

# 提高雷达测量精度的方位角与原点修正方法

李双勋, 王展\*

国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 在雷达测量精度检测中需要将大地坐标转换为雷达坐标以获得目标的真值。首先,介绍了大地坐标系与雷达坐标系的相互转换方法。然后,从大地成果测量误差、雷达参考点选择误差及雷达正北标定误差方面分析了坐标转换误差,并利用某连续波雷达实际测量数据给出了误差仿真结果。最后,提出了提高雷达测量精度的方位角与原点修正方法。将所提方法应用到上述连续波测量雷达中,可使目标真值更为准确,明显减小坐标转换误差对雷达测量精度的影响,进而能更准确地反应雷达测量精度。

**关键词** 测量; 坐标转换; 雷达坐标系; 误差分析; 雷达标定

中图分类号 TN95

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0412001

## Azimuth and Origin Correction Method for Improving Radar Measurement Accuracy

Li Shuangxun, Wang Zhan\*

College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** It is necessary to convert geodetic coordinates into radar coordinates to obtain the true value of the target in the detection of radar measurement accuracy. First, the conversion method between geodetic coordinate system and radar coordinate system is introduced. Then, the coordinate transformation error is analyzed from the aspects of geodetic result measurement error, radar reference point selection error and radar due north calibration error, and the error simulation results are given by using the actual measurement data of a continuous wave radar. Finally, the azimuth and origin correction method for improving the radar measurement accuracy is proposed. The application of the proposed method to the above continuous wave measurement radar can make the true value of the target more accurate, reduce the influence of coordinate conversion error on radar measurement accuracy obviously, and reflect the radar measurement accuracy more accurately.

**Key words** measurement; coordinate conversion; radar coordinate system; error analysis; radar calibration

## 1 引言

雷达的测量误差和数据精度是靶场对雷达作战性能考核的关键内容<sup>[1]</sup>。基于训练任务,采用与光学设备数据对比的方法可对连续波弹道测量雷达的测量精度进行检测。雷达监控分系统、数据处理分系统可对测量结果进行实时储存。在测量结束后,关闭雷达发射机,并对所存储的测量结果进行最小二乘统计处理,以获得动态随机误差。将测量数据

与光学设备数据对比可获得系统误差即检测精度。光学设备获得的是精度较高的大地坐标,将其转换为以雷达为原点的坐标后,可为雷达提供目标的真值。然而,坐标转换误差大小直接影响雷达测量精度能否满足训练和作战的精度要求。本文以雷达测量精度靶场验收为背景,分析了大地坐标系与雷达坐标系的互相转换方法,结合某外场雷达实际测量情况,提出了提高雷达测量精度的方位角与原点修正方法。

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-08-09; 录用日期: 2021-08-18

通信作者: \*1181203374@qq.com

## 2 坐标系转换

### 2.1 坐标系定义

本文涉及的坐标系为大地坐标系<sup>[2]</sup>、球心空间直角坐标系和雷达坐标系。大地坐标系是参考椭球面建立的坐标系,地面上的位置均可用经度( $L$ )、纬度( $B$ )和高度( $H$ )表示。球心空间直角坐标系和雷达坐标系都属于右手坐标系,其中球心空间直角坐标系原点  $O$  为地球质心, $X$  轴指向起始子午面与赤道的交点, $Z$  轴指向地球北极, $Y$  轴与  $XOZ$  面垂直;雷达坐标系原点在雷达处, $x$  轴指向北方, $z$  轴指向东方, $y$  轴指向上空。

### 2.2 大地坐标系转换至雷达坐标系

大地坐标( $L, B, H$ )转换至雷达坐标( $x, y, z$ )的步骤:1)将大地坐标转换至球心空间直角坐标( $X, Y, Z$ );2)将球心空间直角坐标转换至雷达坐标<sup>[3]</sup>。设雷达和测量点的大地坐标分别为( $L_L, B_L, H_L$ )和( $L_{\text{measured}}, B_{\text{measured}}, H_{\text{measured}}$ )。

#### 2.2.1 大地坐标转换至球心空间直角坐标

大地坐标转换至球心空间直角坐标的公式为

$$\begin{cases} X = (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ Y = (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \cdot \sin B \\ N = a / (1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $a$  为参考椭球体的长半轴; $e$  为参考椭球体的第一偏心率。将雷达和测量点的大地坐标代入(1)式后可计算出雷达与测量点的球心空间直角坐标( $X_L, Y_L, Z_L$ )和( $X_{\text{measured}}, Y_{\text{measured}}, Z_{\text{measured}}$ )。

#### 2.2.2 球心空间直角坐标转换至雷达坐标

球心空间直角坐标系中坐标轴  $X, Y, Z$  的旋转矩阵<sup>[4]</sup>为

$$R_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$R_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$R_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

测量点在雷达坐标系中坐标的计算公式为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{measured}} \\ y_{\text{measured}} \\ z_{\text{measured}} \end{bmatrix} = R_Y(-90^\circ) \cdot R_X(B_L) \cdot$$

$$R_Z(L_L - 90^\circ) \cdot \left( \begin{bmatrix} X_{\text{measured}} \\ Y_{\text{measured}} \\ Z_{\text{measured}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} \right), \quad (5)$$

式中: $L_L$  为雷达大地坐标经度; $B_L$  为雷达大地坐标纬度; $(x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}})$  为测量点在雷达坐标系中的坐标。

### 2.3 雷达坐标系转换至大地坐标系

根据 2.2 节中大地坐标系转换至雷达坐标系的过程可反推出测量点雷达坐标转换至大地坐标系的步骤,步骤如下。

1)利用雷达大地坐标经纬度、雷达的球心空间直角坐标( $X_L, Y_L, Z_L$ )和测量点的雷达坐标( $x_{\text{measured}}, y_{\text{measured}}, z_{\text{measured}}$ )可计算出测量点的球心空间直角坐标( $X_{\text{measured}}, Y_{\text{measured}}, Z_{\text{measured}}$ ),其表达式为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{measured}} \\ Y_{\text{measured}} \\ Z_{\text{measured}} \end{bmatrix} = R_Z(90^\circ - L_L) \cdot R_X(-B_L) \cdot$$

$$R_Y(90^\circ) \cdot \begin{bmatrix} x_{\text{measured}} \\ y_{\text{measured}} \\ z_{\text{measured}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2)计算测量点的经度( $L_{\text{measured}}$ )、纬度( $B_{\text{measured}}$ )和高度( $H_{\text{measured}}$ )<sup>[5]</sup>。

经度计算公式为

$$L_{\text{measured}} = \arctan(Y_{\text{measured}}/X_{\text{measured}}) = \arcsin(Y_{\text{measured}}/\sqrt{X_{\text{measured}}^2 + Y_{\text{measured}}^2}). \quad (7)$$

纬度计算公式为

$$B_{\text{measured}}^{(1)} = \arctan(Z_{\text{measured}}/\sqrt{X_{\text{measured}}^2 + Y_{\text{measured}}^2}), \quad (8)$$

$$N_{\text{measured}}^{(i)} = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_{\text{measured}}^{(i)}}, \quad (9)$$

$$B_{\text{measured}}^{(i+1)} = \arctan \left[ \frac{Z_{\text{measured}} + N_{\text{measured}}^{(i)} e^2 \sin B_{\text{measured}}^{(i)}}{\sqrt{X_{\text{measured}}^2 + Y_{\text{measured}}^2}} \right], \quad (10)$$

式中: $B_{\text{measured}}^{(1)}$  表示测量点纬度初值; $B_{\text{measured}}^{(i)}$  表示第  $i$  次迭代的纬度值。

高度计算公式为

$$H_{\text{measured}} = \frac{Z_{\text{measured}}}{\sin B_{\text{measured}}} - N_{\text{measured}}(1 - e^2) = \frac{\sqrt{X_{\text{measured}}^2 + Y_{\text{measured}}^2}}{\cos B_{\text{measured}}} - N_{\text{measured}}. \quad (11)$$

### 3 坐标转换误差分析

依据靶场验收实际情况,当采用 2.2 节和 2.3 节中方法进行坐标系转换时,忽略计算过程中有效位数保留引入的误差,转换误差的主要来源是大地成果测量误差、雷达参考点选择误差及雷达正北标定误差。在坐标转换误差分析中,大地成果测量是基于 WGS-84 坐标系<sup>[6]</sup>进行的,参考平台放置于某外场。各误差来源对坐标转换后的目标距离、方位角及俯仰角影响的分析如下。

#### 3.1 大地成果测量误差

大地成果测量误差主要由大地成果的定位精度决定<sup>[7]</sup>。当目标与雷达相距 477.7204 m 时,大地成果的定位精度对坐标转换误差的影响如表 1 所示。可以发现,随着定位精度的提高,坐标转换误差在减小。

表 1 大地测量精度与坐标转换误差的关系

Table 1 Relationship between geodetic accuracy and coordinate conversion error

Positioning accuracy /m	0.1	0.3	0.5	1.0
Range error /m	0.1077	0.3232	0.5387	1.0775
Azimuth error /( $^{\circ}$ )	0.0127	0.0380	0.0633	0.1267
Elevation error /( $^{\circ}$ )	0.0117	0.0352	0.0587	0.1175

#### 3.2 雷达参考点选择误差

理论上雷达参考点应为雷达接收机的相位中心,但在实际测量中使用的是雷达随动箱,随动箱与雷达相位中心的位置关系如图 1 所示。可以发现,随动箱位置与雷达相位中心有一定的距离偏差,当侧偏为 70.5 cm,高低差为 15 cm,目标与雷达相距 477.7204 m 时,雷达参考点选择带来的转换误差:距离误差为 0.0529 m;方位角误差为 0.0826 $^{\circ}$ ;俯仰

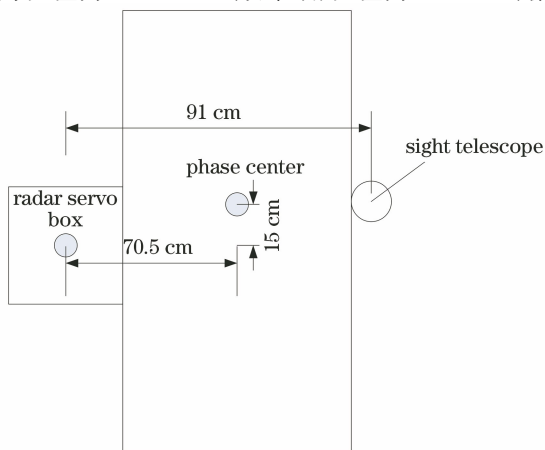


图 1 雷达参考点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radar reference point

角误差为 0.0177 $^{\circ}$ 。

#### 3.3 雷达正北标定误差

雷达正北标定<sup>[8]</sup>原理如图 2 所示。雷达正北方位角即雷达机械轴法线与正北方向的夹角,如图 2 中  $\gamma$  角所示。完成雷达正北标定的步骤如下。

- 1) 进行方位标和雷达机械轴中心(伺服中心)的大地测量,计算得到图 2 中的  $\beta$  角。
- 2) 转动伺服瞄准方位标,得到图 2 中的  $\alpha$  角。
- 3) 计算雷达正北方位角  $\gamma$ 。

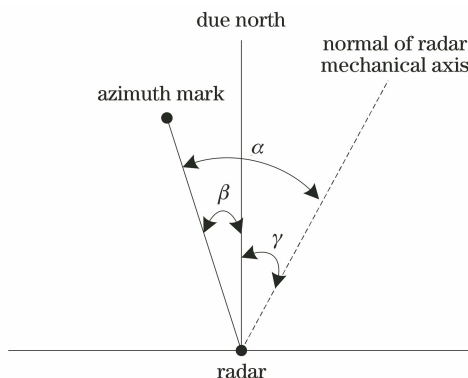


图 2 雷达正北标定原理图

Fig. 2 Schematic diagram of radar due north calibration

当利用大地成果进行雷达正北标定时,误差来源主要包括大地测量误差导致的角度误差和雷达瞄准方位标的误差。

大地测量误差导致的角度误差与大地测量精度及方位标与雷达间距离的关系很大,误差随着雷达与方位标间距离的增大而减小。当方位标与雷达间的距离为 1546.6854 m 时,大地测量精度带来的正北标定误差如表 2 所示。

表 2 大地成果精度与正北标定误差的关系

Table 2 Relationship between accuracy of geodetic results and due north calibration error

Positioning accuracy /m	0.1	0.3	0.5	1
Azimuth error /( $^{\circ}$ )	0.0040	0.0119	0.0199	0.0397

如图 1 所示,雷达通过瞄准镜瞄准方位标,而瞄准镜位置与雷达机械轴中心存在位置偏移,当侧偏为 91 cm,高低差为 15 cm 时,引起的正北标定误差即方位角误差为 0.1066 $^{\circ}$ 。

### 4 实测数据验证

在连续波弹道测量雷达测量精度指标的靶场验收中,采用与光学设备数据对比的方法获取测量精度<sup>[9-10]</sup>,具体步骤如下。

- 1) 按图 3 所示的位置架设雷达、光学设备和枪,枪在雷达后方。

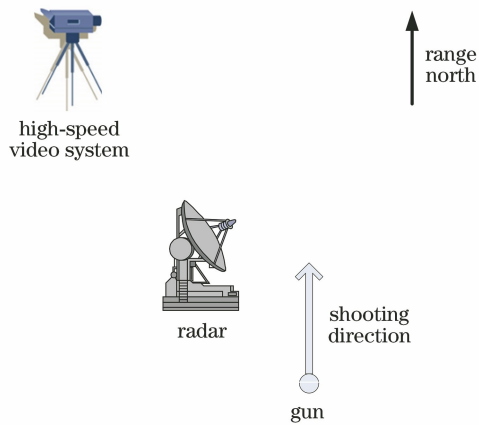


图 3 精度比对中雷达与光学设备的布置

Fig. 3 Arrangement of radar and optical equipments in precision comparison

- 2) 射击弹丸, 雷达和光学设备同时测量并记录数据。
- 3) 对存储的多普勒信号进行分析与处理以获得

距离和角度测量结果。

4) 将光学设备测量数据进行坐标转换及误差修正, 进而得到目标的光学设备测量结果。

5) 将雷达测量结果与光学设备测量结果进行对比以获得测量精度。

步骤 4) 中的坐标转换依据 2.2 节中的方法进行, 在某特定的定位精度条件下, 其误差修正依据第 3 节进行, 此时仅考虑雷达参考点选择误差及雷达正北标定误差, 即对雷达坐标系坐标原点与方位角进行修正。表 3 为直径为 12.7 mm 弹丸测量结果修正前后的对比, 左侧数据为雷达测量结果, 右侧为对光学设备测量数据进行坐标转换及误差修正后的数据。测量精度结果如表 4 所示。可以发现, 坐标转换修正后的测距、测角精度均满足指标要求, 且经过修正后距离精度提高了 0.060 m, 方位角测量精度提高了 0.473 mrad, 俯仰角测量精度提高了 0.199 mrad。

表 3 直径为 12.7 mm 的弹丸测量结果修正前后对比

Table 3 Comparison of measurement results of projectile with diameter of 12.7 mm before and after correction

Order	Radar measurement result			Optical device measurement result		
	Range /m	Azimuth /( $^{\circ}$ )	Elevation angle /( $^{\circ}$ )	Range/m	Azimuth /( $^{\circ}$ )	Elevation angle /( $^{\circ}$ )
1	481.934	7.049	1.002	482.045	7.057	1.012
2	480.582	7.141	1.020	480.570	7.130	1.012
3	479.700	7.077	1.019	479.794	7.087	1.014
4	481.290	7.077	1.038	481.200	7.074	1.039
5	479.266	7.121	1.036	479.156	7.120	1.037
6	483.632	7.090	1.009	483.725	7.088	0.995
7	485.204	7.149	1.020	485.360	7.147	1.010
8	479.281	7.061	1.010	479.337	7.075	1.007
9	482.674	7.128	1.038	482.751	7.117	1.035
10	483.191	7.127	1.029	483.303	7.120	1.013
11	481.721	7.127	1.030	481.538	7.121	1.024
12	483.259	7.062	1.041	483.365	7.038	1.056
13	482.267	7.107	1.025	482.340	7.083	1.031
14	484.352	7.136	1.034	483.911	7.098	1.042
15	483.567	7.084	1.020	483.476	7.050	1.022
16	482.883	7.121	1.034	482.366	7.093	1.046
17	483.376	7.128	1.031	483.544	7.092	1.042
18	485.503	7.128	1.038	485.654	7.086	1.042
19	480.579	7.117	1.035	480.477	7.088	1.031
20	482.950	7.071	1.025	483.108	7.044	1.017
21	482.954	7.117	1.032	483.076	7.092	1.027

表 4 雷达测量精度统计

Table 4 Statistics of radar measurement accuracy

Error	Systematic error	Random error
Range /m	0.003	0.185
Azimuth /mrad	0.260	0.290
Elevation angle /mrad	0.010	0.150

## 5 结 论

首先,阐述了大地坐标系与雷达坐标系的相互转换过程。然后,从大地成果测量误差、雷达参考点选择误差及雷达正北标定误差方面分析了坐标转换的误差。最后,将分析方法应用至某外场连续波弹道测量雷达的测量精度靶场验收中,实测数据结果表明,所提方法能提高坐标转换精度,减小坐标转换误差对雷达测量精度的影响,进而能更准确地反应雷达测量精度。

### 参 考 文 献

- [1] Cheng S B. Design of simulation and data processing software for accuracy calibration flight of pulse instrumentation radar [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008.  
程时兵. 脉冲雷达精度校飞仿真与数据处理软件的设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2008.
- [2] Zai C X, Zhu L Y, Wang H, et al. Transformation of China 2000 coordinate system and geocentric reference coordinate system [J]. Computer Engineering & Software, 2020, 41(8): 136-139.  
宰春旭, 朱兰艳, 王晗, 等. 中国 2000 坐标系与地心参心坐标系转换实现[J]. 软件, 2020, 41(8): 136-139.
- [3] Ling Z Y. Transformation of geodetic coordinate system and topocentric horizon rectangular coordinates system [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2009(4): 31-34.  
凌震莹. 大地坐标系与站心地平直角坐标系的坐标转换[J]. 声学及电子工程, 2009(4): 31-34.
- [4] Ma L, Shao X F, Yang T P. A big rotation angle 3D coordinate transformation method involving geodetic coordinate[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(2): 164-166.  
马雷, 邵先锋, 杨泰朋. 一种涉及大地坐标的大角度三维坐标转换方法[J]. 山西建筑, 2021, 47(2): 164-166.
- [5] Li Z C. Error analysis and research of coordinate transformation algorithm and model [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.  
李卓昌. 坐标转换求解算法及模型误差分析与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [6] Zhang X W, Chen Z W. Precise transformation method and program realization between WGS84 and CGCS2000 coordinates [J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(6): 1-7.  
张祥文, 陈正伟. WGS84 与 CGCS2000 坐标的精密转换方法和程序实现[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(6): 1-7.
- [7] Song D P, Li Y H, Cui S M, et al. Accuracy analysis of GPS/Galileo/QZSS precision single point positioning [J]. Geospatial Information, 2021, 19(5): 5, 63-67.  
宋大鹏, 李玉海, 崔素梅, 等. GPS/Galileo/QZSS 精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息, 2021, 19(5): 5, 63-67.
- [8] Li R, Wei W, Huang Z, et al. A method of vehicle-borne radar azimuth calibration based on GPS location [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2008, 23(5): 499-503.  
李容, 韦巍, 黄仲, 等. 一种基于 GPS 定位的雷达方位标定方法[J]. 成都信息工程学院学报, 2008, 23(5): 499-503.
- [9] Jia W W, Liu P Z, Tang Z L, et al. Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(8): 1670-1677.  
贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1670-1677.
- [10] Yang L, Zhang N. Measurement system design of spatial position accuracy of dynamic targets [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1304001.  
杨亮, 张宁. 动目标空间位置精度测量系统设计[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1304001.