

单瑞, 李浩军, 刘慧敏, 等. GNSS PPP/INS 紧组合模式下的远海无验潮水深测量[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 87-93.

SHAN Rui, LI Haojun, LIU Huimin, et al. Non-tidal bathymetry in the open sea with GNSS-PPP/INS tight combination mode[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 87-93.

GNSS PPP/INS 紧组合模式下的远海无验潮水深测量

单瑞^{1,2}, 李浩军¹, 刘慧敏², 赵钊², 董凌宇², 杜凯²

(1 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237)

摘要:为实现高精度远海水深测量潮位改正, 基于 GNSS/INS 组合系统开展了远海多波束无验潮水深测量方法研究, 并给出了无验潮水深测量基本原理及实施技术流程。结合 GNSS/INS 组合形式及滤波原理, 分别探讨了在 GNSS 有效和失效状态下 PPP/INS 松组合与紧组合的性能差异。以 PPP/INS 紧组合解算结果为基础进行无验潮水深测量改正, 并与传统预报潮位改正方法进行了对比, 经试验验证, 基于 PPP/INS 紧组合模式下的远海无验潮水深测量准确度可达 0.14 m, 并有效消除了动态吃水影响, 在典型水深断面处的水深测量准确度明显优于预报潮位改正模式。

关键词:全球导航卫星系统; 惯性导航系统; PPP/INS 紧组合; 无验潮水深测量

中图分类号: P736; P228

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.099

0 引言

在以多波束测深系统为代表的水深测量工作中, 由于潮汐影响的存在, 除进行必要的换能器位置、姿态、吃水、声速、时间延迟等改正以外, 还需进行水位改正才能得到基于垂直基准的成果水深。传统水位改正一般通过潮位观测(包括人工验潮及电子验潮仪)、潮位推算及预报等方式来解决。其中, 人工验潮作业效率低, 且存在人为主观因素导致的读数误差; 电子验潮仪尽管测量精度较高, 但会面临仪器故障或丢失等问题。而潮位观测方法主要用于近海水深测量, 往往需要设置多个潮位站才能有效地对水位进行改正^[1]。在远离岸边的远海区域, 布设验潮站的难度大、成本高, 往往采用潮位推算及预报方法获取潮位^[2-3]; 但在远海局部水位变化受支流、异常水文现象等因素影响时, 仅通过模型计算获得的潮位变化与真实情况存在较大的差异^[2-3]。

目前, 海洋测绘工程应用中的两大主流导航定

位手段为全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)与惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)^[4]。近年来, 随着动态 GNSS 技术的广泛应用, 无验潮水深测量技术也逐步发展起来^[5-9]。目前用于无验潮水深测量的 GNSS 动态测量技术主要有实时载波相位差分技术(Real-Time Kinematic, RTK)、动态差分后处理技术(Post Processed Kinematic, PPK)、精密单点定位技术(Precise Point Positioning, PPP)等。其中 RTK 验潮技术的理论和算法比较成熟, 精度较高, 可实时得到厘米级验潮精度^[9-10]。但由于受数据通信链路的影响, RTK 最大有效作用距离一般在 15 km 以内, 仅适用于内水及近岸海域, 无法用于远距离海域的精确潮汐观测。PPK 验潮技术利用精密星历和基准站的已知坐标, 通过事后处理模式, 在 80~100 km 范围内同样可获得厘米级的验潮精度^[6,11-12], 但在离岸超过 100 km 的远海海域该方法不再适用。此外, RTK 与 PPK 均要依赖基准站, 为测量工作增加了成本。PPP 技术因不依赖于基准站, 在实际应用中则更加灵活, 在远海精密潮汐观测中具有更大的应用潜力^[13]。

GNSS 可全天候为用户提供精确的位置、速度和时间信息, 且导航误差不会随时间积累, 但其在接收卫星信号时容易受外界干扰; INS 在工作时不受外界干扰, 短时间内具有极高的导航性能, 但其

收稿日期: 2022-04-08

资助项目: 国家自然科学基金(41406115, 42174021); 中国地质调查局项目(DD20191003)

作者简介: 单瑞(1985-), 男, 在读博士, 副研究员, 主要从事海洋测绘及海洋高精度导航定位技术应用方面的研究工作. E-mail: shanrui416@163.com

内部的陀螺仪和加速度计的误差会随时间逐渐累积,故难以长时间独立工作。GNSS 与 INS 具有很强的互补特性,可将二者组合在一起,有效利用各自的优点^[14-15]。本文综合考虑 GNSS 不同作业模式特点,利用 PPP/INS 组合具有无基准站限制、性能稳定可靠、定位精度高等诸多优点^[16-18],将其应用于远海多波束水深测量工作中。

本文首先详细阐述了远海 GNSS 无验潮水深测量及 GNSS/INS 组合导航原理,对 GNSS 短期失效情况下 PPP/INS 松组合与紧组合模式的性能表现进行了评估。在此基础上,利用 PPP/INS 紧组合结果经地球重力场模型改正后获取测区潮位变化,对实测多波束资料进行改正,并与传统预报潮位改正方法进行了精度对比分析。

1 无验潮水深测量基本原理

无验潮水深测量原理如图 1 所示。相较于传

统验潮模式,无验潮模式的本质是通过船载 GNSS 获取高精度大地高变化信息,从而进行在航潮位测量。图 1 中,INS 为高精度惯性导航系统,MBS (Multibeam Echosounder System) 为多波束系统。在进行无验潮水深测量数据处理时,通过建立严格的船体坐标系,且对各传感器进行时间同步,将高精度姿态数据、GNSS 天线大地高 h_{GNSS} 及 MBS 换能器距海底瞬时高度 $h_{水深}$ 等信息进行融合。顾及经姿态改正后的 GNSS 天线与 MBS 垂向安装偏差 d 及声速改正,即可直接确定该时刻基于椭球面的水深 $h_{大地高}$,经过垂直基准转换即可获得最终的成果水深数据。无验潮水深测量具体实施流程如图 2 所示。可以看出,无验潮水深测量有效消除了测量船吃水的影响;而采用常规验潮方式时,所测潮位变化是瞬时海面(或瞬时海面的短时平均值)基于特定基准面的高度变化,因此, $h_{水深}$ 还需进行吃水改正,包括因船舶航速变化等引起的动态吃水。

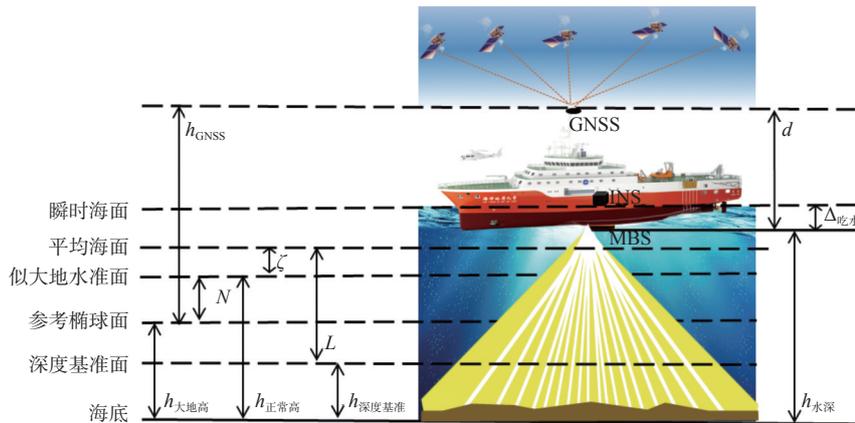


图 1 无验潮水深测量原理

Fig.1 Principle of non-tidal bathymetry

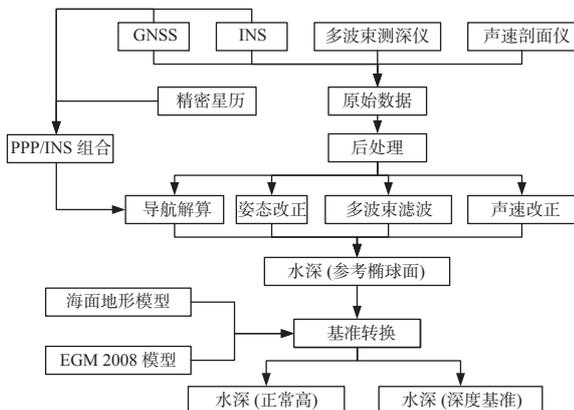


图 2 无验潮水深测量数据处理流程

Fig.2 Data processing flow of non-tidal bathymetry

此外,GNSS 获取的高程数据为基于参考椭球面的大地高,而中国的高程基准采用 1985 国家高程基准(正常高系统)。两者之间存在高程异常 N ,可通过似大地水准面精化模型或 EGM2008 重力场模型结合 GNSS/水准联测予以改化。受各种海洋动力作用影响,平均海面与(似)大地水准面之间并不重合。平均海面在(似)大地水准面上的垂直差距称为海面地形,记为 ζ ,可通过海面地形模型计算。 L 为深度基准面与平均海面之间的差异,为保证航行安全,深度基准面往往选择理论最低潮位面。基于不同基准下的水深计算公式如下:

$$\begin{cases} h_{\text{大地高}} = h_{\text{水深}} + d - h_{\text{GNSS}} \\ h_{\text{正常高}} = h_{\text{大地高}} + N \\ h_{\text{深度基准}} = h_{\text{正常高}} + \zeta - L \end{cases} \quad (1)$$

2 GNSS/INS 组合原理与对比

GNSS/INS 组合导航可分为松组合、紧组合以及深组合 3 种模式^[19]。松组合和紧组合均是在数据域实现 GNSS 与 INS 之间的组合^[20], 算法实现相对简单。深组合则是在信号域实现 INS 与 GNSS 之间的辅助, 在三者之中组合程度最深^[20], 并且需要建立 GNSS 跟踪环路中量测值与载体位置、速度的关系, 数据处理复杂, 在工程应用中难度较大。因此, 深组合方案不在本文讨论范围之内。

2.1 GNSS/INS 松组合基本原理

如图 3 所示, 松组合的基本原理是通过 INS 的原始观测值(角速度和加速度)计算载体的姿态、位置和速度, 结合 GNSS 接收机输出的导航结果, 通过卡尔曼滤波器融合处理得到最终的导航参数^[21]。在计算过程中, 将 GNSS 量测与 INS 预测的位置、速度之差作为新息, 选择导航参数误差作为滤波器状态, 利用估计的误差校正 INS 输出结果。

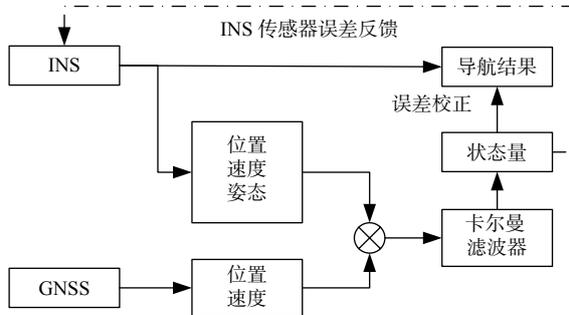


图 3 GNSS/INS 松组合基本原理

Fig.3 Basic schematic diagram of GNSS/INS loose combination

松组合卡尔曼滤波方程中的状态量为 INS 误差状态, 包括位置误差、速度误差、姿态误差、加速度计和陀螺仪误差^[22], 其状态向量 $X(t)$ 可表示为:

$$X(t) = [\delta r \ \delta v \ \psi \ b_g \ b_a \ S_g \ S_a]^T \quad (2)$$

式中: δr 、 δv 、 ψ 分别表示载体北、东、天方向上的位置、速度及姿态误差;

b_g 、 b_a 分别为三轴陀螺仪和加速度计的零偏;

S_g 、 S_a 分别为三轴陀螺仪和加速度计的比例因子误差。

离散的状态方程如下:

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} w_{k-1} \quad (3)$$

式中: X_k 和 X_{k-1} 分别为时刻 k 和 $k-1$ 的状态向量;

$\Phi_{k,k-1}$ 为离散后的状态转移矩阵;

Γ_{k-1} 为系统噪声驱动矩阵;

w_{k-1} 为状态噪声矢量。

量测方程如下:

$$Z = \begin{bmatrix} P_{\text{INS}} - P_{\text{GNSS}} \\ v_{\text{INS}} - v_{\text{GNSS}} \end{bmatrix} = HX + V \quad (4)$$

式中: P_{INS} 、 P_{GNSS} 分别为 INS 与 GNSS 的位置输出;

v_{INS} 、 v_{GNSS} 分别为 INS 与 GNSS 的速度输出;

H 为观测新息对应的状态向量设计矩阵。

松组合方式中 2 个系统均独立工作, 结构直观, 工程实现相对简单。但要求 GNSS 系统每个观测历元均要有足够的可用卫星数(通常应 ≥ 4 颗), 才能保证 GNSS 接收机能够完成位置速度等的解算, 否则组合系统不能正常工作。

2.2 GNSS/INS 紧组合基本原理

紧组合算法同样通过卡尔曼滤波器来实现^[21]。但与松组合不同的是, GNSS 不再输出导航结果, 而是将其原始观测数据直接与 INS 预测的站星距离和相对速度进行组合。在卡尔曼滤波器中, 观测新息向量为 GNSS 观测的伪距与 INS 计算的载体到各 GNSS 卫星的几何距离之间的差值, 或者是 GNSS 观测的伪距率与 INS 计算的载体到各 GNSS 卫星的相对速度之间的差值。滤波器会将估计出的导航参数反馈给 INS 的机械编排, 将 INS 传感器误差反馈给 INS 用于校准其元器件, 对位置、速度、姿态以及 INS 传感器原始输出进行补偿; 将 GNSS 卫星钟差、钟漂信息反馈给 GNSS, 进行伪距改正, 系统模型如图 4 所示。

相较于松组合, 紧组合滤波方程中状态向量增加了 GNSS 的误差状态^[22], 选取的状态参量依次为:

$$X(t) = [\delta r \ \delta v \ \psi \ b_g \ b_a \ S_g \ S_a \ \delta \rho_{\text{GNSS}} \ \delta \dot{\rho}_{\text{GNSS}}]^T \quad (5)$$

式中: $\delta \rho_{\text{GNSS}}$ 、 $\delta \dot{\rho}_{\text{GNSS}}$ 分别表示与 GNSS 观测的距离和距离变化率相关的参数, 如 GNSS 接收机钟差及钟漂等效距离、对流层天顶湿延迟残余误差、电离层延迟误差、载波相位模糊度参数等, 其余符号表示与式(2)相同。

紧组合离散的状态方程形式与式(4)相同, 量测方程如下:

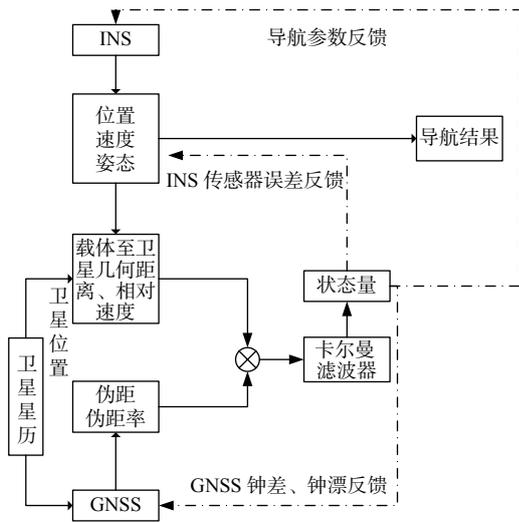


图 4 GNSS/INS 紧组合基本原理

Fig.4 Basic schematic diagram of GNSS/INS tight combination

$$Z = \begin{bmatrix} \rho_{INS} - \rho_{GNSS} \\ \dot{\rho}_{INS} - \dot{\rho}_{GNSS} \end{bmatrix} = HX + V \quad (6)$$

式中： ρ_{GNSS} 、 $\dot{\rho}_{GNSS}$ 分别代表 GNSS 原始观测的距离信息向量和距离变化率信息向量；

ρ_{INS} 、 $\dot{\rho}_{INS}$ 分别代表由 INS 预测的载体与 GNSS 卫星间距离信息向量和相对速度信息向量；

H 为观测新息对应的状态向量设计矩阵。

与松组合相比，紧组合直接采用 GNSS 原始观测值中的伪距观测值、载波相位观测值或多普勒观测值等，接收机无需进行导航解算就可以实现组合系统的解算。因此，在 GNSS 系统可见卫星数不足 4 颗的情况下，紧组合系统仍具备一定的工作能力，具有更好的鲁棒性。

2.3 PPP/INS 组合系统性能分析

基于 GNSS 载波相位观测值的 GNSS/INS 组合形式，主要包括 GNSS RTK 模式与 INS 组合 (RTK/INS 组合)、GNSS PPK 模式与 INS 组合 (PPK/INS 组合)以及 GNSS PPP 模式与 INS 组合 (PPP/INS 组合)。如前文所述，PPP 技术可摆脱相对定位模式下对基准站和基线距离的限制，具有更为广阔的应用前景，因此，本文主要对 PPP/INS 组合进行验证分析。为验证松组合、紧组合算法的有效性，基于车载 GNSS 及 INS 实测数据，按照 GNSS 有效与失效的情况共设置了 2 组对比试验。同时，本文后续工作主要进行潮位数据解算及潮位改正分析，故本节只针对高程数据情况进行分析。

在试验一中，由于观测条件良好，GNSS 全程可

用卫星数充足且卫星空间几何分布情况良好。分别采用 PPP、PPP/INS 松组合、PPP/INS 紧组合 3 种方案分别进行仿实时解算，未加平滑处理。由各高程序列相关性统计(表 1)和解算结果(图 5)可以看出，3 种方案在高程方向表现出极高的一致性。

表 1 相关性统计表

Table 1 Statistics of correlation coefficient

统计方案	相关系数
松组合-PPP	0.986
紧组合-PPP	0.997
松组合-紧组合	0.988

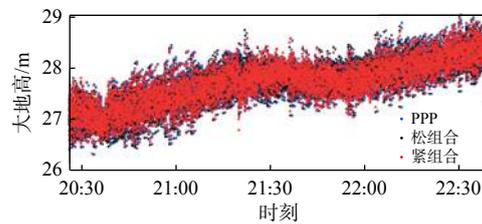


图 5 试验一—高程序列对比

Fig.5 Comparison of elevation sequence of test I

在试验二中模拟 GNSS 短期失效的状况，对试验一所采用的 GNSS 原始观测值进行破坏，选取 2 个时刻将连续 30 s 时间段内的 GNSS 原始观测数据删减到只有 3 颗 GPS 卫星观测值。利用 GNSS 短期失效数据分别以 PPP/INS 松组合与紧组合模式进行仿实时处理，未加任何后向平滑。以 GNSS 有效时的 PPP 解算结果作为对比真值，计算松/紧组合在高程方向上的误差。图 6 给出了 GNSS 失效时松/紧组合高程误差序列及局部放大图(蓝色框)，精度统计情况如表 2 所示。

如图 6 所示，当卫星数 < 4 颗时，松组合高程方向定位精度明显产生振荡，精度迅速下降。这是由于松组合模型受限于解算原理，在卫星数不足时，无法利用 GNSS 原始观测信息，仅依靠 INS 单独解算而导致高程方向精度快速发散。结合表 1 中所示的松/紧组合在 GNSS 失效时高程精度的统计，紧组合模型在这一时间段内误差虽然出现了增长，但由于仍能利用 GNSS 信息，为 INS 提供了较为可靠的距离观测信息，有效抑制了组合系统在高程方向精度的发散，并在 GNSS 恢复有效观测时，紧组合可以更快的速度收敛。在海洋动态环境下，GNSS 受多路径等影响明显，易出现有效卫星观测值较少的情况，仅依靠 GNSS 系统进行位置信息的获取很难保证其高精度定位的长时间连续性。

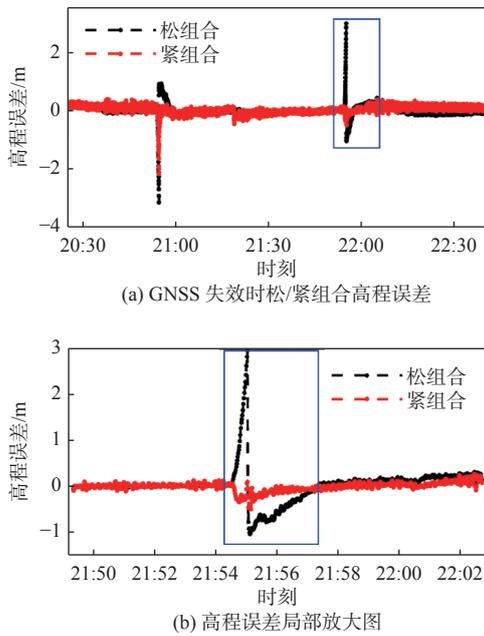


图 6 试验二高程误差对比及局部放大图

Fig.6 Comparison in elevation error and the local enlargement of test II

表 2 GNSS 失效时松/紧组合高程精度统计

Table 2 Statistics in elevation accuracy between loose and tight combination in case of GNSS failure

对比方案	绝对值最大值	均值	标准差
松组合-PPP	2.97	-0.02	0.20
紧组合-PPP	0.38	0.02	0.13

3 无验潮水深测量应用试验

3.1 试验概况

本次试验选取在浙江舟山以东海域进行, 试验海域平均水深 > 50 m, 试验区离岸距离约 140 km。试验区周边无长期验潮站且不利于布设临时验潮站, 故依据《海洋调查规范 第 10 部分: 海底地形地貌调查 (GB T12673.10—2007)》中关于水位观测的规定, 在试验期间收集到了该海域的预报潮位 (基于平均海面)。试验中所用仪器主要有 EM302 多波束系统、Seapath330+ 定位定向系统、MRU5+ 光纤运动传感器、AML 声速剖面仪; 多波束水深后处理软件为 Qimera (版本号 1.7.6); 所用测量船为中国地质调查局青岛海洋地质研究所“海洋地质九号”船, 该船已建立高精度船体坐标系, 各传感器安装位置已准确量取。本次试验共布设 7 条主测线、2 条联络测线, 试验航迹及原始水深覆盖情况如图 7

所示, 图内红色框所示位置为本次试验交叉线中潮差最大的位置。

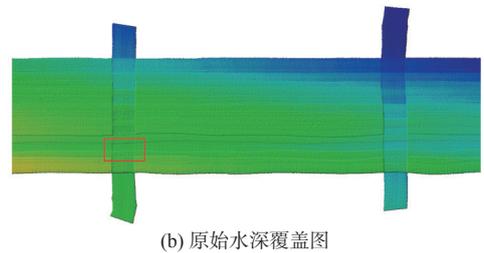
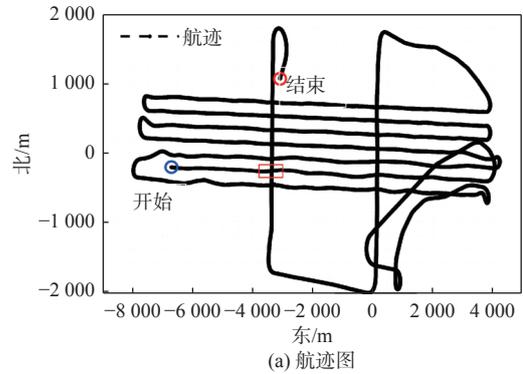


图 7 无验潮水深测量试验航迹及原始水深覆盖图

Fig.7 Track and original water depth coverage of non-tidal bathymetry test

3.2 数据处理与精度验证

从图 7b 中可以看出, 在试验过程中因潮位变化导致相邻多波束原始水深条带之间存在明显的差异。分别采用预报潮位与无验潮模式, 对本次试验多波束原始水深进行了处理, 为更加直观显示因潮差导致的条带间原始测量水深不符情况, 选取图 7 中所示红色框区域内主测线与联络测线进行重合点水深比对分析, 如图 8 所示。

通过对比可知 (图 8b、d、f), 原始水深受潮位变化影响导致条带间重合点水深差值较大, 最大处 > 2 m; 经预报潮位改正后, 有效消除了潮位变化影响, 但从其水深断面图上仍能发现重合点水深存在明显不符, 这主要是由于测量船动态吃水变化及预报潮位误差等带来的影响; 而经无验潮处理的水深断面上重合点之间水深不符情况得到明显改善; 各方案重合点水深不符值中误差及最大偏差统计如表 3 所示。另外, 从图 8d、f 中可知, 因预报潮位采用的垂直基准为平均海面, 无验潮模式经 EGM2008 地球重力场模型改正后采用的基准为大水准面, 两者之间的差异可通过海面地形模型进行改正。

为更加全面评估 2 种潮位改正模式的准确度,

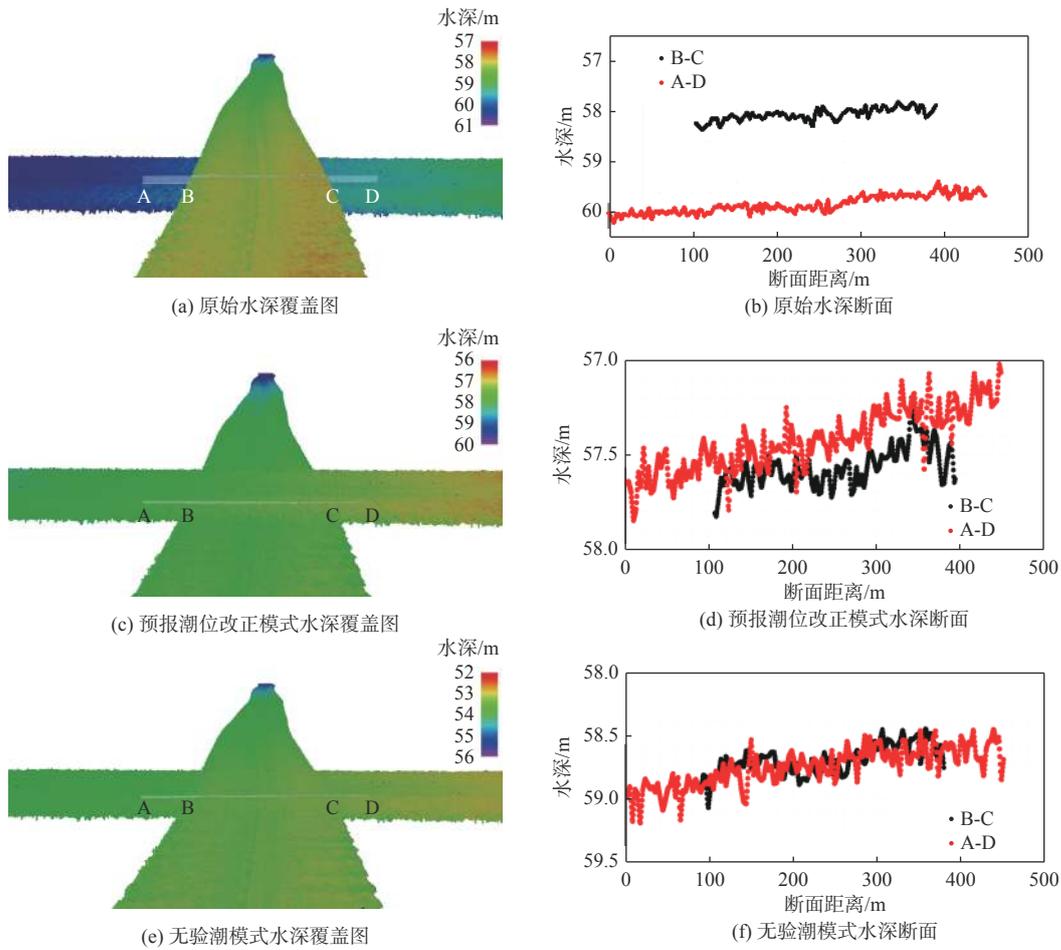


图 8 水深覆盖及水深断面对比

Fig.8 Comparison in water depth coverage and the water depth profile

表 3 典型水深断面重合点水深不符情况统计

Table 3 Statistics in inconsistent water depth at coincidence points of typical water depth section

对比方案	中误差	绝对值最大值
原始水深	1.25	2.06
预报潮位改正	0.13	0.43
无验潮模式	0.08	0.26

对图 7 中红色框重叠区域内所有重合点水深不符情况进行了统计,并依据《海洋调查规范 第 10 部分:海底地形地貌调查(GB T12673.10—2007)》给出了水深比对超限情况,如表 4 所示。由此可知,采用预报潮位和无验潮模式进行水深改正,均满足相关规范要求,但无验潮改正模式在准确度上略优于预报潮位改正结果。

表 4 重叠区内重合点水深不符情况统计

Table 4 Statistics in the inconsistent water depth at coincidence points in the overlapping area

对比方案	统计项	水深不符值范围/m			合计	中误差/m
		0~0.5	0.5~1.0	>1.0		
预报潮位改正	个数	9 336	192	2	9 530	0.15
	百分比	97.96%	2.02%	0.02%	100%	
无验潮模式	个数	9 366	164	0	9 530	0.14
	百分比	98.28%	1.72%	0	100%	

4 结论

(1) GNSS/INS 组合系统可充分发挥 GNSS 与

INS 各自的优点,具有很强的互补特性。其中,紧组合模式可充分利用 GNSS 原始观测值,在 GNSS 短期失效时能够对有效抑制组合系统定位精度的发散,比松组合具有更强的稳健性及更快的精度收敛

速度。综合考虑 GNSS 不同作业模式对基准站等的需求,PPP/INS 紧组合更加适合远海应用。

(2) 与采用预报潮位改正模式相比,基于 PPP/INS 紧组合模式的远海无验潮水深测量模式,可获得精度更高的成果水深数据,水深超过 50 m 时,无验潮水深测量准确度可达 0.14 m,并且可有效消除测量船动态吃水影响,在典型水深断面处的水深测量准确度明显优于预报潮位改正模式。

参考文献:

- [1] 罗小峰,黄海龙,路川藤,等.基于数学模型的长江口海域潮位推算方法[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(9):761-765.
- [2] 黄辰虎,陆秀平,欧阳永忠,等.远海航渡式水深测量水位改正方法研究[J].海洋测绘,2013,33(5):10-14.
- [3] 许军,桑金,刘雷.中国近海及邻近海域精密潮汐模型的构建[J].海洋测绘,2017,37(6):13-16.
- [4] 阳凡林,康志忠,独知行,等.海洋导航定位技术及其应用与展望[J].海洋测绘,2006,26(1):71-74.
- [5] 赵建虎,陆振波,王爱学.海洋测绘技术发展现状[J].测绘地理信息,2017,42(6):1-10.
- [6] 魏荣灏,陈佳兵,徐达.基于PPK无验潮的水下地形测量技术研究[J].海洋技术学报,2021,40(1):57-62.
- [7] 高兴国,田梓文,麻德明,等.GNSS支持下的无验潮测深模式优化[J].测绘通报,2018,11(4):7-10.
- [8] 冯国正,曹磊,马耀昌,等.EGM 2008模型的无验潮测深技术[J].测绘科学,2018,43(1):26-30.
- [9] 刘文勇,郑晖.GPS-RTK无验潮测深精度影响因素分析[J].测绘科学,2015,40(11):7-12.
- [10] 吴敬文,付五洲,薛剑锋.沿岸多模式GNSS三维水深测量方法研究[J].海洋测绘,2019,39(3):41-44.
- [11] 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.
- [12] 赵建虎,王胜平,张红梅.基于GPSPPK/PPP的长距离潮位测量[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(9):910-913.
- [13] 张小红,李星星,李盼.GNSS精密单点定位技术及应用进展[J].测绘学报,2017,46(10):1399-1407.
- [14] 杨元喜.弹性PNT基本框架[J].测绘学报,2018,47(7):893-898.
- [15] 杨元喜.综合PNT体系及其关键技术[J].测绘学报,2016,45(5):505-510.
- [16] 梁健,韩彦岭,于文浩,等.低成本GNSS/INS组合导航系统探讨[J].导航定位学报,2019,7(4):110-117.
- [17] 付心如,徐爱功,孙伟.抗差自适应UKF的INS/GNSS组合导航算法[J].导航定位学报,2017,5(2):111-116.
- [18] 王浩源,孙付平,肖凯.PPP/INS组合系统研究进展与展望[J].全球定位系统,2017,42(5):53-58.
- [19] 牛小骥,班亚龙,张提升,等.GNSS/INS深组合技术研究进展与展望[J].航空学报,2016,37(10):2895-2908.
- [20] 樊云鹏,杨锁昌.GNSS/INS深组合导航关键技术研究[J].飞航导弹,2017(10):22-25,48.
- [21] 伍蔡伦,智奇楠.高精度GNSS/INS组合定位及测姿技术[M].北京:国防工业出版社,2021:78-88.
- [22] 高周正.多模GNSS PPP/INS组合系统算法与应用研究[D].武汉:武汉大学,2016.

Non-tidal bathymetry in the open sea with GNSS-PPP/INS tight combination mode

SHAN Rui^{1,2}, LI Haojun¹, LIU Huimin², ZHAO Zhao², DONG Lingyu², DU Kai²

(1 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China)

Abstract: To realize tidal correction for ocean bathymetry, an ocean multibeam non-tidal bathymetry method was applied based on a combined system of Global Navigation Satellite System (GNSS) and Inertial Navigation System (INS), and the basic principles and procedures of the non-tidal bathymetry are presented. Considering the form and filtering principle of the GNSS/INS system, differences in performance between PPP/INS loose combination and tight combination under valid or invalid state of GNSS were discussed. The outcome of the PPP/INS tight combination were used to correct the non-tidal bathymetry and compared with that of the traditional tidal correction method. It was verified that the accuracy of the non-tidal bathymetry in the PPP/INS tight combination mode could reach 0.14 m, and the influence of dynamic draft could be effectively eliminated, which improved the accuracy in open sea multibeam bathymetry and in bathymetric survey at the typical water depth section, performing obviously better than the predicted tide correction model.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS); Inertial Navigation System(INS); PPP/INS tight combination; non-tidal bathymetry