

## 紧耦合 MIMO 系统 SVA 室内衰落信道容量分析

徐荣蓉 孙得娣

(河海大学计算机与信息学院 南京 211100)

**摘要:** 近年来 MIMO 系统的天线日渐趋于小型化,随之而来的紧耦合效应成为影响信道容量的主要因素。首先介绍了 SVA 室内衰落信道模型的建模方法,其次给出了天线间的耦合效应产生的原理,最后将耦合效应带入信道模型中,并且分析其在丰富的多径情况下不同天线间距对信道容量的影响。仿真结果显示天线耦合效应会导致信道容量减少,并且天线间距越短,耦合效应对信道容量的影响越大。

**关键词:** 紧耦合;SVA;室内衰落信道;容量

**中图分类号:** TP3911; TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Analysis of the SVA indoor fading channel's capacity  
in tightly coupled MIMO systems

Xu Rongrong Sun Dedi

(Department of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In recent years, the antennas of MIMO system tends to be miniaturized, and the coupling effect becomes the main factor that affects the channel capacity. In this paper, the method of modeling the indoor SVA fading channel model is introduced firstly. Secondly, the principle of the coupling effect is presented. Finally, the coupling effect is brought into the channel model, and the effect of different antenna spacing on the channel capacity is analyzed under the multipath condition. Simulation results show that the coupling effect leads to the decrease of the channel capacity, and the shorter the antenna spacing, the greater the effect of the coupling effect on the channel capacity.

**Keywords:** tight coupling; SVA; indoor fading channel; capacity

## 0 引言

随着无线通信技术<sup>[1]</sup>的飞速发展,小型化,智能化成为天线技术<sup>[2]</sup>的发展趋势,天线间距缩小而产生的耦合效应<sup>[3-4]</sup>已成为影响信道容量的重要因素。

Saleh 和 Valenzuela 基于对室内信道数据的大量测量,提出了 Saleh-Valenzuela(S-V)信道模型<sup>[5]</sup>。文献[6]在 S-V 的基础上,引入空域特征,即对到达角(AOA)和离开角(AOD)进行建模,提出了 SVA 模型。2002 年 Wallace 和 Jensen 对室内 MIMO 系统 SVA 信道模型做了深入研究,并且给出了其窄带简化形式。但是这些文献都没有对天线耦合效应对信道性能的影响进行分析。

因此,本文以紧耦合 MIMO 系统中室内衰落信道 SVA 模型的信道容量为研究目标,将天线远场辐射数据带入信道模型中,采用 MATLAB 对有耦合与无耦合的情况进行信道容量的仿真,对比分析可得天线耦合对信道容量的影响。

## 1 信道模型

SVA 信道模型是一种通过对大量实测数据进行拟合而得到的统计信道模型,从时延分布上看是由丰富的簇及簇内射线构成多径传播环境。该模型通过子径的幅值、到达时间以及 AOA/AOD 来描述其特征。每簇及簇内射线的到达时间均服从泊松分布<sup>[5]</sup>,分别建模为平均到达率为  $\Delta$  和  $\lambda$  的泊松分布,表达式如下所示:

$$f_{T_l}(T_l | T_{l-1}) = \Delta \exp[-\Delta(T_l - T_{l-1})] \quad (1)$$

$$f_{\tau_{k,l}}(\tau_{k,l} | \tau_{k-1,l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{k-1,l})] \quad (2)$$

式中:  $T_l$  是第  $l$  簇中第一条射线的到达时间,  $\tau_{k,l}$  是第  $l$  簇中第  $k$  条射线的到达时间。

令  $\beta_{k,l}$  表示第  $l$  簇中第  $k$  条子径的幅度,服从瑞利分布;  $\theta_{k,l}$  表示第  $l$  簇中第  $k$  条子径的相位,均匀分布在  $[0, 2\pi]$  上,则信道的冲击响应表示为:

$$e^{-j4\pi d \sin\theta/\lambda}, e^{-j6\pi d \sin\theta/\lambda}。$$

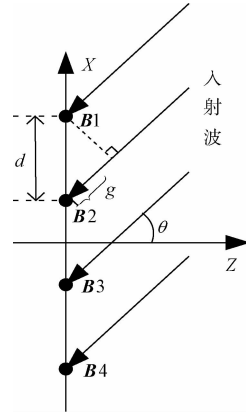


图 1 四元线性阵列模型

设阵元  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  和  $B_4$  的方向图分别为  $G_1(\theta)$ 、 $G_2(\theta)$ 、 $G_3(\theta)$  和  $G_4(\theta)$ ，这里  $G_i(\theta)$ ， $i = 1, 2, 3, 4$  指与  $X-Z$  同平面上阵元方向图<sup>[7]</sup>，因此可得阵元  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  和  $B_4$  的接收信号为：

$$\mathbf{V} = [G_1(\theta), G_2(\theta)e^{-j2\pi d \sin\theta/\lambda}, G_3(\theta)e^{-j4\pi d \sin\theta/\lambda}, G_4(\theta)e^{-j6\pi d \sin\theta/\lambda}]^T \quad (10)$$

理想的情况下，当天线阵列为全向辐射时，即  $G_1(\theta) = G_2(\theta) = G_3(\theta) = G_4(\theta) = 1$ ，则式(10)可表示为：

$$\mathbf{V} = [1, e^{-j2\pi d \sin\theta/\lambda}, e^{-j4\pi d \sin\theta/\lambda}, e^{-j6\pi d \sin\theta/\lambda}]^T \quad (11)$$

这里的阵元方向图  $G_i(\theta)$  即为天线增益图  $G_q^p(\theta)$ ，将其带入信道矩阵表达式中就可以研究天线间的耦合效应对 MIMO 系统性能的影响。由文献[8-10]得 MIMO 信道容量表达式为：

$$C = \log_2 \det[\mathbf{I}_{n_r} + \frac{\rho}{n_t} \mathbf{H}\mathbf{H}^H] \text{bps/Hz} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{I}_{n_r}$  表示  $n_r$  阶的单位矩阵， $\rho$  表示各接收阵元的平均信噪比， $n_t$  表示发射阵列数， $\mathbf{H}$  表示信道传输矩阵。则根据式(12)可以计算出耦合效应对信道容量的影响。

### 3 仿真结果与分析

本文的偶极子天线在丰富多径的传播环境中，针对不同的天线间距对信道容量进行了仿真，多径的丰富与弱由簇衰落时间常数  $\Gamma$  决定。仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

仿真参数	参数取值
发射、接收端阵元个数	4
簇衰落时间常数 $\Gamma$	2(丰富多径)
射线 AOA/AOD 标准差 $\sigma$	26°
阵元间距 $d$	0.25 $\lambda$ 、0.5 $\lambda$ 、0.75 $\lambda$ 、 $\lambda$
信道实现次数	10 000
信噪比 SNR	20 dB

$$h(\theta^R, \theta^T, t) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K |\beta_{k,l}| e^{j\theta_{k,l}} \delta(t - \tau_l - \tau_{k,l}) \cdot \delta(\theta^T - \Theta_l^T - \omega_{k,l}^T) \cdot \delta(\theta^R - \Theta_l^R - \omega_{k,l}^R) \quad (3)$$

式中： $K$  和  $L$  分别表示簇和簇内射线的数量； $\theta^P$ ， $P \in \{T, R\}$  分别表示发射机的发射角和接收机的到达角； $\Theta_l^P$  表示第  $l$  簇的平均发射角和平均接收角，均独立服从  $[0, 2\pi]$  上的均匀分布； $\omega_{k,l}^P$  表示第  $l$  簇中第  $k$  条子径相对于簇而言的发射角和到达角，均独立同服从于零均值，标准差为  $\sigma$  的双边拉普拉斯分布<sup>[6]</sup>，其概率密度函数表示如下：

$$f^P(\omega_{k,l}) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma^P} \exp\left(-\left|\frac{\sqrt{2}\omega_{k,l}}{\sigma^P}\right|\right) \quad (4)$$

对于窄带的情况，Wallace 认为多径时延扩展相较于每符号时间是很小的。因此，多径分量是方向性冲击响应可表示成：

$$h(\theta^R, \theta^T) = \int_0^\infty h(\theta^R, \theta^T, t) dt = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K |\beta_{k,l}| e^{j\theta_{k,l}} \cdot \delta(\theta^T - \Theta_l^T - \omega_{k,l}^T) \cdot \delta(\theta^R - \Theta_l^R - \omega_{k,l}^R) \quad (5)$$

这里每簇中子径的平均功率为常数，表达式为：

$$E[|\beta_{kl}|^2] = E[|\beta_l|^2] = \exp\left(-\frac{\tau_l}{T}\right) \quad (6)$$

对于  $n$  个发射天线和  $m$  个接收天线构成的 MIMO 通信系统，任意一次 SVA 信道实现，信道矩阵均可以通过方向性冲击响应得到，即：

$$h_{mn} = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathbf{W}_m^R(\theta^R) h(\theta^R, \theta^T) \mathbf{W}_n^T(\theta^T) d\theta^R d\theta^T \quad (7)$$

式(7)中  $\mathbf{W}_q^p(\theta) = G_q^p(\theta) \exp[j\psi_q^p(\theta)]$ ， $q \in \{m, n\}$  是导向向量，其中  $G_q^p(\theta)$  是天线增益图， $\psi_q^p$  是相位函数，由式(8)给出：

$$\psi_q^p(\theta) = k_0(x_q^p \cos\theta + y_q^p \sin\theta) \quad (8)$$

式中： $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  是自由空间波数， $\lambda_0$  是中心频率对应的波长， $(x_q^p, y_q^p)$  是天线的坐标。

通过计算式(7)，并采用归一化因子  $\frac{1}{\sqrt{KL}}$  对信道矩阵进行归一化为：

$$h_{mn} = \frac{1}{\sqrt{LK}} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K |\beta_{k,l}| e^{j\theta_{k,l}} \mathbf{W}_m^R(\Theta_l^R + \omega_{k,l}^R) \cdot \mathbf{W}_n^T(\Theta_l^T + \omega_{k,l}^T) \quad (9)$$

上述内容可以看出窄带 SVA 信道模型仅由两个独立的参数  $\Gamma$  和  $\sigma$  来表征。因此，Wallace 将窄带 SVA 室内信道模型记为 SVA( $\Gamma, \sigma$ )。

## 2 耦合效应

本文 MIMO 系统天线端均采用四元线性阵列，如图 1 所示，其中  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  和  $B_4$  代表 4 个半波偶极子天线，其馈电点连线构成  $X$  轴的走向，阵元间距为  $d$ ，阵列法线方向为  $Z$  轴走向，平面入射波与  $Z$  轴夹角为  $\theta$ 。阵元  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  比阵元  $B_1$  接收的信号滞后相位分别为  $e^{-j2\pi d \sin\theta/\lambda}$ 、

图 2~图 5 分别给出了在室内丰富多径的传播环境下,天线间距分别为  $0.25\lambda$ 、 $0.5\lambda$ 、 $0.75\lambda$  和  $\lambda$  时,天线耦合效应对 SVA 室内信道容量的影响。对这 4 幅图进行对比和分析可以看出在室内丰富多径的传播环境下时,天线耦合效应会导致本文 SVA 信道容量减少,并且当天线间距越小时,实际的有耦合信道容量越小于理想的无耦合信道容量;当天线间距越大时,实际的有耦合信道容量越接近于理想的无耦合信道容量;特别地,当天线间距  $\geq \lambda$  时,系统近似于无耦合的理想状态。此外,从图中还可以看出无论是实际有耦合还是理想无耦合,当天线间距变大,SVA 信道容量会随之增大;相反地,天线间距变小,SVA 信道容量会随之增大。

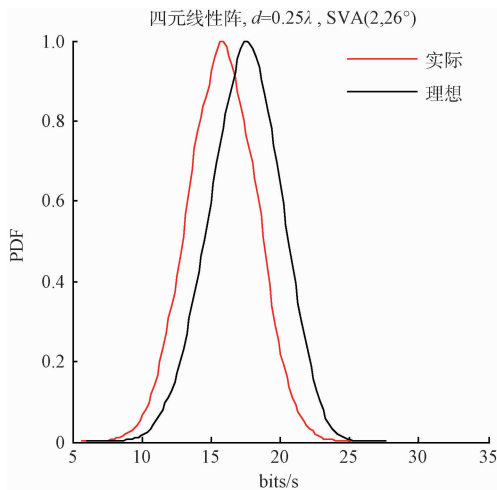


图 2 天线间距为  $0.25\lambda$  时,天线耦合效应对信道容量的影响

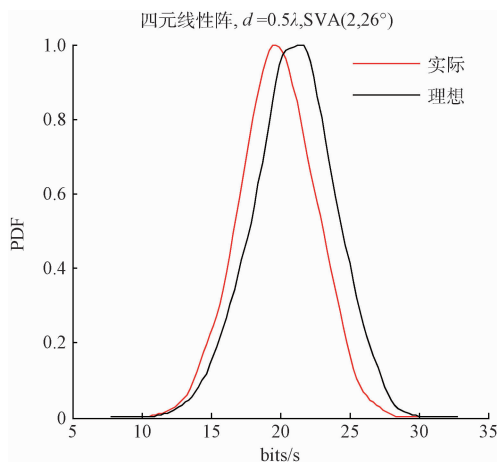


图 3 天线间距为  $0.5\lambda$  时,天线耦合效应对信道容量的影响

## 4 结 论

天线耦合效应严重地影响了无线通信系统的性能。本文分析了不同天线间距所产生的耦合效应对信道容量的影响,仿真结果与实际无线通信系统的表现相吻合,可以为紧耦合 MIMO 系统的设计提供指导性的意见。

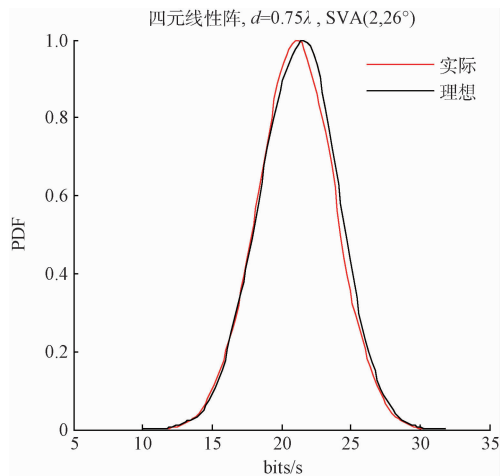


图 4 天线间距为  $0.75\lambda$  时,天线耦合效应对信道容量的影响

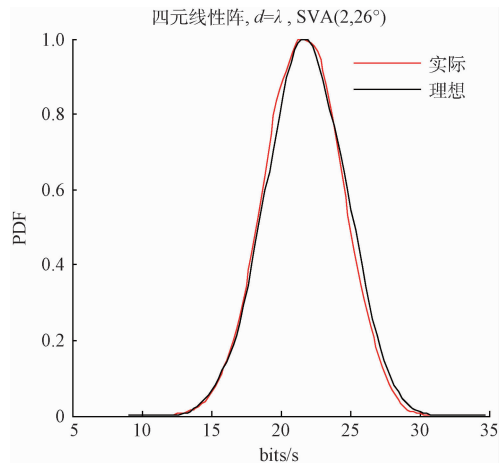


图 5 天线间距为  $\lambda$  时,天线耦合效应对信道容量的影响

## 参考文献

- [1] 康桂华. MIMO 无线通信原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [2] 刘静娴. 小型化天线设计及其可重构技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [3] 胡国庆. MIMO 系统的终端天线耦合研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [4] JAGADISH M, RAMYA T, PRADEEP A S. Design and performance analysis of compact MIMO antenna by mutual coupling suppression between elements[J]. Eersa Publications, 2014(3):131-135.
- [5] CHO Y S, KIM J, YANG W Y, et al. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB [M]. Wiley Publishing, 2010.

(下转第 107 页)