

天线互耦对室内MIMO无线信道容量的影响

肖海林¹, 欧阳缮¹, 聂在平², 李忻²

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】考虑多天线间互耦, 建立了多天线系统等效网络模型, 导出通用耦合系数矩阵。应用互耦补偿方法拓展了室内多输入多输出(MIMO)无线衰落信道模型的研究, 数值分析了天线单元间的互耦对室内MIMO无线信道容量的影响。验证互耦对空域相关性无影响的条件, 计及互耦要比不计互耦对信道容量的影响要大, 但互耦导致的天线方向图畸变可能产生角度分集的效果, 从而降低信道的相关性并提高信道容量。

关键词 信道容量; 互耦; 多输入多输出; 空间相关性

中图分类号 TN911.2

文献标识码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.004

Effect of Mutual Coupling on the Capacity of Indoor MIMO Wireless Channels

XIAO Hai-lin¹, OUYANG Shan¹, NIE Zai-ping², and LI Xin²

(1. College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology of China Guilin 541004;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Antenna mutual coupling (MC) is considered and the general coupling coefficients matrix from the equivalent network model of the multiple-antenna is obtained. Indoor multiple input multiple output (MIMO) wireless channel model is extended by using mutual coupling compensation method, and the effects of MC on the capacity of indoor MIMO channels are analyzed numerically. The conditions that MC has no effect on the spatial correlation are identified. Simulation results show that MC can cause the antenna pattern distortion which brings angel diversity and low correlation so as to improve channel capacity.

Key words channel capacity; mutual coupling; multiple input multiple output; spatial correlation

随着天线单元数目日益增加与天线系统持续小型化发展, 天线单元的间距不断减小^[1], 天线互耦逐渐成为影响MIMO无线信道性能的又一重要因素, 互耦会改变天线间的接收功率差以及接收信号的空域特性, 从而影响后端的空时处理算法, 其对MIMO信道的影响已不可忽略。文献[2]给出了互耦对MIMO无线信道的空域相关性及其容量的影响; 文献[3]报道了多元阵列天线的互耦对MIMO信道容量的影响; 文献[4]研究了互耦对MIMO通信系统的容量与空时处理的影响。这些研究都依靠冗长的数值模拟来分析天线单元间的互耦对空域相关性的影响, 所采用的信道模型都是基于独立同分布瑞利衰落信道模型, 并不具有普遍性和现实性^[5]。文献[6]

考虑真实的室内MIMO信道并辅佐实验来验证, 但忽略了因工程条件限制而带来天线单元间的互耦对室内MIMO信道容量的影响。

本文从工程的实际出发, 考虑多天线间互耦, 建立多天线系统等效网络模型, 导出通用耦合系数矩阵; 并应用互耦补偿技术拓展室内MIMO无线衰落信道模型的研究, 分析天线单元间的互耦对室内MIMO无线信道性能的影响。

1 信道模型

室内信道的散射体比较丰富, 来波到达角、角度扩展、角谱分布以及天线之间的间距与室外也不尽相同。考虑天线单元间互耦, 室内接收端多天线系统模型如图1所示。

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-09-17

基金项目: 国家“973”计划基金(2008CB317109); 广西科学基金(桂科自0991241); 国家自然科学基金(60572054)

作者简介: 肖海林(1976-), 博士, 副教授, 主要从事新一代无线通信系统MIMO信道建模、信道估计、信道编码及其链路算法方面的研究。

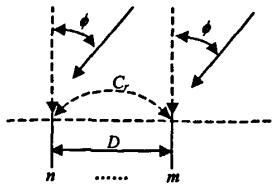


图1 系统模型

不考虑互耦的情况，室内接收端多天线接收信号可表示为：

$$\mathbf{r}(\phi) = \begin{bmatrix} \sum_k g_1(\phi_k) w_1(\phi_k) u(\phi_k) \sqrt{P(\phi)} \\ \sum_k g_2(\phi_k) w_2(\phi_k) u(\phi_k) \sqrt{P(\phi)} \\ \vdots \\ \sum_k g_n(\phi_k) w_n(\phi_k) u(\phi_k) \sqrt{P(\phi)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $u(\phi_k)$ 为单位阶跃函数，用来控制来波到达角（或去波角）； $w_i(\phi_k) = f_i(\phi_k) e^{j2\pi(n-m)d \sin(\phi_k)/\lambda}$ ，为操纵矩阵； $f_i(\phi_k)$ 为信号的幅度和相位， k 表示波束数目； d 表示相邻两天线之间的距离； $g_i(\phi_k)$ 为天线单元的方向图； $P(\phi)$ 为达波功率谱(PAS)。

定义任意两天线接收信号空域相关性为：

$$R = \frac{1}{\sqrt{P_m P_n}} \int r_m(\phi) r_n^*(\phi) P(\phi) d\phi \quad (2)$$

式中 P_m 和 P_n 为第 m 根天线和第 n 根天线接收信号的平均功率。

考虑互耦情况下，图1接收多天线系统的等效网络拓扑模型如图2所示^[7]。

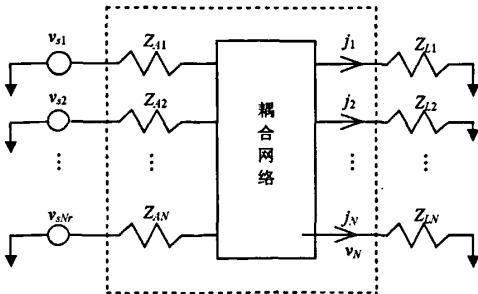


图2 接收多天线系统的等效网络模型

图中， $z_{l1}, z_{l2}, \dots, z_{LN}$ 为负载阻抗， $z_{41}, z_{42}, \dots, z_{AN}$ 为天线阻抗。达波对接收天线阵列的照射等效于外加信号源($v_{s1}, v_{s2}, \dots, v_{sN}$)分别作用于阵列天线单元。由于天线单元间距有限，其间的互耦影响不能忽略。其馈电点的信号电压、电流分别如图2所示。馈电点电压可表示为：

$$\begin{cases} v_i = -i_1 z_{11} - i_2 z_{12} - \dots - i_j z_{1j} - \dots - i_N z_{1N} + v_i^o \\ v_j = -i_1 z_{j1} - i_2 z_{j2} - \dots - i_j z_{jj} - \dots - i_N z_{jN} + v_j^o \\ v_N = -i_1 z_{N1} - i_2 z_{N2} - \dots - i_j z_{Nj} - \dots - i_N z_{NN} + v_N^o \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_j^o ($j=1, 2, \dots, N$) 为馈电点开路电压，即馈电点均开路时的电压。由电路理论可得：

$$v_j = i_j z_{lj} \quad j=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，得：

$$v^o = (I_N + z_L^{-1} z) v \quad (5)$$

式中 v^o 为馈电点开路电压向量； v 为馈电点电压向量； I_N 为 N 维单位矩阵； z 为互阻抗矩阵； z_L 为对角矩阵，其对角元素 $z_{11}, z_{22}, \dots, z_{NN}$ 为负载阻抗。接收信号电压向量为：

$$v_r = (I_N + z_L^{-1} z_A)^{-1} v^o \quad (6)$$

设 C_r 为天线单元间的耦合系数矩阵，再令：

$$v_r^c = C_r v_r^w \quad (7)$$

式中 v_r^c 为考虑互耦的接收信号电压向量； v_r^w 为：

$$v_r^w = (I_N + z_L^{-1} z_A)^{-1} v^o \quad (8)$$

式中 z_A 为对角矩阵，其对角元素为天线阻抗 $z_{A1}, z_{A2}, \dots, z_{AN}$ 。将 v_r^w 视为不计互耦下的接收信号电压向量，由式(6)得：

$$[C_r - (I_N + z_L^{-1} z)^{-1} (I_N + z_L^{-1} z_A)] v^o = 0 \quad (9)$$

解方程式(9)，可得耦合系数矩阵为：

$$C_r = \text{diag}(\text{Rand})(I_N + z_L^{-1} z)^{-1} (I_N + z_L^{-1} z_A) \quad (10)$$

式中 $\text{diag}(\text{Rand})$ 为随机对角矩阵。根据 Kronecker 积性质^[8-9]，推导出经互耦补偿后的收、发端相关矩阵分别为：

$$R_r^c = C_r R C_r^H \quad R_t^c = C_t^H R C_t \quad (11)$$

式中 C_r, C_t 分别为收、发端互耦矩阵，假设它们相同。

考虑天线单元间互耦影响，文献[6]非直射(NLOS)小尺度衰落的室内信道模型拓展为：

$$H^c = \frac{1}{\sqrt{S}} R_r^c G_r R_s^c G_t R_t^c \quad (12)$$

式中 G_r, G_t 分别为 $M \times S, S \times N$ 的独立同分布瑞利衰落矩阵； R_r^c, R_s^c, R_t^c 分别为考虑天线互耦接收端、发射端以及二次散射体的相关矩阵。由于室内人员的流动，散射体产生随机生灭的过程。假设室内是一个齐次生灭随机过程，即其有效散射体的增长与减少速率与时间无关，服从平稳分布^[10]， $S = \lambda / (\mu - \lambda)$ ($\mu \geq \lambda$)，其中， λ 为出生率， μ 为消亡率。室内无线传输除了NLOS外，还存在直射(LOS)

的情况, 信道容量依赖于信道矩阵的特征值分布, 为了确定LOS对它的影响, 本文采用文献[6]中的方案考察两种边界的情况: H^{pp} 秩1和满秩, 目的就是要在相同的条件下, 考察引入互耦对信道容量的影响。

为了简化和不失去一般性, 本文仅考虑室内小尺度衰落的情况, 综合考虑NLOS和LOS, 得到衰落的室内信道模型为:

$$H = aH^{\text{pp}} + bH^{\text{sc}} \quad (13)$$

式中 H^{pp} 和 H^{sc} 分别为信道矩阵的直射分量和散射分量; a 和 b 分别为直射分量和散射分量所占的比例, $a^2 + b^2 = 1$ ($a > 0, b > 0$)。

2 信道容量

假设发射机功率受限, 由于发射机不知道信道状态, 各天线功率均匀分配, 此时信道容量为^[11]:

$$C = \log_2 \det(I_M + \frac{\rho}{N} HH^H) \quad (14)$$

式中 I_M 为 $M \times M$ 维单位矩阵; ρ 为每个接收支路的平均信噪比; 上标 H 表示共轭转置。将式(13)代入式(14)中, 有:

$$C = \log_2 \det\left\{I_M + \frac{\rho}{N} \{b^2 H^{\text{sc}}(H^{\text{sc}})^H + ab[H^{\text{sc}}(H^{\text{pp}})^H + H^{\text{pp}}(H^{\text{sc}})^H] + a^2 H^{\text{pp}}(H^{\text{pp}})^H\}\right\} \quad (15)$$

3 数值模拟

信道容量是一个随机变化量, 迭代100 00次, 得到室内MIMO系统遍历容量的模拟结果, 信噪比为10 dB, 收发端天线的相关系数从文献[6]中得到, 天线阻抗 z_t 的计算将采用文献[12]的方法, z_t 为负载阻抗。设各天线单元的负载阻抗均为50 Ω, 收发两端采用偶极子均匀线阵, 具有相同的天线布局, 天线单元间距为 0.56λ 。(图形中标识有“忽略互耦”所对应的曲线就是文献[6]中的结果。)

图3和图4分别考虑有、无互耦, 直射矩阵分别为低秩和高秩, 信道容量累积分布函数与直射和散射所占比值的变化关系图。从图3和图4中看出, 当散射和直射同时存在, 散射所占的比例越大, 信道容量较大, 这是因为散射相当丰富, 减少了天线端口处信号的相似度, 从而降低信号的相关性。同时还可以看出, 考虑互耦补偿和文献[6]中忽略互耦的信道容量存在交点, 说明此时互耦对相关系数无影响, 但这只有在耦合系数 C 为纯虚数和文献[6]中忽略互耦时相关系数为实数时才成立^[12-13]。另外, 在相同条件下, 考虑互耦补偿要比文献[6]中忽略互耦对信道容量的影响大, 但互耦导致的天线方向图畸变可能产生角度分集的效果, 从而降低信道的相关性并提高信道容量。

变可能产生角度分集的效果, 从而降低信道的相关性并提高信道容量。

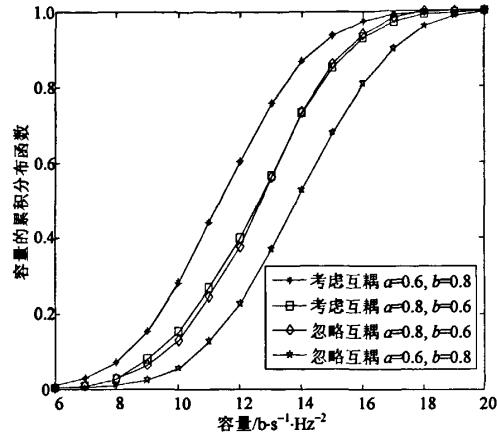


图3 天线数目3×3, H^{pp} 秩为1, 室内
MIMO信道容量累积分布曲线

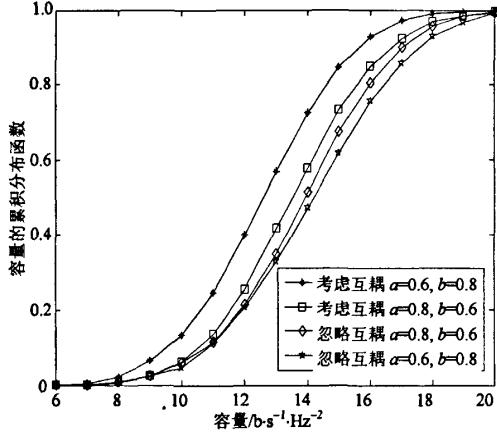


图4 天线数目3×3, H^{pp} 满秩, 室内
MIMO信道容量累积分布曲线

4 结 论

本文从工程的实际出发, 考虑多天线间互耦, 建立多天线系统等效网络模型, 导出通用耦合系数矩阵。应用互耦补偿技术拓展了室内MIMO无线衰落信道模型的研究, 分析了天线单元间的互耦对室内MIMO无线信道容量的影响。研究中发现验证互耦对空域相关性无影响的条件, 即互耦要比不计互耦对信道容量的影响要大, 但互耦导致的天线方向图畸变可能产生角度分集的效果, 从而降低信道的相关性并提高信道容量。

本文的研究工作得到了广西信息与通讯技术重点实验室课题(10903)的资助, 在此表示感谢!

(下转第587页)

- three-party pairing-based protocol for password authenticated key exchange[J]. Information Sciences, 2007, 177(6): 1364-1375.
- [11] LU Rong-xing, CAO Zhen-fu. Simple three-party key exchange protocol[J]. Computers Security, 2007, 26(1): 94-97.
- [12] ABDALLA M, POINTCHEVAL D. Simple password based encrypted key exchange protocols[C]/Proc of CT-RSA 2005, LNCS 3376. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 191-208.
- [13] CHUNG Hao-rung, KU Wei-chi. Three weaknesses in a

simple three-party key exchange protocol[J]. Information Sciences, 2008, 178(1): 220-229.

- [14] 张 靖. 协议入侵者攻击能力的统一建模[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(3): 617-620
- ZHANG Jing. Unified modeling of the intruder's attack ability based on the protocols[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(3): 617-620.

编 辑 熊思亮

(上接第495页)

参 考 文 献

- [1] YANG SHI-WEN, NIE ZAI-PING. A review of the four dimension antenna arrays[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 4(3): 193-201.
- [2] WALDSCHMIDT C, HAGEN J V, WIESBECK W. Influence and modelling of mutual coupling in MIMO and diversity systems[C]/Proc IEEE Antennas and Prop Soc Int Symp. San Antonio, Texas: IEEE, 2002.
- [3] FLETCHER P N, DEAN M, NIX A R. Mutual coupling in multi-element array antennas and its influence on MIMO channel capacity[J]. Electronics Letters, 2003, 39(4): 342-344.
- [4] CLERCKX B, VANHOENACKER J D, OESTGES C, et al. Mutual coupling effects on the channel capacity and the space-time processing of MIMO communication systems[C]/Proc IEEE Int Conf Commun (ICC '03). [S.I.]: IEEE, 2003.
- [5] 肖海林, 聂在平, 杨仕文. 表落信道下的多天线最佳信道容量研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 7(1): 11-13.
- XIAO Hai-lin, NIE Zai-ping, YANG Shi-wen. Optimize the capacity of multi-antenna in fading channels [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 11-13.
- [6] 肖海林, 聂在平, 杨仕文. 室内MIMO无线信道: 模型和性能预测[J]. 电波科学学报, 2007, 27(3): 385-389.
- XIAO Hai-lin, NIE Zai-ping, YANG Shi-wen. Indoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 27(3): 385-389.
- [7] GUPTA I J, KSIENSKI A K. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 1983, 31(5): 785-791.
- [8] CLERCKX B, CRAEYE C, VANHOENACKER J D, et al. Impact of antenna coupling on 2 \$times\$ 2 MIMO communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(3): 1009-1018.
- [9] YANG Yao-qing, XU Guang-han, HAO Ling. An experimental investigation of wideband MIMO channel characteristics based on outdoor non-LOS measurements at 1.8 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(11): 3274-3284.
- [10] PAPOULIS A. Probability, random variables and stochastic processes[M]. 2nd ed. New York: McGraw Hill, USA, 1984.
- [11] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Commun, 1998, 6(3): 311-317.
- [12] XIN LI, ZAI-PING NIE. Mutual coupling effects on the performance of MIMO wireless channels[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3(16): 344-347.
- [13] CHIU C Y, CHENG C H, MURCH R D, et al. Reduction of mutual coupling between closely-packed antenna elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(6): 1732-1738.

编 辑 税 红

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>