引文格式：吴珍丽,彭小青,吴迪军. 机载RTK定位精度对无人机测图精度的影响分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 119-121. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.12.029

机载RTK定位精度对无人机测图精度的影响分析

吴珍丽[1]，彭小青[1]，吴迪军[1]
（1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司，湖北 武汉 430050）

摘　要：机载RTK定位精度存在波动现象，进而会影响无人机测图精度。针对无人机航测中机载RTK定位精度的异常波动问题，详细分析了机载RTK定位精度对无人机测图精度的影响，以及机载RTK定位精度差异成因。通过铜陵长江公铁大桥大比例尺地形图航测项目实验结果表明，机载RTK定位精度对无人机测图精度具有显著影响。因此无人机航测时应选择精度稳定可靠的RTK定位模式，并在航飞作业过程中实时监控机载RTK的定位精度；当机载RTK精度较差时，通过自建单基站方式或者通过选择RTK定位精度较好的时段进行作业，以保证大比例尺地形测图的精度。该研究成果可为无人机免像控作业规范规程的制定提供参考。

关键词：RTK定位精度；大比例尺测图；精灵4 RTK无人机；桥梁工程
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0119-03

Impact Analysis of Airborne RTK Positioning Accuracy on UAV Mapping Accuracy

WU Zhenli[1], PENG Xiaoqing[1], WU Dijun[1]
(1. China Railway Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: There is fluctuation about the airborne RTK positioning accuracy, which affects the mapping accuracy of UAV. To solve the problem, we analyzed the influence of airborne RTK positioning accuracy on UAV mapping accuracy and reasons for the differences of airborne RTK positioning accuracy. Taking the large-scale aerial topographic mapping project of Tongling Yangtze River Highway and Railway Bridge for example, we obtained the result that the airborne RTK positioning accuracy had a significant impact on UAV mapping accuracy. Therefore, it's recommended that stable and reliable RTK positioning mode should be selected during UAV aerial survey, and the real time positioning accuracy of airborne RTK should be monitored during aerial flight operation. When the accuracy of airborne RTK is poor, we can carry out the operation by building a single base station or selecting a time period with good RTK positioning accuracy to ensure the accuracy of large-scale topographic mapping.

Key words: RTK positioning accuracy, large-scale topographic mapping, Phantom 4 RTK UAV, bridge engineering

如何提高无人机大比例尺地形测图的成果精度，一直是无人机航测学术界和工程界关注的重点之一[1]。影响无人机测图精度主要有2个关键因素：一是准确相机参数的获取；二是高精度POS数据的获取[2-3]。

大疆精灵4 RTK无人机相机的镜头参数在出厂时已经过检校，由于搭载的是机械结构不够稳定的非量测型相机，内方位元素和畸变参数一旦发生改变就无法保证测量精度[4]，因此需定期进行相机畸变参数的检校并及时进行更新。而在POS数据获取过程中，在大多数情况下，RTK均能达到较高的精度，但在个别情况下，由于地球的大气层会对电磁波的传播产生路径以及时延上的影响[5-6]，同时受到卫星上的原子钟、卫星星历等精准度的限制，电离层、对流层误差、星历、星钟误差等均会对RTK定位精度产生影响，其定位精度可能会出现较大波动，从而影响最终的测图精度。本文在G3铜陵长江公铁大桥项目实施过程中发现，由于部分测区的大疆精灵4机载RTK定位精度较低，进而导致生成的航测地形图成果精度降低。因此本文结合该项目，进一步分析了机载RTK定位精度对无人机航测精度的影响，并提出了确保测图精度的技术方案。

1　项目概况

G3铜陵长江公铁大桥连接长江南岸的铜陵市区和长江北岸的枞阳县，承担既有铜陵长江公路大桥替代桥功能（替代高速公路），同时搭载铁路过江，在铜

收稿日期：2022-09-01。
项目来源：中铁大桥勘测设计院集团有限公司2021年度科研项目（2021-27）。
第一作者简介：吴珍丽（1984—），博士，高级工程师，研究方向为摄影测量与遥感，E-mail：414936050@qq.com。

陵长江公路大桥上游侧约700 m，主桥桥跨为113.5 m+145 m+988 m+145 m+113.5 m，大桥按照“4线铁路+6车道高速公路”的标准建设。铁路桥面布置2线合庐铜城际、2线城市轨道交通1号线；公路桥面布置双向6车道京台高速，两侧设置紧急停车带。本次测量任务为：在当地测绘部门已收集的1∶2 000地形图基础上，针对部分地形变化较大区域进行修补测，修补测区域为线路中线左右约100 m范围内共6个分散的测区。

2 无人机航测数据获取与试验方案

该项目的数据获取利用大疆精灵4 RTK无人机及机载的2 000万分辨率数码相机，按照1∶500比例尺成图要求及无人机飞行相关要求设计飞行实施。飞行航高设计为100 m，航向重叠度为80%，旁向重叠度为70%。航飞拍摄前，将收集到的控制点及航测范围线导入卫星影像图中，通过卫星影像图确定作业范围是否为禁飞区、限高区，大致判断无人机起降场地、飞行高度。通过踏勘实地核查周边高层建筑物、高压输电线路、河流、高山等影响安全的因素，确定无人机起降场地。本项目外业航拍历时3 d，共计飞行30架次，累计飞行时间495 min，拍摄时间344 min，拍摄相片7 411张。每架次拍摄的像片均确保无人机RTK解为固定解。项目实施过程中，采用千寻CORS作为机载RTK的差分源。

在航飞作业过程中，随时观察并记录机载RTK的定位精度，即遥控器上显示的RTK实时动态精度。经过内业处理生成三维实景模型后，根据测定的检查点来评定模型上对应成果的精度，以此分析机载RTK定位精度对测图精度的影响。所有测区均匀布设一定数量的检查点，检查点选取航测任务范围内的明显地物点，一般选取比较清晰的公路地面标识线角点，方便后期内业比对统计。使用Trimble R10 GNSS接收机以RTK定位模式实测检查点的坐标、高程，测量方式为双测回平滑采集，每个测回采集30个历元的数据，最终以2个测回共60个历元数据的均值作为检查点的成果。

3 机载RTK定位精度对测图精度的影响分析

计算检查点在三维实景模型上的坐标值与RTK实测坐标值的差值，统计测区1~6共40个检查点的精度如表1所示。表中，$\triangle X$表示检查点在平面坐标（X）方向的坐标差值；$\triangle Y$表示检查点在平面坐标（Y）方向的坐标差值；$\triangle H$表示检查点在高程（H）方向的差值。

从表1可以看出，测区1、测区3、测区6的检查点精度较高，而测区2、测区4、测区5的检查点精度整体较低。在项目航测中发现，测区1、测区3、测区6航飞作业时机载RTK定位精度为2~3 cm，而测区2、测区4、测区5航飞作业时机载RTK定位精度为5~9 cm，反映出航测地图的精度与机载RTK精度的正相关性。

表1 检查点精度统计表

测区	点号	$\triangle X$/m	$\triangle Y$/m	$\triangle H$/m	测区	点号	$\triangle X$/m	$\triangle Y$/m	$\triangle H$/m
1	1	−0.022	−0.022	−0.023	4	1	−0.034	0.032	0.047
	2	−0.012	0.013	−0.018		2	−0.024	0.038	0.029
	3	−0.011	0.005	−0.019		3	−0.062	0.034	0.054
2	1	−0.029	0.016	0.074		4	−0.042	0.034	0.055
	2	−0.017	0.048	0.091		5	−0.045	0.027	0.076
	3	−0.037	0.046	0.051		6	−0.038	0.021	0.096
	4	−0.030	0.003	0.041		7	−0.056	0.051	0.026
	5	0.007	0.063	0.027	5	1	−0.024	0.022	0.060
	6	−0.008	−0.044	0.034		2	0.018	0.012	0.038
	7	−0.023	−0.021	0.030		3	−0.008	0.001	0.055
3	1	0.022	−0.005	−0.016		4	0.007	−0.012	0.082
	2	−0.004	−0.018	0.005		5	0.011	0.039	0.078
	3	−0.021	0.010	−0.003		6	0.012	0.001	0.057
	4	−0.013	0.025	0.004	6	1	0.002	0.006	−0.003
	5	−0.013	−0.031	0.009		2	0.001	−0.022	−0.026
	6	−0.014	0.010	−0.004		3	−0.025	0.022	−0.018
	7	−0.030	0.001	0.018		4	−0.006	0.030	−0.009
	8	0.003	0.030	−0.014		5	−0.024	−0.021	−0.011
	9	0.019	0.009	0.013		6	−0.009	0.005	0.001
	10	0.012	0.001	0.030		7	−0.024	0.006	0.010

为了进一步分析测区2、测区4、测区5精度较差的原因是否与机载RTK的定位精度较差有关，以测区4为实验测区，使用Trimble R10 GNSS接收机自建单基站的方式执行航飞并实测检查点的坐标、高程。该测区外业航飞作业时机载RTK显示的实时定位精度均为2~3 cm。统计的7个检查点的精度如表2所示。

表2 测区4试验精度统计表（自建单基站RTK）

点号	$\triangle X$ /m	$\triangle Y$ /m	$\triangle H$ /m
1	−0.022	−0.021	0.018
2	−0.021	−0.006	−0.006
3	−0.026	−0.031	0.014
4	−0.033	−0.020	−0.020
5	−0.020	0.011	−0.007
6	−0.026	0.014	0.046
7	−0.024	0.012	0.065

从表2可以看出，在参与精度统计的7个检查点中：X坐标偏差绝对值最大为0.033 m，最小为0.020 m，

平均值为0.025 m；Y坐标偏差绝对值最大为0.031 m，最小为0.006 m，平均值为0.016 m；X坐标中误差为0.025 m，Y坐标中误差为0.018 m，平面点位中误差为0.031 m。高程偏差绝对值最大为0.065 m，最小为0.006 m，平均值为0.025 m，高程中误差为0.032 m。显然，表2中测区4的检查点精度结果优于表1中测区4的精度，说明机载RTK定位精度会对航测地形图成果的精度产生显著影响。

当千寻CORS系统较稳定，机载RTK的定位精度为2~3 cm时，再次以千寻CORS为差分源对测区4执行航飞作业，此时机载RTK的定位精度与上述自建单基站的方式进行航飞作业时精度相当。统计的7个检查点的精度。在参与精度统计的7个检查点中：X坐标偏差绝对值最大为0.037 m，最小为0.001 m，平均值为0.020 m；Y坐标偏差绝对值最大为0.035 m，最小为0.003 m，平均值为0.019 m；X坐标中误差为0.023 m，Y坐标中误差为0.022 m，平面点位中误差为0.031 m。高程偏差绝对值最大为0.054 m，最小为0.006 m，平均值为0.023 m；高程中误差值为0.028 m。以上精度结果与表2的相当，均优于表1中测区4的检查点精度。结果表明：机载RTK定位精度对生成的航测成果精度具有显著影响。

综上所述，当航飞作业过程中机载RTK的定位精度为5~9 cm时，获取的航测成果的精度较低；当机载RTK的定位精度为2~3 cm时，获取的航测成果的精度较高，航测成果的精度与机载RTK的定位精度表现出较强的正相关性。

4　机载RTK定位精度差异分析

无论是连接千寻CORS方式作业，亦或通过自建单基站的方式作业，其本质均为通过建立载波相位差分方程求解整周模糊度，进而解算机载RTK实时位置。根据载波相位双差方程联立求解，双差综合误差可简化为：

$$\mu=\Delta^2O+\Delta^2I+\Delta^2T \tag{1}$$

式中，Δ^2O为轨道偏差残余；Δ^2I为电离层延迟残余；Δ^2T为对流层延迟残余；μ与站间距离有关，当距离较短时，这3项可以忽略不计，但在中长距离动态定位中，这3项误差占据了主导地位，使得定位精度迅速下降[7]。本文实验中的CORS为采用VRS技术的大型网络参考站系统，基准站间距一般长达40~80 km，容易受电离层、对流层残差的影响，比较常见的表现是：在不同纬度地区、同一天不同时间段、西部山区不同海拔高度使用时均存在差异。在电离层活跃的时段及地区，RTK定位精度将显著降低。而自建单基站系统是一种简便快捷的作业方式，可为大疆精灵4RTK提供差分源。考虑到自建单基站系统作业距离一般不超过2 km，几乎可以忽略电离层、对流层延迟残差的影响，精度相对更稳定、可靠。因此，在执行航测飞行任务时，当机载RTK精度较差时可选择自建单基站方式进行作业。实际航飞作业过程中，应随时监控机载RTK的定位精度。当RTK定位精度较低时，应选择合适的定位模式和有利的作业时间进行航测外业，以提高RTK定位精度和测图精度。

5　结　论

本文基于大疆精灵4 RTK无人机，结合实际航测项目详细分析了机载RTK定位精度对测图精度的影响。结果表明机载RTK定位精度对测图精度的影响显著，因此在执行航测飞行任务时应观察并记录机载RTK定位精度。当机载CORS RTK精度较差时，可通过自建单基站方式进行作业，单基站的作业距离控制在2 km以内，以降低电离层、对流层影响对定位结果的不利影响，进而确保地形图的精度；当无自建单基站条件或自建单基站方式作业精度仍然较差时（RTK定位精度不宜低于3 cm），应选择RTK定位精度较好的时段进行作业，以保证航测成果的精度。本文的研究成果可为无人机免像控作业规范规程的制定提供参考。

参考文献

[1] 冯幼贵,邢著荣,韩玉琪. 基于5DMarkⅡ相机的无人机测绘1∶500地形图可行性分析[J]. 测绘地理信息,2015,40(3):71-73

[2] 艾力,杨冰玉. 大疆精灵4 RTK航测数据在地形图测绘中的应用[J]. 国土资源导刊,2020,17(3):62-65

[3] 倪凯. 基于精灵4 RTK无人机的1∶500地形图免相控测量[J]. 测绘技术装备,2021,23(1):57-59

[4] 任栋,潘海利,武洋. 精灵4RTK无人机在大比例尺地形图生产中的应用探讨[J]. 测绘标准化,2019,35(4):47-50

[5] 翟显,刘瑞华,王剑等. 北斗卫星导航系统误差分析与评估[J]. 现代导航,2018(1):10-15,17

[6] 高峰,郑晨. GNSS差分定位中的误差源分析[J]. 现代导航. 2019,10(3):177-181

[7] 黄丁发,周乐韬,刘经南. 基于Internet的VRS/RTK定位算法模型及实验研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2007,32(3):220-224