

激光与光电子学进展

基于 RTK 定位无人机的光电经纬仪姿态角
测量精度检测方法

袁光福, 于潮*, 王伟超, 李刚平, 吴伟国

中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735018

摘要 光电经纬仪测量飞行目标的姿态角是重要的测姿手段。提出了一种利用实时动态载波相位差分技术(RTK)定位的无人机对光电经纬仪的测姿精度进行检测的方法。该方法将无人机 RTK 天线中心点与地面基准点构成的连线作为待测姿态角的轴线,通过 RTK 定位值计算出轴线与基准面之间的夹角,并以此作为姿态角的标准值来检测光电经纬仪测姿精度。介绍了测姿精度检测原理,对 RTK 定位精度和检测精度进行了不确定度分析,探讨了在精度检测时的设备布站规则。理论分析和实验结果表明:所提方法可以用于光电经纬仪测姿精度的外场检测。

关键词 姿态角; 精度检测; 实时动态载波相位差分技术; 无人机

中图分类号 TJ760.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223035

Method for Determining Attitude Measurement Accuracy of Photoelectric
Theodolites for Positioning Unmanned Aerial Vehicles Based on RTK

Yuan Guangfu, Yu Chao*, Wang Weichao, Li Gangping, Wu Weiguo

95859 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Jiuquan 735018, Gansu, China

Abstract Photoelectric theodolites are important instruments for measuring the attitude of flying targets. We present a method for determining the attitude measurement accuracy of a photoelectric theodolite using a real time kinematic carrier phase difference technology (RTK) positioning unmanned aerial vehicle (UAV). The method uses the line formed between the center point of the UAV RTK antenna and a reference point as the axis of the attitude angle to be measured, calculates the included angle between that axis and the datum plane through the RTK positioning value, and uses the angle as the standard attitude against which the attitude measurement accuracy of the photoelectric theodolite is tested. In this paper, the principle of measuring attitude precision is introduced, the uncertainty in RTK and measuring precision are analyzed, and the rule of equipment distribution is discussed. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method can be used for measurement of the attitude accuracy of photoelectric theodolites.

Key words attitude angle; precision detection; real time kinematic carrier phase difference technology; unmanned aerial vehicle

1 引言

飞机、导弹等飞行目标的姿态角一般指俯仰角、偏航角、横滚角,其是表征目标飞行状态的重要参数,精确测量该参数可以为飞行目标的设计改进、故障分析等提供依据。测姿方法通常分为内测和外测方法,内测方法可采用惯导设备进行测量,并使用遥测设备传输数据,但使用惯导和遥测时通常需要在被测目标上加装设备,在一些应用场景中会受到限制。而外测方法通常采用

光电经纬仪进行视觉测量,这是一种被动测量手段,具有使用方便、测量精度高、可重复使用等优点。文献[1-5]介绍了利用光电经纬仪测量导弹姿态角的方法,常见的测量方法有双站交会测量法和单站测量法。

在研制具有姿态测量功能的光电经纬仪时,需对其测姿精度进行检测。常用的检测方法是在室内进行检测,通常使用姿态板模拟被测目标,将姿态板放置在平行光管焦面上,使用精度更高的三坐标测量机对姿态板特征点进行测量并拟合出姿态角,将该值作为真

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-03-09; 网络首发日期: 2023-05-09

通信作者: *yuchaoswd1216@163.com

值检测光电经纬仪的测姿精度^[6],其检测精度为 0.05° ,当用两台光电经纬仪进行交会测量时,使同一个姿态板在两个互成夹角的平行光管焦面上成像存在一定困难,所以该方法只适用于单台光电经纬仪测姿精度检测。双站交会测量姿态角通常使用的是目标轴线法,该方法通过判读软件精确分割图像获取目标在视窗中的轴线,然后解算得到目标的空间中轴线方程,得到其姿态参数^[7],进行精度检测时,先选取空间已知两点构成一条作为精度比对的等效基准轴线。而构建等效基准轴线就需对两端点位置参数进行精确测量,载波相位动态实时差分技术(RTK)为其提供一条新的应用思路。

RTK是实时处理两个站载波相位测量值的差分方法,其利用参考站与移动站之间测量值误差的空间相关性,通过差分的方式消除大部分误差,从而实现 cm 级的定位精度。RTK 具有定位精度高、方便可靠的技术优点,将 RTK 设备搭载于无人机(UAV)上,可以为光测、雷测、遥测等测控设备标校及精度检测提供方便高效的定位数据源^[8]。本文针对室内光电经纬仪双站交会测姿精度检测中存在的困难,提出了一种室外基于 RTK 定位无人机技术的光电经纬仪双站交会测姿精度检测方法。

2 基于 RTK 无人机定位技术的测姿精度检测方法

2.1 精度检测原理

基于 RTK 无人机定位技术的测姿精度检测方法的基本原理是将无人机 RTK 天线中心点与地面基准点构成的连线作为待测目标的轴线,将该轴线的姿态角作为精度检测的标准值。进行经纬仪测姿精度检测时,使用两台经纬仪拍摄该轴线并通过事后判读、交会处理的方式得到轴线姿态角的测量值。测量值与标准值之差即为两台光电经纬仪交会测量时的姿态角测量误差^[9]。检测原理如图 1 所示。

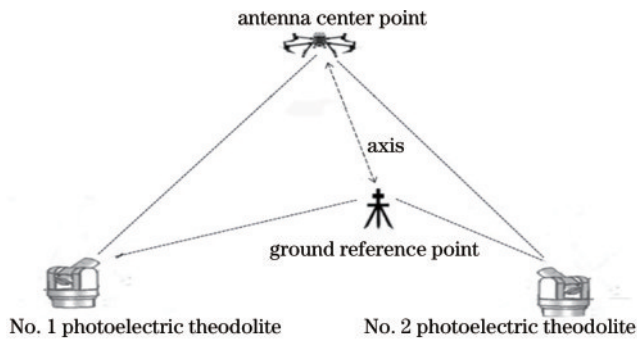


图 1 测姿精度检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of attitude measurement accuracy detection principle

定义测姿精度检测中所使用的坐标系:

1) 地心直角坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 。原点 O_d 是地球质心; Z_d 轴是地球椭球的旋转轴,指向地球地极; X_d 在赤

道平面内,在本初子午面与赤道的交线上,指向经度零点为正; Y_d 轴与 X_d 轴、 Z_d 轴构成右手坐标系,在与 X_d 轴正交方向上, X_d 轴与 Y_d 轴构成赤道面。

2) 垂直测量坐标系 $O_l X_l Y_l Z_l$ 。其基准为地面基准点的铅垂线和水平面,原点 O_l 为地面基准点; Y_l 轴与地面基准点的铅垂线一致,正向指向地球椭球外; X_l 为地面基准点所在子午面与地面基准点水平面的交线,指向大地正北为正; Z_l 在以地面基准点的水平面,与 $X_l Y_l$ 构成右手坐标系。

3) 姿态角坐标系 $O_a X_a Y_a Z_a$ 。其是指固定在飞行器上的遵循右手法则的三维正交直角坐标系,其原点 O_a 位于飞行器的质心; X_a 轴垂直于飞行器参考面并指向飞行器右方; Y_a 轴位于飞行器参考平面内平行于机身轴线并指向飞行器前方; Z_a 轴在参考面内垂直于 $X_a O_a Y_a$ 平面,指向飞行器上方。目标俯仰角 ϕ 、偏航角 θ 、横滚角 ψ 分别为飞行器沿 X_a 轴、 Z_a 轴、 Y_a 轴旋转的角度,姿态角坐标系如图 2 所示。

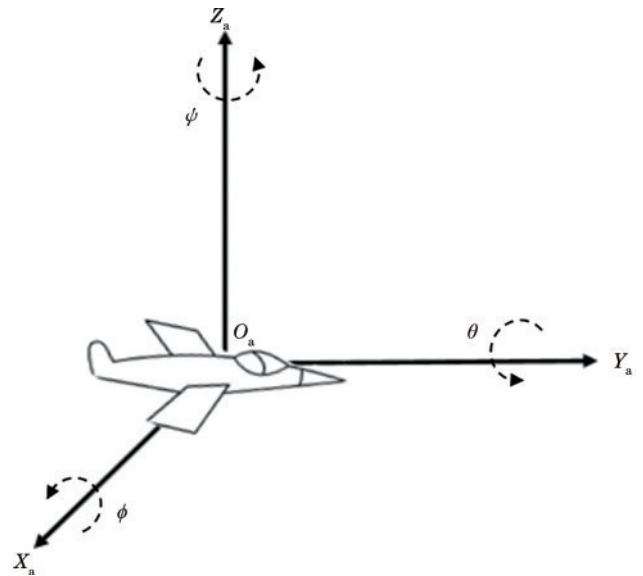


图 2 姿态角坐标系

Fig. 2 Attitude angle coordinate system

根据姿态角的定义,用 RTK 定位无人机和地面基准点构造姿态角时,以其天线中心点与地面基准点的连线作为目标轴线。如图 3 所示,以地面基准点 P 为坐标系原点构建垂直测量直角坐标系,无人机 RTK 天线中心点为 A 点,偏航角 β 为 AP 连线在 XPZ 面的投影 AP 与 XBY 面的夹角,俯仰角 E 为 AP 直线与在 XPY 面的投影 AP 的夹角。此时, β 即为轴线的偏航角, E 即为轴线的俯仰角,以此作为姿态角的标准值^[10]。

2.2 姿态角精度检测方法

姿态角精度检测流程概括为

1) 获取大地坐标。获取无人机 RTK 天线中心点 A 点和地面基准点 P 点的大地坐标, A 点坐标可从

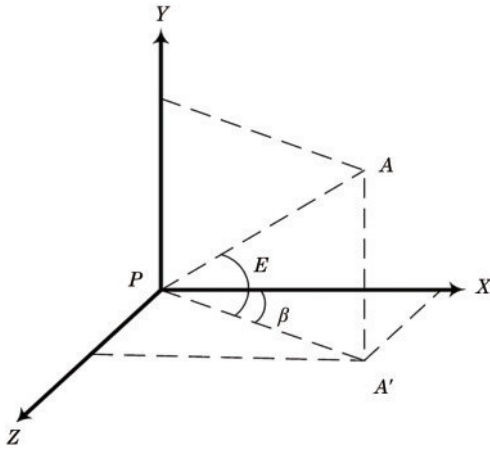


图 3 实验中构建的垂直测量系与空间直角坐标

Fig. 3 Vertical measuring system and the space rectangular coordinate constructed in the experiment

RTK 测量设备得到, P 点坐标可事先通过大地精确测量得到, 所测量的坐标值一般是由 WGS84 坐标系表示的, 统一用 2000 国家大地坐标系表示, 由纬度 B 、经度 L 、高程 H 来表示空间和地面任一点的地心大地坐标。2000 国家大地坐标系采用的地球椭球参数数值为: 长半轴 $a=6378137$ m、短半轴 $b=6356752.141$ m、扁率 $f_0=1/298.257222101$ 。

2) 坐标转换。将 A 、 P 两点的地心大地坐标转换成地心直角坐标, 再将地心直角坐标转换为测站直角坐标。地心大地坐标转换成地心直角坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_i + H_i) \cos B_i \cos L_i \\ (N_i + H_i) \cos B_i \sin L_i \\ [N_i(1 - e^2) + H_i] \sin B_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}}, \quad (2)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}, \quad (3)$$

式中: X_i 、 Y_i 、 Z_i 为地心直角坐标系下的坐标值, $i=A$ 、 P ; N_i 为卯酉曲率半径。

以地面基准点 P 为原点构建测量直角坐标系, 将地心直角坐标转换成垂线测量直角坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_A \cos L_A & -\sin L_A \sin B_A & \cos B_A \\ -\sin L_A & \cos L_A & 0 \\ \cos B_A \cos L_A & \cos B_A \sin L_A & \sin B_A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_A - X_P \\ Y_A - Y_P \\ Z_A - Z_P \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: x 、 y 、 z 为无人机天线中心点的在测量直角坐标系下的坐标分量。

3) 姿态角标准值计算。计算轴线的偏航角 β 和俯仰角 E , 该值即可作为姿态角中偏航角的标准值 α_{ϕ_0} 和俯仰角的标准值 α_{θ_0} 。

$$\begin{bmatrix} \beta \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{z}{x} \\ \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

4) 结果对比。将 A 、 P 两点连线所构成的轴线放入光电经纬仪视场进行姿态测量, 通过图像判读后得到偏航角和俯仰角测量值 α_{ϕ} 和 α_{θ} , 经过多次测量统计其标准差 σ_{ϕ} 和 σ_{θ} , 分别与设备测姿精度指标 σ_0 进行比较, 其中 σ_0 的数值要求在 1.5° 以内, 若都不大于精度指标 σ_0 , 则满足精度要求; 反之, 若两个值中有一个超过指标, 则不满足精度要求。具体检测流程如图 4 所示。

2.3 RTK 定位精度分析

在卫星定位实际应用中, 无人机 RTK 定位所得的测量值精度无论采用哪种卫星观测量进行定位, 都会受到各种因素的影响而产生定位误差, 不同因素引起的定位误差大小也不相同。根据定位误差产生的原因将误差分为 3 类。

1) 与导航卫星有关的误差。主要包括: 卫星轨道误差、卫星钟差和卫星天线相位偏差。此次实验场景中采用无人机进行短基线 (<15 km) 动态定位, 目前, 国际 GNSS 服务 (International GNSS service) 提供时间间隔为 5 min、30 s、5 s 的最终卫星钟差精度已达到 $0.075 \sim 0.15$ ns^[11], 且在 RTK 的高精度定位测量中可以采用对观测值进行差分处理的方式来减弱或消除卫星天线相位中心偏差的影响。所以此类误差在此实验场景中基本可以忽略不计。

2) 与传播路径有关的定位误差。受电离层影响, 主要是电离层的闪烁和电磁波的折射作用使传播路径和卫地几何距离之间产生偏差而导致的延迟误差。在实验中, 主要应用 Klobuchar 电离层经验模型, 具体可表示为

$$I_z = D_C + A_0 \cos \frac{2\pi}{B_0} (t - T_P), \quad (6)$$

式中: I_z 为以秒为单位的垂直延迟; A_0 为白天余弦函数振幅; B_0 为 >20 h 的余弦函数周期; t 为地方时, 可由全球导航卫星系统 (GNSS) 转化得到; D_C 为夜间垂直延迟常数 5 ns; T_P 为 14 h (地方时)。当在短基线范围内进行定位测量时, 可采用对测站间的同步观测值进行差分处理的方式来消除或减小对流层对卫星信号的延迟误差影响。

相关的定位误差同时也会受多路径效应的影响。减小多路径效应误差的方法有: ① 尽量避免在测站周围有高大的对卫星信号容易产生反射的物体; ② 对接收机天线加以改进, 应尽量抑制反射信号对直接信号的干扰; ③ 多路径效应的大小会随着时间的变化而出现周期性的变化。因此, 在实验中可通过延长观测时间来降低多路径效应对定位精度的影响。

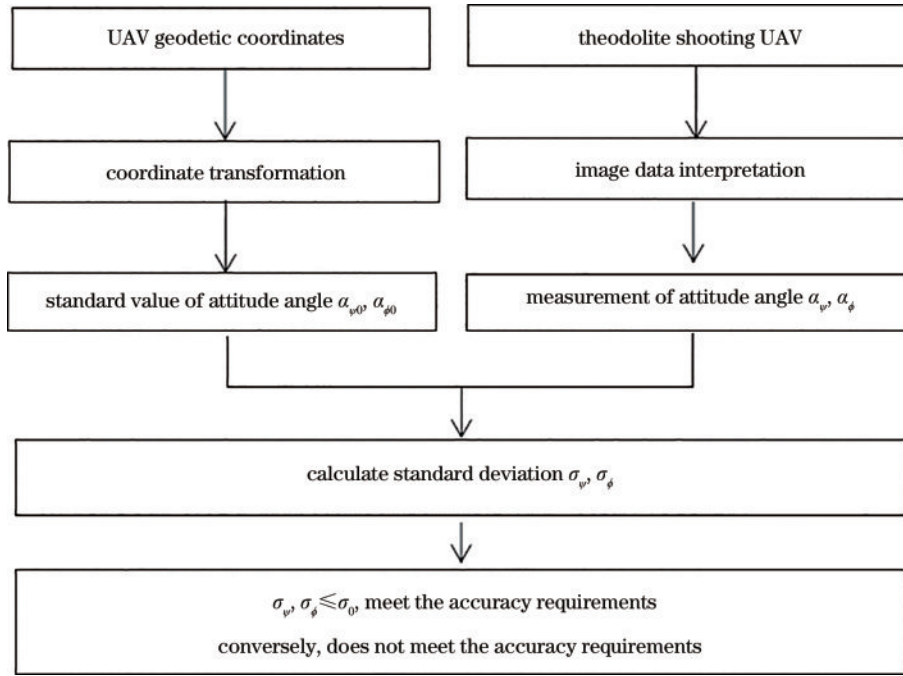


图 4 姿态精度检测流程图

Fig. 4 Flow chart of attitude accuracy detection

3) 与接收机有关的定位误差。①接收机钟差,一般利用双差模型来消除接收机钟差的影响。②接收机天线相位偏差,通常使用内插的方法即可对接收机天线相位偏差进行改正,以消除该部分偏差的影响,在进行相对定位解算时也可以消除该部分误差。③观测噪声,载波相位的观测噪声一般为波长的1%,在数据处理中采用长时间观测、改善硬件设计或提高硬件质量等方法来减小观测值噪声的影响。

2.4 不确定度及误差传导分析

为满足姿态角精度检测的要求,在构造目标轴线的姿态角时需要对其进行不确定度分析。姿态角标准值的不确定度与RTK设备的定位精度、无人机与基准点之间的距离相关,根据误差传递原理,不确定度计算可表示为

$$\sigma_0 = \frac{\Delta x}{r}, \quad (7)$$

式中: Δx 为RTK定位设备的测量误差; r 为RTK设备天线与地面基准点之间的距离。由式(7)可知,当RTK定位误差一定时,只有降低标准值的不确定度,才能增加 r 值。

姿态角标准值的精度要高于光电经纬仪的测姿精度才可作为检测标准,通常情况下要求标准值的3倍不确定度小于光电经纬仪的测姿精度。若双站交会系统的测姿精度 $\sigma = 1.5^\circ$,则无人机RTK定位精度满足 $\sigma_0 \leq \sigma/3 = 0.5^\circ$ 时,目标轴线的姿态角标准值可满足设备检测要求。

无人机RTK定位精度为1 cm,根据上述条件,无人机与基准点之间的距离应满足 $r \geq 1.15$ m。

2.5 布站规则

当RTK设备距离光电经纬仪过远或过近时,都会影响目标成像,且目标轴线不能占据合适的视场,因此在设计布站规则时需充分考虑被检设备参数的设置。

在测量姿态角时要求RTK设备轴线成像像元数不少于 N ,假设被检仪器的焦距为 f ,相机像元尺寸为 δ ,无人机机身直径为 φ ,无人机与被检仪器距离为 R ,无人机成像像元数为 n ,则布站距离 R 与轴线像元数 N 的关系可表示为

$$\frac{r}{R} = \frac{\delta N}{f}. \quad (8)$$

根据姿态角测量原理,目标成像的像元数越多,测姿精度越高。因此,为了检验光电经纬仪在成像像元数最少的情况下,是否仍能满足测姿精度要求,在设计布站时将轴线占据的像元个数取为 N 。

在设计布站规则时,除需要考虑无人机与基准点的轴线所占像元数,还需要考虑无人机的成像情况。当无人机距离光电经纬仪过远时,成像像元数太少,不能进行数据判读;当无人机距离光电经纬仪过近时,存在景深问题,其使无人机不能成像。无人机成像像元数与布站距离的关系可表示为

$$\frac{\varphi}{R} = \frac{\delta n}{f}. \quad (9)$$

假设 $f = 2000$ mm、 $N = 400$ 、 $\delta = 10$ μm 、 $\varphi = 20$ cm,根据式(8)、式(9)得

$$R = \frac{f}{\delta N} r = 500r, \quad (10)$$

$$n = \frac{f\varphi}{\delta} \frac{1}{R} = \frac{40000}{R} \quad (11)$$

根据式(10)、式(11),计算出 r 、 R 、 n 之间的关系如表 1 所示。

表 1 布站参数与成像像元数

r /m	R /m	n
8	4000	10.0
10	5000	8.0
15	7500	5.3
20	10000	4.0

3 精度检测实验

3.1 准备工作

1) 无人机定标系统。选用大疆 M300RTK 旋翼无人机,该型号无人机直径 φ 为 895 mm,位置精度 Δx 为 1 cm,RTK 定位的位置参数为无人机天线中心点,RTK 定位的工作环境选择在空旷无地物遮挡的场地,为提高 RTK 定位采集数据的准确度,可以适当延长观测时间。

2) 双站光电经纬仪。交会测量的两台光电经纬仪焦距 $f=2000$ mm、 $\delta=10$ μ m,其测角精度为 15",双站交会测姿精度为 1.5°。

表 2 采用基于 RTK 定位无人机和光电经纬仪图像判读的轴线测量结果

Table 2 Axis measurements based on RTK UAV and photoelectric theodolite image interpretation

No.	Angle between the axis	Theodolite image interpretation value / (°)	UAV RTK coordinate conversion value / (°)	Interpretation of measurements error / (°)
1	Elevation	19.60	20.52	0.92
	Azimuth	35.77	35.27	0.50
2	Elevation	31.60	31.00	0.60
	Azimuth	35.27	35.67	0.40
3	Elevation	41.00	40.28	0.72
	Azimuth	33.97	34.87	0.90
4	Elevation	52.00	52.70	0.70
	Azimuth	34.27	33.48	0.79
5	Elevation	67.97	67.24	0.73
	Azimuth	236.00	235.33	0.67
6	Elevation	57.00	56.15	0.85
	Azimuth	235.37	234.82	0.55
7	Elevation	46.75	46.20	0.55
	Azimuth	234.35	233.78	0.57
8	Elevation	36.80	35.90	0.90
	Azimuth	333.70	332.97	0.73
9	Elevation	25.93	24.99	0.94
	Azimuth	332.77	331.89	0.88
10	Elevation	15.15	14.06	1.09
	Azimuth	334.77	334.31	0.54

3) 设备布站。实验中的设备布站如图 5 所示。两台光电经纬仪交会角度 j 约为 90°,光电经纬仪间的距离 d 约为 2000 m,无人机与基准点距离 r 约为 10 m,无人机与经纬仪的距离约为 1400 m,在此布站情况下无人机成像像元数 $n>64$,轴线成像像元数 $N=400$,所构造轴线的姿态角精度约为 0.06°,满足对经纬仪测姿精度的检测要求。

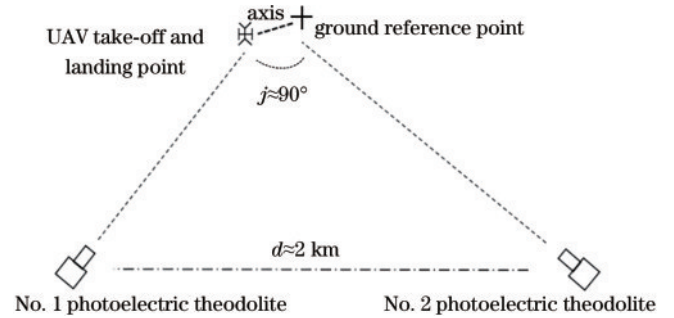


图 5 布站俯视图

Fig. 5 Top view of layout station

3.2 结果分析

经过合理布站,所有的站址坐标通过精确测量来获得,在无人机起飞后,开始记录测量每组数据,其处理结果如表 2 所示。

以上 10 组测量结果数据表明:偏航角最大测量误差为 0.90° , 最小测量误差为 0.50° , 测量误差标准差为 0.67° , 俯仰角最大测量误差为 1.09° , 最小测量误差为 0.50° , 测量误差标准差为 0.82° 。

由实验分析结果可得, 双站光电经纬仪交会测姿系统姿态角测量的真实指标误差 σ 在 1.5° 以内, 实验中的姿态角测量精度在 1° 以内, 说明测量值和实际值接近。根据误差传递模型可得到所构造轴线的姿态角精度误差 σ_0 约为 0.06° 以下, 比 $\sigma/3(0.5^\circ)$ 小很多, 即该标准值可用于精度标定。

4 总 结

提出了一种基于 RTK 定位无人机的光电经纬仪测姿精度检测方法。根据光电经纬仪双站交会测量时的姿态角精度标定需求, 通过无人机和地面基准点来构造用于精度检测的基准轴线, 对基准轴线姿态角的标准值进行不确定度分析, 研究制定布站规则。具体过程为: 布站前选用经过精度检验的 RTK 定位无人机和光电经纬仪, 布设地面基准点地标和无人机平台, 将测量地面基准点和无人机 RTK 定位点坐标值统一转化为国家 2000 大地坐标系下的坐标值, 两台光电经纬仪间的布设距离为 2000 m, 经纬仪交会角度约为 90° , 无人机与基准点和经纬仪的距离分别为 10 m 和 1420 m。由不确定度分析和布站规划的结果可知, 在该布站条件下, 基于无人机和地面基准点构造的轴线姿态角精度达到 0.06° , 满足对测姿精度为 1.5° 的双站交会光电经纬仪测姿系统精度检测的要求。实验结果表明: 基于此方法测得的经纬仪双站交会测姿系统的姿态角测量精度在 1° 以内, 该值接近于系统真实指标, 说明此方法可以应用于外场光电经纬仪姿态测量精度的检测工作。所提方法可操作性强, 适用于外场常态化精度检测, 具有较高的推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 张原, 王志乾, 乔彦峰, 等. 导弹发射姿态测量方法研究[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 997-1003.
Zhang Y, Wang Z Q, Qiao Y F, et al. Attitude measurement method research for missile launch[J]. Chinese Journal of Optics, 2015, 8(6): 997-1003.
- [2] 罗宽, 范蕾, 高玉军, 等. 基于光测图像的空间目标的俯仰角和偏航角的测量技术[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(3): 12-14, 9.
Luo K, Fan L, Gao Y J, et al. Measuring technology on elevation angle and yawing angle of space target based on optical measurement method[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 30(3): 12-14, 9.

- [3] 洪国庆. 基于光学的空间物体姿态测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 14-28.
Hong G Q. The study of space object attitude measurement technology based on optics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018: 14-28.
- [4] 赵立荣. 基于机器视觉的靶场飞行器姿态测量方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016: 8-19.
Zhao L R. Methodology of attitude measurements for aircrafts in shooting range based on computer vision technique[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 8-19.
- [5] 赵怀学, 田留德, 赵建科, 等. 光电经纬仪姿态测量精度分析及室内评价方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0112004.
Zhao H X, Tian L D, Zhao J K, et al. Analysis of attitude measurement accuracy and indoor evaluation method of photoelectric theodolite[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0112004.
- [6] 王颖, 葛超, 崔铁成. 多面交会姿态测量方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(4): 165-167, 176.
Wang Y, Ge C, Cui T C. Research on attitude measurement of polyhedral intersection[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(4): 165-167, 176.
- [7] 胡小丽, 唐明刚, 张三喜, 等. 基于中轴线像长匹配的靶场单站姿态测量方法[J]. 应用光学, 2017, 38(5): 746-750.
Hu X L, Tang M G, Zhang S X, et al. Single Station pose measurement method for range based on axis image length matching[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(5): 746-750.
- [8] 庞岳峰, 霍文杰, 张彬艳, 等. 一种基于 RTK 的遥测设备方位零位标定方法[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 68-74.
Pang Y F, Huo W J, Zhang B Y, et al. Azimuth zero position calibration method of telemetry equipment based on RTK surveying technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 68-74.
- [9] 朱江山, 吴志勇, 刘宁博. 光电经纬仪跟踪飞机 3D 姿态方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(8): 1654-1658.
Zhu J S, Wu Z Y, Liu N B. Methods study of 3D attitudes for photoelectric theodolite tracking aircraft[J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(8): 1654-1658.
- [10] 符宾, 吴坦. 光电经纬仪姿态高精度测量研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 236-238.
Fu B, Wu T. Research on the high accuracy measurement of photoelectric theodolite[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(10): 236-238.
- [11] 杜锋. RTK 技术在 GPS/BDS 组合定位中的误差分析与处理[D]. 西安: 西安工程大学, 2016: 18-28.
Du F. Error analysis and processing of RTK technology in GPS/BDS combined positioning[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2016: 18-28.