

L 波段探空雷达主要标定方法分析与改进

秦建峰¹ 程昌玉¹ 颜国跑²

(1 湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074; 2 武汉市气象局, 武汉 430040)

摘要 运用解析几何的方法,给出了 L 波段探空雷达系统的天线方位零度标定、光轴与机械俯仰轴垂直标定、光轴与海平面平行标定、光轴与电轴一致性标定等主要标定方法的理论解析。依据标定方法和理论解析,总结了 L 波段探空雷达系统标定实施的关键,分析了存在的不足,提出了相应的改进方法。理论解析能为技术人员深入掌握雷达标定方法打下良好的理论基础。掌握标定实施的关键,能减小标定误差,确保雷达探测的可靠性。改进方法可作为改进标定实施或系统设备的参考。

关键词 探空雷达 标定方法 改进

引言

L 波段探空雷达系统标定是确保雷达探测资料的可靠性的重要手段,是 L 波段探空雷达建设、运行维护和系统检测中必不可少的。技术手册^[1]对雷达标定方法进行了说明,但未给出其理论解析,让人知其然不知其所以然,增加了掌握和运用标定方法的难度。尤其是对于较复杂的标定方法,很多台站的技术人员无法独立完成,有些虽能按手册完成,但无法保证标定的准确性,甚至可能引入人为的标定误差。崔炳俭^[2]等对系统的标定方法进行了较详尽的阐述,奉超^[3]分析了标定中的几种误差,徐正旭^[4]等对误差的影响和雷达探测精度进行了分析,纪华^[5]等简略阐述了 701 雷达标定中的几点注意问题。然而,国内尚未见公开文献对 L 波段探空雷达标定方法进行理论解析与论述。本文用解析几何的方法,对 L 波段探空雷达系统的主要标定方法进行分析和论证,总结了标定实施的关键,分析了存在的不足,提出了相应的改进方法。

1 主要标定方法解析

1.1 方位零度标定

方位 0° 标定是以经纬仪方位 0° 为基准,对雷达方位 0° 进行校正。如图 1, N 、 N_1 分别为经纬仪和

雷达标定前的方位 0°, 在标定时通过经纬仪目镜和雷达瞄准镜对瞄,使得雷达机械轴和经纬仪光轴在一条直线上(雷达光轴与机械轴一致性已检验)。图中 Φ 和 β 分别为雷达和经纬仪在各自角坐标系中的角度(角度正方向统一为逆时针方向)。从图中看出,雷达机械轴方向与经纬仪方位 0° 方向夹角为 $\Theta = 180^\circ - \beta$ 。可见,如果将雷达从当前方位角度向经纬仪 0° 方向转动 Θ 角度,则可达到经纬仪 0° 方向。所以,标定时将雷达方位角转动到 $\Phi + \Theta = \Phi + (180^\circ - \beta)$, 设置为雷达方位 0° 即可。

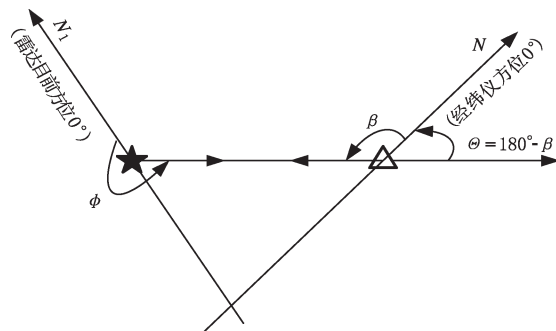


图 1 方位 0° 标定原理

1.2 光轴与俯仰轴垂直标定

如图 2, $P_0(x_0, y_0)$ 、 $P_{90}(x_{90}, y_{90})$ 分别为天线仰角在 0° 和 90° 时远距离目标物在雷达瞄准镜坐标中的位置。从瞄准镜向目标物望去, P_0 到 P_{90} 的路径 P 圆弧方向为逆时针方向(图中箭头方向)。直线 h

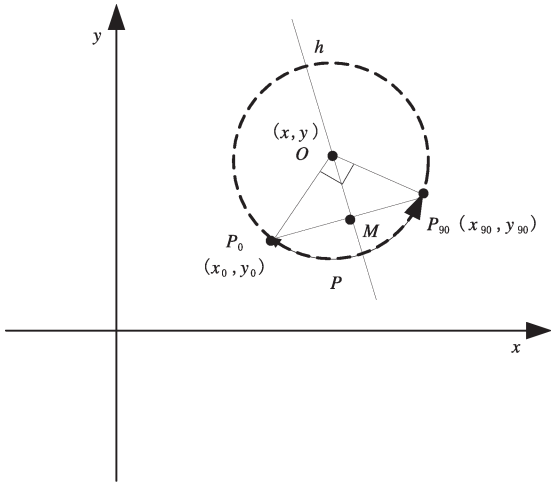


图 2 光轴与俯仰轴垂直标定原理

为 P_0P_{90} 线段的中垂线, 与 P_0P_{90} 线段交于点 M $[(x_0+x_{90})/2, (y_0+y_{90})/2]$ 。因为目标物与雷达距离很远(大于 2 km)以至天线俯仰转动前后移动距离可忽略, 如果光轴与俯仰轴垂直, 在天线俯仰转动前后目标物应在 P_0 位置不变。如果光轴与俯仰轴不垂直, 当天线俯仰转动时, 从 P_0 到 P_{90} 的路径 P 圆弧的圆心 $O(x, y)$ 为俯仰轴在瞄准镜坐标平面的投影点, 调整瞄准镜支架三角板, 使得 P_0 向圆心 O 点逼近, 则能使得光轴与俯仰轴趋于垂直。式(1)中 k 为 P_0P_{90} 线段斜率, 则中垂线 h 的斜率为 $-1/k$, 则 h 直线方程为公式(2)。 P 圆弧对应的角度为 90° , 由 $|P_0P_{90}| = 2|OM|$, 可得到式(3), 从而得到式(4), 根据圆弧 P 的逆时针方向可确定式(4)左边括号内分式的分子分母为负号关系, 最终得到式(5)、(6), 即圆心 $O(x, y)$ 。标定时调整瞄准镜支架三角板, 在仰角 0° 将 P_0 位置调整至圆心 $O(x, y)$ 位置即可。

如果雷达站周围找不到 2 km 外的目标, 则采用人工自制设备作为近距离目标物进行标定^[1] (图 3)。因目标物与雷达距离很近, 不能忽略俯仰转动的距离差。如果光轴与俯仰轴垂直, 当天线俯仰从 0° 转动到 90° 时, 天线指向水平移动距离为 900 mm(转动臂长决定), 则瞄准镜十字线中心应分别对应左右标牌中心。若光轴与俯仰轴不垂直, 将左右标牌中心在瞄准镜坐标中的位置对应为 $P_0(x_0, y_0)$ 和 $P_{90}(x_{90}, y_{90})$, 其调整 and 理论依据同远距离目标物标定一致。

$$k = \frac{y_{90} - y_0}{x_{90} - x_0} \quad (1)$$

$$(y_{90} - y_0) \left(y - \frac{y_0 + y_{90}}{2} \right) = (x_0 - x_{90}) \left(x - \frac{x_0 + x_{90}}{2} \right) \quad (2)$$

$$\sqrt{(x_{90} - x_0)^2 + (y_{90} - y_0)^2} = 2 \sqrt{\left(x - \frac{x_0 + x_{90}}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{y_0 + y_{90}}{2} \right)^2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{x - \frac{x_0 + x_{90}}{2}}{y_{90} - y_0} \right)^2 = \frac{1}{4} \quad (4)$$

$$x = \frac{x_0 + x_{90}}{2} + \frac{y_0 - y_{90}}{2} = \frac{x_0 + x_{90} + y_0 + y_{90}}{2} - y_{90} \quad (5)$$

$$y = \frac{y_0 + y_{90}}{2} + \frac{x_{90} - x_0}{2} = \frac{x_0 + x_{90} + y_0 + y_{90}}{2} - x_0 \quad (6)$$

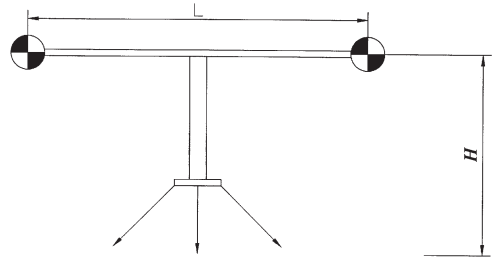


图 3 光轴与俯仰轴垂直标定自制设备示意图

1.3 光轴与海平面平行标定

如图 4, 假如天线方位在 0° 和 180° 时看远距离(大于 2 km)目标物的位置分别为 $P_0(x_0, y_0)$ 和 $P_{180}(x_{180}, y_{180})$, 瞄准镜坐标原点与海平面的垂直距离为 h 。 P_0 和 P_{180} 中点位置的纵坐标 $y = (y_0 + y_{180})/2 = (y_0 + y_0 - 2h)/2 = y_0 - h$ 。若每次调整以中点位置的纵坐标 y 为目标, 则会越来越逼近水平面, 最终平行于水平面。

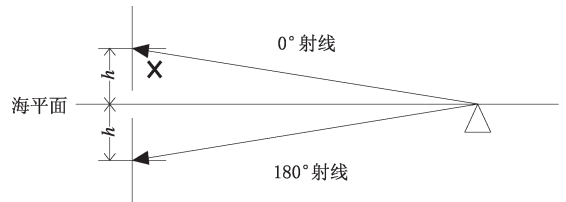


图 4 光轴与海平面平行标定原理

1.4 光轴与电轴一致性标定

图 5 中 a 为光轴(机械轴), A, B, C, D 4 点分别为 4 个抛物面天线的中心, A, B 为垂直平面上的一

组天线,对应上、下两根亮线, C 、 D 为水平平面上一组天线,对应左、右两根亮线, O 点为天线阵面的几何中心, a 轴是天线阵面的中垂线。图中 P 为探空仪位置,因距离足够远,探空仪在瞄准镜十字中心时,可认为 P 在 a 轴上。 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 为 P 到 A 、 B 、 C 、 D 的等效电轴距离(包括到低噪声放大器的传输路径)。理论上 A 、 B 、 C 、 D 两两天线波瓣交点与 O 点连线应该与 a 轴重合,有 $l_1=l_3$, $l_2=l_4$,即左、右亮线和上、下亮线两两对齐。由于电特性变化或工艺等原因,使得 $l_1 \neq l_3$ 或 $l_2 \neq l_4$,表现为左右或上下亮线不两两对齐,通过改变和差箱中对应调相器的相位补偿量(电轴距离补偿),从而使得 $l_1=l_3$, $l_2=l_4$ 重新成立,让左右或上下亮线两两对齐,即完成标定。

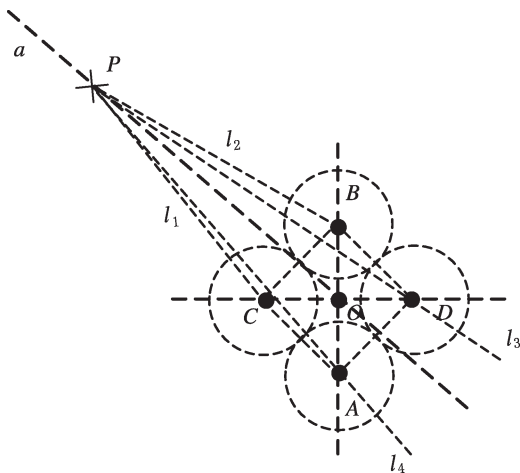


图5 光轴与电轴一致性标定原理

2 标定实施的关键

(1)标定流程。雷达标定须按严格的流程实施,因为有的标定项目必须以前面标定项目的准确性为前提,否则,无法保证标定的顺利实施和准确性。标定流程:粗精搭配→天线水平检查→仰角零度标定→光轴与俯仰轴垂直标定→光轴与海平面平行标定→方位零度标定→距离标定→光轴与电轴一致性标定。

(2)方位零度标定。方位零度标定中经纬仪的指北精度决定标定误差。经纬仪的指北误差主要来源于指北针的指北误差、当地磁偏角误差和经纬仪测量误差。应选择精度优于雷达天线方位精度的经纬仪;当地磁偏角的精度应精确到两位小数;应选择高精度的指北针,或借助其他高精度的方式辅助经纬仪定北。方位零度标定误差应小于 0.2° 。

(3)光轴与俯仰轴垂直标定。①远距离目标物——要保证固定目标物离雷达距离大于 2 km 。在理论分析中,因为距离足够远未考虑俯仰转动的距离。反之,若距离不够远,则会影响标定的精度,甚至可能无法完成标定。标定中还要注意天线方位或俯仰的齿轮回差,若回差较大需在标定前先解决回差问题。在标定过程中,因标定人员攀扶或风力原因,俯仰转动前后方位角或仰角可能会发生变化,标定中应经常查验,保证天线准确停靠在指定位置。②近距离目标物——两个标牌应有明显的几何中心,两个标牌中心的距离应严格为 900 mm ,高度应与瞄准镜等高,方向应保证水平和与天线指向平行(图3)。高度和水平可通过十字线检验和校正。③调整方法——光轴与俯仰轴垂直标定主要是调整瞄准镜支架三角板,使得三角板平面与俯仰轴垂直。在调整时,只需调整三角板的3个螺钉,且要配合兼顾调整3个螺钉,以防损坏螺钉螺纹。光轴与俯仰轴垂直标定误差应小于 0.1° 。

(4)光轴与海平面平行标定。从图4可知,较远的目标可使得 h 更大,所以固定目标物离雷达距离应足够远,最好大于 2 km 。标定过程中只需关注方位转动前后固定目标物的纵坐标,且调整时只需配合调整三角板上面的2个螺钉的上下即可。光轴与海平面平行标定误差应小于 0.1° 。

(5)光轴与电轴一致性标定。探空仪离雷达距离应足够远(在放球约 10 min 后),以忽略天线、探空仪的尺度因素,以及探空仪到瞄准镜和天线的行程差和角度差。标定要在能见度好的晴朗天气下进行^[1],风速不能太大,否则因探空仪移动过快难以实施标定。光轴与电轴一致性标定误差应小于 0.1° 。

(6)水平标定。由于水准器精度高,水平标定时不要用手摸水准器,避免太阳直射^[2],以保证标定精度。天线水平标定时应保证水准器的气泡偏离中心距离小于1小格。

(7)备份板。因为仰角零度、方位零度、距离标定都要对相应的电路板进行设置,所以在更换11-3(测距单元)、11-7(仰角转换单元)、11-8(方位转换单元)备份板时,这些标定项目须重新进行标定。

3 存在的问题分析与改进思路

3.1 方位零度标定

存在的问题:在经纬仪定北时,指北针指示较为

粗略,人为判断误差较大;磁偏角的地域划分粗广,同一地点的磁偏角大小也随着时间的推移而不断改变。所以,指北针的指示误差和磁偏角的引用误差会导致方位零度的标定误差较大。

改进方法:利用“日晷法”确定正北方位,对经纬仪定北,再利用经纬仪对雷达方位零度进行标定,可避免指北针的指示误差和磁偏角的引用误差。

在日照良好的开阔地带,在一已知经纬度处竖一标杆,利用重锤法保证标杆垂直。根据该处经纬度信息,利用通用软件计算或查询当地当日太阳过正北线的时间(精确到秒),在该时间标杆在地上的投影的最远端树立另一标杆,利用重锤法保证标杆垂直,两根标杆的连线即为正南或正北方向。经纬仪定北时,放置经纬仪以保证经纬仪的目镜和两根标杆成一直线,则完成了经纬仪定北。

$$S=L\tan(|\alpha-\beta|) \quad (7)$$

式中 S 为标杆投影长度, L 为标杆长度, α 为当地纬度, β 为标定当地当时太阳赤纬角,在式中 $0 \leq \beta \leq 23^{\circ}26'$ 。从实际经验, $S > 25$ cm 即可满足标定要求,从式(7)计算可知在纬度 30° 以上 $L \geq 2$ m 即可。我国内陆地区在 $21^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 纬度范围内,在每年6月夏至日附近^[6],由于太阳高度角接近 90° ,可能导致标杆投影太短而不适宜采用该标定方法。因风影响重锤法应用时该方法不宜实施。

可行性与精度:该方法易于掌握和操作,不需要特别的仪器或工具,亦不需要改进雷达系统,方法可行。标定中在能清楚分辨标杆投影的情况下尽量采用直径小和足够长的标杆,保证标杆垂直,保证时间和经纬度的精度,定北精度应高于指北针定北。

3.2 电轴与机械轴一致性标定

存在问题:电轴与机械轴一致性标定继承了701探空雷达的传统标定思路,以光轴为中间媒介,即先使得光轴与机械轴一致,再调整电轴与光轴一致,从而实现电轴与机械轴的一致。该方法虽较为成熟,但中间环节较多,三角板的调整较为复杂,不易掌握。由于光轴与机械轴标定、电轴与光轴标定两个环节都会产生误差,增大了整个标定的误差。

改进方法:利用“太阳法”实现电轴与机械轴一致性标定。

根据天线几何中心位置的经纬度信息,理论计算^[7]当前时间太阳在站点坐标中的位置,得到天线方位角度和俯仰角度的理论值,控制天线对准太阳,

四个天线接收太阳光在雷达接收频段内的电磁信号。该标定思路原理同图5, P 点为太阳位置。使得左、右亮线和上、下亮线两两对齐,调整方式同电轴与光轴一致性调整方法。当四个信号一样大时(差值在规定阈值内,阈值由标定精度决定),认为天线电轴对准太阳,将当前天线的实际方位角度和俯仰角度与理论值进行比较,给出误差,人工进行修正,完成标定。

地球上接收到的太阳辐射能流密度大约在 $10^2 \sim 10^3$ AU(AU 为天文单位, $1 \text{ AU} = 10^{-22} \text{ W/m}^2 \cdot \text{Hz}$)^[8]。太阳辐射常数较为稳定^[9],根据加拿大 Ottawa 射电天文台对太阳辐射到地球微波能量的测量数据,最小能流密度为 65 AU 附近,若雷达系统最小可测信号对应的能流密度小于 65 AU 则可通过太阳法进行天线空间指向标定^[8]。进入雷达接收机的太阳电磁信号可表示为^[8]:

$$P_m = F_m A_e \Delta F \quad (8)$$

式中, P_m 为雷达接收到的太阳电磁信号功率, A_e 为天线有效截面, ΔF 是雷达接收机的中频带宽。雷达天线的有效截面可表示为^[8]:

$$A_e = G_e \lambda^2 / (4\pi) \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得:

$$F_m = 4\pi P_m / (G_e \lambda^2 \Delta F) \quad (10)$$

L 波段探空雷达^[1]: $P_m = -107$ dBm, $G_e = 27$ dB, $\lambda = 17.9$ cm, $\Delta F = 2.7$ MHz,

据式(10)可计算得到 $F_m = 57$ AU (< 65 AU)

从计算得到的最小可测能流密度 F_m 可知 L 波段探空雷达满足太阳法检测条件。

太阳法标定精度受气象条件、太阳高度角、位置和时间精度的影响。为了尽量消除气象因素的影响,太阳法需在晴空天气条件进行。太阳高度角由进行太阳法的时间决定,地方时正午 12:00 为太阳高度角最大,且随纬度和季节的不同而不同。杨金焕撰文^[10]对我国各地接受太阳辐射的最佳倾角进行了分析,最佳倾角一般在当地纬度附近,高纬度地区最佳倾角也在 50° 以内,且在冬半年还要偏小,所以进行太阳法的时间一般不宜靠近午时。另,如果进行太阳法时间较早,太阳高度角较小,水汽、云层对太阳辐射的衰减较大^[11],不利于太阳法实施,这也是在实际工作中下午实施太阳法的效果一般比早上好(在山区尤为明显)的原因。所以,实施太阳法的时间最好在 09:00—10:00 或 15:00—16:00,高

纬度地区或冬半年上午时间可适当延后,下午时间可适当提前。

可行性与精度:利用雷达接收太阳光电磁噪声,自动计算和控制天线“找”太阳,以太阳为参考,实现电轴与机械轴的一致性标定。用自动化处理精简了标定步骤,取消了光轴调整,可较大幅度提高标定效率,但需对雷达接收和信号处理进行适当调整,并在雷达控制程序中增加太阳法标定控制才能实施。误差来源于理论计算误差和实际测量误差,目前已有高精度太阳位置算法^[7],完全能满足 0.1° 精度要求。

4 小结

雷达标定的精度对雷达探测数据的可靠性十分重要。掌握标定方法的理论和标定实施的关键,有利于标定的技术实施和保证标定的精度。在L波段探空雷达系统的业务运行和标定工作中,技术人员应结合雷达周边环境和技术条件,合理选择或调整标定方法。正如本文所述,若能将日晷法、太阳法、GPS定位等方法或技术应用到L波段探空雷达的标定中,定能在提高标定效率和标定精度上有所作为。

参考文献

- [1] 南京大桥机器厂.GFE(L)1型二次测风雷达原理和维修[R].南京,2003.
- [2] 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.
- [3] 奉超.L波段雷达标定及误差分析[J].气象研究与应用,2007,28(Z3):4-5.
- [4] 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.
- [5] 纪华,王蕊.701C雷达标定时应注意的问题[J].黑龙江气象,2005,(1):38-38.
- [6] 徐琼芳,高庆九.日照迹线位置移动原理和软件设计[J].气象科技,2011,39(2):207-211.
- [7] 王炳忠,汤洁.几种太阳位置计算方法的比较研究[J].太阳能学报,2001,22(4):413-416.
- [8] 曹俊武,黄涛.利用太阳辐射自动校准天气雷达方位仰角[C]//第九届全国雷达学术年会论文集,2004:187-190.
- [9] 王炳忠.太阳常数测定情况进展[J].气象科技,1993,(3):23-31.
- [10] 杨焕先.固定式光伏方阵最佳倾角的分析[J].太阳能学报,1992,13(1):86-92.
- [11] 刘晓舟,许潇锋,杨军.华东三市能见度、气溶胶和太阳辐射变化特征[J].气象科技,2013,41(2):352-359.

Analysis and Improvement of Main Calibration Methods for L-Band Wind Finding Radar

Qin Jianfeng¹ Cheng Changyu¹ Yan Guopao²

(1 Hubei Province Meteorological Information and Support Centre, Wuhan 430074; 2 Wuhan Meteorological Service, Wuhan 430040)

Abstract: Analytical geometry is used for analyzing and proofing main calibration methods of L-Band Wind Finding Radar systems, such as the zero calibration of antenna azimuth, the perpendicular calibration of the optical axis and the mechanical elevation axis, the parallel calibration of the optical axis and the sea level, the consistent calibration of the optical axis and the electrical axis, etc. The theoretical analysis of these calibration methods is made. Based on the calibration methods and the analytical results, the keys of calibration implementation of L-Band Wind Finding Radar systems are summarized. Some shortcomings are analyzed, and the corresponding improvement methods are given. The theoretical analysis may lay a good theoretical basis for technicians to grasp radar calibration methods. The implementation keys may help reduce calibration errors and ensure the reliability of radar detection. The improvement methods can be used as technical references for improving calibration implementation and system device maintenance.

Key words: wind finding radar, calibration method, improvement