

文章编号 : 1006 - 4729(2005)03 - 0234 - 03

电子设备中天线的互耦效应分析

孟逢逢 , 朱 武

(上海电力学院 计算机与信息工程学院 , 上海 200090)

摘要 :介绍了电磁兼容问题在现代电子设备设计中的重要性 , 重点研究了电子设备中天线的互耦效应和校正方法 , 阐明了天线的互耦效应直接影响到天线性能 , 并对软件校正方法进行了计算机模拟 .

关键词 :电磁干扰 ; 电磁兼容 ; 互耦效应 ; 校正

中图分类号 : TM93 文献标识码 : A

Analysis on Mutual Coupling Effect of Antenna of Electric Equipment

MENG Feng-feng , ZHU Wu

(School of Computer and Information Engineering , Shanghai University of Electric Power , Shanghai 200090 China)

Abstract : This paper introduces the importance of EMC in the design of modern electronic devices , studies the mutual coupling effect and calibration methods , investigates the performance degradation due to mutual coupling , and presents some computer simulation results of software calibrating method .

Key words : electromagnetic interference ; electromagnetic compatibility ; mutual coupling effect ; calibration

随着电子技术的迅速发展 , 现代电子设备如通信、计算机、控制设备和部件的密集程度的不断增加 , 所产生的电磁干扰 (EMI) 也越来越严重 . 电子设备不可避免地在电磁环境 (EME) 中工作 , 因此必须解决电子设备在 EME 中的适应能力 , 以确保它能正常工作 , 发挥应有的功能 . 在设计电子设备的过程中 , 必须同时考虑电磁兼容 (EMC) 问题^[1] .

天线作为通信、电子设备中电磁能量的发射和接收端口 , 最有可能形成相互的辐射干扰 , 即天线能量的相互耦合 . 天线的互耦效应直接影响到天线性能和电参数的改变 , 如辐射方向图失真 , 主

波束方向发生偏移 , 信噪比下降 , 电流分布变化 , 输入阻抗和增益都发生变化等现象 . 因此 , 只要有互耦效应的存在 , 天线就达不到最佳设计效果 . 可见 , 对天线互耦效应的研究 , 也属于电磁兼容的研究范畴 .

1 研究天线互耦影响的基本思想

天线在通信、雷达、声纳等领域都具有广泛的应用 , 但天线的互耦效应严重地影响了电子系统的性能 . 天线互耦的强弱也表征了天线相互干扰的强弱 . 天线的互耦可分为两类 : 一是多个独立天线之间的互耦 ; 二是阵列天线系统内不同辐射元

间的互耦.

同一架飞机或舰艇上不同功能天线之间的互耦是属于独立天线之间的互耦问题.采取增大天线之间的间距是降低互耦的有效措施.但是,飞机和舰艇的有限空间无法使互耦影响降低到允许的范围之内,只有通过合理地设计天线布局,才能使互耦影响减到最小.

在研究阵列天线时,通常都认为各单元是理想工作而互不干扰的.而实际上,在阵列天线系统中,每一个天线单元都是开放型电路,各单元之间并不是完全隔离的,而是存在着相互影响,即互耦.特别是当阵列单元之间距离较小时,其耦合作用是不可忽视的.由于互耦效应,当阵列处于接收时,每个单元的接收信号不仅是对入射平面波的响应,而且包括对周围单元天线引起散射场的响应.在发射时,每个单元天线的表面电流也将包括馈源激励和相邻单元散射场激励两部分^[2].

在天线阵中,由于阵元间距小,它们之间的电耦合使阵元表面处的场及其电流分布都发生了变化,因而其阻抗也发生了变化.根据天线阵理论,每个阵元的阻抗包括两部分:阵元自身的阻抗(自阻抗)和受其他阵元影响而产生的互阻抗.因此,可用互阻抗来表征阵元之间的互耦.证明互耦后,天线阵子上的表面电流仍然近似满足余弦分布关系.因此,可以采用等效网络进行分析.对于N+1端口阵列互耦模型,其示意图见图1.

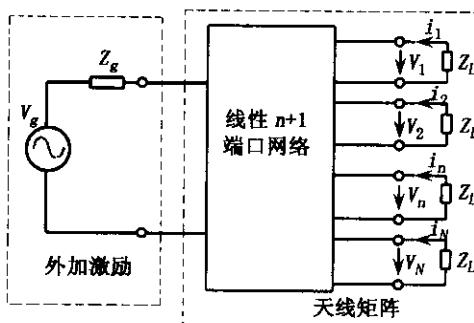


图1 接收阵列的等效n+1端口网络

图1中,外加激励场用开路电压为V_g,内阻抗为Z_g的电压源等效表示.

根据克希霍夫(Kirchoff)定理,可将图1的网络关系表示为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{1s} \\ Z_{2s} \\ \vdots \\ Z_{Ns} \end{bmatrix} i_s \quad (1)$$

式中Z_{ij}表示第i,j端口之间的互阻抗.

在天线输出端口有如下关系式

$$i_n = -\frac{v_n}{Z_L} \quad (2)$$

如果阵列单元开路,则

$$i_n = 0 \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

此时,根据式(1),有

$$v_n = Z_{ns} i_s = V_{n0} \quad (4)$$

式中V_{n0}表示第n单元的开路电压.

将式(3)代入式(1)可得到

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{11}}{Z_L} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & 1 + \frac{Z_{22}}{Z_L} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & 1 + \frac{Z_{NN}}{Z_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{10} \\ v_{20} \\ \vdots \\ v_{30} \end{bmatrix} \quad (5)$$

也可将式(5)写成如下矩阵形式

$$[Z_0] [I] [V] = [V_0] \quad (6)$$

式中[V₀]——开路电压;

[V]——阵列端口接收电压;

[Z₀]——归一化阻抗矩阵.

通常[Z₀]为非奇异矩阵,因此,阵列输出端负载电压为

$$[V] = [Z_0]^{-1} [V_0] \quad (7)$$

可见,阵列接收电压与开路电压仅相差[Z₀]⁻¹的矩阵变换关系.当天线单元间距较大时,将为对角矩阵.著名单元的自阻抗Z_{nn}相同,则阵列接收电压与开路电压仅相差一个常数因子项,它们的幅相特性与[V₀]相同,此时即为无互耦影响的情况.所以,矩阵[Z₀]⁻¹反映了阵列互耦特性.

2 天线互耦影响的校正方法

目前,天线互耦的校正方法^[3]有以下两种.

(1)软件校正互耦影响 如果研究M元天线阵元间互耦的影响,可将M元天线阵等效成M+1

端双向线性网络。通过分析该网的克希霍夫关系可知，阵元间互耦的影响改变了阵列对来波信号的响应矢量，即变成由各阵元端接的负载阻抗归一化的阻抗阵元矩阵的逆左乘忽略互耦时的阵列对来波的响应矢量。通过计算或实验测量各阵元的自阻抗与互阻抗可获得阻抗矩阵。计及互耦影响改变阵列对来波信号的响应矢量修正天线的最佳权矢量后，就可在波束图中恢复干扰方向的零点深度，因而通过软件方法实现阵元间互耦的校正。

(2) 硬件校正互耦影响 阵元间存在的互耦将改变天线阵中各阵元的方向图，使它们各不相同，从而使干扰方向上零深度变浅，或向“零点”方向偏移。采用硬件校正的方法，在天线阵轴两端延线上都增加数目相同的开路阵元，其间距和阵元本身都与原阵列的相同。这种阵元被称为保护阵元，能使整个阵列变长。原阵列的阵元处于整个阵列的中心区域，整个阵列阵元间互耦影响的结果使原阵列阵元的方向图趋于一致。这样就可在很大程度上减小“零点”处的畸变，使其处于信号干扰的位置。

3 计算机模拟实验

天线的互耦分析，计算自阻抗、互阻抗的方法较成熟。本文将阵元选为半波偶极子天线来进行计算和模拟。计算机分析模型具有 10 个对称阵子，阵元间距为 0.5 个波长，阵元半径为 0.003 3 个波长，工作频率为 10^9 Hz，各阵元的负载阻抗取 50Ω ，阵列对来波信号的采样数为 256。

图 2 为考虑互耦影响与互耦校正后的波束，图 3 为不计互耦的理想波束。

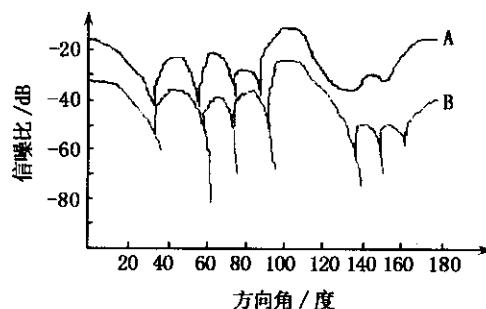


图 2 考虑互耦影响与互耦校正后的波束

图 2 中，需要信号入射角为 90° ，其信噪比(SNR)为 -20 dB，干扰信号分别来自 $40^\circ, 60^\circ,$

$80^\circ, 100^\circ, 130^\circ, 150^\circ$ 方向，其信噪比均为 30 dB。曲线 A 是有互耦影响未经校正的波束，可以看出阵元间互耦使天线系统性能下降，即互耦影响后在干扰方向上的零点深度变浅。曲线 B 是互耦校正后的波束，它保证了在干扰信号方向上有足够深的零点深度，这在很大程度上克服了互耦对系统性能的影响，其形状已接近于图 3 中不计互耦的理想波束(曲线 C)。

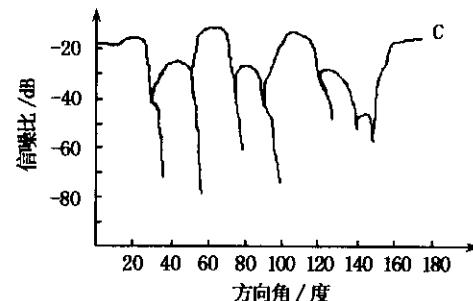


图 3 不计互耦的理想波束

实验证明，经互耦补偿后的波束图保证了在干扰信号方向上有足够深的零点深度，在忽略噪声的情况下，补偿后可恢复理想状态的零点深度。

4 结束语

EMC 问题的分析是一项复杂的工作，需要进行大量的数值计算和分析实验。本文重点讨论的是电子设备中天线的互耦效应和校正方法。通过计算机模拟实验证明，软件校正方法简便可行。而相对于硬件校正互耦影响，则需添加保护阵元。但天线的互耦分析通常需要借助电磁场数值的方法。随着天线阵子的增加，数值计算数量也相应增加，所以对计算机的辅助分析能力要求也较高。

参考文献：

- [1] 刘鹏程,丘扬.电磁兼容原理及技术[M].北京:高等教育出版社,1993.135~137.
- [2] Inder J, Gupta Aharon A, Ksenski. Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Array[J]. IEEE Trans. on AP, 1982, 30(5): 785~791.
- [3] Compton, R T Jr. Adaptive Antennas: Concepts and Performance [M]. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1988. 282~284.
- [4] Chien-chung Yeh, Maw-Lin Leon. Bearing Estimations with Mutual Coupling Present [J]. IEEE Trans., 1989, 37(10): 1 332~1 335.
- [5] Steyskal H, Herd J S. Mutual Coupling Compensation in Small Array Antennas [J]. IEEE Trans. on Antenna and Propagation, 1990, 38(12): 1 971~1 975.

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)，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>