

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508491

# 基于无人机悬吊金属球的天气雷达远场绝对标校方法及跨库偏差分析\*

叶  飞<sup>1,2</sup>  朱长安<sup>1</sup>  曹家璇<sup>1</sup>  尹家智<sup>1</sup>  王箫鹏<sup>3</sup>  杨  倩<sup>1</sup>  黄泽昊<sup>1</sup>  银  莲<sup>4</sup>  杨语迪<sup>5</sup>

(1. 长沙气象雷达标校中心  长沙  410207; 2. 中国气象局雷达气象中心  北京  100811;  
3. 中国气象局气象探测中心  北京  100811; 4. 长沙市气象局  长沙  410207;  
5. 安徽省大气探测技术保障中心  合肥  230031)

**摘  要:**针对天气雷达金属球标校过程中“球体稳定度量化不足、找球流程缺乏体系化参数约束、以及跨库机理与偏差放大规律不清”等关键问题,提出一种基于“无人机+激光测距相机+标准金属球”的天气雷达远场绝对标校方案。首先构建最大水平位移约束的稳定度指标( $S \geq 97\%$ ),获得金属球最佳标校位置;其次,设计基于“十字扫描”找球流程,实现金属球在天线主瓣及距离库中心的快速、精确对准;最后以长沙气象雷达标校中心 S 波段双偏振参考雷达(Z9740)为测试对象,结果表明,金属球处于距离库中心时,反射率因子( $Z$ )和差分反射率( $Z_{DR}$ )与理论值平均偏差仅 $-0.28$ 和 $0.16$  dB,波束宽度、天线增益、脉冲宽度反演偏差分别为 $0.01^\circ$ 、 $0.14$  dB 和 $-0.11$   $\mu$ s;若出现跨库, $Z$ 与 $Z_{DR}$ 偏差增至 $-4.03$ 和 $0.45$  dB,波束宽度、增益及脉冲宽度误差增大至 $0.06^\circ$ 、 $-0.17$  dB、 $0.56$   $\mu$ s。通过对比试验,阐明了“脉冲-窗重叠”是能量分拆与偏差增大的根源,并给出位置动态调控与脉冲加窗等改进建议。该方法可将天气雷达 $Z$ 和 $Z_{DR}$ 绝对标校精度分别提升至 $0.5$ 和 $0.2$  dB 以内,可为全国天气雷达组网一致性评估提供绝对验证手段。

**关键词:** 天气雷达;金属球标校;十字扫描;跨库偏差;绝对定标

**中图分类号:** TN959.4;P412.25      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 170.1520

## UAV-suspended metal sphere based far-field absolute calibration method for weather radar and analysis of range-bin crossing bias

Ye Fei<sup>1,2</sup>  Zhu Changan<sup>1</sup>  Cao Jiaxuan<sup>1</sup>  Yin Jiazhi<sup>1</sup>  Wang Xiaopeng<sup>3</sup>  
Yang Qian<sup>1</sup>  Huang Zehao<sup>1</sup>  Yin Lian<sup>4</sup>  Yang Yudi<sup>5</sup>

(1. Changsha Meteorological Radar Calibration Center, Changsha 410207, China; 2. CMA Radar Meteorological Centre, Beijing 100811, China; 3. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100811, China; 4. Changsha Meteorological Bureau, Changsha 410207, China; 5. Anhui Atmospheric Observation Technology Support Center, Hefei 230031, China)

**Abstract:** This paper addresses key issues such as “insufficient quantification of ball stability in metal sphere systems, lack of systematic parameter constraints in ball search processes, unclear mechanisms of range-bin crossing and deviation amplification patterns.” Proposes an absolute far-field calibration scheme for weather radar that combines an equipped UAV, a laser-range-finding camera and a standard metal sphere. First, a stability metric constrained by a maximum horizontal displacement ( $S \geq 97\%$ ) is defined to determine the sphere’s optimal calibration position. Next, an “cross-scan” procedure is devised to locate the sphere rapidly and precisely at the antenna main-beam center and the midpoint of the chosen range bin. Finally, using the S-band dual-polarization reference radar (Z9740) at the Changsha Weather-Radar Calibration Center as a test case, results show that when the sphere is centered in the range bin, the mean deviations of reflectivity ( $Z$ ) and differential reflectivity ( $Z_{DR}$ ) from their theoretical values are only  $-0.2$  and  $0.16$  dB, the retrieved beamwidth, antenna gain and pulse width differ by just  $0.01^\circ$ ,  $0.14$  dB and  $-0.11$   $\mu$ s. If the sphere straddles adjacent range bins, the  $Z$  and  $Z_{DR}$  errors enlarge to  $-4.03$  and  $0.45$  dB, and the beamwidth, gain and pulse-width errors increase to  $0.06^\circ$ ,  $-0.17$  dB,  $0.56$   $\mu$ s.

收稿日期:2025-06-23      Received Date: 2025-06-23

\* 基金项目:国家自然科学基金项目课题(42405141)、中国气象局“天气雷达标校技术”青年创新团队(CMA2024QN12)、中国气象局大气探测重点实验室项目(2023KLAS11M)、中国气象局智能气象观测技术重点开放实验室(ZNGC2024QN03)项目资助

-0.17 dB and 0.56  $\mu$ s. Comparative tests reveal that “pulse-window overlap” is the root cause of energy splitting and bias growth, and improvement measures such as dynamic position control and pulse windowing are recommended. The approach can tighten absolute calibration accuracy of Z and  $Z_{DR}$  to within 0.5 and 0.2 dB, providing an absolute validation method for nationwide radar-network consistency assessments.

**Keywords:** weather radar; metal sphere calibration; cross-scan; range-bin crossing bias; absolute calibration

## 0 引言

随着天气雷达定量探测技术的快速发展,高精度雷达参数标校已成为提升气象观测质量的核心环节<sup>[1-3]</sup>。国内外学者一直在探索利用标准目标对天气雷达进行“端到端”绝对校准的方法<sup>[4-6]</sup>。此外,传感器标定优化算法也在持续发展,如吴军等<sup>[7]</sup>(2023 年)提出的自适应背景聚类的激光雷达与相机外参标定方法,为复杂环境下的系统校准提供了参考。金属球作为具有稳定散射特性的理想校准体,其雷达散射截面可精确计算,为实现雷达系统参数的绝对校准提供了重要手段。早期研究曾利用系留气球或探空气球悬挂金属球,以实现天气雷达的初步标校。近年来,利用无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)悬挂金属球的外场标校方案逐渐发展成为主要方向。Yin 等<sup>[8]</sup>对荷兰 TARA 雷达采用金属球进行校准试验,量化了天线模式对雷达常数计算的影响、定义了天线常数,计算得到的雷达常数标准差小于 1 dB;Joshi 等<sup>[9]</sup>使用无人机平台悬挂金属球对双频双极化 D3R 雷达进行多次校准实验,最终实现了反射率因子偏差在 1 dB 以内的校准效果。我国近年来也开始重视外场绝对定标技术,中国气象局在汛前对新一代天气雷达开展年度外场校准时,逐步引入金属球方法,以提高各雷达间反射率的一致性<sup>[10]</sup>。中国长沙建立了天气雷达校准试验基地,Ye 等<sup>[11]</sup>利用高精度无人机和标准金属球,周期性开展天气雷达定量标校,反射率因子(reflectivity, Z)和差分反射率因子(differential reflectivity,  $Z_{DR}$ )的定量标校误差可控制在 0.5 和 0.2 dB 以内。总体来看,近 10 年来国内外在金属球校准技术上取得了长足进展:从早期的气球悬挂到如今的无人机精确定位,从单参数的反射率定标扩展到多参数联合校准。金属球校准已成功应用于 S、C、X、Ku、Ka 等频段雷达,包括机械扫描雷达和相控阵雷达,逐步形成了一套成熟的技术方法和应用经验<sup>[12-15]</sup>。这些研究进展为在实际业务中利用金属球校准雷达天线及产品参数提供了重要参考。

尽管金属球外场标校取得了显著进展,但实际应用中仍存在多项挑战:1)金属球受大气湍流及飞行惯性影响造成的姿态稳定性未被有效量化;2)对动态标校场景下“十字扫描”法的找球流程和参数配置缺乏深入研究;3)金属球不在雷达径向距离库的中心位置(跨库)带来

的雷达参数反演偏差尚未明晰。

本文研究创新性主要体现在以下 3 个方面:1)构建包含最大水平位移约束的金属球稳定度评价体系,获得金属球最佳校准位置;2)搭建天气雷达“十字扫描”全参数采集系统,同步分析观测数据的时空回波特征,给出天线波束宽度、天线增益、脉冲宽度、反射率因子及极化特性等雷达参数反演过程;3)分析金属球在雷达径向数据不同距离库及同一距离库上不同位置处所引起偏差,量化金属球跨库对雷达观测值的影响,深入剖析跨库偏差产生的主要原因,并提出相应改进建议。

## 1 原理与方法

### 1.1 基本原理

金属球标校属于外场绝对定标技术,通过将散射截面(radar cross section, RCS)可精确计算的标准金属球悬挂于天线远场主瓣轴线上,融合利用高精度实时动态差分定位(real-time kinematic, RTK)无人机和激光测距系统,动态调整球体位于雷达主波束及距离库中心,获得最大且稳定的回波信号,过程中需考虑天线指向误差、金属球摆动、金属球跨库及杂波干扰等偏差源。利用雷达方程计算理论回波功率,再与雷达实测回波比对,分析 Z、 $Z_{DR}$  等观测产品偏差是否分别达到了 0.5 和 0.2 dB 定量标校精度要求。并利用金属球回波数据反演雷达参数,最终实现波束性能、回波偏差等校准,确保雷达观测数据的一致性与定量精度。图 1 展示了无人机悬吊金属球标校原理,其中,雷达馈源高度为  $h_1$ ,测试点与雷达站直线距离为  $L_1$ ,金属球悬挂绳长度为  $L_2$ ,金属球与雷达天线的水平距离或斜距为  $R$ ,  $Bin-1$ 、 $Bin$ 、 $Bin+1$  分别代表了雷达径向上 3 个连续的距离库。

### 1.2 标校方法

#### 1) 实时获取金属球位置

本研究利用高精度 RTK 系统提供厘米级无人机平台定位,借助激光相机高频精准测距和图像检测,实现金属球的实时跟踪与定位,并在地面站软件上实时显示金属球三维位置轨迹,便于标校过程中实时、高效地动态调整金属球位置如图 2 所示。

#### 2) 建立金属球稳定度模型

在标校过程中,通常只在极小的角度与距离偏移范围内,才能近似认为金属球处于波束中心并应用标准雷

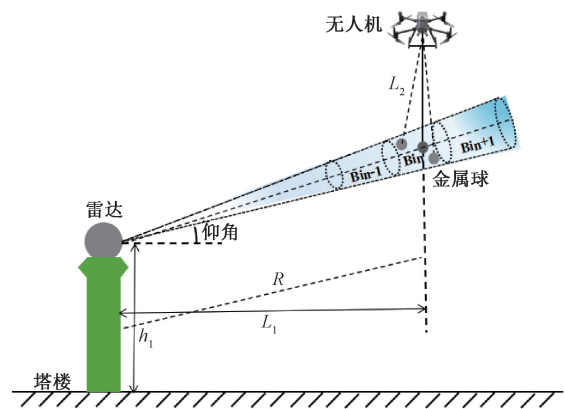


图 1 无人机悬吊金属球标校原理

Fig. 1 Metal sphere calibration based on UAV suspension



图 2 激光测距相机实时追踪金属球

Fig. 2 Real time tracking of metal sphere  
by laser ranging cameras

达方程。金属球在空中摆动时,无法保证其真实位置与假设的“波束中心”或“距离库中心”足够接近,会导致回波强度在每个距离库门或方位角采样点上出现抖动。这种抖动不仅会引入测量噪声,还会影响对雷达等效 RCS 和 Z 的精确反演,进而导致增益、波束宽度等参数反演出现系统误差。因此,必须建立金属球稳定度模型,筛除球体剧烈摆动的时段,优选摆动幅度最小、测量稳定的最佳校准位置,提高标校结果的准确性和可重复性。

(1) 核心参数定义

核心参数定义如表 1 所示。

表 1 核心参数定义

Table 1 Core parameter definition

| 参数     | 符号                         | 说明              |
|--------|----------------------------|-----------------|
| 无人机位置  | $\lambda_a, \theta_a, h_a$ | 无人机经度、纬度、海拔高度   |
| 金属球位置  | $\lambda_b, \theta_b, h_b$ | 金属球经度、纬度、海拔高度   |
| 固定绳长   | $L_2$                      | 无人机与金属球之间的悬吊绳长度 |
| 最大允许摆角 | $\theta_{max}$             | 系统预设角度(如 30°)   |

(2) 坐标转换与稳定度计算

①大地坐标系转东-北-天顶坐标系(east-north-up,

ENU)以无人机位置为原点,将金属球位置转换为东-北-天顶方向位移<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta E = R(\lambda_b - \lambda_a) \cos \theta_a \\ \Delta N = R(\theta_b - \theta_a) \\ \Delta U = h_b - h_a \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta E$  为东向位移;  $\Delta N$  为北向位移;  $\Delta U$  为天顶方向位移;  $R$  为地球半径。

②水平总位移计算

金属球相对于无人机的实时水平位移  $D$  为:

$$D = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta N)^2} \quad (2)$$

③水平总位移计算

根据绳长和最大允许摆角可得到最大允许位移  $D_{max} = L_2 \times \sin \theta_{max}$ , 此时,实时位移与最大允许位移的剩余空间为  $(D_{max} - D)$ , 由此可计算金属球稳定度  $S$  为:

$$S = \begin{cases} (1 - \frac{D}{D_{max}}) \times 100\%, & D \leq D_{max} \\ 0\%, & D > D_{max} \end{cases} \quad (3)$$

3) “十字扫描”法找球

结合合适的扫描参数(扫描范围、步进、停留时间等)与自动化脚本程序,可以在最短时间内完成对金属球回波信号的搜索与位置中心化,为后续的定量标校提供可靠的定位基础。具体找球步骤如下:

(1) 将球体稳定模型给出的最优金属球位置的 RTK 坐标,通过大地坐标→ENU 直角坐标系→方位( $Az$ )/俯仰( $El$ )变换,得到雷达可读的初始指向角( $Az_0, El_0$ );

(2) 下发该指向角至雷达控制单元,使天线先达到“理论最佳”位置;

(3) 先在俯仰方向做小范围高度扫描(range-height indicator, RHI),找出最佳俯仰角  $El_{peak}$ ;

(4) 再在方位方向做小范围平面扫描(plan position indicator, PPI),找出最佳方位角  $Az_{peak}$ ;

(5) 将理论与实测的偏差矢量用于精细对准,并多次重复以求平均,从而实现对金属球的精确“十字扫描”找球;

(6) 判断天线指向是否存在偏差、是否需要进行径向距离上位置调整,确保金属球在距离库中心区域;

(7) 最后执行定点扫描(fixed-point scanning, FIX),获取金属球稳定状态下、长时间序列观测数据。

通过多次飞行,重复测试,分析 Z、 $Z_{DR}$  及反演数据偏差,标校流程具体如图 3 所示。

1.3 天气雷达参数反演

1) 等效反射率因子

金属球作为标校目标具有已知的雷达反射特性,一般选取远大于雷达波长的金属球尺寸,在光学散射区进行标校,从而可以近似为理想的雷达反射目标。金属球

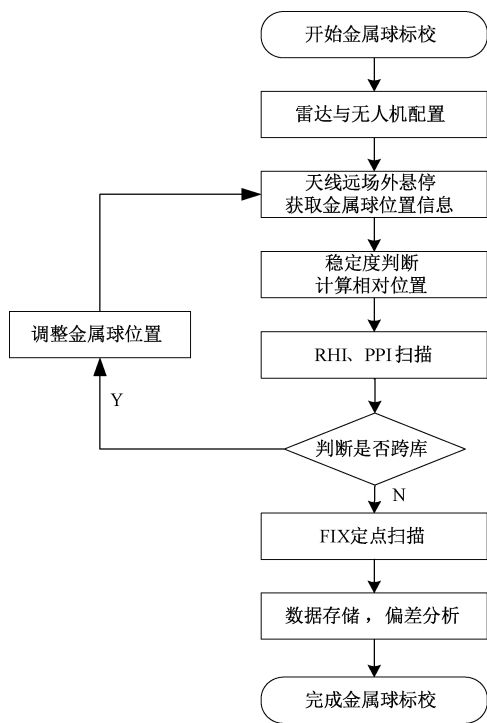


图3 金属球十字扫描标校流程

Fig. 3 Metal sphere cross-scan calibration procedure

的反射回波信号强度通常与目标的雷达截面和距离有关,抛物面天气雷达等效反射率因子计算方法如下:

天气雷达方程是建立在两个降水粒子特性的假设上的,一是粒子完全由介电球体组成;二是对于雷达波长而言粒子足够小时,可以使用瑞利散射理论解释散射特性。单位体积内全部粒子的雷达截面之和为雷达反射率( $\eta$ ),可表示为:

$$\eta = \frac{\pi^5 \times |k|^2}{\lambda^4} Z \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为雷达工作波长;  $Z$  为等效反射率因子,  $|k|^2 = |(m^2 - 1)/(m^2 + 2)|^2$ , 其中  $m$  为复折射指数, 在  $0^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$  粒子为水态、 $\lambda = 10\text{ cm}$  时,  $|k|^2 \approx 0.93$ 。

根据气象雷达有效照射深度和有效照射体积的定义,对于单位取样体积可以用以下公式进行计算:

$$V = \pi \left( \frac{\theta}{2} R \right) \left( \frac{\varphi}{2} R \right) \left( \frac{c\tau}{2} \right) = \frac{\pi R^2 \theta \varphi c \tau}{8} \quad (5)$$

式中:  $R$  为距离;  $\theta$  为水平波束宽度;  $\varphi$  为垂直波束宽度;  $\tau$  为脉冲宽度;  $c$  为光速。

在几何光学区,金属球可视作各向同性强散射体,其有效体积反射率  $\eta$  可用 RCS 与分辨率体积  $V$  之比近似替代,用以推导“点目标”等效反射率因子,该等效处理与天线/雷达方程的经典表述一致<sup>[17]</sup>,表示如下:

$$\eta = \frac{RCS}{V} \quad (6)$$

将上述方程联立,由此可得到基于后向散射截面计算金属球“点”目标等效反射率因子的天气雷达方程:

$$Z = \frac{2\ln 2 \times 8\lambda^4 \times RCS}{\theta \varphi \tau c \pi^6 |k|^2 R^2} \quad (7)$$

其中,  $2\ln 2$  为高斯型波束的天线增益修正值,雷达方程假定散射目标均匀充满体积元,而金属球是点目标,其仅受到波束中心附近高增益区域照射,有效体积相对于均匀填充假设略小,因此在计算等效反射率因子时需考虑非均匀充满校正。

## 2) 差分反射率

对于双偏振雷达,需校准水平和垂直极化双通道的一致性。理想情况下,标准金属球属于完全对称目标,其水平  $Z_H$  和垂直通道  $Z_V$  观测值应完全相等,即  $Z_{DR}$  理论值为  $0\text{ dB}$ 。因此,任何测得雷达观测金属球的  $Z_{DR}$  产生零偏时,都需要校准双通道系统偏差。 $Z_{DR}$  计算公式如下:

$$Z_{DR}(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{Z_H}{Z_V}\right) \quad (8)$$

## 3) 波束宽度、脉冲宽度

波束宽度决定了雷达的空间分辨率和波束填充效应<sup>[18]</sup>。实际波束宽度可能与设计值有偏差,例如波束变宽会导致回波信号被稀释,定量测量偏低,因此需要测量校准以确保雷达空间定位精度。由于金属球的雷达回波信号是稳定且可测的,只要确保金属球位于雷达天线的扫描区域内,沿着一定的方位角(水平波束宽度)或俯仰角(垂直波束宽度)扫描金属球,回波强度会随着天线波束位置的不同而变化,当雷达波束完全对准金属球时,回波强度最大,此时为主瓣方向。通过对金属球反射回波幅度随角度的变化进行反演,可获得雷达天线方向图,进而计算得到波束宽度、天线增益、第一副瓣、远端旁瓣等参数。

以弧度表示的天线半功率波束宽度通常可近似为:

$$\theta = \frac{k_a \lambda}{D} \quad (9)$$

式中:  $D$  表示天线的直径;  $K_a$  是根据天线的结构和效率而变化的系数,抛物面天线通常  $K_a = 1.22$ 。在单向发射或接收天线方向图中,波束宽度通常被定义为主瓣功率密度下降到峰值的  $1/2$  ( $-3\text{ dB}$ ) 时所对应的两条方向线之间的夹角。但金属球的回波经过了天线“发”和“收”的双向幅度调制,双程回波就意味着金属球波束宽度通常定义为在  $-6\text{ dB}$  衰减的地方。通过选取回波最强点位置处的角度和幅度数据,以  $\text{dB}$  为单位,进行二次抛物线的曲线拟合  $y = ax^2 + bx + c$ , 得出曲线的系数  $[abc]$ , 则峰值角度中心为  $-b/2a$ ,  $-6\text{ dB}$  波束宽度为  $2 \times \sqrt{-6/a}$ 。

本文通过金属球回波数据反演的天气雷达脉冲宽度同样也采用  $-6\text{ dB}$  来进行定义。从 RHI 或 PPI 扫描中选

取金属球回波最强的角度位置,提取该角度方向上及对应相邻前后距离库的回波功率数据,利用三点拟合抛物线方程,可以得到金属球回波峰值所在的位置处的最大幅度、距离中心以及距离上的宽度,即雷达脉冲宽度。

4) 天线增益

天线具备将射频功率集中向某一方向辐射的能力,增益越高表明天线把更多能量聚焦在主波束内。增益误差会导致雷达回波强度标定不准,从而影响定量降水估测等应用,可通过已知雷达截面的目标来校准增益<sup>[19]</sup>。抛物面天线的增益为:

$$G_0 = \frac{4\pi A_a e_a}{\lambda^2} \tag{10}$$

式中:  $A_a$  表示天线的物理区域;  $e_a$  表示天线孔径的效率,范围在 0~1 之间,抛物面天线的典型  $e_a$  值为 0.6~0.7。孔径的效率由天线的几何形状、照明区域以及反射器的表面形状和粗糙度决定。对于直径为  $D$  的圆形反射器天线,有效天线面积由式(11)给出。

$$A_e = e_a A_a = \frac{e_a \pi D^2}{4} \tag{11}$$

典型的抛物面反射器的正常视轴天线增益是被近似为 0.7<sup>[20]</sup>,则有:

$$G_0 \approx 0.7 \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \tag{12}$$

这些近似值结合起来,天线的增益与波束宽度有关:

$$G_0 \approx 10.3 \left( \frac{1}{\theta} \right)^2 \tag{13}$$

2 实验平台与数据源

2.1 试验区介绍

长沙气象雷达标校中心(CRCC)是中国唯一的雷达标校基地,建设了 314、126 和 348 等 3 大雷达标校阵地如图 4 所示。其中 314 阵地为主阵地,已建成编号 S1~S6 的 6 个雷达塔楼,分别架设 S/C/X 波段参考雷达和被标雷达,主要用于大型雷达标校,其中建设的 S 波段高精度双偏振参考雷达架设于 S1 塔楼;126 阵地建有 12 个塔楼,主要用于 X 波段(含相控阵)、风廓线、激光雷达标校;348 阵地建有一套由高性能信号发生器、频谱仪、射频放大器、高精度三维伺服转台和标准增益喇叭天线等组成的有源辐射标校系统,可对 314 阵地雷达多项天线参数进行测试标定。本文以 314 阵地架设的 S 波段参考天气雷达(Z9740)作为测试目标,开展金属球标校,雷达关键参数如表 2 所示。

在晴空条件下,对雷达 5 km 范围内体积扫描数据进行扫描,找到一个背景相对干净、地物杂波干扰相对较小的区域。为了确保无人机操作安全、增大无人机续航及

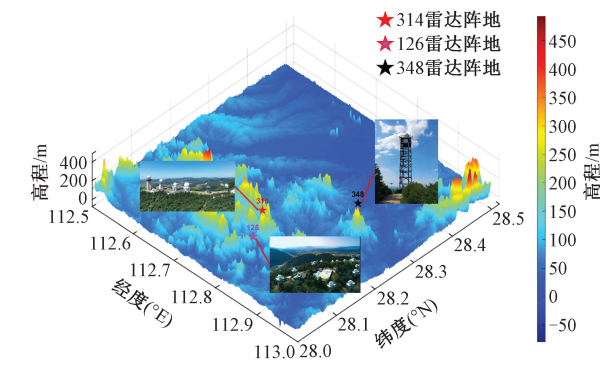


图4 314、126 和 348 雷达标校阵地  
Fig. 4 Radar calibration sites 314, 126, and 348

具备足够空旷区域方便收放金属球悬吊绳,选择了 Z9740 天线远场距离外的 126 阵地作为金属球标校区域。选定试验位置后,分析了 Z9740 体扫数据中各个仰角层信息,图 5 可以看出选定方向上 1.49°与 2.42°仰角层的红框区域背景回波强度基本均在 5 dB 以下,且 2.42°时红框区域有一片完全无背景杂波区域。鉴于远场条件和 500 m 高度空域限制,最终试验选择了雷达观测仰角 2.5°、方位 180°附近进行。

表 2 参考雷达 (Z9740) 关键参数

Table 2 Reference radar (Z9740) key parameters

| 参数名称       | 指标    |
|------------|-------|
| 工作波长/cm    | 10.54 |
| 发射机峰值功率/kW | 705   |
| 水平波束宽度/(°) | 0.91  |
| 垂直波束宽度/(°) | 0.86  |
| 天线增益/dB    | 45.53 |
| 脉冲宽度/μs    | 1.50  |

2.2 试验设备参数

试验采用高精度 RTK 无人机作为悬挂平台,安装高精度激光测距相机,下方悬挂标准金属球如图 6 所示。利用无人机系统飞行云平台,实现飞行器地面控制终端与云服务器进行通信,无人机起飞后,飞行系统实时数据以 2 s/次的频率自动通过遥控器推送至云服务器,标定系统通过云服务器接口获取无人机位置、高空风速、续航等在内的目标无人机数据和测距相机数据,测距相机获得的金属球位置数据,包括经度、纬度、海拔高度、测距距离等。主要设备参数如表 3 所示。

2.3 雷达“十字扫描”参数

建立基于 RHI-PPI-FIX 的金属球专用“十字扫描”模式:设置雷达扫描速度为 2.0°/s、PRF 在 1 000 Hz 以上,尽量增大采样个数,提高数据的可信度;采样距离限制在 10 km 以内、采样数据以两字节进行存储,提高数据传输效率和存储精度;另外,关闭所有滤波算法,避免雷达系

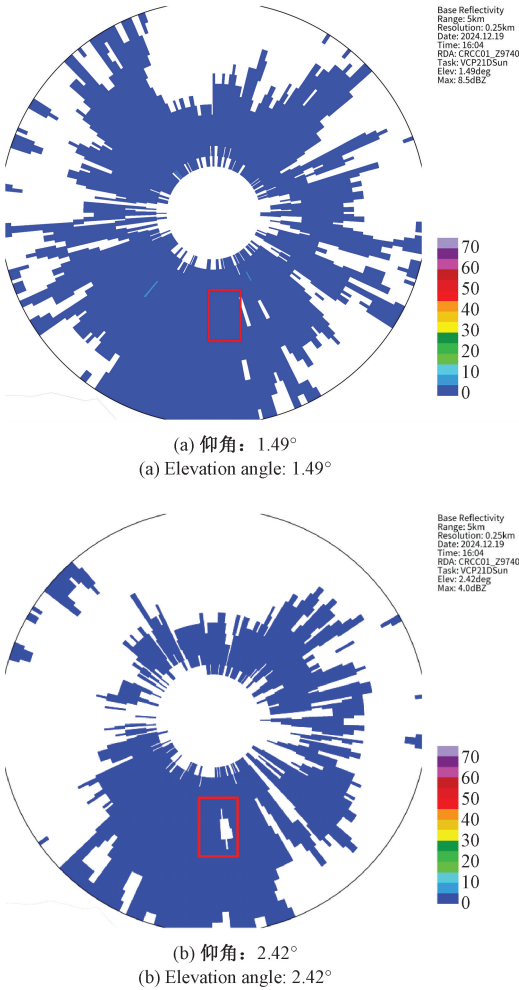


图 5 Z9740 体积扫描数据  
Fig. 5 Z9740 volume scan data



图 6 试验设备现场实拍图  
Fig. 6 On-site photos of experimental equipment

系统将金属球当作点杂波进行过滤处理。具体扫描参数如表 4 所示。

2.4 数据采集介绍

试验选择在晴空、无风条件,无人机云端平台实时记

录飞行高度处瞬时风速( $\leq 3\text{ m/s}$ ),配合稳定度模型  $S\geq 97\%$ 判据,在世界时间 2024 年 9 月 11 日 2:00~4:00,对 Z9740 进行了一次金属球标校试验,悬吊绳长度设置为 140 m,无人机起飞 3 架次,悬吊同一个半径  $r$  为 15.24 cm 的标准金属球,采集了 30 组“十字扫描”模式数据,其中 6 组数据为调整金属球到距离库中心位置前的跨库数据,24 组数据为已实现金属球位置中心化后的数据,如表 5 所示。

表 3 试验设备主要参数

| Table 3 Main parameters of test equipment |        |                                    |
|-------------------------------------------|--------|------------------------------------|
| 设备                                        | 主要参数   | 指标值                                |
| 无人机                                       | 主要材质   | 碳纤维                                |
|                                           | 最大载重   | 2.7 kg                             |
|                                           | 续航时间   | 20 min@2 kg                        |
|                                           | 最大抗风   | 12 m/s                             |
| RTK 定位系统                                  | 定位精度   | 1 cm+1 mm/km(水平)                   |
|                                           | 悬停定位精度 | 1.5 cm+1 mm/km(垂直)                 |
|                                           |        | $\pm 0.1\text{ m}$                 |
| 激光测距相机                                    | 测距精度   | $\pm(0.2\text{ m}+D\times 0.15\%)$ |
|                                           | 测量范围   | D 为目标距离                            |
| 金属球                                       | 直径     | 3~1 200 m                          |
|                                           | 圆度     | 30.48 cm                           |
|                                           |        | $\geq 99.98\%$                     |

表 4 “十字扫描”参数

| Table 4 Cross-scan parameter |                |                              |
|------------------------------|----------------|------------------------------|
| 参数                           | 推荐设置           | 说明                           |
| 处理模式                         | CDX            | 同时获取强度和速度信息                  |
| 扫描速度                         | 2.0°/s         | 慢速扫描,提高采样数                   |
| 脉冲重复频率                       | 1 280 Hz       | 使用 VCP21 模式中高仰角的 CDX 波形      |
| 采样个数                         | 64             | 尽量提高采样个数,提高数据可信度             |
| 采样距离                         | 10 km          | 配置采样距离,节省数据传输量               |
| 距离分辨率                        | 250 m          | 1.57 $\mu\text{s}$ 脉宽对应距离库长度 |
| 滤波和质量控制                      | 全部关闭           | 关闭所有质量控制和滤波算法,获取 dBT 数据      |
| 角度扫描范围                       | $\pm 10^\circ$ | 设置 RHI、PPI 十字搜索范围            |
| 数据采集                         | 2 byte 表示      | 提高观测数据存储精度                   |

表 5 数据采集

| Table 5 Data collection |                                               |             |      |      |
|-------------------------|-----------------------------------------------|-------------|------|------|
| 飞行架次                    | 时间范围(UTC)                                     | 扫描模式        | 是否跨库 | 数据组数 |
| 1                       | 2024. 09. 11. 02. 22~<br>2024. 09. 11. 02. 28 | RHI、PPI     | 跨库   | 6    |
| 2                       | 2024. 09. 11. 02. 32~<br>2024. 09. 11. 02. 34 | RHI、PPI、FIX | 未跨库  | 4    |
| 3                       | 2024. 09. 11. 03. 37~<br>2024. 09. 11. 03. 46 | RHI、PPI、FIX | 未跨库  | 20   |

### 3 试验结果与数据分析

#### 3.1 金属球稳定度分析

球体运动惯性、大气环境风、标校悬挂系统等都是引发金属球摆动的诱因。此次金属球标校过程中,无人机到达目标位置悬停后,利用 RTK 无人机 + 激光测距相机的融合方案,获取到共 157 条金属球高精度有效位置与姿态信息。根据金属球稳定度模型,预设最大允许摆角为  $30^\circ$ ,计算出金属球相对无人机的东向、北向位移在  $\pm 2.2$  m 以内,获得金属球相对于无人机的水平总位移基本在 2 m 以内,进而计算出金属球稳定度指标均在 97% 以上如图 7 所示。

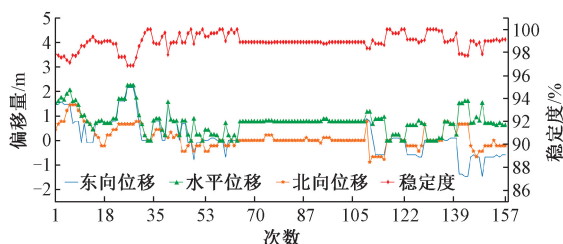


图7 金属球位移与稳定度变化

Fig. 7 Metal sphere displacement and stability variation

金属球高稳定度数据的获得,可以证明此次金属球标校试验所选用设备(无人机的定位精度、激光测距准确度)和天气条件(风速)均比较优异。为此,还专门开发了金属球稳定度实时计算和判断系统,建立一套统一的判据来剔除金属球异常摆动数据,提取摆动最小的实时位置数据代表金属球最佳测试位置。

以本文经过金属球稳定度模型判断后,获得的侧风引起球体水平偏移 2 m 为例,假设远场标校距离  $R = 3$  km、雷达波束宽度  $\theta = 0.95^\circ$ ,则可推算出此时测量误差,推算过程如下:

$$1) \text{ 等效偏离角 } \alpha \approx \arctan \frac{2}{3\,000} \approx 0.038\,2^\circ;$$

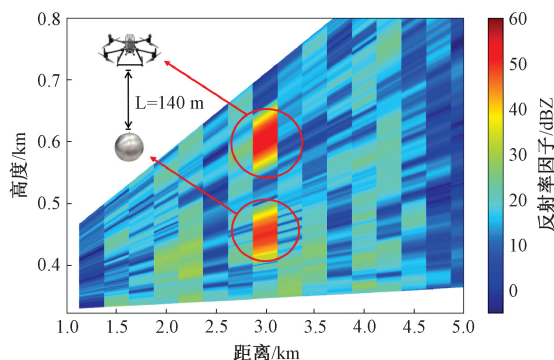
$$2) \text{ 在近似高斯方向图下,主瓣功率 } P \text{ 相对功率衰减 } P_0 \text{ 的比值为 } \frac{P}{P_0} = \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\alpha}{\theta} \right)^2 \right] \approx 0.995\,53;$$

$$3) \text{ 衰减: } 10 \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) = -0.019\,5 \text{ dB}.$$

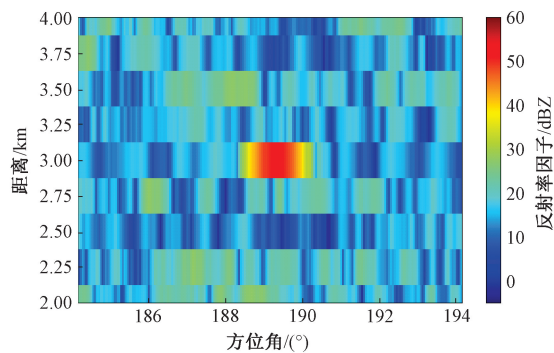
此次测试数据导致的衰减误差仅为  $-0.019\,5$  dB,由此可见,低风速和高稳定度模型配合下,离轴概率显著降低,配合“十字扫描”与 FIX 长时间停留观测,导致的测量误差可以忽略不计,确保了后续偏差评估和数据拟合的科学性。

#### 3.2 “十字扫描”数据反演

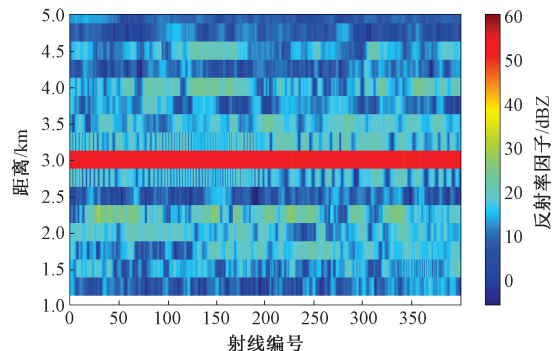
利用金属球稳定度模式获取到金属球高稳定度实时位置后,标校系统自动下发至雷达终端,计算出金属球相对于雷达的理论方位、俯仰角度及直线距离,此时雷达系统可利用“十字扫描”法进行找球。图 8(a)可以看出进行 RHI 扫描时,足够的悬吊绳长度设计,确保了处于高仰角的无人机和处于低仰角的金属球回波完全分离,互不干扰,定位金属球回波最强位置,得到  $El_{peak}$ ;在该仰角上对准金属球理论方位位置进行 PPI 动态扫描时,雷达主波束范围内只有金属球回波,不存在无人机回波、气象回波、地物等杂波影响,获得  $Az_{peak}$  如图 8(b) 所示;雷达



(a) RHI扫描  
(a) RHI scan



(b) PPI扫描  
(b) PPI scan



(c) FIX定点扫描  
(c) FIX scan

图8 金属球标校数据反演

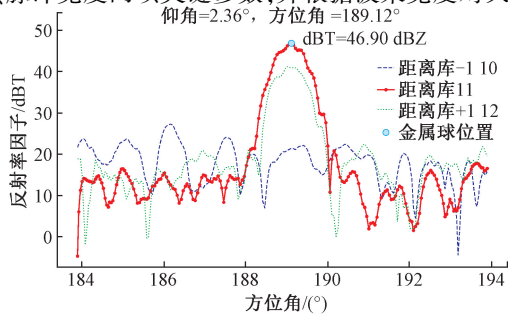
Fig. 8 Inversion of metal sphere calibration data

最终定位到  $El_{peak}$  和  $Az_{peak}$  位置处进行 FIX 定点扫描, 获得雷达对准金属球稳定条件下连续 400 组(可调)径向扫描数据如图 8(c) 所示。

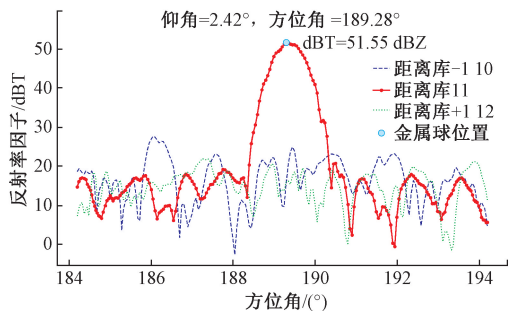
### 3.3 跨库偏差分析

实际标校过程中, 金属球常常不在径向距离库的中心位置, 通过采集金属球在雷达距离库上不同位置处的回波数据, 分析跨库引起的偏差。由于 RHI 扫描数据还未获得最佳的  $Az_{peak}$  位置, 为确保科学性, 后续主要对 PPI 和 FIX 扫描数据进行分析。为了更直观看金属球不在距离库中心位置时导致的回波能量在前后库上的分拆现象, 图 9 分别对两次 PPI 扫描金属球所在库及前后距离库的数据绘制了折线图, 两组数据金属球主波峰都在第 11 库, 第 12 库波峰值接近主波峰数值, 说明金属球更接近第 12 库的采样点, 导致金属球本应全部落入 11 库的目标能量被分配到 12 库, 从而出现“双峰”现象(图 9a)所示。根据金属球理论公式进行计算, 此时雷达观测金属球  $Z$  和  $Z_{DR}$  与理论值分别偏差  $-4.03$  和  $0.45$  dB, 如表 6 所示。指挥无人机悬吊金属球沿着雷达径向方向从 2 836 m 退回至 2 740 m 处, 将金属球位置调整至第 11 距离库的中心区域后(图 9(b)), 此时雷达观测金属球  $Z$  和  $Z_{DR}$  与理论值偏差分别降低至  $0.33$  和  $-0.17$  dB(表 6)。

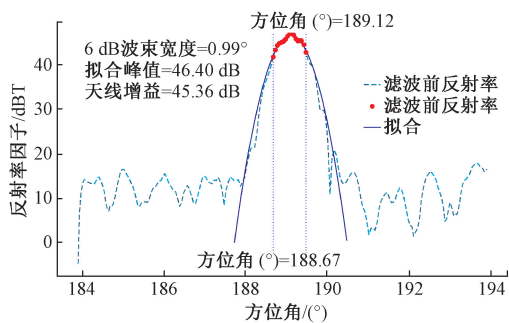
当金属球位于雷达主瓣进行 PPI 扫描时, 可在距离-方位平面上提取球回波的功率-方位分布, 利用高斯或  $\text{sinc}^2$  等拟合方式对该分布进行拟合, 即可得到波束宽度、脉冲宽度两项关键参数, 并根据波束宽度对天线增益



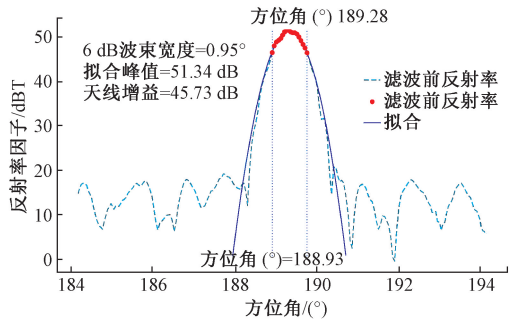
(a) 金属球不在距离库中心位置(扫描时间: 20240911\_022819)  
(a) Metal sphere not centered in the range bin  
(Scan time: 20240911\_022819)



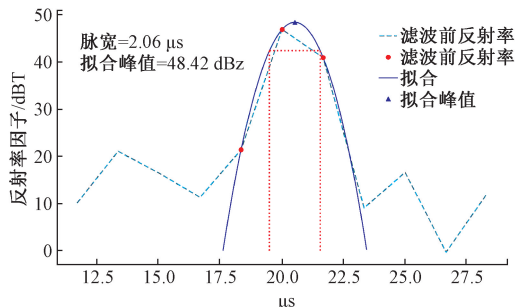
(b) 金属球在距离库中心位置(扫描时间: 20240911\_023238)  
(b) Metal sphere centered in the range bin (Scan time: 20240911\_023238)



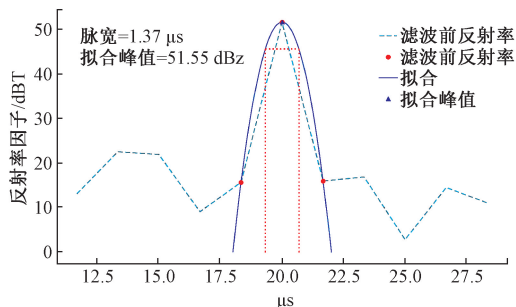
(c) 图(a)对应的波束宽度反演  
(c) Beamwidth inversion corresponding to Fig. (a)



(d) 图(b)对应的波束宽度反演  
(d) Beamwidth inversion corresponding to Fig. (b)



(e) 图(a)对应的脉冲宽度反演  
(e) Pulsewidth inversion corresponding to Fig. (a)



(f) 图(b)对应的脉冲宽度反演  
(f) Pulsewidth inversion corresponding to Fig. (b)

图 9 金属球在雷达距离库不同位置处数据偏差分析

Fig. 9 Bias analysis of metal sphere data at different radar range bin positions

进行近似值反演。本文采用最小二乘法对金属球在雷达距离库不同位置处的数据进行拟合, 金属球不在距离库中心位置时, 波束宽度、天线增益和脉冲宽度分别为

0.99°、45.36 dB、2.06 μs(图9(c)、(e));金属球在距离库中心位置时,波束宽度、天线增益和脉冲宽度分别为0.95°、45.73 dB、1.37 μs(图9(d)、(f))。

表6 是否跨库观测数据比对

| Table 6 Comparison of observation data to determine whether range-bin crossing occurred |               |        |                 |        |                 |       |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------|-----------------|--------|-----------------|-------|-----------------|
| 序号                                                                                      | R/m           | 理论值/dB |                 | 观测值/dB |                 | 差值/dB | 差值/dB           |
|                                                                                         |               | Z      | Z <sub>DR</sub> | Z      | Z <sub>DR</sub> | Z     | Z <sub>DR</sub> |
| 1                                                                                       | 2836<br>(跨库)  | 50.93  | 0               | 46.90  | 0.45            | -4.03 | 0.45            |
| 2                                                                                       | 2740<br>(未跨库) | 51.22  |                 | 51.55  | -0.17           | 0.33  | -0.17           |

将金属球反演数据与有源辐射标校系统(图10)及机外仪表实测雷达参数数据进行对比,金属球跨库时,波束宽度、天线增益及脉冲宽度偏差值分别为0.06°、-0.17 dB、0.56 μs;金属球未跨库时,偏差分别为0.02°、0.2 dB、-0.13 μs如表7所示。另外,对本次试验获取的3组跨库PPI扫描数据进行统计,发现偏差均较大。由此可见,金属球跨库时无法对雷达体制参数进行精确验证;金属球未跨库时反演的雷达参数值,与主流标校系统的测试精度基本一致。

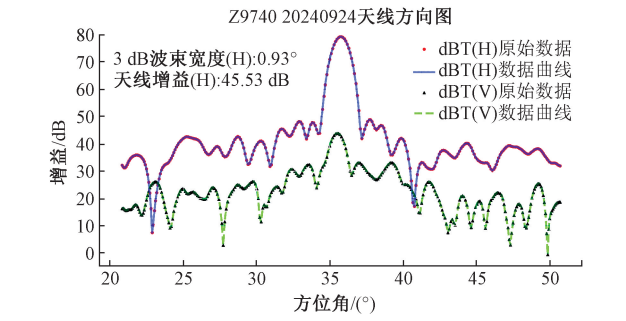


图10 有源辐射标校系统实测参考雷达波束宽度和天线增益

Fig. 10 Measured reference radar beamwidth and antenna gain of the active radiated calibration system

表7 不同标校系统测试偏差对比

| Table 7 Comparison of test deviations among different calibration systems |               |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|
| 是否跨库                                                                      | 观测方式          | θ/(°) | G/dB  | μ/μs  |
| 跨库                                                                        | 有源辐射标校系统、机外仪表 | 0.93  | 45.53 | 1.50  |
|                                                                           | 金属球           | 0.99  | 45.36 | 2.06  |
|                                                                           | 差值            | 0.06  | -0.17 | 0.56  |
| 未跨库                                                                       | 金属球           | 0.95  | 45.73 | 1.37  |
|                                                                           | 差值            | 0.02  | 0.2   | -0.13 |

3.4 未跨库偏差分析

为验证未跨库时,金属球标校数据的可信度,对此次标校过程中收集到的所有8组PPI和FIX扫描数据进行了分析。统计8组PPI扫描数据的雷达参数反演结果,Z和Z<sub>DR</sub>平均值分别为51.33和0.30 dB,与理论值的偏差分别为0.11和0.30 dB(表8),可以看出等效反射率因子偏差较小,满足≤0.5 dB的指标要求,差分反射率偏差较大,超过了≤0.2 dB的指标要求。天线波束宽度、天线增益反演平均值分别为0.95°、45.67 dB,满足S波段新一代天气雷达功能规格需求书指标要求(波束宽度≤1.0°、天线增益≥44.0 dB)。脉冲宽度的反演平均值和平均偏差分别为1.39和-0.11 μs,平均偏差超过±0.1 μs指标要求,原因可能为:受本地空域限制,无人机最大飞行高度无法超过500 m,金属球观测仰角仅在2.5°附近,主波峰前后距离库数据可能受地物背景杂波干扰。由此可见,金属球位于距离库中心位置时,更能正确实现方向图评估、体制参数检查及偏差溯源。

表8 金属球未跨库PPI扫描数据分析  
Table 8 Analysis of metal sphere PPI scan data without range-bin crossing

| 序号  | 时间              | Z/<br>dB | Z <sub>DR</sub> /<br>dB | θ/<br>(°) | G/<br>dB | μ/<br>μs |
|-----|-----------------|----------|-------------------------|-----------|----------|----------|
| 1   | 20240911_023238 | 51.55    | -0.17                   | 0.95      | 45.73    | 1.37     |
| 2   | 20240911_033751 | 51.42    | 0.3                     | 0.93      | 45.94    | 1.37     |
| 3   | 20240911_033833 | 51.04    | 0.56                    | 0.96      | 45.67    | 1.44     |
| 4   | 20240911_034016 | 51.33    | 0.51                    | 0.95      | 45.72    | 1.45     |
| 5   | 20240911_034108 | 51.36    | 0.41                    | 0.98      | 45.46    | 1.33     |
| 6   | 20240911_034252 | 51.18    | 0.24                    | 0.95      | 45.78    | 1.42     |
| 7   | 20240911_034334 | 51.25    | 0.33                    | 0.98      | 45.48    | 1.43     |
| 8   | 20240911_034523 | 51.53    | 0.29                    | 0.97      | 45.59    | 1.34     |
| 平均值 |                 | 51.33    | 0.30                    | 0.95      | 45.67    | 1.39     |
| 理论值 |                 | 51.22    | 0                       | 0.93      | 45.53    | 1.50     |
| 差值  |                 | 0.11     | 0.30                    | 0.01      | 0.14     | -0.11    |

RHI和PPI扫描时,由于转台惯性及波导缝隙等因素极易造成瞬时天线指向在极端情况下产生0.05°~0.1°漂移,波束位置极小的离轴角就可造成较大偏差,雷达每次只截取摆动周期中的一个瞬时相位,无法保证球体精确位于单一波束中心。另外,脉冲停留时间不够(一般几十毫秒),导致脉冲累计数不够(数十至上百),会产生较大的随机误差,无法满足较高的标校精度要求。天线静止不动,长时间序列FIX定点扫描时,雷达波束静止对准球心,可根据标校需求设置脉冲单次停留时间可达几十秒,脉冲累计数可到1×10<sup>3</sup>~1×10<sup>4</sup>个甚至更多,这就能排除“切片效应”,得到真实主瓣中心数据。本次试验过程收集的8次稳定在E<sub>l<sub>peak</sub></sub>和A<sub>z<sub>peak</sub></sub>位置处FIX定点扫描的共3200条数据的Z和Z<sub>DR</sub>与理论值的平均偏差分别为-0.28和0.16 dB(图11),达到了Z和Z<sub>DR</sub>的定

量标校精度要求(0.5 和 0.2 dB)。即使这样,可以看出 8 次 FIX 扫描时球体自身摆动也极易出现强度数值产生数个 0.3~0.5 dB 的峰-谷跳动,仅第 1 次和第 6 次 FIX 扫描时 Z 和  $Z_{DR}$  波段幅度较小,通过几百上千组数据的平均或取中位数,可抵消掉球体摆动和地物背景杂波等对金属球回波能量形成“干涉”所导致的 Z 和  $Z_{DR}$  的起伏。

综上,单点 RHI/PPI 扫描数据存在样本少、几何不确定、受球摆与指向瞬态叠加等因素影响,只能用于快速对准和实时监控;FIX 定点扫描能提供大样本静态观测,使随机误差最小化,符合统计学要求,将其作为最终标校偏差的判定依据更具合理性。

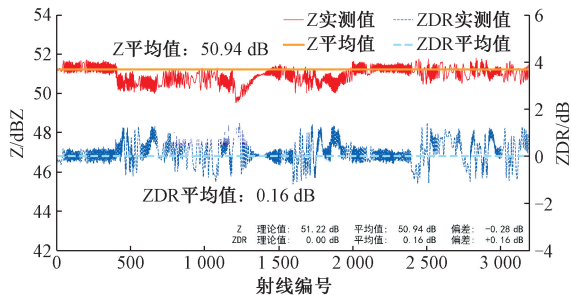


图 11 金属球未跨库时 8 次 FIX 定点扫描数据偏差分析

Fig. 11 Deviation analysis of 8 FIX fixed-point scan datasets when the Metal sphere does not cross range-bin

### 3.5 跨库原因分析

雷达对回波的处理是基于“距离库”来采样。金属球作为点目标,若其不位于某一距离库的中心,会出现回波能量在相邻距离库间分配的现象,导致主库观测回波偏低且相邻库值差异大。其核心原因在于“脉冲-窗重叠”不足与能量分拆。

#### 1) 矩形脉冲与距离窗的重叠积分

发射脉冲在时域上近似为一个宽度为  $T_p$  的矩形,接收时,每个距离库也相当于一个宽度为  $\Delta r$  的时域矩形窗。对应的等效距离分辨率为:

$$\Delta r = \frac{cT_p}{2} \quad (14)$$

当金属球的回波到达时间相对于某库中心偏移  $\Delta t$  (等效距离偏移  $\Delta R = \frac{c\Delta t}{2}$ ) 时,若  $|\Delta t| \leq T_p$ ,主库与回波脉冲的重叠时间仅为  $T_p - |\Delta t|$ 。多余的  $\Delta t$  时长能量就“泄漏”到前一库或后一库。

#### 2) 测量功率与重叠长度成正比

在目标单脉冲反射测量中,接收功率  $P$  与脉冲重叠长度成线性关系,可表达为:

$$P_n \propto A(T_p - |\Delta t_n|) \quad (15)$$

式中:  $A$  为回波幅度常数;  $n$  为距离库索引。归一化峰值

后,主库测得的相对强度是

$$P_n = 1 - \frac{|\Delta t_n|}{T_p} = 1 - \frac{|\Delta R|}{\Delta r} \quad (16)$$

当  $|\Delta R| = \frac{1}{2}\Delta r$  时,主库仅获得一半能量,另一半落入相邻库。

#### 3) 前后距离库值差异的来源

若回波提前,即球体偏向前一库,前一库的重叠长度  $T_p - |\Delta t|$  较大,观测值偏高;后一库仅得  $\Delta t$  的能量,观测值偏低;若回波滞后,即球体偏向后一库,情况正好相反。

偏移越接近半个窗宽,即  $\Delta t \approx \frac{T_p}{2}$  时,前后库平均分配、各取 1/2,落库差异较大;偏移极小或极大时,分布极度不均,前后库值差别最大如图 12 所示。

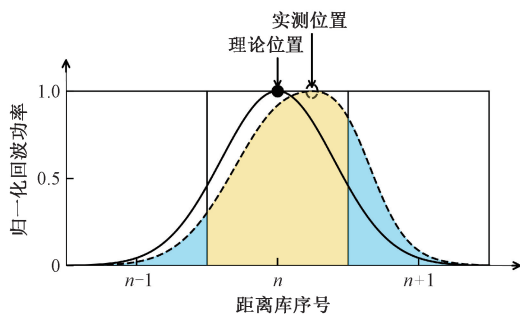


图 12 金属球跨库回波示意图

Fig. 12 Illustration of metal sphere echo crossing range-bin

可见,脉冲雷达进行金属球标校时必须精确对中,尽量让金属球落于某一距离库中心,以采集完整脉冲能量。只要回波落窗不居中,就会出现“能量分拆导致单库测值偏低”与“前后库值差异大”的效应。若雷达系统或后端允许,可压缩脉冲宽度或加窗来降低旁瓣,防止旁瓣落入邻库造成能量泄漏,降低距离向或多普勒向的杂散能量对主瓣测量的污染,减轻偏移带来的测量误差。此外,在定标数据处理阶段,可通过数据融合,将主库与相邻库的能量按比例加权合并,以近似恢复真实峰值,但此方法精度有限,且可能引入新的误差。

## 4 结 论

本研究针对传统金属球标校在机动性和位置精度等方面的局限,提出并验证了一种基于无人机悬吊金属球的高精度天气雷达远场绝对标校方法。通过构建融合最大水平位移约束的稳定度指标可达 97% 以上的金属球稳定度模型,筛选出摆动最小的最佳标校位置;设计并验证“十字扫描”找球流程,可快速实现金属球在主瓣和距离库位置中心化,有效解决动态标校中的目标对准难题。

试验结果表明,当金属球位于距离库中心时,根据金属球标校数据反演的雷达参数更贴近技术规范要求,基本达到了主流标校设备的测试精度要求;而金属球跨库时, $Z$ 与 $Z_{DR}$ 偏差显著增大,且波束宽度、增益与脉宽误差也同步扩大。通过研究跨库偏差机理,首次阐明跨库偏差源于“脉冲-窗重叠不足”导致的能量分拆,其强度与位置偏移呈线性关系。该方法可将S波段雷达 $Z$ 和 $Z_{DR}$ 绝对标校精度分别提升至0.5和0.2 dB以内,可为全国天气雷达组网一致性和新一代相控阵雷达定标提供技术支撑。

需要注意的是,不同波段、不同型号及不同体制天气雷达参数存在较大差异,该方法在不同场景下应用时需对理论值计算方法、标校参数设置及偏差修正等进行适当调整。

## 参考文献

- [1] WANG X, SHAO N, CAO J, et al. ARC-Based absolute calibration method for weather radar reflectivity [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025.
- [2] CHEN Y, LI L, YE F, et al. An RTK UAV-based method for radial velocity validation of weather radar[J]. Remote Sensing, 2024, 16(7): 1153.
- [3] WANG X, LEI Y, FU Y, et al. Analysis of consistency and bias traceability in ground-based weather radar reflectivity using FY-3G precipitation measurement radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025.
- [4] PAONESSA F, VIRONE G, SARRI A, et al. UAV-mounted corner reflector for in-situ radar verification and calibration [J]. 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). IEEE, 2018: 1-4.
- [5] DUTHOIT S, SALAZAR J L, DOYLE W, et al. A new approach for in-situ antenna characterization, radome inspection and radar calibration, using an unmanned aircraft system (UAS)[J]. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). IEEE, 2017: 0669-0674.
- [6] 雷永恒,王黎明,杨亭,等. 地杂波反射率因子的天气雷达在线标校方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(5): 217-226.  
LEI Y H, WANG L M, YANG T, et al. Online calibration method for weather radar based on ground clutter reflectivity factor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39 ( 5 ): 217-226.
- [7] 吴军,袁少博,祝玉恒,等. 采用自适应背景聚类的激光雷达与相机外参标定优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 230-237.  
WU J, YUAN SH B, ZHU Y H, et al. Optimization method for LiDAR-camera extrinsic calibration based on adaptive background clustering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 230-237.
- [8] YIN J, HOOGEBOOM P, UNAL C, et al. UAV-aided weather radar calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(12): 10362-10375.
- [9] JOSHIL S S, CHANDRASEKAR C V. Calibration of D3R weather radar using UAV-hosted target[J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3534.
- [10] ZHAO K, HUANG H, LU Y, et al. Operational phased array radar network for natural hazard monitoring and warnings in urban environments over the greater bay area, China [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2024, 105(11): 2152-2174.
- [11] YE F, WANG X, LI L, et al. Weather radar calibration method based on UAV-suspended metal sphere [J]. Sensors, 2024, 24(14), 4611.
- [12] 李兆明,陈洪滨. 使用金属球定标X波段固态天气雷达[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 259-266.  
LI ZH M, CHEN H B. Calibration of X-band solid-state weather radar using Metal spheres [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 259-266.
- [13] 孙卜郊,魏加华,翁燕章,等. 利用无人机平台标定气象雷达[J]. 现代雷达, 2021, 43(10): 33-40.  
SUN B J, WEI J H, WENG Y ZH, et al. Calibration of weather radar using UAV platform[J]. Modern Radar, 2021, 43(1): 33-40.
- [14] 朱毅,周红根,赵宇,等. CINRAD/SA-D 雷达差分反射率金属球标定试验[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 517-523, 534.  
ZHU Y, ZHOU H G, ZHAO Y, et al. Metal sphere calibration for ZDR parameters of CINRAD/SA-D radar[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(4): 517-523, 534.
- [15] SUH J S, MINZ L, JUNG D H, et al. Drone-based external calibration of a fully synchronized ku-band heterodyne FMCW radar [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66 ( 8 ):

2189-2197.

- [16] 姜卫平, 李昭, 魏娜, 等. 大地测量坐标框架建立的进展与思考 [J]. 测绘学报, 2022, 51 (7): 1259-1270.
- JIANG W P, LI ZH, WEI N, et al. Progress and considerations in the establishment of geodetic reference frameworks [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1259-1270.
- [17] ZHAO J, LI D, CUI J, et al. UAV-Assisted weather radar calibration: A theoretical model for wind influence on metal sphere reflectivity [C]. 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2024, 1: 1-3.
- [18] OKAZAKI A, HONDA T, KOTSUKI S, et al. Simulating precipitation radar observations from a geostationary satellite [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(7): 3985-3996.
- [19] TEGOWSKI B, KOELPIN A. Calibration of the self-radar-cross-section of continuous-wave radars [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025.
- [20] CHANDRASEKAR V, BEAUCHAMP R M, BECHINI R. Introduction to Dual Polarization Weather Radar: Fundamentals, Applications, and Networks [M]. Cambridge University Press, 2023.

## 作者简介



叶飞, 2010 年于南京信息工程大学获得学士学位, 2013 年于安徽农业大学获得硕士学位, 中国气象局青年创新团队骨干成员, 现为中国气象局雷达气象中心长沙气象雷达标校中心高级工程师, 主要研究方向为天气雷达标校技术。

E-mail: yefei@cmacccc.com

**Ye Fei** received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2010 and M. Sc. degree from Anhui Agricultural University in 2013. He is a key member of the Youth Innovation Team of the China Meteorological Administration. He is now a senior engineer at the Changsha Meteorological Radar Calibration Center of the China Meteorological Administration's Radar Meteorological Center. His main research interest includes weather radar calibration technical.



朱长安 (通信作者), 2000 年于成都信息工程大学获得学士学位, 现为长沙气象雷达标校中心综合气象观测高级工程师, 主要研究方向为大气探测。

E-mail: 13986316@qq.com

**Zhu Changan** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2000 from Chendu University of Information Science & Technology. He is now a senior engineer of atmospheric detection in Changsha Meteorological Radar Calibration Center. His main research interest includes atmospheric detection.