

基于 RTK 技术的经纬仪外场精度考核方法研究

谭广通, 马翔, 程国民

(中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对光电经纬仪外场精度考核中传统拍星法易受时空条件限制、综合校飞法存在资源消耗大等问题, 开展了新型外场精度考核方法的研究; 通过融合实时载波相位差分 (RTK) 技术与小型无人机技术, 构建了高精度动态定位系统, 实现了飞行目标空间位置的高精度动态定位, 完成了光电经纬仪外场静态精度和动态精度考核的联合测试, 有效地解决了传统拍星法和综合校飞法存在的弊端, 并且具备成本低、操作简单、轻量便携和快速部署与撤收等优势; 实际试验数据满足光电经纬仪外场考核要求, 分析结果表明基于 RTK 技术与小型无人机技术能够给光电经纬仪外场精度考核提供一种新的手段, 具有较好的应用前景。

关键词: 无人机 RTK; 差分; 动态精度; 静态精度

Research on the Field Accuracy Assessment Method of Theodolite Based on RTK Technology

TAN Guangtong, MA Xiang, CHENG Guomin

(Unit 91245, PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: Regarding the traditional star photography method in the field accuracy assessment of photoelectric theodolites, which is easily restricted by spatiotemporal conditions, and the comprehensive flight calibration method that consumes a lot of resources, research has been conducted on new methods for field accuracy assessment. By integrating Real-Time Kinematic (RTK) technology with small unmanned aerial vehicle (UAV) technology, a high-precision dynamic positioning system has been constructed. This enables high-precision dynamic localization of airborne targets and completes the joint testing for static and dynamic accuracy assessment of electro-optical theodolites in field conditions. It effectively addresses the drawbacks of traditional star photography methods and comprehensive flight calibration techniques, while also offering advantages such as low cost, simple operation, lightweight portability, and rapid deployment and retrieval. Actual experimental data met the requirements for field assessment of photoelectric theodolites. The analysis results indicate that RTK technology combined with small UAV technology can provide a new means for field accuracy assessment of photoelectric theodolites, with good application prospects.

Keywords: unmanned aerial vehicles; real time kinematic; difference; dynamic accuracy; static accuracy

0 引言

载波相位差分技术 (RTK, real time kinematic)^[1-2] 可以将卫星导航与数传技术相结合, 实时进行数据处理, 在较短的时间里得到测站点在指定坐标系中的三维定位结果, 精度可以达到厘米级^[3-4], 因此广泛应用于测量领域。

目前可用于无人机挂载的小型 RTK 产品已经非常成熟, 其具备体积小、重量轻、功率小和便于安装等特点, 并且使用全卫星系统多频段高精度定位模块, 采用

高性能全球卫星导航系统级芯片 (GNSS Soc), RTK 处理能力强, RTK 状态下可获得数十颗卫星的厘米级定位服务以及 1s 内的重新捕获时间, 可有效应对复杂环境下定位定向输出的连续性和可靠性。

近年来, 无人机已经得到了飞速发展。多旋翼小型无人机技术已应用于防灾救灾、电力巡视、交通监视、农业植保等多领域, 高精度定位技术的多旋翼小型无人机在航空测绘、地形建模等方面已有应用^[5-6], 无人机集群应用也越来越重要^[7-8]。将无人机与 RTK 技术相结合, 将会带来更广阔的能力延伸。

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-05-06。

作者简介: 谭广通 (1981-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 谭广通, 马翔, 程国民. 基于 RTK 技术的经纬仪外场精度考核方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 327-333.

目前光电经纬仪外场静态精度考核一般采用星体测量角度评定法(拍星法)进行,其原理是以星体为目标,由光电经纬仪对星体方位角和俯仰角的测量值与理论值比较,统计和评估其静态测角精度。光电经纬仪的外场动态精度考核主要依靠靶机校飞或者实际任务来进行,即综合校飞评定法,以飞机或者飞行物体等为目标,通过标准设备的光电经纬仪和被考核的光电经纬仪对目标同步测量,通过比对和评定验证光电经纬仪的动态测量精度^[9-11]。

传统的拍星法虽然技术成熟、精度可靠,但其存在显著的技术约束与应用限制,具体表现为:1) 光学观测范畴的拍星法受制于天体物理特性,仅能在夜间无光污染条件下实施,且对大气能见度与消光系数有严苛要求;2) 为实现微弱星光的高效捕获,光电经纬仪需配备大口径光学系统以提升集光效率与角分辨率;3) 红外波段的恒星辐射源具有通量密度低、辐射体数量有限等特征,导致红外经纬仪检测存在星源稀缺的技术瓶颈。

相较而言,综合校飞方案是目前外场在用的动态精度考核手段,但其执行过程需构建多单位联合保障体系,涉及飞行空域规划、接力跟踪、多站时统对接等复杂协同作业。该模式存在跨部门资源整合难度大、航迹设计与空域释放审批周期长、人力装备保障成本超线性增长等系统性缺陷,在实战化应用场景中面临显著的费用比失衡问题。

基于 RTK 技术的多旋翼小型无人机定位精度高,在测量应用领域会越来越广泛。依据 RTK 技术空间定位高精度的能力,可满足光电经纬仪的精度考核^[12-13]需求。据此提出一种基于 RTK 高精度定位技术的无人机集成化检测系统,为光电经纬仪外场精度考核提供了革新性技术路径。该系统通过搭载 RTK 接收机、数字传输单元及光学合作目标等模块的无人机平台,构建动态空间基准源,可实现厘米级实时定位精度,相较传统标校方法具有以下技术优势:1) 作业效能提升,无人机空中机动平台通过预设航线规划实现自动化飞行控制,显著缩短外场精度考核周期;2) 资源集约化,系统仅需经纬仪和无人机操作手即可完成全流程操作,相较综合校飞模式大大减少人力需求,并且无需协调空域释放及多单位联动保障,降低设备运输、燃油消耗等边际成本,符合绿色计量技术发展趋势。总之,基于 RTK 技术的无人机光电经纬仪外场测量精度考核方法,具有更加高效快捷、省时省力、组织简单人员需求少、消耗少等优点,可以为经纬仪建设及验证工作提供新的检测方法,拓展光电经纬仪外场精度考核方法渠道,为国防光电装备计量保障体系提供高效可靠的解决方案。

1 RTK 静态与动态定位精度

RTK 技术是以一个已知坐标(或假定已知)的测

站为基准站,基于载波相位观测值的一种实时动态差分定位技术。流动站用户在基准站周围作业,两站相距一般不超过 15 km,从而基准站和流动站的共视卫星相同,具有相近的卫星轨道误差、电离层延迟误差和中性大气延迟误差等影响。基准站和流动站的同步观测数据差分技术处理后,消除了接收机钟和卫星钟误差,而流动站的卫星星历误差、电离层延迟误差和中性大气延迟误差被大大削弱,从而获得高精度的双差观测值。在 RTK 作业模式下,基准站通过数据传输电台将伪距、载波相位值及相关信息(如基站坐标)播发给流动站,流动站利用自身观测数据和基准站数据,组成差分观测方程,快速实时解算模糊度后,得到厘米级的定位结果,RTK 作业模式如图 1 所示。

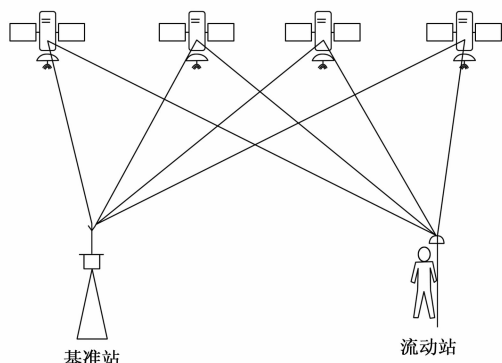


图 1 RTK 工作模式

RTK 产品定位精度较高,通常水平为 $1\text{ cm}+1\text{ ppm}$,垂直 $1.5\text{ cm}+1\text{ ppm}$,但该技术指标为理论指标,实际应用会受多种因素影响,导致实际定位精度低于技术指标,需对 RTK 产品进行定位精度验证。

1.1 RTK 静态定位精度

1.1.1 RTK 静态定位精度的定义及测量方法

RTK 静态定位精度是指 RTK 静态定位值偏离真值的程度。测量方法一般采用测量事先标定好的已知点位,将测量结果与真值进行比对。具体方法如下:

静态实时差分精度,使用实际卫星信号测试,将基准站分系统的 GNSS 接收机天线架设在已知基准点上。基准站分系统的 GNSS 接收机通过数传电台(通视条件)进行差分信息播发,测量分系统(RTK 端)的 GNSS 接收机实时接收该差分信息,完成载波相位差分定位,同时记录观测信息、定位结果,时间不少于 30 min。以基准点位置作为真值,与差分定位结果进行比对计算实时及事后基站静态差分位置测量精度。基准点位设置除满足 GPS 静态观测的条件外,还应设置在地势较高、四周开阔的位置,便于电台的发射。

数据处理与评定方法:

剔除 $PDOP>2.5$ 的定位数据;

按照下式计算水平、垂直误差:

$$m_{\text{Hi}} = \sqrt{(E_i - E_0)^2 - (N_i - N_0)^2} \tag{1}$$

$$m_{\text{Vi}} = |U_i - U_0| \tag{2}$$

式中，PDOP 为空间位置精度因子， m_h 、 m_v 分别为单点定位水平和垂直精度（m）； N_0 、 E_0 、 U_0 分别为已知点在站心坐标系下北、东、高坐标（m）； N_i 、 E_i 、 U_i 分别为第 i 个定位结果在站心坐标系下北、东、高坐标（m）；95%置信度的单点定位精度可依据式（1）（2）通过排序法获得，试验结果记录在表格中。结果满足指标要求，则评定为合格，否则评定为不合格。

1.1.2 RTK 静态定位精度试验与结果

选取已标定准确的两个点位 A 和 B，A 点和 B 点点位信息作为真值，将基准站天线架设于 A 点，接收端（RTK 定位系统）接收天线放置在 B 点进行测量，A 点基准站实时发送差分修正信息，B 点 RTK 定位系统实时接收差分修正信息，记录定位数据，记录时间不少于 30 min，事后将测量值与真值进行比对，得出静态测量误差。

试验记录数据 33 min，记录数据 10 135 组数据，事后将 RTK 测量结果与真值进行了比对，水平精度误差值为 2.25 cm，最大值为 2.65 cm，最小值为 0 cm；垂直精度误差值为 2.61 cm，最大值为 2.95 cm，最小值为 0.2 cm。测量结果见表 1、表 2。

表 1 RTK 水平静态精度结果

序号	时间	水平误差/cm
1	10:02:00.0	1.833
2	10:02:00.2	2.143
.....		
10 135	10:35:46.8	1.486
10 136	10:35:47.0	1.486
误差(RMS)		2.25
最大值		2.65
最小值		0

表 2 RTK 垂直静态精度结果

序号	时间	垂直误差/cm
1	10:02:00.0	1.2
2	10:02:00.2	1.2
.....		
10 135	10:35:46.8	1.8
10 136	10:35:47.0	1.8
误差(RMS)		2.61
最大值		2.95
最小值		0.2

1.2 RTK 动态定位精度

1.2.1 RTK 动态定位精度的定义及测量方法

RTK 动态定位精度是指 RTK 动态定位值偏离真值的程度。动态定位时 GNSS 接收机不用静置放在固定测

量点位上进行观测，是可以在运动过程中完成位置测量的一种定位方式。

动态实时差分精度，将基准站天线及电台布设在已知点位的基准点 A 上，移动用户站（RTK 端）天线及电台布设在另外一基准点 B 上。A 点基准站实时发送差分修正信息，B 点移动用户站实时接收差分修正信息，同时记录原始观测数据和定位数据，设置工作频率，用户站正常工作 10 min 后，保持设备不断电，将设备天线连同基座从基准点上拆下，在 B 基准点附近移动 10 min 后放回原处，在拆卸、移动和安装过程中，保持天线水平和连续观测卫星，连续记录 1 h。通过数据处理得出实时和事后差分定位结果，以 B 基准点位置作为真值，与差分定位结果进行比对完成单基站载波差分位置测量精度考核。评定方法参照行业标准：《全球导航卫星系统（GNSS）测量型接收机 RTK 检定规程》（CHT8018—2009）规定的定位精度评定方法执行。

数据处理与评定方法参照静态定位数据处理方法。

1.2.2 RTK 动态定位精度试验与结果

试验记录有效数据 7 073 组，事后将 RTK 测量结果与真值进行了比对。测量结果见表 3、表 4。

表 3 RTK 水平动态精度结果

序号	时间	水平误差/cm
1	10:43:00.0	0.8
2	10:43:00.2	0.8
.....		
7 072	11:23:59.0	2.641
7 073	11:23:59.2	2.641
误差(RMS)		3.25
最大值		3.65
最小值		0.14

表 4 RTK 垂直动态精度结果

序号	时间	垂直误差/cm
1	10:43:00.0	1.119
2	10:43:00.2	1.119
.....		
7 072	11:23:59.0	2.641
7 073	11:23:59.2	2.641
误差(RMS)		4.11
最大值		4.95
最小值		0.2

从试验结果可知，RTK 产品实际定位精度受使用环境、信号传输质量以及干扰等影响，其真实定位精度要略低于产品技术指标，在基站与测量站距离 20 km 以内，其水平和高程定位精度均小于 5 cm，满足光电经纬仪外场精度考核要求。

1.3 总体误差分析

经纬仪外场精度考核是以目标的 RTK 定位数据为真值,影响真值的误差来源主要包括 RTK 定位误差、RTK 时间与经纬仪时间同步误差,另外经纬仪判读目标位置时会引入大气折射误差。

1.3.1 RTK 定位误差

RTK 定位误差来源有卫星钟差、接收机钟差、大气层延迟误差、星历误差、多路径效应和信号干扰误差等^[14-18]。其中卫星钟差和接收机钟差可通过多星间双差组合进行消除;大气层延迟误差可以通过众多学者建立的经验模型进行计算与削弱,对于卫星高角 15°以上时,误差一般为毫米级;星历误差是空间相关误差,其在 50 km 基线范围内误差小于 2 mm;多路径效应和信号干扰为非空间相关误差,可以通过远离金属、山体、水源和天线等方法减小误差,基站和测量站布置合理其误差一般不超过 1 cm。根据 RTK 设备技术指标参数,其定位水平误差为 1 cm+1 ppm,高低定位误差为 1.5 cm+1 ppm,经实际验证,RTK 基站与测量站距离 20 km 时,其定位精度小于 5 cm,在经纬仪精度考核时,RTK 基站与测量站间距离约为 1 km,其定位精度小于 3 cm,对应经纬仪角度误差小于 6"。

1.3.2 RTK 时间与经纬仪时间同步精度误差

在经纬仪精度考核时,RTK 和经纬仪时间统一选择 GNSS 时间,RTK 和经纬仪对 GNSS 同步精度均小于 1 μs,RTK 和经纬仪二者之间的时间同步精度则远小于 1 μs,可忽略不计。

1.3.3 大气折射误差

大气折射误差因素主要有目标高度、大气温度、气压、湿度等有关,根据经验公式,对于目标距离 1 km,高度 1 000 m 的目标,在经纬仪精度考核时气象(温度 18 ℃,湿度 46%)条件下,其俯仰方向大气折射误差约为 3",水平方向大气折射误差可以忽略不计。

综上所述,在经纬仪外场精度考核中,误差来源为 RTK 定位误差和大气折射误差,对于已知空间位置的点目标位置误差引起的经纬仪角度误差小于 10",则满足测量精度低于 30"的光电经纬仪精度考核。经计算,RTK 端距经纬仪 1 km,目标误差相对于经纬仪的角度误差小于 10",可满足精度低于 30"的光电经纬仪考核需求;如若当被考核经纬仪精度高于 30"时,可以增大 RTK 端与经纬仪之间的距离来提高目标相对经纬仪的精度来完成精度考核,因此,RTK 定位精度满足经纬仪精度考核要求。

2 光电经纬仪静态精度考核方法

2.1 室内静态精度考核方法

通常光电经纬仪的静态测角误差检测方法如下^[19]。

光电经纬仪对水平位置平行光管和俯仰角为 45°~65°之间的平行光管分别进行拍摄,判读后得到光电经纬仪对两个平行光管的方位和俯仰测量差值 A_1 、 E_1 ,与莱卡经纬仪(精度 0.5")对两个平行光管的方位和俯仰测量差值(真值) A_0 、 E_0 比较,计算出静态测角误差:

$$\begin{cases} \Delta A = A_1 - A_0 - c \cdot \left(\frac{1}{\cos E} - 1 \right) - b \cdot \tan E \\ \Delta E = E_1 - E_0 - h \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_1 、 E_1 分别为光电经纬仪对两个平行光管方位、俯仰测量差值, A_0 、 E_0 分别为莱卡经纬仪对两个平行光管方位、俯仰测量差值, c 为照准差, b 为水平轴误差, h 为零位差。

2.2 外场静态精度考核方法

光电经纬仪交付使用后,在外场环境下一般不具备上述的室内静态精度考核手段,此时可以采用星体测量角度评定法。其评定原理是,以星体为目标,由光电经纬仪对星体方位角和俯仰角的测量值与理论值比较,统计和评估其静态测角精度。星体测量角度评定方法如下:

1) 根据光电经纬仪的拍和成像能力,经试拍确定能够拍摄的最低星等,比最低星等稍亮且符合方位角(0°~360°均匀分布)、俯仰角(20°~65°)限制条件的星都可选用;

2) 将所选的星体的坐标及有关参数存入计算机,根据星体理论值计算公式计算出所选星体的方位角和俯仰角;

3) 光电经纬仪进行调平,拍星解算功能开始之前,需要确认当前光电经纬仪的基本指向(方位编码器 0 值是否指向正北)和水平(俯仰编码器 0 值是否水平),主光学系统的调焦是否处于无穷远位置,满足此条件下的恒星引导基本能够实现:当前图像视场中心位置附近会有一个白色点目标,当图像处理器能够对此目标进行稳定捕获提取时,就可以进行星体标校。

若星体相对光电经纬仪的方位和俯仰理论值为 A_{ij}^0 、 E_{ij}^0 ,计算星体测量值:

$$\begin{cases} A_{ij} = A_{ij}'' + \Delta \alpha_{ij} - g - c \cdot \sec E_{ij}'' - \\ \quad b \cdot \tan E_{ij}'' + I \cdot \sin(\alpha_H - A_{ij}) \tan E_{ij}'' \\ E_{ij} = E_{ij}'' + \Delta e_{ij} - h - \Delta P_{ij} - I \cdot \cos(\alpha_H - A_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\Delta P_{ij} = \frac{12325.95 \times P_0}{(273 + t_0) \times 760} \cot E_{ij}''$, A_{ij} 为第 i 颗星第 j 幅画经过修正后的方位测量值, E_{ij} 为第 i 颗星第 j 幅画经过修正的俯仰测量值, A_{ij}'' 为编码器方位原始值, E_{ij}'' 为编码器俯仰原始值, $\Delta \alpha_{ij}$ 为方位脱靶量值, Δe_{ij} 为俯仰脱靶量值。 g 为定向差、 c 为照准差、 h 为零位差、 b 为水平轴误差, I 为垂直轴倾斜误差、 α_H 为垂直倾角, P_0 为测站处的大气压强, t_0 为测站处的大气温度。

计算测量值与理论值的差值:

$$\begin{cases} \Delta A_{ij} = A_{ij} - A_{ij}^0 \\ \Delta E_{ij} = E_{ij} - E_{ij}^0 \end{cases} \quad (5)$$

静态测角总误差:

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m \Delta A_{ij}^2}{mn-1}} \\ \sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^m \Delta E_{ij}^2}{mn-1}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, σ_A 、 σ_E 为方位和俯仰静态总误差。

星体测量角度评定法受众多因素制约影响, 通常需要具备一定条件下才能完成评定。一是星体拍摄必须是晚上, 且需要天空杂散光少对星体影响较小; 二是必须是晴天, 并且大气能见度要极好, 不能有雾霾浮尘; 三是对于光电经纬仪, 要有足够多的 (一般不少于 30 颗) 可以成像的星体; 四是对于红外光电经纬仪, 需要红外星体支撑, 目前红外星体较少。

2.3 基于 RTK 技术的光电经纬仪外场静态精度考核方法

由于光电经纬仪的室内静态精度考核方法不适用于外场, 并且外场光电经纬仪的星体测量角度评定法条件约束较多, 可采用基于 RTK 技术的光电经纬仪外场静态精度考核方法, 其原理为使用无人机挂载 RTK, 模拟室内光电经纬仪静态精度考核方法。

光电经纬仪室内静态精度考核方法原理为光电经纬仪对水平位置平行光管和俯仰角为 $45^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 之间的平行光管分别进行拍摄, 判读后得到光电经纬仪的空间目标测量值 A_1 、 E_1 , 与莱卡经纬仪 (精度 $0.5''$) 对空间目标标定值 A_0 、 E_0 比较, 计算出静态测角误差。

同样, 根据此原理, 在满足条件情况下可以将无人机挂载 RTK 设备模拟平行光管, 其高精度定位空间位置信息作为真值, 并根据无人机实时的高精度定位及姿态信息, 实时解算光学合作目标在被考核光电经纬仪坐标系下的位置信息, 计算光学合作目标相对被考核光电经纬仪的方位角和俯仰角, 计算结果作为真值, 光电经纬仪跟踪捕获无人机挂载的光学合作目标获得测量数据, 通过判读图像获得光学合作目标的光电经纬仪方位角和俯仰角测量值, 将其与真值进行比对, 计算光电经纬仪的静态精度:

$$\begin{cases} \Delta A = A_1 - A_0 - c \cdot \left(\frac{1}{\cos E} - 1 \right) - b \cdot \tan E \\ \Delta E = E_1 - E_0 - h \end{cases} \quad (7)$$

式中, A_1 、 E_1 分别为光电经纬仪对两个光学合作目标方位、俯仰测量差值; A_0 、 E_0 分别为两个光学合作目标位置相对光电经纬仪的方位、俯仰计算值差值; c 为照准差, b 为水平轴误差, h 为零位差。

光学合作目标要根据无人机姿态角和 RTK 天线位置进行位置修正计算, 相对 RTK 天线位置的修正量计算式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L \cos \varphi \cos \delta \\ \Delta L \sin \varphi \cos \delta \\ -\Delta L \sin \delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 分别为空间坐标系下光学合作目标相对 RTK 天线修正量, ΔL 为光学合作目标与 RTK 天线接收点之间的距离 (距离方向与无人机航向一致), φ 为无人机飞控系统给出的俯仰角, δ 为无人机飞控系统给出的偏航角。

2.3.1 准备工作

采用无人机加装 RTK 设备和光学合作目标进行测试, 系统组成包括无人机端和地面端, 无人机端主要包括无人机、飞行控制器 (飞控模块)、数传模块及数传天线、RTK 模块及 RTK 天线、供电电池和光学合作目标及线缆等, 地面端主要包括数据及控制中心、光电经纬仪、地面基准站及天线、数传模块及数传天线, 系统组成原理如图 2 所示。

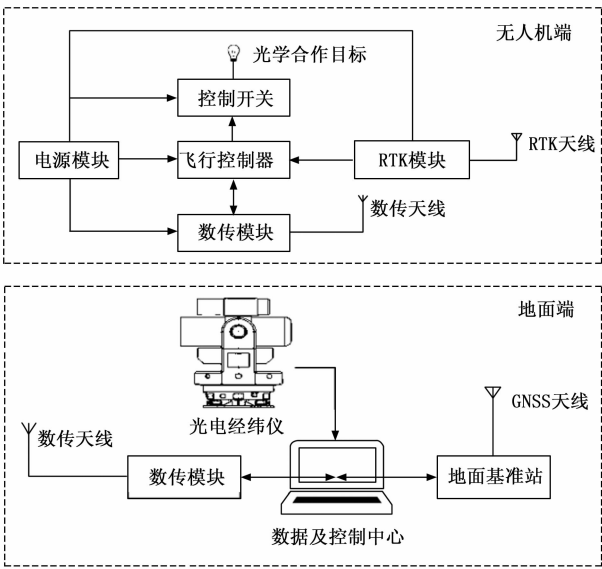


图 2 系统组成原理

2.3.2 试验过程

放飞无人机飞至距离经纬仪大约 1 km, 俯仰高度接近 0° , 悬停并拍摄记录图像。控制无人机飞行, 使得经纬方位角度转动约 90° , 无人机高度飞至经纬仪俯仰角 $45^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 悬停并拍摄记录图像。

事后对无人机光学合作目标 (钨丝灯泡) 进行判读处理, 得到光学合作目标方位、俯仰测量值^[20]; 采集无人机飞控端的 RTK 空间位置数据, 剔除位置精度因子大于 1 的数据, 将光学合作目标的解算空间位置与经纬仪位置进行计算得到光学合作目标相对经纬仪的方位、俯仰真值, 按照式 (7) 计算得到经纬仪静态测量误差。

2.3.3 数据处理及试验结果

表 5 光电经纬仪静态精度考核结果(方位)

A_0 真值/(°)	测量 A_0 /(°)	A_1 真值/(°)	测量 A_1 /(°)	A 误差/(″)
93.736 96	93.743 1	184.347 8	184.352 8	-4.157 91
93.736 35	93.743 5	184.348 2	184.353 4	-7.289 92
93.736 32	93.743 5	184.348 3	184.353 4	-7.685 91
.....				
93.732 17	93.739 6	184.348 6	184.353 7	-8.585 8
93.732 17	93.740 2	184.348 6	184.353 7	-10.745 8
93.732 2	93.740 2	184.348 6	184.353 7	-10.493 8
方位误差(RMS)/(″)				9.85

表 6 光电经纬仪静态精度考核结果(俯仰)

E_0 真值/(°)	测量 E_0 /(°)	E_1 真值/(°)	测量 E_1 /(°)	E 误差/(″)
0.906 28	0.906 9	45.038 04	45.042 1	12.384
0.906 8	0.907 4	45.037 71	45.042 6	15.444
0.907 85	0.907 5	45.038 45	45.042	14.04
.....				
0.905 73	0.905 7	45.033 86	45.038	15.012
0.905 73	0.905 7	45.0343 3	45.038 5	15.12
0.905 74	0.905 7	45.034 19	45.038	13.86
俯仰误差(RMS)/(″)				15.43

注:以两次 RTK 测量的光学合作目标空间位置相对经纬仪三轴中心的方位角差值作为真值,两次经纬仪拍摄的光学合作目标判读值差值作为测量值。

3 光电经纬仪动态精度考核方法

3.1 光电经纬仪室内动态精度考核方法

光电经纬仪在最大工作角加速度条件下,对不大于 65° 高角目标作正弦扰动,同时记录目标视频图像,对下载目标视频图像判读出脱靶量 ΔA_i 、 ΔE_i 和编码器 A_i 、 E_i , 计算在 T_i 时刻目标合成值 A_i 测、 E_i 测;则方位投影动态测角误差 σ_A 、俯仰投影动态测角精度 σ_E :

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[A_{\text{测}} - A_{\text{标}} - c \times \left(\frac{1}{\cos E_{\text{标}}} - 1 \right) - b \times \tan E_{\text{标}} \right]^2}{n-1}} \\ \sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{测}} - E_{\text{标}} - h)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, σ_A 为动态方位测角误差, σ_E 为动态方位测角误差, $A_{\text{标}}$ 为目标方位角度真值, $E_{\text{标}}$ 为目标俯仰角度真值, c 为照准差, b 为水平轴误差, h 为零位差。

3.2 光电经纬仪外场动态精度考核方法

光电经纬仪在野外实际使用中,环境条件差,气象因素复杂,在飞行目标初始段或再入段,光电经纬仪的跟踪角速度与角加速度都较大。因此光电经纬仪的事后测角总误差应为测角静态误差和测角随机误差与动态误差增量的平方和开方^[21],如下:

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\sigma_{A_s}^2 + \sigma_{A_r}^2 + \sigma_{A_{\Delta}}^2} \\ \sigma_E = \sqrt{\sigma_{E_s}^2 + \sigma_{E_r}^2 + \sigma_{E_{\Delta}}^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, σ_A 、 σ_E 为事后测角总误差; σ_{A_s} 、 σ_{E_s} 为事后测角静态误差; σ_{A_r} 、 σ_{E_r} 为事后测角随机误差; $\sigma_{A_{\Delta}}$ 、 $\sigma_{E_{\Delta}}$ 为动态误差增量。

在外场情况下可以通过动态测量综合校飞评定法考核光电经纬仪的动态测量误差。该方法以飞机等为目标,通过标准设备的光电经纬仪和被考核光电经纬仪对规定的航路飞行的飞机目标同步测量,通过比对和评定考核光电经纬仪的动态测量精度。

由被考核光电经纬仪的实际测量量与比较标准“测量量”作差值。按下式计算差值:

$$\begin{cases} \Delta A_i = A_i - A_i^0 \\ \Delta E_i = E_i - E_i^0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, A_i 、 E_i 为第 i 时刻方位角、俯仰角; A_i^0 、 E_i^0 为第 i 时刻方位角、俯仰角的比较标准测量值。

动态测量总误差计算:

$$\begin{cases} \sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2}{n-1}} \\ \sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (12)$$

3.3 基于 RTK 技术的光电经纬仪外场动态精度考核

基于 RTK 的高精度定位能力,使用无人机加装 RTK 设备可实现光电经纬仪外场动态精度的考核,原理同综合校飞评定法。

无人机搭载合作目标作为跟踪目标,按预先设计航路飞行,控制无人机航线^[22-23],并根据无人机加装的 RTK 设备实时的高精度定位及无人机姿态信息,实时解算光学合作目标在被考核光电经纬仪坐标系下的位置信息,光电经纬仪跟踪捕获无人机挂载的光学合作目标获得测量数据。

任务后,将光学合作目标在被考核光电经纬仪坐标系下的 RTK 定位位置信息作为真值,计算相对被考核光电经纬仪的方位角和俯仰角,在时间序列上与光电经纬仪跟踪目标所获得的测量数据进行比对,估算测量数据的误差,以此实现对地面光电经纬仪的精度考核。

基于无人机加装 RTK 的外场动态精度考核方法如下。

3.3.1 准备工作

试验时要求天气无雨雪,风力小于 5 级,大气能见度大于 5 km。无人机、遥控、显示屏技术状态良好,飞机电池、遥控电池以及显示屏电池均满足试验需求。

1) 架设 RTK 地面基准站;

2) 将被考核光电经纬仪通电,确保经纬仪技术状态满足测量要求;

3) 无人机加装 RTK 以及光学合作目标, 设定光学合作目标与 RTK 天线的相对位置关系。

3.3.2 试验过程

控制无人机飞行, 飞行距离不小于 1 km, 当无人机距离大于 1 km 时, 控制打开光学合作目标, 经纬仪跟踪拍摄无人机光学合作目标, 并记录图像数据。

3.3.3 数据处理及试验结果

将光学合作目标的 RTK 定位信息与经纬仪测站原点计算得出的光学合作目标相对光电经纬仪的方位角和俯仰角作为真值; 对光电经纬仪拍摄记录的图像进行处理, 判读光学合作目标相对于经纬仪的方位和俯仰测量值 A 和 E , 将测量值与真值进行比对得到经纬仪的动态跟踪测量误差。

表 7 光电经纬仪动态精度考核结果

测量 A / $^{\circ}$	测量 E / $^{\circ}$	真值 A / $^{\circ}$	真值 E / $^{\circ}$	一次差 $A/^{\circ}$	一次差 E / $^{\circ}$
31.937 4	9.691 4	31.937 45	9.686 63	0.18	-17.172
32.603 1	9.622 7	32.602 49	9.617 61	-2.196	-18.324
32.869 2	9.597 7	32.868 48	9.591 85	-2.592	-21.06
.....					
53.606 5	9.698 2	53.609 91	9.695 84	12.276	-8.496
53.782	9.7192	53.785 41	9.71634	12.276	-10.296
53.959 3	9.740 5	53.962 44	9.737 73	11.304	-9.972
动态误差 RMS/ $^{\circ}$				10.74	15.71

注: 以两次 RTK 测量的光学合作目标空间位置相对经纬仪三轴中心的方位角差值作为真值, 两次经纬仪拍摄的光学合作目标判读值差值作为测量值。

4 结束语

随着无人机与 RTK 技术的不断发展和完善, 利用无人机的灵活飞行和 RTK 技术的高定位精度, 可以实现多种实际观测场景, 在光电经纬仪外场精度考核中可以消除传统考核方法的局限性。基于 RTK 高精度定位能力和无人机技术, 通过分析目前光电经纬仪外场静态和动态测量精度考核方法不足之处, 进行了新方法的应用研究, 并开展了试验验证。结果显示, 无人机加装 RTK 设备外场考核光电经纬仪精度的方法, 在光电经纬仪的外场精度考核应用中, 可以满足光电经纬仪角度测量的精度考核。未来无人机技术与 RTK 技术结合的精度考核方法, 在光电经纬仪和其他测量设备的精度考核领域中会得到更加广泛的应用, 推动相关领域试验测量技术的进步, 具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 徐彦田, 程鹏飞, 秘金钟, 等. GNSS 网络 RTK 技术原理与工程应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.

[2] 杨元喜, 郭海荣, 何海波, 等. 卫星导航定位原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.

[3] 杨泰朋, 宣善钦, 刘 流. 基于 BDS 的 RTK 模式定位精

度分析 [J]. 山西建筑, 2021, 47 (10): 170-173.

[4] 赵健康. 利用 GPS 载波相位快速确定动态载体姿态及精度分析 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21 (4): 114-117.

[5] 熊湘琛, 张新长, 曹凯滨. 城市基础地形数据增量更新研究 [J]. 测绘通报, 2009 (3): 24-26.

[6] 陈百国. 多旋翼无人机技术在防汛抢险中的应用探讨 [J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28 (2): 5-8.

[7] 金 泉, 高显忠, 郭 正, 等. 无人机集群在机场封控作战中的应用研究 [J]. 飞航导弹, 2021 (10): 52-58.

[8] 赵 敏, 姚 敏. 无人机群航迹多任务综合规划方法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2010 (4): 560-563.

[9] 黄学德. 导弹测控系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[10] 何友金. 靶场测控概论 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2009.

[11] 易 牧. 无人机数据链系统现状分析 [M]. 防空兵指挥学院无人机中心, 2008.

[12] 贾绍文, 江志东, 霍立平, 等. 基于无人机平台的陆基光学助降装置动态标校系统 [J]. 兵工自动化, 2020.

[13] 周 巍, 郝金明, 徐兆磊, 等. 基于无人机平台的测控设备精度鉴定系统 [J]. 测绘通报, 2013, 59 (6): 16-18.

[14] 秦显平, 杨元喜, 焦文海, 等. 利用 SLR 和伪距资料确定导航卫星钟差 [J]. 测绘学报, 2014, 33 (3): 205-209.

[15] REMONDI B W. Using the global positioning system (GPS) phase observable for relative geodesy: modeling, processing, and results [D]. Austin: University of Texas at Austin, 1984: 124-132.

[16] NEILL AE. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101 (4): 166-171.

[17] 李 鹏, 沈正康, 王 敏. IGS 精密星历的误差分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006 (3): 40-45.

[18] 傅彦博, 赵龙平, 孙付平, 等. 天线相位中心偏差对 GPS 周年性系统误差的影响分析 [J/OL]. 测绘科学技术学报, 2018 (3): 240-244, 249 [2018-10-25].

[19] 刘 敏, 雷 斌. 靶场光电经纬仪测量数据的误差分析及数据处理 [J]. 国外电子测量技术, 2007, 26 (11): 12-14.

[20] 刘利生. 外测数据事后处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[21] 刘丙申, 刘春魁, 杜海涛. 靶场外测设备精度鉴定 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[22] 宋子豪. 多旋翼无人机 LPV 飞行控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[23] 马顺南, 娄汉泉, 刘秋辉. 大型测控系统校飞航路设计方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2007, 36 (5): 55-57.