



GPS PPK 技术在鱼山海域测量中的应用及其精度分析

张登奎，孙洪瑞

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海 200032)

摘要：GPS RTK(载波相位差分定位技术)测量受卫星信号和RTK电台传输影响，流动站无法获得固定解。针对这一问题，研究GPS PPK(载波相位动态后处理技术)的工作原理、外业操作及数据处理方法。在鱼山海域测量中，采用已知点核算、RTK检查线与PPK主测线高程对比的方法对其测量精度进行统计分析。结果表明，在RTK应用受限时，PPK测量精度与RTK基本一致。联合应用PPK和RTK技术可以提高作业效率和数据可靠性，既节约了成本，又缩短了工期，在海洋测绘中值得推广。

关键词：GPS PPK(载波相位动态后处理技术)；鱼山海域测量；精度分析

中图分类号：U 652

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)05-0162-04

Accuracy analysis and application of GPS PPK in Yushan marine survey

ZHANG Deng-kui, SUN Hong-rui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: GPS RTK(real-time kinematic) survey is affected by the satellite signals and transmission of RTK radio stations, the mobile station cannot obtain the fixed solution. For solving this problem, the working principle, field operations, and data processing methods of GPS PPK (post-processed kinematic) are studied. In the survey of Yushan marine, the method of known point check and elevation comparison between the RTK inspection line and the PPK main survey line is used to statistically analyze its measurement accuracy. The results show that when the application of RTK is limited, the survey accuracy of PPK is consistent with that of RTK. The combined application of PPK and RTK can improve operational efficiency and data reliability, which not only saves the survey costs but also shortens the construction period, therefore PPK technology is worthy of promotion in the marine survey.

Keywords: GPS PPK (post-processed kinematic) ; Yushan marine survey; accuracy analysis

GPS RTK 技术以其方便、实时、高精度等特点广泛应用于大地测量、海洋测绘、地质勘探、交通运输等领域。然而，由于受卫星信号和RTK电台数据传输的影响，随着流动站和基准站之间距离的增加，各种误差的空间相关性迅速下降，导致观测时间增加，甚至因无法解算整周模糊度而无法获得固定解^[1]。GPS RTK 测量中流动站与

基准站之间的距离一般只能在 15 km 以内，受环境和气候的影响，作用距离可能更短^[2]。GPS PPK 技术不仅克服了 RTK 数据传输的限制，而且作用距离更长；同时，作为动态后处理技术，还具有厘米级的平面及高程定位精度^[3]。

大范围海域测量中，水深测量一般会分布在几十公里的范围内，在传统的 GPS RTK 三维水深

测量方法受限时, GPS PPK 技术具有明显优势。当前针对 GPS PPK 技术的研究和应用主要是国外进口 GPS 接收机和配套软件, 本文针对国产主流双频 GPS 接收机(如华测 T8 型)的外业操作步骤、内业处理方法以及测量精度进行研究分析, 探索 GPS PPK 技术在鱼山海域测量中的应用。

1 GPS PPK 技术的工作原理

GPS PPK 技术, 即载波相位动态后处理技术, 能够在数据后处理的情况下获得厘米级的平面及高程精度。其工作原理为: 在已知点上架设一台或多台双频 GPS 接收机作为基准站, 使用至少一台双频 GPS 接收机作为流动站, 对 GPS 卫星进行同步跟踪观测。由于同步观测的流动站与基准站间的误差(包括卫星钟差、轨道误差、对流层延迟、电离层延迟等)具有很强的空间相关性, 外业观测结束后, 对基准站和流动站同步观测的数据, 在计算机中利用数据后处理软件进行差分处理、线性组合, 形成虚拟的载波相位观测值, 从而计算出流动站接收机与基准站接收机之间的空间相对位置; 然后在数据后处理软件中引入基准站的已知坐标及高程, 利用基准站的相位改正数对流动站的相位观测数据进行改正, 即可解算出流动站的三维坐标^[4-5]。

双频 GPS 接收机在 PPK 作业模式下, 其测量精度的计算公式为^[6]:

$$M(x,y) = \pm 10 \text{ mm} + 10^{-6}D \quad (1)$$

$$M(h) = \pm 20 \text{ mm} + 10^{-6}D \quad (2)$$

式中: $M(x,y)$ 为 PPK 的平面定位精度; $M(h)$ 为 PPK 的高程定位精度; D 为流动站接收机与基准站接收机之间的基线长度(km)。

2 GPS PPK 的外业操作及数据处理流程

2.1 PPK 外业数据采集

1) 在已知点上架设华测 T8 双频 GPS 接收机, 在 Land Star 配置中进行静态设置, 包括采样间隔、

存储格式、高度截止角、天线高等, 基准站接收机采样间隔一般设置为 1 s, 设置完成后基准站接收机开始在已知点上进行连续静态观测。

2) 流动站设置: 将流动站接收机设置为静态模式, 采样间隔同基准站保持一致, 设置为 1 s, 然后在 Land Star 测量中进行 PPK 测量的设置与记录, 按设置的“PPK 观测时间”进行测量, 可以手动点击测量, 也可选择“自动完成测量”。

3) 测量开始前流动站接收机须进行 10 min 左右的初始化, 测量过程中应保持流动站接收机对卫星的持续跟踪观测, 如出现关机或卫星失锁等状况应重新初始化。初始化完成后, 即可在待测点上进行 PPK 测量。

4) 为保证 PPK 测量成果的准确性, 测量前应在已知控制点上进行检核比对。检核结果满足规范要求后方可进行 PPK 测量作业。

2.2 PPK 数据后处理

1) 将基准站及流动站接收机记录的静态数据下载至计算机。

2) 在华测 CGO 软件中新建项目, 建立工程项目使用的目标坐标系并设置相关坐标系转换参数, 具体包括设置参考椭球、投影参数、基准转换模型等。

3) 导入基准站接收机和流动站接收机采集的 HCN 或 RINEX 格式数据, 并设置天线类型及天线高。

4) 录入基准站在当前目标坐标系统、高程系统下的已知坐标和高程。

5) 基线处理与平差完成后即可得到流动站观测点每一个观测历元的空间三维成果的详细信息和网图。基线解算时如出现不良测量数据, 可对其进行人工删除。点位中心是红色表示该点未达到固定解, 应对基线进行精化处理, 直至获得满足精度要求的解算结果。当静态模糊度固定时, 解算结果的平面精度和高程精度均可达到厘米级的水平。

PPK 外业操作与数据处理流程见图 1。

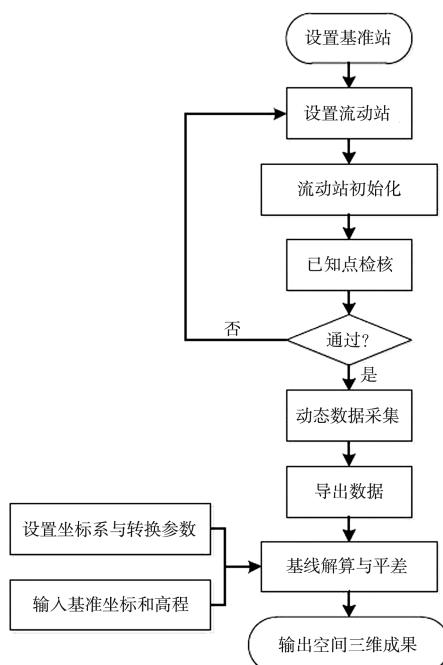


图 1 PPK 外业操作与数据处理流程

3 工程应用及其精度分析

在鱼山围填海三期工程平面形态方案研究地形测量中,由于测区范围较大(138 km^2),采用RTK水深测量时流动站接收机在测区远端经常出现单点及浮动状态,为解决该问题,在该项目部分区域的水深测量中采用了GPS PPK三维水深测量的方法。为确保PPK三维水深测量的准确性,PPK水深测量前在已知控制点上进行了检核比对。

已知点检核及PPK三维水深测量的流程如下:

1) 在测区已知控制点DY06上架设基准站接收机。

2) 将流动站接收机设置为PPK测量模式,在鱼山岛周边已知控制点DY02、DY04、DY05及岱山本岛国家高等级控制点Z506、Z507上进行PPK检核测量,检核测量时将流动站接收机安放在基座上,使用三脚架进行精确对中整平,在每个待测点上测量30 s。PPK三维水深测量过程中将流动站对中杆绑在测量船上。

3) 采用华测CGO软件对基准站和流动站接收机的PPK观测数据进行综合处理,获得不同历元时刻流动站接收机的三维成果。

4) 将处理得到的DY02、DY04、DY05及Z506、Z507的坐标高程与已知坐标高程进行对比分析。

5) 存储PPK三维水深测量过程中静态模糊度固定的流动点解算成果,保留历元的时刻信息、三维成果信息和精度信息,根据这些信息便可进行水深数据的后处理。

已知控制点检核中PPK解算成果与已知成果对比见表1。

表 1 PPK 解算成果与已知成果对比

点号	与基准站DY06的距离/km	$\Delta X/\text{cm}$	$\Delta Y/\text{cm}$	$\Delta H/\text{cm}$
DY02	4.1	± 0.8	± 0.9	± 1.7
DY05	5.1	± 1.1	± 1.3	± 1.9
DY04	6.3	± 1.4	± 1.4	± 2.0
Z507	18.5	± 1.8	± 2.0	± 2.6
Z506	21.7	± 2.2	± 2.2	± 2.8

表1表明,PPK测量精度随流动站与基准站间距离的增加误差呈线性增大的趋势,但21.7 km范围内平面高程精度仍能达到3 cm以内。鱼山围填海三期工程平面形态方案研究地形测量最远端距基准站DY06约15.6 km,采用GPS PPK三维水深测量的方法完全满足测量的精度要求。

水深测量中,布设检查线与主测线水深点进行比对是评价水深测量成果质量的主要标准之一,PPK三维水深测量结束后,垂直于主测线布设检查线,在可以获得RTK固定解的区域采用RTK水深测量的方式进行水深检查测量,经统计分析,RTK检查线与PPK主测线水深点高程中误差为 $\pm 0.12 \text{ m}$,满足规范要求。

高程误差反映了水深测量检查结果的质量,具体的统计方法是以RTK检查测量水深点高程为 a_i ,相邻PPK主测线水深点高程为 b_i ,统计RTK检查测量水深点高程与其相邻PPK主测线水深点高程的差值 v ,从而计算水深点的高程中误差:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}} \quad (3)$$

式中: n 为检查点总数; v 为RTK检查测量水深点高程与其相邻PPK主测线水深点高程的差值, $v=a_i-b_i$;[vv]为 n 个观测值真误差的平方和。

局部区域RTK检查线高程与PPK主测线高程

对比见图 2, 其中细体数字为 PPK 主测线高程, 粗体数字为 RTK 检查线高程。

10.5	10.6	10.6	10.6	10.6
10.7	10.6	10.5	10.4	10.7
10.5	10.6	10.5	10.4	10.4
10.4	10.5	10.5	10.2	10.4
10.6	10.5	10.3	10.4	10.4
10.8	10.5	10.3	10.3	10.3
10.8	10.5	10.5	10.3	10.2
11.0	10.8	10.6	10.4	10.3
11.0	10.6	10.6	10.5	10.3
11.2	11.0	10.4	10.2	10.2
11.4	11.2	10.6	10.2	10.1

图 2 RTK 检查线高程与 PPK 主测线高程对比

4 结语

1) PPK 测量精度与 RTK 基本一致, 均为厘米级。

2) PPK 技术可以有效弥补 RTK 技术的不足, 充分发挥其无需实时通讯连接、作业距离远、测量精度高等优势, 完全可满足大范围水下测绘、远距离潮位控制及其他受数据通讯影响的测量作业。

3) 联合应用 PPK 和 RTK 技术可以提高作业效率和数据可靠性, 从而大大节约成本和工期。

(上接第 154 页)

2) 随着软土层埋深的增加, 除软土层的天然密度较均匀之外, 软土层的强度指标(如压缩模量、标贯击数等)均有增大, 且底部比顶部的工程地质性质更好。

3) 由于各埋深区段取样或测试点分布不均匀, 而厚层软土层在纵向、横向发育的均匀性存在一定的差异, 层内薄夹层比较多, 也导致部分试验成果指标的离散性较大, 因此, 部分成果数据未能客观反映出软土层强度的变化趋势, 需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 谢强, 郭永春. 土木工程地质[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
- [2] 河海大学《水利大辞典》编辑修订委员会. 水利大辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2015.

4) 在使用 PPK 时, 空间转换参数应有效覆盖测量作业区, 作业半径一般不超过 50 km, 从而避免对 PPK 测量精度的影响。

5) 在使用 PPK 的过程中, 应根据实际需要采用多基准站、精密星历参与解算等方式提高测量精度, 保证测量成果的可靠性。

参考文献:

- [1] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [2] 董江, 王胜平. GPS PPK 远距离在航潮位测量及其在航道的实现[J]. 测绘通报, 2008(5): 51-53.
- [3] 邹进贵, 陈健, 余锐, 等. GPS PPK 技术在船舶通航试验中的应用[J]. 测绘通报, 2012(S1): 76-78.
- [4] 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.
- [5] 许家琨, 欧阳永忠, 陆秀平, 等. 双频 GPS PPK 技术在沿岸海道测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2004(6): 30-33.
- [6] 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.

(本文编辑 武亚庆)

- [3] 文渊. 舟山软土土性参数随机场研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- [4] 高大钊. 地基土力学性质指标的可靠性分析与取值[J]. 同济大学学报, 1985(4): 59-68.
- [5] 高华喜. 工程地质学[M]. 北京: 海洋出版社, 2014.
- [6] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 侯晓亮, 谭晓慧, 刘泽勇, 等. 黏性土压缩指标及其与饱和度的关系[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1336-1343.
- [8] 李亮, 魏丽敏. 基础工程[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [9] 刘春, 白世伟, 赵洪波. 黏性土土性指标的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2003(S2): 180-184.
- [10] 王宝勋. 海积软土力学特征与固化新技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [11] 翟静阳, 冷伍明. 黏性土物理力学指标的变异性及相互关系[J]. 铁道建筑技术, 2001(1): 49-51.

(本文编辑 郭雪珍)

投稿须知

- 1) 论文著作权人应确保所投稿件为尚未公开发表的原创性著作，若论文发表后发生侵权问题，一切责任由著作权人承担。
- 2) 所投稿件不得涉及国家秘密，若发生失泄密问题，一切责任由著作权人承担。
- 3) 立论正确，论据充分，重点突出，逻辑严密，数据可靠，文字精练。
- 4) 文中图片要求插入原图（勿用截屏方式），可以清晰显示图中文字。
- 5) 版面与篇幅：A4 版面，通栏排版，正文 5 号字。篇幅一般不超过 5000 汉字（含图、表所占面积）。
- 6) 来稿中必须给出论文题目、作者姓名、单位（邮编）、论文摘要、关键词、中图分类号、第一作者照片（插入文末）及作者简介（出生年月、性别、学历、职称、现从事科技工作领域或研究方向）以及上述从论文题目到关键词的英译文。论文题目应恰当反映文章的特定内容，中文题目一般不超过 20 个汉字。
- 7) 论文摘要（中英文）是一篇尽量简短的完整短文（一般在 200~300 字），包括目的、方法、结果和结论 4 部分，应具有独立性和自含性。摘要以提供梗概为目的，毋需自己评论研究成果。摘要中出现的数据应该是最重要、最关键的数据，不能出现图表参数。摘要中的缩写名称在第一次出现时要有全称。撰写英文摘要时，不能因为某些内容不好翻译就弃掉要点。
- 8) 关键词应选取能表达全文主题内容信息款目的单词或术语 4~8 个。名词术语必须符合国家标准、国家军用标准和相关行业标准。要尽量使用名词或名词性词组并避免使用形容词或形容词性词组做关键词。中英文关键词要一一对应。
- 9) 论文章节编号采用三级标题顶格排序：一级标题为 1, 2, 3, ……；二级为 1.1, 1.2……；三级为 1.1.1, 1.1.2……。
- 10) 正文（含图表）中的物理量和计量单位必须符合最新颁布的国家标准、国际标准和规定。外文字母的文种、字体的大小写、正斜体、是否黑体、上下角标及易混的字母应书写清楚。必须区分数值等式和量的等式，写法应符合 GB 3101—1993 有关量、单位和符号的一般原则。
- 11) 图、表内容具有自明性，且随文出现，其中的字符和数据应准确、清晰、无误，并与正文一致。图、表应附上图号（表号）。图题（表题）中文表达。图和表中加注的单位应写作相关量（或其符号）的分母，而不应写作与相关量相乘。
- 12) 参考文献选用主要的、公开发表的、并尽量选用近年发表的中外文献，按照在正文中出现的先后顺序编号。中外文献作者姓名一律姓前名后，3 名以内全部列出，4 名以上则只列 3 名，后加“等”或“et al”。引用参考文献的页码不可遗漏；（可参照下载中心中的参考文献著录格式）。
- 13) 源于国家自然科学基金或省、部委重点课题、获奖课题的论文，请注明相关项目名称及批准号。