

中长距离水运工程高精度潮位获取技术

刘宏, 王朝金

(上海达华测绘有限公司, 上海 200136)

摘要: 为解决远离岸线的水运工程的高精度潮位获取难题, 通过研究顾及海洋水汽的中长距离 GNSS 定位原理、方法耦合的潮位提取算法, 开发相关软件, 利用基于 GPS 与 BDS 的 PPK 技术测量出 GNSS 天线处瞬时三维坐标, 并结合其在船体坐标系下的坐标获得海面的瞬时高程, 通过傅立叶变换, 小波滤波等滤波处理, 经过垂直基准的转换, 最终得到在航潮位。经过多次测试和实际应用表明, 中长距离水域采用 PPK 技术定位和获取潮位, 精度满足水运工程水深测量等作业的平面定位和潮位要求。

关键词: 中长距离; 水运工程; 潮位获取; GNSS PPK; 垂直基准转换

中图分类号: U652.62; U652.3; P731.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2020)11-0028-05

doi: 10.7640/zggwjs202011006

Technology of high-precision tidal level acquisition in medium and long distance port & waterway engineering

LIU Hong, WANG Chao-jin

(Shanghai Dahua Surveying & Mapping Co., Ltd., Shanghai 200136, China)

Abstract: In order to solve the problem of obtaining high-precision tidal level in the port & waterway engineering far from the coast, the principle of medium and long distance GNSS positioning considering ocean water vapor, and the method coupled tide level extraction algorithm were studied and related software were developed. The instantaneous three-dimensional coordinates of GNSS antenna were measured by using PPK technology based on GPS and BDS, the instantaneous elevation of the sea surface was obtained by combining its coordinates in the hull coordinate system, the tide level in navigation was finally obtained through the Fourier transforming, wavelet filtering, and the conversion of the vertical datum. It has been proved by many tests and practical application that the accuracy of PPK technology in locating and acquiring tidal level in the medium and long distance waters can meet the requirements of horizontal positioning and tidal level in port & waterway engineering.

Key words: medium and long distance; port & waterway engineering; tidal level acquisition; GNSS PPK; vertical datum conversion

0 引言

近年来, 随着水运工程不断向远距离发展, 获取远离岸线的水域潮位、提高远岸平面定位和高程精度显得越来越重要。

水上作业具有“点多、面广、风浪大、工期紧”的特点, 作业区域由于常位于距离陆地较远的水域, 传统抛设临时坐底自容式潮位记录仪无法

适时提供潮位, 且容易受到各种船舶干扰, 潮位仪器常常丢失, 给工程造成损失。采用 RTK-DGNSS 进行三维水深测量技术, 受数据通讯条件差, 通讯距离限制, 特别是超过 20 km, RTK 差分信号接收困难。而 PPK(Post-Processed Kinematic, GNSS 动态后处理差分)恰好弥补了 RTK 技术的不足, 利用 PPK 技术不需要数据通讯, 以往研究和应用表明满足精度的作业半径可以达到 80 km^[1-2], 从而在 RTK-DGNSS 受到限制的区域也能利用 GNSS 进行高精度动态测量, 是对 RTK-DGNSS 的

收稿日期: 2020-08-27 修回日期: 2020-10-09

作者简介: 刘宏 (1980—), 男, 湖南岳阳人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事海洋测绘相关工作。E-mail: liuhong188@126.com

一种重要补充作业方式。PPK 技术及长基线实时解算技术正日趋成熟。

基于海洋定位的 PPK 技术的开发相对滞后, 软件针对性不够, 实际生产中效果不佳。本项目基于 GPS 与北斗卫星导航的中长距离 PPK 技术, 通过算法的改进, 将 PPK 高精度定位范围拓展到 120 km, 应用于水运工程中的平面定位和潮位获取, 研制方法耦合的潮位平滑滤波及提取技术, 解决了远离岸线水运工程潮位获取难题。

1 顾及海洋水汽的 GNSS 中长距离高精度定位算法

PPK 技术是一种与 RTK 相对应的定位技术,

利用载波相位观测值进行事后处理的动态相对定位技术。测量过程中只需连续记录基准站和流动站的原始观测数据, 而无需在站间进行实时数据通讯。然后利用精密星历或广播星历、原始数据、基准站已知坐标, 计算出基站相位改正数, 基站和流动站在一定距离内定位误差具有较好空间相关性, 利用基站改正数对流动站改正得到精确三维坐标^[3]。这一技术是实现全球精密实时动态定位以及导航的重要技术。GNSS 中长距离定位算法流程图如图 1。

要实现 GNSS 中长距离高精度定位, 需要进

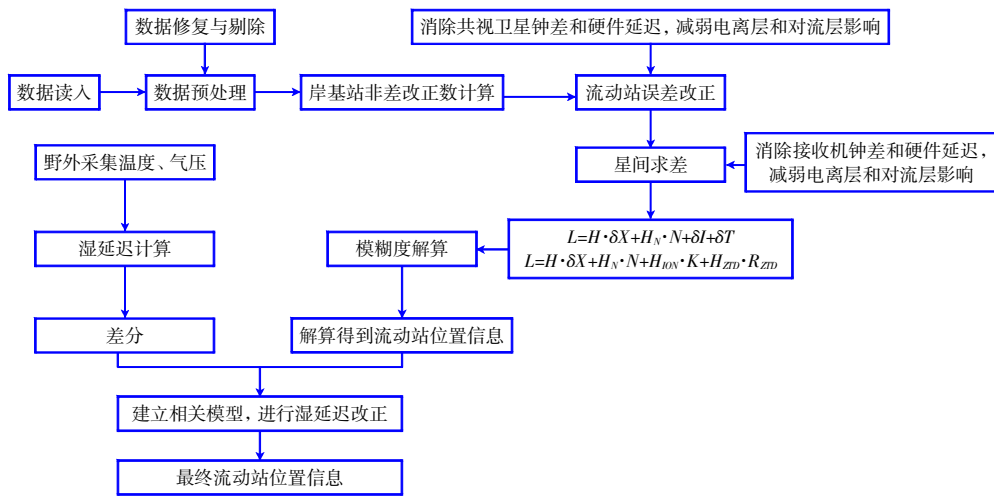


图 1 GNSS 中长距离定位算法流程图

Fig. 1 Flow chart of GNSS medium and long distance positioning algorithm

行载波相位整周模糊度的准确解算, 必须将载波相位观测值所受的观测误差影响减小至小于载波相位波长的一半。本项目采用非差观测误差改正数的误差改正方式进行用户 GNSS 观测值的观测误差改正, 通过参考站的非差观测数据进行流动站观测数据的误差改正。利用单个参考站传递的包含参考站模糊度和误差改正信息的改正数, 消除测站间共视卫星的卫星钟差, 大大削弱电离层延迟误差、对流层延迟误差和卫星轨道误差。其中对流层延迟量可分为干延迟量与湿延迟量, 水运工程中需考虑顾及海洋水汽的湿延迟量。

1) 中长距离 GNSS 定位基本观测方程

中长距离 GNSS 定位使用的 GPS 和 BDS 观测值主要是载波相位和伪距观测值, 非差载波相位和伪距观测值的观测方程为:

$$\lambda_i \cdot \Phi_i^p = H^p \cdot \delta X + \rho^p - \lambda_i \cdot N_i^p - I_i^p + T^p + t^p + t + \varepsilon_i^p \quad (1)$$

$$P_i^p = H^p \cdot \delta X + \rho^p + I_i^p + T^p + t^p + t + \varepsilon_i^p \quad (2)$$

式中: Φ 为载波相位观测值; P 为伪距观测值; ρ 为站星间集合距离; λ 为载波相位波长; N 为模糊度; I 为电离层延迟误差; 下标 i 表示载波相位频率; T 为以对流层延迟和轨道误差为主的非色散性误差; t^p 为卫星钟差, 上标 p 表示卫星号; t 为接收机钟差; ε 为观测噪声; H 为位置参数的系数矩阵; δX 为位置参数。

2) 对流层延迟误差

由于对流层延迟中干分量延迟非常稳定, 可以采用 Saastamoinen 模型进行改正。而对流层湿分量可以作为未知参数来进行估计。参数估计模型可以采用分段线性函数, 每个测站上每 2 h 估计 1 个对流层参数。根据各卫星间对流层延迟误差的空间分布规律, 对于卫星 p , 基准站和流动站各设置 1 个天顶对流层延迟误差参数, 则卫星

p 的对流层延迟误差可表示如下:

$$T^p = Map_A^p \cdot ZTD_A^p - Map_U^p \cdot ZTD_U^p \quad (3)$$

式中: T 为对流层延迟误差; p 为卫星号; ZTD 表示测站天顶方向绝对对流层湿分量延迟; Map 表示对流层映射函数; A 为参考站; U 为流动站。

3) 电离层双频改正

对于双频 GNSS 接收机, 采用双频无电离层组合观测值有效消除电离层延迟。无电离层模型消去 n 个电离层延迟参数的同时减少了 n 个独立观测值, 模型保留了与位置、对流层、模糊度有关的观测信息。

$$\varphi_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \varphi_2 \quad (4)$$

式中: φ_c 为无电离层延迟影响的载波相位线性组合观测值; φ_1 和 φ_2 分别为 L_1 载波和 L_2 载波观测值; f_1 为 L_1 载波频率; f_2 为 L_2 载波频率。

4) 宽巷组合求解模糊度

无电离层延迟组合观测值 φ_c 的整周模糊度 N_c 为:

$$N_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 \quad (5)$$

虽然 N_1 和 N_2 理论上皆为整数, 但是由于系数 $\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ 和 $\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2}$ 都不是整数, 所以 N_c 的理论值已不再为整数, 或者说 N_c 已不再具有整数特性。为解决上述问题, 将式(5)变换为:

$$N_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_1 - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_2 = \frac{f_1(f_1 - f_2)}{f_1^2 - f_2^2} N_1 + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (N_1 - N_2) = \frac{f_1}{f_1 + f_2} N_1 + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_\Delta \quad (6)$$

式中: $N_\Delta = N_1 - N_2$, 即为宽巷观测值 φ_Δ 的整周模糊度。由于宽巷观测值的波长达到 86 cm, 故 N_Δ 较

易确定。一旦 N_Δ 确定后, 确定 N_c 就转化为确定 N_1 , 而 N_1 是具有整数特性的。用这种方法可以较为准确的确定无电离层延迟组合观测值的整周模糊度。

通过研究基于 GNSS 卫星导航的 PPK 算法, 采用对流层湿延迟改正、无电离层模式、宽巷固定模糊度等模型得到高精度解算结果。

2 方法耦合的潮位提取

2.1 潮位过滤提取算法

瞬时海面变化包含了周期性的长周期潮位变化、中长周期的潮波和海浪的变化以及短周期的船体操纵引起的船体上下起伏的变化。潮位项为长周期项, 周期最小也大于 1 h, 涌浪影响为短波项, 周期为 10~60 s。在获得瞬时海面高程后, 需要通过信号处理, 从中提取需要的长周期潮位^[4]。

潮位过滤提取算法是对 PPK 长基线数据潮位进行平滑去噪方法研究, 对潮位数据进行提取^[5]。该模型利用傅里叶变换和小波变换对 GNSS 瞬时潮位进行平滑滤波, 提取潮位信息。

1) 傅里叶变换

傅立叶变换能将满足一定条件的某个函数表示成三角函数(正弦和(或)余弦函数)或者它们的积分的线性组合, 其公式^[6]为:

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

式中: $F(\omega)$ 为 $f(t)$ 的像函数; $f(t)$ 为 $F(\omega)$ 的像原函数; ω 为频率。

利用傅里叶变换对潮位进行提取, 将高频的信号幅度值全部归零, 再进行傅里叶反变换, 得到去噪后的潮位信息。图 2 为瞬时潮位信息, 中间实线是经过变换去噪后提取的潮位信息。

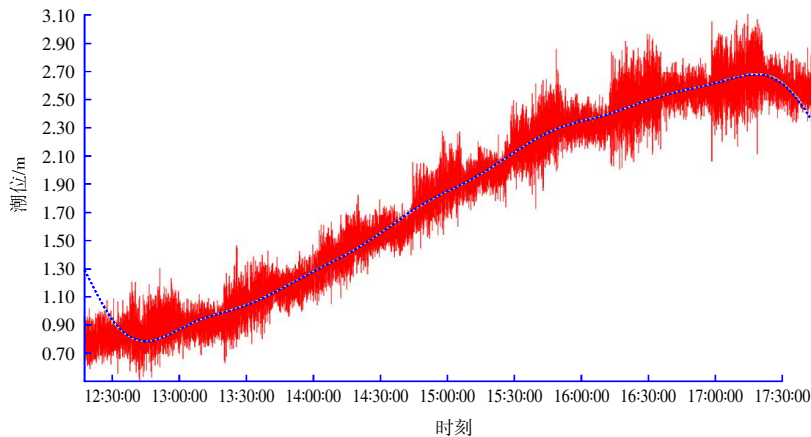


图 2 傅立叶变换法潮位滤波效果图

Fig. 2 Effect of tide level filtering by Fourier transform

2) 小波变换

小波分析方法是傅里叶分析的发展和延拓, 小波做的改变就在于, 将无限长的三角函数基换成了有限长的会衰减的小波基。小波变换的基本原理是把基本小波函数 $\phi(t)$ 作位移 τ 后, 在不同尺度 a 下与待分析的信号 $f(t)$ 作内积, 尺度 a 控制小波函数的伸缩, 平移量 τ 控制小波函数的平移, 横线表示共轭。

$$WT_f(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\phi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)} dt \quad a > 0 \quad (8)$$

小波变换可以将信号逐级分成不同的频率空

间, 而数据的噪声主要是高频信号, 因此, 对含噪数据信号小波变换后的高频部分进行阈值处理, 就可以得到干净的信号。由于波浪频率和潮汐频率相差很大, 根据它们所占有的频率空间的不同, 利用小波变换就可以容易地分离出潮汐数据。采用小波函数进行小波分解, 使低频系数所占有的频段避开波浪的频段, 然后再将该低频系数直接重构, 从而得到真实的潮位序列。

结果表明, 经过小波变换提取的潮位信息相较于傅里叶变换提取的结果更符合原始潮位的趋势, 图 3 为瞬时潮位, 中间实线为经过变换去噪后提取的潮位。

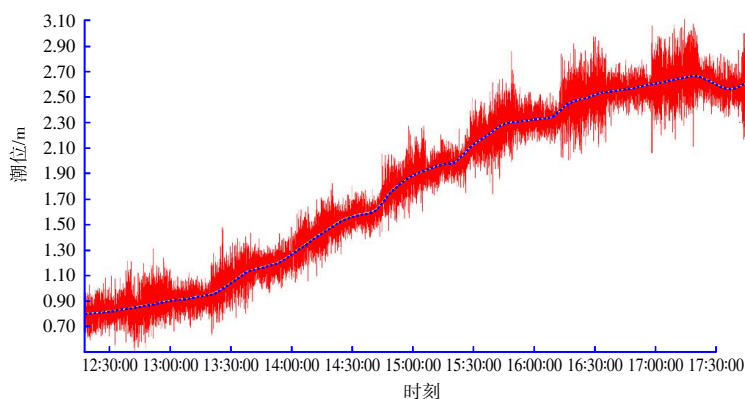


图 3 小波滤波法潮位滤波效果图

Fig. 3 Effect chart of tide level filtering by wavelet filtering method

2.2 方法耦合的潮位提取软件开发

潮位解算模型利用傅里叶变换和小波变换对 GNSS 瞬时潮位进行平滑滤波, 提取潮位信息。为提高开发效率, 该模块利用 Matlab 已有的小波变换和傅里叶变换函数库, 将 Matlab 编写的小波变换函数及傅里叶变换函数打包成动态链接库 .dll 文件, 再通过 C++ 编写的主程序直接调用生成的 .dll 文件, 就能够实现主程序利用小波变换以及傅里叶变换对潮位信息进行平滑去噪。

2.3 垂直基面转换

根据有限的具有理论深度基面数据和高程异常数据的点, 采用最佳的模型进行深度理论基面和高程异常的拟合, 实现潮位高程基准的转换^[7-10]。

将 PPK 解算求解得到的运动船体的 GNSS WGS84 下的坐标, 根据 WGS84 至当地坐标系及高程基准的坐标转换七参数, 利用布尔萨模型转换为当地坐标系下的平面坐标和高程。这种转换中包括了高程异常的部分补偿在里面。由于 GPS 所测的高程为天线相位中心的高程, 而潮位

反映的是海面的变化, 为此, 需要将 GPS 天线处的高程通过姿态改正转换到海面, 进而获得瞬时海面高程。再根据测区几个具有代表性的已有点的理论基面至当地高程基准的差距数据模型, 经过理论基面的无缝内插, 将潮位转换到当地理论最低潮面的潮位, 从而得到高精度的当地理论基面的水深。

3 实验分析

3.1 GNSS PPK 高精度定位测试

为了验证定位结果的精度, 选取了 5 组数据进行动态处理测试, 对观测数据采用本算法进行处理, 得到高精度的流动站坐标, 与已知点数据进行比较, 见表 1。

实验一采用一组 5~20 km GNSS 动态数据, 观测时间为 1 h 40 min, 采样间隔为 1 s, 共计 6 000 历元, X 方向定位结果差值大多数在 -3 cm 与 3 cm 之间, Y 方向在 -2.0 cm 与 2.0 cm 之间, Z 方向在 -5.0 cm 与 5.0 cm 之间, 对 X、Y、Z 的差值进行的平均值和标准偏差计算。

表1 实验一~实验五定位结果偏差

Table 1 Location error of experiment 1 to experiment 5

实验组	一			二			三			四			五		
距离/km	5~20			21~50			51~80			81~100			101~120		
方向	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
平均值/cm	0.3	0.7	0.9	1.8	2.7	3.1	3.9	4.6	5.7	5.9	6.7	7.8	7.5	8.4	10.8
标准偏差/cm	1.3	1.6	1.8	3.2	4.2	5.0	5.5	6.4	7.9	7.4	8.5	9.9	9.2	10.5	12.7

实验二采用一组 21~50 km GNSS 动态数据, 观测时间为 2 h, 采样间隔为 1 s, 共计 7 200 历元, X 方向和 Y 方向定位结果差值大多数在-5.0 cm 与 5.0 cm 之间, Z 方向在-7.0 cm 与 8.0 cm 之间。

实验三采用 51~80 km 的动态数据, 观测时间为 3 h, 采样间隔为 1 s, 共计 10 800 历元, X 方向和 Y 方向定位结果差值大多数在-8.0 cm 与 8.0 cm 之间, Z 方向在-10.0 cm 与 10.0 cm 之间。平均值与标准偏差均小于 8.0 cm。

实验四采用 81~100 km 的动态数据, 观测时间为 4 h, 采样间隔为 1 s, 共计 14 400 历元, X 方向和 Y 方向定位结果差值大多数在-11.0 cm 与 10.0 cm 之间, Z 方向在-13.0 cm 与 15.0 cm 之间, 平均值与标准偏差均小于 10.0 cm。

实验五采用 101~120 km 的动态数据, 观测时间为 4 h 17 min, 采样间隔为 1 s, 共计 17 370 历元, X 方向和 Y 方向定位结果差值大多数在-15.0 cm 与 15.0 cm 之间, Z 方向在-20.0 cm 与 20.0 cm 之间, 平均值与标准偏差均小于 13.0 cm。

可以看出, 经过相应算法处理后的 PPK 定位动态解算精度 100 km 内优于 10 cm, 120 km 内优于 13 cm。

3.2 PPK、RTK 及验潮仪潮位符合性分析

对 2018 年 08 月 07 日某锚地从 08:18:00 开始至 18:09:00 结束的水深数据, 分别采用 PPK、RTK 和 RBR 自容式验潮仪数据进行潮位处理, 提取整分处的潮位平均进行符合性比较, 其中 RTK 加中继站达到 50 km 左右作用距离, 精度统计结果如表 2 所示。

PPK 潮位与 RTK 潮位、验潮仪潮位符合性比较, 50 km 以内 PPK 潮位与 RTK 潮位差值小于 5 cm, PPK 潮位与验潮仪潮位差值小于 10 cm; 100 km 以内 PPK 潮位与验潮仪潮位差小于 15 cm, 120 km 以内差值小于 20 cm, PPK 与 RTK 潮位更为接近, 也体现出验潮仪精度没有 GNSS 方式高。

表2 PPK、RTK 及验潮仪潮位比对表

Table 2 Comparison of PPK, RTK and tide gauge

序号	至基站距离/km	PPK 与 RTK 潮位差平均值/cm	PPK 与验潮仪潮位差平均值/cm
1	15	-1.8	4.8
2	28	-3.1	7.2
3	46	-4.9	9.4
4	72		-11.8
5	96	—	-14.3
6	107	—	-16.5
7	119	—	-18.8

4 结语

项目研究基于 GPS 与 BDS PPK 的中长距离定位解算算法, 采用宽窄巷固定模糊度、无电离层模式、对流层湿延迟改正等模型得到高精度解算结果; 研究方法耦合的 GNSS 潮位平滑滤波、潮位提取算法, 采用傅立叶变换、小波变换进行潮位滤波处理, 提取潮位, 并开发了相关软件, 进行了大量测试验证。研究成果拓展了传统 RTK 和 PPK 的覆盖范围, 满足离岸线 120 km 的水深测量等作业要求; 在长江口河势监测及连云港 30 万 t 疏浚工程水深测量中, 得到了实际应用, 大大缩短了传统验潮仪验潮的时间周期, 从而加快了测量和出图的进度, 降低了水深测量的成本, 可在水运工程建设中推广应用。

参考文献:

- [1] 李炜, 黄幼明. 基于 Hypack 2014 的 GNSS PPK 三维水深测量[J]. 水运工程, 2017(6): 207-212.
LI Wei, HUANG You-ming. GNSS PPK 3D bathymetric survey based on Hypack 2014[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(6): 207-212.
- [2] 李素江, 王华原. GPS PPK 潮位测量技术在疏浚测量中的应用[J]. 水道港口, 2012, 33(2): 178-184.
LI Su-jiang, WANG Hua-yuan. Application of GPS PPK tide measurement technology in dredging survey[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(2): 178-184.
- [3] 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.

(下转第 37 页)