

# 线天线阵单元间距对互耦的影响

秦建军，张厚，席吉虎  
(空军工程大学 导弹学院，陕西 三原 713800)

**摘 要** 采用矩量法严格计算和分析了天线阵单元间的互阻抗随间距的变化关系，分析了互耦对 Chebyshev 八单元天线阵方向图的影响。给出了精确计算任意电流元之间的互阻抗公式，绘制了互阻抗随间距的变化曲线和考虑互耦效应的 Chebyshev 八单元天线阵方向图，给出了天线阵单元间距的一个参考值。  
**关键词** 互耦 线天线阵 矩量法  
**中图分类号** :TN823      **文献标识码** :A      **文章编号** :1009-3516(2002)03-0074-03

计算互耦的影响是很困难的，人们在理论和实验上已进行了大量的研究<sup>[1]</sup>。但是，精确计算和分析天线阵单元间的互阻抗与单元间距的关系的文献却很少见。一种广泛采用的分析互耦的数值计算方法是以单元间互阻抗便于计算为基础的阻抗法，在众多的数值计算方法中，对于线天线最精确、最可靠的分析方法是矩量法。

## 1 理论分析

### 1.1 矩量法的基本思想

矩量法的基本模型为<sup>[1~3]</sup>

$$L(f)=g \tag{1}$$

其中， $L$  为算子，可为差分方程、微分方程或积分方程； $g$  为已知函数，如激励源； $f$  为未知函数，如电流分布。适当的选择基函数与权函数，将未知函数用基函数展开，并与权函数  $\omega_m$  求内积可得下式：

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n <\omega_m, L[F_N(z)]> = <\omega_m, g(z)> \tag{2}$$

将式(2)写为矩阵形式：

$$ZI=V \tag{3}$$

解式(3)所示的矩阵方程可得天线表面的电流分布。

### 1.2 互阻抗公式

图1是任意分段电流的三维坐标示意图。分段电流表达式<sup>[1~3]</sup>如下：

$$f_n(z') = \begin{cases} \sin \frac{[k(z' - z'_{n-1})]}{\sin[k(z' - z'_{n-1})]} \cdots z'_{n-1} \leq z' \leq z' \\ \sin \frac{[k(z'_{n+1} - z')]}{\sin[k(z'_{n+1} - z')] } \cdots z'_n \leq z' \leq z'_{n+1} \end{cases} \tag{4}$$

任意两段分段电流之间的互阻抗计算表达式<sup>[1~3]</sup>：

$$Z_{mm} = 30j \left[ \int_z^{z_m} \frac{\sin \frac{[k(z - z_{m-1})]}{\sin[k(z - z_{m-1})]} + \int_{z_m}^{z_{m+1}} \frac{\sin \frac{[k(z_{m+1} - z)]}{\sin[k(z_{m+1} - z_m)]}} \right] \times \sum_{s=1}^3 \alpha(s) \frac{\exp(-jkR(s))}{R(s)} dz \tag{5}$$

\* 收稿日期 2001-01-10  
作者简介 秦建军(1977-)男，山西长治人，硕士，主要从事天线与电磁兼容研究。

式中：

$$\begin{cases} \alpha(1) = 1/\sin k(z_n - z_{n-1}) \\ \alpha(2) = \sin k(z_{n+1} - z_{n-1})/\sin k(z_{n+1} - z_n)\sin k(z_n - z_{n-1}) \\ \alpha(3) = 1/\sin k(z_{n+1} - z_n) \end{cases} \quad (6)$$

$$R(s) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (7)$$

其中  $s = 1, 2, 3$  分别对应  $i = n - 1, n, n + 1$ ,  $R(s)$  表示分段电流  $I_1$  的端点  $n - 1, n, n + 1$  分别到分段电流  $I_2$  上任意点的距离。

1.3 矩量法计算

采用矩量法精确分析一副  $N$  单元天线阵,考虑各单元间互耦的广义阻抗矩阵可表示为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $Z_{ii}$  和  $Z_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$ ) 分别表示天线阵各单元的阻抗矩阵和单元间互阻抗矩阵。

在这里有两点需要指出：

1)  $R(s)$  是没有作任何近似的距离表达式,这对于计算和分析近区场分布和相位关系是非常必要的,式(5)是互阻抗的精确计算公式。

2) 当单元数目较多时,矩阵  $Z_{mn}$  将是一个非常庞大的一个矩阵,这使计算时间大大增加。但是,仔细的观察一下就不难发现该矩阵是一个分块的 Toeplitz 矩阵,只需要计算和存储矩阵的一列或者一行即可得到整个矩阵,从而大大减少了计算时间。各分块矩阵元素之间的关系如下：

$$\begin{cases} z_{i+1, j+1} = z_{i, j} \\ z_{j, i} = z_{i, j} \end{cases} \quad (9)$$

将阻抗矩阵代入式(3)中,采用  $\delta$ —电压源激励模型,求解式(3)所示的矩阵方程可得各单元天线的电流系数,从而求出输入阻抗和归于馈电点电流的互阻抗,进而得到其辐射特性。

2 结果分析

本文的计算和分析是针对由偶极子天线组成的天线阵的。经过计算和分析得到以下结果：

1) 图 2a 是天线阵相邻两个单元之间的互阻抗随单元间距变化的曲线。由图可知,互阻抗随着间距的增大而减小,互阻抗在感性和容性之间振荡;图中当两个振子离得很近时互阻抗突然下降且幅度很大,由天线原理,天线周围小于  $0.1667\lambda$  的区域为近场感应区,在此区内场的主要形式为储能场<sup>[1]</sup>,所以其互阻抗呈容性;

2) 图 2b 是共线排列的两副天线之间的互阻抗随间距的变化曲线。可以看出,共线排列的天线在间距大于  $0.2\lambda$  时的互阻抗比较小,在天线综合时可以不考虑;

3) 图 3a、图 4、图 5 分别是天线阵单元间距分别为  $0.45\lambda$ 、 $0.4\lambda$ 、 $0.35\lambda$ ,主—副瓣电平比为 30 dB 的 Chebyshev 八单元天线阵在侧射情况下的方向图,图 3b 是间距为  $0.45\lambda$   $60^\circ$  扫描情况下的方向图,天线阵单元长度  $0.5\lambda$ ,半径  $0.02\lambda$ 。分析可得到以下结论:互耦主要影响天线阵方向图的副瓣,对主瓣的影响不大,并且随着互耦的增强副瓣电平逐渐升高,对于侧射阵当单元间距  $d_0 \geq 0.35\lambda$  时,互耦对副瓣影响较小;由图 3b 可知,在扫描状态下,当天线阵单元间距  $d_0 < 0.5\lambda$  时,由于互耦效应使得第一副瓣电平升高了至少 5 dB,所

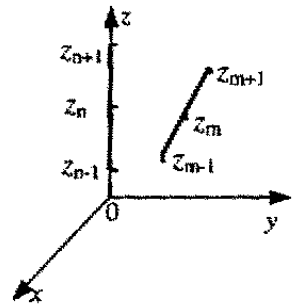
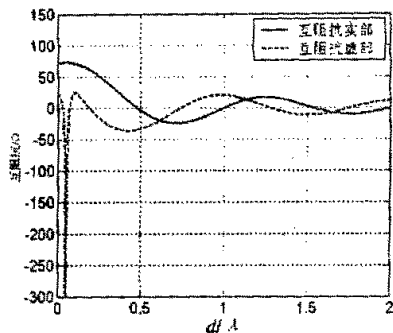
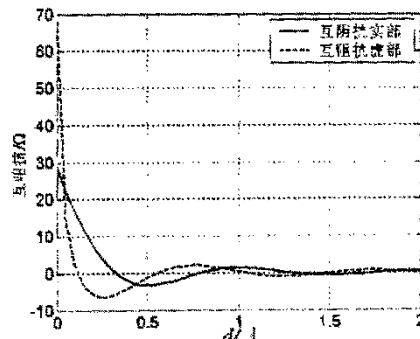


图 1 任意分段电流坐标示意图



(a)



(b)

图 2 互阻抗随距离变化关系曲线

以对综合小于半个波长具有扫描角特别是大扫描角的低副瓣天线时必须考虑互耦效应。

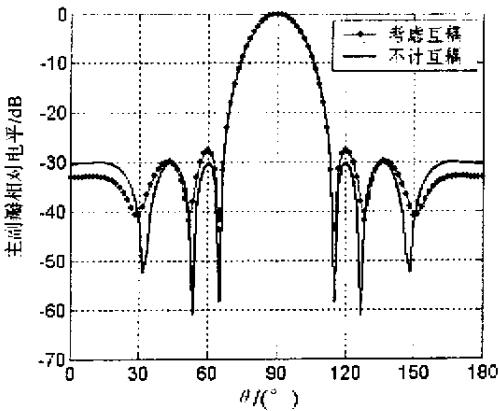


图 3a 单元间距  $0.45\lambda$  侧射时的方向图

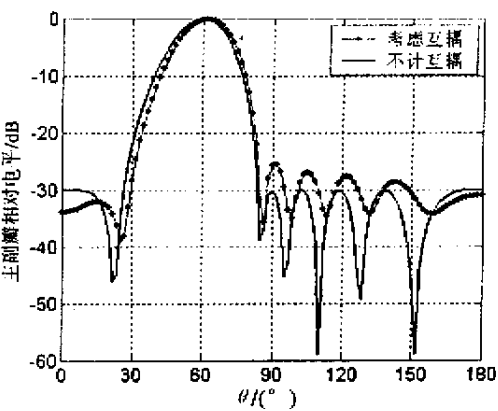


图 3b 单元间距  $0.45\lambda$   $60^\circ$  扫描时的方向图

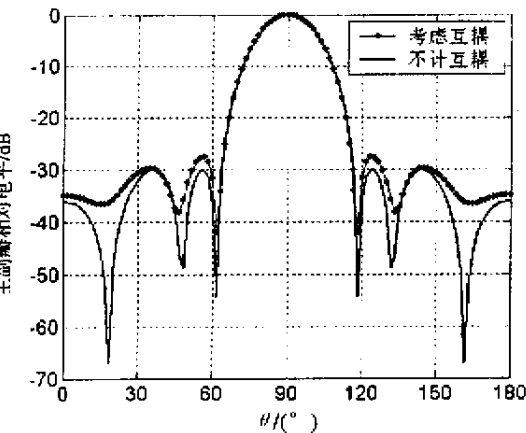


图 4 单元间距  $0.45\lambda$  的方向图

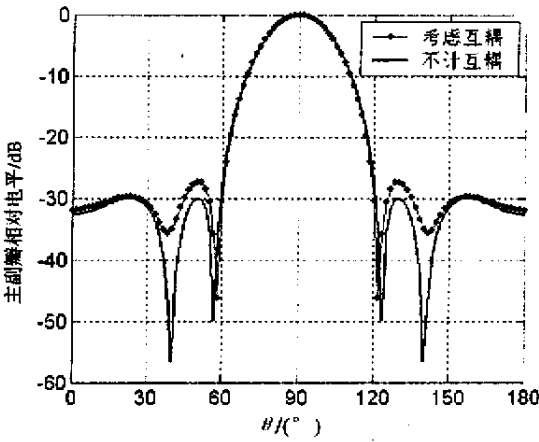


图 5 单元间距  $0.35\lambda$  的方向图

参考文献：

[1] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.  
[2] 林昌禄. 近代天线设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990.  
[3] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.  
[4] 魏文元, 张晓苗, 焦永昌, 等. 超低副瓣相控阵天线设计中的几个问题[J]. 电子学报, 1994, 22(12): 28-34.  
[5] 刘学观, 魏文元, 黄立伟, 等. 相控阵偶极子天线单元互耦的矩量法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 1991, 18(3): 87-92.  
[6] 陈伟, 张善谋. 一种新的天线阵方向图综合方法[J]. 电子科技大学学报, 1989, 18(1): 25-31.

(编辑: 田新华)

The Influence on Mutual Coupling of Distance between Cells in a Linear Array

QIN Jian-jun, ZHANG Hou, XI Ji-hu

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** The influence on mutual impedance with the changes of distance between cells in a linear array is rigorously calculated and analyzed with Methods of Moment. The exact formula for mutual impedance between two arbitrary current elements and a reference value of the distance between cells in the linear array are presented. The curves of mutual impedance and the patterns of the Chebyshev arrays composed of eight dipoles are also protracted and discussed in detail.

**Key Words:** mutual coupling; linear arrays; Methods of Moment

## 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](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>