文章编号：1005-6122(2003)01-0039-04

考虑互耦影响下的智能天线数字波束赋形*

孙长果[1]　张进民[1]　张晓丽[2]　黄际英[3]

(1. 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所，西安 710071；
2. 大唐移动通信设备有限公司，北京 100083；3. 西安电子科技大学理学院，西安 710071)

摘　要： 本文分析了阵列单元之间的互耦对智能天线阵列数字波束赋形(DBF)的影响。通过对天线子系统建立等效接收模型，对由理想半波振子组成的 8 单元圆阵(用于 TD-SCDMA 系统)进行矩量法(MOM)分析，得到表征单元之间互耦的广义阻抗矩阵。由此得到智能天线的互耦信息及其对天线性能(SINR)的影响。通过数值分析结果与试验的结果的对比可以看出互耦对副瓣电平和智能天线抑制干扰的能力有一定的影响。本文的分析对智能天线的研究具有一定意义。

关键词： 互耦，数字波束赋形，输出信干比，矩量法

Digital Beam-forming of Smart Antenna with Mutual Coupling

SUN Changguo[1], ZHANG Jinmin[1], ZHANG Xiaoli[2], HUANG Jiying[3]

(1. *Institute of Antennas and Electromagnetic Scattering*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071;
2. *Datang Mobile Communications Equipment Co., Ltd*, *Beijing* 100083;
3. *School of Technical Physics*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071)

Abstract: Digital Beam-forming (DBF) of smart antenna with the effects of mutual coupling between array elements is presented, and an equivalent model of receiving system is setup and a circular array of eight ideal dipoles (for TD-SCDMA System) is analyzed with MOM. The data about mutual coupling between elements are given and their effects on the performance of smart antenna are simulated. The comparison of analysis results and the measurement shows that the mutual coupling has a certain effect on the sidelobe and the ability of smart antenna to reject interference. The results are useful for the study of smart antenna.

Key words: Mutual coupling, Digital Beam-forming, SINR, Method of Moment (MOM)

1　概述

智能天线在通信系统中的应用得到了广泛的关注和研究。该技术对通信系统的质量和容量都有很大的提高。自从 20 世纪 90 年代以来，国内外各大公司和院校对智能天线技术展开了研究。在以前的研究工作中，人们很少考虑天线阵列本身的实现问题，而认为各天线单元都是理想工作的而且互不干扰。实际上，在天线阵系统中，各单元之间通过电磁场相互作用和影响，发生了电磁耦合效应。特别当单元间距较小的时候，耦合作用是不可以忽略的。耦合单元的空间场和表面场都不同于孤立单元时的分布情况。其他的一些参数，例如天线单元上的电流分布、辐射功率、辐射阻抗、输入阻抗等都发生变化。对互耦的分析能使我们对天线系统的收发性能有更深入的了解，以便进行补偿。同时，互耦的补偿也是智能天线校准(Calibration)的一个重要因素。

本文通过对理想半波振子组成的 8 单元圆形阵列的矩量法[1]分析，得到了表征天线互耦的互阻抗矩阵，给出了互耦对波束赋形的影响结果。结果表明，互耦对主波束指向的影响不大，但是降低了天线系统的辐射效率和输出信干噪比(SINR)。

* 收稿日期：2002-06-27；定稿日期：2002-09-11

万方数据

2 阵列结构及其矩量法分析

考虑 8 单元等间距半波振子圆阵，单元之间的间距是半个波长，振子为中间馈电形式(图 1)。在传统的互耦分析文献中，人们并没有考虑各单元上电流分布的差异，而认为各单元上电流分布规律相同[2,3]。这样降低了得到的互阻抗矩阵的精度。Sarkar[4]提出了对阵列的全波分析而得到广义阻抗矩阵。本文就是利用矩量法对整个阵列进行建模，得到 8 单元之间的广义阻抗矩阵。

基函数采用分段正弦基(图 2)，表达式为：

$$f_{mq}(z') = \begin{cases} \sin[k_0(z' - z_{m,q-1})]/\sin(k_0\Delta z), & z_{m,q-1} \leqslant z' \leqslant z_{mq} \\ \sin[k_0(z_{m,q+1} - z')]/\sin(k_0\Delta z), & z_{m,q} \leqslant z' \leqslant z_{m,q+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{1}$$

根据电磁场积分方程和矩量法，我们得到了矩量法表达形式：

$$\frac{j}{\omega\varepsilon_0}\sum_{m=1}^{M}\sum_{q=1}^{N} I_{mq}\int_{z_{n,p-1}}^{z_{n,p+1}}\int_{z_{m,q-1}}^{z_{m,q+1}} f_{np}(z) f_{mq}(z')\left[\frac{\partial^2 G(z,z')}{\partial z^2} + k_0^2 G(z,z')\right]\mathrm{d}z'\,\mathrm{d}z = \int_{z_{n,p-1}}^{z_{n,p+1}} f_{np}(z) E_z^i(z)\,\mathrm{d}z \tag{2}$$

上式用一个简洁的方式表示就是：

$$[\boldsymbol{Z}_{mn}]_{N\times N}[\boldsymbol{I}_m]_{N\times 1} = [\boldsymbol{V}_{0n}]_{N\times 1} \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{Z}_{mn}$是第 mn 个 $M\times M$ 维子阵，$\boldsymbol{I}_m$、$\boldsymbol{V}_{0n}$分别是第 m、n 个 $M\times 1$ 维子阵，M 和 N 分别为每个单元的分段数和天线的单元数，Z 就是含有互耦信息的广义阻抗矩阵，此时 V_0 为没有互耦时的接收端口电压，(3)式中的各参数和(2)式中一一对应，于是端口电流可以从(3)式得到：

$$[\boldsymbol{I}_m]_{N\times 1} = [\boldsymbol{Z}_{mn}]_{N\times N}^{-1}[\boldsymbol{V}_{0m}]_{N\times 1} \tag{4}$$

3 天线系统收/发等效模型

在接收情况下，我们可以将整个天线系统等效为一个 $N+1$ 端口网络，其中的 1 就是外场等效的源，如图 3 所示

$$V_m = Z_L I_m \qquad m = 1,2,\cdots,N \tag{5}$$

这里的 V 是各个天线单元馈电端口的实际电压，是存在互耦影响情况下得到的。在中心馈电情况下，I_m 是每个 $\boldsymbol{I}_m$子阵的中间元素(图 2)，由(4)式得到。我们将之作为接收信号(在匹配情况下是符合实际情况的)，于是各单元上实际接收电压与理想接收电压的关系可以通过(3)～(5)式计算出来。

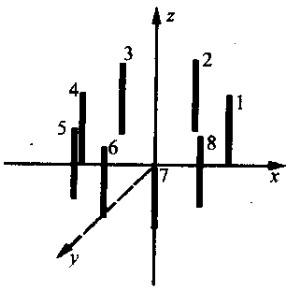

图 1　8 单元半波振子圆阵示意图

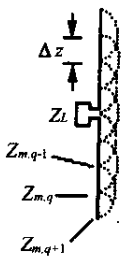

图 2　分段正弦基及分段情况

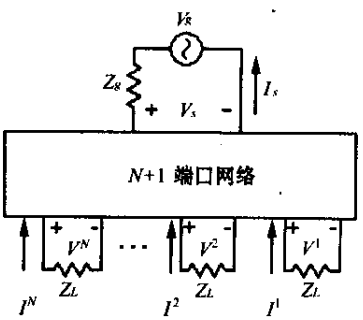

图 3　天线接收状态的等效网络模型

4 考虑互耦情况下的收发特性

我们考虑最大输出功率准则下的波束赋形权函数(权函数是阵列响应矢量的共轭值)。根据阵列方向图叠加原理，我们可以得到阵列的总辐射方向图：

$$f_0(\theta,\varphi) = [\boldsymbol{W}]^T[\hat{\boldsymbol{V}}_0] = \sum_{i=1}^{N} W_i e^{jk\boldsymbol{\rho}_i\cdot\hat{\boldsymbol{r}}} \tag{6}$$

其中，W 是各单元的加权矢量，$\hat{V}_0$ 是归一化的馈电端口电压，在理想情况下

万方数据

$$\hat{\boldsymbol{V}}_0 = E_0 \boldsymbol{a}(\theta,\varphi) \tag{7}$$

E_0 是阵列接收远场幅度，$\boldsymbol{a}$ 是阵列响应矢量，圆阵情况下可以得到

$$a_i(\theta,\varphi) = e^{-jkR\sin(\theta)\cos(\varphi-\varphi_i)} \qquad i = 1,2,\cdots,N \tag{8}$$

其中，R 是圆阵半径，k 是波数，θ，φ 分别是笛卡儿坐标下的俯仰角和方位角。由于存在互耦，(5)式的实际输出为

$$f(\theta,\varphi) = [\boldsymbol{W}]^T[\hat{\boldsymbol{V}}] = \sum_{i=1}^{N} W_i Z_L \hat{\boldsymbol{I}}_i \tag{9}$$

其中，$\hat{\boldsymbol{I}}_i$ 可通过(5)式计算，W_i 是第 i 个天线的权函数，$\boldsymbol{\rho}_i$ 是第 i 个天线单元的位置矢，$\boldsymbol{r}$ 是场点的矢径。我们考虑最大输出功率准则下的波束赋形权矢量，假设来波方向已知，则权矢量是阵列响应向量的共轭。

图 4、5 是两种情况(有互耦和无互耦)下的 DBF 结果。在没有互耦的情况下，直接利用(6)式得到阵列的接收方向图(此时 W 是理想的权)；考虑互耦的情况下，利用(3)～(5)式，实际的馈电电压改变了，于是实际的赋形方向图也出现了偏差(此时的方向图通过(9)式计算给出)。图 4 是利用上述的计算结果，图 5 是通过对 TD-SCDMA 系统天线的测量得到的结果。理想情况下的波束赋形可以通过单个单元的方向图，通过叠加原理得到，这样的结果是不考虑互耦的；实际情况下，通过每个单元利用移相器加权得到的测量结果，就是含有互耦的阵列接收方向图(表 1)。从图中可以看出，互耦对波束指向并没有太大的影响，但是对副瓣电平有一定的影响。这是因为互耦改变了接收信号的幅相，使接收信号与阵列相应矢量之间的关系发生了变化。

表 1　天线端口加权系数表

单元		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
理想情况	幅度	1	1	1	1	1	1	1	1
	相位	0°	−121°	69°	−52°	−52°	69°	−121°	0°
互耦计算	幅度	1	0.8384	0.7679	0.8251	0.8279	0.7876	0.8303	1.0383
	相位	0°	−132°	55°	−47°	−47°	57°	−130°	−1°
互耦测量	幅度	0.7905	0.9162	1	0.9536	0.9684	0.9942	0.9072	0.7967
	相位	−77°	172°	0°	−132°	−132°	−1°	171°	−77°

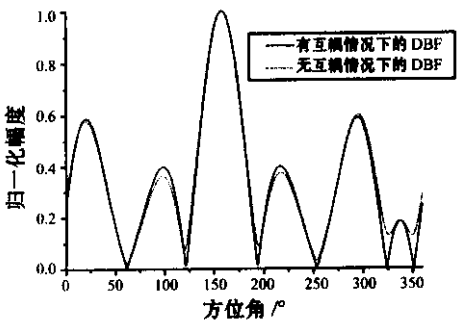

图 4　有无互耦情况的 DBF(数值结果)

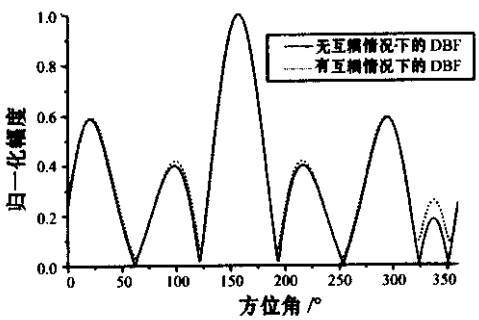

图 5　有无互耦情况的 DBF(试验结果)

万方数据

5 DBF 下的 SINR

在接收信号时,天线接收下来的信号不仅包括期望信号,同时也包含干扰信号和噪声。智能天线本身由于良好的空间滤波特性,能起到抑制干扰作用,从而提高系统的输出信干噪比,提高系统的质量和容量。然而互耦影响了智能天线抑制干扰的能力。

图 6 为系统输出 SINR 和用户数目的关系曲线在有无互耦情况下的比较。从曲线可以看出,当用户数目较多时,互耦的影响越来越小。模拟的条件是输入信噪比为 5dB,干扰信号的信噪比也是 5dB,也就是说,干扰信号和期望信号功率相同。在 CDMA 系统中由于使用了功率控制技术,因此这种假设是符合实际情况的。

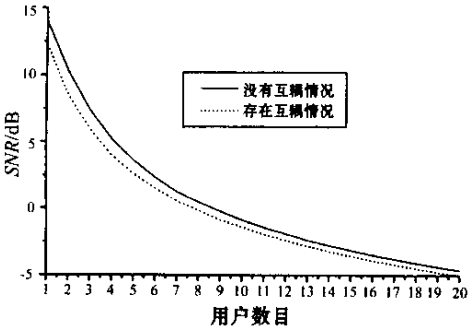

图 6 输出 SINR 同用户数的关系

需要说明的是,不同算法对互耦影响的敏感程度是不同的,这取决于算法对阵列响应矢量的依赖性。

如果能精确得到表征互耦的互阻抗矩阵,则实际上只需对接收信号进行一个矩阵运算就可以得到理想情况下的接收信号。在发射状态,对权函数进行互耦补偿,可以得到修正的权函数,以获得良好的辐射特性。

6 结论及研究前景

互耦对智能天线的影响是很明显的,以往关于智能天线的分析都没有考虑到互耦的影响。本文提供了一个考虑互耦影响的依据。虽然实际应用的天线单元各不相同,但是互耦影响的规律基本是一样的。在实际应用中,如何精确获得互耦参数以便在校准时进行补偿成为一个新的问题。互耦的存在同时对 DOA(Direction of Arrival)估计、功率控制、系统容量等都有影响,这些也是将来研究的重要内容。

参 考 文 献

〔1〕 R F Harrington. 计算电磁场的矩量法. 王尔杰, 肖良勇,等译. 北京:国防工业出版社,1981.

〔2〕 I J Gupta, A A Ksienski. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1983, 31(9):785 ~ 791.

〔3〕 D F Kelley, W L Stutzman. Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1993, 41(12):1625 ~ 1632.

〔4〕 R S Adve, T K Sarkar. Compensation for the effects of mutual coupling on direct data domain adaptive algorithms. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2000, 48(1):86 ~ 94.

孙长果 1974 年生,西安电子科技大学博士研究生。主要研究领域为:近场测量、自适应天线算法、多天线接收技术等。

E-mail:sunchangguo@datangmobile.com

张进民 西安电子科技大学高级工程师。主要研究领域为:近场测量、计算电磁学、天线理论与技术等。

张晓丽 高级工程师,大唐移动通信设备有限公司基站开发部负责人。主要研究领域为 TD-SCDMA 系统的开发设计和标准制定。

黄际英 西安电子科技大学教授,博士生导师,中国电子学会会士,电波专业委员会委员,URSI-F 组中国委员会委员,电磁环境特性与模化国防重点实验室学术委员。研究方向:电磁波传播与散射及其应用、复杂系统和随机介质中电磁波传播与散射。

E-mail:jyhuang@xidian.edu.cn

万方数据

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