

天线阵结构对非视距室内 MIMO 信道容量的影响

吕剑刚^① 吕英华^① 李云庄^② 杜 鹃^③

^①(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 100876)

^②(中国电信集团公司大客户事业部 北京 100032)

^③(意法半导体有限公司 北京 100080)

摘 要 采用 2 维射线跟踪法分析了非视距室内环境中天线间隔、天线阵形对 MIMO 系统容量和互补累积分布函数(CCDF)的影响。结果表明随着天线间隔减小, MIMO 系统容量降低。10%中断容量表明, 天线间隔相同时, 有独立同分布瑞利信道容量大于线性阵容量大于方阵容量或者圆形阵容量的关系。当天线间隔大于等于 3λ 时, 不同天线阵列阵形对容量影响非常小, 此时 i.i.d.瑞利信道理论容量几乎全部实现。当天线间隔小于等于 1λ 时, 天线阵列阵形对容量影响较大, 矩形阵和圆形阵 MIMO 系统容量相差较小, 但都显著小于线性阵列系统容量。在非视距的室内环境中, 要实现最大的 MIMO 容量增益, 设计天线阵列时应该对天线间隔和阵列阵形综合考虑。

关键词 无线通信, 多入多出, 射线跟踪法, 容量互补累积分布函数, 阵列结构, 非视距

中图分类号: TN92, TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1636-04

Antenna Array Structures Effect on Capacity of Indoor NLOS MIMO Channel

Lü Jian-gang^① Lü Ying-hua^① Li Yun-zhuang^② Du Juan^③

^①(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(The VIP Customer Department of China Telecom, Beijing 100032, China)

^③(STMicroelectronics, Beijing 100080, China)

Abstract A 2-D shooting-and-bouncing ray-tracing (SBR) method is used to analyze the different antenna array structures effect on the capacity CCDF of indoor NLOS MIMO channel. The results show in NLOS indoor environments the less antenna interval is, the less MIMO channel capacities get. The results on 10% outage capacity show that there exist a fixed relationship that i.i.d Rayleigh channel capacity is larger than the capacity with linear antenna array which is larger than the capacity with rectangular antenna array or with circular antenna array. When antenna interval is equal to or larger than 3λ , antennas array structures affect the CCDF indistinctively and all the CCDF approach the theoretical i.i.d Rayleigh capacity, i.e. Telatar capacity. When antenna interval is equal to or less than 1λ , the CCDFs of MIMO system equipped with different antenna array structures changes remarkably. To obtain the MIMO capacity gains in indoor NLOS environment, antenna interval and antenna structure should be considered jointly when designing the antenna array.

Key words Wireless communication, MIMO, Ray-tracing, Capacity Complementary Cumulative Distribution Functions (CCDF), Antenna array structure, Non Line-Of-Sight (NLOS)

1 引言

MIMO无线数字通信系统也称为大容量数据无线传输系统。此项技术被认为是现代无线通信技术中重大突破之一。Foschini, Telatar和其他人^[1,2]的研究工作表明在理想情况下, 使用MIMO技术的无线通信系统的容量随发射机端和接收机端的最小天线数目线性增加。采用编码技术例如贝尔实验室空时分层码(BLAST)和空时编码(STTC和STBC)^[3,4]就能够取得MIMO增益。

由于Foschini, Telatar等人所预测的MIMO系统容量都是

假设天线阵阵元之间的距离足够大, 天线阵阵元之间不存在相关性, 散射环境丰富的理想情况下所取得的。但在实际的传播环境中MIMO系统如何实现理论预测的容量需要进一步研究。因此对于MIMO无线信道的测量和建模正在成为研究的热点之一。但由于MIMO信道的复杂性, 以及进行实际的MIMO信道测量成本非常高。所以采用近些年已被广泛地应用于传播预测和无线信道建模的射线跟踪法^[5]对MIMO系统的性能进行了分析就成为了一个很好的选择。

要设计和实现一个实际的MIMO系统来取得理论预测的容量, 就要考虑在实际的传播环境下发射端和接收端天线阵对系统性能的影响。虽然有工作分别研究了天线间隔和天线阵列阵形对系统性能的影响^[6,7], 但并没有同时考虑天线间隔和天线阵列结构对系统性能的影响。而且由于WLAN, 家庭

2004-12-29 收到, 2005-06-21 改回

国家自然科学基金(60271018, 60331010)和北京邮电大学教育部光通信和光波技术重点实验室开放基金资助课题

视频/音频无线网络等短距离无线通信系统有可能成为 MIMO 技术最重要的应用领域。因此本文用射线跟踪法研究了不同天线间隔时,不同天线阵结构对非视距的室内 MIMO 信道容量的影响。

2 射线跟踪法和 MIMO 容量计算

2.1 射线跟踪法

射线跟踪理论可以对确定环境中的无线通信系统性能进行高效而且有用的仿真。射线跟踪法是按照几何光学(GO)和一致性衍射理论(UTD),将发射机发射电磁波做平面波近似,考虑了电波的视距传播,透射,衍射和散射效应。到目前为止已经提出了多种射线跟踪算法,如SBR算法、镜像算法和混合算法。在这些算法中SBR算法是一种基本的,最常用的算法,而且与镜像法相比可以分析更加复杂的环境等很多优点。但是三维的SBR射线跟踪算法是非常耗时的,在目前是实现起来是有困难的。因此采用二维的SBR射线跟踪算法对MIMO系统的容量进行了分析^[8-11]。

在这种方法中,每一根射线被发射天线发射后都被跟踪,直到被接收天线接收或者衰减到门限以下。射线跟踪的过程是一个递归的过程,当一根射线遇到一个物体时又会产生反射、透射和绕射射线。对这些射线跟踪的过程又相当于对发射射线的跟踪,随着遇到的物体的数量增加,射线的数量将指数增加,跟踪的计算量也大大增加。当射线被接收,射线的功率和其他参数同时被得出。所以通过跟踪所有的射线,就可以获得到达接收天线的射线的功率,时延,到达角和离开角以及位相角。

二维SBR射线跟踪算法主要包括以下3部分,即射线的发射,射线的接收和射线同物体的求交运算^[12]。在本算法中发射射线由以发射天线为圆心的单位圆划分为张角为 1° 的360个射线扇形的每一个扇形的中心线表示,即每一个发射天线发射出360根射线。对于射线的接收,认为进入接收天线为中心的接收圆的射线都认为被接收,接收圆半径为 $r \approx l\phi/2$;其中 l 为射线所经过的实际路径的长度, ϕ 为射线扇形的张角。射线与物体的求交运算可以由射线与平面是否相交求得。衰减门限为一常数 S ,本算法中设为15。如将反射的衰减的权 r 定为1,透射权 t 为3,绕射的权 d 为5,则对于每一条被跟踪的射线有 a 次反射, b 次透射和 c 次绕射。如果 $S \leq ar + bt + cd$,那么这条射线就认为衰减到很小,可以停止跟踪。

室内环境中的墙壁通常可以用是具有一定的厚度的多层平行各向同性的有耗非磁性介质模型代替。因此当射线遇到障碍物时将产生反射和透射射线,反射和透射系数就可以通过多层有耗介质的模型来计算^[13]。在研究中对室内环境中做了一些简化,认为墙壁是单层的,而且没有考虑门、窗户和室内家具等物体的影响。

2.2 MIMO 系统容量的计算

考虑一个窄带的,点到点的,无反馈的,接收机可以精

确估计信道,发射机每个发射天线平均发射功率相同的慢衰落 MIMO 系统。对于在室内环境下的短距离无线通信系统来说,这些假设是符合实际情况的。

MIMO 系统信号模型可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 \mathbf{r} 是 $M \times 1$ 的接收信号矢量, \mathbf{s} 是 $N \times 1$ 发射信号矢量, \mathbf{n} 是 $M \times 1$ 独立同分布加性复白高斯噪声矢量,每一分量的方差是 σ^2 , \mathbf{H} 是 $M \times N$ 信道矩阵,其中第 i 行,第 j 列矩阵元素表示为 h_{ij} , N 和 M 是发射和接收天线数目。

按照 Telatar 和 Foschini 的结果,此时 MIMO 系统的信道容量为

$$C_{\text{eq}} = \log_2 \left[\det \left(I_M + \frac{\rho}{N} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \quad (\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})) \quad (2)$$

这里 $E|h_{ij}|^2 = 1$, $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, N$, ρ 为接收机每个接收天线分支上的平均信噪比(SNR)。 C_{eq} 表示平均发射功率相同时的系统容量。

这样从射线跟踪法得到的参数来构造MIMO系统信道矩阵 \mathbf{H} 后,按照式(2)就可以得出MIMO系统容量 C_{eq} 。每一发射和接收天线对之间的信道冲激响应可以表示为所有被接收天线接收的射线矢量和^[14, 15]

$$g_{ij}(t) = \sum_{k=0}^L \sqrt{P_k} e^{i\theta_k} \delta(t - \tau_k) \quad (3)$$

其中 P_k , θ_k 和 τ_k 分别是接收功率,位相角,和第 k 根射线的相对时延; L 是被接收的射线的数目; $\delta(t)$ 是 δ 函数。因此可以得出窄带的系统频率响应为

$$h_{ij} = \sum_{k=0}^L \sqrt{P_k} e^{i\theta_k} e^{-i2\pi f_0 \tau_k} \quad (4)$$

利用式(4),信道矩阵 \mathbf{H} 就被构建。 P_k , θ_k 和 τ_k 等参数可以利用射线跟踪法得到。这样所有的 $N \times M$ 个 h_{ij} 都是复数。把接收天线放置于1000个随机位置的小范围内。还假设接收机每一个天线分支上的平均信噪比为18dB。计算每一个信道样本的容量 C_{eq} ,然后容量CCDF可以容易得到。

图1是某室内环境的平面图。发射天线阵固定于走廊,可以是线性阵列、矩形阵列和圆形阵列其中的一种。接收天线阵放于房间A中1000个随机选取的位置,其阵列阵形和发射天线阵列阵形相同,而且天线阵的取向是固定的,这样发射天线阵同接收天线阵之间是非视距传播。载波频率为5.2GHz,即波长 $\lambda = 5.8\text{cm}$ 。接收机和发射机天线阵阵列是8个全向天线所组成的天线阵。而且发射机和接收机天线阵天线间的距离 d 也相同,并且天线都是垂直极化。墙壁为单层的各向同性的非磁性介质,其电参数分别为 $\epsilon_r = 5$, $\mu_r = 1$, $\sigma = 0.00001\text{A}/\text{m}^2$ 。外墙壁和室内墙壁的厚度分别为0.35m和0.15m。

图2是所研究的3种天线阵列阵形。这3种天线阵的相邻天线之间间隔相同,分别取 0.5λ , 1λ , 3λ 和 5λ 。用射线跟踪法分析了不同的天线间隔时,天线阵列结构对

MIMO 系统容量 CCDFs 的影响。

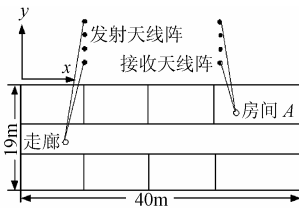


图 1 非视距室内平面图
Fig.1 Floor plan of indoor NLOS environment

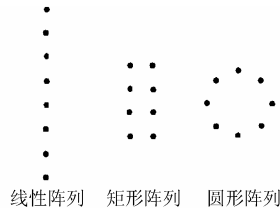


图 2 8 个单元的天线阵列结构
Fig.2 Antenna array structures of 8 elements

3 讨论

图 3—图 6 表明, 天线间隔相同时, 不同天线阵列阵形对系统容量 CCDF 影响不同; 对于相同阵列阵形的 MIMO 系统, 随着天线间隔的减小系统容量显著降低。当天线间隔为 3λ 和 5λ 时, 不同的天线阵列阵形对容量 CCDF 的影响非常小, 各容量曲线都非常接近理论的独立同分布瑞利信道容量。当天线间隔为 0.5λ 和 1λ 时, 矩形阵列阵形和圆形阵列阵形的 MIMO 系统容量 CCDF 非常接近, 但都明显低于线性阵列阵形的 MIMO 系统容量, 此时阵列结构对 MIMO 系统容量的影响将非常显著。但无论天线间隔为多少, 各天线阵列阵形的系统容量都要低于理论的独立同分布瑞利信道容量。

$\alpha\%$ 中断容量表示 CCDF 曲线上 $(100 - \alpha)\%$ 概率时系统容量。因为中断容量是一个非常具有意义的系统性能度

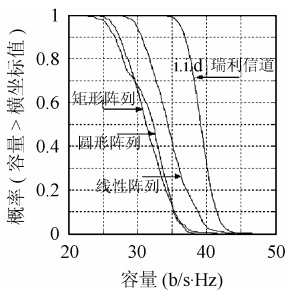


图 3 天线间隔为 0.5λ 的不同阵列的 CCDF
Fig.3 CCDF with antenna interval of 0.5λ

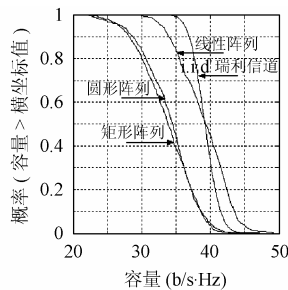


图 4 天线间隔为 1λ 的不同阵列的 CCDF
Fig.4 CCDF with antenna interval of 1λ

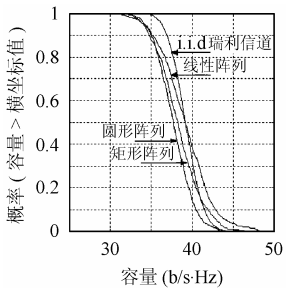


图 5 天线间隔为 3λ 的不同阵列的 CCDF
Fig.3 CCDF with antenna interval of 3λ

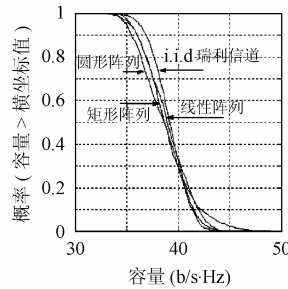


图 6 天线间隔为 5λ 的不同阵列的 CCDF
Fig.4 CCDF with antenna interval of 5λ

量^[16], 所以在表 1 列出了射线跟踪法和蒙特卡罗仿真得到的不同天线阵列阵形的 MIMO 系统 10% 中断容量。在表 2 中列出了不同阵列结构的 MIMO 系统所能实现的独立同分布瑞利信道容量的百分比。

表 1 不同阵列结构 MIMO 信道的 10% 中断容量

Tabl.1 10% outage capacity of MIMO channel with different antenna array structure

	线性阵列 (b/(s·Hz))	方行阵列 (b/(s·Hz))	圆形阵列 (b/(s·Hz))	Telata 容量 (b/(s·Hz))
0.5λ	30.7365	27.4119	26.7619	36.9063
1λ	33.8749	28.1711	28.6274	36.9063
3λ	35.1160	34.7596	35.0091	36.9063
5λ	36.0370	35.9836	35.4553	36.9063

表 2 不同阵列结构实现的 i.i.d. 瑞利信道 10% 中断容量百分比

Tab.2 Percentage of i.i.d. Rayleigh channel 10% outage capacity obtained with different antenna array structure

	10% 线性阵列容量/ 10% Telata 容量 × 100 (%)	10% 方行阵列容量/ 10% Telata 容量 × 100 (%)	10% 圆形阵列容量/ 10% Telata 容量 × 100 (%)
0.5λ	83.28	74.27	72.51
1λ	91.79	76.33	77.57
3λ	95.15	94.18	94.86
5λ	97.64	97.50	96.07

从表 1 可以看出, 随着天线间隔的减少, 不同天线阵列的 MIMO 系统容量有不同程度的降低, 即有 Telatar 容量大于天线间隔为 5λ 时的容量大于天线间隔为 3λ 时的容量大于天线间隔为 1λ 时的容量大于天线间隔为 0.5λ 时的容量。

从表 1 还可以看出, 当天线间隔为 3λ 和 5λ 时, 各天线阵列阵形的 MIMO 系统的 10% 中断容量之间差别比较小, 相差 $0.5b/(s \cdot Hz)$ 左右, 小于理论的 Telatar 中断容量最大 $2b/(s \cdot Hz)$ 左右; 当天线间隔为 1λ 时, 圆形和矩形阵列阵形的 MIMO 系统 10% 中断容量相差不超过 $0.5b/(s \cdot Hz)$, 但小于线性阵列的 MIMO 系统 10% 中断容量 $5 \sim 6b/(s \cdot Hz)$, 小于 Telatar 10% 中断容量 $8 \sim 9b/(s \cdot Hz)$; 当天线间隔为 0.5λ 时, 圆形阵列和矩形阵列 10 中断容量相差也比较小, 有 $0.7b/(s \cdot Hz)$ 左右, 小于线性阵列 MIMO 系统 10% 中断容量 $3 \sim 4b/(s \cdot Hz)$, 小于 Telatar 10% 中断容量 $9 \sim 10b/(s \cdot Hz)$ 。因此对于天线间隔相同的 MIMO 系统的 10% 中断容量有 Telatar 容量大于线性阵列容量大于方阵容量或圆形阵容量的关系。

从表 2 可以看出, 当天线间隔小于等于 1λ 时, 阵列结构对系统容量有显著影响, 当天线间隔为 1λ 时, 线性阵列仍旧能够实现 90% 以上绝大部分的独立同分布理论信道容量, 这与已有的结果^[7]相一致; 但矩形阵列和圆形阵列只能能够实现不到 80% 的 i.i.d. 瑞利信道容量。当天线间隔大于等于 3λ 时, 不同天线阵列结构对系统容量的影响非常小, 90% 以上的理论容量都可以实现。

天线间隔和天线阵列阵形对系统容量的影响,可以直观地解释为当天线间隔较大时,天线之间的相关性非常小,所以此时系统性能非常接近理论 i.i.d.瑞利信道容量,当天线间隔比较小时,天线之间的相关性将显著增强,从而显著地降低系统容量。圆形和矩形阵列阵形的 MIMO 系统容量低于线性阵列结构系统容量也可以解释为由于天线的集中程度增加,从而导致信道的相关性增加,进而降低系统容量。

4 结束语

本文分析了不同天线阵列阵形在不同天线间隔时对 8 发 8 收 MIMO 系统容量 CCDF 的影响。结果表明天线阵形和天线间隔对 MIMO 系统容量有显著影响,可以通过合理设计天线阵列结构获得 MIMO 系统容量增益。天线间隔减小会降低系统容量。要实现一定百分比的理论容量,天线间隔的设计需要根据天线阵列阵形进行合理设计。当天线间隔大于等于 3λ 时,不同天线阵列结构的设计对 MIMO 系统容量影响将较小;但当天线间隔比较小时,阵列结构对系统容量影响非常显著,当天线间隔为 1λ 时,矩形阵列结构和圆形阵列结构的 MIMO 系统容量相差较小,只能实现 70% 多的 i.i.d. 瑞利信道理论容量,明显小于线性阵列所实现的 90% 以上的 i.i.d. 瑞利信道的理论容量。因此在非视距的室内环境中,为实现 MIMO 系统的容量增益,对天线阵设计就要对天线阵形和间隔综合考虑。

参考文献

- [1] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *Eur. Trans. Tel.*, 1999, 10(6): 585-595.
- [3] Paulraj A J, Gore D A, Babar R U, et al.. An overview of MIMO communications—A key to gigabit wireless. *Proc. IEEE*, 2004, 92(2): 198-218.
- [4] Gesbert D, Shafi M, Shiu D S, et al.. From theory to Practice: An overview of MIMO spac-time coded wireless systems. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 2003, 21(3): 281-302.
- [5] Huang Y M, Lü Y H, Xu L. Improving a hybrid method of indoor propagation modeling for wireless communications systems. *The Journal of China University of Posts and Telecommunications*, 2003, 10(3): 41-45.
- [6] Hampicke D, Landmann M, Schneider C, et al.. MIMO capacities for different antenna array structures based on double directional wideband channel measurements, *Proceedings of VTC 2002*, 1: 180-184.
- [7] Pohl V, Jungnickel V, Haustein T, et al.. Antenna spacing in MIMO indoor channels. *IEEE VTC*, 2002, 2: 749-753.
- [8] Ghobadi C, Shepherd P R, Pennock S R. 2D ray-tracing model for indoor radio propagation at millimeter frequencies, and the study of diversity techniques. *Proc.-H.*, 1998, 145(4): 349-353.
- [9] Iskander M F, Yun Z. Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Trans. on Microwvl. Tech.*, 2002, 50(3): 662-673.
- [10] Burr A. Evaluation of capacity of indoor wireless MIMO channel using ray tracing. *Proceeding International Zurich Seminar Broadband Communications*, 2002: 28.1-28.6.
- [11] Tila F, Shepherd P R, Pennock S R. Theoretic capacity evaluation of indoor micro- and macro-MIMO systems at 5GHz using site specific ray tracing. *Electron. Lett.*, 2003, 39(5): 471-472.
- [12] 季忠, 黎滨洪, 王豪行等. 用射线跟踪法对室内电波传播进行预测. *电波科学学报*, 1999, 14(2): 160-165.
- [13] 王一平, 陈达章, 刘鹏程. *工程电动力学*. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [14] Chuah C N, Tse D, Kahn J M, et al.. Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 2002, 48(3): 637-650.
- [15] Ertel R B, Cardieri P, Sowerby K W, et al.. Overview of spatial channel models for antenna array communication systems. *IEEE Personal Commu.*, 1998, 5: 10-22.
- [16] Biglieri E, Proakis J, Shamai S. Fading channels: information-theoretic and communications aspect. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, 44(6): 2619-2692.

吕剑刚: 男, 1977 年生, 博士, 研究方向为多入多出(MIMO)无线通信技术研究。

吕英华: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、电磁兼容、生物医学工程方向。