

# 相控微带天线阵互耦对阵增益的影响分析

车仁信<sup>1</sup>, 崔学武<sup>2</sup>, 程鑫<sup>1</sup>

(1. 大连交通大学电气信息学院, 大连 116028; 2. 黑龙江信息技术职业学院, 哈尔滨 150086)

**摘要:** 本文针对微带天线阵元之间的互耦对功率增益的影响进行研究, 以口径耦合微带天线单元构成的七单元直线阵为研究平台, 导出相应的计算公式; 基于时域有限差分法建立天线模型, 进行仿真测试, 所得图形和数据, 可为相控微带天线阵的快速设计提供参考。

**关键词:** 相控微带天线阵; 互耦; 增益

**中图分类号:** TN820.1+5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-8329(2007)03-0045-04

## The Impact Which Mutual Coupling of the Phased Microstrip Antenna Arrays to the Gain

CHE Ren-xin<sup>1</sup>, CUI Xue-wu<sup>2</sup>, CHENG Xin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. Hei Long Jiang Infotech Profession College, Harbin 150086, China)

**Abstract:** This article carried on to the mutual coupling among microstrip antenna array elements to the power gain impact has studied, the seven-element linear arrays composed the aperture-coupled antenna elements are regarded as a research platform, The relevant computing formula is educed; The model is constructed by using finite-different time-domain (FDTD) method, carries on the simulation to test, obtained graph and data, may to provides a reference to the fast design phased microstrip antenna arrays in the mutual coupling state.

**Key words:** phased microstrip antenna arrays; mutual coupling; gain

## 1 引言

传统的天线阵列设计往往是在假定阵元间无互耦的前提下进行的, 但在实际情况下, 在要求宽角度扫描的现代阵列天线中, 天线阵元之间的互耦对天线阵列的性能有重要的影响。对于相控微带天线阵, 当扫描时, 由于单元间互耦的存在, 使得阵的电流分布偏离预计情况, 从而使阵的性能大为改变<sup>[1,2]</sup>。概括起来, 互耦对天线阵性能的影响主要集

中在 4 个方面<sup>[3]</sup>: ① 单元在阵中的方向图与孤立元的方向图不同, 这一点在参考文献[4]中已有所叙述; ② 阵中单元的输入阻抗与孤立元的输入阻抗不同; ③ 对于相控阵, 阵中单元的输入阻抗将随扫描角而改变, 这会引起阵的失配和单元效率(或增益)的降低; ④ 天线的极化特性要变坏。因此, 在微带阵列中, 单元间互耦的计算成为一个主要问题。对此人们进行了大量的研究与实验, 国内外对阵列互耦的研究主要集中在互耦建模, 及其对阵列滤波性能和 DOA 估计影响的问题上, 并提出一些互耦校正算

• 基金项目: 铁道部专项资金项目(编号 J2000Z052)和辽宁省教育厅科学研究计划资助项目(编号 2004D024)。

作者简介: 车仁信, 女, 1956 年生, 教授, 硕士导师。主要研究方向: 微带天线的数值计算及工程应用。

法。参考文献[5]研究了 MOL(method of lines)方法,可表述互耦状态;文献[6]分析了阵列互耦对普通阵列天线滤波性能参数 SINR 的影响;文献[7]给出较完整的阵列互耦误差模型,分析了互耦对高分辨率的影响。

本文讨论互耦对功率增益的影响,以口径耦合微带天线单元构成的七单元直线阵为研究平台,结合直线阵理论和传输线理论导出相应的计算公式,借助于时域有限差分法进行数值计算获取数据,进行仿真研究,并将该分析方法推广到了无限阵。

## 2 理论分析

阵列的互耦对功率增益的影响可以通过反射系

$$b_n \theta_{m,0} = \sum_{m=0}^{N-1} s_{n,m} a_0 \exp(-jm\beta d \sin \theta_{m,0}) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

于是波束扫描到  $\theta_{m,0}$  时第  $n$  个天线单元的动态反射系数为:

$$\Gamma(\theta_{m,0}) = \frac{b_n(\theta_{m,0})}{a_n(\theta_{m,0})} = \sum_{m=0}^{N-1} s_{n,m} \exp[-j(m-n)\beta d \sin \theta_{m,0}] \quad (5)$$

式中  $s_{n,m}$  为第  $m$  个单元对第  $n$  个单元的互耦系数,再由参考文献[4]中表 1 至表 4 的互耦系数测量值,并注意天线阵对中心单元天线左右对称,所以实际只需要前面所计算的单元的耦合系数,就可以计算每个天线单元在任何波束扫描角  $\theta_{m,0}$  的动态反射系数。由动态反射系数可得总功率反射系数:

$$R_{\text{all}}(\theta_{m,0}) = \frac{\sum_{n=0}^6 |\Gamma(\theta_{m,0})|^2}{7} \quad (6)$$

由参考文献[3],[9]关于增益的论述,可得扫描角为  $\theta_{m,0}$  时阵的总增益:

$$G(\theta_{m,0}) = \sum_{n=0}^{N-1} g_n(\theta_{m,0}) \quad (7)$$

$$g_n(\theta_{m,0}) = \frac{4\pi a}{\lambda_0} \eta_n \cos \theta_{m,0} (1 - |\Gamma(\theta_{m,0})|^2) \quad (8)$$

式中  $a$  为阵元面积,  $\eta_n$  为第  $n$  个阵单元的辐射效率,  $g_n(\theta_{m,0})$  物理意义为单元在阵中的增益函数。可见增益随反射系数及扫描角在变化,而反射系数的变化依赖于互耦系数,说明功率增益随阵元间的互耦发生变化。

数来讨论。以七单元直线阵为例,馈给第  $i$  个阵元的电压入射波为  $a_i$ ,则有:

$$[b] = [s][a] \quad (1)$$

其中  $[a]$  和  $[b]$  分别代表 7 个电压入射波和电压反射波的列矩阵。 $[s]$  为  $7 \times 7$  的散射矩阵。式(1)中的任一行为:

$$b_n = \sum_{m=0}^{N-1} s_{n,m} a_m \quad n = 0, 1, \dots, 6 \quad (2)$$

对于扫描的情况,使馈电入射功率固定不变,所有入射电压波等幅,但相位步进,即:

$$a_m \theta_{m,0} = a_0 \exp(-jm\beta d \sin \theta_{m,0}) \\ = a_0 \exp(-jm\beta d \sin \theta_{m,0}) \quad (3)$$

以便产生一个  $\theta_{m,0}$  指向的波束,  $\theta_{m,0} = \arcsin(\Psi_0 / \beta d)$  [8] 可得:

## 3 数值计算

### 3.1 天线单元选择

选择口径耦合微带天线做为相控天线阵的单元。口径耦合微带天线较其它微带天线具有便于制作,易实现阻抗匹配,接地板的隔离使有源电路的

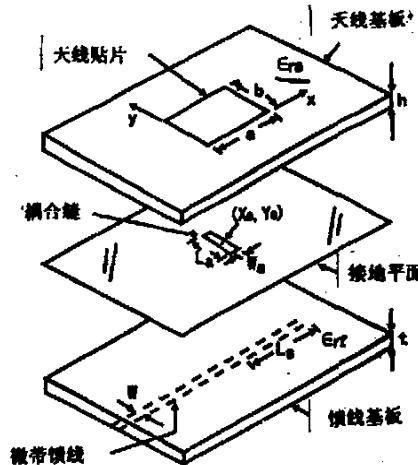


图 1 口径耦合天线结构图

寄生辐射对天线方向图影响小等特点,模型图如图1所示。用时域有限差分法(FDTD)反复进行数值计算及优化,确定天线单元参数为:  $a = 6.1\text{mm}$ ,  $b = 8\text{mm}$ ,  $h = 0.94\text{mm}$ ,  $W_a = 0.31\text{mm}$ ,  $L_a = 4.42\text{mm}$ ,  $x_0 = a/2$ ,  $y_0 = b/2$ ,  $t = 0.44\text{mm}$ ,  $W = 1.24\text{mm}$ ,  $\epsilon_r = \epsilon_f = 2.54$ 。调整  $L$ , 使谐振点的实部为最大, 得  $L$  为  $2.08\text{mm}$ 。以此单元构成 7 单元直线阵。

### 3.2 数值计算结果

将 7 单元直线天线阵完全处于计算空间之中, 计算空间的吸收边界采用理想匹配层吸收边界(PML, Perfectly Matched Layer)<sup>[10]</sup>, 为了保证介质基片的截断处和微带馈线的截断处无反射, 计算区域介质基片和微带馈线深入到 PML 中。最小空间步长  $\Delta x = \Delta y = 0.12\text{mm}$ ,  $\Delta z = 0.14\text{mm}$ , 为保证计算精度, 介质层取 6 个空间步长。采用 Gauss 脉冲作为激励源, 因为该脉冲满足频带要求。计算仿真结果如图 2、图 3 所示。

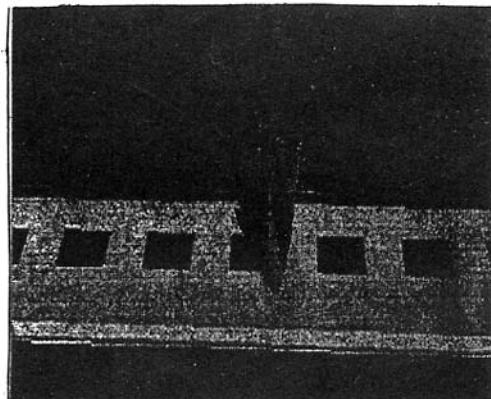


图 2 7 单元直线阵仿真模型及波束扫描状态

$$\begin{aligned} \Gamma(\theta_{m,0}) &= \frac{b_0 \theta_{m,0}}{a_0 \theta_{m,0}} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s_{0,m} \exp(-jmkds \sin \theta_{m,0}) \approx \sum_{m=-3}^{+3} s_{0,m} \exp(-jmkds \sin \theta_{m,0}) \\ &= A_{-3,0} e^{j3\psi_0} + A_{-2,0} e^{j2\psi_0} + A_{-1,0} e^{j\psi_0} + A_{0,0} + A_{1,0} e^{-j\psi_0} + A_{2,0} e^{-j2\psi_0} + A_{3,0} e^{-j3\psi_0} \\ &= 2A_{3,0} \cos(3\psi_0) + 2A_{2,0} \cos(2\psi_0) + 2A_{1,0} \cos(\psi_0) + A_{0,0} \end{aligned} \quad (9)$$

上式中  $\psi_0 = \beta d \sin \theta_{m,0}$ ,  $A_{i,j}$  由参考文献[4]中的表 1 ~ 表 4 给出。

同样进行数值计算, 得曲线如图 4 和图 5 所示。可以看出阵元反射系数模值在  $60^\circ$  时达到最大值, 约为 0.35。而且也是在  $30^\circ$  左右反射系数模值随着扫描角的增大急剧增大。由此可看出在无限阵中, 互耦对功率增益的影响情况。

图 2 所示波束的指向随输入激励信号相位的变化完成规定的扫描, 图 3 说明随着扫描角的变化, 总功率反射系数发生较大的变化。可以看出, 总功率反射从  $30^\circ$  以后急剧增加, 在  $30^\circ$  之前小于 2%, 而在  $50^\circ$  时已经达到 7.6% 了。可见由于互耦的影响, 相控微带天线阵的功率增益受到了影响, 动态扫描范围受到了限制。

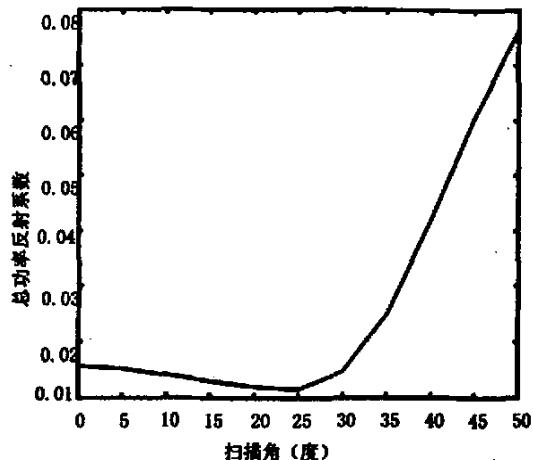


图 3 7 元阵总功率反射系数随扫描角变化曲线

### 4 分析方法推广

用同样思路分析无限阵中互耦对增益的影响, 首先计算单元天线的反射系数, 由公式(5)推广到无限阵。由于互耦系数随着辐射单元距离的增大急剧下降<sup>[4]</sup>, 把无限和截断, 并使用七单元阵中的互耦系数近似无限阵中的互耦系数, 从而可得:

$$\begin{aligned} \Gamma(\theta_{m,0}) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s_{0,m} \exp(-jmkds \sin \theta_{m,0}) \approx \sum_{m=-3}^{+3} s_{0,m} \exp(-jmkds \sin \theta_{m,0}) \\ &= A_{-3,0} e^{j3\psi_0} + A_{-2,0} e^{j2\psi_0} + A_{-1,0} e^{j\psi_0} + A_{0,0} + A_{1,0} e^{-j\psi_0} + A_{2,0} e^{-j2\psi_0} + A_{3,0} e^{-j3\psi_0} \\ &= 2A_{3,0} \cos(3\psi_0) + 2A_{2,0} \cos(2\psi_0) + 2A_{1,0} \cos(\psi_0) + A_{0,0} \end{aligned} \quad (9)$$

### 5 结束语

众所周知, 相控微带天线阵具有诸多优点, 因此, 对其设计及应用研究已成为天线领域研究的热点。但是由于阵中阵元间的相互耦合十分复杂, 而这些耦合直接影响天线阵性能, 因而分析天线阵元间的互耦成为天线阵设计的关键之一。

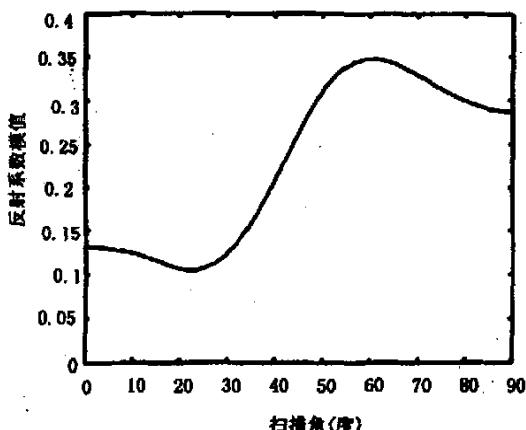


图 4 无限阵中单元反射系数模值与扫描角关系

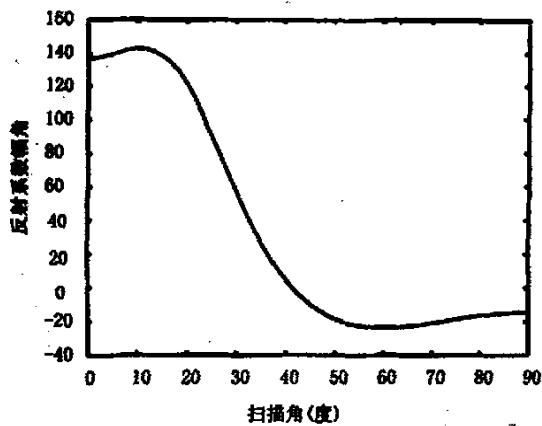


图 5 无限阵中单元反射系数相位与扫描角关系

互耦是阵列天线的固有特性,为避开复杂的阵元间的耦合分析,一些天线阵的设计不得不采用一些特定的幅度相位馈电模式,这给天线阵的灵活设计带来困难。本文基于时域有限差分法对相控天线阵进行研究,结合理论分析,建立天线阵模型,针对互耦对功率增益的影响进行分析,所得结论对相控微带天线阵的快速设计提供了参考。

conformal Microstrip patch Antenna Arrays[J]. IEE Proceedings. Part H, Microwaves, Antennas and Propagation. 2003,150(4):191~196.

- [2] Ramirez, R. R. ; De Flaviis, F. A mutual coupling study of linear and circular polarized Microstrip Antennas for diversity wireless systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2003, 51 (2):238~248.
- [3] 张钩, 刘克成. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 车仁信, 程鑫, 张振国. 口径耦合微带天线阵的互耦研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2005, 23(4): 337~342.
- [5] Vegni, L. ; Toscano, A. The method of lines for mutual coupling analysis of a finite array of patch Antennas on a cylindrical stratified structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2003, 51(8):1907~1913.
- [6] Inder J Gupta, Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays [J]. Trans Antennas Propagation IEEE ,1983 ,31 (5) :785 — 791.
- [7] A Manikas ,N Fistas . Modeling and estimation of mutual coupling between array elements [A]. Proceedings of IEEE. ICASSP94[C] . Adelaid e , Australie : IEEE Press , 1994. Vol . 4. 553 — 557.
- [8] I. J. 魏尔, P. 布哈蒂亚. 微带天线[M]. 丛联译, 龚廷耀译(第一版). 北京: 电子工业出版社, 1984.
- [9] (美)阿米特(N. Amitay)等著. 相控阵天线理论与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [10] Jean-Pierre Berenger. Three-Dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves[J]. Journal of computational physics, 1996,127(2):363~379.

(收稿日期:2007-05-07)

## 参考文献

- [1] Sangster, A. J. ; Jacobs, R. T. Mutual coupling in

## 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>