

同轴双环多模喇叭收、发天线近场耦合特性分析

曹祥玉¹, 高 军², 梁昌洪¹, 戴国宪², 甄蜀春²

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院 陕西 西安 710071;

2. 空军工程大学 导弹学院 陕西 三原 713800)

摘要:采用平面波谱理论分析了同轴双环多模喇叭收、发天线耦合特性,得出了同轴双环多模喇叭收、发天线之间的耦合系数表达式,计算了收、发天线间耦合系数随收发天线间距和旋向的变化趋势,为收、发天线的布局提供了参数,为实现隔离度要求提供了有效方案.经测试表明,理论与测量结果吻合良好.

关键词:同轴双环多模喇叭天线;耦合特性;隔离度

中图分类号:TN820.1 文献标识码:A 文章编号:1001-2400(2001)05-0672-04

An analysis of the mutual coupling between the coaxial multi-mode horn of two chokes in the near-field

CAO Xiang-yu¹, GAO Jun², LIANG Chang-hong¹, DAI Guo-xian², ZHEN Shu-chun²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Air Force Engineering Univ. Missile Institute, Sanyuan 713800, China)

Abstract: The spectral-domain approach is applied to analyze the isolation between the coaxial multi-mode horn of two chokes side by side, with the coupling formulation derived. The coupling is computed and practically measured. The results show an excellent agreement of theory with experiment. By this means, the isolation between transmitting and receiving antennas in the airborne nacelle jammer is guaranteed, which satisfies the technical indexes for design. On the other hand, a valuable basis for the disposition optimization of antennas in airborne nacelle jammer is provided.

Key Words: coaxial multi-mode horn of two chokes; coupling; isolation

扼流环多模馈源体积小、结构简单、加工容易、成本低,自 20 世纪 60 年代末 G. F. Koch 提出,70 年代由 H. Scheffer 对其改进以后,由于其具有方向图宽、旁瓣低、能产生旋转对称的辐射方向图,且交叉极化低(小于 -30 dB),端口隔离度高等特点而得到广泛应用.某机载吊舱式干扰机天线系统就采用了同轴双环多模喇叭天线.在对同轴双环多模喇叭天线做了较深入全面的理论分析后^[1],笔者对同轴双环多模喇叭收、发天线近场区隔离度(耦合系数)进行了分析.国外在 70 年代曾采用几何绕射理论(GTD)对喇叭天线近区隔离度进行了分析^[2,3];国内的一些研究报告大都采用工程近似的方法进行估算,这对远区可以,但在近区其误差太大^[4,5].笔者采用谱域法分析计算了同轴双环多模喇叭天线近区耦合度,并对其进行了实验验证,计算与测量结果相吻合的结论证明了理论分析的正确性和有效性,为此类收、发天线系统电磁兼容(EMC)研究提供了依据.

1 同轴双环多模喇叭收、发天线耦合公式

天线所产生的场可用平面波谱的谱积分来表示,而平面波谱和口径分布之间构成 Fourier 变换对.如果

收稿日期 2000-11-27

基金项目 国家自然科学基金资助项目(69871021, 69931030)

作者简介 曹祥玉(1964-),女,副教授,博士.
万方数据

不做渐近近似,平面波谱中也包含近场信息,这样,就可以通过平面波谱来沟通近场信息和远场信息,也可以通过平面波谱来分析预测收、发天线之间在自由空间的耦合度以及耦合度随空间距离、旋转角度的变化关系.

定理 如果有一个平面波入射到天线上,它的电场矢量为 $\mathbf{e}(i)$, i 是由天线向平面波看去的方向,则由天线传送到接收机的讯号的复幅度正比于标量积 $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}(i)$. 这里, $\mathbf{e}(i)$ 是天线用作发射时在 i 方向上场的矢量方向图函数,其比例系数是 $\lambda^2/(j 4 \pi Z P_0)$, 即

$$\frac{b}{a} = \frac{\lambda^2}{j 4 \pi Z P_0} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}(i) \quad (1)$$

式中 $Z = (\mu/\epsilon)^{1/2}$ 为波阻抗; \mathbf{e}_i 为入射平面波的矢量幅度; $\mathbf{e}(i)$ 由式 $E(r, \theta, \varphi) = [\exp(-j k r)(k r)] \cdot \mathbf{e}(\theta, \varphi)$ 所定义.

式(1)是在远区情况下,在空域利用 Lorentz 定理推导出来的. 将此概念推广到谱域,把平面波作为平面波谱,在包括复角在内的所有角度上把平面波谱叠加起来,就得出适合于任意距离的耦合公式^[6].

如图 1 所示,在空间面对面间隔一段距离放置时,利用上述结论可推导同轴双环多模喇叭天线收、发天线之间的耦合度公式.

图中 $r_0 = \overline{oo'}$ 表示两天线口径中心的距离, r_0 的方向余弦为 $(\xi_0, \eta_0, \delta_0)$, $\xi_0 = \sin \alpha \cos \beta$, $\eta_0 = \sin \alpha \sin \beta$, $\delta_0 = \cos \alpha$.

根据式(1),首先应求出 $\mathbf{e}(i)$, 即 $\mathbf{e}(\theta', \varphi')$. 根据定义知

$$\mathbf{e}(\theta', \varphi') = \frac{k r}{\exp(-j k r)} E_R(r', \theta', \varphi') \quad (2)$$

由谱域理论知道,平面波谱可以表示辐射方向图. 由于同轴双环多模喇叭天线口径场的极化是任意的,即它有两个谱函数 $\tilde{F}_x(\theta, \varphi), \tilde{F}_y(\theta, \varphi)$, 因此接收天线的矢量电场用平面波谱可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(\theta', \varphi') = & j 2 \pi \frac{1}{\lambda^2} [(x \cos \theta' - z \sin \theta' \cos \varphi') \tilde{F}_x(k \sin \theta' \cos \varphi', k \sin \theta' \sin \varphi') + \\ & (y \cos \theta' - z \sin \theta' \sin \varphi') \tilde{F}_y(k \sin \theta' \cos \varphi', k \sin \theta' \sin \varphi')] = \\ & j 2 \pi \frac{1}{\lambda^2} \left\{ \left(x' \frac{k'_z}{k} - z' \frac{k'_x}{k} \right) \tilde{F}_x(k'_x, k'_y) + \left(y' \frac{k'_z}{k} - z' \frac{k'_y}{k} \right) \tilde{F}_y(k'_x, k'_y) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

再求 \mathbf{e}_i . 由平面波谱理论可知,对任意极化口径场天线其总场用平面波谱可表示为

$$\begin{aligned} E(x, y, z) = & \frac{1}{4\pi^2} \{ (x k_z - z k_x) \tilde{F}_x(k_x, k_y) + (y k_z - z k_y) \tilde{F}_y(k_x, k_y) \} \cdot \\ & \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] \frac{dk_x dk_y}{k_z} \quad (4) \end{aligned}$$

根据式(4),再考虑经过距离 r_0 的相位延迟,则可求得发射天线入射到接收天线上的波谱

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_i = & \frac{1}{4\pi^2} \{ (x k_z - z k_x) \tilde{F}_x(k_x, k_y) + (y k_z - z k_y) \tilde{F}_y(k_x, k_y) \} \cdot \\ & \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] \frac{dk_x dk_y}{k_z} = \\ & \frac{1}{4\pi^2} \{ (x k_z - z k_x) \tilde{F}_x(k_x, k_y) + (y k_z - z k_y) \tilde{F}_y(k_x, k_y) \} \cdot \\ & \exp[-j r_0 (\xi_0 k_x + \eta_0 k_y + \delta_0 k_z)] \frac{dk_x dk_y}{k_z} \quad (5) \end{aligned}$$

将式(4)(5)坐标系进行统一,采用发射天线坐标系 (x, y, z) , 此时可利用下列变换:

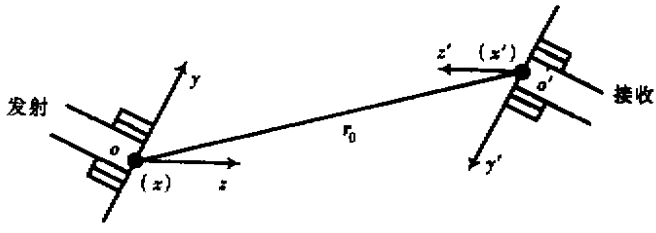


图 1 收、发天线空间位置示意图

$$\begin{aligned}x' &\rightarrow x, & k'_x &\rightarrow -k_x, \\y' &\rightarrow -y, & \text{以及} & k'_y \rightarrow k_y, \\z' &\rightarrow -z, & k'_z &\rightarrow k_z.\end{aligned}$$

将上述关系式代入式(5),可得 e_i 在发射坐标系下的表达式,代入(1),并对所有谱积分,得耦合系数为

$$\begin{aligned}C &= \frac{\lambda^2}{j 4 \pi Z_0} e_i \cdot e(i) = \\&\frac{1}{8 \pi^2 k Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{ (k^2 - k_y^2) \tilde{F}_{x,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{x,I}(k_x, k_y) + k_x k_y \tilde{F}_{x,R}(-k_x, k_y) \cdot \\&\tilde{F}_{y,I}(k_x, k_y) - k_x k_y \tilde{F}_{y,R}(-k_x, k_y) \tilde{F}_{x,I}(k_x, k_y) - (k^2 - k_x^2) \tilde{F}_{y,R}(-k_x, k_y) \cdot \\&\tilde{F}_{y,I}(k_x, k_y) \} \exp[-j r (\xi_0 k_x + \eta_0 k_y + \delta_0 k_z)] \frac{dk_x dk_y}{k_z}.\end{aligned}\tag{6}$$

式(6)是适用于任意口径场极化的天线耦合公式.由此公式可以看出,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(6)即可求得它们之间的耦合度.

2 计算结果与实测结果比较

根据上述分析结果,计算两个并列放置的同轴多模喇叭天线之间的耦合度,两天线放置位置如图2所示.

图中 $r = \overline{oo'}$, r 的方向余弦为 $(\xi_0, \eta_0, \delta_0)$. 此时两坐标系间的转换关系为

$$\begin{aligned}x &\rightarrow x', & k_x &\rightarrow -k'_x, \\y &\rightarrow y', & \text{以及} & k_y \rightarrow -k'_y, \\z &\rightarrow z', & k_z &\rightarrow -k'_z.\end{aligned}$$

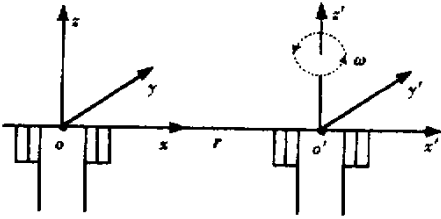


图2 收发天线放置位置示意图

因为 $k_x = k \sin \theta \cos \varphi$, $k_y = k \sin \theta \sin \varphi$, 根据式(1),可推导出图2所示的两个并列放置的互耦天线之间的耦合度表达式为

$$\begin{aligned}C &= \frac{k^2}{8 \pi^2 Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{ (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) \tilde{F}_{x,R}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) \cdot \\&\tilde{F}_{x,I}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) + \\&\sin^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi \tilde{F}_{x,R}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) \tilde{F}_{y,I}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) - \\&\sin^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi \tilde{F}_{y,R}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) \tilde{F}_{x,I}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) - \\&(1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) \tilde{F}_{y,R}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) \tilde{F}_{y,I}(k \sin \theta \cos \varphi, k \sin \theta \sin \varphi) \} \sin \theta \cdot \\&\exp[-j k r (\sin \theta \cos \varphi \sin \alpha \cos \beta + \sin \theta \sin \varphi \sin \alpha \sin \beta + \cos \theta \cos \alpha)] d\theta d\varphi.\end{aligned}\tag{7}$$

当接收天线的旋转角度 $\omega = c$, 由式(7)可得出耦合系数随收发天线之间间距 r 的变化关系,如图3所示.在图3中还标出了一些典型的测量值,由图可见,分析预测结果与测量值吻合得较好,绝大部分点一致性很好,最大的误差也不超过2 dB,而且从整体来看耦合度都小于 -45 dB,满足了工程设计指标要求($|C| \leq -40$ dB).

当收、发天线之间的距离固定, $r = 3.5\lambda$, 而且发射天线固定不动,只有接收天线沿自身的轴向旋转,即 $\omega = 0 \sim 360^\circ$, 将 $\varphi \rightarrow \varphi + \omega$ 代入式(7),同样可得耦合度随旋转角度 ω 的变化关系,如图4所示.

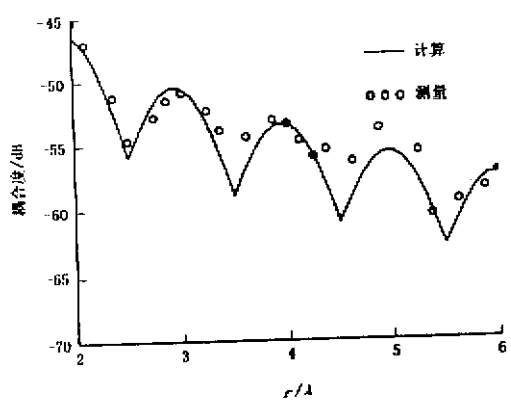


图 3 收发天线隔离度随距离变化

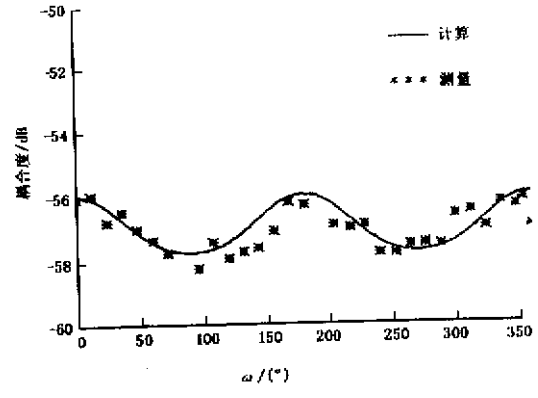


图 4 收发天线隔离度随旋转角度变化

3 小 结

收发天线耦合度不仅与天线的类型、天线之间的距离和极化状态有关 ,还与收发天线所处的空间环境有关 .笔者是在理想环境下 ,通过计算和实测 ,得出了两个并行放置的同轴双环多模喇叭收、发天线之间的耦合系数表达式 .这一计算结果为分析预测机载吊舱式干扰机收、发天线隔离度 ,以及选择收、发天线在空间的最佳布局提供了依据 .利用微波暗室对其隔离度进行大量、反复的实验研究 ,得出了所设计的收发天线隔离度随距离变化的关系曲线和随天线旋转角度变化的关系曲线 .理论计算与实测结果吻合较好 .经过反复实践修正 ,确定了同轴双环多模喇叭收、发天线在吊舱内的间距和旋向 ,为在一个有限的空间内寻找最佳的收、发天线安装位置提供了参考依据 .

参考文献 :

[1] 曹祥玉 ,高 军 ,梁昌洪 . 双扼流环多模喇叭天线研究 [J] . 西安电子科技大学学报 , 2000 , 27 (5) : 567-570 .
[2] Hamid M A K . Mutual Coupling Between Sectoral Horns Side by Side [J] . IEEE Trans on AP , 1967 , 26 (3) : 475-477 .
[3] Andersen J B , Lessow H A , Schjer H . Coupling Between Minimum Scattering Antennas [J] . IEEE Trans on AP , 1974 , 10 (6) : 532-535 .
[4] 杨绍华 . 近场区内天线之间的互耦分析 [J] . 移动通信 , 1996 (6) : 31-33 .
[5] 王显蓉 ,梁维杰 . 机载连续波侦察干扰模拟机收发隔离问题的研究 [J] . 航天电子对抗 , 1985 , (1) : 6-13 .
[6] 方大纲 . 电磁理论中的谱域方法 [M] . 合肥 : 安徽教育出版社 , 1995 .

(编辑 : 郭 华)

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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),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>