

# MIMO系统的天线相关性研究

## The Analysis of Antenna Correlation for MIMO

(南京信息工程大学)高乙月 周杰 姚克友  
GAO YIYUE ZHOU JIE YAO KEYOU

**摘要:**空间相关性是实际的多入多出无线通信系统必须要解决的损伤之一。多入多出系统的信能受空间相关性的影响非常大,有必要对天线的空间相关性进行深入研究。利用数学分析,介绍了两种用于多入多出系统的空间相关性的精确分析与近似分析的模型。并利用 Mat lab 对模型进行仿真。仿真结果表明,近似分析在一定的条件下可替代精确分析。

**关键字:**多入多出系统;圆形天线阵;相关方程;精确与近似分析

中图分类号:TN929.53

文献标识码:A

**Abstract:** Spatial correlation is one of the impairments practical MIMO wireless communication systems have to cope with. The performance of MIMO system is mostly affected by the channel correlation, it needs to study the channel correlation. Using mathematical analysis, two kinds of exact and approximate equations on spatial correlation are introduced. Numerical simulations are performed with Mat lab to verify the proposed formula. The results show that approximate analysis can replace the exact analysis in some cases.

**Key words:** MIMO, circular antenna array, correlation equations, exact and approximate analyze

## 1 引言

多副接收天线和接收分集的使用可追溯到 20 世纪初的马可尼时代,早在 1908 年马可尼就提出用它来抗衰落。MIMO 系统的特点是在不增加频谱资源和天线发送功率的情况下,提高信道的容量和信宿的可靠性。实验室的研究表明,采用 MIMO 技术在室内传播环境下的频带利用率可以达到 20-40bit/s/Hz。

对于 MIMO 系统而言,由于其使用多传输天线与多接收天线,大量的空间统计特性便是其最重要的特征。MIMO 系统的信能受空间相关性的影响非常大,随信道之间相关性的增大而下降。能否实现增加信道性能取决于信道间的空间相关系数。

天线阵中,单元阵列最常使用的是均匀线性阵(ULA)。ULA 的空间相关函数是众所周知的高斯角能量分布与均匀角能量分布。但是在移动通信系统中,还没有对均匀圆形阵(UCA)的一些特性像对 ULA 那样进行深入研究。近来,均匀圆形阵得到了越来越多的关注。那么在研究均匀圆形阵的特性时,有必要得到其空间相关模型。本文旨在介绍 UCA 的空间相关模型。

## 2 空间相关函数

### 2.1 阵列几何图

天线阵可以为各种排列。在线性阵中,天线排成一条直线;在平面阵(例如圆形阵)中,

天线元素的位置按极坐标或笛卡尔坐标分布。本文中为简单起见,在几何模型中,我们仅考虑方位面。图 1 给出了一个半径为 R、具有不同天线元素 M=8 的圆。

天线可能是全方向的,也可能各个角度以及入射波形的频率的灵敏度都不一致。这些天线均匀或不均匀地分布在阵列中。在无线通信环境中,用户占用同一通信渠道以及局部或偏

远信号的散射都会引起信号失真,因此有必要寻找合适的抵消失真的处理方法,天线的空间分布是研究的重点之一。

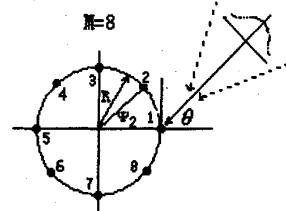


图 1 阵元为 8 的圆形天线阵

### 2.2 角能量分布

空间信道有两个模型。

第一个是高斯分布。角能量分布函数可表述如下

$$p(\theta) = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\theta + \phi)^2/\sigma^2}, \theta \in [-\pi + \phi, \pi + \phi]$$

$$k = \frac{1}{\operatorname{erf}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\sigma}\right)} \quad (1)$$

$\Phi$  是中心到达角,  $\sigma$  是分布的标准差。k 是标准化因子, p(θ) 使得成为一个物理密度函数,  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  是误差函数。

另一个常见的角能量分布是均匀分布。角能量的均匀分布定义为

$$p(\theta) = \frac{1}{2\Delta}, \theta \in [\phi - \Delta, \phi + \Delta] \quad (2)$$

其中  $\Delta$  是中心到达角  $\Phi$  的角度范围。

### 2.3 相关模型

如图 1 所示的圆形天线阵的几何图,天线的排列可以形成一个半径为 R 的圆。像线性阵一样,天线响应矢量  $v_i(\theta)$  为

$$v_i(\theta) = e^{-j2\pi \frac{R}{\lambda} \sin(\xi) \cos(\theta - \psi_i)}, i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

此处圆形天线阵列半径为 R,  $\xi$  是仰角,  $\lambda$  是入射波波长, 此处只考虑  $\xi=90^\circ$  的情况。 $\psi_i$  是第 i 个天线阵元的方位角。

第 m 个和第 n 个天线的相关性函数表示为:

$$\rho(m, n) = E[v_m(\theta)v_n(\theta)^*] = \int_{-\pi}^{\pi} v_m(\theta)v_n(\theta)^* p(\theta) d\theta \quad (4)$$

这里  $p(\theta)$  是随机信号的概率密度函数。

高乙月: 硕士研究生

基金项目:江苏省高校自然科学指导性

计划项目(NO. 05KJD510122)

通过一系列计算得

$$\operatorname{Re}[\rho(m, n)] = J_0(Z_c) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(Z_c) \cos(2k(\phi + \gamma)) \sin c(2k\Delta) \quad (5)$$

$$\operatorname{Im}[\rho(m, n)] = 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(Z_c) \sin((2k+1)(\phi + \gamma)) \sin c((2k+1)\Delta) \quad (6)$$

$$Z_c = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \quad (7)$$

方程(7)中

$$Z_1 = 2\pi \frac{R}{\lambda} [\cos(\psi_m) - \cos(\psi_n)], \quad Z_2 = 2\pi \frac{R}{\lambda} [\sin(\psi_m) - \sin(\psi_n)]$$

方程(5)与方程(6)中,  $\sin(\gamma) = Z_1/Z_c$ ,  $\cos(\gamma) = Z_2/Z_c$ 。

当 $\Delta$ 较小时,  $\sin(z\Delta) \approx z$ ,  $\cos(z\Delta) \approx 1$ 。从而得出均匀角能量分布 $\rho(m, n)$ 的近似方程:

$$\rho(m, n) = e^{-Z_c \sin(\phi + \gamma)} \sin c[Z_c \Delta \cos(\phi + \gamma)] \quad (8)$$

当角能量分布是高斯分布时, 圆形天线阵的相关函数 $\rho(m, n)$ 的实部与虚部写为

$$\operatorname{Re}[\rho(m, n)] = \frac{k}{\sqrt{\pi}} \frac{\frac{\pi}{\sigma}}{\sqrt{2\sigma}} e^{-y^2} \left[ J_0(z_c) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z_c) \cos(2k(\gamma + \sqrt{2\sigma}\phi + \phi)) \right] dy \quad (9)$$

$$\operatorname{Im}[\rho(m, n)] = \frac{k}{\sqrt{\pi}} \frac{\frac{\pi}{\sigma}}{\sqrt{2\sigma}} e^{-y^2} \left[ 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z_c) \sin((2k+1)(\gamma + \sqrt{2\sigma}\phi + \phi)) \right] dy \quad (10)$$

$\sigma$ 较小时,  $\sin(z\sigma) \approx z\sigma$ ,  $\cos(z\sigma) \approx 1$ , 从而得出高斯角能量分布 $\rho(m, n)$ 近似方程:

$$\rho(m, n) \approx k e^{-jZ_c \sin(\gamma + \phi)} e^{-\frac{(Z_c \sigma \cos(\gamma + \phi))^2}{2}} \quad (11)$$

### 3 仿真与分析

估计第1个元素与第4个间的空间相关性,  $|\rho(1, 4)|$ 有不同的人射角 $\Phi$ 。

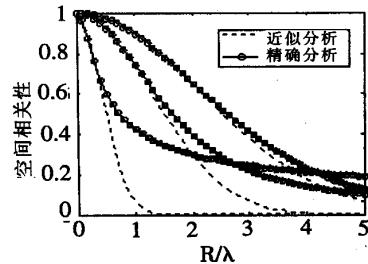


图2 高斯分布 $\Psi_1=0^\circ, \Psi_4=135^\circ, \phi=0^\circ$ 时

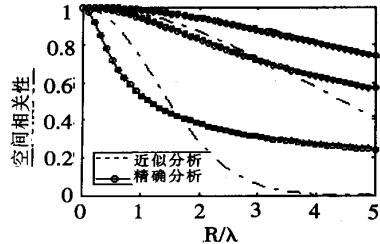


图3 高斯分布 $\Psi_1=0^\circ, \Psi_4=135^\circ, \phi=30^\circ$ 时

图2和图3中, 空间相关性系数为纵坐标,  $R/\lambda$ 为横坐标, 曲线由右向左依次为 $\sigma=6^\circ, \sigma=10^\circ, \sigma=30^\circ$ , 信号是高斯角能量分布。如图, 相关性随 $R$ 的增大而减小。 $\sigma$ 增大, 相关性减小。方程9与方程10得出精确分析的结果, 方程11得出近似分析的结果。当 $\phi=0^\circ$ 时, 在 $\sigma < 6^\circ, R/\lambda < 2.5$ 下, 近似分析能很好地符合精确分析。 $\phi=30^\circ$ 时, 当 $\sigma < 10^\circ$ , 近似分析能较好地符合精确分析。比较图2与图3,  $\Phi$ 增大时, 一致性更适用于 $\sigma$ 较小时。

图4与图5给出了均匀角能量分布下, 入射角为 $\phi=0^\circ$ 和 $\phi=30^\circ$ 时的精确分析与近似分析的相关结果, 曲线由右向左依

次为 $\Delta=6^\circ, \Delta=10^\circ, \Delta=30^\circ$ 。当 $\phi=0^\circ$ 时, 在 $\Delta < 6^\circ, R/\lambda < 1.5$ 下, 近似分析能很好地符合精确分析。当时 $\phi=30^\circ$ , 在 $\sigma < 6^\circ, R/\lambda < 3.6$ 下, 近似分析才能较好地符合精确分析。比较图4与图5, 同样可得出当 $\Phi$ 增大时一致性更适用于 $\Delta$ 较小时。

比较不同入射角 $\Phi$ 时的高斯分布与均匀分布, 在主场区, 高斯分布下降得更慢, 而且缺少次级相关峰。

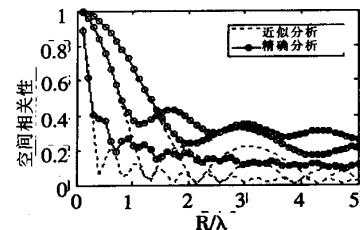


图4 均匀分布 $\Psi_1=0^\circ, \Psi_4=135^\circ, \phi=0^\circ$ 时

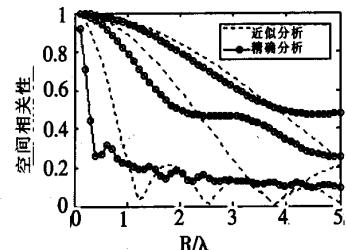


图5 均匀分布 $\Psi_1=0^\circ, \Psi_4=135^\circ, \phi=30^\circ$ 时

### 4 结论

本文提出了两个MIMO系统的相关性模型。该模型是在高斯角能量分布与均匀角能量分布的基础上提出的, 并适用于圆形天线阵。使用数学分析以及贝塞尔函数, 得到了相关函数的近似模型。仿真分析表明, 这些近似方程十分适应于入射角一定时,  $\Delta < 10^\circ$ 以及 $\sigma < 10^\circ$ 的情况。近似模型同精确模型相比, 可以降低运算复杂性, 节省运算时间。设计精密天线系统时, 这些结果起重要的作用。

本文作者创新点: 本文在基于圆形天线阵的基础上提出了两个MIMO系统的相关性模型, 此模型也可以应用于非均匀结构的研究。近似模型同精确模型相比, 可以降低运算复杂性, 节省运算时间。设计精密天线系统时, 这些结果起重要的作用。

项目产生的经济效益: 近似模型同精确模型相比, 可以降低运算复杂性, 节省运算时间。研究方法: 使用数学分析以及Mat lab仿真。

### 参考文献

- [1] 赵亚男, 张禄林, 吴伟陵. MIMO技术的发展与应用[J]. 电讯技术, 2005(1):7-11.
- [2] 刘文珂, 金梁. 基于前后相关阵的CDMA信号DOA估计及DSP实现[J]. 微计算机信息, 2005, 10-2:68-69.
- [3] R. W. Heath, A. J. Paulraj. Characterization of MIMO channels for spatial multiplexing systems[J]. IEEE International Conference on Communications, 2000 Jun. vol. 2, 591-595.
- [4] Fletcher P N, Danwood P. Beam forming for circular and semicircular array antennas for low-cost wireless LAN data

communication systems [J]. IEE Proc -Micro Antennas Proper 1998, 145(2): 153-157.

[5]Salonen, I., Toropainen, A., and Vainikainen, P..Linear pattern correction in a small micro strip antenna array [J]. IEEE Trans. Antennas Propag, 2004, 52, (2), 578 - 586.

[6]Zhou Jie, H.Kzhchit, Khhizawat. Generalized Spatial Correlation Equations for Antenna Arrays in Wireless Diversity Reception Exact and Approximate Analyses[J]. IEICE Transations on Communications Vol.E87-B No.1 2004:204-208.

**作者简介:**高乙月,女,1983年,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为MIMO系统及天线;周杰,男,1964年,四川成都人,教授,博士后,研究方向为信号处理及其在移动通信中应用研究、阵列天线;姚克友,男,1984年,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为信号分离与网络优化。

**Biography:**Gao Yiyue (1983-), Female, Han, Jiangsu Province, Electronic&Information Engineering College, Nanjing University of Information Science & Technology, graduated student, Research field: MIMO system and antenna design

(210000 江苏 江苏省南京信息工程大学)高乙月 周杰

姚克友

通讯地址:(210000 江苏 江苏省南京信息工程大学 602 信箱)高乙月

(收稿日期:2007.8.13)(修稿日期:2007.10.15)

**(上接第 196 页)**

参考文献:

[1]段慧达,王建南,白晶..基于动态对角递归网络的变压器故障诊断.[J].微计算机信息,2006,11-1:6-7

[2]朱伟江,陈刚,刘明. 2002 年国家电网安全运行情况分析.中国电力,2003,36(5):11-15.

[3]周琳,陈刚,朱伟江,等. 2003 年国家电网安全运行情况分析.中国电力,2004,37(5):39~42.

[4]胡超凡,陈刚,赵玉柱. 2004 年国家电网安全运行情况分析.中国电力,2005,38(5):9~12.

[5]胡超凡,陈刚,朱伟江,等.2005 年国家电网安全运行情况分析.中国电力,2006,39(5):1~4.

**作者简介:**张 静(1972-),女(汉族),宁夏人,北京科技大学博士研究生,高级工程师,研究方向为安全技术及工程、电力安全。

**Biography:**Zhang,jing (born in 1972 - ),female, the Han nationality, Ningxia man doctor of University of Science and Technology Beijing, senior engineer, majored in safety technology and engineering、electric power safety

(100083 北京 北京科技大学)张静 宋存义 谢振华

(100044 北京 中国华电工程(集团)有限公司)白建明

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)Zhang Jing Song CunYi Xie ZhenHua

(China Huadian Engineer Co.,LTD, Beijing 100044)Bai JianMing

通讯地址:(100044 北京 海淀区西三环北路 91 号南门中国华

电工程(集团)有限公司物料部)白建明

(收稿日期:2007.8.23)(修稿日期:2007.10.25)

**(上接第 198 页)**

参考文献

[1]王恩哥. 薄膜生长中的表面动力学[J]. 物理学进展 2003.3, Vol. 23.No.1: 1-61.

[2]李美亚.脉冲激光制膜新技术及其在功能薄膜研究中的应用[J]. 功能材料.1998.29(2):133-135.

[3]叶健松,胡晓军.超薄膜外延生长的 Monte Carlo 模拟[J].物理学报. 2002.5; 1108-1111.

[4]徐国政,陈勇.基于 Matlab/xPCTarget 的数据采集系统[J].微计算机信息,2005,21(1):63-65.

[5]陈光华等. 薄膜生长的理论模型与 Monte Carlo 模拟[J]. 物理学报. 2000.11:2225-2229.

[6]张庆瑜.载能粒子沉积薄膜生长的微观机制研究.大连理工大学学报[J].1999.11.Vol39.No.6.731-735.

[7]D.罗伯.《计算材料学》[M].(项金钟,吴兴惠译).北京.化学工业出版社.2002.9.59-135.

[8]吴自勤,王兵.《薄膜生长》[M].北京.科学出版社.2003.7:47-319.

**作者简介:**崔海涛(1981-),男,山东青岛人,硕士生,主要从事激光制备薄膜材料研究;王永仓(1958-),男,陕西宝鸡人,教授,主要从事激光制备 CMR 薄膜材料研究。

**Biography:**Cui Haitao (1981 - ) ,male, Qindao Shandong province, master, study on the growth of thin films produced by laser; Wang Yongcang (1958 - ),male, Baoji Shaanxi province, professor, study on the CMR materials produced by laser; Duan Zhangshan(1979-), male, Heze Shandong province, doctor, study on the Left Hand Material.

(710051 陕西西安 空军工程大学理学院)崔海涛 王永仓 段章山  
(The Science Institute , Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)Cui Haitao Wang Yongcang

Duan Zhangshan

通讯地址:(710051 陕西 陕西省西安市长乐东路甲字 1 号空军工程大学理学院研究生 1 队)崔海涛

(收稿日期:2007.8.13)(修稿日期:2007.10.15)

书 讯

《PLC 应用 200 例》

110 元 / 本(免邮资)汇至

《嵌入式系统应用精选 200 例》

110 元 / 本(免邮资)汇至

地址:北京海淀区皂君庙 14 号院鑫雅苑 6 号楼 601 室

微计算机信息杂志收 邮编:100081

电话:010-62132436 010-62192616 (T/F)

## 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>