

Ka 频段全机动综合测控系统无人机标校设计与应用

吕亮亮¹, 蔡文炳², 董晓彤¹, 游莎莎², 王芹英¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 任务前的系统标校和跟踪验证是 Ka 频段全机动综合测控系统需要完成的重要工作。Ka 频段全机动综合测控系统机动性强, 同时支持陆地机动测控和海上测控需求。系统布站位置灵活, 布站地无标校塔, 无法采用传统固定标校塔方法进行系统标校和跟踪验证。无人机平台机动灵活, 搭载 Ka 频段信标机和校零变频器设备后, 不仅可用于完成 Ka 频段全机动综合测控系统静态情况下的校相、距离校零和跟踪验证工作, 还可满足系统机动测控情况下的跟踪验证需求。本文设计了无人机测试标校系统, 满足 Ka 频段全机动综合测控系统在任意布站位置展开标校和跟踪验证工作, 并进行了机动情况下的测控跟踪验证。经实测, “动中测”的测量精度满足要求, 为机动型测控系统提供了一种新的跟踪验证手段, 具有良好的应用前景。

关键词: 测控系统; 无人机; Ka 频段; 动中测

中图分类号: V556.1; TN953 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)04-0089-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240305002

引用格式: 吕亮亮, 蔡文炳, 董晓彤, 等. Ka 频段全机动综合测控系统无人机标校设计与应用[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 89-96.

Calibration Design and Application of UAV for Ka-band All-mobile Integrated TT&C System

LYU Liangliang¹, CAI Wenbing², DONG Xiaotong¹, YOU Shasha², WANG Qinying¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The pre-mission system calibration and tracking verification are important tasks to be accomplished by the Ka-band all-mobile integrated TT&C system, which has strong mobility, supporting the requirements of land mobile TT&C and maritime TT&C. The system is flexible in terms of station deployment location, and there is no calibration tower at the station deployment site, so it is impossible to use the traditional fixed calibration tower method for system calibration and tracking verification. The UAV platform is mobile and flexible, and after carrying Ka-band beacon machine and calibration zero inverter equipment, it can not only be used to complete the calibration phase, distance calibration zero and tracking verification work under the static condition of Ka-band fully motorized comprehensive measurement and control system, but also meet the tracking verification demand under the system motorized measurement and control condition. In this paper, the UAV test calibration system is designed to meet the calibration and tracking verification requirements of Ka-band all-mobile integrated TT&C system, and the tracking verification under maneuvering conditions is carried out. Through actual testing, the measurement accuracy of the mobile TT&C meets the requirements which provides a new means for the mobile TT&C, and has a good application prospect.

Keywords: TT&C system; UAV; Ka band; Mobile TT&C

Citation: LYU Liangliang, CAI Wenbing, DONG Xiaotong, et al. Calibration Design and Application of UAV for Ka-band All-mobile Integrated TT&C System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 89-96.

0 引言

测控系统是各类运载器、飞行器信息保障的基础。目前, S 频段统一载波测控通信系统已无法满足飞行器各方面的需求, Ka 频段在通信带宽、安装空间和克服“黑障”等方面优势明显。随着航天测控技术的发展, Ka 频段天线在测控领域已逐步应用^[1,2]。

测距、测速、测角是测控系统的基本功能。Ka 频段全机动综合测控系统采用双通道单脉冲自跟踪, 为保证测距、测速和测角精度, 任务前在布站地进行系统标校和跟踪验证是系统的重要工作内容^[3]。

系统标校主要包括距离零值标校、角度零值标校、系统校相等^[4]。系统标校方式主要包括: 对塔标校、无塔偏馈校零、无塔偏馈校相、方位标角度零值标校、无人机标校、信标球校相、星体标校等^[5-11]。距离零值标校可采用对塔标校、无塔偏馈校零、无人机标校。角度零值标校可采用方位标角度零值标校、星体标校。系统校相可采用对塔标校、无塔偏馈校相、无人机标校。无人机标校用途广泛^[3,12-15], 开展标校工作迅速, 在海上还可作为信标球校相的备份手段用于系统跟踪验证, 是 Ka 频段测控系统任务前系统标校的有效方法。基于无人机标校的优点, 本文设计了无人机标校系统, 解决了 Ka 频段全机动综合测控系统布站地无标校塔情况下的实际标校问题, 同时针对系统机动测控的需求, 采用无人机进行“动中测”验证, 为机动测控系统提供了一种新的跟踪验证手段。

1 无人机标校系统原理

系统标校工作需要远场条件下进行, 远场距离条件要满足: $R \geq 2D^2/\lambda$ 。式中, R 为标校塔或高层建筑物与测控站接收天线之间的距离, D 为天线口径, λ 为波长。标校塔或高层建筑物的高度 H 应满足: 天线光轴对准光标时, 光轴与大地之间的夹角大于三倍天线的半功率点波束宽度。随着系统工作频率的升高或天线口径的增大, 使 R 增大、 H 增加, 则实施难度越来越大, 特别是对于 Ka 频段全机动综合测控系统, 这一矛盾更加突出^[12]。无人机标校系统不需要标校塔, 且无人机飞行高度能够满足标校高度的要求, 可克服这一矛盾。

无人机标校基本原理同对塔标校原理的差别在于, 标校天线、校零变频器或信标机等标校设备不是固定放置在标校塔上, 而是由无人机搭载悬停在指定位置, 进而完成系统标校工作。利用无人机搭载高精度 GPS/BD 定位设备、校零变频器或信标机等, 就是将无人机载高精度 GPS/BD 定位结果作为已知量, 结合 Ka 频段全机动综合测控系统自身的位置, 可计算出无人机至系统的精确距离, 并以此作为距离标校的基准值, 完成测控站的距离零值标校工作。对于系统校相, 无人机搭载信标机悬停在某一固定点, 由信标机发射出单载波信标信号, 即可开展系统校相工作。

Ka 频段全机动综合测控系统的标校工作在满足远场距离条件下, 规划无人机悬停点, 控制系统对无人机进行跟踪, 利用无人机高精度 GPS/BD 定位设备进行实时定位解算, 无人机定位结果可通过数传电台传至综合测控系统, 系统结合该结果和测控站位置, 计算出测控站与无人机的距离值, 确定误差修正模型系数, 通过测距软件对距离零值进行修订。采用无人机进行系统标校原理见图 1。

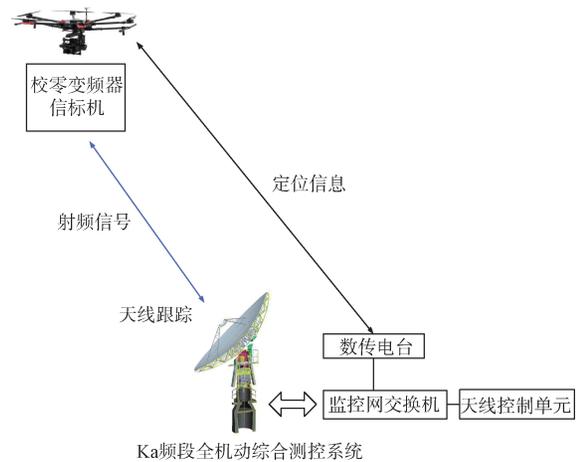


图 1 无人机标校原理图

Fig. 1 UAV calibration schematic

2 无人机标校系统设计

2.1 系统组成布局

Ka 频段全机动综合测控系统无人机标校系统由无人机平台、Ka 频段校零变频器、Ka 频段信标机、标校天线、无人机飞控单元、无人机飞控软件、RTK 差分定位设备、数传电台及飞控手持机

组成。

无人机平台上安装无人机高精度GPS/BD定位设备、数传电台模块等设备。GPS/BD定位设备用于获取无人机定位信息，数传电台模块用于将无人机位置信息远距离传输给综合测控系统，同时可接收飞控手持机控制命令。RTK差分定位设备和地面数传电台模块安装于Ka频段综合测控系统方舱顶部，用于和无人机平台通信以及给无人机平台提供差分定位数据。无人机飞控单元用于接收无人机飞控软件控制命令，通过数传电台发送至无人机，同时接收无人机定位信息。飞控手持机可单独控制无人机平台飞行，也可在无人机起飞降落时进行辅助控制。

Ka频段校零变频器、信标机、标校天线是Ka频段全机动综合测控系统的标校设备，采用小型化、轻量化设计，吊装于无人机平台上，满足无人机电载重和续航时间要求。无人机标校系统组成及布局位置关系如图2所示。

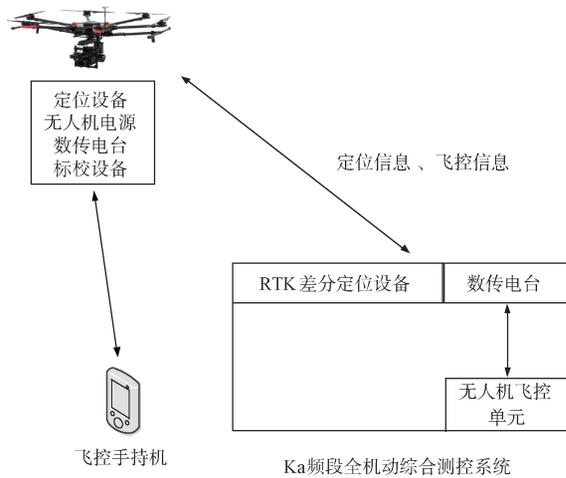


图2 无人机标校系统组成及布局

Fig. 2 Composition and layout of UAV calibration system

2.2 无人机平台规划

利用无人机进行系统标校，无人机平台需满足以下技术需求：

① 无人机具备挂载校零变频器和信标机等载荷的能力，并可保证带载飞行续航时间大于30 min，以满足系统标校时间要求。

② 为满足Ka频段综合测控系统标校远场距离的要求，无人机最大通信距离大于5 000 m。

③ 无人机配置高精度GPS/BD定位设备，差分定位精度小于0.3 m，悬停精度满足水平小于

1.5 m，垂直小于0.5 m，以保证无人机距离零值标定的精度要求。

① 无人机飞行控制软件可实现航迹规划编辑，综合测控系统可接收无人机定位信息并转换为距离信息供系统标校使用。

基于以上需求，选用成熟无人机平台并加装系统标校设备，无人机地面设备布置在测控站电子设备方舱。

无人机主要指标如下：

① 无人机飞行最大高度： $\geq 2\ 500\text{ m}$ ；

② 续航时间： $\geq 30\text{ min}$ ；(挂载重量6 kg情况下)；

③ 最大通信距离： $\geq 5\text{ km}$ 。

④ 无人机悬停精度：水平 $\leq 1.5\text{ m}$ ；垂直 $\leq 0.5\text{ m}$ 。

⑤ 定位精度(差分模式)： $\leq 0.3\text{ m}$ 。

⑥ 飞行控制软件可实现航迹编辑，并可将航迹定位信息通过网口发送给系统交换机。

⑦ 环境要求：

a 工作温度： $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；

b 最大可承受风速： $\geq 8\text{ m/s}$ 。

2.3 系统标校设备

Ka频段全机动综合测控系统设计专用的Ka频段校零变频器、信标机、标校天线吊装于无人机平台上，标校设备具备电池供电能力(续航时间满足无人机飞行时间要求)，且具有重量轻、体积小等特点，可用于无人机标校系统。

Ka频段校零变频器、信标机还支持远程遥控功能，当无人机升起后，可通过遥控电台控制信标机、校零变频器设备工作频率及信号强度大小，可满足不同频点、不同信号强度下系统标校、测试验证的需求。

挂标天线采用宽频带圆极化波纹喇叭天线形式，带宽可以覆盖Ka频段，可同时产生Ka频段左、右旋圆极化信号，标校天线重约70 g，天线增益在Ka频段为12 dB。

2.4 系统标校方法设计

2.4.1 标校方法设计

Ka频段全机动综合测控系统采用3.8 m口径抛物面天线，根据远场距离条件计算，系统远场距离应满足 $R \geq 2\ 700\text{ m}$ ($D=3.8\text{ m}$, $F=28\text{ GHz}$)。在Ka频段综合测控系统周围3 000 m外，规划无人机起落点，无人机挂载信标机或校零变频器设备，飞行高度在500 m时，Ka频段综合测控系统与无人

机之间的斜距可满足远场距离条件, 系统标校设计如图 3 所示。

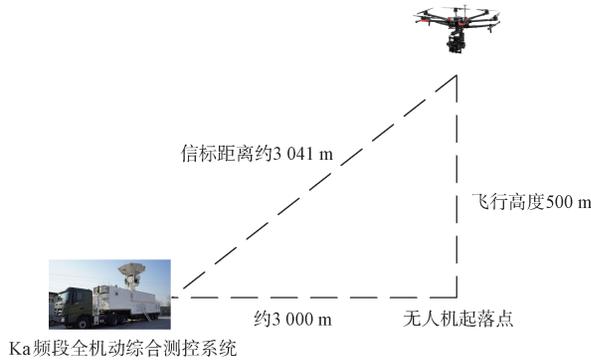


图 3 系统标校方法设计

Fig. 3 System calibration method design

2.4.2 信标功率核算

信标机设备开机发射 Ka 频段信标信号, 发射功率为 0 dBm, Ka 频段标校天线增益为 12 dB, Ka 频段发射电缆损耗为 2 dB, 此时, 无人机平台发射的信号功率为 10 dBm。根据公式(1)进行空间损耗计算。

$$L_{sp} = 32.44 + 20\lg(F) + 20\lg(R) \quad (1)$$

其中, F 为信标信号频率, R 为信标距离, 可计算得: 到达 Ka 频段综合测控系统天线口面处的信标功率 P_r 为 -121.043 dBm。

Ka 频段综合测控系统接收信号功率与噪声谱密度比计算公式如公式(2)。

$$S/\Phi = P_r + G/T - K \quad (2)$$

其中, P_r 为接收信号功率, G/T 为 Ka 频段综合测控系统品质因数, 取值为 29.8 dB/K, K 为玻尔兹曼常数 (-228.6 dBW/Hz·K), 因此, Ka 频段综合测控系统接收信号功率与噪声谱密度比为 137.357 dBm/Hz, 满足系统标校要求。实际应用中, 无人机挂载信标天线存在一定的倾斜角度, 信标机具备遥控功能, 可根据接收信标信号强度适当调整信标机输出功率。

3 系统“动中测”试验

3.1 距离零值标定

在无人机平台搭载标校天线、校零变频器(单机的距离零值已知)等, 综合测控系统通过与无人机上的校零变频器进行收发信号闭环, 可以获得伪距值。根据无人机差分定位结果获得无人机与测控站的真实距离值, 将此距离与伪距进行对比,

即可获得综合测控系统无人机标校的距离零值。无人机距离校零原理图如图 4 所示。

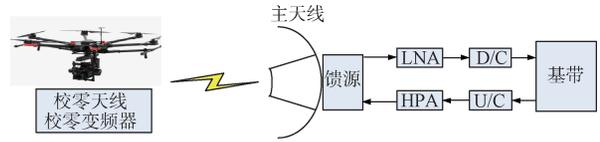


图 4 无人机距离校零原理图

Fig. 4 UAV distance calibration principle diagram

距离零值标定校零残差主要包括校零变频器距离零值标定误差、空间距离标定误差。无论是对塔标校、无塔标校还是无人机标校, 都存在空间距离测量问题。一般校零变频器校零残差为 $\Delta < 0.8$ m。采用无人机进行距离零值标定时, 校零残差还要考虑无人机差分定位精度。差分定位精度为 0.3 m 时, 无人机标校系统校零残差为 0.85 m。

3.2 系统校相

Ka 频段全机动综合测控系统采用双通道单脉冲体制进行目标自跟踪。利用无人机完成系统校相功能, 无人机搭载信标机悬停在固定位置, 在综合测控系统基本对准无人机后, 在方位顺逆方向拉偏一定的角度, 同时记录脱靶量、误差电压等信息, 并可以求出需移向值 Φ 。后续在俯仰上下方向分别多次拉偏天线并进行电跟踪, 可以求出所需移向值 Φ 。多次测量取平均值, 可以确定系统的移向值 Φ 。

采用无人机进行系统校相时, 无人机差分定位精度 0.3 m, 在远场条件下, 假设无人机偏移角度为 A , 则偏移角度 $A = \arctan(0.3/R) = 0.0057^\circ$ (根据 2.4 节设计方法, R 取值为 3 041 m)。利用无人机进行多次系统校相后, 系统跟踪基本不受影响, 经过实际任务验证, 可将无人机校相结果用于系统跟踪使用, 系统校相精度分析如图 5 所示。

3.3 系统“动中测”跟踪验证

Ka 频段全机动综合测控系统在完成系统标校后, 可利用无人机完成系统任务前的目标跟踪验证工作, 根据任务跟踪轨道, 规划无人机航迹, Ka 频段全机动综合测控系统可在等待点进行目标捕获跟踪验证, 也可利用系统微光电视对无人机进行电视跟踪验证。

Ka 频段全机动综合测控系统集成了测姿测位设备, 具备动中测控能力, 可利用无人机完成系统机动情况下的测量精度统计。测试采取载车机

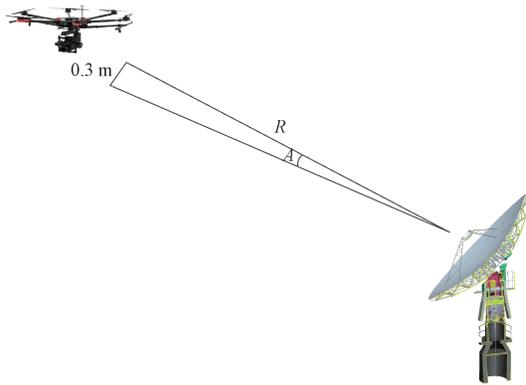


图5 系统校相精度分析

Fig.5 Analysis of phase calibration accuracy of system

动情况下，跟踪无人机目标，路况为三级路况，载车速度分别为10 km/h、20 km/h。测试过程中，载车机动时，系统均能成功捕获跟踪无人机目标，并稳定跟踪至载车停止，经测试，Ka频段全机动综合测控系统机动过程中跟踪无人机目标精度满足相关要求。

3.3.1 测角精度测试

Ka频段全机动综合测控系统载车机动期间，测控站可稳定跟踪无人机。跟踪过程中，全程记录天线实时角度信息(Ai、Ei)。

载车停止后，根据载车运动中测量得到的方位、俯仰实时角度，利用最小二乘法拟合真值曲线。拟合曲线与测量值在每个采样点作方差，计算差值的均方根，分别得到方位、俯仰的测角误差。

根据公式(3)得到系统测角随机误差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [X_i - X]^2}{n-1}} \quad (3)$$

X_i为测量值，X为拟合曲线采样点，σ为测量随机误差。

无人机将实时定位数据发给测控站，通过计算可得测控站对准无人机的理论大地角度值。根据公式(4)计算得到测角系统误差。

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - y_{0i}]^2}{n-1}} - \sigma \quad (4)$$

y_i为测量值，y_{0i}为根据无人机位置给出的理论真值，σ为测量随机误差。

3.3.1.1 车速为10 km/h时测试结果

在载车速度为10 km/h时，方位/俯仰角度对比

曲线和方位/俯仰误差曲线如图6~图9所示，经计算，方位测角随机误差为0.018°，俯仰测角随机误差为0.017°。

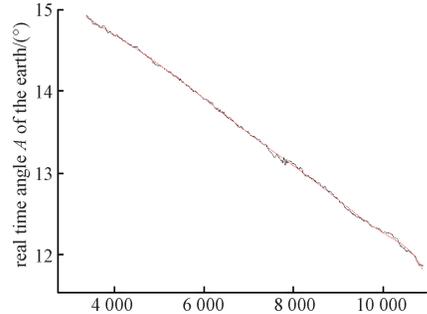


图6 车速为10 km/h方位角度对比曲线

Fig.6 Azimuth angle contrast curve at 10 km/h

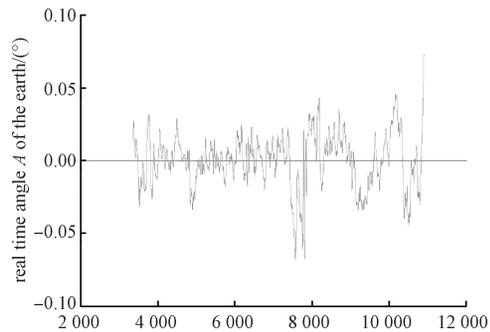


图7 车速为10 km/h方位误差曲线

Fig.7 Azimuth error curve at 10 km/h

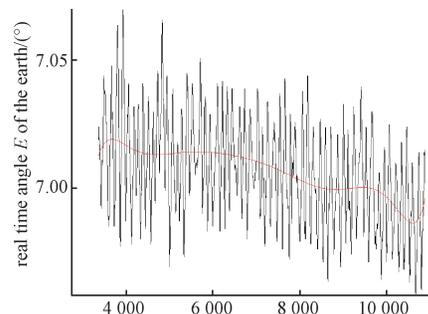


图8 车速为10 km/h俯仰角度对比曲线

Fig.8 Pitch angle contrast curve at 10 km/h

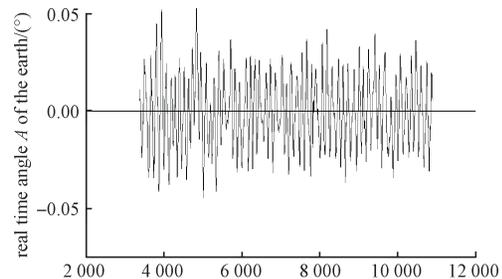


图9 车速为10 km/h俯仰误差曲线

Fig.9 Pitch error curve at 10 km/h

3.3.1.2 车速为 20 km/h 时测试结果

在载车速度为 20 km/h 时, 方位/俯仰角度对比曲线和方位/俯仰误差曲线如图 10~图 13 所示, 经计算, 方位测角随机误差为 0.017°, 俯仰测角随机误差为 0.012°。

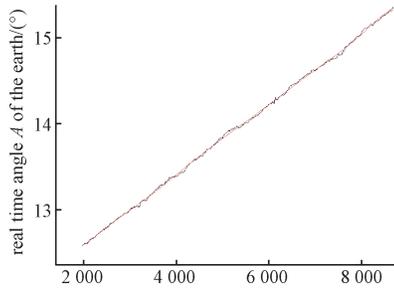


图 10 车速为 20 km/h 方位角度对比曲线
Fig. 10 Azimuth angle contrast curve at 20 km/h

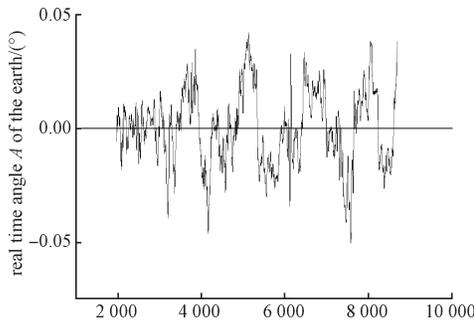


图 11 车速为 20 km/h 方位误差曲线
Fig. 11 Azimuth error curve at 20 km/h

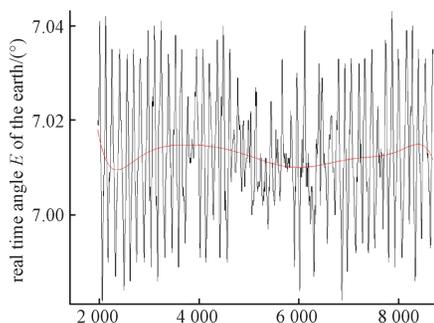


图 12 车速为 20 km/h 俯仰角度对比曲线
Fig. 12 Pitch angle contrast curve at 20 km/h

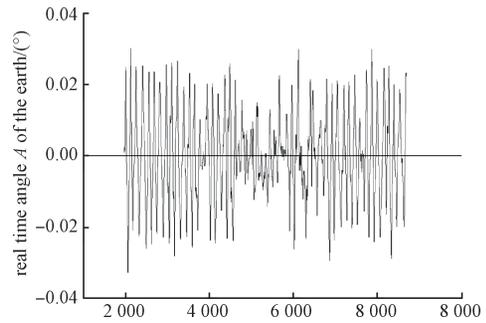


图 13 车速为 20 km/h 俯仰误差曲线
Fig.13 Pitch error curve at 20 km/h

载车停止后, 利用实时记录的距离值, 并根据无人机定位信息和载车位置信息计算出距离真实值, 根据公式(5), 计算测距精度。

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [R_i - R'_i]^2}{n-1}} \quad (5)$$

3.3.2.1 车速为 10 km/h 时测试结果

车速为 10 km/h 时, 经计算距离随机误差为 0.291 707 405 m, 如图 14、图 15 所示。

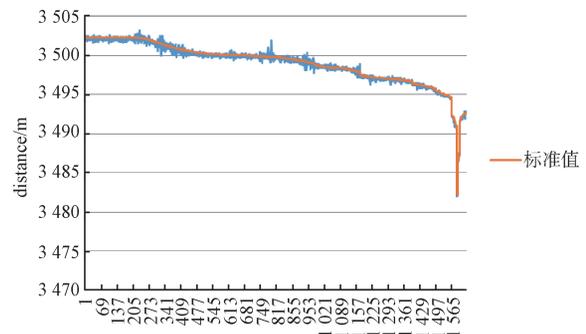


图 14 车速为 10 km/h 时距离对比曲线
Fig. 14 Distance contrast curve at 10 km/h

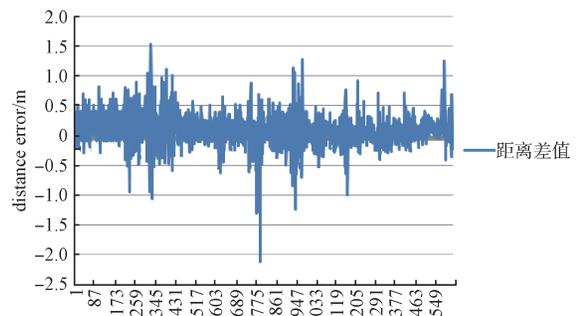


图 15 车速为 10 km/h 时距离误差曲线
Fig. 15 Distance error curve at 10 km/h

3.3.2 测距精度测试

Ka 频段全机动综合测控系统机动情况下稳定跟踪无人机信标后, 开始收发扩频测量信号, 与无人机载设备完成上下行链路测量闭环。测控系统按照预定路线机动, 实时记录系统测量的距离值 R_i , 以及对应时刻的站址位置 X_i 、 Y_i 、 Z_i 。根据无人机的位置 X_0 、 Y_0 、 Z_0 和测控天线的实时站址位置 X_i 、 Y_i 、 Z_i 计算距离真值 R'_i 。

3.3.2.2 车速为 20 km/h 时测试结果

车速为 20 km/h 时, 经计算距离随机误差为

0.291 53 m, 如图16、图17所示。

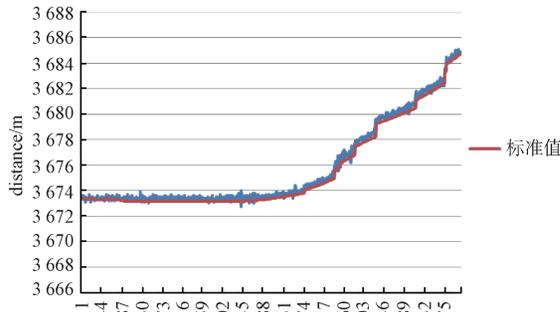


图16 车速为20 km/h时距离对比曲线
Fig. 16 Distance contrast curve at 20 km/h

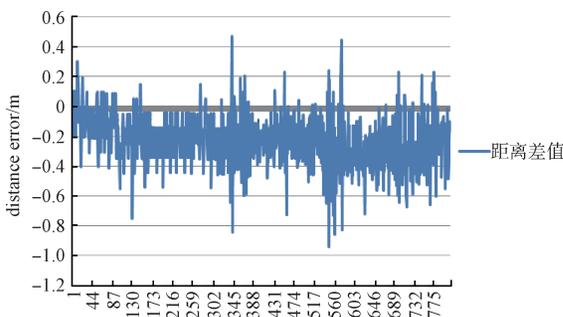


图17 车速为20 km/h时距离误差曲线
Fig. 17 Distance error curve at 20 km/h

3.4 小结

Ka频段全机动综合测控系统利用无人机进行了机动情况下的测量精度测试,测角、测距随机误差统计情况见表1,满足相关要求。

表1 机动情况下系统测量精度统计

Table 1 System measurement accuracy statistics under maneuvering conditions

精度统计	车速 10 km/h	车速 20 km/h
测角-方位随机差	0.018°	0.017°
测角-俯仰随机差	0.017°	0.012°
测距随机误差	0.291 m	0.291 m

4 结束语

无人机平台机动灵活,快速高效。采用无人机搭载Ka频段标校设备载荷,可满足Ka频段全机动综合测控系统任务前系统校相、距离零值标定和跟踪验证需求,满足载车机动中测控情况下的精度验证需求;设备在海上执行任务时,无人机标校可作为信标球标校手段的有效补充,提高设备标校的效率,并节约标校成本。随着越来越多的

Ka频段测控系统的应用,无人机标校作为一种灵活的标校手段,将大大提高系统任务前的相关准备工作的效率。

参考文献

- [1] 邱长泉,袁延荣. Ka频段飞行器测控与通信系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 271-277.
QIU Changquan, YUAN Yanrong. Design of Ka band TT&C and communication system of spacecraft[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(10): 271-277.
- [2] 黄展,李冰. Ka频段馈源多波束引导概率分析[J]. 电讯技术, 2019, 56(6): 647-651
HUANG Zhan, LI Bing. Analysis of Ka-band multibeam parabolic antenna guiding probability[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(6): 647-651.
- [3] 李敏剑,王向伟,刘佳伟. 多旋翼无人机在某测控设备标校工作中的应用[J]. 遥测遥控, 2021, 42(3): 26-33
LI minjian, WANG Xiangwei, LIU Jiawei. Application of multi-rotor UAV in a telemetry and control system's phase position calibration work[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(3): 26-33.
- [4] 杨兵. 某型卫星地面站标校技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [5] 郑金秀,王强. 卫星接收系统Ka频段对星快速校相方法[J]. 机电技术, 2020(4): 10-12.
- [6] 杨锁强,林兴隆. 单脉冲跟踪系统中自动校相的设计与实现[J]. 信息通信, 2011(3): 23-24.
- [7] 华林. 舰载测控系统校相方法的研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(11): 104-106.
HUA Lin. Research of the phase calibration methods for shipboard TT&C system[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(11): 104-106.
- [8] 瞿元新,毛南平. 舰载X频段微波统一测控系统快速校相方法[J]. 遥测遥控, 2014, 35(2): 69-72.
QU Yuanxin, MAO Nanping. A Fast phase calibration method of the shipboard unified X-band system [J]. Journal of telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(2): 69-72.
- [9] 周成刚,姜志合,徐荣,等. 舰载USB海上无塔新型标校技术研究[C]//中国宇航学会飞行器测控专业委员会. 第25届飞行器测控学术年会会议论文集. 2010: 400-404.
- [10] 薛玉龙,李玉瑄,张峰,等. 利用射电星的无塔角度标校技术研究[C]//中国宇航学会飞行器测控专业委员会. 第26届飞行器测控学术年会会议论文集. 2012: 434-439.

- [11] 胡晋东. 跟踪雷达无塔校相方法及应用[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 144-146.
HU Jindong. Research of methods and application of beaconless phase-calibrating of tracking rader[J]. Fire Control Comm and Control, 2010, 35(10): 144-146.
- [12] 洪宇, 吴宗清, 门涛, 等. Ka 频段大口径测控天线无人机校相方法设计与验证[J]. 宇航学报, 2021, 42(6): 783-789.
HONG Yu, WU Zongqing, MEN Tao, et al. Design and test verification of phase calibration mode of Ka-band large aperture TT&C antenna based on unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(6): 783-789.
- [13] 雷鸣. 基于无人机平台对地面测控系统校相的设计与实现[J]. 电子质量, 2021, 4: 50-53.
LEI Ming. Design and application of TT&C ground system phase calibration based on UAV platform[J]. 2021, 4: 50-53.
- [14] 仇晓静, 代云超, 顾新锋, 等. 航天测量船船载无人机应用系统设计[C]//中国指挥与控制学会空天安全平行系统专业委员会. 第二届中国空天安全会议论文集. 2017: 529-532.
- [15] 解玲娜, 王怀. S/X/Ka 频段卫星地面站无人机测试标校设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 29(1): 14-19.
XIE Lingna, WANG Huai. S/X/Ka band satellite ground station uav test calibration design[J]. Computer Measurement & control, 2020, 29(1): 14-19.

[作者简介]

- 吕亮亮 1988年生, 硕士, 高级工程师。
蔡文炳 1988年生, 硕士, 助理研究员。
董晓彤 1990年生, 博士, 工程师。
游莎莎 1983年生, 硕士, 助理研究员。
王芹英 1974年生, 硕士, 高级工程师。

(本文编辑: 潘三英)

(英文编辑: 赵尹默)