doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.05.010

基于高精度 GNSS 定位解算及姿态数据获取潮位研究

陈正伟,韩 磊
(上海海事测绘中心,上海 200090)

摘 要:文中基于 GNSS 高精度定位解算成果中的高程数据,利用测船航行过程中实时采集的姿态数据进行涌浪补偿,并根据船舶每天的吃水变化将 GNSS 天线高调整为瞬时水面高;通过相邻水位站的比对获取 GNSS 高程与深度基准面的高差,对获取的瞬时水面高进行基准面变换,得到基于深度基准面的潮位值。针对以上技术路线进行了研究,并在工程中进行了验证,成果统计数据证明,提取的潮位满足规范要求,可在实践中应用推广。

关键词:GNSS 高程;潮位;姿态改正;船舶吃水;深度基准面
中图分类号:P229 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2019)05-0055-05

水深测量获取的瞬时水深,必须经潮位改正得到基于深度基准面的水深。东海海区具有岛礁多、潮差大、潮汐复杂等特点,使得在当前港口航道图及通航尺度核定测量中,每个工程需设置众多验潮站,每个验潮站设置好之后为防止零点变动还需要定期进行人工比对, 潮位的获取所需工作量非常大,不仅耗时、耗力,而且设置的潮位站存在风险,岸边或者岛礁潮位站有遭受破坏(人为原因或自然原因)的风险,定点验潮站也时有丢失。

随着 GNSS 定位技术的发展,采用 RTK 方式或 PPK 技术解算得到的 GNSS 天线瞬时位置及高程已达到厘米级;GNSS 天线高程的变化反映了测区所在海域潮位的变化, 可通过一定的技术处理消除涌浪、船舶吃水等其他因素对高程的影响,提取出测量期间的潮位,而不需要进行潮位的观测,如此可减轻测量期间的潮位获取工作,实现无验潮水深测量。

目前,可实现海上高精度 GPS 定位的主要技术有 RTK、PPK 和 PPP。受无线电传输影响,RTK 作用距离有限, 局限于 20 km 以内;PPK 不受无线电因素影响,作用距离最远可达 200 km,考虑基准站和流动站间误差与作用距离的相关性,建议在 100 km 范围内开展 PPK 应用[1]。

本文尝试在测区已知控制点上设置 GNSS 基准站 (或利用北斗地基增强系统项目建立的 GNSS 台站),同时利用船台上安装的 GNSS 定位设备和涌浪补偿仪, 在测量期间同步采集 GNSS 静态数据和三维姿态数据;通过 GNSS 解算得到高精度定位成果,从中提取高程数据,并经数据精化获取潮位数据。

1 实施过程

从 GNSS 解算结果中提取潮位数据, 需消除姿态和船舶吃水变化等因素的对高程的影响。下文介绍消除对高程影响、获取基于深度基准面的潮位数据的过程。

1.1 姿态改正

海上测量期间,涌浪对船舶的三维姿态产生影响,从而影响 GNSS 天线的位置和高程,所以需要在剔除部分跳跃点之后,对姿态变化产生的影响进行补偿。赵建虎等在《远距离高精度 GPS 潮汐观测及垂直基准转换研究》中采取低通滤波器[2]的算法实

收稿日期:2019-04-26
作者简介:陈正伟(1981-),男,高级工程师,主要从事海洋测绘工作。E-mail:64204429@qq.com

现了潮位提取。本文拟采取水深测量软件中所用的姿态改正算法对高程数据进行姿态补偿。原始GNSS 高程曲线和剔除跳跃点之后的高程曲线如图1~图 2 所示。

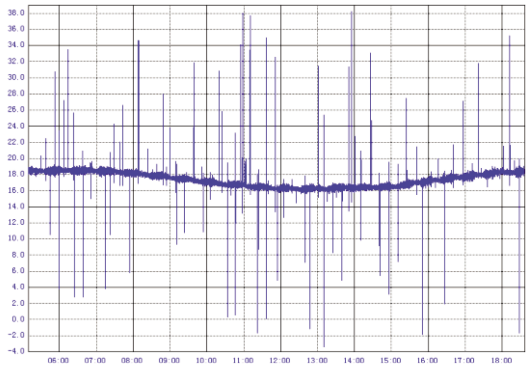


图 1 原始 GNSS 高程曲线

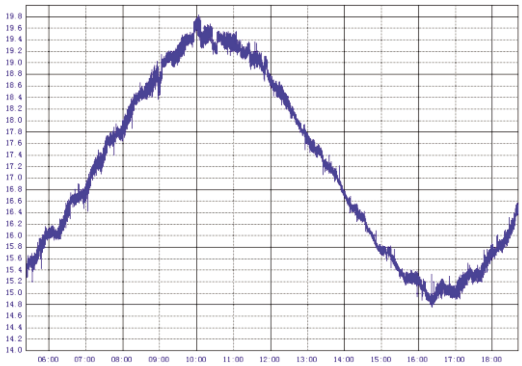


图 2 剔除跳跃点之后的高程曲线

当测量船在波浪中运动产生横摇、纵摇和升沉运动时,GNSS 天线处除了产生与涌浪补偿仪传感器处相同的升沉运动外,还有横摇、纵摇运动引起的附加升沉运动(或称诱导升沉)[3]。GNSS 天线处的升沉为:

$$h_G=h_0+X\cdot\sin P-Y\cdot\sin R\cdot\cos P-Z\cdot(\cos R\cdot\cos P-1) \quad (1)$$

式中:h_G 为计算所得的 GNSS 天线处升沉变化值;R,P,h_0 分别为涌浪补偿仪记录的横摇、纵摇和升沉变化;X,Y,Z 为 GNSS 天线相对于涌浪补偿仪在船体坐标中的位置[3]。利用上述公式计算每一个GNSS 数据观测历元的升沉值(Heave),并进行姿态改正:

$$H=H_0-h_G \quad (2)$$

式中:H_0 为原始高程值;h_G 为 GNSS 天线处经式(1)计算得到的综合涌浪升沉值。姿态改正后得到明显变“细”的高程曲线如图 3 所示。视不同海况条件,姿态改正能将误差从 0.5 m 甚至更大缩小到 5 cm 左右。

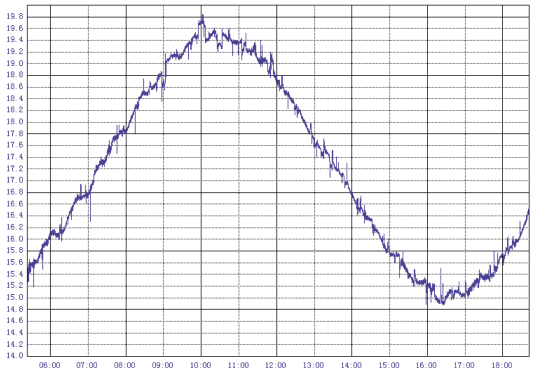


图 3 姿态改正后的高程曲线

需要注意的是,GNSS 数据和涌浪补偿器的时间系统可能不一样,姿态纠正前需对两套数据进行时间同步(或称为延时计算),计算可通过数据相关性求得。GNSS 数据一般为 GPS 时,涌浪补偿器的时间为世界协调时(UTC 时),当前存在 18 s 的闰秒(跳秒)差异。

1.2 潮位提取

经过姿态改正后,即可在 GNSS 高程数据中提取“潮位”数据,一般每 10 min 提取一个潮位值即可。为消除 GNSS 解算误差及姿态改正残留误差的影响,取潮时前后各 1 min 高程数据的平均值,提取的“潮位”数据曲线如图 4 所示。

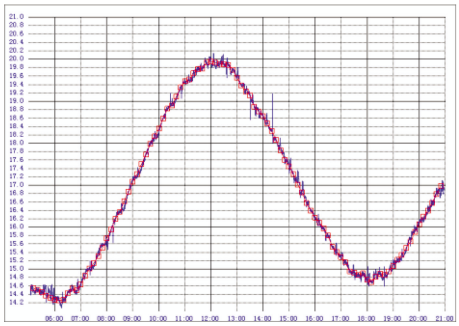


图 4 提取的“潮位”曲线

此时的“潮位”数据是基于 WGS84 椭球高的,而不是潮位改正所需的基于深度基准面,如图 5 所示。

图中:H 为 GNSS 高程,通过 GNSS 高精度解算并经姿态改正求得;D 为 GNSS 天线至水面的垂直距离,可于每天测量前、后量取并取平均并考虑动吃水变化作为当天的值使用;Δh 为深度基准面与椭球面的高差(理基面大地高),在下一节介绍计算方法。已知 H,D 和 Δh 即可根据式(3)求得基于深度基准面的潮位值 T。

$$T=H-D-\Delta h \quad (3)$$

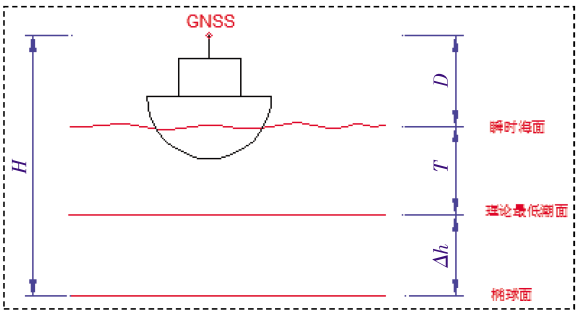


图 5　GNSS 高程 H 与潮位 T 的关系

1.3　基准面高差计算

将获取的潮位从椭球面转换到深度基准面,需知道两个基准面高差 Δh 的值。为求取 Δh 值,选择定点或岸边自动潮位站附近抛锚 (限定在 1 km 以内,测量时长包含一个高潮、低潮)测量 GNSS 静态数据和姿态数据,并解算得到高程数据 H_i(经过姿态纠正),同时期潮位站基于深度基准面的潮位数据设为 T_i,则通过同站潮位比较法[2]求得 Δh 值:

$$\Delta h=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(H_i-D-T_i) \tag{4}$$

测量期间,夜间测量船一般会在测区附近抛锚休息,所以求取基准面高差的过程不会额外增加工期。测区所用潮站的 Δh 都计算完成后,之后若再测量同一测区就可不再设置自动验潮站,直接利用这些差值将测量期间所有测点的 GNSS 高程值转换为潮位值。

1.4　基准面变换

测量期间测点的 Δh 是与附近验潮站的 Δh 相关的,可基于一定算法进行换算。一般水深测量潮位改正可采用直线分带法、三角分带法或最小二乘法等,基面变换采用类似方案。

假设某三角分带使用的 3 个潮位站位置分别为 $S_1(x_1,y_1),S_2(x_2,y_2),S_3(x_3,y_3)$,基准面高差分别为 $\Delta h_1,\Delta h_2,\Delta h_3$。过 3 点$(x_1,y_1,\Delta h_1),(x_2,y_2,\Delta h_2),(x_3,y_3,\Delta h_3)$平面的法线向量$\vec{n}$与向量$\overrightarrow{S_1S_2}$,$\overrightarrow{S_1S_3}$都垂直,而$\overrightarrow{S_1S_2}=(x_2-x_1,y_2-y_1,\Delta h_2-\Delta h_1)$,$\overrightarrow{S_1S_3}=(x_3-x_1,y_3-y_1,\Delta h_3-\Delta h_1)$,则通过式(5)可得[4]:

$$\vec{n}=\overrightarrow{S_1S_2}\times\overrightarrow{S_1S_3}=\begin{vmatrix} i & j & k \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & \Delta h_2-\Delta h_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & \Delta h_3-\Delta h_1 \end{vmatrix}=ai+bj+ck \tag{5}$$

式中:

$$\begin{cases} a=(y_2-y_1)*(\Delta h_3-\Delta h_1)-(y_3-y_1)*(\Delta h_2-\Delta h_1) \\ b=(x_3-x_1)*(\Delta h_2-\Delta h_1)-(x_2-x_1)*(\Delta h_3-\Delta h_1) \\ c=(x_2-x_1)*(y_3-y_1)-(x_3-x_1)*(y_2-y_1) \end{cases}$$

根据平面的点法式方程,得平面方程为:

$a(x-x_1)+b(y-y_1)+c(\Delta h-\Delta h_1)=0$。若测量点 $P(x_p,y_p)$ 在该三角分区内,则该测量点基准面差值为:

$$\Delta h_p=\Delta h_1-[a(x_p-x_1)+b(y_p-y_1)]/c \tag{6}$$

如果是直线分带则将测量点投影到直线分带的潮流方向上,再根据投影点至两站的距离采用反距离加权法求得测量点的基准面差。

批处理一整天潮位值的基准面变化流程:事先编辑好基准面转换分区文件,每个分区通过几个离散点的连线定义分区范围,如三角分区通过 3 个潮位站位置连线,直线分区指定 4 个点构成分区范围。程序执行过程中,先读取 GNSS 解算文件和基准面转换分区文件,然后通过点在多边形内外的算法查找测量点落在哪个分区内,最后通过上述算法求取基准面差值。

2　精度验证

为验证上述算法的可靠性,在江苏某工程进行尝试。该工程为航道多波束测量,外业测量共 21 d,因天气原因实际跨度超过 1 个月。设置 1 个岸边站(长期站)和 5 个定点验潮站,测区范围及验潮站布设见图 6,潮位观测时间都超过 1 个月,利用调和分析法计算了 5 个定点验潮站的潮位基面关系,并通过岸边长期站进行基面的季节性改正。

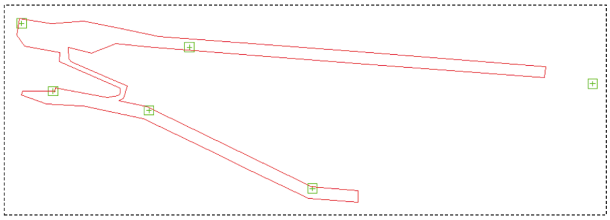


图 6　江苏某工程测区范围及验潮站布设

工程实施期间采集了 GNSS 静态数据和姿态数据,GNSS 静态数据采用 PPK 技术解算,基准站与测区距离 12~55 km。每天早晚通过测量船舷两侧共 4 点离水面高差的变化换算得到 GNSS 天线的水面高。在每个验潮站附近抛锚记录数据求得各站的深度基准面与椭球面高差,然后计算得到每个测量点的潮位值,潮位间隔为 10 min。

水深测量数据利用验潮站潮位数据进行潮位改正,提取每个测点的潮位值,与 GNSS 潮位进行对比,某一天的曲线对比如图 7 所示,图中蓝色为验潮站潮位,红色为 GNSS 潮位,从图中可见两条曲线是高度重合的。

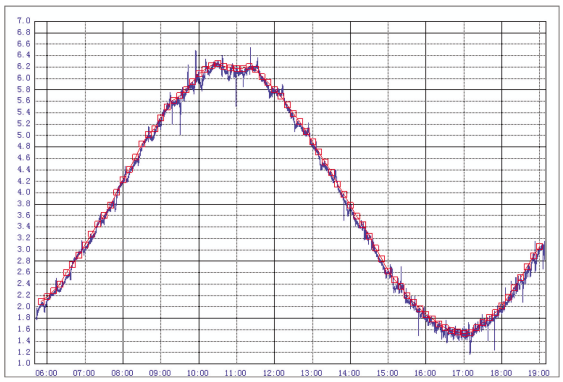


图 7 测量点验潮站潮位与 GNSS 潮位对比

《水运工程测量规范》(JTS 131–2012)中 7.2.11.3 款对推算水位与实测水位的要求如下[5]:

(1) 占比对总点数的 80%的观测值与推算值之差不大于 0.10 m;

(2) 占比对总点数的 95%的观测值与推算值之差不大于 0.20 m;

(3) 占比对总点数的 100%的观测值与推算值之差不大于 0.30 m。

参照规范要求,对测量点验潮站潮位与 GNSS 潮位对比按天统计的详细情况见表 1,从表中可知,潮位中误差为 7.6 cm,除少数天外(部分时段数据质量较差,解算结果跳跃偏大,难以提取到准确潮位值,潮位获取的基础是 GNSS 高精度解算,所以解算的质量将影响最终获取潮位的精度[6]),绝大部分比对优于规范要求,所有数据的整体统计也优于规范要求,说明算法合理,可在实际工程中应用推广。

表 1 测量点验潮站潮位与 GNSS 潮位对比情况统计

序号	测量日期	<10 cm		<20 cm		<30 cm		总数	中误差
1	04.16	57	86.4%	65	98.5%	66	100%	66	7.2
2	04.17	46	68.7%	65	97.0%	67	100%	67	9.5
3	04.18	57	80.3%	70	98.6%	71	100%	71	8.4
4	04.19	37	51.4%	66	91.7%	72	100%	72	12.8
5	04.20	9	100%	9	100%	9	100%	9	7.9
6	04.26	20	95.2%	21	100%	21	100%	21	4.1
7	04.27	67	97.1%	69	100%	69	100%	69	5.5
8	05.03	2	100%	2	100%	2	100%	2	3.2
9	05.04	63	88.7%	71	100%	71	100%	71	6.0
10	05.05	33	86.8%	38	100%	38	100%	38	6.2
11	05.06	13	100%	13	100%	13	100%	13	7.5
12	05.07	11	100%	11	100%	11	100%	11	3.0
13	05.08	63	100%	63	100%	63	100%	63	5.0
14	05.09	58	79.5%	73	100%	73	100%	73	7.9
15	05.10	21	75.0%	28	100%	28	100%	28	9.3
16	05.24	6	75.0%	8	100%	8	100%	8	9.4
17	05.25	8	80.0%	10	100%	10	100%	10	9.4
18	05.26	19	82.6%	23	100%	23	100%	23	7.2
19	05.27	63	94.0%	67	100%	67	100%	67	6.5
20	05.28	32	97.0%	33	100%	33	100%	33	5.5
21	05.29	82	94.3%	87	100%	87	100%	87	5.5
总体统计		767	85.0%	892	98.9%	902	100%	902	7.6

3 结 语

东海海区港口航道图及通航尺度核定测量项目需布设较多验潮站,对于定期重复测量的项目,可在测区第一次测量时建立深度基准面与椭球面高差关系,之后每次测量采用基于高精度 GNSS 定位解算成果及姿态数据获取潮位数据的方法。

GNSS 潮位技术与验潮站实测潮位对比,验潮站若采用人工验潮方式需额外增加人力,人力成本巨大,采用 GNSS 潮位技术优势明显;且 GNSS 潮位技术因潮高为各测量点实测数据,内业仅剔除跳跃

点、姿态改正和基面变换等,所以不用考虑潮位超带问题,即可以全天候工作;验潮站验潮在部分潮差大的测区,测量需避开超带时段,或者加密潮站布设。

综上,潮站布设及潮位人工比对占用工期较多,水深测量期间同步采集 GNSS 静态数据和姿态数据,不额外占用工期,将极大地提高潮位获取的便利性、及时性,可节约水位计购置经费,并可减少潮位站设置的人力、缩短工期。

参考文献:

[1] 赵建虎,王胜平,张红梅,等. 基于 GPS PPK /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.
[2] 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.
[3] 葛健,肖付明,丰启明. 姿态传感器与换能器安装位置偏移对换能器升沉监测的影响[J]. 海洋测绘,2008,28(4):4-7.
[4] 同济大学数学系. 高等数学(第七版)[M]. 北京:高等教育出版社,2017.
[5] 中华人民共和国交通运输部. JTS 131-2012. 水运工程测量规范[S]. 北京:人民交通出版社,2012.
[6] 汪连贺. 基于 GPS PPK 技术的远距离高精度验潮方法研究[J]. 海洋测绘,2017,34(4):24-27.

Research on Tidal Acquisition Based on High-Precision GNSS Positioning Solution and Attitude Data

CHEN Zheng-wei, HAN Lei

Shanghai Marine Surveying and Mapping Department, Shanghai 200090, *China*

Abstract: Based on the elevation data of GNSS high-precision positioning solution, this paper uses real-time attitude data collected during vessel navigation to compensate the surge, and adjusts the GNSS antenna height to the instantaneous water level according to the daily draught change of the vessel. The difference between GNSS elevation and depth datum is obtained by comparing adjacent tide stations. It also performs a datum transformation on the acquired instantaneous water level height to obtain tidal data based on the depth datum. The technical routes are studied and verified in the project. The statistical data of the results show that the tidal data extracted meet the specification requirements and can be applied and widely adopted in practice.

Key words: GNSS elevation; tidal data; attitude correction; vessel draught; depth datum