

一种圆形智能天线阵的实现及其互耦研究

高峰¹, 单润红², 刘其中¹, 芦永超³, 肖良勇³

(1. 西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室 陕西 西安 710071; 2. 国防科技大学 计算机学院 湖南 长沙 410073; 3. 西安海天天线科技股份有限公司 陕西 西安 710075)

摘要: 利用遗传算法和矩量法相结合的方法, 优化设计了智能天线阵列单元——同轴串馈印刷振子天线. 分析了考虑互耦影响的圆形智能天线阵, 考虑互耦的计算更接近实际情况, 通过实验天线验证了其有效性.

关键词: 互耦; 同轴直排; 波束赋形; 矩量法

中图分类号: TN821+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-240X(2004)04-0618-04

A smart antenna circular array implementation and its analysis with mutual coupling

GAO Feng¹, SHAN Run-hong², LIU Qi-zhong¹, LU Yong-chao³, XIAO Liang-yong³

(1. State Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. The Univ. of National Defense Technology, College of Computer, Changsha 410073, China; 3. Xi'an Haitian Antenna Technologies Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: This paper investigates an efficient procedure integrating the genetic algorithm with the method of moment for the optimal design of the smart antenna element. Then a novel coaxial collinear printed dipole antenna is presented, which is used as an element in the circular smart antenna array. The analysis of the circular smart antenna array considering the effects of mutual coupling is obtained. Finally the effectiveness of the analysis is evaluated by experimental antenna arrays. The results are useful for the development of a smart antenna system in the 3rd generation mobile communications.

Key Words: mutual coupling; coaxial collinear; beam-forming; method of moment

随着全球通信业务的迅速发展, 智能天线日益成为 3G 通信的收发平台. 对智能天线的前期研究工作中, 大都把天线单元看作是互不干扰的. 近期, 国内有一些研究考虑了天线单元间的互耦对天线的影响, 但是大多集中于理论计算方面. 对于圆形阵列, 也主要是以理想点源或对称振子作为阵列单元模型, 经模拟基带处理而得出实验数据, 并未有完整实验天线样机, 这样得出的互耦数据具有局限性.

笔者采用圆阵结构, 频率为我国 3G 通信标准的频段(2 010 ~ 2 025 MHz), 首先选择同轴印刷振子阵列单元的结构尺寸, 然后对阵列的结构性能和互耦参数进行了优化设计, 并进行了实际制作、测量, 检验了设计的有效性和互耦对天线阵列的影响.

1 阵列单元的分析设计

首先, 分析设计单个阵列的结构、性能. 同轴直排印刷振子天线易于提高增益和组阵, 具有良好的一致性. 其基本形式如图 1 所示.

收稿日期: 2003-07-20

基金项目: 国家部委预研基金资助项目(41001020204, 40106030502)

作者简介: 高峰(1975-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

万方数据

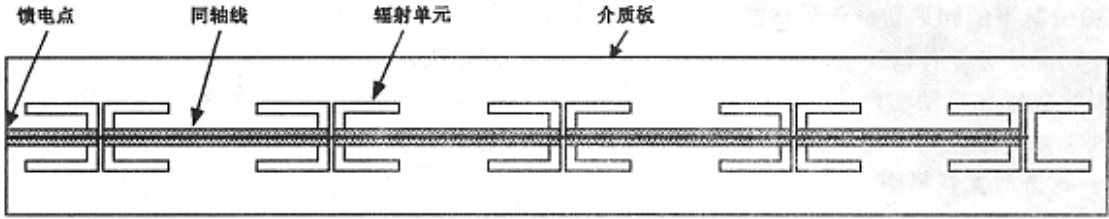


图 1 同轴直排印刷振子天线

图 1 显示了由 5 个振子组成的单个阵列单元,取每个振子为半波对称振子,并忽略同轴线的损耗,则电流积分方程为^[1]

$$\frac{j}{\omega \epsilon} \int_S \left\{ \frac{\partial K(z')}{\partial z'} \frac{\partial \psi(z, z', \phi')}{\partial z} + k^2 K(z') \psi(z, z', \phi') \right\} dS' +$$
$$\sum_{n=1}^{N-1} \left\{ (-1)^{n+1} \frac{\Phi_n}{\Phi_1} \cdot \sum_{k=2}^{N-1} (-1)^{k+1} \Pi'(k:n) I_k - \sum_{k=n+1}^{N-1} (-1)^{k+1} \Pi'(k:n) I_k \right\} \delta(z - z_n) =$$
$$\sum_{n=1}^{N-1} (-1)^{n+1} \frac{\Phi_n}{\Phi_1} V_g \delta(z - z_n) \quad , \tag{1}$$

其中 $\Pi'(k:n) = (r_k p_{k-1} p_{k-2} \cdots p_{n+1}) + \cdots + (r_k p_{k-1} \cdots q_{m+1} p_{m-2} p_{m-3} \cdots p_{n+1}) + \cdots + (r_q q_{k-1} q_{k-3} \cdots q_{n+2})$.
根据式(1)将上述电流带入电磁场积分方程中,基函数采用正弦插值基函数

$$I_j = A_j + B_j \sin k_s(s - s_j) + C_j [\cos(s - s_j) - 1] \quad , \quad |s - s_j| < \Delta_j/2 \quad ,$$

式中 s_j 为第 j 段中心的 s 值 Δ_j 为第 j 段的长度.

采用点选配的方法作为检验函数,即利用矩量法(MoM)计算出同轴直排天线的阻抗矩阵,进而得到天线的电流、远区辐射场、增益和输入阻抗,然后优化设计出天线的尺寸.因为矩量法的计算考虑了各段之间的电磁耦合作用,因此阵元的计算已经考虑了互耦的影响.

2 圆阵及其互耦的分析设计

如图 2 所示,将上面分析得到的 8 个阵列单元在水平面上沿半径为 r 的圆周等间距排列构成圆阵.由计算可知当 $N = 8$ 时,阵因子的最大增益在直径 $D = 0.18\text{ m}$ 附近.将 8 个直排天线阵元等间距放入圆阵中,考虑到互耦和其他情况的影响,其直径的选取应该略大于 0.18 m ,实验中取 $D = 0.186\text{ m}$ (即半径 $r = 0.625\lambda$).

2.1 互耦分析

广泛采用的分析互耦的一种方法,是将天线阵中各单元间的关系视为多端口耦合网络,各单元电流和电压的关系可由网络方程给出^[2]

$$V = IZ \quad , \tag{2}$$

其中 $Z_{mn} = \int (J_m \cdot E_n^s) dV'$, $V_m = - \int (J_m \cdot E_i) dV'$, J_m 为第 m 个检验函数, E_n^s 为第 n 个单元的辐射电场, E_i 为平面波电场矢量.则有^[3]

$$Z_{kl}^T = \frac{V_{kl}^T}{I_l^e} = \frac{1}{I_{kl}^e I_l^e} \sum_{m=1+(k-1)N_e}^{KN_e} \sum_{p=1+(l-1)N_e}^{IN_e} Z_{mp} I_m I_p \quad , \quad k, l = 1, 2, \dots, M \quad , \tag{3}$$

其中 V_{kl}^T 为第 l 个阵元上的电流在第 k 个阵元上产生的电压.根据上述公式即可求出含有互耦信息的阻抗矩阵,一旦阻抗矩阵 Z^T 确定,即可求出电压和电流矩阵.

根据以上阵列单元之间的互耦分析,并结合阵元的分析,就可以得到包含了互耦影响的整个圆阵的电流、远区辐射场和增益方向图.

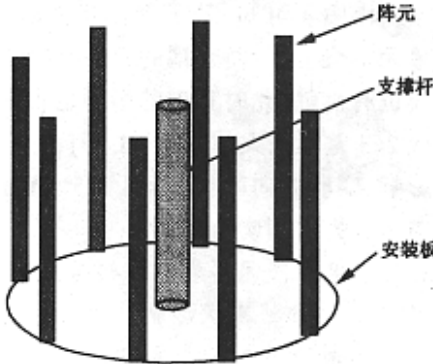


图 2 8 阵元圆阵结构示意图

2.2 3 种情况下的圆形智能天线阵的性能及互耦分析检验

在开阔场地分 3 种情况对天线阵的性能进行检测,收发天线相距 60 m 左右,发射天线采用了喇叭天线,将实验天线放置在自动转台上,控制其在水平面和竖直面 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的范围内转动,得到 E 面和 H 面方向图.

2.2.1 8 个阵元等幅同相馈电,用以检验天线阵的全向辐射能力和此时的互耦影响

由于笔者更关心与阵列轴线垂直的 H 面辐射情况,所以只给出了 H 面方向图.图 3 为中心频率(2.017 GHz)的归一化 H 面增益方向图.

前期智能天线的研究认为天线各单元都是互不干扰的,其理想模型的全向辐射归一化方向图是所有值为 0 的圆(与曲线 1 类似).曲线 1 表示不考虑互耦的 H 面方向图,曲线 2 为考虑互耦计算得出的方向图,曲线 3 为实测方向图(肯定存在互耦现象).由图 3 可知,对于天线阵的全向辐射,互耦的存在导致天线阵的增益有所下降,考虑互耦的方向图更接近实测值.

数值计算的 H 面方向图的不圆度仅为 0.17 dB,由于同轴线的损耗和支撑架介质板以及天线罩等介质材料的影响,实验的 H 面方向图不圆度小于 ± 0.7 dB,远远小于工程可以接收的 2 dB,其全向增益大于 7.5 dB,表明天线阵的全向辐射特性很好.

2.2.2 1 个阵元的端口馈电,其他阵元的端口接 50 Ω 匹配负载,用于检验天线阵单阵元馈电时的互耦情况

仿真和实验的方向图如图 4.由图 4 可知,若不存在互耦时,只有一个单元在辐射,其余单元不会工作,而互耦的存在,导致了其他单元在没有馈电的时候也有贡献,此时互耦的影响也很明显,这也解释了曲线 1 和曲线 2、3 差别很大的原因.由于同轴线的损耗和支撑架介质板的影响,实验方向图在 85° 和 275° 附近增益略微有些偏移,但基本与仿真方向图吻合.

2.2.3 8 个阵元各端口等幅异相馈电,进行波束赋形,检验天线阵的波束赋形能力和互耦对波束赋形的影响,这也是智能天线的一个重点

选择以下的相位分布:1 和 8 端口为 0° ,2 和 7 端口为 122° ,3 和 6 端口为 -66.2° ,4 和 5 端口为 55.8° .仿真和实验的方向图如图 5.

可以看出,异相馈电时,考虑互耦的仿真方向图更接近实测值.互耦对波束指向影响不大.由于互耦影响各单元的幅度相位,使主瓣电平有所降低,波束形成的两个方向(波束指向 2、3)均略有偏移,副瓣电平有所改变(200° 附近的副瓣电平升高很多),特别是整个方向上零陷电平上升很多,不过只要满足主、副瓣电平相差 10 dB 以上,就可满足工程应用要求.

3 结 论

以上论述了采用同轴印刷振子组成圆形智能天线阵列的新技术,并分 3 种情况考虑了互耦对天线阵列的影响,并据此研制出实验天线阵,表明考虑互耦的计算

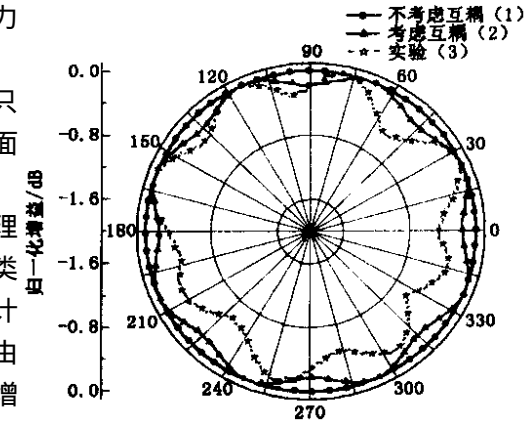


图 3 天线阵 H 面方向图(等幅同相馈电)

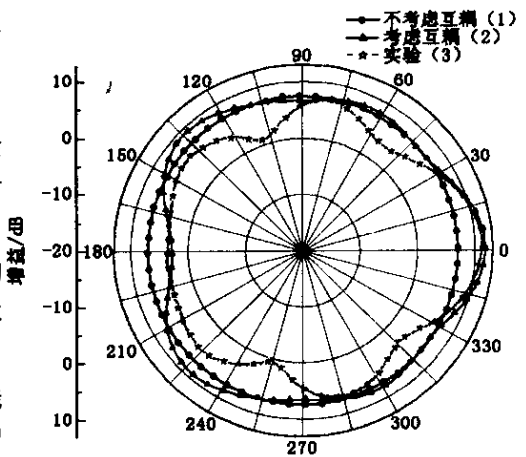


图 4 天线阵 H 面方向图(单阵元馈电)

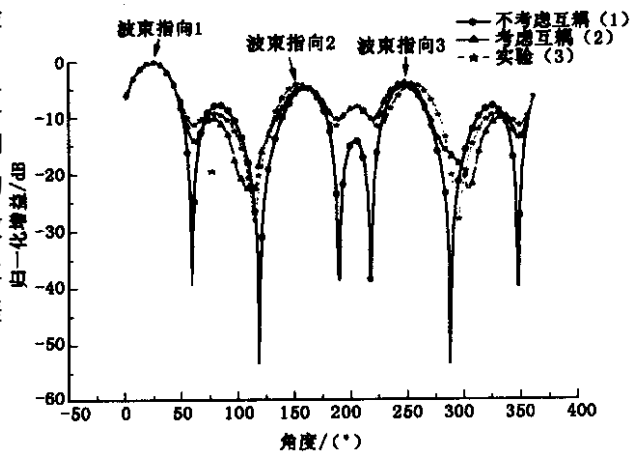


图 5 天线阵 H 面方向图(异相馈电)

更接近实际情况 ,验证了分析设计的有效性.

参考文献 :

[1] Sakitani A , Egashira S. Analysis of Coaxial Collinear Antenna : Recurrence Formula of Voltages and Admittances at Connections[J]. IEEE Trans on AP , 1991 , 39(1) : 15-21.

[2] 康行健 . 天线原理与设计[M]. 北京 :国防工业出版社 ,1995.

[3] Pasala K , Friel E. Mutual Coupling Effects and Their Reduction in Wideband Direction of Arrival Estimation[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems , 1994 30(4) : 1 116-1 122.

[4] 张晓刚 ,纪奕才 ,田步宁 ,等 . 线栅型圆锥单极天线[J]. 西安电子科技大学学报 ,2002 , 29(6) : 756-759.

(编辑 : 郭 华)

(上接第 592 页)

$\lambda y_1 + (1 - \lambda)y_2 = \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \in f[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] + \text{int } K(\bar{v}) \subset f(X) + \text{int } K(\bar{v})$,
因此 $f(X)$ 在 X 上是 $K(\bar{v})$ - 严格凸的. 从 $X \subset R$ 为非空紧凸集 , $f : X \rightarrow Y$ 是 $K_\delta(\bar{v})$ - 半连续的 , 故 $f(X)$ 是 $K_\delta(\bar{v})$ - 半紧 , 于是 $f(X)$ 和 $\varepsilon'_\delta(v)$ 满足定理 2 的条件 , 利用此定理即知结论成立.

以上讨论的有效点集、超有效集、弱有效点集的锥超次微分稳定性是在锥存在有界基的条件下. 因此 , 当锥不存在有界基时 , 上述的结论未必成立.

参考文献 :

[1] 胡毓达 ,徐永明 . 扰动多目标规划的次微分稳定性[J]. 数学学报 ,1992 , 35(5) : 577-586.

[2] 胡毓达 ,孟志青 . 序扰动多目标规划的锥次微分稳定性[J]. 系统科学与数学 ,2000 , 20(4) : 439-446.

[3] 傅万涛 . 赋范线性空间集合的严有效点[J]. 系统科学与数学 ,1997 , 17(4) : 324-329.

[4] 刘三阳 . 凸函数的新发展[J]. 西安电子科技大学学报 ,1990 , 17(1) : 63-69.

(编辑 : 郭 华)

(上接第 601 页)

[3] Valentin D , Abdi H , Otoole A J , et al. Connectionist Model of Face Processing : a Survey[J]. Pattern Recognition , 1994 , 27(9) : 129-130.

[4] Brunelli R , Poggio T. Face Recognition : Feature Versus Templates[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 1993 , 15(10) : 1 024-1 052.

[5] Turk M , Pentland A. Eigenfaces for Recognition[J]. Journal of Cognitive Neuroscience , 1991 , 3(1) : 71-86.

[6] 陈熙霖 ,山世光 ,高 文 . 多姿态人脸识别[J]. 中国图像图形学报 ,1999 , 4(A-10) : 818-824.

[7] 李军锋 ,姜昱明 . 具有真实感的虚拟人脸合成[J]. 西安电子科技大学学报 ,2003 , 30(4) : 525-529.

[8] 陈 刚 ,戚飞虎 . 实用人脸识别系统的本征脸法实现[J]. 计算机研究与发展 ,2001 , 38(2) : 170-175.

(编辑 : 齐淑娟)

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>