

# 智能天线阵列单元阵中方向图畸变分析

卜安涛，史小卫，李平

(西安电子科技大学 电子工程学院 陕西 西安 710071)

**摘要：**主要研究了智能天线系统前端接收天线阵列中的耦合问题。针对圆形阵列中单元间相互耦合作用引起单元水平面方向图的畸变这一问题，分析了未激励单元的互耦、以及这些单元端接电缆的加载作用对激励单元阵中方向图的影响。依据多端口理论，把所研究的结构等效为多端口网络，提出使用迭代方法求解未激励端口的匹配阻抗，并由结构对称性，提出使未激励端口加载阻抗与激励端口输入阻抗相等，以减小考察单元阵中方向图畸变，降低单元水平方向图不圆度，以满足智能天线系统要求。

**关键词：**智能天线系统 互耦 加载 迭代 不圆度

中图分类号 TN0451 文献标识码 A 文章编号 1001-2400(2003)06-0802-04

## Analysis of element pattern aberrance in the smart antenna array

BU An-tao , SHI Xiao-wei , LI Ping

( School of Electronic Engineering , Xidian Univ. , Xi'an 710071 , China )

**Abstract :** The mutual coupling in the antenna array of a smart antenna system is discussed. The aberrance of the horizontal pattern of the pole is described, which is caused by the mutual coupling in the antenna array. During the analysis of the pole pattern, mutual coupling caused by un-excited elements and loading caused by the cable connected to them are considered. According to the theorem of the multi-port system, the configuration is considered as a multi-port system. And the matching impedance of the un-excited port will be calculated by the tumbling method. With configuration symmetry considered, the loading impedance of the un-excited port equals the input impedance of the excited port in order to reduce the aberrance and un-roundness of the horizontal pattern of the pole, thus matching the requirement for the smart antenna system.

**Key Words :** smart antenna system ;mutual coupling ;loading ;tumbling method ;un-roundness

智能天线系统是具有波达方向估计(DOA)和数字波束形成(DBF)能力的天线阵列。其工作过程是利用该系统接收前端天线阵列中各单元之间的空间位置差，对各个单元经过多通道分别接收之后得到的信号再通过数字信号处理技术形成一组权值(即阵列单元激励的幅度和相位)，并按照这组权值去激励每个单元，将产生空间定向波束，使天线波束对准期望用户信号方向，同时在干扰信号到达方向上形成零陷。

智能天线系统是由天线阵列、多通道接收机、信号处理组成<sup>[1]</sup>。智能天线系统与传统阵列天线不同点在于：传统阵列天线对所有单元经过一个固定的馈电网络，将所有单元接收到的信号合成一路输入到后续射频处理单元。而智能天线系统对应用每个天线单元，连接着一个独立的通道(射频处理单元)，仅在基带部分才使用数字信号处理对各路信号利用各种数值算法加权求和，实现波达方向估计和数字波束形成。智能天线系统下行工作模式为

$$y(t) = u(t) \cdot h(t) \quad , \quad (1)$$

其中  $u(t)$  为数字波束形成算法针对用户来波方向综合出的阵列各个单元的权值， $h(t)$  为阵列流形， $y(t)$  为系统输出信号，即为最终形成的空间波束。

如果智能天线系统前端阵列中存在耦合，会引起两个问题：(1)现有DOA估计方法在波达方向估计过程

中均假设阵列所有单元的单元方向图是全向的<sup>[1]</sup>,但是实际的阵列单元之间存在耦合,使得单元方向图并不是全向的。用户信号经过天线阵列、多同道接收机部分,到达基带数字处理部分中不仅反映每个单元位置误差引起的相位差,而且包含阵列单元之间的耦合以及各通道的射频处理性能差异等带来的误差信号。则数值处理部分就不能估计出正确的空间来波信号的方向。<sup>[2]</sup>现有数字波束形成算法同样是基于理想阵列,即所有单元的方向图是全向的。由于实际阵列单元之间互耦的存在,应用针对理想阵列形成的权值去激励实际阵列,形成的空间方向图与理想方向图差别很大<sup>[2]</sup>。从而使智能天线阵列形成的波束方向不能对准来波方向。因此应该进行阵列校正,尽量使每个通道的性能保持一致。对于每个通道前端的天线单元,系统要求通过阵列校正使各个方向的信号同等程度地进入通道,即要求每个单元在阵中方向图的不圆度要满足一定数值。

## 1 天线阵列模型

智能天线系统模型是一个具有8个信号通道接收处理系统,系统所采用的天线阵列结构如图1所示。

该系统主要用来处理水平面(*H*面)内360°方向来波信号。由于阵列的旋转对称性,它们所受的外部互耦影响相同。由系统对单元方向图假设为全向的。那么在该阵列中,阵列某一单元的方向图是考虑其他单元存在、且由其他单元连接电缆引起负载作用情况下的方向图。即要求这种激励模式下,该单元在水平面360°方向图“不圆度”必须满足一定要求。“不圆度”这个概念解释如下:因为该系统的每一个通道前端都连接一个天线单元——单极子加地板就是该通道的天线单元,系统要求该天线单元在水平方向接收能力具有全向性。众所周知,位于圆形地板中央的单极子在水平面方向图为圆形,即是全向的。但是实际阵列中,每个单极子都不在地板中心。在组成阵列之后,由于阵列中单元之间相互耦合作用,使得每个振子在水平面方向图均发生畸变。而把这种情况下阵列中某个振子水平面方向图最大值与最小值之差定义为单元阵中方向图的不圆度。显然,单元方向图畸变使每个振子在水平面360°范围内接收信号能力不同。在智能天线系统接收前端就引入了误差,可能引起智能天线系统错误判断来波方向。基于此原因,要求每个振子在阵列中方向图不圆度不小于一定数值。

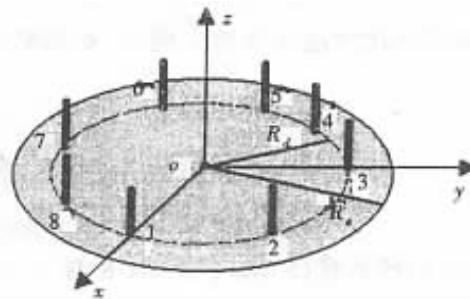


图1 天线结构示意图

## 2 算法分析

为了简化计算,计算分析使用原天线的等效模型:8个对称振子组成的圆形阵列。使用矩量法分析该天线电流分布、远场方向图的公式可以见文献[3~6]。

该天线在工作状态下,每个端口均连接一根电缆。考虑电缆的加载作用,对于其中某一个激励端口而言,其余端口并非一般计算中认为的短路情况。而是由于连接的电缆存在相当于给每个端口连接了阻抗为50Ω负载。因此利用多端口网络理论,将该天线看作一个8端口系统。在一端口激励,其余7个端口加载50Ω。如图2所示网络模型。端口①组成激励组1,其余7个加载端口组成加载组2,每个端口加载阻抗记为 $Y_i$ 。这两组的电流、电压关系可以描述为<sup>[3]</sup>



图2 天线阵网络模型

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $I_1, V_1$ 表示激励组1所有端口处的电流、电压; $I_2, V_2$ 表示加载组2所有端口处的电流、电压。矩阵元素 $Y_{ij}$ 可见文献[3],与矩量矩阵方程中的广义导纳矩阵有关。

三方数据 加载组2的所有端口的电流、电压约束条件为

$$\mathbf{I}_2 = -\mathbf{Y}_L \cdot \mathbf{V}_2 , \quad (3)$$

其中  $\mathbf{Y}_L$  表示的阻抗矩阵详细信息为

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Y_7 \end{bmatrix}_{7 \times 7} . \quad (4)$$

将式(3)(4)代入式(2),得到激励组的输入导纳矩阵<sup>[3]</sup>为

$$\mathbf{Y}_{in} = \mathbf{Y}_{11} - \mathbf{Y}_{12} \cdot (\mathbf{Y}_{22} + \mathbf{Y}_L)^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{21} . \quad (5)$$

若图2所示天线系统中加载端口2阻抗匹配,考虑到该系统结构的对称性,必须使端口①的输入阻抗等于其余7端口的加载阻抗。实际上就是式(5)中  $\mathbf{Y}_{in}$  与  $\mathbf{Y}_L$  相等。依据式(5)欲求出端口①在其余7端口加载的情况下输入阻抗,除了要知道天线的结构以外,还必须事先求出其余7个端口的加载阻抗。因此,  $\mathbf{Y}_{in}$  与  $\mathbf{Y}_L$  匹配情况下端口①的输入阻抗与其余7个端口的加载阻抗实际上是一对相互制约的参数。针对式(5)提出使用迭代方法求解输入阻抗、加载阻抗矩阵,先假设加载端口的加载阻抗为电缆的特性阻抗50Ω,即

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} 1/50 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/50 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/50 \end{bmatrix}_{7 \times 7} . \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)求得端口①的输入阻抗  $\mathbf{Y}_{in}$ ,把端口①的输入阻抗再作为加载阻抗,这样计算反复多次,并设置精度系数  $\epsilon = |\mathbf{Y}_{in} - \mathbf{Y}_L|$ ,当加载阻抗与所求得输入阻抗之差满足设置精度即停止,则得到该端口的匹配阻抗。根据结构旋转对称性,该阻抗值同时是其他端口的匹配阻抗。

振子的激励端口直接与特性阻抗为50Ω的同轴线连接,同轴线对于振子的连接端口的加载作用就是50Ω。而“匹配负载”时必须在振子的激励端口与馈电同轴线之间加入阻抗变化网络,即将振子的输入阻抗变换至同轴线特性阻抗,方可与同轴线连接。

### 3 算例分析

采用的计算例子如图1所示,计算频率为1.90 GHz,振子长度为  $\lambda/2$ ,振子所在圆半径  $R_d$  为  $\lambda/2$ ,考察振子1的阵中  $H$  面方向图。

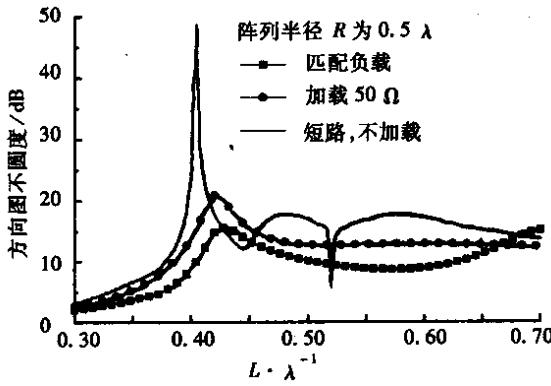


图3 单元阵中方向图不圆度随振子长度变化

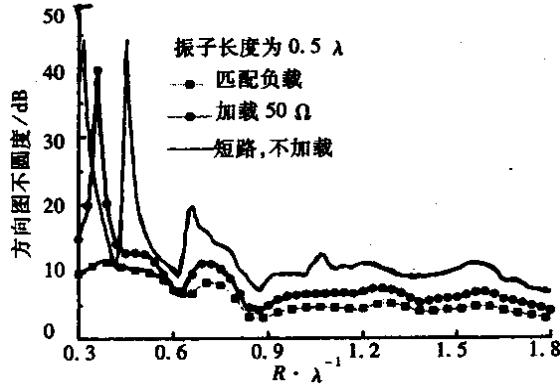


图4 单元阵中方向图不圆度随阵列半径变化

图3分别给出在不考虑传输线引起的加载作用、考虑传输线引起的加载作用(加载50Ω)、端口接匹配阻抗3种情况下,振子1阵中方向图不圆度与组成阵列振子长短变化关系。可以看出随着组成阵列振子长短的变化,在大多数情况下给其他振子加载50Ω与接匹配负载情况下对振子1的阵中方向图不圆度有明显的改善。而且给其他振子加载50Ω与接匹配负载效果也不相同,主要是匹配情况下其余振子电缆连接处没有反

射,负载吸收最大<sup>[5]</sup>,使激励振子耦合到其余振子上的电流最小。图4分别给出在以上3种情况下,振子1阵中方向图不圆度随着阵列半径的变化。从两个图中均可以看出,在大多数情况下,考虑了其他端口连接馈电电缆的加载作用以后,对振子1阵中方向图不圆度均有所改善。如果其他端口接匹配阻抗,对振子1阵中方向图有更大改善。图3,图4中提出的“匹配”是指对给定的振子长度、阵列半径使用上述给出的方法求出激励端口输入阻抗和加载端口负载相等的情况。

图5中振子长度 $L$ 为 $\lambda/2$ ,阵列半径 $R_d$ 为 $\lambda/2$ 时,振子1在不同情况下的阵中H面方向图。计算频率为1.90 GHz时,加载阻抗初始选择为(50,0)Ω,迭代7次求得匹配阻抗为(127.34,29.88)Ω。

从图5中可以看到,与不考虑其他端口连接电缆的加载作用相比,采用文中提出的其他端口阻抗匹配时,振子1的阵中方向图不圆度由16.80 dB减小到10.13 dB,该数值在某些数字校正算法中是可以接受的。而且,考察单元方向图的不圆度不仅看其不圆度数值,而且应该考虑不圆度发生的角度范围。在不考虑其他端口连接电缆的加载作用时,不圆度发生的角度范围为90°,180°,270°,而采用文中提出的其他端口阻抗匹配时,不圆度发生角度仅为180°,在以后的数字校正工作中更容易一些。

图6给出了不同情况下振子1激励时振子2上的电流分布。可看出匹配情况下激励单元耦合到非激励单元上的电流密度最小。因此匹配情况下确实能够减小单元之间的耦合。

同时必须指出,图3~图5中不同情况下,按照文中提出的迭代方法求解端口匹配阻抗的过程都很快收敛。上面的例子中,初始阻抗值取为50Ω,一般只需4~7步迭代过程就可以求得端口的匹配阻抗。

## 4 结 论

研究了智能天线前端天线阵列的耦合问题,考虑了每个振子激励端口连接电缆的加载作用对于各个单元阵中方向图的影响,并提出通过迭代法求解每个端口的匹配阻抗,使单元阵中方向图不圆度得以改善。

致谢 感谢天线与电磁散射研究所傅德民老师给予的指导。

## 参考文献:

- [1] Liberti J C, Rappaport Jr T S. Smart Antennas for Wireless Communications IS-95 and Third Generation CDMA Application [M]. USA : Prentice Hall PTR , 1999.
- [2] 张志军, 冯正和. 考虑互耦的圆形阵列方向图综合[J]. 电波科学学报, 1997, 12(4): 362-368.
- [3] Harrington R F. Field Computation by Moment Method [M]. Malabar : Krieger , 1982.
- [4] 刘其中, 宫德明. 天线的计算机辅助设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988.
- [5] 毛乃宏, 傅德民. 设计低副瓣阵列天线的一种新途径[J]. 西安电子科技大学学报, 1991, 18(Sup): 1-9.
- [6] 刘文虎. 短波加载天线的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(5): 663-666.

(编辑:齐淑娟)

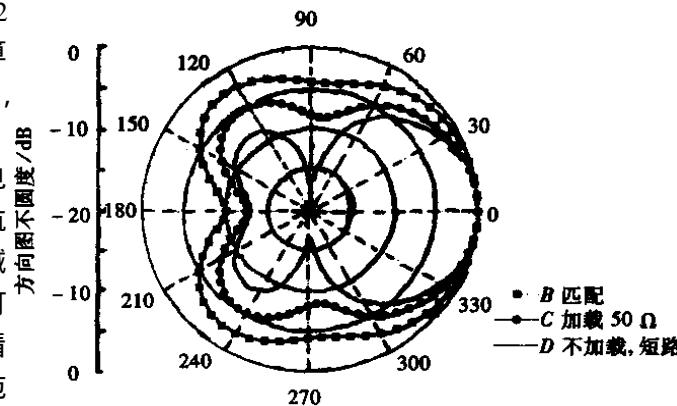


图5 振子1阵中H面方向图

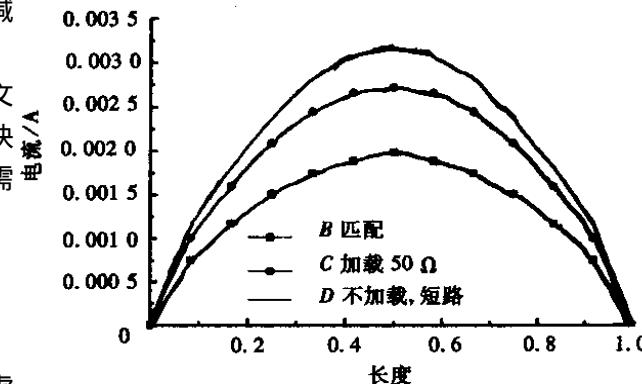


图6 振子2上的电流分布

## 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>