

不同天线相关分布特性下的 MIMO 容量性能分析

李英梅 邵玉斌 王纯

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650051)

摘要 研究了在无线 MIMO(Multiple - Input Multiple - Output)系统中, 天线的相关性对系统容量性能的影响。建立了相关天线 MIMO 系统仿真模型, 给出了相关系数并推导了相关信道容量的表达式, 用 Monte Carlo 法仿真了天线角度扩展分别为高斯分布和均匀分布 2 种情况, 对比分析了信道容量与天线角度扩展以及扩展分布特征之间的关系, 为实际的 MIMO 系统设计提供参考。

关键词 MIMO; 信道相关性; 系统容量

【中图分类号】TN915

【文献标识码】A

【文章编号】1672—8513(2007)03—0277—04

Performance of the MIMO Capacity with the Different Antenna Distribution Characteristic

Li Yingmei Shao Yubin Wang Chun

(Faculty of Information and Automation, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650051, China)

Abstract: This paper studies the wireless MIMO system and the effect of antenna correlation on the performance of system capacity. First, the MIMO system model with antenna correlation is introduced, the correlation parameter is given and the expression of correlate channel capacity is deducted. Second, by using Monte Carlo method, we simulate the relationship of channel capacity and antenna angle expansions under the condition of the Gaussian distribution and uniform distribution respectively. It provides a reference for the design of MIMO system with effect of correlation.

Key words: MIMO; correlation; system capacity

0 引言

MIMO 技术通过空间复用能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率^[1], 为无线移动通信提供了更高的传输速率和可靠性。该技术已成为 B3G/4G 与新一代无线通信系统的关键技术之一^[2]。

MIMO 系统在发射端和接收端均采用多个天线(或阵列天线)发射和接收信号, 利用多天线来抑制信道衰落, 从而显著提高无线 MIMO 系统的容量和频谱利用率。但在实际的无线移动通信系统中, 多天线间存在的相关性将会严重影响无线 MIMO 系统的容量和频谱利用率^[3]。为了能在复杂的无线通信

环境中充分发挥 MIMO 系统的优越性, 有必要研究相关性对系统性能的影响。本文建立了相关天线 MIMO 系统的模型, 给出了天线的相关系数并推导了相关信道容量的表达式, 在此基础上用 Monte Carlo 法仿真了相关瑞利衰落信道的 MIMO 系统在角度扩展分别为高斯分布和均匀分布时的容量性能曲线。这些容量性能曲线包括容量的补充累积分布函数(ccdf)曲线和平均容量曲线。

1 相关天线 MIMO 系统的模型^[4]

考虑一个有 n_T 根发射天线和 n_R 根接收天线的线性阵列 MIMO 信道, 其天线阵列规则排列并且方位角为 $\pi/2$, 相关天线 MIMO 系统的模型如图 1 所

* 收稿日期: 2006-12-26。

作者简介: 李英梅(1982~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动通信、个人通信和无线通信。

通讯作者: 邵玉斌(1970~), 男, 副教授, 主要研究方向: 移动通信、个人通信和护频通信。

示. 其中发射天线和接收天线的间距分别为 d_t 和 d_r , 假设发射天线和接收天线之间的距离远远大于 d_t 或 d_r . 接收天线周围布满散射体, 传输信号被散射体反射, 从散射体到接收天线的信号的平面波达方向为 α , 接收天线的角度扩展 α_r .

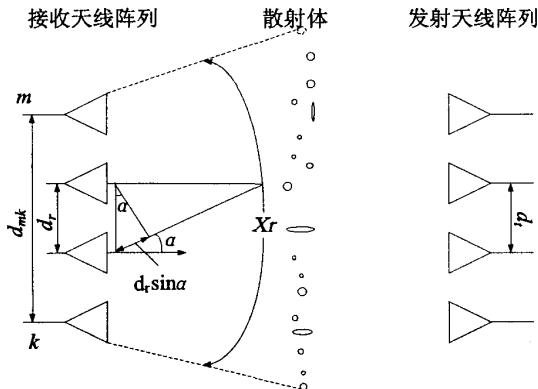


图1 相关天线MIMO系统的模型

2 相关系数

由于收发天线距离远远大于天线间距, 故可设接收天线之间的相关性不依赖发射天线, 发射天线的相关性也不依赖接收天线. 在图1的MIMO系统模型下, 相关系数由天线间距 d_{mk} 、天线的角度扩展 α 、波达方向的概率密度函数 $p(\alpha)$ 共同决定. 天线 m 和天线 k (距离为 d_{mk}) 的相关系数为^[4]

$$\theta_{mk} = \begin{cases} \int_{-\alpha_r/2}^{\alpha_r/2} e^{-\mu \pi \frac{d_{mk}}{\lambda}} p(\alpha) d\alpha, & m \neq k, \\ 1, & m = k, \end{cases} \quad (1)$$

根据信道散射环境和天线位置不同, 可设波达方向 α 服从均匀分布或高斯分布. 如果波达方向服从均匀分布, 则波达方向的概率密度函数 $p(\alpha)$ 为:

$$p(\alpha) = \frac{1}{\alpha_r}, \quad -\pi \leq \alpha_r \leq \pi. \quad (2)$$

均值为零、标准方差为 σ 的高斯分布波达方向的概率分布函数 $p(\alpha)$ 由(3)式近似给出

$$p(\alpha) \approx \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}}, & -\pi \leq \alpha \leq \pi, \\ 0, & |\alpha| > \pi, \end{cases} \quad (3)$$

为了在波达方向均匀分布和高斯分布2种条件下得到相同的均方根(rms), (3)式中的标准差 σ 按 $\sigma = \alpha_r k$ 计算, 其中 $k = 1/2\sqrt{3}$ ^[3].

3 相关 MIMO 衰落信道容量

对于天线间无相关性的 MIMO 系统, 假定有 n_T

根发射天线和 n_R 根接收天线, 则可以用 $n_R \times n_T$ 的复矩阵 H 描述信道. 其元素 h_{ij} 代表从第 i 根接收天线到 j 根发射天线之间的信道衰落系数. 由于多径传播的存在, 一种比较接近实际情况的假设是: 信道传输矩阵 H 的元素 h_{ij} 为独立复高斯随机变量, $h_{ij} = (z_1 + jz_2)/\sigma_r$, 其中 h_{ij} 的实部 z_1 和虚部 z_2 是独立同分布零均值高斯随机变量, 且实部和虚部的方差相等, 均为 $\sigma_r^2 = 1/2$, 信道传输矩阵的元素的幅度 $z = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$ 服从瑞利分布. 具有这种信道传输矩阵的信道称为瑞利衰落信道.

定义 $m = \min(n_R, n_T)$, 具有信道传输矩阵 H 的 MIMO 通信系统, 单位带宽的信道容量公式可以写为^[4]

$$C = \log_2 \det \left(I_m + \frac{P}{n_T \sigma_r^2} Q \right). \quad (4)$$

其中, I_m 为 m 维单位矩阵, \det 表示求方阵行列式的值, P/σ_r^2 是信噪比, Q 是威沙特矩阵, 定义为

$$Q = \begin{cases} HH^H, & n_R < n_T, \\ H^H H, & n_R \geq n_T. \end{cases} \quad (5)$$

式中 H^H 表示矩阵 H 的共轭转置.

以上考虑的是天线间没有相关性时的容量, 但在实际情况下, 被两根接收天线接收的信号普遍存在相关性^[5,6]. 定义 $n_R \times n_R$ 维接收天线相关矩阵 Θ_R , $n_T \times n_T$ 维发射天线相关矩阵 Θ_T , 相关矩阵的元素 θ_{mk} 表示天线 m 和天线 k 的相关系数由式(1)给出. Θ 和 Θ 作 Cholesky 分解得出:

$$\Theta_R = K_R K_R^H, \quad (6)$$

$$\Theta_T = K_T K_T^H. \quad (7)$$

K_R 和 K_T 是下三角矩阵, K_R^H 和 K_T^H 是上三角矩阵, 相关信道矩阵可分解为相关部分和去相关部分的乘积

$$H_C = K_R H K_T^H. \quad (8)$$

假设, 相关 MIMO 衰落信道的单位带宽容量可以表示为

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_n + \frac{P}{n \sigma_r^2} H_C H_C^H \right) \right] =$$

$$\log_2 \left[\det \left(I_n + \frac{P}{n \sigma_r^2} K_R H K_T^H K_T H^H K_R^H \right) \right]. \quad (9)$$

利用恒等式

$$\det(I + AB) = \det(I + BA) \quad (10)$$

得到

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_n + \frac{P}{n \sigma_r^2} K_R H K_T^H K_T H^H K_R^H \right) \right] =$$

$$\log_2 \left[\det \left(I_n + \frac{P}{n \sigma_r^2} (K_R^H K_R) H (K_T^H K_T) H^H \right) \right]. \quad (11)$$

由于 H 是随机变量,(11) 式的容量 C 也是随机变量,定义补充累积分布函数(ccdf) $f(x)$ 为达到特定容量等级 n 的概率^[4],即 $f(x) = P(C > n)$ 。(11) 式表示的是瞬时容量,通过对所有信道矩阵的实现取平均得到平均信道容量.

4 仿真结果

我们将通过 Monte Carlo 法仿真相关瑞利衰落信道的 MIMO 系统在角度扩展分别为高斯分布和均匀分布时的容量性能,仿真结果是依据相应理论公式得到的. 假定信噪比 $P/\sigma^2 = 20$ dB,接收天线 $n_r = 4$ 和发射天线 $n_t = 4$,发射天线彼此不相关,即发射天线相关矩阵 $\Theta_T = I_4$,而接收天线彼此相关. 所有的仿真结果均是在 10 000 次信道实现下得出的. 仿真的流程图如图 2 所示.

图 3 展示了角度扩展 $\alpha_r = 5^\circ$ 时,接收天线间距 d_t 分别为 $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 5\lambda, 10\lambda$ 时的容量补充累积分布函数(ccdf)曲线,图 4 展示了天线间距 $d_t = 0.5\lambda$ 的情况下,角度扩展分别为 $1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ 时的容量的补充累积分布函数(ccdf)曲线. 综合图 3 与图 4 可知:天线间距或角度扩展增加时,波达方向为高斯分布和波达方向为均匀分布的相关瑞利

衰落信道的平均容量达到一个特定等级的概率都迅速增加,但均匀分布增加的速度更快. 也就是波达方向为均匀分布的天线对角度扩展和天线间距的变化更敏感. 那么波达方向为高斯分布时的通信可靠性比均匀分布的要好.

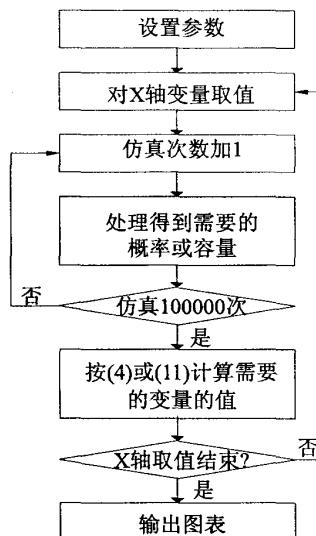


图2 仿真流程图

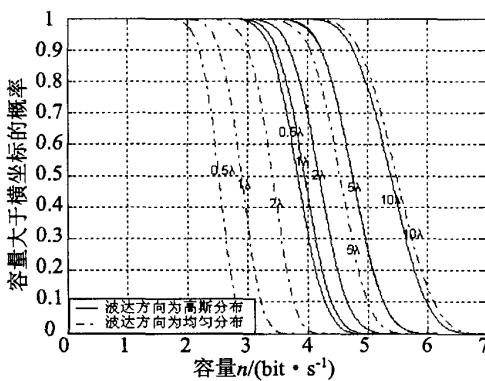


图3 对于相关瑞利衰落信道,当接收天线角度扩展为 5° 时,天线元素间距分别为 $0.5\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 5\lambda, 10\lambda$ 时的ccdf

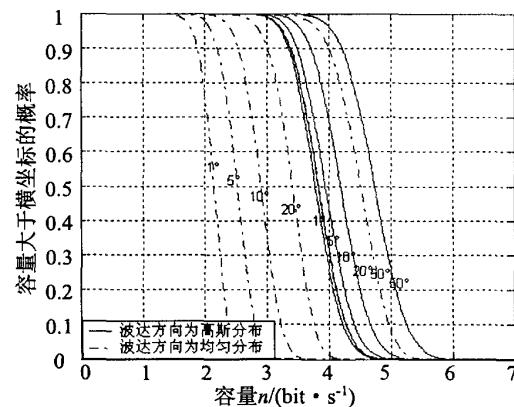


图4 对于相关瑞利衰落信道,当天线间距为 0.5λ 时,角度扩展分别为 $1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ 时的ccdf

由图 5 可以看到:对于相关瑞利衰落信道,在天线间距很小时,波达方向为高斯分布的平均容量远远大于波达方向是均匀分布的平均容量. 随着天线间距增加,两种分布的相关瑞利衰落信道的平均容量都增加,波达方向均匀分布的相关瑞利衰落信道的平均容量增加的快. 当角度扩展为 $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ 时,波达方向均匀分布的相关瑞利衰落信道的平均容量约分别在

$7.075\lambda, 3.495\lambda, 1.735\lambda, 0.725\lambda$ 处追上并超过高斯分布的,最终 2 种分布的相关瑞利衰落信道的平均容量先后达到相同的最大值. 此外,当 $\alpha_r > 5^\circ$ 且 $d_t > 12\lambda$ 时,2 种分布的相关瑞利衰落信道的平均容量都达到最大值,无论波达方向是高斯分布还是均匀分布,相关瑞利衰落信道的平均容量的最大值都等于无相关的瑞利信道平均容量.

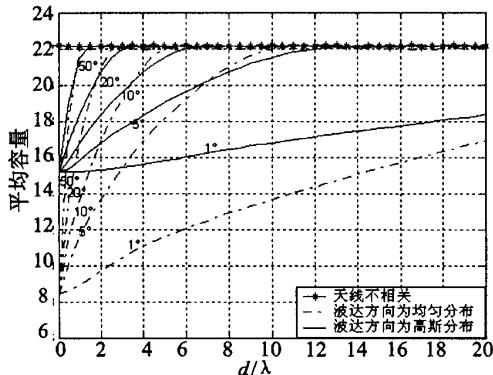


图5 对于相关瑞利衰落信道,以天线间距(波长倍数)为变量,角度扩展分别为 1° , 5° , 10° , 20° , 50° 时的系统平均容量

参考文献:

- [1] FOSCHINI G J, GANS M J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas [J]. *Wireless Personal Communications*, 1988, 6(3):311–335.
- [2] JACKS W C. *Microwave Mobile Communication* [M]. New York: Wiley Press, 1974.
- [3] CHIZHIK D, RASHID-FARROKHI F, LING J, et al. Effect of Antenna Separation on the Capacity of BLAST in Correlated Channels [J]. *IEEE Comm Lett*. 2000, 4(11):337–339.
- [4] BRANKA V, YUAN J. 空时编码技术 [M]. 王晓海, 黄开枝, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] HOTTINEN A, TIRKKONEN O, WICHMAN R. *Mult-antenna Transceiver Techniques for 3G and Beyond* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [6] SCHULZE H. Performance Analysis of Concatenated Space-time Coding with Two Transmit Antennas [J]. *IEEE Trans on Wireless Comm*, 2003, 2(4):669–679.

(责任编辑 高 飞)

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)，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>