

文章编号:1009-671X(2008)10-0001-04

## 互耦对阵列天线辐射特性的影响

王 壢, 杨莘元, 冯春楠, 李 明

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**阵元间互耦是分析阵列天线问题中的难点之一, 常用矩量法加以分析。这里提出了一种改进的矩量法, 把线天线等效为带状线, 用 RWG 基函数作为阵元表面电流的展开函数, 精确计算了阵元之间的互阻抗矩阵, 从而在分析问题时计人了互耦的影响。以等间距的 Chebyshev 线阵为例, 分析讨论了在阵元位置和副瓣电平不同的情况下, 互耦对阵列方向图的影响。得到了一些有用的结论, 对以后深入研究互耦问题有一定的指导意义。

**关键词:**互耦; 矩量法; RWG 基函数; 阵列天线

中图分类号: TN82 文献标识码: A

## The effects of mutual coupling on performance of array antennas

WANG Yao, YANG Shen-yuan, FENG Chun-nan, LI Ming

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Mutual coupling of elements in array antennas often seriously affects the outcome of array antenna analysis using moment method. This paper is mainly devoted to an improved moment method, in which the wire antenna is equalized as a thin strip; RWG basis function is used as the expansion function of surface currents of array elements. With this method, the mutual impedance matrix can be evaluated exactly, and the effect of mutual coupling is taken into account in analysis. Considering an example of Chebyshev arrays with equal distance between elements, the effects of mutual coupling on array patterns were analyzed under situations with different array element location and sidelobe levels. Simulation results offer some useful conclusions for future study.

**Keywords:** mutual coupling; method of moment (MoM); RWG basis function; array antenna

现代海战中, 舰队作战指挥系统应该具有快速反应能力, 以及互联网化、系列化、模块化等特点。为了适应快速发展的现代海战需要, 提高雷达的生存能力, 必需提高雷达的机动性能。由于舰上特殊的环境, 要求单 元天线和天线阵尽可能小, 必须考虑天线阵的小型化问题。但随着天线阵元之间的距离减小, 互耦影响就会加剧, 势必影响天线阵的辐射性能。

矩量法作为分析电磁散射与辐射的主要方法之一, 常用于研究互耦对天线性能的影响, 对各种线天线问题可以得到准确的分析。矩量法中的一个关键问题就是基函数的选取。传统上, 线天线建模被作为一维分段模型加以研究, 如脉冲基函数、三角基函数、正弦基函数。但当遇到线-面、线-线连接问题时就会出现问题。文中提出了一种新的面元分割的基函数 (RWG 基函数) 来表示导体表面的电流分布, 采用 Galerkin 法求解电场积分方程, 并用 Matlab 软件进行仿真, 求得表面电流分布系数, 进而计算出阵元之间的互阻抗矩阵, 分析讨论了互耦对阵列天

线辐射方向图的影响, 对以后深入研究阵列天线辐射与散射问题有一定的指导意义。

### 1 理论分析

#### 1.1 RWG 基函数与线天线等效模型

采用矩量法求解电场积分方程时, 金属导体表面用平面三角形进行剖分, 选用如图 1(a) 所示的 RWG 基函数<sup>[1]</sup> 对表面电流进行展开

$$J(r) \cong \sum_{n=1}^N I_n f_n(r). \quad (1)$$

$$f_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & r' \in T_n^+; \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & r' \in T_n^-; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $N$  为未知量总数,  $A_n^+$  和  $A_n^-$  为正负三角面元的

收稿日期: 2007-11-18.

作者简介: 王 壢(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 微波天线技术, E-mail: wangyao@hrbeu.edu.cn.

面积,  $\rho_n^+$  从  $T_n^+$  自由顶点指向面元的内点, 而  $\rho_n^-$  从面元内点指向  $T_n^-$  的自由顶点,  $r_n^+$  和  $r_n^-$  分别由坐标原点  $Q$  指向  $T_n^+$  和  $T_n^-$  的内点,  $T_n^+$  和  $T_n^-$  的中心点的位置矢量分别用  $\rho_n^{c+}$  和  $\rho_n^{c-}$  以及  $r^{c+}$  和  $r^{c-}$  表示. 三角形网格每一条边对应一个基函数(不包括边界边).

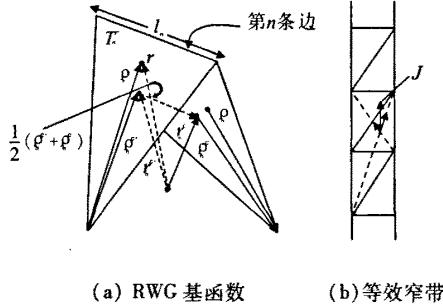


图 1 RWG 基函数及线天线等效模型

对于电小尺寸的圆金属导线, 当导线直径  $r$  远小于波长时, 其电磁特性可用一窄金属条带来等效<sup>[2]</sup>, 导线半径和条带宽度之间的关系为  $a \approx 0.25s$ , 其中:  $a$  为圆导线的半径,  $s$  为细带宽度. 等效后就可以用条带进行三角形网格划分, 如图 1(b) 所示. 并使用 RWG 基函数描述带上的电流分布, 沿带的横向只有一个边元. 两个相临边元能够沿带轴向形成均匀电流.

## 1.2 互阻抗矩阵的建立与求解

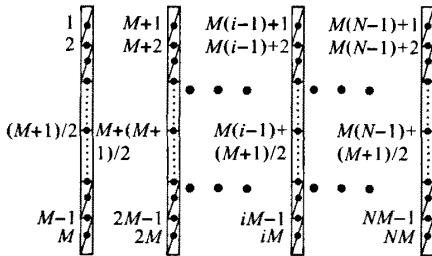


图 2 天线阵分割模型

考虑传统中间馈电的对称振子天线组成的线阵, 阵中各天线均等效为金属条带, 其模型如图 2 所示. 进行三角元分割后, 对每个 RWG 边元编号. 需要指出的是, 这里的 RWG 边元并不包括边界边, 每个边元包括 2 个三角, 它们有一个公共边, 其中一个三角标以正号, 另一个标以负号. 一个三角形可以由 2 个边元所共用.

根据文献[1-3]中的讨论, 天线阵在不加载的情况下得到求解阵元表面电流系数的矩阵方程:

$$[\mathbf{Z}_{mn}]_{MN \times MN} [\mathbf{I}_n]_{MN \times 1} = [\mathbf{V}_m]_{MN \times 1}. \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{Z}_{mn} = l_m [\mathbf{j}\omega (A_{mn}^+ \cdot \rho_m^{c+}/2 + A_{mn}^- \cdot \rho_m^{c-}/2) + \Phi_{mn}^- - \Phi_{mn}^+], \quad (4)$$

$$A_{mn}^{\pm} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\Delta} f_n(r) \frac{e^{-jkR_m^{\pm}}}{R_m^{\pm}} dS' =$$

$$\frac{\mu}{4\pi} \left[ \frac{l_n}{2A_n^+} \int_{T_n^+} \rho_n^+(r) \frac{e^{-jkR_m^+}}{R_m^+} dS' + \frac{l_n}{2A_n^-} \int_{T_n^-} \rho_n^-(r) \frac{e^{-jkR_m^-}}{R_m^-} dS' \right] \quad (5)$$

$$\Phi_{mn}^{\pm} = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \int_{\Delta} \nabla_s \cdot f_n(r) \frac{e^{-jkR_m^{\pm}}}{R_m^{\pm}} dS' = \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} \left( \frac{l_n}{A_n^+} \int_{T_n^+} \frac{e^{-jkR_m^+}}{R_m^+} dS' - \frac{l_n}{A_n^-} \int_{T_n^-} \frac{e^{-jkR_m^-}}{R_m^-} dS' \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_m = \int_{T_m^+ + T_m^-} \mathbf{E} \cdot \mathbf{f}_m dS, \quad (7)$$

$$R_m^{\pm} = |r_m^{\pm} - r| \quad (8)$$

$[\mathbf{Z}_{mn}]_{MN \times MN}$  是含有互耦信息的广义阻抗矩阵,  $[\mathbf{V}_m]_{MN \times 1}$  是电压激励向量, 即可以是入射波激励也可以是电压源激励.  $M$  和  $N$  分别为单个天线的分段数与阵元个数. 由式(4)~(8)可以看到, 求解阻抗矩阵关键是求解 2 个位函数. 位函数中难点是求解如下形式的积分:

$$I_g = \frac{1}{\Delta} \int_{\Delta} g(r) \frac{e^{-jkR}}{R} dS: \quad (9)$$

这里对任意三角形采用质心切分法<sup>[4]</sup>, 应用"三分之一"规则, 可以把图 1(b) 所示的任意原始三角分割为 9 个相同的子三角. 进一步假设, 被积函数在每个子三角上为常数, 那么上式可以写为

$$\frac{1}{\Delta} \int_{\Delta} g(r) \frac{e^{-jkR}}{R} dS' = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 g(r_k^c) \frac{e^{-jkR_k^c}}{R_k^c}. \quad (10)$$

这里, 黑圆圈表示的点  $r_k^c$  ( $k = 1, \dots, 9$ ) 是图 3 所示的 9 个子三角的中心, 白圆圈表示原三角中心.  $R_k^c = |r - r_k^c|$  表示场点到子三角中点的距离.

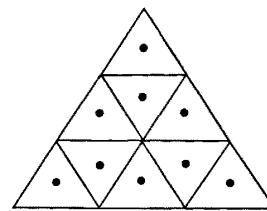


图 3 原始三角形的质心切分

### 1.3 喂源的加入

文中采用电压源激励, 通常天线由传统的传输线通过2个靠近的端子馈电, 这意味着将理想电压发生器跨接在天线的小间隙上, 有多种方法来描述间隙内的场。最简单的办法是所谓的 $\delta$ 函数发生器法, 简单地说, 假设这种模型有一宽度可以忽略的间隙, 如果间隙上跨接的电压是 $V$ , 那么间隙内的电场为

$$E = -\Delta\varphi = \frac{V}{\Delta}n = V\delta n. \quad (11)$$

式中:  $\varphi$ 为电势,  $n$ 为电场的方向, 对于中央馈电的对偶极子天线, 电场方向沿轴向方向。将其加入到编号为 $M(i-1) + (M+1)/2$ 的边元上, 则式(7)改为

$$V_m = \int_{T_m^+ + T_m^-} E \cdot f_m dS = \int_{T_m^+ + T_m^-} V\delta n \cdot f_m dS = I_m V. \quad (12)$$

对于其他的边元 $V_m = 0$ , 公式(12)应用了以下事实: RWG 基函数垂直于边的分量总等于1<sup>[1]</sup>。

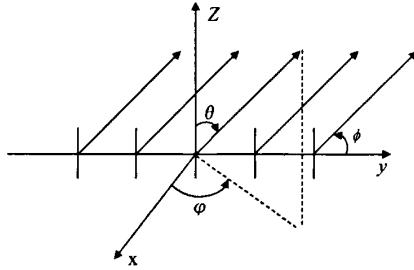
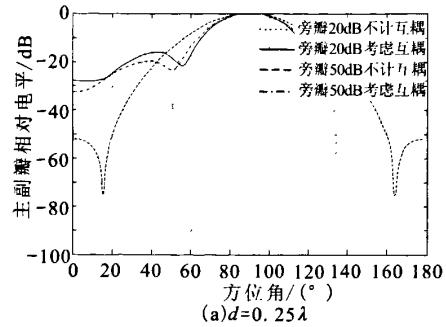


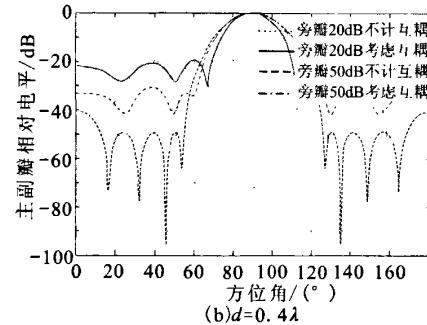
图4 均匀线性偶极子阵列

## 2 计算仿真与结果分析

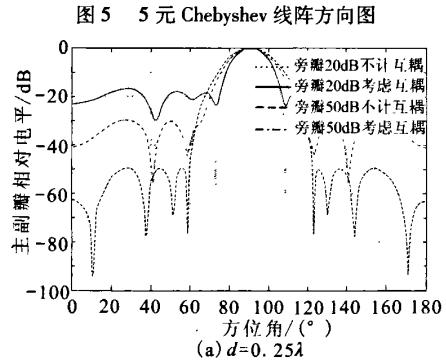
为分析互耦对阵列天线辐射特性的影响, 首先应建立阵列的电磁模型。如图4所示的 $N$ 元均匀直线阵, 单元间距为 $d$ , 阵元模型是半波长偶极子天线, 长度 $L = 1$  m, 半径 $a = 0.001$  m(等效带宽 $s = 0.004$  m) 对应频率 $f = 150$  MHz, 波长 $\lambda = 2$  m。等效细带按图1(b)所示分割成200个三角元(即199个RWG边), 对所有RWG边元统一编号。阵元中心边元采用 $\delta$ 函数激励。阵元间的互耦会通过改变各阵元激励电流的幅度和相位影响阵列方向图。文中分别讨论了不同间距、不同副瓣电平的Chebyshev线阵, 互耦对其方向图的影响。图5和图6显示了5元阵与7元阵的情况。



(a)  $d = 0.25\lambda$



(b)  $d = 0.4\lambda$



(a)  $d = 0.25\lambda$

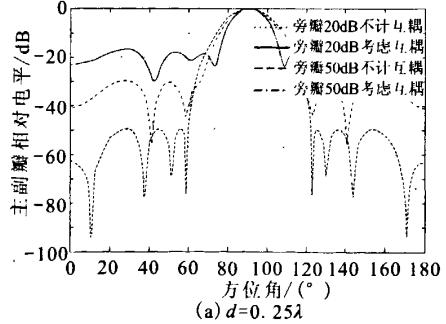


图6 7元Chebyshev线阵方向图

为了更具体的说明波瓣影响情况, 仿真结果分别列于表1和2。图7为旁瓣理想电平为-50 dB

时,阵元间距分别为  $0.3\lambda$ 、 $0.5\lambda$  下互耦影响随阵元

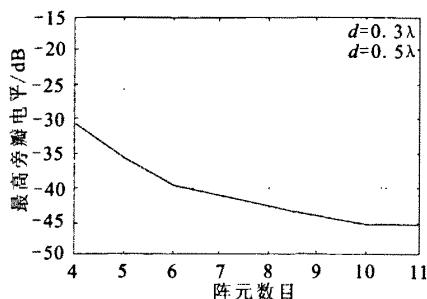


图 7 最高旁瓣电平随阵元个数的变化示意图  
个数的变化情况。

综上所述,讨论了对于不同阵元间距、不同阵元数目、不同副瓣电平的情况下,互耦对阵列方向图的影响,得到如下结论:

- 1) 互耦对阵列副瓣电平与零点影响最为严重,对主瓣宽度及主瓣方向影响较小。副瓣电平越低,互耦对其的抬升越大,随阵元间距变化越剧烈,同时零点位置也会发生偏移。
- 2) 阵元数越多,互耦对副瓣电平的抬升小且随阵元间距变化平缓。对等间距线阵当阵元数目大于 13 时,互耦对副瓣电平的影响不大。如图 7 所示。
- 3) 相临阵元间激励电流变化越剧烈,互耦影响越显著。
- 4) 阵元间距越小互耦影响越严重,对于副瓣电平为 20 dB 的线阵,阵元间距  $d \geq 0.35\lambda$  时,基本上没有互耦影响。
- 5) 扫描角度对阵列天线副瓣电平也有一定的抬升,当扫描角较大时,单元互耦对天线方向图电平将会有更加明显的影响<sup>[5]</sup>。

表 1 互耦对五元阵旁瓣电平的影响

阵元 间距	互耦下旁瓣 电平(理论值为 -20/dB)/dB		互耦下旁瓣 电平(理论值为 -50/dB)/dB	
	误差 /%	误差 /%	误差 /%	误差 /%
0.25λ	-16.75	16.3	-20.06	59.9
0.3λ	-18.90	5.5	-26.59	46.8
0.4λ	-19.84	0.8	-33.84	32.3
0.5λ	-19.87	0.65	-35.89	28.2

表 2 互耦对七元阵旁瓣电平的影响

阵元 间距	互耦下旁瓣 电平(理论值 为 -20/dB)/dB		互耦下旁瓣 电平(理论值 为 -50/dB)/dB	
	误差 /%	误差 /%	误差 /%	误差 /%
0.25λ	-18.70	6.5	-30.79	38.4
0.3λ	-19.04	4.8	-34.25	31.5
0.4λ	-19.86	0.7	-40.65	18.7
0.5λ	-19.93	0.4	-41.70	16.6

### 3 结束语

一般天线的设计都是在忽略互耦作用的情况下获得的,由此得到系统的性能与实际天线的性能有一定的误差。文中提出一种改进的矩量法,把天线表面划分成一系列三角面元,认为被积函数在三角面元上恒定,从而把积分问题转化成线性相加,减小了计算量。这种方法适用于分析任意平面阵列,阵元可以是偶极子天线、单极子天线和微带天线等多种形式,具有普遍适用性。用其可以精确计算天线阵的互阻抗矩阵,从而在以后分析天线阵问题时加入了互耦的影响。

### 参考文献:

- [1] RAO S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1982, 30(3):409-418.
- [2] MAKAROV S N. Antenna and EM modeling with MATLAB [M]. New York: Wiley, 2002.
- [3] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design [M]. 2ed. New York: Wiley, 1997.
- [4] KAMEN Y, SHIRMAN L. Triangle rendering using adaptive subdivision [C]// IEEE Computer Graphics and Applications. San Jose, USA, 1998:95-103.
- [5] 崔金辉. 超低副瓣阵列天线互耦及幅相误差影响的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2004.

[责任编辑:李玲珠]

## 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>