

# 机载吊舱式干扰机天线系统 EMC 研究

曹祥玉<sup>1</sup>, 高 军<sup>2</sup>, 梁昌洪<sup>1</sup>, 戴国宪<sup>2</sup>, 甄蜀春<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学, 陕西西安 710071; 2. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 710038)

**摘 要:** 本文结合机载吊舱式干扰机的研制, 深入研究了吊舱式干扰机天线系统 EMC 问题, 将谱域法等计算电磁学当中的混合方法应用于天线系统 EMC 预测分析和设计. 经检测证明, 所研制的机载吊舱式干扰机收发天线系统完全达到并超过设计指标.

**关键词:** 同轴双环多模喇叭天线; 天线罩; 隔离度; 辐射方向图; 透波率

**中图分类号:** TN820.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1710-03

## Study of Electromagnetic Compatibility of Antenna System in Airborne Nacelle Jammer

CAO Xiang-yu<sup>1</sup>, GAO Jun<sup>2</sup>, LIANG Chang-hong<sup>1</sup>, DAI Guo-xian<sup>2</sup>, ZHEN Shu-chun<sup>2</sup>

(1. Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China; 2. Air Force Engineering University Missile Institute, Sanyuan, Shanxi 710038, China)

**Abstract:** Electromagnetic Compatibility problem of antenna system in airborne nacelle jammer is studied in this paper. Many methods used in computational electromagnetics, such as Spectral-Domain Approach etc, are applied in the predicting analysis and the design of antenna system. It is shown by experimental test that performance of the receiving and transmitting antenna system in airborne nacelle jammer is up to, or even surpasses the target designed.

**Key words:** coaxial multi-mode horn of two chokes; radome; isolation; directional pattern; transmission coefficient

### 1 引言

机载吊舱式干扰机是将侦察设备和干扰机设备密集布置于飞机上的同一吊舱内, 由侦察设备侦察地面雷达信号, 引导干扰机释放有源干扰, 使雷达无法正常工作的系统. 其发射天线和接收天线密集布置于前舱头部的天线罩内, 组成一个特定的收发天线系统. 由于收发天线在空间有限的天线罩内密集布置, 相伴产生的电磁干扰问题成为研制工作的一个关键课题, 它严重制约着收发天线系统的正常工作以及系统指标的实现. 该天线系统 EMC 的研究内容包括两个方面: 一是从天线的选型、增益、方向图等方面分析预测, 设计出符合指标要求的天线. 二是从收发天线辐射耦合通道入手, 建立收发天线近场耦合数学模型, 从收发天线间的距离、天线相互取向以及综合系统的形状和尺寸等方面考虑, 对收发天线的耦合干扰进行分析预测, 即对隔离度进行分析预测, 从而保证所设计的收发天线系统各部分在舱内这样一个复杂的电磁环境下能兼容工作.

### 2 同轴多模喇叭天线特性分析

根据本课题的技术指标要求, 天线的选型为同轴多模喇叭天线. 同轴多模喇叭天线结构如图 1, 它是由中心圆波导和两个环波导组成的, 中心圆波导由主模激励, 在环波导中可存在多个模式:  $TE_{mn}$  和  $TM_{mn}$ . 实际中为简化分析, 环波导只考虑

可激励起来的传输模:

$TE_{11}$ 、 $TE_{12}$ 、和  $TM_{11}$  模, 它们的合成场具有良好的相位特性, 可提供旋转对称主极化方向图, 方向图类似扇形, 且 90° 旁瓣和后瓣很低.

如图 1, 依据等效原理及边界条件, 其横向磁场  $H^+(R)$  可用口面上 ( $z=0$ ) 的电场表示为:

$$H^+(R) = \frac{j}{2\mu_0} [k_0^2 + \nabla_t \cdot \nabla_t] \cdot [z \times \iint_{\Sigma} E_A(R) G(R, R) ds] \quad (1)$$

式中  $G(R, R) = \frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'|} e^{-jk_0(\mathbf{R} - \mathbf{R}')$  是自由空间格林函数,  $R, R'$  分别代表源点和观察点, 根据模式展开法及矩量法, 其口径场可表示为:

$$H_A = C_1^{(1)} h_1^{(1)} + \sum_{p=2}^4 C_p^{(2)} h_p^{(2)} + \sum_{p=5}^7 C_p^{(3)} h_p^{(3)} \quad (2a)$$

$$E_A = B_1^{(1)} e_1^{(1)} + \sum_{p=2}^4 C_p^{(2)} e_p^{(2)} + \sum_{p=5}^7 B_p^{(3)} e_p^{(3)} \quad (2b)$$

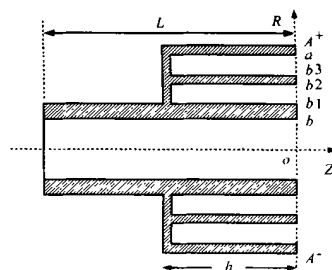


图 1 同轴多模喇叭结构示意图

其中:  $I = \begin{cases} 1, 0 \leq r \leq b \\ 0, r > b \end{cases}$ ,  $II = \begin{cases} 1, r < b, r > b_2 \\ 0, b_1 \leq r \leq b_2 \end{cases}$ ,  $III = \begin{cases} 0, r < b_2, r > a \\ 1, b_3 \leq r \leq a \end{cases}$ , 分别代表相应的主波导和环波导区域. 其中  $e_p, h_p$  是相应区域第  $p$  个模电场、磁场本征函数,  $B_p, C_p$  是相应区域第  $p$  个模电场和磁场模系数. 求解方程 (2) 可得口径面场分布  $E_A(x, y)$ . 由口径场分布可得平面波谱<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{F}(k_x, k_y) &= \tilde{F}_x(k_x, k_y) x + \tilde{F}_y(k_x, k_y) y \\ &= \iint_{S_A} E_A(x, y) e^{jk_0(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

其设计参数及方向图参见文献[2].

### 3 天线之间的耦合

根据平面波谱理论, 平面波谱和口径分布之间构成 Fourier 变换对. 因此平面波谱包含近场信息, 这样, 就可以通过平面波谱求得收、发天线之间的耦合度. 由文献[3]可导出同轴双环多模喇叭收、发天线之间的耦合度为:

$$\begin{aligned} C &= \frac{2}{j4 Z_0} e_i \cdot e(t) \\ &= \frac{1}{8^2 k Z_0} \{ (k^2 - k_y^2) \tilde{F}_{x,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{x,T}(k_x, k_y) \\ &\quad + k_x k_y \tilde{F}_{x,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{y,T}(k_x, k_y) \\ &\quad - k_x k_y \tilde{F}_{y,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{x,T}(k_x, k_y) \\ &\quad - (k^2 - k_x^2) \tilde{F}_{y,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{y,T}(k_x, k_y) \} \\ &\quad e^{-j k_0 (0 k_x^2 + 0 k_y^2 + 0 k_z^2)} \frac{dk_x dk_y}{k_z} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 是适用于任意口径场极化的普遍的天线耦合公式. 只要知道任意两个极化天线的平面波谱和它们在空间的相互位置, 通过式 (3) 即可求得它们之间的耦合度. 当工作频率  $f = 5.65 \text{ GHz}$ , 收发天线在理想空间并行放置, 两天线口径面中心间距为  $r$ , 耦合度随空间距离变化关系曲线见图 2; 当收发天线间距  $r = 2.5$ , 发射天线固定, 接收天线沿自身中心轴旋转, 得耦合度随旋转角度变化关系曲线见图 3, 由图可见计算结果与测量值吻合较好, 最大误差不超过 2dB. 这样就可以通过调整空间布局来满足收发天线之间隔离度的要求.

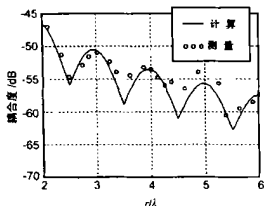


图 2 收发天线耦合度随距离变化

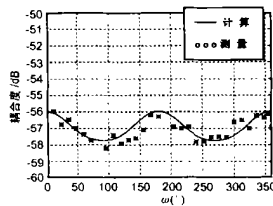


图 3 收发天线耦合度随旋转角度变化

### 4 天线罩对天线辐射特性影响

根据指标要求, 机载吊舱干扰机天线罩选择了电气性能好、重量—强度比高的 A—夹层结构. 天线罩外型为旋转对称、卵形天线罩, 其母线方程为:

$$\begin{cases} (x - 80)^2 + y^2 = 80^2 \\ y = 39.4 + 0.808x - 1.285 \times 10^{-3}x^2 + 1.39 \times 10^{-6}x^3 - 8 \times 10^{-4}x^4 \end{cases}$$

切点为:  $(x = 32, y = 64)$  (5)

A—夹层结构天线罩截面是由高介电常数且厚度很薄的内外蒙皮和一个低介电常数的夹芯层组成. 根据微波等效网络原理, 可把介质平板等效成一低阻抗传输线, 三层相当于三个低阻抗传输线的级联, 可用传输矩阵分析<sup>[4]</sup>. 通过分析天线罩传输系数随频率、层厚、入射角的变化关系, 可得到天线罩设计的最佳层厚和入射角范围, 为天线罩的设计提供了理论依据. 所设计的天线罩内外蒙皮采用玻璃纤维加环氧树脂:  $\epsilon_1 = 4.2, tg \delta_1 = 0.015$ , 其厚度  $d_1 = 0.02 \lambda_0$ ; 中间层采用低介电常数、低损耗、低密度的纸蜂窝芯层:  $\epsilon_2 = 1.15, tg \delta_2 = 0.004$ , 其厚度  $d_2 = 0.2 \lambda_0$ . 经高低温 ( $-55 \sim +65$ ) 试验、振动 (振动频率  $5 \sim 500 \text{ Hz}$ ; 振动加速度  $6g$ ; 冲击加速度  $20g$ ) 试验, 天线罩完好无损; 经静压试验, 当罩内外压差为  $0.069 \text{ Mpa}$  时, 未见天线罩损坏. 采用图 1 所示的天线, 天线位于天线罩中心, 天线电轴与天线罩纵轴夹角  $15^\circ$ . 在工作频率范围内, 实测透波率大于  $85\%$ . 同时利用谱域法预测了加罩后天线辐射方向图的变化, 并与实测结果进行了对比, 获得了令人满意的结果<sup>[5]</sup>.

### 5 加天线罩后的隔离度

分析加罩收发天线的隔离度, 首先要分析天线罩对天线辐射方向函数的影响, 然后反推天线—天线罩平面波谱, 最后求隔离度. 分析天线罩对天线方向函数的影响, 采用平面波谱表面积分法. 平面波谱表面积分法是基于如下假设: (1) 天线罩内表面上的近场分布是作为局部平面波入射到一个平面介质板上的情况处理的; (2) 忽略天线与天线罩之间多次反射的影响; (3) 面积分只考虑位于天线前半空间的天线罩表面上的场.

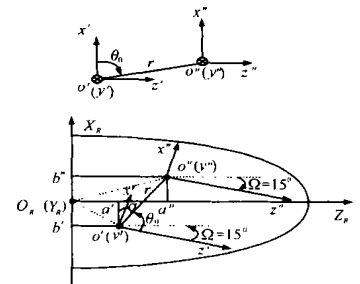


图 5 收发天线坐标系与天线罩坐标系关系示意图

设子平面波  $(S, \theta_0)$ , 它的入射角  $\theta_0(S, \theta_0)$  和极化角  $\phi_0(S, \theta_0)$  既是  $S, \theta_0$  的函数, 也是天线罩位置的函数. 子平面波透过天线罩以后, 在天线罩外表面上形成的切面场为  $E_t^{Rout}(S, \theta_0), H_t^{Rout}(S, \theta_0)$ .

由此可得天线—天线罩远区辐射场:

$$\begin{aligned} E &= -\frac{jk_0}{4r} e^{-jk_0 r} R \times \iint_R n_{RMO} \times E_t^{Rout} - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} R_1 \\ &\quad \times n_{RMO} \times H_t^{Rout} \} e^{jk_0 r} \cdot R_1 dS_R \end{aligned} \quad (6)$$

根据平面波谱理论, 由天线—天线罩远区辐射方向性函数可反推平面波谱:

$$\tilde{F}_{Rt}(\vartheta_R, \phi_R) = \left[ \cos \vartheta_R \cos^2 \phi_R + \frac{\sin^2 \phi_R}{\cos \vartheta_R} \right] E_{Rt}(\vartheta_R, \phi_R)$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\sin^2 \vartheta_R \sin_{R \cos R}}{\cos \vartheta_R} E_{Ry}(\vartheta_R, R) \\
& - \sin \vartheta_R \cos_{R} E_{Rz}(\vartheta_R, R) \tag{7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{F}_{Ry}(\vartheta_R, R) = & - \frac{\sin^2 \vartheta_R \sin_{R \cos R}}{\cos \vartheta_R} E_{Ry}(\vartheta_R, R) \\
& + \left( \cos \vartheta_R \sin^2 R + \frac{\cos^2 R}{\cos \vartheta_R} \right) E_{Ry}(\vartheta_R, R) \\
& - \sin \vartheta_R \cos_{R} E_{Rz}(\vartheta_R, R) \tag{8}
\end{aligned}$$

根据式(4)、(6)、(7),在图5所示的天线罩坐标系下,当接收天线位于 $o(95,0,140)$ ,发射天线位于 $o(-85,0,40)$ 时,可求得加罩收发天线隔离度: $IDL = |C| = 52.4302\text{dB}$ .而在微波暗室测得: $IDL = 50.10\text{dB}$ .

### 6 结论

本文结合“机载吊舱式干扰机”的研制,对干扰机加罩天线系统 EMC 问题进行了较深入而系统的研究.通过大量的理论计算和反复的实验,得到了机载吊舱式干扰机加罩收发天线系统实现电磁兼容预测所必须的隔离度、透波率、方向性函数、空间布局等重要参数.实现了机载吊舱(加罩)收发天线系统的科学设计和研制,经检测证明,所研制的机载吊舱式干扰机收发天线系统完全达到并超过设计指标.

### 参考文献:

[1] 杨可忠,杨志友,高健,章日荣.同轴多模馈源的理论研究[J].中国科学A辑,1989,8:887-896.

[2] 曹祥玉.机载吊舱干扰机天线系统 EMC 研究[D]. 博士学位论文,空军导弹学院,1999.5.  
 [3] 方大纲著.电磁理论中的谱域方法[M].安徽教育出版社,1995.6,第一版.  
 [4] Benjamin Rulf. Problems of radome design for modern airborne radar[J]. Part 1 Microwave Journal, January 1985:145-153.  
 [5] 高军,曹祥玉.C波段机载干扰机天线罩的分析与设计[J].现代雷达,22(1):66-70.

### 作者简介:



曹祥玉 女.1964年生于陕西省西安市.博士,副教授,1999年7月毕业于空军导弹学院,获博士学位.现在西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士后流动站.曾获军队科技进步一等奖(并获国家科技进步三等奖),主要研究方向电磁场数值计算,电磁兼容.



高 军 男.1962年12月生于青海省西宁市.副教授,多次获军队科技进步奖.主要研究方向:防空武器系统电子抗干扰.

(上接第1725页)

### 附录 对链形拓朴 $F_n(i)$ 函数的计算

第一步:设  $q_1 = p$ ;

$$\begin{aligned}
F_{n-1}(i) &= \sum_{x=0}^{i-1} \binom{i}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{i-x} \cdot F_n(i-x) \\
&= \sum_{x=0}^{i-1} \binom{i}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{i-x} \cdot (1-q_1^{i-x}) \\
&= \sum_{x=0}^{i-1} \binom{i}{x} \cdot p^x \cdot (1-p)^{i-x} \\
&\quad - \sum_{x=0}^{i-1} \binom{i}{x} \cdot p^x \cdot (1-p) \cdot q_1^{i-x} \\
&= 1 - p^i - ((p + (1-p) \cdot q_1)^i - p^i)
\end{aligned}$$

由二项式定理

$$= 1 - (p + (1-p) \cdot q_1)^i$$

第二步:设  $q_2 = p + (1-p) \cdot q_1$

$F_{n-2}(i) = 1 - (p + (1-p) \cdot q_2)^i$ ; 同上推导过程

第三步:设  $q_3 = p + (1-p) \cdot q_2$

$F_{n-3}(i) = 1 - (p + (1-p) \cdot q_3)^i$ ; 同上推导过程

.....

第  $n-1$  步:设  $q_{n-1} = p + (1-p) \cdot q_{n-2}$

$F_1(i) = 1 - (p + (1-p) \cdot q_{n-1})^i$ ; 同上推导过程

由以上推导过程构造等比数列:

$$q_{i+1} - 1 = (1-p) \cdot (q_i - 1).$$

其中  $1 \leq i \leq n-2$ , 则  $q_{n-1} - 1 = (1-p)^{n-2} (p-1)$ , 等比数列通项式, 即  $q_{n-1} = 1 - (1-p)^{n-1}$ .

$$\begin{aligned}
\text{解得 } F_0(i) = F_1(i) &= 1 - (p + (1-p) \cdot q_{n-1})^i \\
&= 1 - (1 - (1-p)^n)^i
\end{aligned}$$