

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519325

基于网络 RTK 的单北斗浮标潮位测量研究^{*}

蒋泉宇 周文清 邵毅

(国家海洋技术中心自然资源部海洋观测技术重点实验室 天津 300110)

摘要: 高精度的潮位信息,是海洋科学研究和工程应用的关键基础。随着现代海洋活动的扩展,离岸的远距离潮位信息需求不断增强。为了进一步推动离岸高精度潮位信息的获取,本文基于网络 RTK 技术,开展了单北斗浮标潮位测量的可行性试验、精度研究和姿态补偿影响分析。实验结果表明:高程方面,加入姿态补偿能够有效的减小误差,提高测量精度。在未加入姿态补偿条件下,潮位测量的最大绝对误差为 4.10 cm,平均偏差为 1.34 cm,标准差为 1.54 cm,精度能够达到为 1.96 cm。加入姿态补偿后,潮位测量的最大绝对误差减小至 3.30 cm,平均偏差减小至 1.14 cm,标准差减小至 1.44 cm,精度能够提高到 1.75 cm。相位方面,整体的相位滞后差异保持在 4°以内,加入姿态补偿对于改善相位偏移无明显作用。因此,基于网络 RTK 的单北斗浮标在潮位测量方面具备一定的可行性。在智慧航道建设、海道测量等领域,基于网络 RTK 的单北斗验潮浮标具备一定的应用前景。

关键词: 网络 RTK;单北斗浮标;潮位测量

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420

Research on tidal measurement with Sigal-BDS buoys via network RTK

Jiang Xiaoyu Zhou Wenqing Shao Yi

(Key Laboratory of Marine Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Nation Ocean Technology Center, Tianjin 300110, China)

Abstract: High-precision tidal level data serves as a critical foundation for marine scientific research and engineering applications. With the expansion of modern marine activities, the demand for offshore long-distance tidal level information continues to grow. To further advance the acquisition of offshore high-precision tidal level data, this study conducted feasibility testing, accuracy research, and attitude compensation impact analysis for single-Beidou buoy tidal level measurement based on network RTK technology. Experimental results indicate: regarding elevation, incorporating attitude compensation effectively reduces errors and enhances measurement accuracy. Without attitude compensation, the maximum absolute error in tide level measurement was 4.10 cm, with an average deviation of 1.34 cm and a standard deviation of 1.54 cm, achieving an accuracy of 1.96 cm. With attitude compensation applied, the maximum absolute error decreased to 3.30 cm, the average deviation reduced to 1.14 cm, the standard deviation decreased to 1.44 cm, and the accuracy improved to 1.75 cm. Regarding phase, the overall phase lag variation remained within 4°. Adding attitude compensation showed no significant effect on improving phase shift. Therefore, a single-Beidou buoy based on network RTK demonstrates certain feasibility for tide level measurement. In fields such as smart waterway construction and hydrographic surveying, a single-Beidou tide gauge buoy based on network RTK holds promising application prospects.

Keywords: network RTK; single BDS buoy; tidal measurement

0 引言

高精度的潮位数据是海洋科学研究和工程实践的核心基础要素。随着现代海洋活动的扩展,离岸的远距离潮位

信息需求不断增强。传统的验潮方式如浮子式验潮仪、雷达式验潮仪等只能在海岸边固定站点部署,压力验潮仪容易发生海底固定基座的偏移,难以较好的适应离岸潮位观测需求^[1]。近些年来,随着全球导航卫星系统(global

收稿日期:2025-07-10

* 基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB4204200)项目资助

navigation satellite system, GNSS) 的不断发展, 定位精度不断提高, 基于 GNSS 浮标验潮得到越来越广泛的研究^[2]。相较于传统的验潮方式, GNSS 浮标观测布放点位选择更加灵活, 不再受到选址、基建等方面的影响, 更加适用于离岸的潮位信息测量。

GNSS 浮标定位系统的选择方面, 早期主要以全球定位系统(global position system, GPS)为主^[3], 受限于星座规模和环境的影响, 定位时常出现精度较低, 连续性不足等问题。随着更多的定位系统不断发展, 多系统融合定位成为趋势。多模系统通过增加可见的卫星数量, 能够在一定程度上提高定位的精度和抗干扰能力^[4]。其中, 北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是我国自主研发、建设和运营的导航定位系统^[5]。2020 年 7 月, 北斗三号定位系统全球组网成功, 在定位精度、时频基准、国产化核心技术等多种关键指标上均实现了里程碑式的突破, “高性能+自主可控”的双重目标逐渐成为新的发展方向^[6]。基于独特的混合星座设计和星基增强服务, 北斗三号定位系统能够在全球尤其是亚太区域提供高精度的定位信息, 满足海洋观测需求。系统实现了核心元器件的 100% 国产化和全产业链的独立自主, 构建了从卫星到终端的全链路加密体系, 大大提升了系统可靠性。对于海洋观测这种对定位精度和信息安全都有较高要求的领域, 相较于多系统融合定位, 目前的单模北斗系统能够在实现高精度定位的同时提供更高的自主可控性与安全防护性。

GNSS 浮标定位技术的选择是潮位测量的核心, 其精度和适用范围对离岸的潮位观测有着最直接的影响。当前主流的技术包括实时动态载波相位差分定位(real time kinematic, RTK)、后处理差分动态定位(post processing kinematic, PPK)和精密单点定位(precise point positioning, PPP), 其中 RTK 又细分为基于自建单基站的传统 RTK 和依托参考站网的网络 RTK。七一五研究所何志强等^[7]基于传统 RTK 进行了潮位测量, 试验结果表明潮位测量精度能够达到 6 cm 左右, 但受限于单基站的覆盖范围, 离岸观测的距离有限。相较于 RTK, PPK 拥有更大的作业范围。国家海洋局第一海洋研究所梁冠辉等^[8]利用基于 PPK 的 GPS 浮标进行 2 km 内的近距离验潮, 结果表明短基线下的 PPK 潮位测量精度优于 3 cm; 武汉大学赵建虎等^[9]进行了基于 PPK 的 20~100 km 的 GPS 浮标验潮, 实验结果表明: 随着验潮距离的增加, 基准站和流动站间的误差相关性减弱, PPK 的验潮精度降低, 但基于无缝垂直基准转换模型得到的潮位测量偏差大部分仍能保持在 12 cm 以内。Di 等^[10]通过实验则更详细的指出了 PPK 在基线小于 35 km 时可实现厘米级精度, 超过该阈值后需要考虑无需基准站的 PPP 等绝对定位方法。针对 PPK 和 PPP 两种定位方式, Bender 等^[11]评估了两者在复杂环境下的测试性能, 指出 PPP 在复杂海洋环境下更具适应性。王朝阳等^[12]分析对比发现, 远距离潮位观测时 PPP 的精度优于

PPK, 但总体精度表现不佳。为了进一步提升 PPP 的验潮精度, Yan 等^[13]结合精密轨道和小波分析进行定位精度补偿和去噪, 幅度和相位误差分别在 ± 5 cm 和 $\pm 8^\circ$ 范围内。总体而言, 目前 GNSS 浮标定位技术的选择主要以 PPK 和 PPP 为主, 其中 PPK 精度表现较好, 但依赖基准站且实时性较差, PPP 虽有更远的适用范围但精度表现十分依赖精密星历修正。

相较于 PPK 和 PPP, 网络 RTK 具备更好的实时性和定位精度, 不再需要复杂的精密星历修正, 且相较于传统 RTK, 网络 RTK 不需要自建基准站, 拥有更大的作业范围。目前, 针对网络 RTK 技术, 特别是基于单模的北斗定位系统, 在 GNSS 浮标潮位测量方面的表现, 仍然少有研究。为此, 本文基于网络 RTK 技术, 开展了单北斗浮标潮位测量的可行性试验、测量精度研究和姿态补偿影响分析, 旨在探究基于网络 RTK 的单北斗浮标在潮位测量方面的可行性, 同时为北斗验潮浮标的设计和离岸高精度潮位信息的获取提供一定的参考。

1 北斗浮标潮位测量

1.1 网络 RTK 定位

网络 RTK 主要通过基准站网、数据处理中心和用户端三级结构来实现厘米级实时定位^[14]。基准站网主要由区域内部的多个卫星观测基准站组成, 每一个站点同步观测卫星信号并将观测的载波相位数据、伪距数据、时间戳等数据实时上传至数据处理中心。数据处理中心通过卡尔曼滤波等算法对多个卫星观测基准站的数据进行融合, 生成区域电离层、对流层误差网络模型。同时进一步基于用户端的概略位置, 通过虚拟参考站技术(virtual reference station, VRS)选择最优基准站组合计算区域误差模型, 在用户附近生成虚拟参考站, 计算差分改正数^[15-16]。用户端通过无线电台、移动通信网络等多种方式接收修正参数, 并融合自身的观测值, 计算出其刚开始工作时已经丢失的完整信号周期数, 即实现整周模糊度的固定, 最终输出高精度的定位信息。

用户端解算使用的双差观测模型为:

$$\nabla \Delta \varphi_{u,b}^{i,j} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{i,j} + \nabla \Delta I_{u,b}^{i,j} + \nabla \Delta T_{u,b}^{i,j} + \lambda \nabla \Delta N_{u,b}^{i,j} + \epsilon \quad (1)$$

$$\nabla \Delta (\cdot)_{u,b}^{i,j} = ((\cdot)_u^i - (\cdot)_b^i) - ((\cdot)_u^j - (\cdot)_b^j) \quad (2)$$

式中: $\nabla \Delta$ 为双差算子, u, b 分别为用户站和基准站, i, j 为卫星对, ρ 为几何距离, I 为电离层延迟, T 为对流层延迟, λ 为载波波长, N 为整周模糊度, ϵ 为观测噪声。

1.2 高程转换

基于网络 RTK 捕捉的浮标实时垂向高度, 其本质上是基于参考椭球面的大地高^[17], 而实际的海面高度变化通常需要用基于 1985 国家高程基准面的正常高来表示^[18], 因此需要进行高程转换, 具体的原理图如图 1 所示, 数学表达式为:

$$H_{85} = H - L - \xi \quad (3)$$

式中: H_{85} 为海面 85 高, H 为浮标天线大地高, L 为浮标天线高, ξ 为高程异常值。

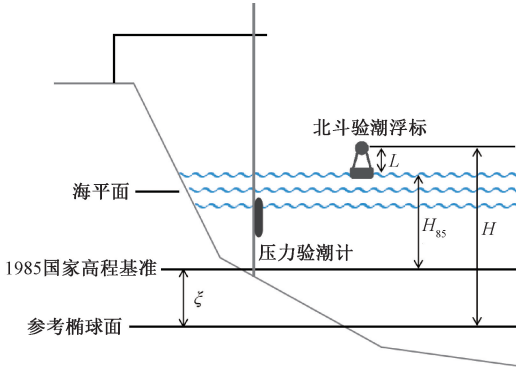


图1 高程转换及设备布放综合示意图

Fig.1 Comprehensive diagram of elevation conversion and equipment layout

1.3 姿态补偿

在实际情况下,受到海风、海浪、海流等多种海洋环境因素的影响,浮标会产生横摇、纵摇、艏摇、纵荡、横荡、垂荡 6 个自由度的运动^[19-20],浮标天线的垂向高度也会随之处于动态变化之中,因此需要进行浮标天线垂向高度的实时姿态校正。定义浮标的姿态角和倾斜角如图 2 所示,其中 x 轴正方向指向正北, y 轴正方向指向正东, z 轴正方向垂直于海面。通过加入姿态传感器测量浮标的横滚角 α 和俯仰角 β ,对浮标天线高 L 进行修正得到浮标天线的实时垂向高度 h :

$$h = L \cos \alpha \cos \beta \quad (4)$$

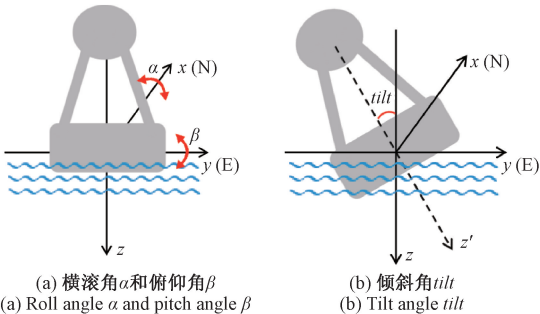


图2 横滚角 α 、俯仰角 β 和倾斜角 $tilt$ 定义

Fig.2 Definitions of roll angle α , pitch angle β and tilt angle $tilt$

1.4 浮标系统设计

浮标选用直径为 1 m 的小型圆盘浮标,并在浮体中心位置设置一个独立水密舱,用于放置和保护各种传感器监测设备。浮标采用水平锚系,通过不锈钢链、水面浮筒和浮球与海底抓力锚进行固定连接,有效减小海流影响的同时有助于浮标随波浪和潮汐进行垂向的运动,减小浮标吃水深度的动态变化,从而进一步保证测量的准确性。

北斗定位模块选用中海达 K20 高精度分体式 RTK 定位定向仪,支持单北斗解算和网络差分模式,安装固定于浮

标舱体内部,用于获取浮标实时的动态高程定位信息,其精度能够达到 1.5 cm 左右。运动姿态补偿模块选用飞迪 DETA 10 九轴微型惯导模组,集成了三轴加速度计、三轴陀螺仪以及三轴磁力计,并采用 Sigma-Point 卡尔曼滤波器对仪器的漂移和噪声进行实时修正,安装固定于浮标重心位置,用于获取浮标实时的运动姿态信息,其精度能够达到 0.1° 左右。

数据采集模块选用树莓派 4 代 B 型主板 (Raspberry Pi 4 Model B),配置 32 GB 闪迪内存卡,烧录 Raspberry Pi OS 操作系统,用于多传感器的数据采集、解析、存储和通讯。但在树莓派原生的 40 针 GPIO 接口中仅包含一对串口收发引脚 (GPIO 8/TxD 和 GPIO 10/RxD),为此,添加微雪 Serial Expansion HAT 串口扩展板将原有的 1 个串口扩展为 3 个。其中,新扩展的两个普通串口用于北斗定位信息和姿态信息的传输,配置更高更稳定的硬件串口用于远程通讯。

4G 通讯模块选用有人物联的 USR-DR152 超小体积导轨式数据传输终端,在岸站数据中心部署内网穿透中继服务,构建基于 TCP 协议透传的远程通讯和监测系统,实现低延迟的数据交互和设备状态管理。供电模块选用金通新能 JT1493-BMS 三元锂电池组,标称电池容量为 93 Ah,标称电压为 14.4 V,固定于浮标底座,直接为北斗定位传感器、运动姿态测量传感器和 4G 通讯传感器进行供电。同时,选用轮趣科技 P05C DC-DC 降压模块,将三元锂电池组的输出稳定转换为 5 V/3 A 输出,为树莓派供电。

2 试验分析

2.1 试验概况

本次比测实验于 2025 年 6 月 8 日~6 月 11 日在山东威海环翠区褚岛附近海域开展,为期 4 天,具体的实验地点示意图如图 3 所示,完整的实验设备布放示意图如图 1 所示。在褚岛码头海岸旁增设 RBRduet3 TD-tide16 压力验潮仪(如图 4 所示):将压力验潮仪固定于垂直安装杆上后,布放于最低潮位深度以下超过 1 m 处,安装杆上端与向海面延伸的支撑架连接绑定,下端固定于海底,确保其在海水冲击下的稳定性。设定压力验潮仪的工作模式为 Tide 潮汐模式,工作周期为 5 min,采样时间长度为每个工作周期的第 1 min,采样频率为 16 Hz。压力验潮仪的潮位测量精度约为 1 cm,其测量数据在本次比测实验中作为标准参照值。在距离褚岛码头海岸旁的压力验潮仪约 100 m 处开阔海域,布放北斗验潮浮标(如图 4 所示)。北斗定位模块工作模式设置为移动站,数据链模式选择内置网络,卫星跟踪模式选择单北斗,采样频率设置为 10 Hz,卫星高度角设定为 10° ,输出选择 GNGGA 定位模块语句,包含 UTC 时间、经纬度位置信息、定位质量指示、参与定位的卫星数量、高程定位信息、校验信息等。运动姿态补偿模块选择 MSG-AHRS 数据模式,采样频率设置为 10 Hz,实时获取浮标的姿态角信息以及时间戳。所有传感器数据通过树莓派进行

存储和处理,并最终通过 4G 数据传输终端将数据回传至岸站数据中心。



图 3 实验地点示意图

Fig. 3 Experimental location diagram



图 4 压力验潮仪与北斗验潮浮标

Fig. 4 Pressure tide gauge and Beidou tide gauge buoy

2.2 数据处理

首先对原始数据进行预处理,剔除其中的异常数据。由于卫星信号波动、网络状态不佳、外界环境干扰等问题,网络 RTK 在少数情况下会出现整周模糊度整数固定失败,模糊度参数以非整数的浮点形式参与后续解算的现象。此时,定位解算的结果会出现跳变或漂移,固定解退化为浮动解,最终的高程定位精度也会从厘米级降低至分米级。通过北斗定位模块输出的定位语句中的解状态标识位对定位解算过程中产生的浮动解进行筛选和剔除,并利用三次样条插值重新构造连续序列。

预处理完成后,得到的高程变化序列中,不仅包含潮汐信息,还包含仪器噪声以及波浪等海洋环境信息。为了得到准确的潮汐信息,需要对高程变化序列进行信号降噪与分离。潮汐信号的周期通常在 12 h 以上,属于超低频信号,相比之下,波浪的周期通常不超过 30 s,与仪器噪声同属于高频信号。由于信号之间的频率差异十分明显,本文使用均值滤波对重构的连续数据序列进行处理,提取潮汐信息。

要进行均值滤波,关键在于平均处理的时间步长的选择。钱塘江大潮通常被视为中国最大的潮汐现象,其最大潮差约为 900 cm^[21],主要为半日潮,潮周期约为 12 h 25 min。为定量描述和分析钱塘江大潮的潮汐变化特征,利用余弦函数模型对其进行大致的数学建模:

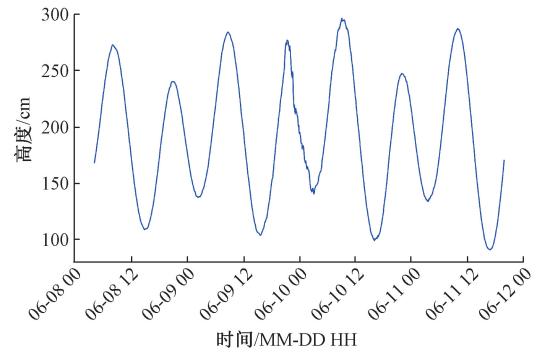
$$h = A \cos(\omega t + \varphi) + C \quad (5)$$

式中: h 为潮高,振幅 A 设置为 450 cm,角频率 ω 设置为 0.000 14 rad/s,初始相位 φ 设定为 $-\pi/2$,海平面高度 C 设

定为 500 cm。

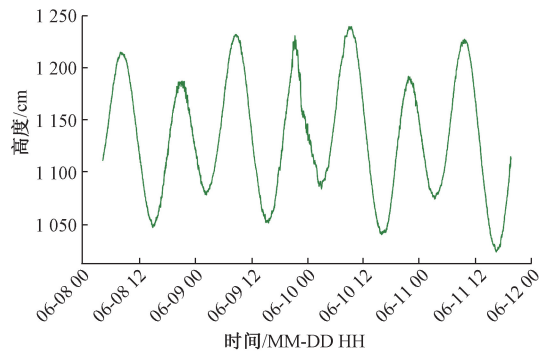
基于上述模型,通过求导求得潮汐高度的最快下降速率约为 0.063 cm/s。假设保持最快的下降速率下降 1 min,则潮汐高度的下降量为 3.78 cm。相比之下,威海海域的潮汐同样以半日潮为主,最大潮差通常不超过 2 m,远远小于钱塘江大潮的潮差,若保持最快的下降速率下降 1 min,潮汐高度的变化小于 1 cm。因此,选择 1 min 作为平均滤波处理的时间步长,对测量精度产生的影响较小,符合潮汐测量规范且满足实验需求。

均值滤波处理后的高度变化图如图 5 所示,由图 5 可知,显然威海海域的潮汐类型为半日潮,一天存在两次高潮与两次低潮。



(a) 压力验潮仪测量的水位高度变化

(a) Changes in water level height measured by the pressure tide gauge



(b) 北斗浮标测量的天线大地高变化

(b) Changes in antenna height measured by the Beidou buoy

图 5 设备测量的高度变化

Fig. 5 The variation in height measured by the equipment

由式(4)可得,同样以 1 min 为时间步长对浮标姿态补偿过程中使用的余弦信息进行均值滤波处理。尽管横滚角 α 和俯仰角 β 准确描述了浮标绕 x 轴和 y 轴的旋转角度,能够很好的用于浮标的姿态修正,但难以直接量化浮标姿态相较于垂直方向的整体偏移程度。因此,这里引入倾斜角 $tilt$ 作为浮标姿态偏离垂直方向的一个直观表征,其具体的数学表达式定义为:

$$tilt = \begin{cases} \arccos(\cos\alpha\cos\beta), \alpha, \beta > 0^\circ \text{ 或 } \alpha, \beta < 0^\circ \\ -\arccos(\cos\alpha\cos\beta), \alpha > 0^\circ, \beta < 0^\circ \text{ 或 } \alpha < 0^\circ, \beta > 0^\circ \end{cases} \quad (6)$$

均值滤波处理后,实验期间浮标的倾斜角 *tilt* 的幅值的绝对值的变化情况如图6所示,浮标整体的姿态倾斜程度保持在14°以内。由于浮标选用的水平锚系,其动态条件下的吃水深度和静态条件下基本能够保持一致,因此,将浮标置于码头平静海面下,测得浮标的原始天线高度为94 cm。

选取6月9日19:30~20:30浮标倾斜程度最大的时间段,对加入姿态补偿前后浮标测量的海面高对比进行清晰展示(如图7所示)。其中,最大的倾斜角约为13.8°,此时对应的最大姿态补偿高度约为2.7 cm。

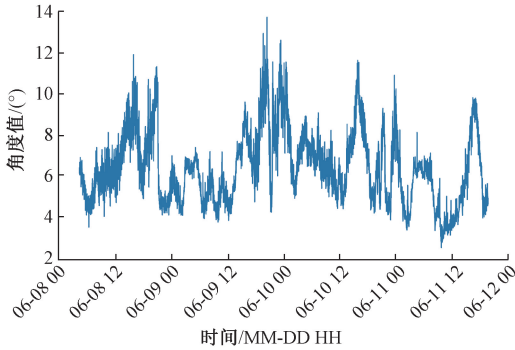


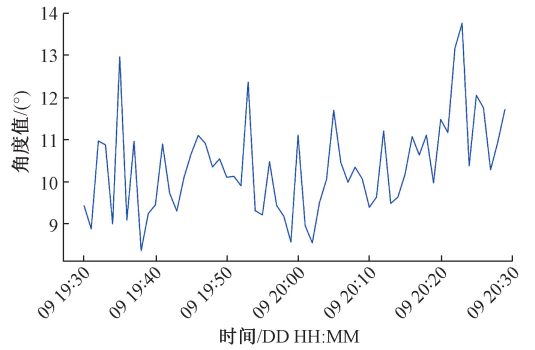
图6 倾斜角幅值的绝对值变化

Fig. 6 The absolute value change of the tilt angle amplitude

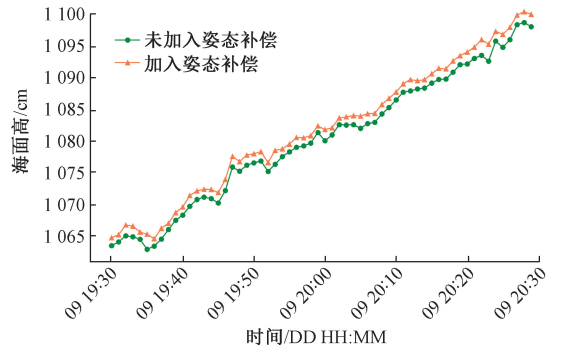
2.3 精度分析

从北斗浮标测量数据中成功提取出潮汐信号后,将其与压力验潮计对比,进行进一步的精度分析,包括潮位高度对比和相位偏移分析。由于潮高是基于1985国家高程基准面的绝对高度值^[22],而本文中使用的北斗浮标和压力验潮计两种测量设备的基准面并不一致,在统一基准面的过程中容易带入新的测量误差。因此,本文选用潮差代替潮高作为比较对象,其本质上是相对高度值,能够消除基准面不同而产生的系统误差。

为了进一步从潮汐信号中提取出潮差和相位进行精度比较,对其进行数据平滑和拟合分析。若将高潮平潮开始前到下一次低潮停潮结束后的时间段划分为一段拟合区



(a) 6月9日19:30至20:30倾斜角幅值的绝对值变化
(a) The absolute value change of the tilt angle amplitude from 19:30 to 20:30 on June 9



(b) 加入姿态补偿前后的海面高对比
(b) Comparison of sea surface height before and after attitude compensation

图7 倾斜角与海面高补偿效果时序对比图

Fig. 7 Time series comparison chart of the compensation effect of the tilt angle and the sea surface height

间,那么在本次实验过程中,总共划分出7段拟合区间,具体的时间段分别为6.8日06:00~16:00、6.8日19:00~次日04:00、6.9日07:00~17:00、6.9日20:00~次日5:00、6.10日08:00~18:00、6.10日20:00~次日05:00以及6.11日08:00~18:00。由于威海海域潮汐以半日潮为主,针对每一段拟合区间,通过余弦函数模型对其进行拟合。

压力验潮仪、未加入姿态补偿的北斗浮标以及加入了姿态补偿的北斗浮标三者的拟合分析结果如表1所示。

表1 拟合分析结果

Table 1 Fitting analysis results

日期	拟合区间	拟合优度			潮差/cm			相位/(°)		
		压力验潮计	未加入姿态补偿北斗浮标	加入姿态补偿北斗浮标	压力验潮计	未加入姿态补偿北斗浮标	加入姿态补偿北斗浮标	压力验潮计	未加入姿态补偿北斗浮标	加入姿态补偿北斗浮标
2025-06-08	06:00~16:00	0.999 7	0.999 5	0.999 4	162.2	162.7	162.2	1.7	-1.9	-1.9
2025-06-08	19:00~04:00	0.999 0	0.997 7	0.997 6	102.2	103.6	103.9	-6.6	-9.7	-9.7
2025-06-09	07:00~17:00	0.999 7	0.999 1	0.999 1	178.1	177.8	177.3	-13.1	-13.1	-13.1
2025-06-09	20:00~05:00	0.955 2	0.952 0	0.954 5	114.1	115.9	116.3	-19.5	-21.8	-21.8
2025-06-10	08:00~18:00	0.999 5	0.999 5	0.999 5	196.1	198.2	197.6	-42.7	-42.4	-42.4
2025-06-10	20:00~05:00	0.998 6	0.997 1	0.997 2	112.7	112.5	112.8	-41.8	-42.0	-41.9
2025-06-11	08:00~18:00	0.999 7	0.999 6	0.999 6	196.0	200.1	199.3	45.2	44.6	44.7

从表 1 中可以发现,所有拟合的拟合效果均较好,拟合优度普遍都能达到 0.9 以上。但对比拟合优度可以发现,6.9 日 20:00~次日 05:00 的拟合效果明显低于其他时间段。回看均值滤波后的高度变化图也能够明显的发现,6.9 日晚间到 6.10 日凌晨这一段时间,数据平滑性相比其他时间出现明显的降低。由于压力验潮计和北斗浮标两者同时出现类似现象,数据平滑性降低后的变化趋势仍然保持相似,且持续的时间较长,因此可以大致排除北斗浮标单方面技术层面、大船经过以及人为干扰等相关因素的影响。

影响。推测可能是由于风、浪、流等海洋环境的变化引起的数据变化,但仅为推测性结论,具体仍待获取对应的气象数据进行进一步的分析验证。

基于潮差和相位对测量精度进行进一步的误差统计分析,最终的具体结果如表 2 所示。未加入姿态补偿时,单北斗浮标潮位测量的高程精度能够达到 1.96 cm,相位滞后差异在 4°以内。加入姿态补偿后,单北斗浮标潮位测量的高程精度达到 1.75 cm,提高了 0.21 cm,相位滞后后情况基本保持不变。

表 2 北斗浮标潮位测量精度分析

Table 2 Analysis of Beidou buoy tide measurement accuracy

量	是否加入姿态补偿	最大绝对误差	平均偏差	标准差	均方根
潮差/cm	未加入姿态补偿	4.10	1.34	1.54	1.96
	加入姿态补偿	3.30	1.14	1.44	1.75
相位/(°)	未加入姿态补偿	3.60	1.44	1.60	2.01
	加入姿态补偿	3.60	1.41	1.62	2.01

3 结 论

本文基于网络 RTK 技术,开展了单北斗浮标潮汐测量的可行性试验、精度测量研究和姿态补偿影响分析。实验结果表明:通过合理选择均值滤波参数,能够在不影响精度的情况下有效的去除原始数据中的高频噪声,提取出潮汐信号;基于网络 RTK 的单北斗浮标潮位测量的高程精度优于 2 cm,相位偏移保持在 4°以内,在离岸的潮位测量方面具备一定的可行性;加入姿态补偿能够在一定程度上有效的提高北斗浮标潮位测量的高程精度,对改善相位偏移无明显作用。因此,在离岸的海洋科学研究、航道安全工程、海道测量等领域,基于网络 RTK 的单北斗浮标能够为其提供较高精度的潮位测量信息,同时保障信息的安全可靠,具备一定的应用价值。

参考文献

- [1] 王盼龙,周兴华,王朝阳,等. 多系统 GNSS 浮标潮位提取精度研究[J]. 海洋测绘,2018,38(6): 41-44.
WANG P L, ZHOU X H, WANG CH Y, et al. Research on extraction tidal accuracy of multi-system GNSS buoys [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2018, 38(6): 41-44.
- [2] 漆随平,徐晓飞,厉运周,等. 基于全球卫星导航系统的海洋环境监测方法研究综述[J]. 山东科学,2024, 37(2): 1-11.
QI S P, XU X F, LI Y ZH, et al. Review of marine environment monitoring methods based on GNSS technology [J]. Shandong Science, 2024, 37(2): 1-11.
- [3] 邹伟,王世明. 卫星导航系统在海洋工程中的应用[J].

全球定位系统,2016,41(3): 121-125.

ZOU W, WANG SH M. Application of satellite navigation systems in marine engineering [J]. GNSS World of China, 2016, 41(3): 121-125.

- [4] LI X X, GE M R, DAI X L, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, Beidou, and Galileo [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(6): 607-635.
- [5] YANG CH F, YANG J, YANG J L, et al. The international development strategy of the large-scale application of Beidou navigation satellite system [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 1-12.
- [6] 王瑛,边朗,杨涛,等. 卫星导航技术发展综述 [J]. 海洋测绘,2025,22(S1): 20-34.
WANG Y, BIAN L, YANG T, et al. A review of the development of satellite navigation technology [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2025, 22(S1): 20-34.
- [7] 何志强,王文浩,郭冉. 基于 GNSS 的综合观测浮标系统初步设计 [J]. 声学与电子工程,2021(3): 22-26,29.
HE ZH Q, WANG W H, GUO R. Preliminary design of an integrated GNSS-based observation buoy system [J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2021(3): 22-26,29.
- [8] 梁冠辉,周兴华,周东旭,等. 基于后处理载波相位差分 GPS 技术的验潮浮标 [J]. 海洋测绘,2017,37(3): 49-52.
LIANG G H, ZHOU X H, ZHOU D X, et al. A buoy for tidal measurement based on after-processing

- carrier-phase differential GPS technology [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(3): 49-52.
- [9] 赵建虎,董江,柯灏,等. 远距离高精度GPS潮汐观测及垂直基准转换研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(6): 761-766.
- ZHAO J H, DONG J, KE H, et al. High precision GPS tide measurement method in a far-distance and transformation model for the vertical datum [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 761-766.
- [10] DI M W, GUO B F, LIU Y CH, et al. Sea surface height measurement using GNSS buoy based on carrier phase differential positioning [C]. 2024 13th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2024: 200-205.
- [11] BENDER L C III, HOWDEN S D, DODD D, et al. Wave heights during Hurricane Katrina: An evaluation of PPP and PPK measurements of the vertical displacement of the GPS antenna [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 27(10): 1760-1768.
- [12] 王朝周,周兴华,李延刚,等. 远距离GNSS潮位测量精度的影响因素研究[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(3): 1-6.
- WANG CH Y, ZHOU X H, LI Y G, et al. Research on the influence factors in the precision of long range GNSS tidal measurement [J]. *Ocean Technology*, 2017, 36(3): 1-6.
- [13] YAN ZH F, GUO J Y, ZHOU M SH, et al. Short-term ocean tidal parameters estimated from high-rate buoy GNSS data [J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(11): 7960-7970.
- [14] FILLER V, KOSTELECKY J. Monitoring of networked RTK reference stations for coordinate reference system realization and maintenance-case study of the Czech Republic [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2025, 19(2): 333-345.
- [15] JONGRUJINAN T, SATIRAPOD C. Stochastic modeling for VRS network-based GNSS RTK with residual interpolation uncertainty [J]. *Journal of Applied Geodesy*, 2020, 14(3): 317-325.
- [16] 宋伟,毛威,张益泽. GNSS RTK定位技术的发展历程和机遇[J]. *世界科技研究与发展*, 2023, 45(3): 294-305.
- SONG W, MAO W, ZHANG Y Z. Achievements and opportunities in the development of GNSS RTK positioning technology [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2023, 45(3): 294-305.
- [17] 姜广旭,邓晰元,沈建,等. 我国高程系统的历史沿革及基面换算关系研究[J]. *吉林水利*, 2023(3): 36-40.
- JIANG G X, DENG X Y, SHEN J, et al. Research on historical evolution of elevation system in China and conversion relationship among datums [J]. *Jilin Water Resources*, 2023(3): 36-40.
- [18] 霍东亚. 水文测站多种高程基准之间的转换分析[J]. *山东水利*, 2024(9): 14-16.
- HUO D Y. Analysis of conversion between various elevation datum of hydrologic station [J]. *Shandong Water Resources*, 2024(9): 14-16.
- [19] 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.
- 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): 1239-1247.
- [20] 张文勤,周文清,邵毅. 基于双天线GNSS/SINS组合的风速测量运动补偿方案设计[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(19): 1-6.
- ZHANG W Q, ZHOU W Q, SHAO Y. Design of wind speed measurement motion compensation scheme based on dual-antenna GNSS/SINS integrated system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(19): 1-6.
- [21] 潘存鸿,郑君,曾剑,等. 杭州湾年最大潮差分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2021, 36(2): 201-209.
- PAN C H, ZHENG J, ZENG J, et al. Analysis of annual maximum tidal range in Hangzhou Bay [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(2): 201-209.
- [22] 蔡肇元,刘京城. 潮位测量技术及其现状思考[J]. *长江信息通信*, 2024, 37(1): 67-69.
- CAI ZH Y, LIU J CH. Tide level measurement technology and their current situation consideration [J]. *Changjiang Information & Communications*, 2024, 37(1): 67-69.

作者简介

蒋泉宇, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail: jiangxiaoyu_1226@163.com

周文清, 硕士, 工程师, 主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail: sohotope@163.com

邵毅(通信作者), 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为海洋观测技术。

E-mail: shaoyi8090@163.com