

# MIMO 系统中双极化天线抗极化失配性能分析

马 优 陈小平 周玉龙

(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 610054)

**摘 要:** 本文对采用双极化与单极化天线下的 MIMO 无线信道容量进行了分析比较。结论表明, 单极化天线下 MIMO 信道容量受交叉极化鉴别和交叉极化耦合等极化域因素影响很大, 而双极化天线具有很强的抗极化失配性能, 系统容量具有更好的稳定性。

**关键词:** MIMO; 双极化; 极化耦合; 信道容量

## The performance of using dual-polarized antennas in MIMO system

You Ma Xiaoping Chen Yulong Zhou

(Research Institute of Electronic Science and Technology University of Electronic Science and Technology of China.

Sichuan Chengdu 610054 China)

**Abstract:** This paper analyzed the capacity of MIMO channel with single-polarized and dual-polarized antennas respectively. The result shows that, the capacity of MIMO system with single-polarized antennas is influenced greatly by the polarization factors such as cross-polarization discrimination and cross-polarization coupling. Dual-polarized antenna system can effectively reduce the influence of polarization, and the capacity of MIMO system is much more stable.

**Keywords:** MIMO; dual-polarization; polarity inversion; capacity

### 1 引言

多入多出 (MIMO) 无线通信技术是指发射端与接收端同时采用多根天线, 进行空时联合处理的无线通信技术。作为新一代移动通信中的关键技术, 它在提高无线通信系统容量与可靠性方面显示出了巨大的优势。借助于充分散射的传播环境, MIMO 系统能建立起并行的传输子信道, 在不增加系统带宽与发射功率的前提下, 能成倍地提高通信系统容量与可靠性。

MIMO 系统的性能受传输环境影响很大, 充分散射的传播环境有助于 MIMO 系统建立起并行的传输子信道。同时, 散射环境也会带来一定的负面因素, 其中之一就是极化失配问题。对于某极化方向的电磁波, 经过反射、折射及散射等作用后, 电磁能量的极化方向会向其正交极化方向转变, 即发生极化耦合, 恶劣情况下接收端无法接收到这些能量, 出现极化失配。本文综合考虑交叉极化鉴别和交叉极化耦合的影响, 简单表示为极化失配度。

本文前两部分建立了单极化和双极化天线下 MIMO 系统受极化域因素影响的信道模型。

第三部分研究了 MIMO 系统的信道容量, 给出了推导过程。第四部分进行了仿真, 对两种天线形式下的系统容量做出评估。

### 2 单极化天线下 MIMO 信道模型

为方便起见, 我们采用 2 发 2 收的 MIMO 传输系统。首先考虑发射端与接收端均采用同一方向的单极化天线, 不妨假定为水平极化天线。其信道结构如图 1 所示。

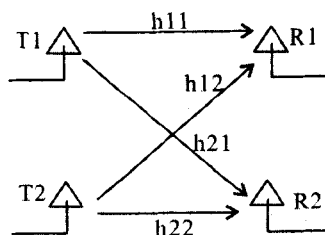


图 1 2×2MIMO 信道模型

我们假设有经典的独立同分布 (I.I.D) 信道  $H_w$ , 其数学模型为<sup>[1]</sup>:

$$H_w = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $h_{ij}$  表示第  $j$  根发射天线到第  $i$  根接收天线的信道衰落系数。信道矩阵  $H_w$  中各元素  $h_{ij}$  为单位方差独立零均值循环对称复高斯随机变量。 $h_{ij}$  的包络服从 Rayleigh 分布, 相位服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布, 其衰落系数具有如下统计特性:

$$E\{h_{ij}\} = 0 \quad (2)$$

$$E\{|h_{ij}|\} = 1 \quad (3)$$

$$E\{h_{ij}h_{mn}^*\} = 0 \quad i \neq m \text{ 或 } j \neq n \quad (4)$$

先考虑理想单极化天线信道模型, 电磁波在传播过程中极化方向不发生改变。为了集中考虑极化失配度的影响, 假设无极因素影响的环境, 单极化天线下的 MIMO 信道矩阵  $H$  满足条件:

$$H = H_w \quad (5)$$

考虑极化域因素的影响, 信道模型随之改变。假设发射功率为  $P_t$ , 同极化方向上的接收功率为  $P_r$ , 参考极化鉴别度, 定义极化失配度  $\alpha$  为

$$\alpha = 1 - \frac{P_r}{P_t} \quad (6)$$

极化失配度表明了电磁能量在极化域损失的比率, 受交叉极化鉴别和交叉极化耦合的影响。极化失配度越大, 接收到信号能量将越小, 信道容量也会变小。对于  $2 \times 2$  的 MIMO 信道, 设定极化失配矩阵为  $X$ , 则:

$$X = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \\ \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{bmatrix} \quad (7)$$

参考极化因素影响下的 MIMO 信道模型<sup>[1]</sup>, 存在极化耦合的单极化天线 MIMO 信道模型为

$$H = X \odot H_w \quad (8)$$

其中,  $\odot$  表示 Hadamard 乘积运算

$$(H_{ij} = X_{ij} \times H_{wij}).$$

进一步考虑实际环境中的 MIMO 信道, 即对空间相关性的影响加以考虑。单极化天线阵元间的空间相关性与阵元距离有关, 当阵元间距足够大时, 能实现阵元间的解相关。但阵元间距往往不可能取得很大, 相关性的存在将导致系统容量的下降。

设  $R_r$  和  $R_t$  分别表示接收端与发射端天线阵元间的功率相关矩阵,

$$R_r = \begin{bmatrix} 1 & \rho_r \\ \rho_r & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_t = \begin{bmatrix} 1 & \rho_t \\ \rho_t & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $\rho_r$  和  $\rho_t$  分别表示接受端与发射端阵元间的功率相关系数。则, 不考虑极化耦合的相关信道模型<sup>[2]</sup>可建立如下:

$$H = R_r^{\frac{1}{2}} H_w R_t^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$R^{\frac{1}{2}}$  由公式  $R = R^{\frac{T}{2}} R^{\frac{1}{2}}$  得到。引入极化域因素的影响, 单极化 MIMO 信道模型为

$$H = X \odot R_r^{\frac{1}{2}} H_w R_t^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

### 3 双极化天线信道模型

仍然考虑 2 发 2 收的 MIMO 系统, 收发两端均采用双极化天线, 假设为  $\pm 45^\circ$  的双极化天线, 其信道结构如图所示:



图2 采用双极化天线 MIMO 信道模型

假设发射天线  $T_1$  发射的信号功率为  $P_t$ , 则极化方向与其正交的接收天线  $R_2$  上接收到的功率:

$$P_r = \alpha P_t \quad (13)$$

$\alpha$  为交叉极化鉴别及交叉极化耦合等极化域因素引起的极化失配度。其极化失配矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\alpha} & \sqrt{\alpha} \\ \sqrt{\alpha} & \sqrt{1-\alpha} \end{bmatrix} \quad (14)$$

不考虑空间相关性的双极化天线 MIMO 信道模型同样可按式 (8) 建立:

$$H = X \odot H_w \quad (15)$$

另外有研究表明, 两正交极化的天线间具有很小的空间相关性。我们近似认为实际环境

中的双极化天线 MIMO 信道模型与式中的模型相同。

#### 4 MIMO 无线信道容量

传统的单天线发-单天线收 (SISO) 无线通信系统容量由 Shannon 公式给出

$$C = \log(1 + \frac{|h|^2 P}{\sigma^2}) \quad (16)$$

其中,  $P$ ,  $\sigma^2$ ,  $h$  分别代表信号发射功率、接收端噪声功率以及信道衰落系数。系统容量  $C$  为对信道带宽归一化的值, 即频带利用率, 单位 bit/s/Hz。SISO 系统容量受到发射功率的约束, 无法突破 Shannon 容量定理的限制。

MIMO 传输技术借助于多径传输环境, 能建立起并行传输子信道, 成倍提高系统容量<sup>[3][4]</sup>。对于广义平稳非相关散射信道 (WSSUS),  $t$  发  $r$  收的 MIMO 系统具有如下的信号模型:

$$y = Hx + n \quad (17)$$

其中,  $x$ 、 $y$  和  $n$  分别为发射信号矢量、接收信号矢量及加性高斯白噪声。对  $H$  进行奇异值分解<sup>[3]</sup>

$$H = UDV^H \quad (18)$$

$U \in C^{r \times r}$ ,  $V \in C^{t \times t}$ , 二者均为酉矩阵,

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \sigma_k & \\ 0 & & & \ddots \\ & & & & 0 \end{bmatrix}_{r \times t} \quad (19)$$

$\sigma_i$  为  $H$  的奇异值。 $k$  为  $H$  的秩,  $k \leq \min(r, t)$ 。 $\sigma_i = \lambda_i^{\frac{1}{2}}$ , 其中  $\lambda_i$  为  $HH^H$  的非零特征值。将 (18) 代入 (17), 则有

$$y = UDV^H x + n \quad (20)$$

$$U^H y = DV^H x + U^H n \quad (21)$$

令  $\tilde{y} = U^H y$ ,  $\tilde{x} = V^H x$ ,  $\tilde{n} = U^H n$ , 则有

$$\tilde{y} = D\tilde{x} + \tilde{n} \quad (22)$$

$U$  为酉矩阵, 因此,  $\tilde{n}$  与  $n$  具有相同的分布。

$$\tilde{y}_i = \lambda_i^{\frac{1}{2}} \tilde{x}_i + \tilde{n}_i, \quad 1 \leq i \leq \min\{r, t\} \quad (23)$$

因此, 可以将 MIMO 信道等效为  $k$  个平行

子信道, 每个子信道的容量可由 Shannon 公式给出, 总的信道容量为各个子信道容量之和。假设发射端不知道信道矩阵信息, 发射功率在每根天线上平均分配, 其信道容量表示如下:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^k \log(1 + \frac{P}{\sigma^2 t} \lambda_i) \\ &= \log \prod_{i=1}^k (1 + \frac{P}{\sigma^2 t} \lambda_i) \\ &= \log[\det(I_m + \frac{P}{\sigma^2 t} W)] \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $m$  为信道矩阵  $H$  的秩,  $m \leq \min(r, t)$ , 其中  $I_m$  表示  $m$  维的单位矩阵;  $[\cdot]^H$  为共轭转置运算。

$$W = \begin{cases} HH^H & r > t \\ H^H H & r < t \end{cases} \quad (25)$$

MIMO 信道  $H$  为随机矩阵, 因此, 其信道容量也是随机变量, 一般采用平均信道容量来评估其信道容量:

$$C = E \left\{ \log[\det(I_m + \frac{P}{\sigma^2 t} W)] \right\} \quad (26)$$

#### 5 仿真结果与分析

对单极化和双极化天线下的 MIMO 信道容量进行仿真, MIMO 系统收发端均采用 2 天线阵元, 信噪比选择 15db, 接收端与发射端天线阵元间的相关系数假定为  $\rho_r = 0.7$ ,  $\rho_t = 0.4$ , 仿真结果如图 3 所示。

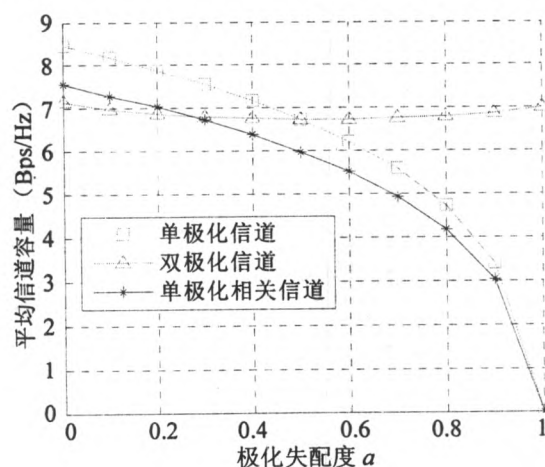


图3 各信道模型下容量比较

仿真结果表明, 单极化天线下, MIMO 系统容量随极化失配度的增加急剧下降。在现实通信环境中, 极化方向很可能因各种反射或散射现象而发生转变, 接收端无法接收正交极化

方向的来波, 导致能量的损失。恶劣情况下, 当完全极化失配时, 系统无法接收发射信号, 容量降为零。采用双极化天线很好地解决了这一问题, 仿真曲线表明, 随着极化失配度的变化, 双极化天线下的系统容量具有很好的稳定度。同时仿真曲线也反映出了空间相关性对系统容量的影响, 单极化天线下, 阵元之间具有较强的相关性, 需要靠增大阵元间距来降低相关性。双极化天线间具有较低的相关性, 可以有效地降低相关性对系统容量的影响。

## 6 结论

由于交叉极化鉴别和交叉极化耦合等极化域因素的存在, 接收端将出现一定程度的极化失配。MIMO 系统中, 单极化天线下的系统容量随极化失配度的增加急剧下降。本文分析验证表明采用双极化天线能很好地解决极化失配的问题, 增大系统容量的稳定度。

## 参考文献

- [1] Arogyaswami Paulraj 等著. 空时无线通信导论. 李少谦等译. 北京: 清华大学出版社, 2007
- [2] K. I. Pedersen, J. B. Andersen, J. P. Kermoal, and P. Mogensen, A stochastic multiple-input-multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms,"in Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference.Fall, 2000, vol. 2, 893~897
- [3] I.E.Telatar, Capacity of multi-antenna Gaussian channels.Technical report AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum, 1995
- [4] G.J.Foschini and M.J.Gans, Capacity when Using Diversity At Transmit And Teceive Sites and The Rayleigh-Faded Matrix Channel is Unknown At The Transmitter, WINLAB Workshop on Wireless Information Network, March 20~21, New Brunswick, NJ
- [5] Ludwig A, The definition of cross polarization, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1973, Vol.21, Issue 1,:116~119
- [6] Mitsui T, Otani M, Eugene.C.H.Y, et al, Indoor MIMO channel measurements for evaluation of effectiveness of array antenna configurations, Vehicular Technology Conference, IEEE 58th,2003,Vol.1,84~88

## 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](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>