

舰载 POS MV 数据采集与处理技术的 水上定位性能 *

毕继鑫¹, 丁世一²

(1. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 浙江 杭州 310014;
2. 哈尔滨市勘察测绘研究院, 黑龙江 哈尔滨 150010)

摘要: 为提高水运工程复杂作业环境舰载水下声学设备的定位能力, 研究了舰载 POS MV 系统组成单元及搭载的 Applanix IN-Fusion GNSS/INS 组合定位基本原理。基于 POSPac MMS 构建了 4 种 POS 数据后处理模式选择策略及方法流程, 形成了舰载 POS 数据采集与处理核心技术体系。依托温岭航道疏浚工程扫测项目开展离岸 35 km 持续 2.17 h 的 POS MV WaveMaster 数据采集及处理工程实践。研究结果表明: 1) POS MV 在非星站差分情况下, 其实时定位平面、高程精度均为米级, 横纵摇、艏向平均精度分别为 0.026°、0.029°。2) 在 POSPac MMS 的 PP-RTX 和 SingleBase 后处理模式下, 平面、高程定位精度提高至 2~3 cm, 横摇、艏向平均精度分别提高至 0.012°、0.015°, 真垂荡数据中误差稳定在 0.01 m。3) POS MV 可以实时获取稳定、有效的惯导数据, 辅助后处理技术能够为水运工程提供准确的位置和姿态信息。

关键词: 水运工程; POS MV; GNSS/INS 组合惯性导航; 定位定向测姿; IN-Fusion 技术; 方位测量系统

中图分类号: P 229.5; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0041-09

Positioning performance of shipborne POS MV data acquisition and processing technology on water

BI Jixin¹, DING Shiyi²

(1. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co. Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. Harbin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Harbin 150010, China)

Abstract: To improve the positioning ability of shipborne underwater acoustic equipment in complex operating environments of port and waterway engineering, this paper investigates the components of the shipborne position and orientation system for marine vessels (POS MV) and the basic principle of integrated global navigation satellite system/inertial navigation system (GNSS/INS) positioning by the onboard Applanix IN-Fusion. Specifically, it develops four kinds of mode selection strategies for POS data post-processing and the procedures of corresponding methods on the basis of POSPac MMS and fosters the core technology system for shipborne POS data acquisition and processing. Then, relying on the scanning survey project of the Wenling Waterway dredging project, the paper presents the engineering practice of POS MV WaveMaster data acquisition and processing conducted 35 km offshore for 2.17 h. The results suggest the following conclusions: 1) In the case of non-satellite difference, the real-time plane and elevation positioning accuracy of POS MV are both at meter level, and its average roll, pitch, and heading positioning accuracy are 0.026°, 0.026°, and 0.029°, respectively. 2) In the Post-processing Real Time eXtended

收稿日期: 2022-06-11

*基金项目: 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司科技项目 (HDC&A-KJ-2021-05、HDC&A-KJ-2021-09); 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技项目 (KY2017-02-75)

作者简介: 毕继鑫 (1994—), 男, 硕士, 注册测绘师, 工程师, 从事工程测量及安全监测方面的研究。

(PP-RTX) and SingleBase post-processing modes of POSPac MMS, the plane and elevation positioning accuracy increase to 2–3 cm, and the average roll and heading positioning accuracy rise to 0.012° and 0.015°, respectively, with a stable mean square error in true heave data of 0.01 m. 3) POS MV can obtain stable and effective inertial navigation data in real time, and auxiliary post-processing technology can provide accurate position and attitude information for port and waterway engineering.

Keywords: port and waterway engineering; POS MV; integrated GNSS/INS inertial navigation; positioning, orientation, and attitude measurement; IN-Fusion technology; azimuth measurement system

水运工程是我国交通建设事业的重要组成部分^[1], 其可研、初设、技施、运营阶段均需按工程需求采用单波束、多波束、侧扫声呐、三维实时声呐开展水下地形测量^[2]、障碍物扫测^[3]、水下设备安装^[4]、冲刷监测^[5]等涉水工程, 其中水深定位是上述工作的重要组成部分, 也是保障成果质量的决定因素, 随着水下测量装备自身技术的不断发展, 如何提高上述工程作业中舰载定位系统的精度已成为水下测量领域亟待解决的关键问题。

按水运工程所涉及的测量环境特点, 目前工程实践中的定位方法主要有以下 4 类: 1) 无线电信标(Radio Beacon Navigation, RBN)差分导航定位^[6]。测量船采用信标机接收由我国建成的中国沿海无线电指向标-差分全球定位系统所播发的DGNSS 修正信息进行实时动态差分定位(Real Time Kinematic, RTK), 该方法虽覆盖范围离岸约 300 km, 但定位精度较低。2) 自架 RTK 基准站实时动态差分导航定位^[7]。该方法是将 GNSS 接收机、电台及发射天线等设备布置在岸边控制点建立基准站, 测量船设置与基准站接收机相同的电台频率接收其发射的多星差分数据, 得到平面精度 $1 \text{ cm} + 1 \times 10^{-6} D$ 、高程精度 $2 \text{ cm} + 1 \times 10^{-6} D$ 的定位数据, 但 GNSS-RTK 技术的有效通讯距离 D 普遍小于 20 km。3) 星基增强差分导航定位^[8]。星基增强系统(Satellite Based Augmentation System, SBAS)是基于布设在全球的连续运行参考站分析并建立各类 GNSS 观测误差模型, 计算各误差源的修正值并传递给测量船, 但测量船需等待较长的收敛时间方可达到可靠的定位精度。4) GNSS/INS 组合导航定

位^[9]。该方法将 GNSS 和 INS 观测值或计算值进行多种组合, 兼顾了 GNSS 导航定位的精度和惯性导航系统(Intertial Navigation System, INS)的抗干扰能力, 特别适用于离岸较远的水运工程施工定位。

近年来, 加拿大 Applanix 公司为充分发挥 GNSS、INS 各自优势, 将 GNSS 方位测量系统与 INS 进行深度融合, 利用惯导瞬时高精度及 GNSS 长时间高精度测向特点所研制的 POS MV 系列定位定向测姿系统已成为水运工程 GNSS/INS 组合导航定位的最佳商用产品。为探究该系列产品在简单及复杂环境下的定位精度及稳定性, 笔者构建 Applanix 船载 POS 数据采集与处理体系, 依托温岭航道疏浚工程扫测项目将 POS MV WaveMaster 集成于 R2SONIC 2024 开展工程实践, 事后辅助 POSPac MMS 数据后处理软件进行差分定位解算, 分析 Applanix POS MV 定位定向测姿系统在海上导航定位中的性能。

1 POS MV 定位定向测姿系统

POS MV 在各种复杂环境下将 GNSS 数据与来自 IMU 的角速度和加速度以及来自方位角测量系统(GNSS Azimuth Measurement System, GAMS)的航向数据进行融合, 是为了提供稳定而精确的位置参考所研制的定位定向测姿系统(图 1), 可采用毫秒级的时间精度对位置(经度、纬度和高程)、方向(横摇角、纵摇角和航向角)、涌浪、速度等性能指标进行同步, 且在 GNSS 接收信号不连续或存在多路径效应情况下, 具有消除定位漂移和快速重新捕获信号的特点。



图 1 Applanix POS MV 硬件

1.1 GNSS 全球导航定位系统

POS MV 的 GNSS 全球导航定位系统有 2 个嵌入式 GNSS 接收器和天线, 其中主 GNSS 接收器用于向 POS MV 提供位置、速度、时间和原始观测信息, GNSS 接收器内置的天宝主板兼容 GPS、Beidou、GLONASS、Galileo、QZSS, 并支持直接导入差分数据实现 RTK 定位。此外, 时间同步误差是水运工程测量的重要误差源, POS MV 通过 GNSS 的 1 PPS 信号实现微秒级时间同步。

1.2 INS 惯性导航系统

POS MV 的 INS 为捷联式惯性导航系统, 由 3 个高精度角速率陀螺仪传感器和 3 个三轴正交的高质量加速度计组成, 可固定在测量船舶并在高动态环境下测量 3 个姿态的速度和角速率, 进而计算横摇、纵摇、航向、垂荡。此外, 在 GNSS 定位结果比较差时, 若传递 IMU 一个初始位置, IMU 可通过整合的加速度计和陀螺仪计算位置偏差, 进而得到一个新的位置, 保持一定时间的位置延续。

1.3 GAMS 方位测量系统

如图 2 所示, GAMS 方位测量系统由安装距离 2~5 m 的双频主、辅 GNSS 天线组成 GNSS 罗经, 基于载波相位差分测量天线 B 与天线 A 的距离, 计算天线 A、B 间的航向 ΔR_{AB} , 为 IMU 提供航向辅助数据, 再将航向角和惯导数据输入卡尔曼滤波器参与解算, 可降低 GNSS 载波相位数据噪声。GAMS 连续检校 IMU, 确保只要有 GNSS 信号覆盖, 测量船航向即不发生漂移, 减小高纬度地区和测量船运动航向对定位精度降低的影响^[10]。

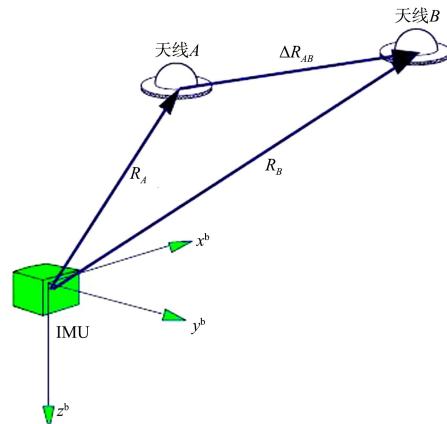


图 2 方位测量系统

1.4 POS 计算机系统

POS 计算机系统(POS Computer System, PCS)提供导航模式和备用模式, 获取和处理来自 POS MV 的 GNSS、IMU 传感器数据。备用模式不执行任何数据处理, 只接收命令信息并搭配 MV POSView 存储获取 GNSS、IMU 原始数据, 用于 POSPac 数据后理解算及分析。导航模式 PCS 基于内嵌在主机的松耦合、紧耦合算法电子主板实时计算并输出测量船舶高精度定位、定姿参数, 并根据采集数据情况自行选择解算策略。

2 Applanix IN-Fusion 技术架构体系

IN-Fusion 技术是 Applanix 基于深层传感器集成和误差模型提出的 GNSS 辅助 INS 紧耦合新方法^[11], 是 POS MV 系列产品的核心技术, 其技术体系架构见图 3, 采用与集中式一体化卡尔曼滤波器紧密联系的模糊度估计解算技术, 利用惯性数据进行 GNSS 浮点模糊度估计, 然后使用 OTF 模糊度解算算法快速获取整周模糊度并将其回馈至卡尔曼滤波器。此外, 不同于传统 GNSS/INS 组合导航采用 GNSS 滤波器的方式, In-Fusion 基于单一紧密集成的卡尔曼滤波器直接处理 GNSS 接收机伪距和载波相位原始观测值, 对 INS 速度和姿态误差进行递归最小二乘估计, 用于修正及辅助 INS 系统输出定位、定姿数据。IN-Fusion 技术在实时处理理解算中的应用称为惯性辅助实时动态定位 (Inertial Assisted Real-Time Kinematic, IARTK), 在

后处理解算中的应用称为惯性辅助动态整周模糊度解算 (Inertially Aided Kinematic Ambiguity Resolution, IAKAR)。

IN-Fusion 技术体系架构中还将 GAMS 集成至紧耦合卡尔曼滤波器, GAMS 能独立于纬度和船舶动力学计算精确的航向, 削弱高纬度地区 POS MV 航向精度低的问题, 其航向观测值仅作为卡尔

曼滤波的初始值, 不直接影响数据后处理定位精度, 较高的方位精度使 POS MV 在 GNSS 信号遮挡时具有较小的位置漂移。此外, IN-Fusion 技术体系架构包含 Heave 滤波器, 对估计的 INS 系统垂直加速度先进行组合双重积分, 后进行高通滤波, 在实时模式执行滤波得到实时垂荡, 在后处理模式执行滤波得到真 (延迟) 垂荡。

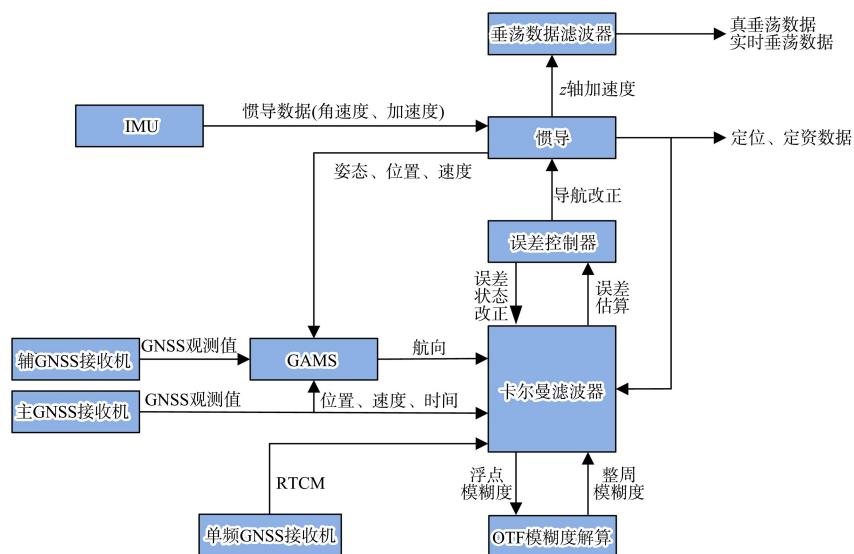


图 3 基于 Applanix IN-Fusion 技术的 GNSS 辅助 INS 架构体系

当 GNSS 卫星信号出现周跳、中断或接收卫星数量少于 4 颗致使无法计算位置和速度时, INS 方位参与 GAMS 方位计算, IN-Fusion 技术使系统保持对前期模糊度的记忆, 立即快速重新估计载波相位模糊度, 系统基于 IN-Fusion 技术直接访问 GNSS 所有信息用于辅助 INS 定位定姿, 上述环节共同作用可极大降低惯导误差, 持续最佳定位精度。IAKAR 后处理时利用信号遮挡前期和后期的数据进行前向、后向、精确前向、平滑共 4 个处理步骤解算模糊度, 可使系统解算更加稳定和快速, 提高系统的重捕获能力, 帮助系统更快恢复整周模糊度解算, 极大减少或消除了传统 GNSS/INS 组合定位受 GNSS 信号不佳或观测卫星数量的限制, 最终生成高精度以及可靠的轨迹最佳估计 (SBET) 数据。

3 POSPac MMS 惯性导航辅助动态后处理

3.1 POSPac MMS 数据后处理模块

POSPac MMS 是 Applanix 公司专为基于 POS MV 采集的船载 GNSS 与 IMU 数据生成平滑轨迹最佳估计成果而设计开发的强大集成式后处理软件^[12], 内置多种测量船和参考 GNSS 数据间的不同组合处理策略, 采用的深层次传感器融合和误差模型可极大提高水下测量定位定姿数据解算的精确度和可靠性。

3.1.1 IN-Fusion SingleBase 数据后处理模块

IN-Fusion SingleBase 模块将 IN-Fusion 技术与单基准站数据处理技术进行深层融合, 形成单基准站紧组合差分 GNSS 数据处理技术, 该方法仅使用一个基站作为参考站, 将 GNSS 接收机原始观测值执行惯性导航辅助动态模糊度解算 (IAKAR),

能克服传统单基准站模式所限制的测量船与基准站间 20 km 的距离要求, 且在 GNSS 中断后保持固定整周模糊度持续进行高精度定位。

3.1.2 IN-Fusion SmartBase 数据后处理模块

IN-FusionSmartBase 模块将 IN-Fusion 技术与 GNSS 后处理虚拟参考站技术进行融合, 基于精确建立的测区对流层、电离层延迟几何误差模型以及卫星钟差和轨道参数, 先在靠近测量船的位置生成虚拟参考站并计算其 GNSS 观测数据, 再基于 IN-Fusion 技术将虚拟参考站观测数据以及测量船流动站的观测数据与惯性测量单元记录的数据同时进行后处理, 解算 GNSS 整周模糊度和测量船位置与姿态。

3.1.3 IN-Fusion PP-RTX 数据后处理模块

IN-Fusion PP – RTX 模块将 IN-Fusion 技术与 Trimble 实时差分扩展后处理技术 (Post-processing Real Time eXtended, RTX)^[13] 进行融合, 形成一种 RTX 辅助惯导高精度后处理技术, POSPac 将导入的测量船轨迹信息压缩后通过互联网上传至 RTX 服务器, RTX 服务器利用全球分布式跟踪站网络的实时 GNSS 数据生成精确卫星轨道、卫星时钟等 Trimble RTX 校正, 形成包含差分数据的 RTX Observables 文件, 再通过互联网输出至 POSPac, 最后使用卡尔曼滤波器优化平滑处理生成最终的 RTX 辅助惯导成果, 实现测量船在没有自架基准站情况

下的移动定位。

3.1.4 IN-Fusion PPP 数据后处理模块

IN-FusionPPP 数据后处理模块将 IN-Fusion 技术与精密单点定位技术 (Precise Point Positioning, PPP) 进行融合, 形成一种惯性辅助 PPP 后处理技术, 测量船在未安装基准站的开阔海域且未开通 RTX 服务的情况下, 通过 IN-Fusion PPP 模块可以获得分米级定位成果。此外, 惯性辅助 PPP 模块解决了传统 PPP 算法在测量船进行转弯等大幅度操作时, 因载波相位跟踪受损需重新进行精度收敛的问题。

3.2 船载 POS 数据后处理模式选取策略

船载 POS 数据处理方法的选择与基准站的数量以及所要求的数据处理精度有关, 其处理方法选取策略见图 4, 当测区岸边基准站数量多于 3 个时, 应选择 IN-Fusion SmartBase 模块基于虚拟参考站惯导辅助动态后处理技术进行 POS 数据解算; 当岸边含 1~3 个基准站时, 可选择其中 1 个离海岸线最近且信号最稳定的基准站基于 IN-Fusion SingleBase 模块的单基准站紧组合惯导辅助动态后处理技术或实时差分 GNSS 处理技术进行 POS 数据解算; 当岸边不含基准站时, 可基于 WASS、EGNOS、MSAS 等星基增强系统进行星站差分 GNSS 实时动态定位, 或基于 IN-Fusion PP-RTX 辅助惯性后处理技术、IN-Fusion PPP 惯性辅助精密单点定位技术解算 POS 数据。

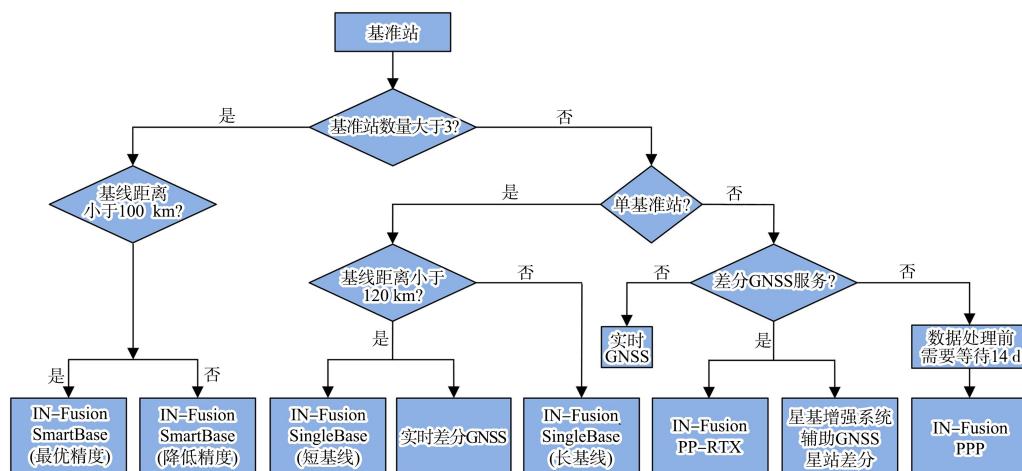


图 4 船载 POS 数据处理模式选取策略

3.3 数据后处理流程

将 PCS 在备用模式记录的 GNSS/INS 组合导航原始 POS 数据、基准站 GNSS 观测数据、精密星历数据导入 POSPac MMS 后，软件自动解码主、辅 GNSS 天线数据并对 IMU 数据进行连续性检查，然而数据采集阶段量取位于测量船的 POS MV 系

统各传感器间的偏移量势必存在误差，故先基于考虑定位环境特点所选取的数据处理策略进行前向处理准确计算偏移量，将偏移量固定后再以约 200 次/s 的速度全向处理计算测量船位置、方位角、速度、加速度和角速率，随后平滑处理得到 SBET，其数据处理流程见图 5。

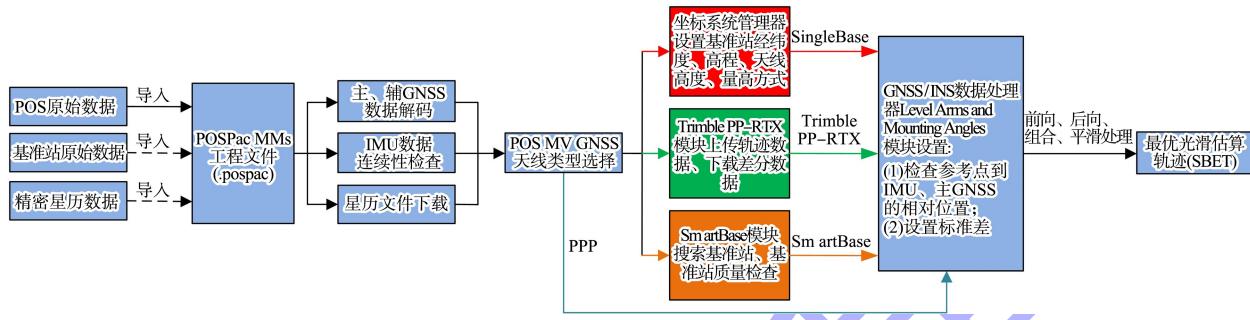


图 5 基于 POSPac MMS 软件的 POS 数据后处理流程

4 工程实例

4.1 工程概况

温岭航道疏浚工程整体离岸约 35 km，水深 3~26 m。为分析 Applanix 船载 POS MV 在水运工程导航定位中的性能，在陆岸首级控制点架设基准站，海上测量船集成 POS MV WaveMaster 与 R2Sonic 2024 多波束换能器，开展温岭航道疏浚扫测。基于 MV POSView 软件调试并运行 POS MV 硬件，待姿态、航向、位置、速度和实时垂荡精度指示灯全部在定义的精度阈值内而显示为绿色时，在备用模式记录 POS MV 组合导航原始数据。经统计，共记录 7 801 个历元(约 2.17 h)的 POS 数据。

4.2 卫星连续可用性与 PDOP 值分析

图 6 为测量船在所有历元时段内跟踪的 GPS、GLONASS 卫星数量，分析图 6 可知，该时段内测量船接收卫星数量良好、无 GNSS 失锁现象。图 7 为测量船在本时段的位置精度因子 (Position Dilution of Precision, PDOP)，《全球定位系统实时动态测量 (RTK) 技术规范》^[14] 中规定 $\text{PDOP} \in (0, 4)$ 时观测窗口状态为良好、 $\text{PDOP} \in [4, 6]$ 时观测窗口状态为可用，分析图 7 可知，基于 POS MV 的测量船导航定位 PDOP 值在大部分时段内表

现为良好，个别时段 PDOP 值表现为可用，但均符合规范精度要求。

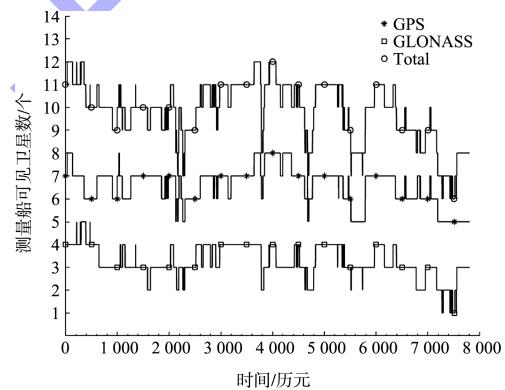


图 6 测量船可见卫星数

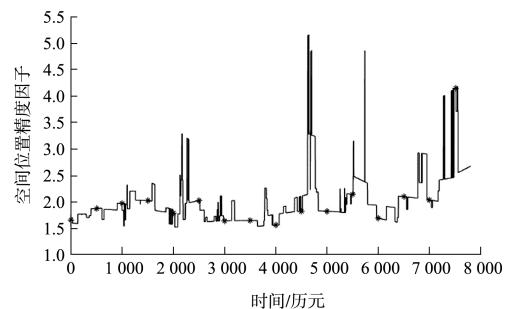


图 7 空间位置精度因子

4.3 实时导航定位性能分析

对获取的测量船实时轨迹进行定位定向测姿数据中误差计算，以 GPS 历元为横坐标，分

别以定位中误差、测姿中误差为纵坐标, 绘制测量船实时轨迹数据定位定向测姿中误差变化, 见图 8、9。

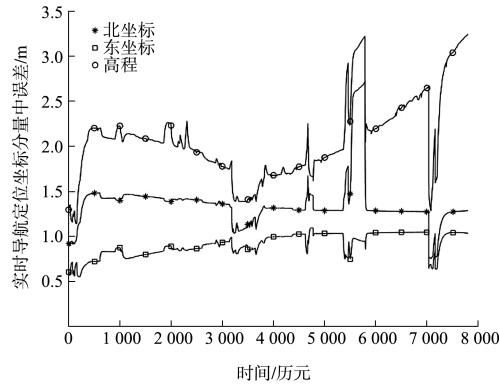


图 8 实时导航定位坐标分量中误差

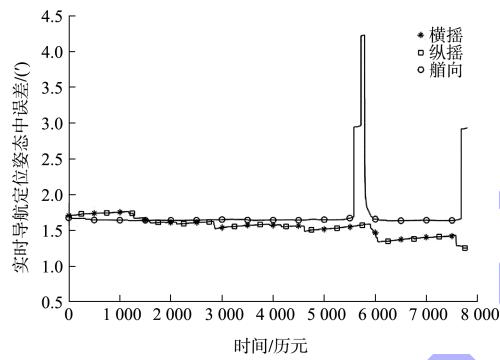


图 9 实时导航定位姿态中误差

分析图 8、9 可知, 北坐标中误差最大值为 2.718 m, 最小值为 0.757 m, 平均值为 1.356 m; 东坐标中误差最大值为 1.097 m, 最小值为 0.553 m, 平均值为 0.912 m; 高程中误差最大值为 3.242 m, 最小值为 1.140 m, 平均值为 2.078 m。横、纵摇中误差最大值为 1.757', 最小值为 1.250', 平均值为 1.550'; 舵向中误差最大值为 4.227', 最小值为 1.629', 平均值为 1.711'。综合北坐标和东坐标可知实时导航平面定位中误差最大值为 2.878 m, 最小值为 1.004 m, 平均值为 1.642 m, 不满足涉海测量相关规范^[15]对导航定位的精度要求。

4.4 后处理导航定位性能分析

分别基于 POSPac 软件 IN-Fusion PP-RTX、IN-Fusion SingleBase 数据后处理模块对获取的测量船轨迹 POS 数据进行差分 GNSS 后处理和

定位测姿数据中误差计算, 以 GPS 历元为横坐标, 分别以定位误差、测姿误差为纵坐标, 绘制测量船实时轨迹数据定位测姿误差变化, 见图 10、11。

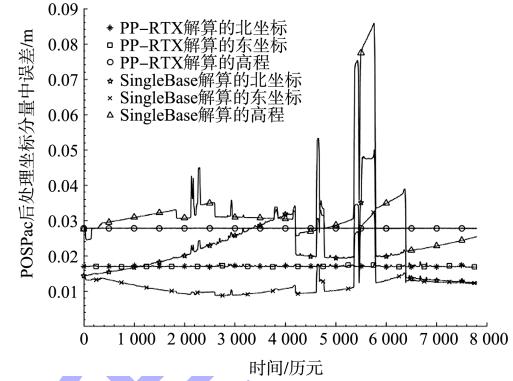


图 10 POSPac 后处理坐标分量中误差

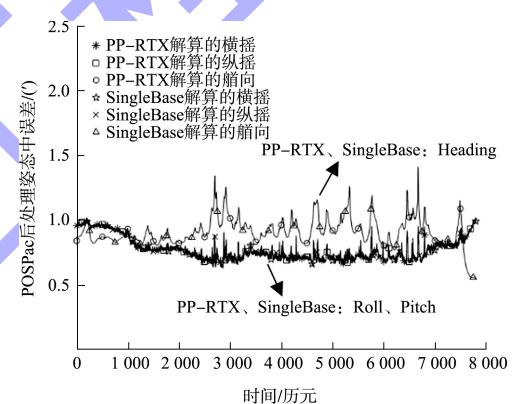


图 11 POSPac 后处理姿态中误差

分析图 10 可知, 基于 IN-Fusion PP-RTX 计算的测量船北坐标和东坐标中误差均相同, 最大值为 0.018 m, 最小值为 0.016 m, 平均值为 0.017 m; 高程中误差恒为 0.028 m。基于 IN-Fusion SingleBase 计算的测量船北坐标中误差最大值为 0.050 m, 最小值为 0.012 m, 平均值为 0.021 m; 东坐标中误差最大值为 0.032, 最小值为 0.009 m, 平均值为 0.012 m; 高程中误差最大值为 0.086 m, 最小值为 0.021 m, 平均值为 0.032 m。

分析图 11 可知, IN-Fusion PP-RTX 与 IN-Fusion SingleBase 两种不同处理模式下计算的测量船横摇、纵摇、艏摇 RMSE 值均相同, 横、纵摇最大值为 1.016', 最小值为 0.632', 平均值为 0.775'; 艄向最大值为 1.410', 最小值为 0.549', 平均值为 0.907'。

4.5 垂荡数据精度分析

图 12 为测量船基于实时姿态的垂荡数据与基于 POSPac 数据后处理的真(延迟)垂荡数据, 两种垂荡数据在相位上基本保持一致, 其偏差约在 5 cm 内。图 13 为实时垂荡和真(延迟)垂荡中误差, 分析图 13 可知基于 POSPac 数据后处理的真(延迟)垂荡数据得到较大提高, 误差稳定在 0.01 m。

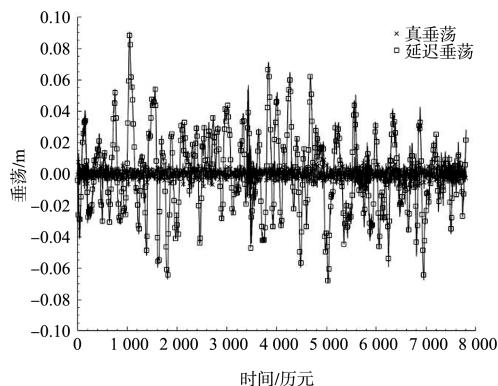


图 12 实时垂荡与真(延迟)垂荡值

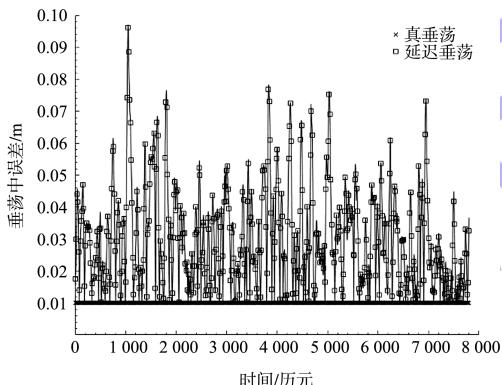


图 13 实时垂荡与真(延迟)垂荡中误差

5 结论

1) Applanix POS MV 定位定向测姿系统安装方便、操作简单, 在水运工程导航定位工程实践中工作稳定、可靠, 其兼容的多源 GNSS 系统丰富的数据资源, 使测量船具备优良的天顶卫星空间分布几何结构。

2) POSPac MMS 数据后处理软件具备船载 POS MV 定位定向测姿数据和参考 GNSS 数据间的多种组合数据处理策略, 其中 IN-Fusion Smart-Base、IN-Fusion SingleBase 均提高了参考基准站的通讯距离和定位精度, IN-Fusion PP-RTX 可在无

基准站情况下实现惯导数据后处理, IN-Fusion PPP 解决了在未安置基准站且未开通 RTX 服务时获取分米级定位成果的问题。

3) POS MV 在非星站差分情况下的实时导航定位中误差平均值为 1.642 m, 仅满足测量船海上导航的需求, 而 IN-Fusion PP-RTX 与 IN-Fusion SingleBase 数据后处理模式的平面定位中误差平均值均为 0.024 2 m, 横摇、纵摇中误差平均值均为 0.775'(0.012°), 舵向中误差平均值均为 0.907'(0.015°), 远高于实时导航定位, 满足水运工程测量的精度要求, 且 IN-Fusion PP-RTX 与 IN-Fusion SingleBase 在惯导定位定向测姿数据后处理方面具有精度一致性。

4) 基于 POS MV 组合导航数据解算的真(延迟)垂荡中误差 0.01m, IN-Fusion PP-RTX 与 IN-Fusion SingleBase 后处理高程中误差平均值分别为 0.028、0.032 m, 可提高基于 GNSS 无验潮的高程基准统一的精度, 为简化传统基于验潮模式的平均海平面传递工作提供了技术支撑。

5) POS MV 定位定向测姿系统与 NORBIT、Teledyne Reason、KONGSBERG、R2SONIC、Coda Octopus 等国际主流水下声呐厂家的硬件设备具有很好的兼容性, 可为多波束、三维实时声呐、侧扫声呐等声学涉水测量数据后处理提供可靠的定位数据保障, 能有效提高水下声呐走航式测量条带的拼接效果及成果质量。

参考文献:

- [1] 杨曦, 胡拓. 水运工程现状及发展探讨[J]. 中国水运, 2020(2): 75-76.
- [2] 黄亚平, 朱春春. 三维地面模型测量技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(8): 145-149.
- [3] 沈立祥, 陈浩, 严文晗. 侧扫声纳在护底工程软体排检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2018, 38(3): 57-59, 68.
- [4] 刘天云, 李社生. 声呐三维成像技术在新型护面块体 ACCROPODE™ II 安装中的应用 [J]. 水运工程, 2018(9): 198-204.
- [5] 谢华伟, 于传见, 杨斌. 白茆沙持续冲刷对鑫海码头的结构安全影响[J]. 水运工程, 2022(6): 67-72.

- [6] 王成, 崔健慧, 施闯, 等. 中国沿海 RBN-DGNSS 系统北斗差分定位性能测试及分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(3): 412-415, 423.
- [7] 王建忠, 王玉龙. 多波束与 RTK 三维水深测量技术的联合应用[J]. 测绘工程, 2014, 23(4): 65-68.
- [8] 周东旭, 唐秋华, 张化疑, 等. 星站差分与 PPP 技术在深远海调查中的位置服务精度分析[J]. 海洋通报, 2020, 39(2): 215-222.
- [9] 鲍耿忠, 苏永恒, 马高峰, 等. 卫星对 GNSS/INS 组合导航精度的影响分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(11): 148-155.
- [10] 冯义楷, 丁继胜, 杨龙, 等. 基于 GNSS 方位辅助惯性导航系统的水下地形精密测量技术[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(5): 43-48.
- [11] BRUNO S, JOE H. Applanix IN-Fusion™ Technology Explained[M]. Richmond Hill: Applanix Corporation, 2016.
- [12] JOE H, EDITH R. The Applanix SmartBase™ Software for Improved Robustness, Accuracy, and Productivity of Mobile Mapping and Positioning [M]. Richmond Hill: Applanix Corporation, 2015.
- [13] 徐以厅, 宋济宇. Trimble RTX 技术综述[J]. 测绘通报, 2014(2): 137-138.
- [14] 国家测绘局. 全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范: CH/T2009—2010 [S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [15] 海军海洋测绘研究所. 海道测量规范: GB 12327—1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 30 页)

参考文献:

- [1] 刘新荣, 李栋梁, 张梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1291-1300.
- [2] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 基于核磁共振技术的弱胶结砂岩干湿循环损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 825-831.
- [3] LI C M, LIU N, LIU W R, et al. Study on characteristics of energy storage and acoustic emission of rock under different moisture content[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1-15.
- [4] HALE P A, SHAKOOR A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones [J]. Environmental & engineering geoscience, 2003, 9(2): 117-130.
- [5] 陈绪新, 付厚利, 秦哲, 等. 水化学作用及干湿循环对蚀变岩力学性质影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(1): 98-102.
- [6] 谢凯楠, 姜德义, 孙中光, 等. 基于低场核磁共振的干湿循环对泥质砂岩微观结构劣化特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 653-659, 667.
- [7] ZHAO Y, LI J T, MA G. Experimental study on the damage and degradation characteristics of red sandstone after dry and wet cycling by low magnetic field nuclear magnetic resonance (NMR) technique [J]. Geofluids, 2021, 20: 1-8.
- [8] 张丙吉, 辛全明, 季铁军, 等. 干湿循环作用下砂岩力学特性及能量损伤演化[J]. 水运工程, 2022(1): 192-197, 219.
- [9] 白松涛, 程道解, 万金彬, 等. 砂岩岩石核磁共振 T_2 谱定量表征[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 382-391, 414.
- [10] 林斌, 徐冬. 不同岩性岩石的单轴抗压强度与弹性模量关系[J]. 煤矿安全, 2017, 48(3): 160-162, 166.
- [11] 尤明庆. 岩石的损伤、黏结和摩擦特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 554-560.
- [12] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 732-739.

(本文编辑 王璁)