

文章编号: 1001 - 893X(2012)07 - 1202 - 04

# 天线回转中心偏离阵列球心对测向的影响\*

郑 星, 贺金龙, 高军山, 李 芷, 杨黎都

(解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:**在微波暗室内进行射频仿真试验时, 必须保证被试装备天线回转中心和天线阵列的球心重合, 否则就会引起测向误差, 从而影响对被试装备性能的科学评估。分析了对心不准对装备测向测试结果的影响, 建立了测向误差的分析模型, 并且结合实例详细分析了偏心距离和测向误差的关系。相关分析模型和结论可以作为对心设备建设中对对心精度的指标论证的依据, 也可以为仿真试验战情的设计提供科学的借鉴。

**关键词:**射频仿真试验系统; 天线阵列; 对心设备; 测向误差; 被试装备

**中图分类号:** TN955      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.032

## Impact of Equipment under Test(EUT) Antenna Rotating Center Deviating Antenna Array Centre on Direction-finding

ZHENG Xing, HE Jin-long, GAO Jun-shan, LI Zhi, YANG Li-du

(Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** RF simulation test in microwave anechoic chamber must ensure Equipment under Test(EUT) antenna rotating center and antenna array centre to be coincided, otherwise it will cause direction - finding(DF) error, thus affecting the scientific assessment of equipment performance. The influence of antenna rotating center deviating antenna array centre on equipment performance test results is analysed, a DF error analysis model is established and the relationship between eccentric distance and DF error is discussed through an example. This research work not only can be used as the basis of the center coincidence device in the construction of the precision index demonstration, but also can provide scientific reference for simulation scenario design.

**Key words:** radio frequency simulation system; antenna array; center coincidence device; direction - finding error; equipment under test(EUT)

### 1 引 言

在雷达对抗装备中, 侦察测向的任务在于测得辐射源的方位, 为干扰设备提供精确的方位引导。侦察设备的测向精度即测向准确度, 是测量值与被测目标真实方位之间的差值, 测向精度是侦察设备最重要的指标之一。半实物仿真试验系统为电子战装备的研制、性能评估提供密集、复杂、逼真、动态的

电磁威胁信号环境, 对于电子战系统的研制开发、试验鉴定具有十分重要的意义。在雷达对抗辐射式仿真试验中, 被试的雷达对抗装备接收球面天线阵列辐射的雷达和干扰信号, 根据天线阵列三元组工作原理和侦察系统测向的基本原理, 必须保证被试装备天线回转中心和天线阵列的球心重合, 否则就会产生测向误差<sup>[1-3]</sup>。而保证“两心”重合的工作是由对心设备完成的, 对心设备有经纬仪、全站仪或小型激光器等多种方案; 对心方法有两线交叉、三点交会

\* 收稿日期: 2011 - 12 - 21; 修回日期: 2012 - 04 - 10

等。但无论是哪种工程实现方法,对心设备及测量方法产生的误差都无法完全消除,这样被试装备天线回转中心与球面天线阵的球心就会不完全重合。那么,偏差达到什么程度是仿真试验测试可以接受的呢?本文在分析仿真试验对心过程的基础上,建立了对心不准引起的被试装备测向误差分析模型,重点结合偏心不偏轴和偏心偏轴两种情况产生的测向误差进行了详细分析,希望可以为对心设备和对心方法的论证提供科学参考,为射频仿真试验误差分析提供有益的借鉴。

## 2 不同心引起的测向误差分析

通过辐射单元阵列辐射方式模拟产生被试装备试验所需的电磁信号环境,利用多自由度转台模拟被试装备运载平台的运动姿态及机动特性,同时通过被试装备的天线及馈电系统接收由辐射单元阵列辐射的各种模拟信号,进行装备的作战能力检验的系统,我们称之为射频仿真试验系统<sup>[4]</sup>。微波暗室是射频仿真试验系统的组成部分之一,其一端是放置在静区的三轴飞行转台或装备承载平台,另一端是球形天线阵列<sup>[5]</sup>。

仿真试验前,必须对被试装备天线进行调零操作<sup>[6-7]</sup>。首先是用对心设备进行“对心”,使被试装备天线的中心与静区中心(球面阵球心)重合。由于天线阵的球心是空间的一个点,并且被试装备天线的回转中心也不能直观地标识,一种基于经纬仪或全站仪的对心方法就是:通过暗室外的对心窗口建立坐标系,在被试装备天线大致放到指定位置后,再利用经纬仪或全站仪等对心设备进行精确调整,对心设备测量被试装备回转中心与球面天线阵列的球心之间的偏差,给出误差信号,传送给平台或转台,再由平台或转台调整被试装备天线的回转中心,使之与天线阵的球心重合。“对心”完成后,再使阵列“零位”天线辐射信号用被试装备天线对准,进行“对轴”,使被试装备天线与球面阵零位一致。由于“对轴”误差主要是由被试装备天线的测向性能决定的,且其在数据处理时可以消除<sup>[8-9]</sup>,所以对轴不准产生的测向误差这里不作分析,重点对由于对心不准产生的测向误差进行分析。

建立如图 1 所示的直角坐标系,  $O(0,0,0)$  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  $F(0, R, 0)$ 。

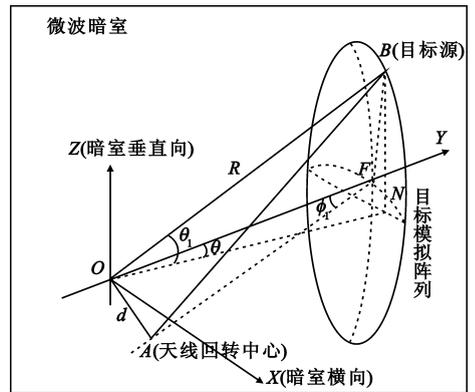


图 1 天线回转中心与球面阵球心不重合示意图  
Fig.1 The diagram shows antenna turning center and spherical array center does not coincide

则测向误差为

$$\delta = \beta - \alpha \tag{1}$$

式中,  $\alpha$  为目标真实角度值,  $\beta$  目标角度测量值。

目标源  $B$  点的坐标常用方位-俯仰角表示为  $(R, \theta, \phi)$ , 有:

$$\begin{cases} x_1 = R \cos \phi \sin \theta \\ y_1 = R \cos \phi \cos \theta \\ z_1 = R \sin \phi \end{cases}$$

式中,  $R$  为球面阵列的半径,  $\theta$  为目标源相对于静区中心的方位角,  $\phi$  为目标源相对于静区中心的俯仰角。

同样,将  $A$  点表示为  $(d, \theta_1, \phi_1)$ , 有:

$$\begin{cases} x_0 = d \cos \phi_1 \sin \theta_1 \\ y_0 = d \cos \phi_1 \cos \theta_1 \\ z_0 = d \sin \phi_1 \end{cases}$$

其中,  $\theta_1 = \text{arctg} \frac{x_0}{y_0}$ ,  $\phi_1 = \text{arcsin} \frac{z_0}{d}$ 。

根据图 1 所示球心  $O$ 、目标源  $B$  和天线回转中心  $A$  等各位置的关系,可以得到目标真实角度值  $\alpha$  为

$$\alpha = \text{arccos} \left( \frac{y_1}{R} \right) = \text{arccos}(\cos \phi \cos \theta) \tag{2}$$

目标角度测量值  $\beta$  为

$$\beta = \text{arccos} \left( \frac{BA^2 + FA^2 - FB^2}{2 \cdot BA \cdot FA} \right) \tag{3}$$

其中:

$$BA = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2},$$

$$FA = \sqrt{x_0^2 + (R - y_0)^2 + z_0^2},$$

$$FB = \sqrt{x_1^2 + (R - y_1)^2 + z_1^2}.$$

将式(2)、(3)代入式(1)就可以得到由于对心不准产生的测向误差的计算模型。

### 3 仿真分析

如果被试装备天线回转中心与球面阵球心不重合,就会有3种情况:第一种情况是不偏心、偏轴;第二种情况是偏心、不偏轴;第三种情况是偏心、偏轴。显然,第一种情况是由于对轴不准产生的测向误差,这里不作讨论,重点分析后两种由于对心不准而产生的测向误差情况。

#### (1) 偏心、不偏轴

当偏心点在“零轴”(Y轴,即球心与阵列“零位”天线的连线)上时,就会出现偏心、不偏轴的情况。偏心点即天线回转中心选在  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$  的位置,它们到球心的距离分别为10 cm、5 cm、1 cm、-1 cm、-5 cm、-10 cm。用 Matlab 分别对各偏心点时的测向误差进行计算,偏心点在 Y 轴上的位置示意及测向误差的结果如图 2 所示。

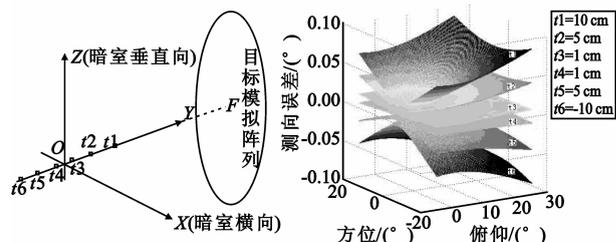


图 2 偏心但不偏轴时偏心点在 Y 轴上的位置示意及测向误差的结果

Fig.2 The eccentric point on the Y axis position and direction finding error results

由图 2 可知:对一固定目标源,当天线回转中心在阵列零轴上且距离球心越远时,由于不同心产生的测向误差也越大;当天线回转中心在阵列零轴上一固定点时,目标源为阵列“零位”天线时测向误差最小,目标源距离阵列“零位”天线越远测向误差越大。

#### (2) 偏心、偏轴

当偏心点不在“零轴”上时,就会出现偏心、偏轴的情况。

首先,计算偏心点在 X 轴上时的情况,偏心点 ( $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ , 它们到球心的距离分别为 10 cm、5 cm、1 cm、-1 cm、-5 cm、-10 cm) 的位置示意及测向误差的结果如图 3 所示。

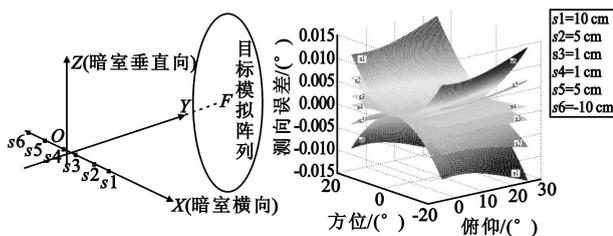


图 3 偏心偏轴时偏心点在 X 轴上的位置示意及测向误差的结果

Fig.3 The eccentric point on the X axis position and direction finding error results

再计算偏心点在 Z 轴上的情况,偏心点 ( $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ , 它们到球心的距离分别为 10 cm、5 cm、1 cm、-1 cm、-5 cm、-10 cm) 的位置示意及测向误差的结果如图 4 所示。

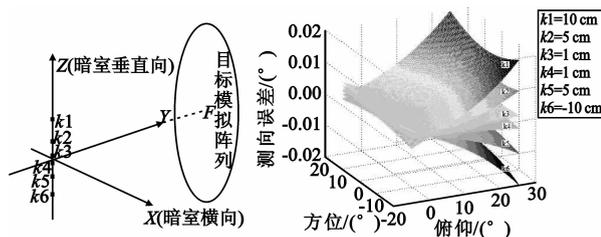


图 4 偏心偏轴时偏心点在 Z 轴上的位置示意及测向误差的结果

Fig.4 The eccentric point on the Z axis position and direction finding error results

通过图 3、图 4 和图 2 结果的比较可以发现:偏心、不偏轴引起的测向误差明显大于由于偏心、偏轴时产生的测向误差;测向误差的最大值总是发生在当目标源为阵列的边缘处时。

这样,我们应用式(1)、式(2)、式(3)建立的测向误差计算模型,就可以基于偏心、不偏轴的情况,找到产生最大测向误差的阵列上的目标源  $B_{\delta_{max}}$  位置,然后根据  $B_{\delta_{max}}$  计算出偏心距离的允许值,结果如图 5 所示。

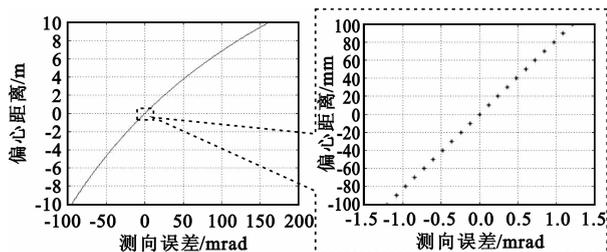


图 5 偏心距离与测向误差的关系图

Fig.5 The relationship eccentric distance and direction-finding error

如当仿真试验时,要求由于对心不准产生的测向误差不超过 $0.1\text{ mrad}$ ,那么被试装备天线回转中心与球心的距离就必须保证在 $8.3\text{ mm}$ 以内;若要求测向误差在 $1\text{ mrad}$ 以内,那么偏心距离就必须保证不超过 $83\text{ mm}$ 。

## 4 结束语

进行侦察装备性能的射频仿真试验之前,必须利用对心设备对被试装备的天线进行对心操作。本文分析表明:由于对心不准而造成的偏心不偏轴引起的测向误差明显大于由于偏心偏轴时产生的测向误差,而且测向误差的最大值总是发生在当目标源为阵列的边缘处时。另外,为确保对心因素对侦察测向设备测向性能测试结果的影响在限定的精度范围内,被试装备天线回转中心与阵列球心的偏离就必须控制在一定的距离范围内,这也就是对对心设备和对心方法提出的相应对心精度的指标要求。本文建立的分析模型和相应的分析结果,既可以指导对心系统建设和对心方法研究,同时还可以为试验设计时目标源位置的选取提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 陈训达. 射频仿真中的双近场效应[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 92 - 95.  
CHEN Xun - da. The dual near - field effect in radio frequency simulation[J]. Journal of system simulation, 2001, 13(1): 92 - 95. (in Chinese)
- [2] 修继信, 曾茂生. 几种外在因素对测向误差的影响程度[J]. 舰船电子对抗, 2003, 26(1): 28 - 31.  
XIU Ji - xin, ZENG Mao - sheng. Several external factors on direction finding error influence degree[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2003, 26(1): 28 - 31. (in Chinese)
- [3] 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.  
MAO Ji - zhi, GUO Chen - jiang, ZHANG Lin - xi, et al. The influence of amplitude and phase error for target positioning error in RFSS [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(8): 1149 - 1151. (in Chinese)

- [4] 陈怀瑾. 防空导弹武器系统总体设计和试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.  
CHEN Huai - jin. Air defense missile weapon system design and test[M]. Beijing: Aerospace Press, 1995. (in Chinese)
- [5] 郑星, 樊友谊, 焦斌, 等. 射频仿真暗室静区性能测量与优化[J]. 电讯技术, 2010, 50(7): 140 - 144.  
ZHENG Xing, FAN You - yi, JIAO Bin, et al. Performance measurement and optimization of quiet zone in RF simulation anechoic chamber[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 140 - 144. (in Chinese)
- [6] 王成信. 雷达辐射式仿真的目标运动轨迹模拟问题[J]. 飞行器测控学报, 2000, 19(1): 50 - 60.  
WANG Cheng - xin. Radar radiation simulation target trajectory simulation[J]. Spacecraft TT&C Technology, 2000, 19(1): 50 - 60. (in Chinese)
- [7] 郝晓军, 陈永光, 何建国, 等. 射频仿真系统的目标模型研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2006, 27(6): 31 - 33.  
HAO Xiao - jun, CHEN Yong - guang, HE Jian - guo, et al. Target simulation in radio frequency system[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2006, 27(6): 31 - 33. (in Chinese)
- [8] 王雷钢, 杨黎都, 傅亦源, 等. 射频仿真系统中的弹目偏角修正方法研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(4): 89 - 91.  
WANG Lei - gang, YANG Li - du, FU Yi - yuan, et al. Research on correction method for angle error between target and radar In RF simulation system [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(4): 89 - 91. (in Chinese)
- [9] 王有朝. 比幅测向动态范围的分析与测试[J]. 现代雷达, 2006, 28(8): 50 - 53.  
WANG You - zhao. Analysis and Measurement of dynamic range of Amplitude - comparison DF Equipment[J]. Modern Radar, 2006, 28(8): 50 - 53. (in Chinese)

## 作者简介:

郑 星(1976—),男,陕西西安人,2000年于西北大学获学士学位,2007年于国防科学技术大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为射频仿真测试技术及其应用。

ZHENG Xing was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1976. He received the B. S. degree from Northwestern University and the M. S. degree from PLA National University of Defense Technology in 2000 and 2007, respectively. He is now an engineer. His research concerns RF simulation test technology and its application.

Email: zhx961079@yahoo.com.cn