

文章编号: 1671-0576(2021)03-0043-07

试验平台对高精度测量雷达测角误差的影响及补偿

杨明远, 邹波, 江利中, 顾泽凌, 李雁斌

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要: 进行高精度雷达测角误差测量时,通常利用试验平台与雷达的转动来模拟目标与雷达之间的相对转动。针对试验平台与雷达之间的安装误差影响测角精度的问题,分析了安装误差对测角误差的影响,并进行仿真验证。仿真结果表明:旋转中心不重合引起的测角误差是固定误差,在测角试验过程中可以根据误差公式补偿修正;安装面不平行引起的测角误差在较小的测角范围内近似为线性误差,可根据实际情况进行线性补偿修正;不共轴引起的测角误差与旋转角度之间为非线性关系,应依据相关公式进行补偿修正。

关键词: 高精度测量雷达; 测角误差; 旋转中心; 不平行; 不共轴

中图分类号: TN953⁺.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.03.008

Influence and Compensation of Test Platform on Angle Measurement Error of High Accuracy Measurement Radar

YANG Ming-yuan, ZOU Bo, JIANG Li-zhong, GU Ze-ling, LI Yan-bin

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In angle error measurement of high accuracy measurement radar, the relative rotation between target and radar is usually simulated by the rotation of test platform and radar. Aiming at the problem that the installation error between the test platform and the radar affects the angle measurement accuracy, the influence of the installation error on the angle measurement error is analyzed, and simulation verification is carried out. The simulation results show that the angle measurement error caused by the non-coincidence of the rotation centers is a fixed deviation, which is compensated and corrected according to the error formula during the angle measurement test. The angle measurement error caused by the non-parallel mounting surfaces can be approximated as a linear error in a smaller angle measurement range, and liner compensation can be performed according to the actual situation. There is a non-linear relationship between the angle measurement error caused by non-coaxiality and the rotation angle, which should be compensated and corrected according to the relevant formula.

Key words: high accuracy measurement radar; angle measurement error; center of rotation; non-parallel; non-coaxial

0 引言

测向定位是雷达的基本功能。早期的雷达通过机械扫描的方式根据回波的强弱对目标进行方位测量,这种雷达具有故障率较高,测向精度偏低等缺点。现代复杂的战场环境对雷达提出了更高的要求,尤其是具备高精度目标指向和跟踪功能的雷达,对测角精度的要求很高。随着雷达技术的发展,单脉冲测向技术^[1-2]的应用大大提高了雷达测角精度。

雷达测角精度标校是高精度测量雷达设计和研制过程中的重要工作内容^[3-4]。测角精度标校试验通常将雷达安装在试验平台上,目标置于雷达正前方的较远处,通过试验平台的转动来模拟目标的方向运动。试验过程中,影响雷达系统精度的因素比较多^[5-8],其中雷达与试验平台间的安装误差是影响标校精度的主要原因之一。对于高精度测量雷达,必须对该误差进行修正补偿,才能保证试验过程中雷达的角度测量精度。

1 标校系统与测角模型建立

测角精度标校系统主要由试验平台、雷达、模拟目标、目标支架和微波暗室等组成,如图 1 所示。雷达安装在试验平台上,目标放置在雷达正前方较远处的支架上,试验平台带动雷达进行方位向和俯仰向转动,模拟目标的方位向和俯仰向运动。雷达跟踪到目标后,沿着试验平台转动的反方向运动,并实时反馈测量到的目标方位角和俯仰角。通过分析方位角和俯仰角的测量精度即可评估雷达的测向性能^[9-10]。

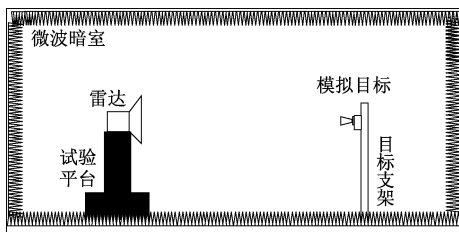
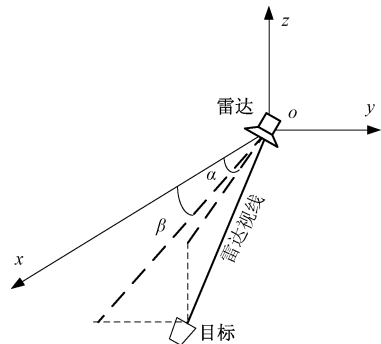


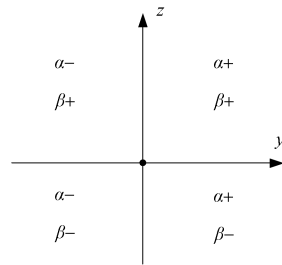
图 1 测角精度标校系统

测角精度标校系统几何关系如图 2 所示。其中图 2(a)为以试验平台中心为坐标原点建立的

测角坐标系 $oxyz$ 。 x 轴指向试验平台的正前方, z 轴指向试验平台正上方, y 轴指向由右手法则确定。试验平台绕 y 轴旋转模拟目标俯仰向运动,绕 z 轴旋转模拟目标方位向运动。雷达视线在 xoy 面上的投影与 x 轴的夹角为方位角 α ,在 xoz 面上的投影与 x 轴的夹角为俯仰角 β 。同时定义方位角朝向 y 轴正方向为正,俯仰角朝向 z 轴正方向为正。方位角及俯仰角的极性定义如图 2(b) 所示。



(a) 测角坐标系



(b) 极性定义

图 2 测角精度标校系统几何关系图

雷达与试验平台之间的安装误差将导致雷达测角误差,因此为了保证雷达的测角精度,需要对安装误差进行补偿。因安装误差导致的测角误差主要包括:试验平台旋转中心和雷达旋转中心不重合引起的测角误差,雷达安装面与试验平台安装面不平行引起的测角误差,试验平台的旋转轴与雷达的旋转轴不共轴引起的测角误差等。

2 测角误差分析

2.1 旋转中心不重合引起的测角误差

在试验设备安装过程中,由于试验平台的旋转中心和雷达的旋转中心不重合,会导致雷达角度测量结果存在偏差。图 3 是旋转中心不重合引

起方位角测角误差的示意图。以试验平台中心 o 为坐标原点建立坐标系 oxy , 方位向上平台中心与雷达旋转中心距离为 L_1 , 雷达与目标距离为 R_0 , 试验平台沿方位向的旋转角度为 α , 雷达跟踪后测得的方位角为 $\hat{\alpha}$, 雷达跟踪的方位角误差为 ξ_0 。

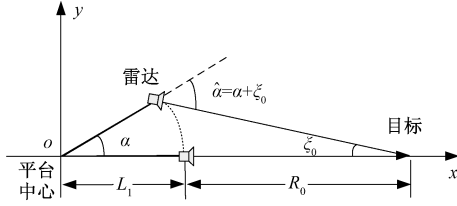


图 3 旋转中心不重合示意图

由图 3 可知, 雷达跟踪后测得的方位角

$$\hat{\alpha} = \alpha + \xi_0 \quad (1)$$

设目标的坐标向量 $t = [L_1 + R_0, 0]$, 雷达的

坐标向量 $s = [L_1, 0]$, 试验平台旋转前雷达相对目标的位置向量

$$a = s - t = [-R_0, 0] \quad (2)$$

试验平台旋转角度 α 后, 雷达坐标向量

$$\hat{s} = [L_1 \cos \alpha, L_1 \sin \alpha] \quad (3)$$

此时, 雷达相对于目标的位置向量

$$b = \hat{s} - t = [L_1 \cos \alpha - L_1 - R_0, L_1 \sin \alpha] \quad (4)$$

则方位角误差 ξ_0 计算公式为

$$\begin{aligned} \xi_0 &= \arccos\left(\frac{a \cdot b}{|a| |b|}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{L_1 \cos \alpha - L_1 - R_0}{\sqrt{2L_1^2 + R_0^2 + 2R_0L_1 - 2L_1^2 \cos \alpha + 2R_0L_1 \cos \alpha}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 方位角误差和方位向旋转中心距离 L_1 、雷达与目标距离 R_0 、方位向旋转角度 α 相关。俯仰角的分析过程同上, 俯仰角误差与俯仰向旋转中心距离 L_2 、雷达与目标距离 R_0 、俯仰向旋转角度 β 相关。

2.2 安装面不平行引起的测量误差

(1) 测量误差模型

试验平台安装面不平, 会导致雷达安装面与试验平台安装面不平行, 从而引起测角误差, 如图 4 所示。以试验平台中心 o 为坐标原点建立坐标系, 设目标在 x 轴上, 由于安装面不平行, 雷达阵面法线与目标-雷达连线在方位向上存在偏差

δ_z , 在俯仰向上存在偏差 δ_y 。

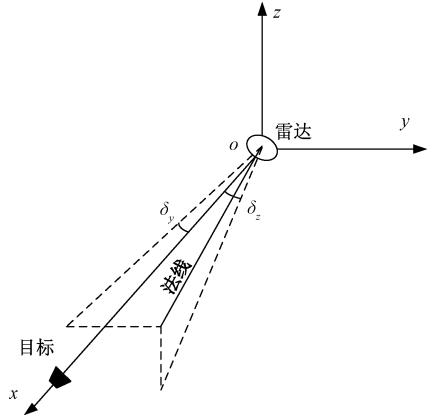


图 4 安装面不平行示意图

令雷达阵面法线向量 $c = [1, 0, 0]$, 目标位置向量 $t = [x, 0, 0]$, 绕 x, y, z 轴分别旋转角度 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$, 则旋转矩阵 R_x, R_y, R_z 可以表示为

$$\begin{cases} R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\ R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \\ R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

则存在误差的阵面法线向量可以表示为

$$\begin{aligned} c_{yz} &= c \cdot R_y \cdot R_z \\ &= [\cos \delta_y \cos \delta_z, \cos \delta_y \sin \delta_z, -\sin \delta_y] \end{aligned} \quad (7)$$

(2) 方位角测量误差

安装面在方位向上不平时, 试验平台绕 z 轴旋转角度 α , 即沿方位向旋转角度 α , 同时雷达阵面法线沿方位向旋转角度 α , 得到旋转后的阵面法线向量

$$\begin{aligned} a_1 &= c_{yz} \cdot R_z \\ &= \begin{bmatrix} \cos \delta_y \cos \delta_z \\ \cos \delta_y \sin \delta_z \\ -\sin \delta_y \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= [\cos \delta_y \cos(\delta_z + \alpha), \cos \delta_y \sin(\delta_z + \alpha), -\sin \delta_y] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: T 表示矩阵的转置运算。则沿方位向旋转角度 α 后, 阵面法线向量在 xoy 面的投影为

$$a_z = [\cos \delta_y \cos(\delta_z + \alpha), \cos \delta_y \sin(\delta_z + \alpha), 0] \quad (9)$$

则雷达测量方位角 α' 等于雷达阵面法线在 xoy 面投影与目标位置向量的夹角, 计算公式为

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left(\frac{\mathbf{a}_z \cdot \mathbf{t}}{|\mathbf{a}_z| |\mathbf{t}|}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{x \cos \delta_y \cos \delta_z + \alpha}{x \sqrt{(\cos \delta_y \cos \delta_z + \alpha)^2 + (\cos \delta_y \sin \delta_z + \alpha)^2}}\right) \\ &= \alpha + \delta_z \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 安装面方位向不平行时, 方位角测量值与理论值之间存在一个固定偏差 δ_z , 因此在方位角测量时可以对该偏差进行补偿。

(3) 俯仰角测量误差

安装面俯仰向不平行时, 试验平台绕 y 轴旋转角度 β , 即沿俯仰向旋转角度 β , 同时雷达阵面法线沿俯仰向旋转角度 β 角度, 得到旋转后的阵面法线向量 \mathbf{a}_z 及其在 xoz 面的投影 \mathbf{a}_y , 表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_z &= \mathbf{c}_{yz} \cdot \mathbf{R}_y \\ &= \begin{bmatrix} \cos \delta_y \cos \delta_z \\ \cos \delta_y \sin \delta_z \\ -\sin \delta_y \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ &= [\cos \delta_y \cos \delta_z \cos \beta - \sin \delta_y \sin \beta, \cos \delta_y \sin \delta_z, \\ &\quad -\cos \delta_y \cos \delta_z \sin \beta - \sin \delta_y \cos \beta] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_y &= [\cos \delta_y \cos \delta_z \cos \beta - \sin \delta_y \sin \beta, 0, \\ &\quad -\cos \delta_y \cos \delta_z \sin \beta - \sin \delta_y \cos \beta] \end{aligned} \quad (12)$$

则雷达测量俯仰角 β' 等于雷达阵面法线向量在 xoz 面投影与目标位置向量的夹角, 表达式为

$$\begin{aligned} \beta' &= \arccos\left(\frac{\mathbf{a}_y \cdot \mathbf{t}}{|\mathbf{a}_y| |\mathbf{t}|}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{\cos \delta_y \cos \delta_z \cos \beta - \sin \delta_y \sin \beta}{\sqrt{(\cos \delta_y \cos \delta_z)^2 + \sin^2 \delta_y}}\right) \\ &= \beta + \delta_y \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, 安装面俯仰向不平行时, 俯仰角测量值与理论值存在一个固定偏差 δ_y , 因此在俯仰角测量时可以对该偏差进行补偿。

2.3 不共轴引起的测量误差

(1) 测量误差模型

测角精度标校试验过程中会出现试验平台的旋转轴与雷达的旋转轴不共轴的现象。旋转轴不

共轴引起测角误差的示意图如图 5 所示。以试验平台旋转中心为坐标原点、试验平台方位向旋转轴为 z 轴、试验平台俯仰向旋转轴为 y 轴, 根据右手法则建立坐标系 $oxyz$ 。以存在偏差的雷达阵面中心 o' 为原点建立坐标系 $o'x'y'z'$ 。安装后雷达旋转轴相对于试验平台旋转轴在 y 轴向存在偏差 m , 在 z 轴向存在偏差 n 。

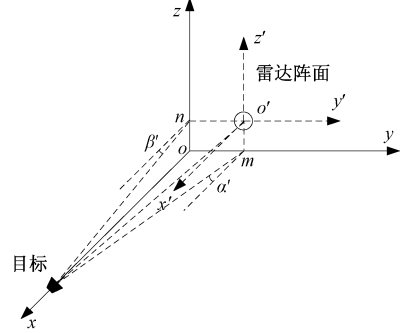


图 5 旋转轴不共轴示意图

在 $oxyz$ 坐标系下, 定义目标位置向量 $\mathbf{t} = [x, 0, 0]$, 雷达中心坐标向量 $\mathbf{o} = [0, m, n]$, 雷达阵面法线方向向量 $\mathbf{c} = [1, 0, 0]$, 则参考向量 \mathbf{d} 为

$$\mathbf{d} = \mathbf{c} + \mathbf{o} = [1, m, n] \quad (14)$$

(2) 方位角测量误差

当试验平台旋转轴与雷达旋转轴不共轴时, 试验平台旋转轴绕 z 轴旋转角度 α , 即沿方位向旋转角度 α , 同时雷达绕 z 轴旋转角度 α , 则旋转后的雷达阵面中心坐标向量

$$\begin{aligned} \mathbf{o}' &= \mathbf{o} \cdot \mathbf{R}_z \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ m \\ n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= [-m \sin \alpha, m \cos \alpha, n] \end{aligned} \quad (15)$$

旋转后的参考向量

$$\begin{aligned} \mathbf{d}' &= \mathbf{d} \cdot \mathbf{R}_z \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ m \\ n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= [\cos \alpha - m \sin \alpha, \sin \alpha + m \cos \alpha, n] \end{aligned} \quad (16)$$

$o'x'y'z'$ 坐标系中, 旋转后的雷达阵面法线向量

$$\mathbf{c}_z = \mathbf{d}' - \mathbf{o}' = [\cos \alpha, \sin \alpha, 0] \quad (17)$$

旋转后雷达相对于目标的位置向量

$$\mathbf{b}_z = \mathbf{t} - \mathbf{o}' = [x + m \sin \alpha, -m \cos \alpha, -n] \quad (18)$$

旋转后雷达阵面法线向量在 xoy 面的投影

$$\mathbf{c}_{zz} = [\cos\alpha, \sin\alpha, 0] \quad (19)$$

旋转后雷达相对于目标的位置向量在 xoy 面的投影

$$\mathbf{b}_z = [x + m \sin\alpha, -m \cos\alpha, 0] \quad (20)$$

则雷达测量得到的方位角

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left(\frac{\mathbf{c}_{zz} \cdot \mathbf{b}_z}{|\mathbf{c}_{zz}| |\mathbf{b}_z|}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{\cos\alpha}{1 + 2m \sin\alpha/x + m^2/x^2}\right) \\ &= \alpha + \xi_1 \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\xi_1 = \arctan\left(\frac{-m \cos\alpha}{x + m \sin\alpha}\right) \quad (22)$$

式中: ξ_1 为不共轴导致的方位角测量误差。

由式(21)可知,试验平台的旋转轴与雷达的旋转轴在方位向不共轴时会产生方位向测角误差,该误差与雷达到目标的距离、试验平台旋转轴到雷达旋转轴的方位向距离和方位向旋转角度相关。

(3) 俯仰角测量误差

当试验平台旋转轴与雷达旋转轴不共轴时,试验平台绕 y 轴旋转角度 β ,即沿俯仰向旋转角度 β ,同时雷达绕 y 轴旋转角度 β ,则旋转后的雷达中心坐标向量

$$\begin{aligned} \mathbf{o}' &= \mathbf{o} \cdot \mathbf{R}_y \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ m \\ n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ &= [n \sin\beta, m, n \cos\beta] \end{aligned} \quad (23)$$

旋转后的参考向量

$$\begin{aligned} \mathbf{d}' &= \mathbf{d} \cdot \mathbf{R}_y \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ m \\ n \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ &= [\cos\beta + n \sin\beta, m, n \cos\beta - \sin\beta] \end{aligned} \quad (24)$$

$\mathbf{o}'x'y'z'$ 坐标系中,旋转后的雷达阵面法线向量

$$\mathbf{c}_y = \mathbf{d}' - \mathbf{o}' = [\cos\beta, 0, -\sin\beta] \quad (25)$$

旋转后雷达相对于目标的位置向量

$$\mathbf{b}_\beta = \mathbf{t} - \mathbf{o}' = [x - n \sin\beta, -m, -n \cos\beta] \quad (26)$$

旋转后雷达阵面法线向量在 xoz 面的投影

$$\mathbf{c}_{yy} = [\cos\beta, 0, -\sin\beta] \quad (27)$$

旋转后雷达相对于目标的位置向量在 xoz 面的

投影

$$\mathbf{b}_y = [x - n \sin\beta, 0, -n \cos\beta] \quad (28)$$

则雷达测量得到的俯仰角

$$\begin{aligned} \beta' &= \arccos\left(\frac{\mathbf{c}_{yy} \cdot \mathbf{b}_y}{|\mathbf{c}_{yy}| |\mathbf{b}_y|}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{\cos\beta}{1 - 2n(\sin\beta)/x + n^2/x^2}\right) \\ &= \beta + \xi_2 \end{aligned} \quad (29)$$

其中

$$\xi_2 = \arctan\left(\frac{-n \cos\beta}{x - n \sin\beta}\right) \quad (30)$$

式中: ξ_2 为不共轴导致的俯仰角误差。

由式(29)可知,试验平台旋转轴与雷达旋转轴在俯仰向不共轴时会产生俯仰向测角误差,该误差与雷达到目标的距离、试验平台旋转轴到雷达旋转轴的俯仰向距离和俯仰向旋转角度相关。

3 仿真分析

3.1 旋转中心不重合情况

对试验平台旋转中心与雷达旋转中心不重合情况进行仿真分析。设试验过程中目标距离雷达 30 m,雷达旋转中心距离测试平台旋转中心 0.2 m,试验平台转动范围为 $-40^\circ \sim +40^\circ$ 。由于试验平台旋转中心和雷达旋转中心不重合,导致角度测量值与理论值存在偏差。旋转中心不重合导致的测角误差的仿真结果如图 6 所示。可以看出:试验平台旋转角度越大,测角误差也越大;在小的旋转角度范围内,测角误差近似为线性变化。

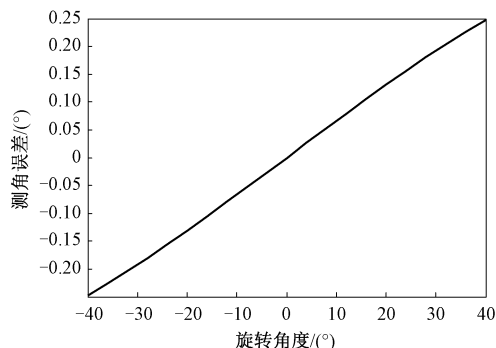


图 6 旋转中心不重合导致的测角误差

对试验平台旋转中心与雷达旋转中心偏离距离和测角误差的关系进行仿真分析。设试验过程

中目标距离雷达 30 m, 试验平台转动角度为 20° , 仿真结果如图 7 所示。可知, 两个旋转中心之间的偏离距离越大, 测角误差也越大。

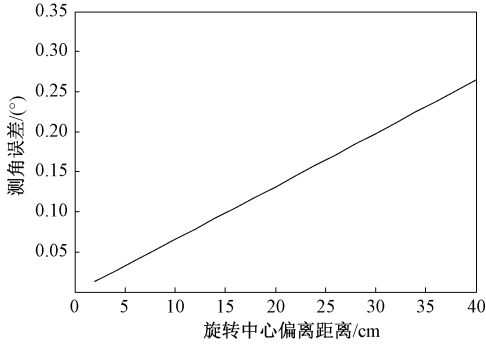


图 7 旋转中心偏离距离与测角误差关系

3.2 安装面不平行情况

对雷达安装面与试验平台安装面不平行引起的测角误差进行仿真分析。设雷达安装面与试验平台安装面的不平行误差为方位向 0.4° 、俯仰向 0.7° , 试验平台方位向转动范围为 $-10^\circ \sim +10^\circ$, 雷达方位角测量曲线与理论曲线如图 8 所示。可以看出, 方位角测量值与理论值之间存在固定偏差 0.4° , 因此在方位角精度标校试验过程中可以根据实际情况进行固定值测角误差补偿。

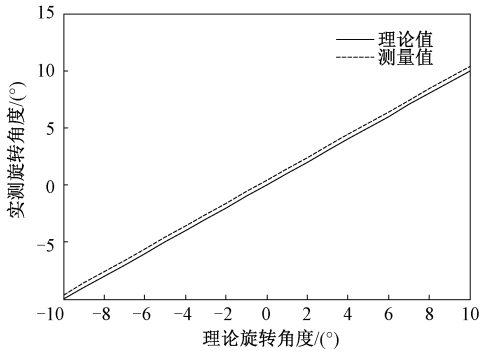


图 8 安装面不平时方位角测量仿真结果

试验平台俯仰向转动范围为 $-10^\circ \sim +10^\circ$, 雷达俯仰角测量值与理论值如图 9 所示。可以看出, 俯仰角测量值与理论值之间存在固定偏差 0.7° , 因此在俯仰角精度标校试验过程中可以根据实际情况进行固定值测角误差补偿。

3.3 不共轴情况

对试验平台旋转轴和雷达旋转轴不共轴的情

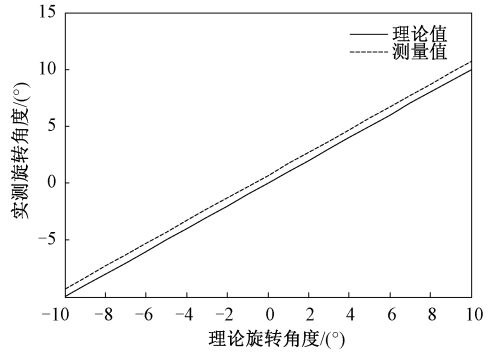


图 9 安装面不平时俯仰角测量仿真结果

况进行仿真分析。设目标距离雷达 30 m, 雷达在 y 轴向的安装偏差为 0.07 m, 在 z 轴向的安装偏差为 0.05 m。试验平台绕 z 轴从 -40° 旋转至 $+40^\circ$, 方位角测量误差的仿真曲线如图 10 所示。可以看出, 试验平台旋转过程中旋转角度与方位角测量误差成非线性关系。

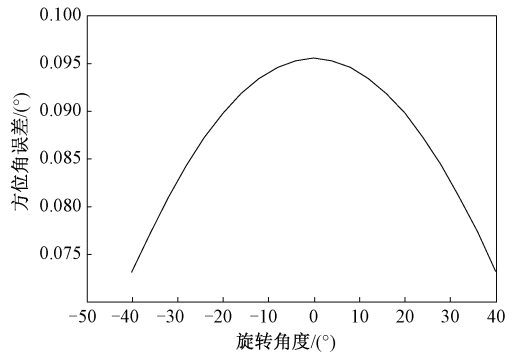


图 10 不共轴时方位角测量误差仿真结果

试验平台绕 y 轴从 -40° 旋转至 $+40^\circ$, 俯仰角测量误差的仿真曲线如图 11 所示。可以看出, 试验平台旋转过程中旋转角度与俯仰角测量误差成非线性关系。

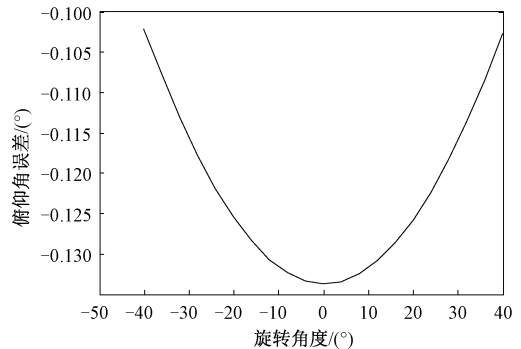


图 11 不共轴时俯仰角测量误差仿真结果

4 结论

针对测角精度标校试验过程中,试验平台与雷达之间的安装误差影响测角精度的问题,建立了误差分析模型,分析了三种安装误差对测角精度的影响。通过仿真分析可知:旋转中心不重合引起的测角误差是固定偏差,在测角试验过程中根据误差公式很容易补偿修正;安装面不平行引起的测角误差在较小的测角范围内可以近似为线性误差,可以根据实际情况进行线性补偿修正;不共轴引起的测角误差与旋转角度之间为非线性关系,应依据相关公式进行补偿修正。

参考文献

- [1] 王玉涛. 单脉冲测角技术及工程实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995: 245-311.
- [3] 张洪波. 子阵级数字阵列雷达单脉冲测角精度影响因素分析[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(3): 38-

41.

- [4] 姜义成, 喻春曦. 一种改善单脉冲雷达测角精度的新方法[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(5): 380-383, 388.
- [5] 陶军, 唐晓雷, 黄晓辉. 阵面安装误差对相控阵雷达测角精度的影响[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(6): 1179-1186.
- [6] 赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 舰载雷达零位标校新法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(2): 169-171, 176.
- [7] 张虎龙, 李娟妮. 机载火控雷达天线阵面安装误差的高精度校准方法[J]. 现代电子技术, 2011, 34(19): 4-6, 10.
- [8] 朱泽锋, 张恒华, 王鹏宇. 高精度测量雷达安装误差的测试和调平方法研究[J]. 计量与测试技术, 2012, 39(6): 18-19.
- [9] 马可, 张远安, 王仁涛, 等. 主动防护雷达的角度标校[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 30-33, 41.
- [10] 王录, 路建功, 张维宁. 精密测量雷达常规标校误差校正参数研究[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(1): 1-5, 41.

(上接第42页)

动态码序列匹配方法捕获灵敏度性能损失可以控制在较小范围内,能够满足应用需求。

4 结束语

针对常规扩频系统高动态微弱信号捕获灵敏度低的问题,提出一种动态码序列匹配方法。在本地产生具有相同动态多普勒频率和多普勒频率变化率特性的载频和扩频码序列,对接收信号进行混频,并对混频后的基带信号进行码序列匹配,将匹配结果进行多次非相干累积,提高接收设备的捕获灵敏度。在消耗硬件资源不变的前提下,动态码序列匹配方法解决了高动态信号多比特累积时前后比特间频率和相位特性发生变化导致的累积增益降低的问题,且可以兼容原有的软件架构,因此特别适用于高速超远距通信系统。

参考文献

- [1] 祁东杰. 大频偏、高动态扩频信号捕获跟踪技术及

其FPGA实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

- [2] 赵春燕, 崔崑. 一种可克服非相干数据影响的直扩信号捕获算法[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1491-1496.
- [3] 谢伟. GPS中伪随机码的捕获技术研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2007.
- [4] 黄振, 陆建华, 杨士中. 基于DMF直扩系统捕获性能的研究[J]. 电路与系统学报, 2002, 7(1): 92-95.
- [5] 袁梦云, 张继娜, 赵忠凯. 基于FFT的高动态扩频信号快速捕获[J]. 应用科技, 2016, 43(1): 13-16.
- [6] 陈伟波, 杜晓冬. 基于广义差分相干累加的高灵敏度GPS捕获算法[J]. 遥测遥控, 2013, 34(1): 34-38.
- [7] 唐斌, 董绪荣. 基于简易差分相干积累的高灵敏度GPS软件接收机捕获算法[J]. 信号处理, 2009, 25(5): 832-836.
- [8] 顾建华, 严国军, 杨久东. GPS软件接收机信号快速捕获新方法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(6): 67-71.