摇摆台实验表明组合运动测量系统的动态测量达到了较高精度。在此基础上,将设计的组合运动测量系统搭载于南海东沙群岛海域的浮标上并对浮标运动姿态数据进行了为期 48 天的海上测量试验,并在超强台风经过浮标所在位置恶劣海况下,对该组合运动测量系统的工作稳定性与可靠性进行了检验,试验测试数据有效率在 95% 以上。实验表明,该研究设计的组合运动测量系统实现了浮标运动姿态的高精度测量,且具有良好的工作稳定性,将对开展浮标海上运动特性研究及智能信息感知研究打下良好基础,具有重要实用价值和意义。

参考文献

- [1] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2414.
WANG B, LI M, LIU SH X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2414.
- [2] 王军成, 厉运周. 我国海洋资料浮标技术的发展与应用[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 1-20.
WANG J CH, LI Y ZH. Development and application of ocean data buoy technology in China[J]. Shandong Science, 2019, 32(5): 1-20.
- [3] 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): 1-11.
WANG J CH, LI Y ZH, YANG Y D, et al. Status quo and trend of research and development in attitude measurement technology of ocean data buoy[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2023, 54(5): 1-11.
- [4] 笄良龙, 王文龙, 孙犇东, 等. 一种微型矢量水听器姿态测量系统[J]. 中国惯性技术学报, 2016(1): 20-25.
DA L L, WANG W L, SUN Q D, et al. The invention relates to a miniature vector hydrophone attitude measurement system[J]. Chinese Journal of Inertia Technology, 2016(1): 20-25.
- [5] CUI X L. Attitude integrate monitor system design for direction finding of vector hydrophone on buoy platform[C]. 2018 2nd IEEE Advanced Information Management Communicates Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2018: 1-2180.
- [6] 程为彬, 陈烛姣, 张夷非, 等. IMU 姿态误差均衡校正模型与验证[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 202-213.
CHENG W B, CHEN ZH J, ZHANG Y F, et al. Balance correction and verification of IMU posture error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 202-213.
- [7] ELLIOTT D K, CHRISTOPHER J H. GPS/GNSS 原理与应用(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
ELLIOTT D K, CHRISTOPHER J H. Understanding GPS/GNSS: Principles and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [8] 陈红梅, 常林江, 徐振方, 等. 复杂环境下 GNSS/INS/UWB 紧组合的无人机协同导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(7): 98-107.
CHEN H M, CHANG L J, XU ZH F, et al. UAV collaborative navigation algorithm based on tight combination of GNSS/INS/UWB in complex environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 98-107.
- [9] 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.
YU B S, HE J, CAO X ZH. Measurement system of ocean drifting buoy motion attitude based on MEMS[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(10): 99-104.
- [10] JOYBARI 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.
- [11] 苟艳妮, 王英民, 王奇. 利用模拟退火算法的多基地浮标定位研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(4): 607-613.
- GOU Y N, WANG Y M, WANG Q. Applying simulated annealing algorithm to locating multistatic bouy [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(4): 607-613.
- [12] 刘宁, 魏晓辉, 王斌, 等. 基于 MEMS 加速度计空投浮标的波浪测量方法试验研究[J]. 海洋科学, 2020(9): 146-153.
- LIU N, WEI X H, WANG B, et al. Experimental study on the new wave measurement method of air-launched buoys using a MEMS accelerometer[J]. Marine Science, 2020(9): 146-153.
- [13] 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.
- [14] 周金金, 林志, 王小英. 基于 ARM11 的海洋浮标云台稳定控制系统[J]. 中国测试, 2016, 42(1): 74-78.
- ZHOU J J, LIN ZH, WANG X Y. Design of PTZ stability control system in ocean buoy based on ARM11[J]. China Measurement & Testing Technology, 2016, 42(1): 74-78.
- [15] XUE H, CHAI T. Estimation of buoy drifting based on adaptive parameter-varying time scale Kalman filter[J]. Journal of Control and Decision, 2021, 8(3): 353-362.
- [16] LEI X, WANG R, FU F. An adaptive method of attitude and position estimation during GPS outages [J]. Measurement, 2022, 199: 111474.
- [17] 杨英东. GNSS-MIMU 组合系统误差补偿与抗干扰问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- YANG Y D. Research on error compensation and anti-interference of GNSS/MIMU integrated system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [18] 肖玉钢, 王峥, 喻守刚, 等. 一种有效的多模 GNSS 高维模糊度固定算法[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 17-20.
- XIAO Y G, WANG ZH, YU SH G, et al. An effective multi-GNSS high-dimensional ambiguity resolution algorithm[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(5): 17-20.
- [19] JIA X, CHENG G, JI Y, et al. GNSS single-frequency, single-epoch attitude determination method with orthogonal constraints [J]. Mathematical Problems in

Engineering, 2022:1-9.

- [20] WANG X Z, YAO Y B, XU C Q, et al. An improved single-epoch attitude determination method for low-cost single-frequency gnss receivers [J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2746.

作者简介



厉运周, 2008 年于山东科技大学获得学士学位, 2011 年于山东科技大学获得硕士学位, 2022 年博士毕业于国防科技大学, 现为齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所副研究员, 主要研究方向为海洋资料浮标测控与智能感知技术。

E-mail: lyz@qlu.edu.cn

Li Yunzhou received his B.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2008, M. Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2011, and graduated as a doctor from National University of Defense Technology in 2022, respectively. Now he is an associate research in Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences). His main research interests include ocean data buoy measurement and intellisense technology.



杨英东 (通信作者), 2007 年于临沂大学获得学士学位, 2011 年于上海海事大学获得硕士学位, 2017 年于上海交通大学获得博士学位, 现为齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所副研究员, 主要研究方向为海洋浮标运动测量及波浪测量。

E-mail: yangyingdong01@163.com

Yang Yingdong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the University of Linyi in 2007, M. Sc. degree from Shanghai Maritime University in 2011, and Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2017, respectively. Now he is an associate researcher in Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences). His main research interests are marine buoy movement measurement and wave measurement.



王军成, 1978 年大学毕业于哈尔滨工业大学, 现为中国工程院院士、齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所研究员, 主要研究方向为海洋环境监测技术与仪器。

E-mail: wjc@sdioi.com

Wang Juncheng graduated degree from Harbin Institute of Technology in 1978. Now he is an academican of Chinese Academy of Engineering, a research fellow in Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences). His main research interests include marine environmental monitoring technology and instruments.