

转台对天线阵列角模拟精度的影响

杨黎都, 张德锋, 王立冬, 韩国强
(中国人民解放军63880部队, 河南 洛阳 471003)

摘要: 转台和天线阵列是射频仿真试验系统的两个主要组成部分, 射频仿真试验系统的精度是以天线阵列角精度来表征的。由于转台误差以及转台中心与天线阵列球心不重合等原因, 会影响天线阵列角模拟精度。针对转台的运动性能, 结合天线阵列三元组工作原理, 研究计算了转台静态误差和动态误差的数学模型, 最后给出了转台对天线阵列角模拟精度影响的仿真结果。

关键词: 射频仿真; 转台; 天线阵列; 精度

中图分类号: V271.4; TN124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)11-0100-05

Effects of the Rotating Platform on Antenna-Array Angle Simulation Precision

YANG Lidu, ZHANG Defeng, WANG Lidong, HAN Guoqiang
(No. 63880 Unit of PLA, Luoyang 471003, China)

Abstract: The rotating platform and the antenna-array are two main parts of Radio-Frequency (RF) Simulation Test System. The error of RF Simulation Test System is represented by the angle simulation precision of the antenna-array, which may be influenced by the error of the rotating platform and the in-coincidence between the rotating platform center and the spherical center of the antenna-array. The mathematic models of static and dynamic error of the rotating platform are analyzed and calculated out based on the operational principle of the antenna-array and motion performance of the rotating platform. Finally, the simulation results about rotating platform's effects on the angle simulation precision of the antenna-array angle are presented.

Key words: radio frequency simulation; rotating platform; antenna-array; precision

0 引言

射频仿真试验通常是在一个能模拟电磁波自由传播空间的暗室内进行, 暗室一端装有能实现射频目标仿真的天线阵列, 另一端装有模拟飞机、导弹和反辐射武器等运动平台空间角度运动的三轴转台, 转台上装有进行仿真试验的装备^[1]。天线阵列由多个射频辐射单元组成, 这些辐射单元口面按一定的规律排在一个球面上, 形成球面天线阵。仿真系统所模拟的目标信号是以阵列上相邻的3个单元辐射的合成信号来表示, 此3个单元按等边三角形排列, 构成1个子阵列, 称之为三元组。三元组的辐射信号通过射频开关矩阵的控制, 使目标模拟信号由一个三元组转移到另一个

三元组, 从而实现目标位置的控制; 三元组内3个单元的射频信号, 分别通过程控衰减器及移相器来改变它们之间的相对幅度及相位, 从而控制目标模拟信号在三元组内的精确位置。在进行仿真试验时, 转台是一个姿态运动转换装置, 在半实物仿真试验中主控计算机将运动平台的空间姿态信号传送给转台, 在此信号控制下, 转台电机驱动内、中、外框三轴转动完成信号的跟踪, 输出的实际姿态角被转台上的角度传感器所感知并反馈给主控计算机^[2-5]。由于转台自身材料、结构、安装和工作带宽等原因, 输入姿态角与输出的实际姿态角之间往往会有误差, 从而影响到天线阵列角模拟精度。

1 天线阵列三元组的数学模型

天线阵列与转台回转中心的关系如图1所示。天线阵列由按一定排列规律安装在一个球冠上的辐射单

元阵组成,所有辐射单元都指向位于球冠球心处的转台回转中心。按照一定的规律在阵面上选择一组辐射单元(一般为位于近似正三角形 3 个顶点上的单元),这组单元在转台回转中心处合成场的方向可以通过控制组中每 1 个单元辐射信号的幅度来实现^[6]。

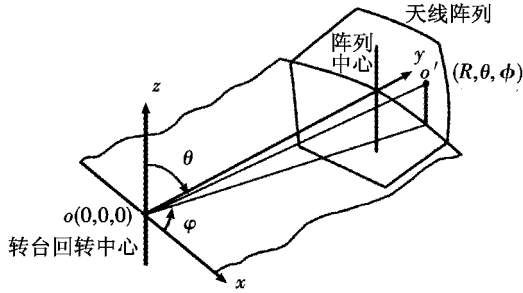


图 1 阵面与转台回转中心的位置关系

Fig.1 The position relation between the antenna-array and the center of the rotating platform

如图 1 建立坐标系,将坐标原点 $o(0,0,0)$ 放在三轴转台的回转中心,假设三元组 3 个辐射单元的位置分别为: $A(R, \theta_1, \phi_1), B(R, \theta_2, \phi_2), C(R, \theta_3, \phi_3)$, R 为三元组天线口径面到转台回转中心的距离。

此时,三元组三个天线辐射信号在转台回转中心处的电场可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_A = E_A e^{j(\omega t + \alpha_1)} \hat{\theta}_1 \\ \mathbf{E}_B = E_B e^{j(\omega t + \alpha_2)} \hat{\theta}_2 \\ \mathbf{E}_C = E_C e^{j(\omega t + \alpha_3)} \hat{\theta}_3 \end{cases} \quad (1)$$

转台回转中心处的磁场可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{H}_A = -H_A e^{j(\omega t + \alpha_1)} \hat{\varphi}_1 = -\frac{E_A}{\eta} e^{j(\omega t + \alpha_1)} \hat{\varphi}_1 \\ \mathbf{H}_B = -H_B e^{j(\omega t + \alpha_2)} \hat{\varphi}_2 = -\frac{E_B}{\eta} e^{j(\omega t + \alpha_2)} \hat{\varphi}_2 \\ \mathbf{H}_C = -H_C e^{j(\omega t + \alpha_3)} \hat{\varphi}_3 = -\frac{E_C}{\eta} e^{j(\omega t + \alpha_3)} \hat{\varphi}_3 \end{cases} \quad (2)$$

利用坐标变换有

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \hat{x} \cos \theta \cos \varphi + \hat{y} \cos \theta \sin \varphi - \hat{z} \sin \theta \\ \hat{\varphi} = -\hat{x} \sin \varphi + \hat{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

从而,根据电磁场理论,平均坡印廷矢量可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = \frac{1}{2} \text{Re}((\mathbf{E}_A + \mathbf{E}_B + \mathbf{E}_C) \times (\mathbf{H}_A + \mathbf{H}_B + \mathbf{H}_C)^*) = -\frac{1}{2} \text{Re}\{ \hat{x} [(E_A \sin \theta_1 e^{j\alpha_1} + E_B \sin \theta_2 e^{j\alpha_2} + E_C \sin \theta_3 e^{j\alpha_3}) \times (H_A \cos \varphi_1 e^{-j\alpha_1} + H_B \cos \varphi_2 e^{-j\alpha_2} + H_C \cos \varphi_3 e^{-j\alpha_3}) + \hat{y} [(E_A \sin \theta_1 e^{j\alpha_1} + E_B \sin \theta_2 e^{j\alpha_2} + E_C \sin \theta_3 e^{j\alpha_3}) \times (H_A \cos \varphi_1 e^{-j\alpha_1} + H_B \cos \varphi_2 e^{-j\alpha_2} + H_C \cos \varphi_3 e^{-j\alpha_3}) + \hat{z} [(E_A \cos \theta_1 \cos \varphi_1 e^{j\alpha_1} + E_B \cos \theta_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_2 e^{j\alpha_2} + E_C \cos \theta_3 \cos \varphi_3 e^{j\alpha_3}) \times (H_A \cos \varphi_1 e^{-j\alpha_1} + H_B \cos \varphi_2 e^{-j\alpha_2} + H_C \cos \varphi_3 e^{-j\alpha_3}) + (E_A \cos \theta_1 \sin \varphi_1 e^{j\alpha_1} + E_B \cos \theta_2 \sin \varphi_2 e^{j\alpha_2} + E_C \cos \theta_3 \sin \varphi_3 e^{j\alpha_3}) \times (H_A \sin \varphi_1 \cdot e^{-j\alpha_1} + H_B \sin \varphi_2 e^{-j\alpha_2} + H_C \sin \varphi_3 e^{-j\alpha_3}) \} \end{aligned} \quad (4)$$

同时, $-\mathbf{S}_{av}$ 为视在辐射中心的方向,则可以由式(4)得出视在辐射中心的方向方位角和俯仰角。

2 转台误差对天线阵列角模拟精度影响分析

转台误差包括静态误差和动态误差两部分,静态误差由指向误差和对心误差组成,动态误差包括制导控制系统的幅度衰减及相位滞后和速率稳定度。其中,对心误差包括天线阵球心与转台中心不重合和转台中心与被试装备回转中心不重合两个方面,前者引入的是几何误差,后者引入的是电误差。

2.1 指向误差

在仿真试验中,被试装备沿转台内框法线轴方向安装在转台上,因此指向误差是指固连在内框的单位向量经过三轴转动后预期指向 λ_1 与实际指向 λ_2 之间的偏差^[7]。工作坐标系 $O_g X_g Y_g Z_g$ 选取为天线阵列球面的球心为原点,通过原点水平指向天线阵中心方向为 X_g 轴,垂直于转台安装底面为 Y_g 轴, Z_g 轴符合右手定则,在此坐标系内安装在内框轴轴线矢量表示为 $\lambda = r \cdot [\cos \beta \cos \alpha, \cos \beta \sin \alpha, \sin \alpha]$; r 为矢量长度; α 为俯仰角; β 为偏航角。上述各量的关系如图 2 所示。

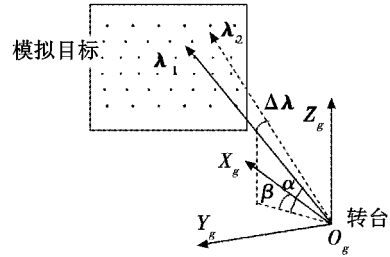


图 2 大地坐标系、预期和实际指向与天线阵列关系示意图

Fig.2 The relation of antenna-array versus geodetic coordinate system and expected and actual pointing

在理想情况,按照内、中、外三轴依次转动 X_1, X_2, X_3 角度,将初始单位 λ_0 向量转到指定位置 λ_1 ,即 $\lambda_1 = \mathbf{R}_0 \lambda_0$,根据欧拉运动方程,其转换矩阵为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos(X_3) & \sin(X_3) & 0 \\ -\sin(X_3) & \cos(X_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(X_2) & 0 & -\sin(X_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(X_2) & 0 & \cos(X_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(X_1) & \sin(X_1) \\ 0 & -\sin(X_1) & \cos(X_1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于变换矩阵 \mathbf{R}_e 实际是一个与误差因素相关的量,实际的指向为 λ_2 ,即 $\lambda_2 = \mathbf{R}_e \lambda_0$,取内、中、外三轴位

置精度 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, 回转精度 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, XYZ 三轴因摆动在 Y-Z, X-Z, X-Y 面内投影与 YZX 轴夹角为 X_4, X_5, X_6 , XY 轴垂直度 θ_1 , YZ 轴垂直度 θ_2 。则指向误差角为

$$\Delta\lambda = \arccos(\lambda_1 \cdot \lambda_2) = f(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \theta) \quad (6)$$

将存在的误差量作为控制量引入, 位置精度反映轴稳定状态误差大小, 可将其补偿于预期转动量 X_1, X_2, X_3 中; 内框轴回转精度通过绕 X 轴旋转 X_4 后绕 Z 轴旋转 β_1 , 再绕 X 轴旋转 $-X_4$ 来补偿, 如图 3 所示。

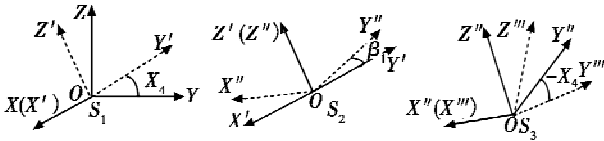


图3 回转精度引入模型示意图

Fig. 3 The slewing error introducing model

其他两框轴采用同样方法处理, 其数学模型如下:

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_1) & \sin(\varepsilon_1) & 0 \\ -\sin(\varepsilon_1) & \cos(\varepsilon_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(X_1 + \delta_1) & \sin(X_1 + \delta_1) \\ 0 & -\sin(X_1 + \delta_1) & \cos(X_1 + \delta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varepsilon_2) & \sin(\varepsilon_2) \\ 0 & -\sin(\varepsilon_2) & \cos(\varepsilon_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(X_2 + \delta_2) & -\sin(X_2 + \delta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(X_2 + \delta_2) & 0 & \cos(X_2 + \delta_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_3) & 0 & -\sin(\varepsilon_3) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varepsilon_3) & 0 & \cos(\varepsilon_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(X_3 + \delta_3) & \sin(X_3 + \delta_3) & 0 \\ -\sin(X_3 + \delta_3) & \cos(X_3 + \delta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$D = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot A \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) \\ 0 & \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \cdot C \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ 0 & -\sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

于是, 得到误差模型

$$R_e = E \cdot B \cdot D \quad (12)$$

结合误差模型特点, 仅考虑转台位置精度和回转精度, 某转台各个误差项的大小如表 1 所示。

表1 转台部分精度指标

Table 1 Parts of the rotating platform precision

	位置精度/(°)	回转精度/(°)
内框轴	18	15
中框轴	18	15
外框轴	18	20

假定目标在某时刻以 1000 km/h 的速度自 30 km 远沿直航航路向转台飞行, 航路捷径为 5000 m, 取过航路捷径点时的目标仰角为 25°, 可得指向误差随时间的变化(角度变化)如图 4 所示。

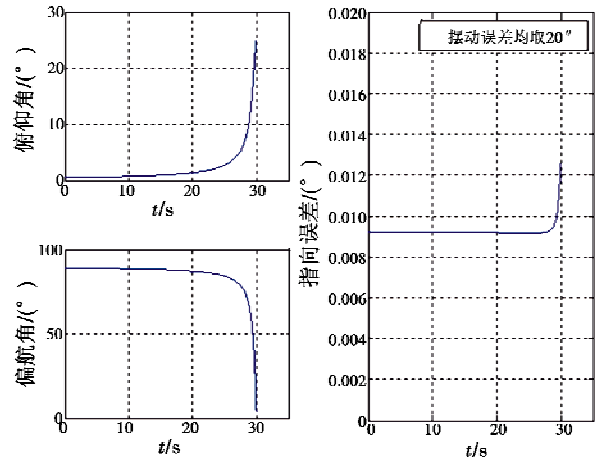


图4 指向误差与飞行时间关系图

Fig. 4 The relation between pointing error and flying time

2.2 对心误差

对心误差包括天线阵球心与转台中心不重合和转台中心与被试装备回转中心不重合两个方面, 前者引入的是几何误差, 后者引入的是电误差。

1) 天线阵球心与转台中心不重合^[8]。

如图 5 所示建立直角坐标系, $O(0,0,0)$ 点为静区中心(球面阵球心), $B(x_1, y_1, z_1)$ 点为目标源的位置, OB 之间的距离为 R , $A(x_0, y_0, z_0)$ 点为测向天线由于安装偏离球面阵球心的偏心点, 偏心距离为 d (即 OA), 阵列“零位”天线为 $F(0, R, 0)$ 。

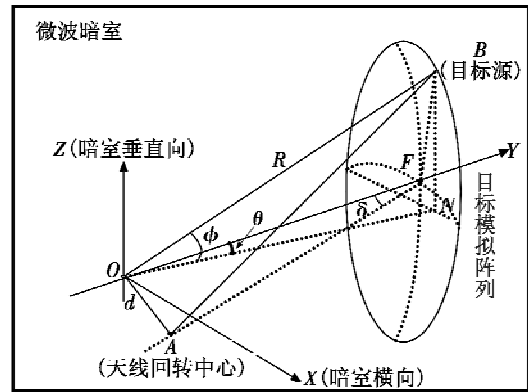


图5 天线回转中心与球面阵球心不重合示意图

Fig. 5 The centers of the rotating platform and the antenna-array don't coincide

则误差为: $\delta = \beta - \alpha$ 。其中, α 为目标真实角度值

$\alpha = \arccos\left(\frac{y_1}{R}\right) = \arccos(\cos \phi \cos \theta)$; β 为目标角度测量值, $\beta = \arccos\left(\frac{BA^2 + FA^2 - FB^2}{2 \cdot BA \cdot FA}\right)$; $BA = [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2]^{1/2}$; $FA = \sqrt{x_0^2 + (R - y_0)^2 + z_0^2}$; $FB = \sqrt{x_1^2 + (R - y_1)^2 + z_1^2}$ 。

依据微波暗室对心不大于 5 cm 计算, 分别在 X、

Y、Z 轴线上各取距离球心 5 cm、2.5 cm、0 cm、-2.5 cm、-5 cm 的点计算误差,仿真结果如图 6 所示。

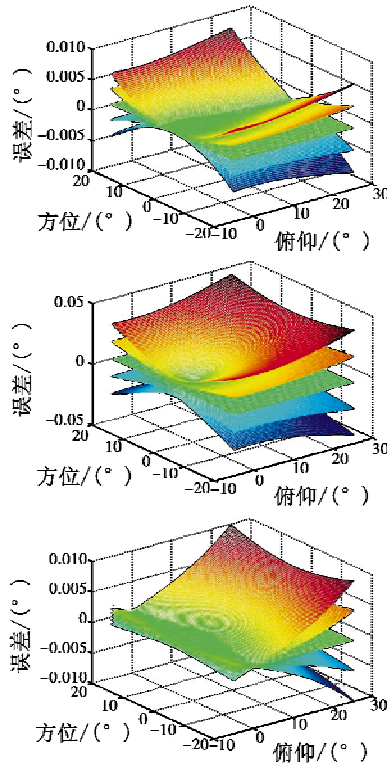


图 6 偏心点在 X、Y、Z 轴上的测向误差

Fig.6 The pointing error with the off-center point on each axis

2) 转台中心与被试装备回转中心不重合。

依据天线阵列三元组的数学模型,把位置变化引起的 3 个辐射天线的辐射电磁波幅度、相位变化计算出来,然后由波印亨矢量计算模拟方向。

选择密阵三元组重心点为模拟位置,被试装备中心与转台中心重合度为 5 mm 计算,则被试装备中心偏离转台中心数值为以转台中心为球心、半径为 5 mm 的一个误差球,如图 7 所示。

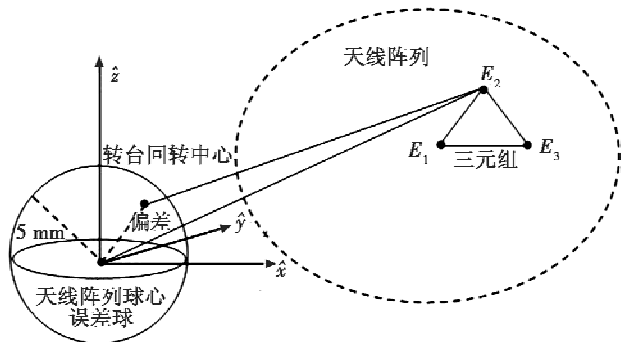


图 7 转台回转中心偏离天线阵列球心示意图

Fig.7 The center of rotating platform departs from spherical center of antenna-array

计算时,令被试装备天线中心在误差球面上移动,仿真结果如图 8 所示。

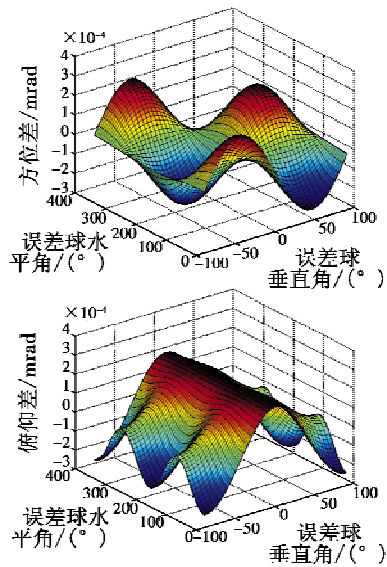


图 8 不同心误差

Fig.8 The disalignment error

2.3 动态误差

由于动态误差同角误差系数和输入驱动信号的形式有密切关系,因此,确定了角误差系数和输入驱动信号形式才能确定输入信号的动态精度^[9-10]。

设给定的输入指令为正弦函数,即

$$f(t) = A \sin \omega t \tag{13}$$

式中:A 为正弦函数的振幅; $\omega = 2\pi f$,为正弦函数的角频率。

经转台系统响应后,得到的转台响应函数为

$$f_0(t) = A_0 \sin(\omega t - \phi) \tag{14}$$

式中: A_0 为响应正弦函数的幅值; ϕ 为相角滞后。则此时的动态误差为

$$e(t) = f(t) - f_0(t) = A \sin \omega t - A_0 \sin(\omega t - \phi) = A \sqrt{1 - 2\alpha \cos \phi + \alpha^2} \sin(\omega t + \gamma) \tag{15}$$

式中: $\gamma = \arctan \frac{A_0 \sin \phi}{A - A_0 \cos \phi}$, $\alpha = \frac{A_0}{A}$, 且 $A - A_0 \cos \phi \neq 0$ 。

在角频率下,正弦信号的动态误差为同频率的周期信号,动态误差的幅值与给定正弦的幅值、控制系统的幅值变化量及控制系统的相位滞后量有关,可见,系统的动态误差并不是由某一参数唯一决定,它不仅与系统的频率特性(幅值变化和相位变化)有关,同时还与给定信号的频率和幅值有关。如果系统的频率特性和给定信号确定后,对应的动态误差也唯一确定。

结合如表 2 所示的某转台频率响应测试数据,则可以计算出转台动态误差,如图 9 所示。

表2 转台频响测试数据
Table 2 The test data of the rotating platform frequency response

轴	频率/Hz	幅度差/dB	相位差/(°)
横滚轴	8	0.62	-2.22
纵倾轴	6	0.66	-7.63
偏航轴	5	0.75	-8.92

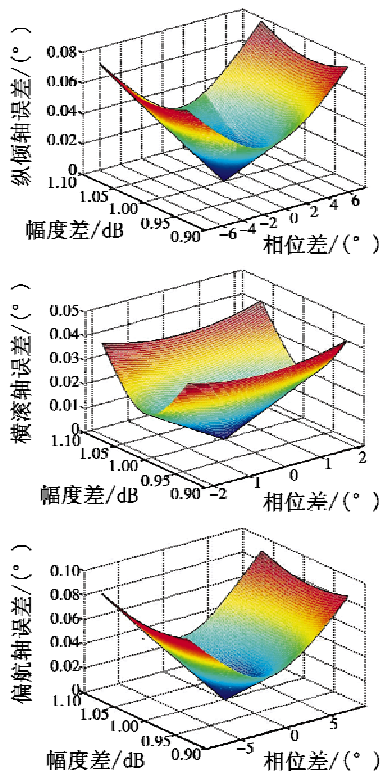


图9 基于频响的转台动态误差图
Fig.9 The rotating platform error based on frequency response

3 结论

从以上分析可看出,转台静态误差很小,对天线阵列角模拟精度几乎没有影响;动态误差较大,对天线阵列角模拟精度有一定影响。在进行射频仿真试验时,通过合理设置战情等方式可以降低转台动态误差对天线阵列角模拟精度的影响。另外,为了减小转台台体对射频信号的反射,一般会在转台上粘贴吸波材料,粘贴吸波材料对天线阵列角模拟精度的影响将在下一步分析。

参考文献

- [1] 单家元,孟秀云,丁艳.半实物仿真[M].北京:国防工业出版社,2008:28-30.
- [2] 扈宏杰,尔联浩,吴森堂,等.基于DSP技术的飞行仿真转台控制[J].电气传动,2004,34(2):35-36.
- [3] 王划一,杨西侠,林家恒.自动控制原理[M].北京:国防工业出版社,2004:195-209.
- [4] 杨辉,吴钦章,范永坤,等.高精度位置随动系统的误差源分析[J].光电工程,2008,35(8):5-9.
- [5] 白雪峰,赵剡.单轴速率三轴位置惯性测试转台误差及传递分析[J].航天控制,2006,24(2):26-29.
- [6] 毛继志,郭陈江,张麟兮,等.幅相误差对射频仿真系统目标位置精度的影响[J].系统仿真学报,2003,15(8):1149-1151.
- [7] 王雷钢,杨黎都,张杨.三轴导弹仿真转台指向误差分析[J].计算机仿真,2009(11):73-75.
- [8] 郑星,贺金龙,高军山,等.天线回转中心偏离阵列球心对测向的影响[J].电讯技术,2012,52(7):1202-1205.
- [9] 杨黎都,肖本龙,张程,等.三轴仿真转台动态性能对仿真试验影响分析[J].电子测量技术,2011(12):28-31.
- [10] 肖卫国,尔联浩.雷达寻的制导半实物仿真误差研究[J].计算机仿真,2007,24(5):259-263.

下 期 要 目

基于量子分布估计算法的火力分配问题研究
摆式陀螺大偏北角运动特性研究
用博弈论求解浮标最佳工作深度
基于对数极坐标变换的尺度变化目标跟踪
基于博弈值的战场电磁环境复杂度评估方法
控制微变形镜稳定固体激光器输出的研究
偏振导航传感器标定系统的设计与实现

基于支持向量机的红外成像导引头抗干扰性能评估方法
面向语义的分布交互建模方法研究
基于图像融合与多尺度分割的目标级变化检测
故障估计下子空间预测控制的仿射设计
一种基于盲源分离的MIMO雷达侦察识别方法
小型高精度红外黑体辐射源的设计
基于自提取样本图的雷达辐射源识别新方法