

多旋翼无人机在某测控设备标校工作中的应用

李敏剑, 王向伟, 刘佳伟
(63618 部队 库尔勒 841001)

摘要: 为了提高综合测控设备标校效率, 简化标校流程, 克服传统标校的各项缺点, 进行了多旋翼无人机在某综合测控设备标校工作中的应用研究。分析了某综合测控设备相位标校工作的现状, 对引入多旋翼无人机进行相位标校工作进行了需求分析, 建立了无人机相位标校的数学模型。在选定无人机型号、设计实现小型化信标机、飞行电池与信标机固定支架等工作的基础上, 实现了无人机在某综合测控设备相位标校工作中的应用。经过实际标校工作检验, 多旋翼无人机不但能应用于某综合测控设备相位标校工作中, 而且同时能够检验综合测控设备的动态跟踪性能, 在同类型设备中具有一定的推广应用价值。

关键词: 多旋翼无人机; 测控; 标校; 跟踪

中图分类号: V556.1

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2021)03-0019-08

Application of multi-rotor UAV in a telemetry and control system's phase position calibration work

LI Minjian, WANG Xiangwei, LIU Jiawei

(63618 PLA Troops, Kuerle 841001, China)

Abstract: In order to improve work efficiency, simplify work flow and overcome weaknesses of conventional phase position calibration work, research on application of multi-rotor UAV in telemetry and control system in phase position calibration work has been done. The present situation that existed in the phase position calibration work of a integrated telemetry and control system has been analysed, as well as demands of the multi-rotor UAV application in the phase position calibration work. Math model of the phase position calibration work by using multi-rotor UAV has been established. In the end, the multi-rotor UAV type selection work has been done and a mini new beacon transmitter has been designed and manufactured. The mounting frame which fixed the beacon transmitter and flying battery had been designed and manufactured. The production of this research has been proofed by practical application, while the multi-rotor UAV can be applied in the phase position calibration work, it can also be used to testing telemetry and control system's tracking performance, and it is endowed with practical application and popularization value to the similar telemetry and control systems.

Key words: Multi-rotor UAV; Telemetry and control; Calibration; Tracking

引 言

目前, 航天测控系统中遥测设备的自跟踪通常采用差模跟踪体制^[1]。对采用连续波信号体制、多模馈源、双通道单脉冲跟踪方式, 并工作在 Ka 频段的某机动综合测控设备来说, 为了准确地跟踪高动态目标, 必须在执行任务前一天或者前几个小时, 对综合测控设备和差通道相位差进行标校与调整。某机动综合测控设备采用远场标校手段来完成相位标校工作, 实际使用过程中, 远场标校条件一般很难满足。

由于某机动综合测控设备是机动式布局, 工作的条件一般比较恶劣, 几乎没有满足远场标校特定的距离、仰角、无遮挡条件^[2]的场区。某机动综合测控设备跟踪任务当天, 由于实际工作安排以及人员配备等条件限制, 很难在任务前几个小时抽出人员和时间来进行相位标校工作, 一般是安排在任务前一天进行相位校准工作。进行相位标校工作时, 需要将安装有标校杆的牵引车车头驾驶至指定地域, 人工将笨重的远场标校设备架设好, 通过标校杆将标校喇叭与连接线缆升高至距离地面 15 m 的高度。虽然该

传统方法能够满足相位标校工作的要求, 但是配发的远场标校设备体积大、重量重、连接复杂且架设工作需要参与的人员多、工作量大、耗时长, 对地形要求必须无遮挡, 已经不能满足目前综合测控设备定岗人员少、快速开展工作的要求。

对于工作在 Ka 频段的某机动综合测控设备, 和差通道相位差随时间和温度的变化较大, 导致综合测控设备在前一天进行远场信标校相后对该信标跟踪性能良好, 但是在第二天任务中实际目标跟踪时, 由于定向灵敏度及交叉耦合系数变差, 从而引起某机动综合测控设备跟踪不稳定^[3]的问题。

针对上述问题, 笔者开展了多旋翼无人机在某综合测控设备标校工作中的应用研究。

1 某综合测控设备相位标校工作现状

在信标机信号强度满足标校的前提条件下, 某综合测控设备进行相位标校工作还需要满足以下几点需求。

1.1 空间要求

信标机标校喇叭与综合测控设备天线之间能通视无遮挡, 信标机标校喇叭距离某综合测控设备天线 1 km~1.5 km, 高度 15 m, 信标机喇叭架设处海拔要求不低于某综合测控设备天线所处地海拔, 天线对准标校喇叭电中心时, 仰角要求大于天线半功率波束宽度, 以便最大程度地减少地杂波对相位标校的影响。

1.2 时间要求

某综合测控设备进行标校工作, 从驾驶员驾驶天线车牵引车头至预先选定的标校地点开始计时, 至标校过程结束, 大约需要 1.5 h~2 h 左右, 而从信标机和标校喇叭架设好后开始计时, 真正用来进行相位标校的时间只需约 10 min 左右。现有条件下, 相位标校主要时间都耗在标校准备阶段。

1.3 人员要求

某综合测控设备进行相位标校工作时, 最少需要 1 名驾驶员, 2 名标校设备架设人员, 综合测控设备端进行校相标校的人员 1 名, 共计 4 名人员进行相位标校工作。

2 相位标校工作对多旋翼无人机的需求

进入本世纪以来, 世界各国都在大力发展各种用途的无人飞行器。目前主要有固定翼无人机、无人直升机和多旋翼无人机等三大无人机平台^[4]。其中, 固定翼无人机和无人直升机具有更高的自由度、结构紧凑简单等优点^[5], 但同时也具有价格高昂、体积较大、起降场地要求高、飞行控制难度大等缺点, 因此, 固定翼无人机和无人直升机多应用于军事领域, 包括美国在内的许多国家都投入了大量的军事经费对无人机进行研发^[6]。

多旋翼无人机具有结构简单、体积小、重量轻、造价便宜、操控简单、飞行可靠、可悬停、起降场地条件要求低等优点, 已经成为民用无人机市场的主流机型。近几年来, 多旋翼无人机在教育科研领域、航拍领域、军事应用领域、农业应用领域、快递行业等均得到了广泛应用^[7]。

将多旋翼无人机应用至综合测控设备相位标校工作中来, 结合综合测控设备相位标校工作的特点, 认为多旋翼无人机应达到如下技术要求。

2.1 载重指标

在载重性能方面, 多旋翼无人机的载重能力在各类无人机中是最差的。根据多旋翼无人机设计的大小, 已经商用的各类多旋翼无人机的载重量从几百克到几百公斤, 植保(植物保护)多旋翼无人机最大起飞重量通常在 10 kg~20 kg 左右。目前, 已经设计实现的安装于多旋翼无人机上的信标机重量为 1.7 kg, 在多旋翼无人机的载重范围内。

2.2 续航能力

多旋翼无人机一般使用锂电池作为飞行动力, 也有采用燃料电池、太阳能电池、柴油或汽油发动机作为动力的多旋翼无人机, 其飞行时间受电池容量或燃料箱大小的影响。采用锂电池作为动力的多旋翼无人机, 飞行时间一般在 30 min 左右。而某综合测控设备相位标校工作耗时仅需 10 min 左右, 在续航能力上, 多旋翼无人机可以满足综合测控设备相位标校工作的需求。

2.3 悬停能力

多旋翼无人机的最大特点就是具有多对旋翼,采用无刷电机作为旋翼的动力,并且每对旋翼的转向相反,用来抵消每组旋翼产生的扭力矩。多旋翼无人机的控制系统对姿态回路与水平位置和高度位置回路均有良好的控制特性^[8,9]。通过飞控程序改变每对旋翼的转速大小,就可以实现无人机俯仰、滚转、航向和高度四个通道的控制,可以实现垂直起降,定点盘旋功能。

通过市场调研可知,目前市场售卖的多旋翼无人机悬停精度的范围大致为垂直方向 $\pm 0.1\text{ m} \sim \pm 0.5\text{ m}$,水平方向 $\pm 0.1\text{ m} \sim \pm 1.5\text{ m}$ 。标校过程中,依据信标机信号最大电平在综合测控设备主收波束范围内($\theta_0=0.2^\circ$)的要求,无人机在悬停标校过程中,由于无人机悬停精度带来的方位方向角度抖动如下式:

$$\Delta A = \arctan \frac{2\Delta L}{L} \quad (1)$$

其中, ΔL 为无人机的悬停精度, L 为无人机悬停位置与综合测控设备天线之间的距离,一般标校时此距离值约为 1 km 。

由式(1)计算可知,由无人机悬停精度引起的无人机相对综合测控设备天线水平方向抖动的角度范围 ΔA 约为 $0.01^\circ \sim 0.17^\circ$ 。同理可得,无人机相对综合测控设备天线垂直方向抖动的角度范围 ΔE 约为 $0.01^\circ \sim 0.06^\circ$ 。

综合测控设备主收天线波束范围为 $\theta_0=0.2^\circ$, $\theta_0 > \Delta A$, $\theta_0 > \Delta E$,由于无人机悬停精度引起的综合测控设备天线方位俯仰方向的抖动均在要求范围内,多旋翼无人机的悬停精度满足综合测控设备标校要求。

2.4 飞行高度

无人机的升限取决于飞控硬件与无人机之间通信链路的作用距离,目前应用于多旋翼无人机上通信系统的作用距离均大于 1 km ,保守估计多旋翼无人机的升高最少大于 1 km 。若无人机悬停高度为 30 m ,悬停地点与综合测控设备天线水平距离为 1 km ,此时综合测控设备天线对准无人机上的标校喇叭电中心的仰角为

$$E_{\text{对标}} = \arctan \frac{30}{1000} = 1.718^\circ > \theta_1 \quad (2)$$

其中, $E_{\text{对标}}$ 为多旋翼无人机悬停点高度 30 m ,在距离综合测控设备天线 1 km 条件下,综合测控设备天线电轴对准无人机时的仰角,即对标仰角。 θ_1 为天线偏馈半功率波束角度, $\theta_1=1.5^\circ$ 。综合测控设备在目标初始捕获时,偏馈多波束先发现目标,进行偏馈多波束跟踪,待跟踪稳定后,目标进入天线主波束范围内,进行主波束自跟踪。因此,需要同时对主波束通道和偏馈多波束通道进行相位标校。由于偏馈多波束的波束宽度比主波束的波束宽度大,故在计算标校仰角条件时,参考的波束宽度应以偏馈多波束的半功率波束宽度为主。

多旋翼无人机若应用在综合测控设备相位标校工作中,满足标校喇叭与综合测控设备天线之间的仰角大于天线半功率波束的要求,能够完全避免地杂波对相位标校结果精度带来的不利影响。

3 无人机相位标校数学模型

某综合测控设备工作在 Ka 频段,采用卡塞格伦天线、多模馈源的实现形式。采用了多波束馈源扩大了天线波束的覆盖范围。当目标进入到天线波束的覆盖范围后,数字基带计算产生角误差电压,引导天线中心馈源对准目标,当目标进入天线主波束后,达到自跟踪条件时启动自跟踪,实现对目标的闭环跟踪。

为了实现综合测控设备对目标闭环自跟踪,方便数字基带进行跟踪角误差的解调,需要在任务前对综合测控设备进行相位标校工作。

在实际相位标校工作中,天线和差通道对信标机天线的响应由天线近场辐射场以及信标机天线口径场点乘决定。在实际应用中,可以将信标机天线简化成一个点源天线,因此,测控设备天线对信标机天线辐射场的响应实际上就是测控设备天线近场的方向图^[10]。

在计算卡塞格伦天线近场方向图时, 一般采用等效抛物面法来进行简化。简化后的卡塞格伦天线的近场方向图可表示为

$$E_S(u) = \int_0^1 \frac{J_0(vt)}{1 - \left(\frac{vt}{2.405}\right)^2} J_0(ut) \exp(-j\phi_m t^2) dt \quad (3)$$

$$E_D(u) = \left[\int_0^1 \frac{J_1(vt)}{1 - \left(\frac{vt}{3.832}\right)^2} J_1(ut) \exp(-j\phi_m t^2) dt \right] \frac{2.405}{3.832} / E_S(0) \quad (4)$$

式中: $\phi_m = \frac{\pi a_R^2}{\lambda} \frac{1}{R}$; $v = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a_R a_H}{F}$; $u = \frac{2\pi}{\lambda} a_R \sin \theta$; $E_S(u)$ 为天线和方向图, 可以等效为天线接收信标机信号的和信号; $E_D(u)$ 为天线差方向图, 可以等效为测控设备天线接收信标机的差信号; a_R 为被测天线的口径半径; a_H 为馈电喇叭的口径半径; F 为卡塞格伦天线的等效焦距。

和差信号经过测控设备下行链路放大变频至 70 MHz 的中频信号, 其中和信号送给接收机进行跟踪滤波处理, 产生两路正交的和信号。差信号经过幅度归一化和相位归一化处理, 与两路正交的和信号进行点乘, 并低通滤波处理后, 就解调出了测控设备方位、俯仰方向的角误差信号:

$$\Delta u_A = \mu \theta E [\cos \beta \cos(\phi_1 - \phi_2) + \sin \beta \sin(\phi_1 - \phi_2)] \quad (5)$$

$$\Delta u_E = \mu \theta E [\sin \beta \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos \beta \sin(\phi_1 - \phi_2)] \quad (6)$$

μ 为天线差斜率 (天线设计定型后为常数); θ 为目标偏离测控设备主波束的夹角; β 为目标空间相位; ω 为信标信号的角频率; E 为和模信号、差模信号的幅度; ϕ_1 为和信道设备引起的信号相移; ϕ_2 为差通道设备引起的信号相移。 ϕ_1 和 ϕ_2 可以由测控设备校相得到, 经过测控设备校相后, ϕ_1 和 ϕ_2 一般相差为 0° 或 180° , 因此可以得到真实的误差电压:

$$\Delta u_A = \mu \theta E \cos \beta \quad (7)$$

$$\Delta u_E = \mu \theta E \sin \beta \quad (8)$$

数字基带计算得到角误差电压后, 将角误差电压送给伺服控制计算机, 伺服控制计算机驱动电机朝着减小误差电压的方向运动, 直至方位俯仰误差电压为零, 从而实现了测控设备对目标的自跟踪。

在近场标校条件下, 文献[10]研究结果显示: 当标校距离为理论距离的 1/3 时, 和差通道校相结果比理想条件下校相结果约大 13° 左右。虽然近场标校与理想条件下标校结果有差距, 近场标校的相位结果多次在实际工程中得到应用, 应用结果表明: 近场校相结果不会影响测控设备对目标的自跟踪。因此, 一般直接将近场标校出来的相位结果用来进行测控设备对目标的自跟踪。

依据经验公式 $R_0 = 2D^2/\lambda$, 其中, R_0 为综合测控设备理论校相距离, D 为综合测控设备抛物面天线口径, λ 为天线接收无线电信号的波长。计算可得, 某综合测控设备理论标校距离为 2.7 km。使用选定的 MG-1P 无人机进行某综合测控设备相位标校的时候, 一般将无人机起飞高度设置为 30 m, 离综合测控设备天线约 1 km 的地方进行标校, 使用 MG-1P 无人机进行综合测控设备相位标校属于近场标校, 理论上是可行的。

4 多旋翼无人机在标校工作中的应用

4.1 多旋翼无人机的选型

通过分析某综合测控设备相位标校工作的现状, 结合多旋翼无人机的工作方式和特点, 可以确定多旋翼无人机能够很好地满足某综合测控设备相位标校工作的需求。目前, 市面上多旋翼无人机主要以大疆品牌为主。符合综合测控设备标校要求的主要有大疆的 M600Pro 飞行平台、MG-1P 植保机和 T16 植保机三种型号, 从售价、载重能力、续航时间、悬停精度, 机身外形尺寸等几方面进行参数对比, 见表 1。

表 1 三种型号多旋翼无人机对比
Table 1 Comparison of three kinds of Multi-Rotor UAV

产品名称	M600Pro 飞行平台	MG-1P 植保机	T16 植保机
产品外形			
单价	40 598 元	45 087 元	54 999 元
机器尺寸	1 668 mm×1 518 mm×727 mm (机器展开) 437 mm×402 mm×553 mm (机器折叠)	1 460 mm×1 460 mm×578 mm (机器展开) 780 mm×780 mm×578 mm (机器折叠)	2 520 mm×2 212 mm×720 mm (机器展开) 1 100 mm×570 mm×723 mm (机器折叠)
机身重量	含 6 块 TB47S 电池: 9.5 kg 含 6 块 TB48S 电池: 10 kg	不含电池作业箱: 9.8 kg 标准起飞重量: 23.8 kg	不含电池: 18.5 kg 标准起飞重量: 39.5 kg
最大载重	6 kg	10 kg	15 kg
电池容量	一块电池容量 4 500 mA, 一次起飞 装六块电池	12 000 mA	17 500 mA
续航时间	6 块 TB47S 电池: 16 min 6 块 TB48S 电池: 18 min	起飞重量 13.8 kg: 20 min 起飞重量 23.8 kg: 9 min	起飞重量 24.5 kg: 18 min 起飞重量 39.5 kg: 10 min
充电时间	六通道并充 6 块: 180 min	快充: 30 min 一块	快充: 20 min 一块
悬停精度	垂直: ±0.5 m, 水平±1.5 m	垂直: ±10 cm, 水平±10 cm	垂直: ±10 cm, 水平±10 cm
控制方式	遥控器	遥控器	遥控器
防风等级	5 级	5 级	5 级
最大控制距离	5 km	5 km	5 km
最大飞行高度	2 500 m	2 000 m	2 000 m
产品特色	标配 A3Pro 飞控, 可靠性高; 易安 装, 便捷; 6 通道并行充电; 可搭 载航拍一体机; 长时续航, 远距传 输; 广播级一体化高清图传。	标配 A3NG 飞控; 八轴动力冗余 设计; FPV 摄像头, 飞行性能稳 定可靠; 搭载第二代高精度雷达, 全天候护航, 稳定可靠安全。	GNSS+RTK 双冗余系统, 厘米级 定位; 高清数字图传; 模块化设 计, 电池作业箱可快速插拔; 成 像雷达自主绕障飞行。

通过表 1 对比可以分析得到, 从载重能力、续航能力、悬停精度和飞行高度四项关键指标来看, M600Pro、MG-1P 和 T16 三款多旋翼无人机理想条件下均能满足综合测控设备相位标校工作的需求。M600Pro 飞行平台悬停精度虽然理论条件下符合要求, 但若在缩短无人机悬停位置与综合测控设备天线之间距离的条件下, 因悬停精度引起的天线抖动范围会超出天线中心波束范围, 影响相位标校的精度, 因此排除 M600Pro 飞行平台。T16 植保无人机超出预算, 起飞重量更重, 尺寸也更大, 因此排除 T16 植保无人机。最终综合测控设备无人机相位标校工作的开展选定的多旋翼无人机飞行平台为 MG-1P 植保无人机飞行平台。

4.2 信标机安装支架的设计

新疆 MG-1P 植保无人机配套部件安装完成并展开



图 1 安装展开的 MG-1P 植保机
Fig. 1 The unfolded MG-1P plant protection UAV

后如图 1 所示。在机身正下方有一个 10L 的药箱, 药箱里面不便于放置某小型化信标机及喇叭, 且为了不破坏 MG-1P 植保机的配套性, 因此需要重新设计制作一个信标机及喇叭安装固定支架。

由于该固定支架将取代药箱的位置, 并方便信标机及喇叭的安装, 因此, 该固定支架的设计有以下两个关键要求: 一是重量轻。MG-1P 的载重为 10 kg, 且信标机及喇叭的重量约为 1.7 kg, 因此, 固定支架的重量不能超过 8.3 kg。MG-1P 的飞行续航时间与起飞重量成反比, 起飞重量越轻, 飞行时间越长, 越有利于某综合测控设备相位标校工作的进行, 因此, 固定支架越轻越好。选材方面, 综合考虑到加工方便性以及材料可获得性两方面因素, 选用 0.8 mm 的不锈钢板进行剪板折弯和氩弧焊技术进行加工。二是固定支架安装方便。固定支架需要安装三种设备: 飞行电池、小型信标机及喇叭。MG-1P 的飞行电池原来固定于药箱上方的一个凹槽里面, 采用固定支架取代药箱的位置后, 需要在固定支架的上面设计一个相对应的凹槽来存放和固定飞行电池。固定支架内部需要根据信标机和喇叭特点设计存放安装部件, 且要便于拆装。

鉴于上述两点关键要求, 在不破坏不更改 MG-1P 植保无人机起落架的前提下, 设计了集安装无人机飞行电池、信标机、标校喇叭于一体的固定支架。固定支架的设计示意图如图 2 所示。

按照图 2 所示的设计效果图加工出来的固定支架实物如图 3 所示。固定支架重量小于 2 kg, 与药箱和药泵的总重量相等, 设计实现的固定支架没有减少无人机的有效载重。固定支架上方有一个深度为 3 cm 的凹槽, 用于安放飞行电池, 凹槽的四周焊接了四个螺丝, 方便固定飞行电池。固定支架底部及右侧为网状结构, 方便安装固定信标机、喇叭以及根据实际安装情况调整重心。其中, 安装喇叭的右侧面网格中间开孔, 便于从喇叭发射出来的信号向自由空间传播而不被金属网格所屏蔽。

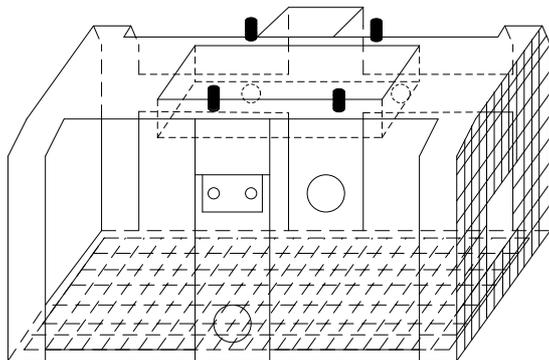


图 2 固定支架设计效果图

Fig. 2 Design drawing of battery and beacon transmitter's mounting frame

将固定支架取代 MG-1P 植保机药箱, 安装实际情况如图 4 所示。从图中可以看出, 所设计的固定支架能够完全取代药箱, 并达到安装飞行电池、信标机以及喇叭的目的。

4.3 小型 Ka 信标机的设计与实现

由于小型信标机将搭载于无人机上, 因此, 要求该小型信标机的设计有以下三个关键要求: 一是重量轻。因为一般多旋翼无人机的载重能力普遍较低, 普通商用多旋翼无人机的标准载重为 3 kg, 且搭载的载荷越大, 相同的供电条件下, 无人机的续航悬停时间越短。二是需要自带电源, 且更换电池方便。若采用无人机自带电池对信标机供电的话, 将会增加复杂的供电电路结构, 大大增加无人机的冗余载荷, 缩短无人机的续航时间。三是信标机外形结构要方便安装。由于信标机要搭载于无人机上, 因此要有与无人机能够相互匹



图 3 固定支架及信标机、喇叭安装实物图

Fig. 3 Beacon transmitter and horn that fixed on the mounting frame



图 4 固定支架上机安装实物图

Fig. 4 Mounting frame which is fixed on the multi-rotor UAV

配、方便安装的外形结构。经过多种方案的对比，采用如图 5 中的结构措施，较成功地解决了以上关键技术。

如图 5 中所示，将 Ka 信标机、拨码开关、放大器等电路板元器件全部平铺在一个密封防雨外壳里，外壳尺寸为：220 mm×120 mm×70 mm。单独设计了一个电池盒，内装 1.5 V 干电池 12 节，将电池盒至于上述元器件上层，并用四个螺丝与外壳固定好，便于快速拆卸电池。外壳底部四周设计了四个螺栓孔座连接结构，方便后续将信标机与多旋翼无人机结构件连接。拨码开关和连接信标机天线的 SMA 接口座分别置于信标机外壳的两端。该小型 Ka 信标机外观简单整齐、结构合理、设备总质量（包含标校喇叭和连接线缆）为 1.7 kg，重量较轻、便于手持和安装，满足设计要求。该小型 Ka 信标机外观及其与参考物（综合测控设备配发的信标机）的对比关系如图 6 所示。

以 28 GHz 频点为例，将信标机与频谱仪用电缆直接连接，去除标校喇叭 16 dB 增益作用，增加线缆的衰减作用，测得的信标机 28 GHz 在信号如图 7 中左图所示。将该信标机连接好标校喇叭后，置于离综合测控设备天线大约 1 km 左右的地方（天线仰角为 1.5°），经过某机动 Ka 频段综合测控设备接收链路下变频至 70 MHz 中频信号后，接收到的信号频谱如图 7 中右图所示。从图 7 可以看出，信标机发出的信号较强，其相噪性能、频偏特性均能满足某机动 Ka 频段综合测控设备角度相位标校的需求。

4.4 无人机相位标校的应用

信标机开机条件下，将搭载信标机的 MG-1P 植保无人机飞行至在符合标校距离高度要求的位置，标校喇叭对准综合测控设备天线，实际标校情况如图 8 所示。

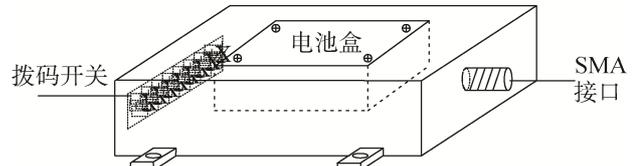


图 5 小型 Ka 信标机结构方案
Fig. 5 Design drawing of a Ka-band beacon transmitter



图 6 两种 Ka 信标机及外观对比图
Fig. 6 Comparison between two kinds of Ka-band beacon transmitter

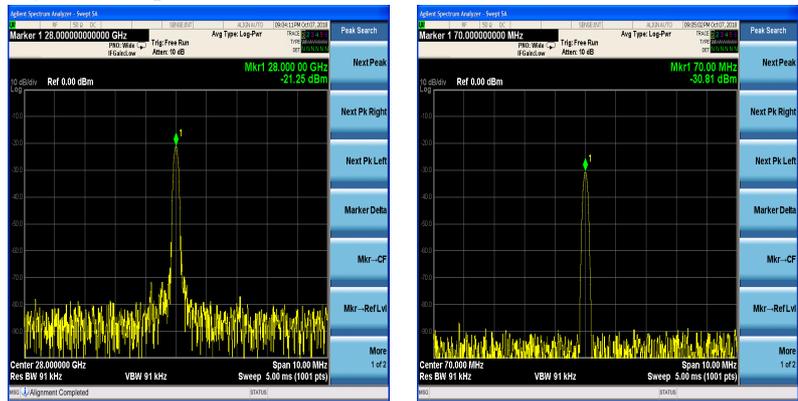


图 7 信标机信号频谱
Fig. 7 Radio signal spectrum of the designed small size Ka-band beacon transmitter



图 8 无人机标校应用实况
Fig. 8 Practical application of multi-botor UAV in the phase position calibration work

经过标校测试, 无人机飞行至距离综合测控设备天线 1 000 m、距离地面高度 25 m 的位置, 并保持悬停。无人机搭载的某小型化信标机发出的单音信号满足综合测控设备相位标校要求, 使用无人机进行相位标校后, 综合测控设备能够稳定跟踪无人机。使用该小型化信标机进行角度相位标校的结果, 与使用综合测控设备配发的远场标校单元标校结果对比情况见表 2。

表 2 两种信标机相位标校结果对比

Table 2 Comparison between two phase position calibration work results

	相位		斜率		交叉耦合			
	方位	俯仰	方位	俯仰	方位正偏	方位负偏	俯仰正偏	俯仰负偏
配发远场标校单元	86.1	266.1	337.1	337.7	1/50	3/49	3/33	2/32
无人机相位标校	81.6	261.6	315.3	315.3	3/50	2/48	1/30	2/28

分析某机动 Ka 频段综合测控设备历史相位标校结果可知, 相位零值的变动范围一般在 20° 以内, 斜率值的变化范围在 50 以内, 交叉耦合指标要求 $\leq 1/7$ 。从表 2 中可以看出, 使用无人机进行相位标校工作, 其标校结果的相位值、斜率值、交叉耦合值变化范围均在综合测控设备历史数据变动范围之内, 满足综合测控设备自跟踪要求。

5 结 论

本文在完成某小型化信标机设计、无人机选型、固定支架设计实现的前提条件下, 将该小型信标机及喇叭搭载在 MG-1P 植保无人机上, 应用到某综合测控设备相位标校工作中。经过检验, 能够实现某综合测控设备相位标校工作, 同时能够检验该综合测控设备的动态跟踪性能。

目前, 无人机相位标校项目在我单位多台 Ka 频段综合测控设备上已经得到应用, 有效解决了传统相位标校工作场地要求高、准备时间长、需要参与人员多等诸多不利因素的影响, 具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 赵业福. 无线电跟踪测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 10–20.
- [2] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 1–30.
- [3] 毛南平, 从波, 段庆光, 等. 近场效应对一种 C 频段统一测控雷达角度标校数据的影响分析[J]. 电讯技术, 2008, 48(4): 65–68.
MAO Nanping, CONG Bo, DUAN Qingguang, et al. Analysis of near field effect on the angle calibration data of a C band unified TT&C radar[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(4): 65–68.
- [4] 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.
- [5] 岳基隆, 张庆杰, 朱华勇. 微小型四旋翼无人机研究进展及关键技术浅析[J]. 电光与控制, 2010, 17(10): 46–51.
YUE Jilong, ZHANG Qingjie, ZHU Huayong. Research progress and key technologies of micro quad-rotor UAVs[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(10): 46–51.
- [6] 祁圣君, 张立丰. 美国军用无人系统综述[J]. 飞航导弹, 2015(7): 21–24.
- [7] 代君, 管宇峰, 任淑红. 多旋翼无人机研究现状与发展趋势探讨[J]. 赤峰学院学报, 2016, 32(8): 22–24.
- [8] 宋子豪. 多旋翼无人机 LPV 飞行控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
SONG Zihao. LPV flight control of multi-rotor UAV[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] 郭剑东. 无人倾转旋翼机飞行控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
GUO Jiandong. Flight control of unmanned tiltrotor aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [10] 习靖. 双通道角跟踪设备的近场相位校准研究[J]. 无线电工程, 2013, 43(5): 32–34.
XI Jing. Research on near-field phase calibration of double-channel angle tracking[J]. Radio Engineering[J]. 2013, 43(5): 32–34.

[作者简介]

- 李敏剑 1984 年生, 硕士, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。
王向伟 1986 年生, 本科, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。
刘佳伟 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要从事航天测控领域遥测遥控工作。