长距离感潮内河航道多站水位传递精度分析

王俊刚，黄勇清，卢军民，李建委
（中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：针对内河航道因沼泽植被茂密、无道路通行导致常规水准测量无法开展的工程难题，进行高精度高程传递方法研究。采用长时段临时潮位站验潮观测，分析工程海域潮汐性质，并基于同步期高低平潮水位传递法，以 5 km 间距布设临时潮位仪，利用多站同步水位观测数据构建航道起点和终点间的高程关系。为验证传递精度，分别采用国际 GNSS 精密定位高程解算与长基线静态数据加载 EGM2008 模型两种方法进行高程比对。结果表明：潮位传递法与 GNSS 静态解算加载 EGM2008 模型法的高程互差为 2.4 cm，与国际 GNSS 精密定位高程解算的高程互差为 4.9 cm，3 种方法成果一致。结论认为，多站同步潮位传递方法可有效解决复杂感潮内河环境下高精度高程传递难题，将高程传递精度提升至厘米级，为类似无通视、无道路的感潮河段工程提供可靠技术参考。

关键词：同步期水位；潮汐性质；水准面精化模型；高程传递
中图分类号：U612　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0177-06

Accuracy analysis of multi-stage water level transmission in long-distance tidal inland waterways

Wang Jungang, Huang Yongqing, Lu Junmin, Li Jianwei
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To address the challenge of conducting conventional leveling in inland waterways where dense marsh vegetation and inaccessible terrain make standard elevation surveying infeasible, a high-precision elevation transmission method is proposed. Long-term tidal observations are conducted using temporary tide gauges to analyze the tidal regime of the study area. Based on the synchronous high and low tide water level transmission method, temporary tide gauges are deployed at 5 km intervals along the waterway, and multi-station synchronous water level observations are utilized to establish the elevation relationship between the starting and ending points of the channel. To validate the transmission accuracy, two independent approaches are employed for elevation comparison: international GNSS precise positioning solutions and long-baseline static data processing coupled with the EGM2008 global geoid refinement model. The results show that the elevation difference between the tidal transmission method and the GNSS static solution with EGM2008 model is 2.4 cm, while the difference relative to the international GNSS precise positioning solution is 4.9 cm, showing good consistency among the three methods. It is concluded that the multi-station synchronous tidal level transmission method can effectively solve the high-precision elevation transmission problem in complex tidal inland waterway environments, improving the accuracy of elevation transmission to centimeter level, and providing reliable technical references for similar waterway projects characterized by limited visibility and inaccessible conditions.

Keywords: synchronous water level; tidal regime; geoid refinement model; elevation transmission

工程建设中，高程基准的统一是控制测量、施工放样及后期运营监测的基础。在沿海、河道滩涂、沼泽湿地、原始森林覆盖区等无道路通行区域，水准路线无法布设，高程基准传递成为工

收稿日期：2026-04-03　　**录用日期：**2026-05-05

作者简介：王俊刚(1984—)，男，硕士，高级工程师，从事海洋测绘、GIS 等工作。

水运工程

程测量的突出难题。

针对上述问题，高兴国等[1]利用 15 天同步验潮平均海面传递法与 GNSS/水准法的精度相当(厘米级)。武威等[2]利用国家岛礁测绘实测数据，分析出短期同步验潮法与三角高程的比较精度可达 5 cm；朱志烨等[3]基于潮汐调和分析的水位控制方法能够满足工程精度需求。在 GNSS 高程拟合方面，陈绍荣等[4]基于 EGM2008 重力场模型研究 GNSS 高程拟合方法，分析在平坦区域的高程转换精度；杨俊[5]针对长距离带状工程，系统比较了多种高程拟合方法的适用性；王柱等[6]针对右江航道整治工程河段比降观测，采用水准测量方法观测河心水面高程，结合 GNSS-RTK 技术提高观测精度；刘阳等[7]针对长距离河道工程控制测量，利用 GNSS 测高法达到三、四等水准测量精度。

现有研究对多种方法交叉验证、精度互比的研究尚不充分；针对长距离(大于 100 km)感潮内河航道，采用多站逐段水位传递的研究较少。为此，依托某国外内河航道工程(全长 140 km，中段 70 km 为原始森林无人区)，提出多站同步高平潮水位传递方法，通过分段布设临时潮位仪(间距不大于 5 km)，实现全航道高程基准的统一。分别采用 AUSPOS 在线精密单点定位解算与 TBC 软件加载 EGM2008 地球重力场模型两种独立方法进行高程对比，分析水位传递精度。

1 在线精密单点定位(PPP)数据处理软件

目前，在线精密单点定位(PPP)数据处理软件发展迅速，主流软件包括 APPS、CSRS、GAPS、magicGNSS 及 AUSPOS。该类软件可将测站点的静态双频观测数据与邻近的 IGS 站或 CORS 站数据进行联合解算与平差。对于 24 h 的观测数据，联合平差后的内符合精度可达毫米级，外符合精度约为 1 cm[8]。

其中，AUSPOS 由澳大利亚地球科学局运营。用户在全球任何地点，将静态双频观测数据、天线高、天线类型及 RINEX 格式的数据文件上传，系统自动选取最近的 15 个 IGS 站点，利用双差技术进行精密解算[9]。可获得 ITRF2020 框架下，参考椭球为 GRS80 的 UTM 网格坐标和 EGM2008 高程模型的高程值。部分 IGS 站解算的静态数据仅支持 GPS 卫星星座。研究表明，观测时长超过 3 h 的静态数据，即可实现毫米级的平面及高程定位精度[10]。

2 EGM2008 地球重力场模型

EGM2008 地球重力场模型是当前全球范围内精度最高的地球重力场模型之一[11]。该模型融合了 GRACE 卫星重力数据与地面、航空、卫星测高重力数据，相较于 EGM96 模型，其分辨率提升 6 倍，精度提升 3~6 倍；但受地形覆盖影响，山区因重力数据覆盖不足，模型精度会出现显著降低，而在地势平坦、高程异常变化平缓的测区，基于离散已知点采用等值线内插法可获得较高的高程精度。我国现行高程系统为正常高系统，GNSS 实测高程为椭球高(即大地高)，两者之间需利用 EGM2008 地球重力场模型求解高程异常，进而完成高程值的转换，该方法可替代四等及以下水准测量，适用于大比例尺测图等工程实践。

3 工程实例

以国外某内河航道工程项目为例：该航道全长 140 km，直线长度 100 km，水面最窄处宽度为 700 m，出海口水面宽度达 4.5 km。沿航道布设 6 个 GNSS 平面控制点，其中 G3~G4 控制点间为 70 km 原始森林阻隔，人员无法通行，常规水准测量作业无法实施。为统一全测区高程基准，分别在出海口与码头位置布设 A、B 两个临时潮位站，以 A 站高程基准为起算，通过水位传递法推算 B 站高程基准，进而实现 G1~G6 全线路 GNSS 控制点的高程基准统一。工程区域见图 1。

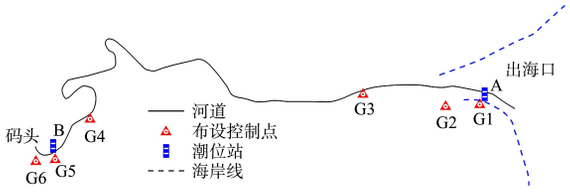

图 1 工程区域

Fig. 1 Engineering area

3.1　潮位观测

在 A、B 两潮位站分别采用自记式潮位仪开展连续 35 d 的同步潮位观测，观测时段为 2024 年 10 月 7 日—11 月 11 日，潮位数据采样间隔设置为 10 min。基于连续 35 d 的实测验潮数据，计算 A 站当地理论最低潮面，推算出 A 处码头面高程。

3.2　潮位分析

基于 A、B 两站连续 35 d 的同步潮位观测数据开展潮汐特征分析，该内河流域段潮汐均呈正规半日潮特征，每日出现两次高潮与两次低潮；其中 A 站最大潮差 3.16 m、最小潮差 0.6 m，B 站最大潮差 1.9 m、最小潮差 0.5 m。两站涨潮历时均为 6~7 h，落潮历时均为 5~6 h，落潮历时略短于涨潮。经计算，两站潮位序列相关系数 $r=0.97$，呈极强正相关，且潮汐形态、大小潮周期、潮汐不对称性等特征高度一致，表明两站受同一潮波系统控制，潮汐变化规律本质相同。两站潮汐差异主要体现在潮差幅值与潮时相位。A 站潮位变化整体超前于 B 站，高潮出现时间早约 4 h，低潮出现时间早约 5 h。A、B 两站潮位对比见图 2。

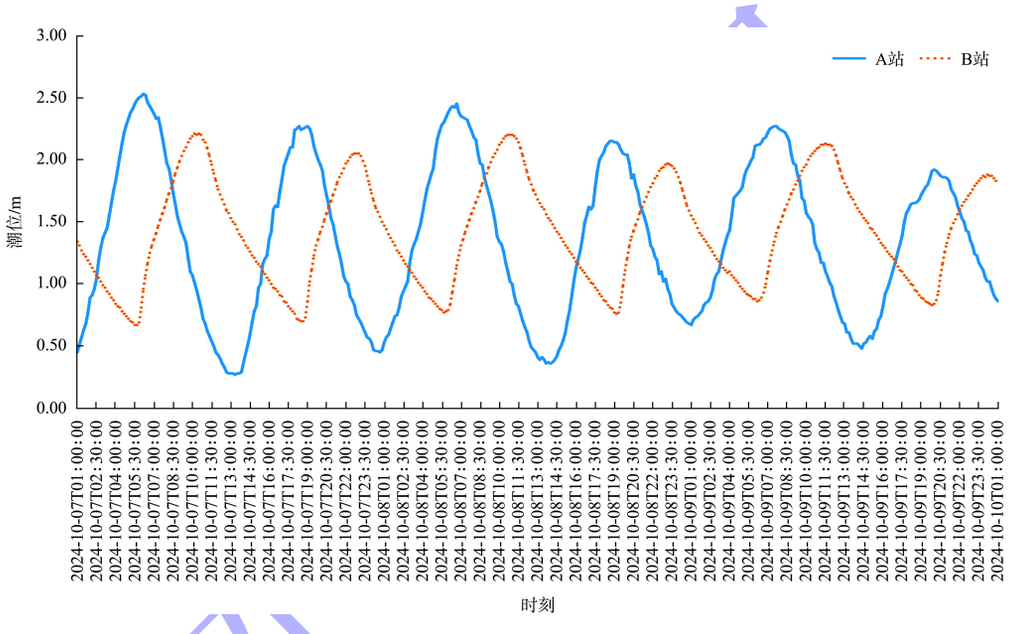

图 2　两站潮位对比

Fig. 2　Comparison of tide levels between the two stations

3.3　水位传递

现有研究针对海域水位传递方法已较为成熟，但针对内河航道的水位传递技术研究相对匮乏。基于 7 d 同步验潮数据，提出同步期平均海平面高程传递方法，成功实现远海跨岛礁 30 km 高程联测，其测量精度达到四等水准测量要求；基于高平潮水位传递方法开展多项海域工程实践，有效解决了大于 15 km 的水位传递问题，使水深图载水深精度优于 15 cm。

依据 JTS 131—2012《水运工程测量规范》[12] 相关要求，水位站布设于沿海地区时，相邻水位站间距需满足最大潮差不大于 1 m、最大潮时差不大于 2 h，且潮汐性质基本一致的条件。通过 A、B 两站 35 d 潮位观测，证实两站潮汐性质相同且存在强相关关系，符合规范布设标准。采用多站同步期高平潮方法，通过 A、B 两站高程基准的统一，实现全测区高程基准的整体统一。

外业数据获取利用 7 台同型号 KellerDCX-25PVDF 自记式潮位仪开展同步观测，潮位观测前，7 台设备在同一区域进行 2 h 同步观测，确保 7 台设备潮位观测数据精度一致。根据 JTS 131—2012《水运工程测量规范》，采用高低潮法，应以各组高低平潮平均值推算高差的平均值作为传递高差值，高程传递距离为 1~5 km 时，高低平潮观测 4 组。为

保障各潮位仪具备充足的高平潮时间重叠、受制于现场作业效率，同时尽可能缩短外业观测周期，保证设备安全，单站布设间距控制在不大于 5 km，共划分为 4 个观测时段，布设 25 个测站(T1～T25)。T1～T7 为潮位观测第 1 测段，T7～T13 为潮位观测第 2 测段，T13～T19 为潮位观测第 3 测段，T19～T25 为潮位观测第 4 测段，其中 T7、T13、T19 测站作为后续时段的转点站，实施连续观测时长大于 48 h，其余测站单次观测时长均大于 24 h，以保障高程传递过程的连续性与精度。各测站高平潮时间见表 1。

表 1 各测站高平潮时间

Tab. 1 High water slack times at each tide gauge station

测段	观测日期	测站编号	高平潮时间
第 1 测段	2024-11-19	T1	08:10:00—09:00:00
		T2	08:50:00—09:10:00
		T3	08:20:00—08:50:00
		T4	08:40:00—09:00:00
		T5	08:50:00—09:20:00
		T6	08:50:00—09:20:00
		T7	09:00:00—09:30:00
第 2 测段	2024-11-21	T7	11:00:00—11:40:00
		T8	11:10:00—11:30:00
		T9	11:20:00—12:00:00
		T10	11:40:00—12:00:00
		T11	11:50:00—12:10:00
		T12	12:00:00—12:20:00
		T13	12:00:00—12:30:00
第 3 测段	2024-11-22	T13	13:20:00—13:40:00
		T14	13:20:00—13:50:00
		T15	13:20:00—14:00:00
		T16	13:40:00—14:10:00
		T17	14:00:00—14:20:00
		T18	14:10:00—14:30:00
		T19	14:20:00—14:50:00
第 4 测段	2024-11-24	T19	02:10:00—02:30:00
		T20	02:20:00—02:40:00
		T21	02:30:00—02:50:00
		T22	02:50:00—03:10:00
		T23	02:50:00—03:30:00
		T24	03:20:00—03:40:00
		T25	03:30:00—03:50:00

基于 A 潮位站 35 d 连续潮位观测数据，计算得到 A 潮位站码头面高程 H_A。其中，A 潮位站码头面与高平潮水面的高差记为 h_1，第 1 测段与第 2 测段的高平潮水位差记为 h_2，以此类推，B 潮位站码头面与高平潮水面的高差记为 h_5。通过公式 $H_B = H_A - h_1 + h_2 - h_3 + h_4 + h_5$，即可推算得到 B 潮位站码头面高程，高程计算示意见图 3。依托多站同步高平潮水位传递法，实现了 A、B 两潮位站高程基准的统一。基于每日 2 次高平潮观测数据开展高程推算，B 潮位站码头面高程的互差为 6 cm，满足工程精度要求。

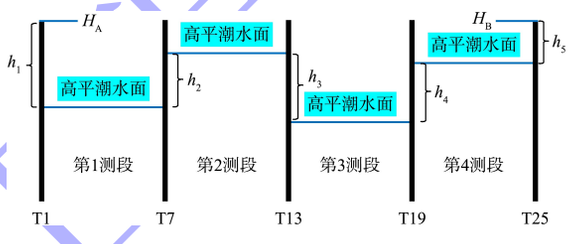

图 3 高程计算示意

Fig. 3 Schematic of elevation calculation

3.4 精度验证

受现场作业条件限制，无法采用高精度水准测量开展精度验证，因此采用 AUPOS 在线精密单点定位解算结果，与 TBCv5.2 软件加载 EGM2008 地球重力场模型获取的高程成果进行对比分析。

采用海星达 iRTK5 双频 GNSS 接收机，在 G1～G6 控制点开展静态观测作业。观测过程中，卫星几何图形位置精度因子(Position Dilution of Precision，PDOP)小于 8，单站观测时长不少于 4 h，数据采样间隔设置为 10 s，观测网以边连接方式扩展布设。

3.4.1 AUPOS 解算

将 RENIX 格式静态观测数据上传至 AUPOS 在线解算平台，通过与测区周边 IGS 基准站开展联合平差解算，获取 6 个控制点的平面坐标与正常高成果。解算精度统计见表 2。

表 2　AUPOS 解算 95%置信水平位置不确定度

Tab. 2　Position uncertainty at the 95% confidence level from AUPOS solutions

点号	X/m	Y/m	H/m
G1	0. 008	0. 012	0. 030
G2	0. 009	0. 011	0. 028
G3	0. 009	0. 014	0. 039
G4	0. 008	0. 013	0. 031
G5	0. 009	0. 015	0. 039
G6	0. 009	0. 014	0. 035

注：X、Y、H 分别为北方向、东方向及高程位置的不确定度。

3. 4. 2　TBC 解算

数据采样间隔设置 10 s，各同步环观测大于 4 h。共测量 12 条基线，异步环 6 个，2 条重复基线，闭合环水平分量闭合差最大为 89. 84 mm，垂直分量闭合差最大为 26. 1 mm，最弱边相对中误差 1/932 000，精度统计见表 3。以上各项精度指标均满足规范限差要求，数据质量合格。

表 3　同步环、异步环及重复基线精度统计

Tab. 3　Accuracy statistics of synchronous loop, asynchronous loop, and repeated baseline

名称	类别	最差值/mm	限差/mm	位置
同步环各坐标分量闭合差	Wx	-14. 0	±143	G4-G5-G6
	Wy	31. 1	±143	
	Wz	5. 1	±143	
	W 环	34. 5	±248	
异步环各坐标分量闭合差	Wx	34. 6	±163. 5	G1-G2-G3
	Wy	-78. 7	±163. 5	
	Wz	-26. 1	±163. 5	
	W 环	89. 84	±283. 3	
重复基线	W 复	13. 55	±59. 46	G4-G5

A 潮位站与 G1 控制点间距为 140 m，采用 RTK 技术实测 A 潮位站码头面高程，进而推算得到 G1 控制点高程；B 潮位站与 G5 控制点间距为 1. 4 km，同理通过 RTK 实测 B 潮位站码头面高程，推算得到 G5 控制点高程。经数据比对计算，基于 GNSS 静态拟合高程获取的 G5 控制点高程，与同步期高平潮水位传递法推算的高程较差为 3 cm，满足工程精度要求。高程互差统计见表 4。

表 4　高程互差

Tab. 4　Elevation difference

点号	H_1/m（TBC 解算）	H_2/m（AUPOS 解算）	H_3/m（验潮高程）	H_2-H_1/m	H_3-H_2/m
G1	5. 210	5. 210	-	0. 000	-
G2	4. 290	4. 285	-	-0. 005	-
G3	4. 792	4. 770	-	-0. 022	-
G4	6. 174	6. 144	-	-0. 030	-
G5	7. 876	7. 851	7. 900	-0. 025	0. 049
G6	8. 114	8. 076	-	-0. 038	-

注：H_1 为 TBC 解算高程；H_2 为 AUPOS 解算高程；H_3 为验潮高程。

4　结语

1）测区为沿海平坦区域，高程异常变化平缓均匀，两种 GNSS 静态处理方法（PPP 在线解算、TBC 加载 EGM2008 模型解算）均获得了较高的高程精度，高差互差优于 5 cm。但在地形起伏较大的山区，高程异常变化非均匀性显著，若无已知水准点进行检核，应谨慎采用全球重力场模型拟合高程转换方法。建议后续研究在不同地形条件下对该方法开展进一步验证，以明确其适用范围。

2）研究受现场作业条件限制，仅观测两组高低平潮数据进行高程传递，潮位观测未考虑大气压等环境因素对水位的影响，且缺乏水准测量成果的直接对比验证。因此，该方法适用于工程规划及可行性研究阶段，在条件具备时应增加观测组数并开展几何水准比对，以进一步提升成果的可靠性。

参考文献：

[1]　高兴国, 江峻毅, 常增亮, 等. 海上中距离跨海高程传递方法比较[J]. 海洋测绘, 2021, 41(5): 53-56.
Gao Xingguo, Jiang Junyi, Chang Zengliang, et al. Comparison of transferring the elevation methods for mid-distance over sea [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2021, 41(5): 53-56.

[2]　武威, 王强, 韩少红. 短期同步验潮高程传递精度分析[J]. 海洋测绘, 2016, 36(1): 55-58.

Wu Wei, Wang Qiang, Han Shaohong. Short-term tidal synobservation precision analysis of elevation transmission project [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(1): 55-58.

[3] 朱志烨, 贾俊强, 王恒. 潮位推算技术在盘锦长航道水深测量中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 99-103.
Zhu Zhiye, Jia Junqiang, Wang Heng. Application of tide level calculation technology in bathymetry of long Panjin Channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(S2): 99-103.

[4] 陈绍荣, 丁惠明, 吴传彦. 基于EGM2008重力场模型的GNSS高程拟合方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 87-88, 91.
Chen Shaorong, Ding Huiming, Wu Chuanyan. Research on GNSS elevation fitting method based on EGM2008 gravity field model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(11): 87-88, 91.

[5] 杨俊. 长距离带状工程中高程拟合方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(9): 161-164.
Yang Jun. Research on elevation fitting method in long-distance strip engineering[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2025, 48(9): 161-164.

[6] 王柱, 江木春. 右江航道整治工程河段比降观测方法探讨[J]. 水运工程, 2024(1): 144-148.
Wang Zhu, Jiang Muchun. Observation method of river section gradient in the Youjiang River waterway regulation project [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(1): 144-148.

[7] 刘阳, 舒晓明, 徐畅, 等. GNSS测高法在控制测量中的研究[J]. 水运工程, 2023(11): 193-197.
Liu Yang, Shu Xiaoming, Xu Chang, et al. GNSS elevation measurement method in control meassurement[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(11): 193-197.

[8] 崔家武, 张兴福, 王峰, 等. GNSS精密单点定位成果的框架与历元转换方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(2): 172-175, 186.
Cui Jiawu, Zhang Xingfu, Wang Feng, et al. Method research on reference frame and epoch transformation of GNSS precise point positioning result [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(2): 172-175, 186.

[9] 张锡越, 王权, 赵春梅. 在线数据处理系统精度分析[J]. 导航定位学报, 2016, 4(1): 109-112, 116.
Zhang Xiyue, Wang Quan, Zhao Chunmei. Accuracy analysis of online data processing system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(1): 109-112, 116.

[10] 徐莹, 聂桂根, 吕乔森. GNSS在线数据处理系统的比较与分析[J]. 测绘通报, 2010(12): 30-33.
Xu Ying, Nie Guigen, Lyu Qiaosen. Comparisons and analysis of the GNSS on-line data processing systems[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(12): 30-33.

[11] 沈映政, 王友昆, 余章蓉. EGM2008模型计算重力扰动位及相关量的方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(3): 25-28.
Shen Yingzheng, Wang Youkun, Yu Zhangrong. Research on the method of calculating gravity disturbance potential and related quantities with EGM2008 model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(3): 25-28.

[12] JTS 131—2012 水运工程测量规范[S].
JTS 131-2012 Specifications for port and waterway engineering survey[S].

(本文编辑 赵娟)

声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动，他们建立伪网站，利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明，从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址：www. sygc. com. cn，敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部