

应用互耦补偿的多天线无线系统容量分析

伍裕江^{1,2}, 聂在平¹

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 广东通宇通讯设备有限公司 广东 中山 528437)

【摘要】针对互耦对空域相关性影响的两种对立观点,分别应用不同的互耦补偿方法修正多天线系统的传输矩阵,推导出容量公式。通过电磁场数值方法并结合蒙特卡罗实验,指出了在射线模型下互耦对容量的作用需取决于入射波的角谱分布,随着中心到达角的变化,互耦从一个积极的因素变化成一个消极因素。在Kronecker信道模型下,通过数值计算证明了天线方向图相关与互耦矩阵补偿方法是等效的,从而统一了两种对立观点,完善了互耦对相关性作用的研究。

关键词互耦; 互耦补偿; 多天线; 信道容量; 空域相关性
中图分类号 TN911 **文献标识码** A

MIMO Channel Capacity Analysis Using Mutual Coupling Compensation Techniques

WU Yu-jiang^{1,2} and NIE Zai-ping¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. Tongyu Communication Equipment Co. Ltd. Zhongshan Guangdong 528437)

Abstract Aiming at the two contrary viewpoints about the effects of mutual coupling on spatial correlation, two mutual coupling compensation techniques are employed to derive the channel capacity of multi-antenna system. Based on the electromagnetic numeric method and Monte Carlo method, it is pointed out that the effects of mutual coupling are also determined by the spatial channel parameters under the ray tracing model. As the mean angle of arrival varying, the effects of the mutual coupling will change from a detrimental factor to the beneficial ones. The equivalency of these two viewpoints is illuminated by the numeric results under Kronecker channel model.

Key words channel capacity; multiple-antenna; mutual coupling; mutual coupling compensation; spatial correlation

收发两端同时应用多天线技术的MIMO系统能显著提高信道容量,成为目前无线通信领域的研究热点^[1]。MIMO无线系统的信道容量取决于信道矩阵的秩,而信道矩阵的秩则依赖于天线端口处信号衰落的相关特性^[2],故天线特性是决定系统性能的一个关键因素。多天线间的互耦作为一个显著影响系统性能的参数而获得了广泛的研究。

为了获得低相关性,传统上要求天线间的间距充分大,天线间的互耦可以忽略^[3]。但在现实中往往存在安装空间受限的情况,此时由于天线间隔较小,天线间的相互作用会显著地影响相关特性。天线间信号相关性的求解可以采用对方向图求相关的方法^[3]。文献[4]通过实验证明了对于相距很近的单极子天线,由于互耦作用使天线方向图发生畸变而产生方向图分集效果,从而得到明显低于忽略互耦时的相关性。文献[5]在理论上证明了相隔很近的天

线仍可通过方向图的正交而取得很低的相关性。文献[6]研究了互耦和负载网络对相关性的影响,在天线间距较小且共轭匹配条件下,通过方向图相关方法求得的相关性远小于不考虑互耦的情况。但若从耦合机理上分析,互耦将该天线上信号的“副本”馈入另一个天线,会增加两个天线端口处信号的相似性,从而增大相关性^[1,7]。文献[7]采用该观点,将基于互耦补偿的互耦矩阵来修正忽略互耦时的传输矩阵,指出了天线互耦额外增大了由于无线传播环境带来的相关性,降低信道容量。

本文针对上述两种对立观点,应用电磁场数值方法研究了互耦对相关性及对信道容量的作用。

1 互耦矩阵的推导

接收多天线的互耦如图1所示。设天线数为 N ,各天线具有相同的辐射特性,以 θ 角入射、且幅度

收稿日期: 2006-05-16; 修回日期: 2006-09-21

基金项目: 国家863计划项目(2002AA123032)

作者简介: 伍裕江(1971-),男,博士,主要从事新一代无线通信技术及新型天线设计与天线分集技术等方面的研究。

为 E_0 的平面波在各天线端口处激励输出电压, 第 m 根天线上的输出电压除了由该平面波直接产生以外, 还有来自其他天线的互耦信号, 端口电压为^[8]:

$$v_m(u) = c_{mm} E_0 f^i(u) e^{jkd_m u} + \sum_{n, n \neq m}^N c_{mn} E_0 f^i(u) e^{jkd_n u} \quad (1)$$

式中 $f^i(u)$ 为无互耦时的单天线远场方向图; k 为波数; d_m 为天线 m 相对于相位中心的位置; $u = \sin \theta$; c_{mm} 为第 m 根天线的自耦合系数; c_{mn} 为第 m 和 n 根天线间的耦合系数。将式(1)改写为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{C} \mathbf{V}_n \quad (2)$$

式中 \mathbf{V} 、 \mathbf{V}_n (下标 n 表示忽略互耦, 下同) 分别为被互耦修正了的端口电压和忽略互耦时的端口电压。对均匀线阵, 耦合矩阵 \mathbf{C} 可以应用傅里叶变换方法求解^[8], 但该方法只适合均匀线阵, 而且只有当天线间距大于 0.5λ 才能保证解的精度。

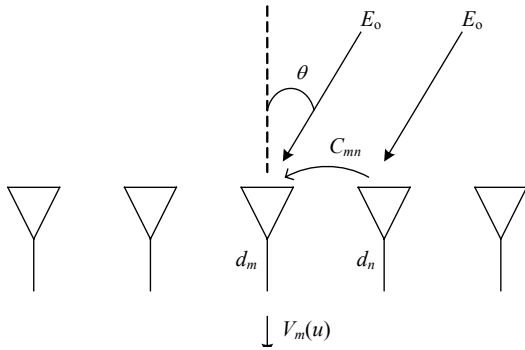


图1 多天线间互耦的示意图

为了克服文献[8]的不足, 本文推导了基于阻抗网络理论的耦合矩阵。同理, 将 \mathbf{V} 分解为忽略耦合时的接收电压矢量 \mathbf{V}_n 以及互耦的贡献项, 即有:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{Z} - \text{diag}(\mathbf{Z})) \mathbf{I} + \mathbf{V}_n \quad (3)$$

式中 $\text{diag}(\mathbf{Z})$ 为由 \mathbf{Z} 的对角元素组成的对角阵; \mathbf{I} 为端口电流矢量。定义 $\mathbf{Z}_A = \mathbf{Z} - \text{diag}(\mathbf{Z})$, 并考虑天线端口处的电压和电流关系, 即 $\mathbf{V} = \mathbf{Z}_L \mathbf{I}$, 可得:

$$(\mathbf{I}_N - \mathbf{Z}_A \mathbf{Z}_L^{-1}) \mathbf{V} = \mathbf{V}_n \quad (4)$$

式中 \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 的单位阵。故耦合矩阵为 $\mathbf{C} = (\mathbf{I}_N - \mathbf{Z}_A \mathbf{Z}_L^{-1})^{-1}$, \mathbf{Z}_A 的计算采用文献[9]的方法。相对式(2), 式(4)具有更广泛的适用性和准确性, 它不仅有效地修正了传统基于开路电压理论的互耦模型的不足, 而且在理论上适用于任意天线数目的多天线互耦计算。

本文的分析是基于接收端的, 对发射端可进行相同的处理。当得到收发端的耦合矩阵 \mathbf{C}_l 和 \mathbf{C}_r , 对忽略互耦时的传输矩阵 \mathbf{H}_n 修正为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_r \mathbf{H}_n \mathbf{C}_l \quad (5)$$

耦合矩阵的计算采用严格的电磁场数值方法——矩

量法^[10]。

2 随机信道模型及信道容量

本文分别采用射线模型和基于Kronecker结构的随机信道模型^[11], 后者的引入是为了进行互耦补偿方法与方向图相关方法的比较。Kronecker模型适用于收发端距离较远、且在各天线单元具有相同辐射特性的情况下, 收、发两端的相关矩阵 \mathbf{R}_m 与 \mathbf{R}_n 间是独立的, 传输矩阵为:

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{R}_m^{1/2} \mathbf{H}_w (\mathbf{R}_n^{1/2})^T \quad (6)$$

式中 \mathbf{H}_w 为各元素独立的复高斯矩阵。当考虑收发端的天线互耦时, \mathbf{H}_n 由式(5)修正。根据Kronecker积性质^[12], 经互耦补偿后的收发端相关矩阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_r = \mathbf{C}_r \mathbf{R}_m \mathbf{C}_r^H \\ \mathbf{R}_l = \mathbf{C}_l^H \mathbf{R}_n \mathbf{C}_l \end{cases} \quad (7)$$

考虑天线互耦后的传输矩阵在统计意义上为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_w (\mathbf{R}_l^{1/2})^T \quad (8)$$

为了评估互耦对系统性能的影响, 本文采用统计平均信道容量作为系统性能指标。由发射端平均分配发射功率, 并应用互耦补偿后的传输矩阵公式, 可推导 $N_r \times N_t$ 的窄带单用户MIMO系统平均容量为:

$$C_a = E \left\{ \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{C}_r \mathbf{R}_m \mathbf{C}_r^H \mathbf{H}_w \mathbf{C}_l^H \mathbf{R}_n \mathbf{C}_l \mathbf{H}_w^H \right) \right] \right\} \quad (9)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示期望; \mathbf{I}_{N_r} 为 $N_r \times N_r$ 单位矩阵; ρ 为每根接收天线上的平均信噪比。

3 数值计算结果与分析

在本文的数值计算中, 收发端均采用五个偶极子天线组成均匀线阵, 分别用射线模型和Kronecker模型产生矩阵 \mathbf{H} , 并对 \mathbf{H} 作归一化, 使 $\|\mathbf{H}\|_F^2 = N_r N_t$ 。收发端的相关矩阵分别应用式(7)和基于方向图相关的方法求解, 研究不同模型和计算方法下互耦对相关性继而信道容量的影响。应用矩量法^[11]进行相关矩阵的计算, 选取分段的正弦基函数并采用伽略金匹配离散细线积分方程。

3.1 基于射线方法的信道容量

本文采用文献[7]的二维射线模型参数, 即收发端采用相同的天线布局, 天线单元间距为 0.56λ 。每次计算中随机产生八根射线, 分别以 θ_l 发出, 以 θ_r 入射。每根射线具有相同的功率, 并在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 内服从均匀独立分布的相移, θ_l 和 θ_r 则服从相同的角谱密度分布, 即在 $|\theta - \theta_0| \leq \Delta\theta/2$ 内为均匀分布,

其他处处为零, $\Delta\theta = 80^\circ$ 。每次计算随机产生500个传输矩阵 \mathbf{H} , 求出平均容量。分别采用式(2)和式(4)计算耦合矩阵。图2给出了 θ_0 分别为 0° 和 80° 时的计算结果。由图可知, 两种不同的求解耦合矩阵方法得到的容量结果是非常一致的; 当 $\theta_0 = 0^\circ$, 即入射波能量主要集中在侧射方向时, 忽略互耦比存在互耦时的容量高。该结果与文献[7]符合, 但当入射能量转至端射方向, 忽略互耦时容量却下降了。

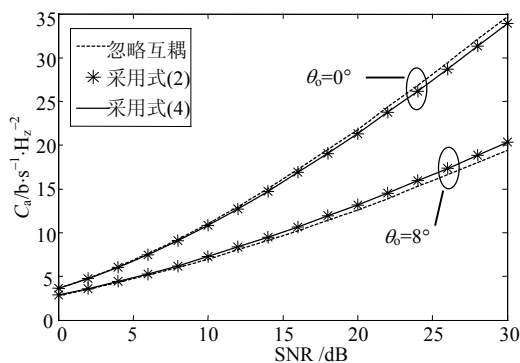


图2 不同的中心入射角下平均信道容量随信噪比的变化

图3给出了改变 θ_0 时容量的变化趋势, 信噪比取为20 dB。当入射中心角由侧射方向渐偏向端射方向时, 互耦对容量的作用也由消极因素转变为积极因素, 因此互耦对容量的作用与入射中心角 θ_0 密切相关, 这也是文献[7]所忽略的。

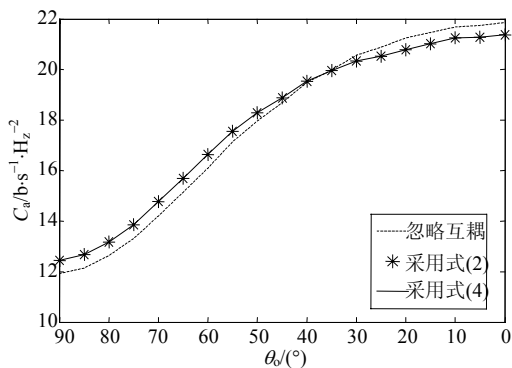


图3 平均信道容量随中心入射角的变化

3.2 基于Kronecker模型的信道容量

在Kronecker模型下, 分别应用方向图相关和互耦矩阵补偿方法得出的在不同天线间隔下的容量结果如图4所示。由于需要考察天线间隔小于 0.5λ 时的情况, 故耦合矩阵选用式(4)并用矩量法求解, 同时各天线的远场方向图也由矩量法求出。中心入射角 θ_0 为 80° , 角度扩展 $\Delta\theta = 80^\circ$, 天线间距 d 分别取为 0.25λ 、 0.5λ 和 2λ 。由图4可见, 虽然基于互耦补偿和方向图相关的理论推导截然不同, 但得到信道容量结果却非常吻合; 当进一步改变角谱参数和天线间距, 两种方法所得的结果都表现出很好的一致性。

因此在Kronecker模型下, 方向图相关和互耦矩阵补偿方法是等效的, 即这两种对立观点在Kronecker模型下是统一的。故图3的结果也可从方向图相关角度得到很好的解释, 即当 $d=0.56\lambda$ 时, 由于端射方向的方向图畸变比侧射方向大, 前者导致较强的方向图分集效果, 从而增加了信道容量。图4中也进一步印证了该结果, 当入射能量集中在端射方向时, 互耦总是起到增大容量的作用; 当天线间距 d 较大时, 互耦作用变得很小。

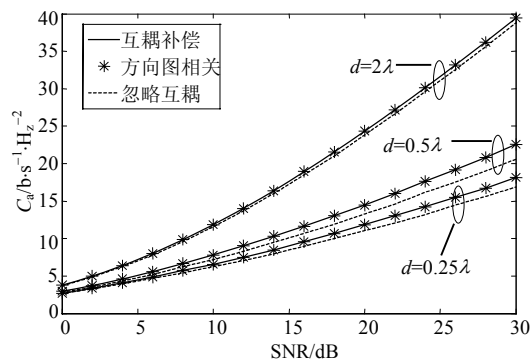


图4 不同天线间距下平均信道容量随信噪比的变化

4 结束语

天线互耦是天线近场相互作用的结果, 对其精确求解一般只能借助数值方法。本文通过电磁场数值计算结合蒙特卡罗方法, 应用不同的互耦补偿技术研究了互耦对信道容量的作用, 指出了互耦的作用需取决于信道的角谱分布。

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 Commun, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] SHIU D S, FOSCHINI G J, GANS M J, et al. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(3): 502-513.
- [3] JAKES W C. Microwave mobile communications[M]. New York, USA: Wiley, 1974.
- [4] VAUGHAN R G, SCOTT N L. Closely spaced monopoles for mobile communications[J]. Radio Science, 1993, 28(6): 1259-1266.
- [5] BOYLE K. Radiation patterns and correlation of closely spaced linear antennas[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2002, 50(8): 1162-1165.
- [6] WALLACE J W, JENSEN M A. Mutual coupling in MIMO wireless systems: a rigorous network theory analysis[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3(4): 1317-1325.

(下转第296页)

(7.6~15.8 GHz), 明显改善了片状金属磁性微粉吸收剂的吸收特性。

参 考 文 献

- [1] 曹琦, 龚荣洲, 冯则坤, 等. Fe-Si-Al系合金粉微波吸收特性[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 524-529.
- [2] ZHOU Pei-heng, DENG Long-jiang, XIE Jian-liang, et al. Nanocrystalline structure and particle size effect on microwave permeability of FeNi powders prepared by mechanical alloying[J]. Magn Magn Mater, 2005, 292: 325-331.
- [3] 周佩珩, 邓龙江, 翁小龙. 磁性纳米晶颗粒电磁特性研究进展[J]. 隐身技术, 2005, 4: 28-33.
- [4] YOSHIYUKI Y, TAKAHIRO M, NAKAE Y, et al. Magnetic properties of the noble metal nanoparticles protected by polymer[J]. Physica B, 2003, 329-333(2): 1183-1184.
- [5] 王其祥, 宋宝珍, 李洪钟. α -Fe金属磁记录粉表面化学改

- 性[J]. 无机材料学报, 2002, 17(5): 953-958.
- [6] VANOOIJ W J. Protecting metals with silane coupling agents[J]. Chem Tech, 1998, 28(2): 26-35.
- [7] 杜作栋, 陈剑华. 有机硅化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 184-206.
- [8] ARKLES B. Tailoring surfaces with silanes[J]. Chem Tech, 1977, 7: 766-769.
- [9] WU L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites[J]. Magn Magn Mater, 2005, 285: 233-239.
- [10] 高正娟, 曹茂盛, 朱静. 复合吸波材料等效电磁参数计算的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004, 4: 12-15.

编辑 张俊

(上接第190页)

- [7] 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.
- [8] STEYSKAL H, HERD J S. Mutual coupling compensation in small array antennas[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1990, 38(12): 1971-1975.
- [9] HUI H T. A new definition of mutual impedance for application in dipole receiving antenna arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propag, 2004, 3: 364-367.

- [10] HARRINGTON R F. Field computation by moment method[M]. New York, USA: Macmillan Company, 1968.
- [11] KERMOAL J P, SCHUMACHER L, PEDERSEN K I, et al. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2002, 20(6): 1211-1226.
- [12] 张贤达. 信号处理中的线性代数[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

编辑 黄莘

(上接第237页)

- [4] Lü J, CHEN G. A new chaotic attractor coined[J]. Int J Bifurcat Chaos, 2002, 12(3): 659-661.
- [5] Lü J, CHEN G, ZHANG S. The compound structure of a new chaotic attractor[J]. Chaos, Solitons&Fractals, 2002, 14: 669-672.
- [6] LIU C, LIU T, LIU L, et al. A new chaotic attractor[J]. Chaos, Solitons&Fractals, 2004, 22: 1031-1038.
- [7] WANG J Z, CHEN Z Q, YUAN Z Z. The generation of a hyperchaotic system based on a three-dimensional autonomous chaotic system[J]. Chinese Physics, 2006, 15(6): 1216-1225.

- [8] PARK J H. Adaptive synchronization of hyperchaotic Chen system with uncertain parameters[J]. Chaos, Solitons & Fractals 2005, 26: 959-964.
- [9] WANG F Q, LIU C X. Hyperchaos evolved from the Liu chaotic system[J]. Chinese Physics, 2006, 15(5): 963-968.
- [10] 刘扬正, 费树岷, 李平. 变形蔡氏电路混沌同步的非线性反馈控制[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(8): 1448-1451.
- [11] 刘扬正, 费树岷. Sprott-B和Sprott-C系统之间的耦合混沌同步[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1035-1039.
- [12] 刘扬正, 费树岷. Genesio-Tesi和Coullet混沌系统之间的非线性反馈同步[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3486-3490.

编辑 漆蓉