

# EMC 测试中天线系数的误差分析

沈国连

(中国航空无线电电子研究所 上海 200233)

**[摘要]** 指出了目前正在使用的两种天线系数校准方法的不足; 引入了配置天线系数及其配置不确定度的概念; 提出了减小天线配置不确定度的途径。

**[关键词]** 天线系数; 配置不确定度; 误差分析

**[中图分类号]** TN820.1<sup>7</sup> **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-141X(2001)02-0001-05

## 1 引言

在电磁兼容性试验中, 天线是必不可少的重要部件。尤其在被测件对外的电场辐射干扰试验中, 人们利用接收天线的输出电压  $U_r$  和天线系数  $AF$  之和来获得被测设备的干扰电场。

本文从多个角度对天线系数及其误差进行定量分析。提出了固有天线系数及其不确定度和配置天线系数及其配置不确定度的概念, 并且指出, 建造大型高质量的全波暗室是大幅度降低配置不确定度的必经之路。

## 2 自由空间中的天线系数是天线本身固有的参数

天线的增益、波束宽度等参数都是天线在自由空间和远场条件下得到的。在电场辐射干扰测试中, 天线系数采用如下定义, 即:

$$AF = \frac{E}{U_r} \quad ①$$

式中,

$AF$ —接收天线的天线系数;

$E$ —入射到接收天线参考面上均匀平面波的电场强度;

$U_r$ —接收天线输出电压。

在自由空间中, 当接收天线处于发射天线的远场且与  $50\Omega$  接收系统匹配时,  $AF$  可以表示为波

长和增益的函数。

$$AF = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}} \quad ②$$

式中,

$\lambda$ —工作波长;

$G$ —天线增益。

根据天线增益  $G$  的定义, 它是一个唯一确定的自由空间中的远场参数, 所以由式②得到的天线系数  $AF$  也是唯一确定的, 它本身没有水平极化和垂直极化之分。正因为如此, 我们把它定义为接收天线的固有天线系数, 记作  $AF_0$ , 相应的增益记作  $G_0$ , 从而

$$AF_0 = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G_0}} \quad ③$$

## 3 固有天线系数的不确定度

在式③两边取对数得

$$20 \log AF_0 = 20 \log \frac{9.73}{\lambda} - 10 \log G_0 \quad ④$$

令

$$20 \log AF_0 = AF_0(dB)$$

$$10 \log G_0 = G_0(dB)$$

式④变成

$$AF_0(dB) = 20 \log \frac{9.73}{\lambda} - G_0(dB) \quad ⑤$$

显然, 当工作频率固定后,  $G_0(dB)$  的不确定度

就是  $AF_0$  (dB) 的不确定度。在天线测量中,  $G_0$  (dB) 的不确定度一般取土 1dB, 故  $AF_0$  (dB) 的不确定度为

$$U_0 = \pm 1dB \quad (6)$$

#### 4 生产厂家提供的天线系数及其不确定度

目前国内执行 GJB152A-97 标准的检测机构大都采用进口天线。按照标准规定, 每个接收天线

至少每两年计量一次, 但实际情况是, 国内的计量部门目前还不具备计量这些天线的能力。

下面, 以美国 EMCO 公司型号为 3109 中某一天线的实际校准数据为例来判断其天线系数的不确定度。

从表 1 可以看出:

表 1 EMCO 3109 天线系数的典型数据

EMCO 3109	1.0m 法校准			3.0m 法校准		
	频率 (MHz)	天线系数 (dB)	增益值	增益分贝值	天线系数 (dB)	增益值
30	12.0	0.06	-12.2	13.7	0.04	-14.0
100	9.9	1.07	0.3	9.7	1.12	0.5
200	14.7	1.44	1.6	13.1	2.04	3.1
300	22.8	0.50	-3.0	20.2	0.90	-0.5

(1) 无论是 1 米法校准还是 3 米法校准, 天线系数和天线增益的关系服从自由空间中远场条件下天线系数的理论计算公式②, 因此, 从形式上看, 3109 天线系数的不确定度

$$U_{3109} = \pm 1dB \quad (7)$$

(2) 但是, EMCO 3109 天线的长为 133cm, 如果用 1 米法校准, 要达到远场条件, 仅当频率在 50MHz 以上时才能使用公式②。为了满足 MIL-STD-462D(GJB152A-97 与之对等) 的 1 米法测量距离要求, 天线制造厂家把远场条件下校准天线系数的方法照搬到处于近场状态下的待校接收天线。

所以, 1 米法的校准数据在低频段会对国军标中 RE102 的测量结果造成不利影响。

#### 5 屏蔽暗室中视在增益校准法的不足

GJB152A-97 中规定, 在对被测设备(EUT)进行 RE102 测试前, 按照 QJ 2840-96 标准先对天线进行现场校准, 我们把这一方法称为视在增益校准法。然而, QJ 2840-96 仍然照搬了自由空间及远场条件下天线系数的校准方法。根据 QJ 2840-96,

我们可以推理出发射天线在离接收天线 1 米处产生的电场强度为

$$E_e = \frac{9.73 \sqrt{U_t U_r}}{\sqrt{4\pi\lambda}} \quad (8)$$

式中,

$E_e$ —发射天线在接收天线参考点处的电场强度;

$U_t$ —发射天线输入口电压;

$U_r$ —接收天线输出口电压。

理论和实践告诉我们, 如果把一对相隔 1 米, 并且处于近场状态下的收发天线放在两个电磁检测环境不同的屏蔽暗室中现场校准, 当发射天线输入电压  $U_t$  保持不变时, 必然会得到两个不同的接收天线输出电压  $U_r$ , 按照式⑧就会得到两个不相同的辐射电场  $E_e$ 。这样会使人们难以准确判断该发射天线的辐射能力, 更无法给出具有实际意义的天线系数不确定度。可见, 在理论上, 视在增益校准法并不能改善测试结果的一致性。

#### 6 天线系数在自由空间与屏蔽暗室中的差异

事实上, 除了用于 EMC 试验的屏蔽暗室本身的地面反射及周围吸波材料的性能优劣外, 按照 MIL-STD-462D 或 GJB152A-97 的要求, 试验中还必须在 80cm 高的桌子上放置至少  $2.25\text{m}^2$  的金属接地平板以及阻抗稳定网络。

这些设施的存在都会对 EUT 在接收天线处产生的电场形成扰动。因此, 在实际测量中, 接收天线处在既有直射电场又有反射电场及绕射电场的非常不规则的电场结构中, 天线的输出电压  $U_r$  是 EUT 的辐射电场与天线周围环境作用后的综合反映。我们用以下两个实验来说明这种综合反映。

表 2 EMC 3101 天线的典型输出电压

频率 (MHz)	天线输出电压 ( $\text{dB}_{\mu\text{V}}$ )	
	在美国校准场地	在模拟屏蔽暗室
225	103.2	96.5
250	104.7	96.6
275	106.3	106.3
300	108.2	101.8
325	108.5	100.9
350	108.7	100.9
375	108.7	97.2
400	108.5	100.9

比较表中的数据可以发现, 只有在 275MHz 附近, 3101 天线在两种电磁检测环境中的输出电压是一致的, 在某些频率点上, 输出电压相差竟达到  $11.5\text{dB}_{\mu\text{V}}$ 。显然, 由电磁环境引起的误差远大于信号源、电缆损耗和接收机等引起的误差总和。

### 实验 2

发射偶极子天线仍放在模拟 EUT 放置的位置, 并使发射天线输入电缆口的入射功率保持恒定; 用 EMC 公司两个具有工作频率部分重合但结构形式不同的接收天线 3101 和 3106 来交替接收电场; 收发天线相距 1 米。检测数据如表 3 所示。表中符号说明如下:

$U_1(H)$ —发射天线水平极化放置时 3101 的输出电压;

### 实验 1

在模拟 EUT 放置的接地平板上, 放置一个偶极子发射天线, 在模拟放置 EMC 3101 天线的地方悬挂 PF1000 场探头, 两者相距 1 米; 在不同频率点上调整并记录信号源的输出, 使 PF1000 保持检测到  $2\text{V/m}$  的电场强度; 然后移去 PF1000, 重新放置 EMC 3101, 记录 EMC 3101 天线的输出电压; 根据 EMC 公司提供的校准数据计算出 EMC 3101 在美国标准场地的输出电压。实验数据如表 2 所示。

$U_1(V)$ —发射天线垂直极化放置时 3101 的输出电压;

$U_2(H)$ —3106 和发射天线水平极化放置时 3106 的输出电压;

$U_2(V)$ —3106 和发射天线垂直极化放置时 3106 的输出电压;

$$D(H) = D_2(H) - D_1(H);$$

$$D(V) = D_2(V) - D_1(V);$$

$$D(1) = D_1(V) - D_1(H);$$

$$D(2) = D_2(V) - D_2(H);$$

$$DAF = AF_{3106} - AF_{3101}.$$

以上电压的单位为  $\text{dB}_{\mu\text{V}}$ 。

从表中可以看出:

(1) 当  $f=400\text{MHz}$  时,  $D(1)=15.36\text{dB}_{\mu\text{V}}$ ; 当

$f=600\text{MHz}$  时,  $D(2)=14.32\text{dB}_{\mu\text{v}}$ 。这说明无论是 3101 天线还是 3106 天线, 当把它们放在模拟的电磁检测环境中, 其对水平极化场源与垂直极化场源的

接收能力相差甚大。因此, 把 EMCO 公司提供的单一天线系数既用于水平极化测量又用于垂直极化测量会引起很大的误差。

表 3 EMCO 3101 与 EMCO 3106 接收电压之差异

f (MHz)	U1 (H)	U1 (V)	U2 (H)	U2 (V)	D (1)	D (2)	D (H)	D (V)	DAF
200	79.32	77.16	70.28	61.24	-2.16	-9.04	-9.04	-15.92	10.40
400	67.03	82.39	66.70	67.69	15.36	0.99	-0.33	-14.70	3.90
600	68.15	76.58	61.06	75.38	8.43	14.32	-7.09	-1.20	3.90
800	71.53	72.31	63.75	62.08	0.78	-1.67	-7.78	-10.23	5.10
1000	73.79	66.83	65.71	60.83	-6.96	-4.88	-8.08	-6.00	3.50

(2) 在自由空间中, 由于两个天线的天线系数都无需区分水平极化与垂直极化, 因此, 当  $f=400\text{MHz}$  且  $DAF=3.90\text{dB/m}$  时, 则  $D(H)=D(V)=-3.90\text{dB}_{\mu\text{v}}$ 。但在实际的电磁检测环境中,  $D(H)=-0.33\text{dB}_{\mu\text{v}}$ ,  $D(V)=-14.70\text{dB}_{\mu\text{v}}$ 。显然, 在一般情况下, 两个结构不同的接收天线的输出电压差满足下列关系:

$$\left. \begin{aligned} D(H)_{\text{[自由空间]}} &\neq D(H)_{\text{[实际环境]}} \\ D(V)_{\text{[自由空间]}} &\neq D(V)_{\text{[实际环境]}} \\ D(H)_{\text{[实际环境]}} &\neq D(V)_{\text{[实际环境]}} \end{aligned} \right\} \quad ⑨$$

因此, 国内某些计量部门在实际的电磁检测环境中以一个天线的天线系数作为基准, 用比较法来校准另一个结构不同天线的天线系数, 这种做法缺乏理论依据, 甚至会引起更大的测量误差。

## 7 配置天线系数及其不确定度

为了描述屏蔽暗室中由配置造成实际电磁检测环境对接收天线的影响, 我们提出配置天线系数及其配置不确定度的概念。其目的是为了把接收天线所处的不同于自由空间的实际检测环境引起的误差全部归属到天线系数的不确定度中去, 以配置不确定度来表征实际检测环境与自由空间的差异。为此, 首先应该选定基准。

### 7.1 确定统一的标准辐射源

把工程上常用的电偶极子和磁偶极子天线作为  $1\text{GHz}$  以下的标准辐射天线, 把双脊喇叭作为  $1\text{GHz}$  以上的标准辐射天线。

### 7.2 确定统一的基准电磁环境

把能够体现收发天线固有参数的自由空间作

为基准的电磁环境, 把实际屏蔽暗室中的检测环境看作是基准环境的对比环境。

### 7.3 配置天线系数及其配置不确定度的定义

按照 GJB152A-97 中 (RE102) 电场辐射干扰测试配置的要求, 在对 EUT 测试前, 把标准发射天线放置在 EUT 的位置; 调整好收发天线的距离和极化状态; 控制好发射天线的输入功率; 计算出在自由空间中发射天线在接收天线参考点处产生的电场强度; 测量出在实际电磁检测环境中接收天线的输出电压。在此基础上, 把配置天线系数定义为

$$\left. \begin{aligned} AF_{(h)} &= \frac{E_0}{U_{(h)}} \\ AF_{(v)} &= \frac{E_0}{U_{(v)}} \end{aligned} \right\} \quad ⑩$$

式中,

$AF_{(h)}$ 、 $AF_{(v)}$ ——实际环境中天线的水平、垂直极化配置天线系数;

$U_{(h)}$ 、 $U_{(v)}$ ——实际环境中天线的水平、垂直极化输出电压。

把配置不确定度定义为

$$\left. \begin{aligned} u_{(h)} &= AF_{(h)} - AF_0 \\ u_{(v)} &= AF_{(v)} - AF_0 \end{aligned} \right\} \quad ⑪$$

式中,

$u_{(h)}$ 、 $u_{(v)}$ ——实际环境中水平、垂直极化配置不确定度;

$AF_0$ ——天线制造厂家提供的天线系数。

表 4、表 5 列出 EMC0 3110 天线及 3115 天线在模拟电磁检测环境中的测试数据。

根据表中列出的数据, EMC0 3110 天线在模拟电磁检测环境中最大配置不确定度达到 16.85dB; 而 3115 天线在与 EMC0 3110 天线相同电磁检测环境中的最大配置不确定度仅为 2.13dB。因此, 随着频率的降低, 屏蔽材料性能的变差和天线方向性图的畸变等诸多因素都会大大增加天线系数的配置不确定度。

## 8 建造高质量的全波暗室是大幅度降低天线系数配置不确定度的必经之路

表 4、表 5 的数据告诉我们, 在模拟现场得到

的配置天线系数及其配置不确定度在水平和垂直方向上是不同的, 而且都是频率的函数。因此, 按照 GJB152A-97 标准, 利用天线制造厂家提供的天线系数  $AF_0$  进行 RE102 测试时, 不同的电磁检测环境不可避免地会得到不同的测试结果。但在目前的 RE102 测试中, 我们不能简单地用  $AF_{(h)}$ 、 $AF_{(v)}$  来代替  $AF_0$ , 因为 GJB152A-97 中判定 EUT 是否超标的极限值并不是在自由空间中获得的。

为了保证目前电场辐射干扰测试结果的一致性, 从长远看, 建造大型高质量的模拟自由空间的全波暗室, 进一步完善和规范标准中的测试配置, 大幅度降低天线系数配置不确定度, 这是提高测试结果可信度的必经之路。

表 4 EMC0 3110 天线的配置天线系数及其配置不确定度

频率 (MHz)	$AF_{(h)}$	$AF_{(v)}$	$AF_0$	$u_{(h)}$	$u_{(v)}$
60	18.63	19.11	8.50	10.13	10.61
80	20.57	15.68	7.40	13.17	8.28
100	26.95	14.96	10.10	16.85	4.86
120	20.76	6.49	13.80	6.96	-7.31
140	16.63	14.98	18.70	-2.07	-3.72
160	18.80	16.01	19.10	-0.30	-3.09
180	22.74	21.20	17.40	5.34	3.80
200	23.26	15.94	16.50	6.76	-0.56

表 5 EMC0 3115 天线的配置天线系数及其配置不确定度

频率 (MHz)	$AF_{(h)}$	$AF_{(v)}$	$AF_0$	$u_{(h)}$	$u_{(v)}$
1000	25.62	23.87	24.70	0.92	-0.83
1200	25.83	24.71	25.10	0.73	-0.39
1400	24.41	23.27	25.40	-0.99	-2.13
1600	26.77	25.26	26.10	0.67	-0.84
1800	28.42	27.43	27.00	1.42	0.43
2000	28.01	27.81	28.00	0.01	-0.19

(下转第 23 页)

[1] 谢文涛.开放式航空电子系统和COTS技术.航空电子技术,2000(3): 18~25  
[2] 霍曼.综合航空电子技术发展展望.航空电子技术,2000(3): 12~17

(收稿日期 2001-02-05)

(上接第5页)

## Error Analysis of Antenna Factor in EMC Test

Shen Guolian

(Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233)

**[Abstract]** Some disadvantages of two methods being used at present of rectifying antenna factor are described in this paper; a set antenna factor and its set uncertainty concept are introduced and a way for diminishing antenna set uncertainty is proposed.

**[Keywords]** Antenna factor; Set uncertainty; Error analysis

(收稿日期 2000-12-08)

(上接第8页)

上述公式表明:

(1) 目标规避机动是命中概率下降的主要因素。由于悬停投雷时必须先收吊声缆绳再投鱼雷,从收缆绳到鱼雷在水中声自导开启约有2分钟时间,因此潜艇有2分钟的机动时间,导致声自导开启时,鱼雷测定的潜艇的位置有大的偏移,甚至无法命中目标。解决该问题的途径是去掉收缆绳动作,也就是改用双机协同的投雷方式。

(2) 目标速度的提高极大地影响命中概率,若要具有攻击高速潜艇的能力,必须提高鱼雷的速度。

## 5 结论

本文以某一型号的自导鱼雷为例,探索一种求解自导鱼雷命中概率的方法。用蒙特卡罗法解决复杂弹道、计算有自导功能武器的命中概率问题是一种行之有效的办法。命中概率计算的精确程度取决于数学模型的正确性。本研究成果可推广到计算其它自导鱼雷武器的命中概率;也可以此为基础,进行全机作战效能分析;以单次命中概率计算,配以图形显示功能可直观地判别本次是否命中。

(收稿日期 2000-09-31)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>