

文章编号 1005-0388(2010)02-0373-05

# 用于 MIMO 基站双极化天线 设计及阵元互耦分析

王永巍 姜 兴 侯 轶

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 利用缝隙耦合技术和双线馈电技术设计出了一种 H 型缝隙耦合天线。其结构简单, 制作容易, 成本低廉, 并具有高增益、高隔离、双极化的特性, 非常适用做 MIMO 基站端天线。对天线进行了仿真和测试, 测试结果与仿真结果吻合良好, 在 2.11~2.17 GHz 所需频段内, 实测两端口 VSWR 均小于 1.2, 实测水平极化增益为 9.2 dBi、垂直极化增益为 9.17 dBi、端口隔离度在频段内均低于 -40 dB。分析了 MIMO 系统中天线阵元间的互耦作用, 仿真得出基站天线阵最小阵元间距为  $d = 0.86 \lambda$ , 从而为 MIMO 系统分析相关性提供了参考数据。

**关键词** 双极化; 缝隙耦合馈电; 基站天线; 天线互耦

**中国分类号** TN821<sup>+</sup>.1      **文献识别码** A

## 1. 引言

移动通信业务在容量和质量上的不断升级, 而工作频带在移动通信中已经是非常拥挤, 因此, 要求采用先进的技术有效地利用有限的频率资源, 满足高速率、大容量的业务需求; 同时克服高速数据在无线信道下的多径衰落<sup>[1-2]</sup>。MIMO 技术就是基于上述要求提出的新技术, 并已成为目前无线通信领域的研究热点之一。MIMO 技术能大大提高系统的容量, 被视为未来无线通信中最有竞争力的技术之一, 亦被作为后 3G、4G 的候选技术。

MIMO 系统的实现离不开基站和移动端多天线的研究, 并且由于移动端天线受到体积、重量、成本等诸多限制, 提高系统通信质量的技术和措施很多靠基站端天线来实现的。本文综合运用了缝隙耦合技术和双线馈电技术设计出了一种结构为单层介质板、H 型缝隙耦合天线单元, 因其结构简单, 制作容易, 成本低廉, 并具有高增益、高隔离、双极化的特性, 非常适用做 MIMO 基站端天线。

在 MIMO 系统中, 相关性表现在两方面, 一为信道多径的相关性, 一为阵元之间的相关性, 最终相

关性问题是由这两方面共同影响的。有关文献[3-4]从算法的角度分析了上述两种相关性所产生的影响。在假设信道多径之间独立的情况下, 讨论阵元之间的相关性问题, 就得要求阵元间互耦很小。

## 2. 基站天线单元结构设计

天线结构如图 1 所示, 天线由一层介质板加铝板组成。辐射贴片用四根塑料螺钉支撑于介质板上方。接地板和馈线分别位于介质板的上部和下部。接地板上采用一对相互垂直的 H 型缝隙, 使隔离度明显提高, 降低了交叉极化。铝板和介质板之间引入空气层, 相当于减小了上层介质板的平均相对介电常数, 降低了微带天线的 Q 值, 从而达到了增加天线带宽的目的, 同时也提高了天线的增益<sup>[5]</sup>。

微带贴片天线的口径耦合馈电方式是 Pozar 于 1985 年提出的<sup>[6]</sup>, 它很好地克服了微带天线传统馈电方式的许多缺点(如同轴线引入一较大的电感、馈电网络的寄生辐射等)。在缝隙耦合结构的设计中包括介质层的选定、贴片的尺寸、耦合缝的尺寸和位置、馈电线的尺寸和相对位置, 根据微带电路改进的

收稿日期: 2009-07-26

基金项目: 973 计划前期研究专项(CB317109)

联系人: 王永巍 E-mail: yongweiwj@163.com

传输线理论<sup>[7-8]</sup>,可以初步确定贴片与两个缝隙的长宽和馈线调谐枝节的长度。选用的介质板介电常数  $\epsilon_r=2.65$ 、 $\tan \delta=0.0005$ 、厚度  $h=1 \text{ mm}$  的介质板。

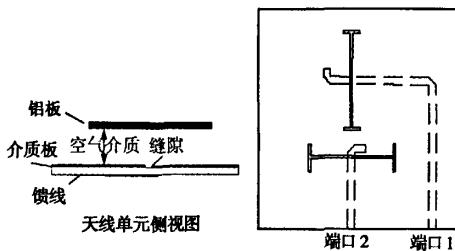


图 1 单层馈电网络的双极化口径耦合贴片单元

### 3. 天线仿真与实测结果

用三维仿真软件 HFSS 对天线单元进行了仿真和优化,仿真得到天线两个端口的 S 参数如图 2 所示。

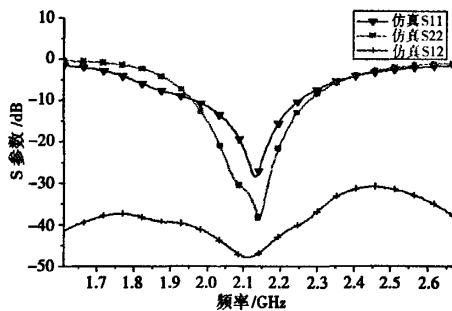


图 2 天线 S 参数仿真结果

据仿真优化结果制作了天线模型如图 3 所示。用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪对天线阵的 S 参数进行了测试,测试结果如图 4 所示。

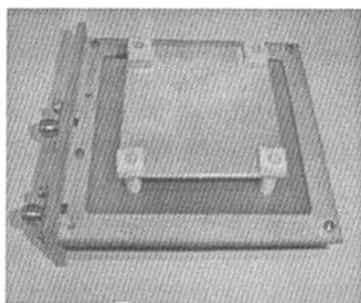


图 3 天线实物

通过实测与仿真结果比较,在频段 2.11~2.17 GHz 内实测  $S_{11}$  都在  $-20 \text{ dB}$  以下,实测  $S_{22}$  都在  $-30 \text{ dB}$  以下,及端口隔离度  $S_{12}$  大于  $-40 \text{ dB}$ ,实测

图形与仿真值基本吻合,验证了天线仿真的正确性。并且实测结果优于仿真结果。

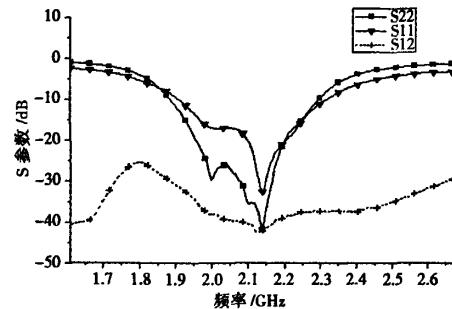


图 4 天线 S 参数实测结果

对天线单元的增益及方向图进行了测试,图 5 给出了水平、垂直极化端口方向图的仿真与实测结果,图形表明仿真与实测结果基本吻合。实测水平极化增益为  $9.2 \text{ dBi}$ ,垂直极化增益为  $9.17 \text{ dBi}$ 。

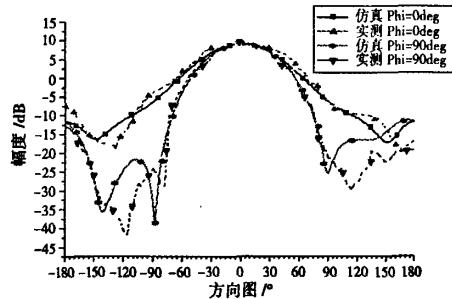


图 5 天线单元增益方向图

### 4. 阵元间的互耦分析

在天线阵中,由于单元间彼此靠近,一个天线阵元产生的场将改变其他阵元上的电流分布,使之不同于单元在自由空间孤立存在时的电流,从而导致天线输入阻抗发生变化,这就是互耦作用。

架设在室外的基站天线阵,各个单元间的距离很远,达到几十个波长,所以完全可以认为单元间的互耦可以忽略不计;而架设在有丰富的散射环境地方的基站天线阵,单元间的间距可能只有半个波长,所以可以利用基站天线不受空间限制的因素更好地确定单元之间的间距来降低阵元间互耦效应。

根据天线理论,当多个天线同时存在于空间时,它们之间会发生电磁耦合。其中任一个天线的阻抗由于受到周围其它天线的影响,将不同于它单独存在时的阻抗值;此时每一阵元的阻抗包括自身的阻抗(即自阻抗)和受其它阵元影响产生的互阻抗两部分,因而可用阵元间的互阻抗来表征阵元间的互

耦<sup>[9]</sup>。所以,互耦的计算问题归根结底是天线阵元间互阻抗的计算问题。

多天线系统的等效耦合网络<sup>[4]</sup>的模型如图6所示。负载阻抗为 $Z_{b1}, \dots, Z_{bN_s}$ , 天线阻抗(即自阻抗)为 $Z_{a1}, \dots, Z_{aN_s}$ 。当系统进行信号接收时, 等效于外加信号源( $V_{c1}, \dots, V_{cN_s}$ )分别作用于阵列天线单元。把天线单元间的互耦影响考虑进来。由电路理论, 馈电点电压可表示为

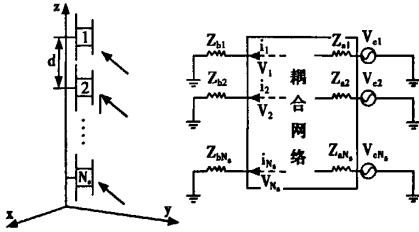


图6 多天线系统耦合网络模型

$$\begin{aligned} V_1 &= -i_1 z_{11} - \dots - i_j z_{1j} - \dots - i_{N_s} z_{1N_s} + V_1^0 \\ V_j &= -i_1 z_{j1} - \dots - i_j z_{jj} - \dots - i_{N_s} z_{jN_s} + V_j^0 \\ &\vdots \\ V_{N_s} &= -i_1 z_{N_s 1} - \dots - i_j z_{N_s j} - \dots - i_{N_s} z_{N_s N_s} + V_{N_s}^0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $V_j^0$  ( $j=1, \dots, N_s$ ) 是馈电点均开路时的电压。由电路理论可得

$$V_j = i_j z_{jN_s} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可得

$$V^0 = (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z) V \quad (3)$$

式中:  $V$  是馈电点电压向量;  $I_{N_s}$  是  $N_s$  单位矩阵;  $V^0$  是馈电点开路电压向量;  $Z$  是互阻抗矩阵; 对角矩阵  $Z_b$  的对角元素为负载阻抗。接收信号电压向量表示为

$$V_r = (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z)^{-1} V^0 \quad (4)$$

可以设  $W_r$  为天线单元间的耦合系数矩阵。令

$$V_r^* = W_r V^0 \quad (5)$$

$$V_r^* = (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z_A)^{-1} V^0 \quad (6)$$

式中:  $Z_A$  是对角矩阵; 天线阻抗  $Z_{a1}, \dots, Z_{aN_s}$  是对角元素, 将  $V_r^*$  视为不计互耦下的接收信号电压向量, 由式(6)得到

$$[W_r - (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z)^{-1} (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z_A)] V^0 = 0 \quad (7)$$

解方程(7)可得耦合系数矩阵为

$$W_r = \text{diag}(\text{Rand}) \cdot$$

$$(I_{N_s} + Z_b^{-1} Z)^{-1} (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z_A) \quad (8)$$

式中:  $\text{diag}(\text{Rand})$  是随机对角矩阵。耦合系数矩阵如果不计互耦时则为单位阵, 则

$$W_r = (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z)^{-1} (I_{N_s} + Z_b^{-1} Z_A) \quad (9)$$

上式给出了通用的耦合系数矩阵形式, 使得我们对不同天线单元间的互耦分析更加的方便。

若各天线单元的自阻抗相等并且负载阻抗也相等, 即  $Z_b = z_b I_{N_s}$  与  $Z_A = z_A I_{N_s}$ , 则  $W_r$  简化的结果为

$$W_r = (z_b + z_A) (Z_b + Z)^{-1} \quad (10)$$

本文采用了双H型缝隙耦合馈电的微带天线单元, 利用双线馈电技术实现了天线的双极化特性, 一对相互垂直的H型缝隙提高了端口隔离度, 设计制作了MIMO基站端双极化天线单元, 测试结果与仿真较一致, 满足了设计要求。

## 5. 仿真验证互耦分析结果

通过分析四单元阵列不同间距产生的互耦影响。利用HFSS对不同阵元间距进行了仿真, 得出不等间距对互耦的影响, 因为受本身天线尺寸的影响, 阵元间距的最小间距  $d=80$  mm。

实验分别对阵元间距  $d=0.57\lambda, d=0.7\lambda, d=0.86\lambda, d=\lambda$  的四单元阵列进行仿真, 图7给出了二单元阵元示意图, 不同极化端口隔离度基本在-40 dB以下, 其中影响互耦较大的是相邻的同极化端口1、3和端口2、4。

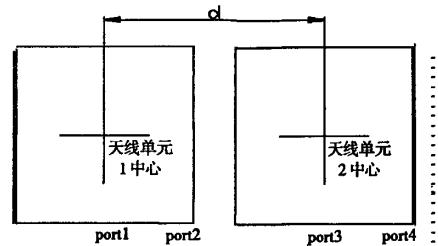


图7 二单元阵元示意图

图8给出了不等间距间的同极化端口1、3和端口2、4相互间的隔离度, 其中间距为  $d=0.57\lambda$  时, 在频段内间距的隔离度只有十几个dB, 互耦影响很大;  $d=0.7\lambda$  时, 只能达到-20 dB, 也不能满足系统的要求;  $d=0.86\lambda, d=\lambda$ , 各个端口的隔离度效果理想, 都在-25 dB以下。实验从仿真的角度验证了阵元互耦分析理论, 达到了理想的效果。通过分析互耦确定了阵元的间距最小为  $d=0.86\lambda$ , 从而为MIMO系统分析相关性提供了参考数据。

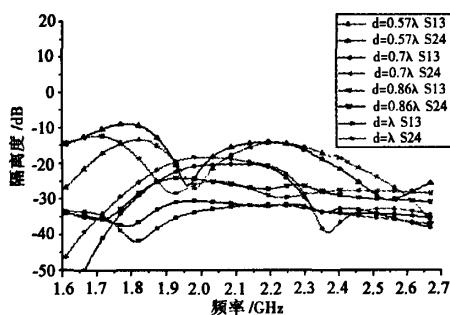


图 8 1,3 和 2,4 同极化端口隔离度仿真图

## 6. 结 论

本文采用了双 H 型缝隙耦合馈电的微带天线单元, 利用双线馈电技术实现了天线的双极化特性, 一对相互垂直的 H 型缝隙提高了端口隔离度, 设计制作了 MIMO 基站端双极化天线单元, 测试结果与仿真较一致, 满足了设计要求。并分析了 MIMO 系统中天线阵元间的互耦相互作用, 通过软件仿真得出  $d=0.86\lambda$  时基站天线阵最小阵元间距, 为实现 MIMO 天线系统的高性能提供了良好的平台。

## 参考文献

- [1] TABBANO S. Handbook of Mobile Radio Networks [M]. Norwood: Artech House, 2000.
- [2] GODARA L C. Handbook of Antennas in Wireless Communications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [3] 王自力, 龚耀寰. MIMO 宏小区窄带信道模型的相关性能分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 37-42.  
WANG Zili, GONG yaohuan. Correlation characteristic analysis of MIMO macro-cell narrowband channel model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(1): 37-42. (in Chinese)
- [4] 李忻, 聂在平. 天线互耦对 MIMO 无线信道性能的影响[J]. 电波科学学报, 2005, 20(4): 546-551.  
LI Xin, NIE Zaiping. Effect of mutual coupling on the performance of MIMO wireless channels[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(4): 546-551. (in Chinese)
- [5] ZHANG YABIN, LIBINHONG, LIU YIJUN. A procedure to design aperture coupled stacked microstrip antenna based on experiment [J]. Microwave and optical technology letters, 2002, 35(3): 244-247.
- [6] TSAO C H, HWANG Y M, KILBURG F, et al. Aperture-coupled patch antennas with wide-bandwidth and dual-polarization capabilities [J]. IEEE AP-S IntSymp, 1988, 3: 936-939
- [7] BHARTIA P, BAHL INDER, GARG R, et al. Microstrip Antenna Design Handbook [M]. Norwood: Artech House Inc, 2000.
- [8] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [9] 伍裕江, 聂在平. 一种新的互耦补偿方法及其在 DOA 估计中的应用 [J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 541-544.  
WU Yujiang, NIE Zai Ping. A new mutual coupling compensation method and its application to DOA estimation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(4): 541-544. (in Chinese)
- [10] ADVE S R, SARKAR K T. Compensation for the Effects of Mutual Coupling on Direct Data Domain Algorithms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(01): 86-94.

## 作者简介



王永巍 (1983—), 男, 山东人, 硕士生, 主要研究方向为天线理论与技术。



姜 兴 (1962—), 女, 河北人, 教授, 主要从事宽带天线、阵列天线、微波测量、计算电磁学、光通信等方面的研究。



侯 轶 (1981—), 男, 广西人, 硕士生, 主要研究方向为天线理论与技术。

## Design of dual-polarized antenna used for MIMO base station and analysis of array element mutual coupling

WANG Yong-wei JIANG Xing HOU Yi

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract** An H-type slot antenna is designed by using slot-couple technology and two-gap-couple feed technology. It is structure-simple, easy to produce and low cost. With such features as high-gain, high isolation and dual-polarized, it is fit for MIMO mobile communication base station. It is simulated and tested. The tested data coincide well with the simulation results. In frequency band from 2.11 GHz to 2.17 GHz, the horizontal polarization gain is 9.2 dBi, the vertical polarization gain is 9.17 dBi and the port isolation is lower than  $-40$  dB. The mutual coupling between the array elements of MIMO systems is analyzed. The smallest elements spacing  $d = 0.86\lambda$  for the base station antenna array is given by the simulation which provides reference data for the correlation analysis of MIMO system.

**Key words** dual-polarization; coupling slot; base-station antenna; antenna mutual coupling

## 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>