

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.01.008

基于 PPK 无验潮的水下地形测量技术研究

魏荣灏^{1,2}, 陈佳兵^{1,2}, 徐 达^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020;

2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘 要: 随着载波相位差分技术的发展, RTK (Real Time Kinematic) 三维水深测量已经广泛应用于水下地形测量中。RTK 技术需要建立实时数据链接传输差分数据, 当数据链接丢失时, 定位精度会严重下降。针对此问题, 本文研究了一种基于后处理动态差分无需实时数据链接的 PPK (Post Processing Kinematic) 定位技术, 并通过静态和动态比测的方法, 对不同 GNSS 系统及其组合解算策略进行了精度和稳定性测试, 最后在杭州湾河口进行了实际应用。测试结果表明, PPK 获取的结果具有良好的稳定性, 定位精度能满足实际工作需要; 实际应用结果表明基于 PPK 的无验潮水下地形测量技术具有广泛的应用前景。

关键词: 水下地形测量; PPK; RTK; 无验潮观测; 强潮河口

中图分类号: P229.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2021) 01-0057-06

水下地形测量的主要任务是确定水下起伏形态, 主要内容包括测深和定位。测深主要采用声呐进行, 定位方式主要有光学定位和无线电定位。最早采用六分仪、经纬仪或全站仪等设备通过天文定位或者光学定位的方法确定平面坐标, 采用潮位观测的方式进行验潮。随着无线电定位技术的发展, 基于全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的空基定位技术成为水下测量作业的主要定位手段, 而实时动态载波相位差分 (Real Time Kinematic, RTK) 技术因其可实时提供高精度三维坐标的特点使得无验潮水下地形测量得到了广泛应用。但是, RTK 技术需要通过无线电等方式建立实时数据链接以传输载波相位差分数据, 在实际测量作业中, 由于环境的限制, 通讯信号容易发生波动乃至丢失, 造成差分数据链接失效, 进而导致定位精度严重衰减

而无法满足相关作业规范^[1]要求, 而无需实时数据链接的 GNSS 载波相位后处理 (Post Processing Kinematic, PPK) 技术可较好地解决该问题。该技术可望在海洋工程建设、水利工程建设、港口航道建设等方面发挥重要作用。

基于 PPK 技术获取高精度三维坐标是当前的研究热点之一, 国外在此方面的工作较少, 而国内已经开展了较多研究: 汪连贺^[2]联合全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的定位信息和惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 姿态信息获取了瞬时水面高程数据, 并在烟台港进行了工程试验, 结果表明, 验潮距离高达 98 km 时, 验潮精度仍优于 10 cm; 赵建虎等^[3]基于 GPS 事后动态处理技术开展了远距离高精度潮位观测, 对垂直基准面转换方法进行了研究, 并取得了在 100 km 范围内的基线距离上, 潮位精度

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 浙江省科技计划资助项目 (2016F10012, 2017F10008); 浙江省水利科技计划项目 (RC1605, RC1805, RC1902)

作者简介: 魏荣灏 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水陆一体精细探测方面的应用研究工作。

E-mail: weironghao@gmail.com

优于 10 cm 的成果；王朝阳等^[4]研究了基于 PPK 和精密单点定位技术（Precise Point Positioning, PPP）的远距离 GNSS 潮位测量影响因素，研究表明，扼流圈天线可提高观测质量，且 PPP 模式下潮位测量精度优于 10 cm；杜锐^[5]在远海区域以 GPS PPK 技术进行了水面高程传递的测试工作，结果表明，该技术定位精度可满足工程需求；王长永等^[6]将 GPS PPK 技术应用于长江口的水深测量工作中，获得了比传统验潮方法更高的作业效率和精度；叶伟等^[7]在水库水下地形测量中对 PPK 技术进行了应用，较好地解决了山区通讯信号遮挡与控制点距离较远导致 RTK 作业无法进行的问题；刘胜震等^[8]在呼伦湖中进行了 PPK 技术的实际应用，结果表明，该技术在对大面积水域进行水下地形测量时，定位精度可达厘米级。Marcelo Santos 等^[9]研究了海洋环境中 PPK 算法的解算策略，提出了一种新的天气延迟模型并改进了解算精度。Jae Young Roh 等^[10]使用 PPK 技术处理 GNSS 浮标观测数据，结果表明，浮标观测水位与验潮站观测水位之差小于 ± 2 cm。

目前，国内相关研究主要基于 GPS 进行，缺少对不同 GNSS 系统及其组合解算策略的精度评估。此外，针对入海口等海洋环境的 PPK 解算精度和稳定性的验证工作也较少，同时国内 PPK 技术的研究应用领域主要集中于内陆水域，在近海岸特别是杭州湾等强潮河口的应用研究较为少见。为此，本文首先采用不同的 GNSS PPK 解算策略，对静态比测进行精度和稳定性验证工作，然后使用多 GNSS 联合解算方法进行了动态比测。比测结果表明，基于不同 GNSS 系统及其组合的 PPK 技术的定位精度能满足实际工作需要。最后，在杭州湾涌潮河口的大桥航道监测工作中进行了推广应用，实例结果表明，该技术可为水下地形测量提供技术支撑。

1 PPK 无验潮技术原理

PPK 无验潮技术主要由两部分组成，第一部

分是采用载波相位技术获取高精度的三维坐标成果，第二部分是采用相关的高程转换技术实现潮位控制。

1.1 载波相位差分原理

载波相位差分技术的原理是利用 GNSS 观测误差在时间和空间上的强相关特性，通过对基准站和流动站的原始载波相位观测数据进行双差计算，消除接收机和卫星时钟的偏差、卫星误差以及大部分的电离层、对流层延迟的影响，达到厘米级的定位精度^[11]。

研究者可以从至少两个相隔某一固定距离（称为基线）的 GNSS 接收机中获得相似的测量值组合，将从两个接收机得到的相似的测量值形成线性组合（差分），就有可能消除两个接收机共有的误差，这样的组合称为单差。对来自同一颗卫星的两个单差测量值进行求差，就可以得到双差。利用双差技术处理载波相位观测值，就可以消除大部分的误差源^[12]。通过单差消去了卫星星历误差、发射信号的相位和时钟偏差，如果接收机同纬度且相距较近（基线小于 50 km），电离层和对流层的大部分误差也消除了。形成双差后，接收机时钟偏差被消去了，只剩下相位项、整数项和系统相位噪声项。

1.2 PPK 无验潮测量原理

PPK 技术可通过后处理得到厘米级的测点三维坐标，高程数据一般是 CGCS2000（China Geodetic Coordinate System 2000）的大地高数据，处理时需要将大地高转换至目标基准的高程数据，如 85 高程基准，其原理如图 1 所示。

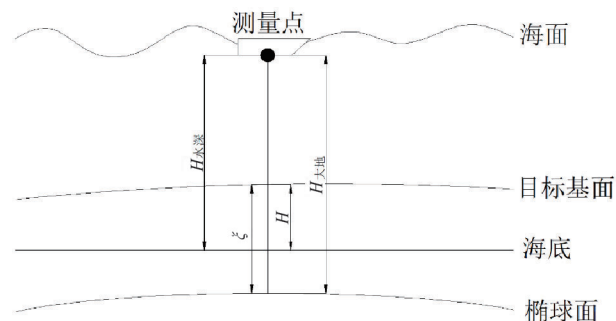


图 1 PPK 无验潮测量原理

水底相对于目标基面的高程可表示为:

$$H = H_{\text{水深}} - H_{\text{大地}} + \zeta \quad (1)$$

式中: H 为海底到目标基面距离; $H_{\text{水深}}$ 为经过天线高改正和吃水改正之后的水深测量值; $H_{\text{大地}}$ 为该点到大地水准面的距离; ζ 为高程异常值。问题的关键在于获取准确的高程异常数据。在小范围的测量中可采用七参数来进行高程转换, 大范围则可以使用区域似大地水准面精化进行^[13]。

2 精度分析与验证

为了验证 PPK 在水上作业的稳定性和可靠性, 有必要对 PPK 解算结果的精度、可靠性和稳定性进行分析。但水上作业时测点是在不断运动的过程中获取的, 无法像陆地作业时长时间多次重复测量得到多组数据进行平差, 因此首先在陆地上选取已知高等级控制点, 按照水上作业的数据采集设置进行静态比测, 对 PPK 解算结果的精度、可靠性和稳定性进行评估, 然后采用同一 GNSS 天线, 由两台同型号 GNSS 接收机在船舶上分别进行 RTK 和 PPK 观测, 假定 RTK 结果为真值, 根据时间戳匹配的方式比较 RTK 与 PPK 解算结果的偏差。

本文采用的卫星定位系统包括全球定位系统、格洛纳斯 (Global Navigation Satellite System, GLONASS)、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、伽利略卫星导航系统 (Galileo Satellite Navigation System, Galileo) 和准天顶卫星系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)。

2.1 静态比测

验证时选取了 5 个控制点同时进行观测, 选取其中一个控制点架设 GNSS 流动站, 其他 4 个控制点作为基准站, 与其距离约为 5 km、10 km、15 km 和 20 km。根据常规作业配置, 一般在基准站和远距离移动作业时选用大地型 GNSS 接收机, 其他则使用普通 GNSS 接收机。因此, 在流动站和距离流动站 20 km 的两个观测点位采用 Trimble R9S 大地型 GNSS 接收机, 并采用 Zephyr Model 2 Geodetic 型卫星天线进行观测, 其他点位

采用 Trimble R8S 型接收机进行静态比测。所有的 GNSS 接收机统一观测设置, 记录所有可见卫星 (GPS、GLONASS、BDS、Galileo 和 QZSS) 的多频数据 (如 GPS 记录 L1、L2 和 L5), 卫星截止高度角设置为 15°, 每秒记录一个观测数据。

完成观测后, 以 Trimble 的 T02 格式下载所有 GNSS 接收机的原始观测数据并导入 Trimble Business Center (TBC) 软件进行后处理, 后处理时设置卫星截止高度角为 15°, 采用多频数据处理不同的卫星信号, 并分别选用单星、双星和多星组合进行, PPK 解算结果与控制点较差统计结果见表 1 至表 7。由于各测站开始和结束的时间略有差异, 因此选取同步观测数据进行统计分析, 所有的解算模式都得到了 3 900 个有效解。

由表 1 至表 7 可见, 在仅使用一个 GNSS 星座的情况下, GPS 解在大部分条件下略优于 BDS 卫星的解算结果, 但两者处于同一量级, 所有的平面标准差都处于毫米的量级, 垂向的标准差处于厘米量级; 比较特殊的是 BDS 解算结果在 20 km 处平面标准差最小, 且垂向标准差优于 15 km 解算结果, 其主要原因是观测设备不同造成的, 在 20 km 处使用的大地型天线配合大地型 GNSS 接收机, 其性能优于其他测点。使用多个 GNSS 星座的解算结果明显优于仅使用 1 个 GNSS 星座的解, 但 2 个、3 个、4 个及 5 个的 GNSS 星座组合的结果没有显著的差异, 平面标准差都小于 1 cm, 垂向标准差基本都小于 1 cm。因此建议在 PPK 作业时, 同时观测所有的 GNSS 星座, 并尽量使用大地型 GNSS 接收机进行观测。

表 1 GPS 静态比测数据统计表

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差 /mm	±4.045	±4.786	±5.861	±8.501
垂向标准差 /mm	±6.721	±8.785	±11.631	±13.220

表 2 BDS 静态比测数据统计表

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差 /mm	±6.130	±9.152	±10.170	±5.380
垂向标准差 /mm	±9.518	±9.697	±16.073	±13.439

表3 双星静态比测数据统计表 (GPS+GLONASS)

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差/mm	±3.322	±3.926	±4.570	±7.351
垂向标准差/mm	±5.796	±7.677	±8.884	±11.775

表4 双星静态比测数据统计表 (GPS+BDS)

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差/mm	±3.602	±3.952	±4.426	±5.154
垂向标准差/mm	±3.822	±6.513	±8.229	±9.596

表5 多星静态比测数据统计表 (GPS+GLONASS+BDS)

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差/mm	±2.952	±3.503	±4.146	±4.835
垂向标准差/mm	±3.356	±5.904	±7.135	±9.154

表6 多星静态比测数据统计表
(GPS+GLONASS+Galileo+BDS)

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差/mm	±2.953	±3.202	±3.796	±4.053
垂向标准差/mm	±3.355	±6.557	±8.377	±7.588

表7 多星静态比测数据统计表
(GPS+GLONASS+Galileo+BDS+QZSS)

	5 km	10 km	15 km	20 km
平面标准差/mm	±2.922	±3.303	±3.591	±4.053
垂向标准差/mm	±3.173	±6.531	±8.931	±7.588

在不同距离观测5个星座得到的PPK解与控制点较差结果如图2所示。从箱型图中可以看出,不同距离的北向、东向和垂向较差都在±5 cm之内,数据分布较为集中,未出现偏差超过5 cm的点。同时,计算得到的平面和三维位置较差基本都小于5 cm。可见在1 Hz观测条件下PPK解算结果较为稳定,具备应用于水上移动作业的能力。

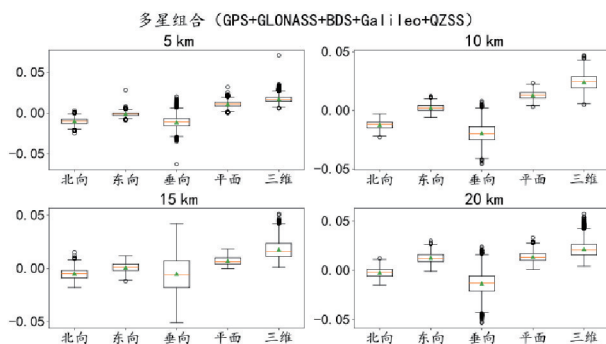


图2 不同距离下多星组合各方向较差 (单位: m)

2.2 动态比测

采用车载移动测量的方式对移动测量的精度进行动态比测。在已知控制点上架设GNSS基准站,并在船舶上架设GNSS流动站,在杭州湾河口区域进行测试。所有测站都采用Trimble R9S大地型接收机和Zephyr Model 2 Geodetic型卫星天线进行观测:以10°的卫星截止高度角采集数据,观测5个卫星星座并按1 Hz频率记录原始数据,同时采用基于浙江省连续运行卫星定位综合服务系统(ZJCORS)的网络RTK(使用GPS与GLONASS的双星组合)进行三维定位,使用手簿记录RTK定位结果。野外数据采集结束后,分别下载GNSS基准站和流动站的T02原始观测数据,采用TBC软件进行后处理。

以RTK定位结果为基准,将PPK处理结果通过时间戳匹配后与RTK定位结果求差,其结果如表8所示。从表中可见,各个统计量的中位数与平均值基本一致,数据偏差较小。平面与三维定位结果的标准差都处于厘米量级,同时,各个定位分量较差的平均值都处于厘米的量级,可见RTK与PPK定位结果的一致性较好。

表8中的垂向和三维定位结果较差最大值分别为16.00 cm和17.27 cm,表明仍存在部分数据较差大于10 cm。对数据进行分析,较差超过10 cm的点主要位于测区内桥梁附近,仅使用GPS与GLONASS双星组合基于ZJCORS的网络RTK技术受桥面遮挡,观测卫星数较少导致定位结果不佳。

3 实例应用

测区位于杭州湾口澉浦段附近,该航道河势变化受上游径流和下游潮流的双重影响。由于河床宽浅、潮强流急,涨落潮流路存在较大差异。实测最大涌潮流速约为12 m/s,潮位瞬间最大涨幅

2 m 以上，实测最大涌潮压力 70 kPa。虽然航道所处江道水域最窄仅有约 8 km 左右，但由于处于涌潮区域且两岸主要为浅滩，基本无法布设验潮站；所处位置的无线电信号一直较差，采用 RTK 方式作业时数据链接丢失严重，因此采用 PPK 技术结合单频测深仪进行水下地形测量工作。

数据采集共获取 7 072 个定位数据，实时获取定位数据（含单点解与浮动解）、PPK 定位数据的定位较差如表 9 所示。从表中可见，野外测量

时由于经常发生 RTK 信号丢失的问题，因此北向、东向实时定位与 PPK 定位的结果较差的绝对值最大达到了 18.569 m 和 33.430 m，垂向的较差绝对值最大超过了 75.932 m，该数据已经完全超出了 GNSS 系统的单点定位精度，主要由于大桥附近 GNSS 信号被遮挡及 RTK 改正信号丢失导致。从平面和三维的定位较差的标准差来看，都已经超过了米级的量级，可见丢失 RTK 差分信号对定位结果的影响是巨大的。

表 8 定位结果比较

	北向	东向	垂向	平面	三维
最小值 /cm	-3.30	-8.20	-7.10	0.00	0.10
中位数 /cm	1.30	-0.10	0.70	1.46	2.23
平均值 /cm	1.22	-0.21	0.72	1.50	2.37
最大值 /cm	4.90	5.00	16.00	8.24	17.27
标准差 /cm	±0.72	±0.80	±1.87	±0.68	±1.06

表 9 实时与 PPK 定位结果较差表

	北向	东向	垂向	平面	三维
最小值 /m	-14.830	-13.890	-75.932	0.000	0.003
中位数 /m	0.012	-0.001	-0.005	0.123	0.129
平均值 /m	-0.083	0.161	-0.157	0.389	0.601
最大值 /m	18.569	33.430	44.860	36.497	78.696
标准差 /m	0.987	2.010	2.235	2.213	3.116

由于 RTK 实时信号与 PPK 信号的定位结果差距较大，因此使用测区附近已有的高程异常模型将 RTK 与 PPK 获取的高程数据转换至 85 国家高程基准后，与同步观测的潮位数据进行验证。图 3 绘制了作业期间某天的 RTK 实时潮位、PPK 潮位、南北岸和通航孔的潮位站的潮位过程线。从图 3 上可见 RTK 实时潮位与 PPK 解算结果基本是一致的，而丢失 RTK 差分信号的实时定位潮位数据发生了较大的振荡，已经无法满足 RTK 三维水深测量的技术要求。PPK 潮位与该区域布置的三个潮位站的数据能够较好的吻合，其计算结果可以满足在该区域中进行 RTK 三维水深测量的精度要求。

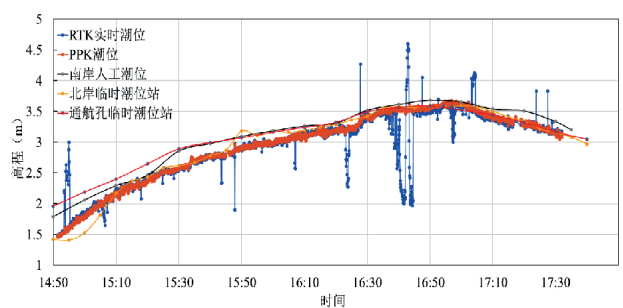


图 3 RTK 实时潮位、PPK 潮位与潮位站潮位数据比较图

4 结 论

本文基于载波相位观测原理介绍了载波相位差分技术，通过静态和动态比测的方法进行了精

度和稳定性测试后,在杭州湾涌潮河口进行了实际应用,主要结论如下:

(1) 静态比测结果表明,20 km 距离内现有 GNSS 系统的 PPK 解算结果都能符合相关规范要求;动态比测结果表明,RTK 和 PPK 解的一致性较好,平面与三维定位结果的标准差都处于厘米量级。静态比测结果表明,在 20 km 距离内,现有的 GNSS 系统都能提供满足相关规范要求的定

位结果,多个 GNSS 系统的联合观测解能提供精度更为稳定的结果;(2) 实际应用中 PPK 解算结果精度可满足 RTK 三维水深测量的技术要求,能较好地解决 RTK 差分信号丢失时定位精度严重下降的问题,具有较大的应用潜力;(3) 后续有必要在延长测试距离的基础上对更多影响 PPK 解算结果的因素进行研究,并开展联合 RTK 和 PPK 的水下地形测量技术研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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,2014,34(4):24-27.
- [3] 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.
- [4] 王朝阳,周兴华,李延刚,等. 远距离 GNSS 潮位测量精度的影响因素研究[J]. 海洋技术学报,2017,36(3):1-6.
- [5] 杜锐. GPS PPK 技术在远海水下地形测量中的应用[J]. 全球定位系统,2017,42(1):111-113.
- [6] 王长永,颜惠庆. 动态后处理技术在长江口水深测量的适用性[J]. 水运工程,2017(11):194-196,212.
- [7] 叶伟,魏荣灏,史永忠. PPK 技术在水库水下地形测量中应用[J]. 浙江水利科技,2017,45(4):72-73,76.
- [8] 刘胜震,陈景涛,陈真,等. 大面积水下地形测绘中的 PPK 技术应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(8):157-159.
- [9] Santos M, Nievinski F, Cove K, et al. Range-Extended Post-Processing Kinematic (PPK) in a marine environment[C]// ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, USA, 13-16 September, 2005:805-809.
- [10] Roh J Y, Yoo K W, Suh Y C, et al. Determination of vertical datum level for tidal bench mark using GNSS buoy observations[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017,25(6): 689-695.
- [11] [美] 卡普兰, [美] 赫加蒂. GPS 原理与应用(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [12] Remondi B W. Global positioning system carrier phase: Description and use[J]. Bulletin Geodesique, 1985, 59(4): 361-377.
- [13] 张国利,时小飞,杨开伟,等. 网络 RTK 支持下的无验潮水深测量方法及其应用[J]. 测绘通报,2016(12):140-141.
- [14] 王智,曹庆磊,张洪德,等. PPK 动态后处理测量技术及精度分析[J]. 城市勘测,2019(2):97-100.

Research of Bathymetric Survey Technique based on PPK without Tidal Observation

WEI Rong-hao^{1,2}, CHEN Jia-bing^{1,2}, XU Da^{1,2}

1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marien Planning and Design), Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Estuary and Coast of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China

Abstract: With the development of carrier phase differential technique, RTK 3D bathymetric survey has been widely used in underwater topographic survey. RTK technology needs to establish a real-time data link to transfer differential data, when the data link is lost, the positioning accuracy will be seriously reduced. In order to solve this problem, a PPK positioning technology based on post processing dynamic difference without real-time data link has been studied, and the precision and stability of different GNSS systems and their combined solution strategies are tested by static and dynamic comparison methods, finally the actual application is carried out in Hangzhou Bay. The test results show that the results obtained by PPK have good stability and the positioning accuracy can meet the needs of actual work; the practical application results show that the bathymetric survey technology based on PPK without tidal observation has a wide application prospect.

Key words: bathymetric survey; PPK; RTK; observation without tidal observation; strong tide estuary