

冉峰,赵浩阳,叶飞,等.基于GNSS-RTK定位的无人机L波段探空系统标定方法[J].气象研究与应用,2024,45(2):45-49.
RAN Feng, ZHAO Haoyang, YE Fei, et al. Calibration method for L-band upper-air sounding system based on GNSS-RTK positioning of UAV[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2):45-49.

基于GNSS-RTK定位的无人机L波段探空系统标定方法

冉峰^{1,2}, 赵浩阳^{1,2}, 叶飞³, 沈俊佑⁴, 许海军^{1,2}

(1.长沙市气象局,长沙 410205; 2.长沙国家综合气象观测试验基地,长沙 410207; 3.中国气象局雷达气象中心长沙气象雷达标校中心,长沙 410207; 4.中国气象局气象干部培训学院湖南分院,长沙 410125)

摘要:随着我国北斗卫星导航探空观测系统升级换代工作逐步推进,降低L波段探空系统测风数据差异的需求尤为迫切。利用无人机GNSS-RTK定位信息研究新的标定方法,相较传统标定手段,避免人为因素干扰、极大的降低测量误差,新的标定方法更加科学有效,对保证测风数据的有效性,提高高空气象观测数据质量具有重要应用意义。

关键词:L波段探空系统;GNSS-RTK;北斗卫星导航探空观测系统;标定方法;无人机;网络RTK

中图分类号:P415.2 **文献标识码:**A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.2.07

高空探测是气象基础业务的重要组成部分,我国气象探空系统主要采用L波段二次测风雷达技术体制,利用雷达测距和测角信息计算高空风向风速^[1],与全球主流的GPS卫星导航技术体制相比,其测风动态准确性相差较大^[2-3],基于我国北斗卫星定位导航系统的逐步完善及进一步缩小与国际先进高空探测技术差距的迫切需求,我国规划将于2025年完成全国L波段探空系统向北斗卫星导航探空系统的升级换代工作^[4],研究表明L波段探空系统与北斗卫星导航探空系统两个体制的测风数据由于探测原理不同存在一定差异^[5],但现阶段能够有效减小其差异的手段有限,主要是通过滑动平均对测风数据进行平滑处理,但其并未从根本上减小观测误差且可能造成观测数据失真^[6-9]。L波段探空雷达系统标定是确保测风资料的可靠性的重要手段,定期进行标定是L波段探空雷达架设、运行维护和系统检测中必不可少的^[10-11],现阶段日常工作中,雷达标定任务流程复杂繁琐,工作量大且标定效果过度依赖机务人员自身经验,不可避免产生人为误差,标定结果缺乏有效的检验手段进行验证^[12-16],因

标定误差放大产生的测风误差会对测风数据的可靠性造成影响。

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)与北斗卫星导航系统在定位原理与精度上有着良好的一致性^[17-18],实时动态载波相位差分定位(Real Time Kinematic, RTK)为其代表性技术,利用定位误差在空间与时间上的相关性将其消除,极大的提高卫星导航系统的定位精度,无人机网络RTK为第三代卫星导航定位技术,其定位精度可以达到厘米级^[19-20],目前国内尚未有公开文献开展利用无人机进行L波段探空系统标定的相关研究,采用无人机GNSS-RTK定位标定方法能够大量节省人力物力,标定过程能够极大避免天气及人为因素影响,在过渡升级到北斗卫星导航探空系统过程中,标定后的L波段雷达能够有效消除传统标定方法的标定误差,对于保证测风数据的有效性,提高高空气象观测数据质量具有重要的应用意义。

1 标定方法研究

L波段雷达工作是由跟踪探空仪得到其空间坐

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 长沙市气象学会2021年科研项目(2021-02)

第一作者: 冉峰(1985-),工程师,主要从事仪器试验考核、综合气象观测及设备维护保障工作。E-mail:47696648@qq.com

标(方位、仰角、斜距)进行计算实现测风功能,其位势高度是通过地球曲率订正后的三角函数计算再进行大气折射修正、测距误差修正得到^[21]。

1.1 传统标定方法

日常雷达水平传统标定工作主要是依靠雷达天线主轴上相互垂直的两个水准器配合底座三个千斤顶完成调整,如水准器安装不正确或松动还应先进行水准器校正,而水准器调节螺母容易锈蚀,造成水准器卡死从而影响雷达无法进行水平标定工作。

仰角标定因重锤法无垂直点面,标定过程繁琐复杂且标定结果不准确,日常传统标定手段主要是通过经纬仪观测雷达抛物面天线后衍架来标定 0° ,此方法必须在水平标定准确可靠完成后进行,容易因人工观测产生误差,且只能进行 0° 的标定,随着仰角增加由于齿轮间隙等因素也会产生误差。无人机定位标定方法可不依靠水准器对水平及仰角同时进行标定,且可同时在各方位对不同仰角进行标定及标定效果验证。

方位角传统标定手段一般采取经纬仪法或北极星法进行。经纬仪法利用指南针标定的经纬仪与雷达互瞄的相对角度计算角度差完成方位角 0° 标定;北极星法是在晴朗少云的夜间对照北极星方位进行 0° 标定。这两种方法都需要经过地磁偏角或北极星位置进行修正且对时间及天气情况要求较高。无人机方位标定可与水平及仰角标定同时进行,不受天气及人工操作误差影响,同时也能在不同方位进行标定效果验证。

测距就是测量探空仪回答信号对主波的延时,而时间的测量又可转化为对具有一定重复频率的脉冲的计数来求得。显然,脉冲周期的长短直接影响测距的准确度,周期越短,测距准确度就越高,反之则越低。L波段雷达系统中计数脉冲的频率为37.477MHz,这样每个脉冲代表的距离就是4 m,即测距量化误差为4 m,无人机网络RTK定位精度达到厘米级,完全满足距离标定精度要求。雷达设置两个发射机,虽然归属一个分系统,但在电路形式器件选择,甚至是结构安装上都有很大的差异,因而两个发射机对同一个探空仪的测距值就会有很大差别(相对主波的延时不一样),因此测距的标定必须根据两个发射机分别进行。传统距离标定手段采用在200 m距离处及450 m外放置回答器的方式分别对大小发射机做单点距离标定,此方法受

地形地物影响较大,标定距离难以测量,不易找到合适放置点位,放置过程费时费力(即使放置在450 m外,因地物回波影响大发射机标定也难以看清示波器回波信号),也易因难以实测标定距离而产生较大误差。无人机定位标定可在各个距离范围进行精确测距标定,不受地物及空间距离等限制,能够极大减小传统标定方法测距误差造成的雷达高差及测风误差。

光、电轴一致性标校通过雷达瞄准镜观测回答器与十字线相对位置及示波器四根亮线,实时调整和差箱内调相器和差环腔体长度,使其达到小于1.67个密位(小于 0.1°)进行标定。通常一般采用正点观测施放气球或气球系留法实施,但正点观测法标定过程中雷达方位仰角快速移动不易操作,且放球后气球高度不断上升,标定时间窗口较短难以实施,还易影响观测质量。系留气球法需在静风白天进行,为达到标定精度要求回答器需置于仰角大于 15° ,斜距大于500 m位置进行标校,即充灌气球至水平距离482 m外使用129 m以上系留绳放置回答器,此法对天气情况要求极高,费时费力难以实施且有一定安全风险。无人机定位标定可方便快捷的携带回答器悬停在远距离固定位置进行精确标定,不受天气等因素影响,且能极大降低传统标定过程中的人力物力成本。

1.2 无人机标定方法

L波段无人机辅助标定工作主要进行水平标定、仰角标定、方位角标定、大小发射机距离标定及光电轴一致性标定等。无人机标定过程由于高度和控制范围限制一般在方圆5 000 m及相对高度500 m范围内进行实施,此高度及范围内地球曲率及大气折射等订正误差影响可以忽略不计,且3 000 m高度以下位势高度与几何高度一致,所以方位、仰角及斜距的标定可以在平面直角坐标系下直接进行计算,标定过程回答器直接固定在无人机机身,高度可直接调用无人机高度数据,方位标定进行四方位标定:其同经度位置为 0° 、 180° 方位,同纬度位置为 90° 、 270° 方位;仰角 E 、斜距 r 分别可简化由下式求得:

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{h_{\text{回}} - h_{\text{雷}}}{D} \right) \quad (1)$$

$$r = \frac{h_{\text{回}} - h_{\text{雷}}}{\sin E} \quad (2)$$

其中: $h_{\text{回}}$ 为回答器即无人机飞行几何高度, $h_{\text{雷}}$ 为雷达中心到测站地面高度差。

2 标定实施

2.1 无人机主要性能指标

标定无人机采用大疆经纬 M300RTK 平台, 机重 6.3 kg, 最大负载 2.7 kg, 最大起飞重量 9 kg, 限飞高度 500 m, 最大飞行速度 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 无负载最大续航时间 55 min, 最大抗风性能 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 网络 RTK 位置精度水平 $1\text{cm}+1\text{ppm}$, 垂直 $1.5\text{cm}+1\text{ppm}$, RTK 模式下悬停精度垂直 $\pm 0.1\text{m}$, 水平 $\pm 0.1\text{m}$, 最大通信距离 FCC 模式下为 15 km, CE 模式 8 km^[22], 参数满足标定需求。

2.2 标定过程

为简化标定流程, 利用无人机可将水平标定、仰角标定、方位角标定、大小发射机距离标定及光电轴一致性标定集中同时进行, 实施过程主要以测站雷达为中心向 0° 、 90° 、 180° 、 270° 四个方位进行标定。为保证无人机控制距离及仰角高度, 每个方位分别选取 500 m、1 000 m、1 500 m、2 000 m 四个距离点位, 以无人机最大限飞高度 500 m 进行航点设置 (图 1)。由于无人机起飞点无法以雷达为中心, 起飞点选择在雷达正西 10 m 处, 90° 及 270° 两个方位标定的水平距离应相应 $\pm 10 \text{ m}$ 修正, 起飞点地面距雷达中心高度差为 3 m, 飞行高度修正为 -3 m, 斜距及仰角计算时进行相应订正, 无人机网络 RTK 定位搜星良好时 (38 ~ 42 颗) 自动执行航线。

方位角、仰角、距离标定前先要进行光轴、机械轴与电轴一致性标定。光轴是指瞄准镜在正常工作位置时, 其物镜中十字线交点所对方向的射线; 机械轴是指天线中心 (方位轴、仰角轴的交点) 向天线所指方向的射线; 电轴是指四个波瓣交点所指方向的射线。此项标定是为了使雷达三轴都能准确对准跟踪目标应答器, 分为两步进行: 首先检查光轴和机械轴一致性即调整瞄准镜校正光轴与仰角轴垂直, 校正仰角 0° 时光轴与海平面平行, 此步骤为采取传统标定手段; 第二步为检查光轴与电轴的一致性, 用无人机携带应答器飞至最大飞行距离 ($\geq 3 \text{ km}$), 开启雷达自动跟踪, 由于无人机悬停相对对气球更加稳定, 待示波器四根亮线稳定两两对齐, 观

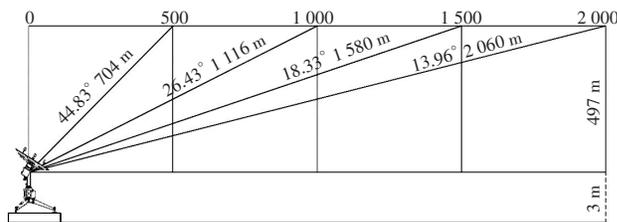


图 1 GNSS-RTK 无人机 L 波段雷达标定点位示意图

察无人机在雷达瞄准镜中位置, 如与瞄准镜十字线相差小于 1.67 个密位 (小于 0.1°), 则无需进行调整。如相差较大, 可关闭雷达自动跟踪, 手动微调雷达至无人机与雷达瞄准镜十字线重合, 此时示波器亮线应不齐, 调整和差箱内调相器长短使四根亮线齐平, 再开启雷达自动跟踪, 此时雷达瞄准镜十字线应与无人机重合, 完成光轴、电轴一致性标定。

方位角、仰角、距离的标定首先进行四方位其中一个方位的标定流程, 选定与雷达底座三个千斤顶其中两个连线大致平行的方位为第一标定方位, 如图 1 所示, 无人机飞至与雷达中心同纬度或经度第一标定方位水平距离 500 m 标定点, 为避免雷达自动跟踪抖动调至手动模式控制雷达至瞄准镜十字线与无人机重合, 此点目标应答器仰角为 44.83° , 斜距 704.99 m, 高度 497 m, 分别进行仰角及小发射机距离标定。仰角调整雷达中心与标定点连线平行的两个千斤顶其中一个至雷达仰角合格, 此时可调整平行水准器气泡至两横线中央。雷达调至小发射机状态, 手动调整斜距至 704 m, 根据示波器回波显示拨动测距板 11-3 上 S1 近程发射机距离标定拨盘开关, “1”号位为低位, “8”号位为高位, 其调整值分别为 4、8、16、32..., 当开关向 “ON” 调整时, 距离显示值减小, 反之则增大, 使示波器回波至 2 km 扫描线上两暗点之间, 再切换至自动测距模式, 观察面板显示距离值是否正确显示在 704 m 范围左右, 结束此方位小发射机距离标定。由于不同应答器有一定的延时差异, 可在四个方位装载不同应答器进行标定取平均值以减小仪器个体误差对标定效果造成影响。完成 500 m 标定点标定工作后, 无人机飞至 1 000 m 标定点, 以此标定点数据继续进行仰角及小发射机标定, 如 500 m 距离标定正确通常情况下一般无需进行调整。1 500 m、2 000 m 两个远距标定点主要进行方位及大发射机的标定及验证, 大发射机标定流程与小发射机相同, 距离标定拨盘开关为 S2。之后选定与第一标定方位相邻 90° 方位为第二标定方位进行标定调整, 此方位水平标定前先将垂直方位水准器气泡调至两横线中央再进行, 水平标定完成后需保持垂直方位水准器气泡不变, 可通过观察水准器及经纬仪观测雷达天线后衍架验证水平及仰角标定效果, 再通过两个标定方位进行标定效果的验证, 至此 L 波段雷达水平标定工作完成, 首次标定应进行完整四方位飞行标

定,后续日常标定维护工作可简化进行两方位标定。

3 结论

无人机 GNSS-RTK 定位信息辅助 L 波段雷达标校对传统标校工作进行简化及改进,结合无人机自身优势研究一些新的标定方法,方位、仰角、距离的标定可以同时进行,几乎完全不受地形地物影响,用于标定的回答器可以方便快速的精确布置到任何位置。相较传统标校手段,避免人为因素干扰,减少时间及天气因素制约,节约人力物力,提高标定效率,极大的降低测量误差,并可在标定的同时对标定结果进行科学有效的检验,经 GNSS-RTK 无人机定位标定的 L 波段探空系统能够有效消除传统标定方法的标定误差,对于研究缩小与北斗卫星导航探空系统的测风误差有着积极意义。

参考文献:

- [1] 中国气象局. 常规高空气象观测业务规范[M]. 北京:气象出版社, 2010:1-58.
- [2] 李伟, 张玉存. GFE(L)1 型二次雷达测风性能评估[J]. 成都信息工程学院学报, 2011, 26(1):91-97.
- [3] 王冬玫, 张小兵, 王志文, 等. 芬兰 GPS 探空仪与中国 L 波段探空仪试验数据对比分析[C]//仪表, 自动化及先进集成技术大会论文集(二). 重庆:中国仪器仪表学会, 2007.
- [4] 气象探空业务系统升级换代工作方案(2023-2025年)[Z]. 北京:中国气象局, 2023.
- [5] 罗雄光, 梁国锋, 杨超, 等. L 波段雷达系统不同测风方法计算结果分析[J]. 气象科技, 2015, 43(6):1025-1029.
- [6] 姚雯, 马颖, 黄炳勋, 等. 利用 GPS 定位资料分析 L 波段雷达测风性能[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2):195-202.
- [7] 梁建平, 李宇中, 黎洁波, 等. L 波段高空气象探测系统测风算法改进探讨[J]. 气象科技, 2014, 42(5):753-758.
- [8] 王缅, 李伟, 陈永清, 等. L 波段探空系统高空风平滑计算方法探讨[J]. 气象, 2011, 37(1):85-91.
- [9] 李宛桐, 姜明, 史静, 等. 基于地心坐标系的卫星导航测风平滑算法[J]. 气象科技, 2022, 50(2):171-178.
- [10] 吴月友. GFE(L)1 型二次测风雷达故障及维修[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(1):235-237.
- [11] 崔炳俭, 陈德生, 王全周, 等. L 波段测风雷达的选址、天线架设及标定[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(增刊):242-245.
- [12] 奉超. L 波段雷达标定及误差分析[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(增刊3):4-5.
- [13] 许正旭, 宁新红. 二次测风雷达现场校验及精度分析探讨[J]. 青海气象, 2004, (2):43-47.
- [14] 郝志毅, 张立功, 巴秀天, 等. 用北极星标定雷达及经纬仪方位的方法[J]. 干旱气象, 2002, 20(1):42-42.
- [15] 安克武, 刘涛, 于晓, 等. L 波段气象探空雷达角度自动跟踪系统故障分析[J]. 现代雷达, 2012, 34(1):14-19.
- [16] 叶飞, 肖萌, 银莲, 等. 利用太阳法自动标定 L 波段探空雷达天线指向[J]. 气象科技, 2018, 46(3):450-454.
- [17] 张恩红, 曹云昌, 朱彬, 等. 北斗探空系统研发及其测风性能初步分析[J]. 应用气象学报, 2013, 24(4):464-471.
- [18] 张丰兆, 刘瑞华, 倪育德, 等. 北斗卫星导航系统动态定位精度测试与分析[J]. 全球定位系统, 2018, 43(1):43-48.
- [19] 国家测绘局. 全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范:CH/T 2009-2010[S]. 2010.
- [20] 宋伟, 毛威, 张益泽, 等. GNSS RTK 定位技术的发展历程和机遇[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(3):294-305.
- [21] 中国气象局. 常规高空气象观测业务手册[M]. 北京:气象出版社, 2012:1-298.
- [22] M300 RTK User Manual CHS v4.0[Z]. 深圳:大疆创新, 2023.

Calibration method for L-band upper-air sounding system based on GNSS-RTK positioning of UAV

RAN Feng^{1,2}, ZHAO Haoyang^{1,2}, YE Fei³, SHEN Junyou⁴, XU Haijun^{1,2}

(1. Changsha Meteorological Bureau, Changsha 410205, China; 2. Changsha National Comprehensive Meteorological Observation Test Base, Changsha 410207, China; 3. Changsha Meteorological Radar Calibration Center of CMA Radar Meteorological Center, Changsha 410207, China; 4. Hunan Branch of CMA Training Center, Changsha 410125, China)

Abstract: With the gradual promotion of the upgrading of the Beidou satellite navigation sounding observation system in China, it is particularly urgent to reduce the discrepancy of wind measurement data of the L-band upper-air sounding system. This paper innovatively uses the UAV GNSS-RTK positioning information to study the new calibration methods, compared with the traditional calibration methods, to avoid the interference of human factors, to greatly reduce the measurement error, and to calibrate more scientifically and effectively, and to improve the quality of high-altitude meteorological observation data, which are of great practical significance of application.

Key words: L-band upper-air sounding system; GNSS-RTK; Beidou satellite navigation sounding observation system; calibration method; unmanned aircraft; network RTK