

移动性对MIMO无线信道性能的影响

李 忻, 聂在平, 伍裕江

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】提出了MIMO无线信道动态收发模型,分析了收发天线的运动对MIMO无线信道空域相关性及其容量的影响,得出其影响是由收发天线的初始位置及其运动速度决定的,空域相关性随天线单元间距增大而减小,随散射信号角度扩展增大不是一致减小,存在使相关性达最小的角度扩展值,并通过数值模拟得到了验证,拓展了MIMO散射无线衰落信道模型的研究。

关键词 移动性; MIMO信道; 信道容量; 空域相关性

中图分类号 TN 911.2 文献标识码 A

Impact of Mobility on Performances of MIMO Wireless Channels

Li Xin, Nie Zaiping, Wu Yujiang

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Based on multiple-input-multiple-output (MIMO) scattering wireless fading channel model, a dynamic receiving and transmitting model for MIMO wireless channels is proposed in this paper, which is used for analyzing the impact of mobility of transceiver antennas on spatial correlation and capacity of MIMO wireless channels. The results show that the effects are determined by the original positions of transceiver antennas and by their velocity. The simulation results validate this impact and point out that there exists an optimum angular spread that forces spatial correlation, which decreases with increasing antenna spacing and does not consistently decrease with increasing angular spread, to reach minimum.

Key words mobility; MIMO channels; channel capacity; spatial correlation

MIMO无线信道能够提供分集增益与并行空域信道的复用增益。在一定传播条件下,容量可随天线单元数目线性增长^[1]。为研究MIMO系统的性能,首先需要建立MIMO无线信道模型。MIMO散射无线衰落信道模型比独立同分布(iid)模型更接近实际^[2-4],但该模型没有考虑散射体及收-发天线的运动,假定散射信号的角度扩展值恒定,因此是一个“静态”模型。在实际无线移动通信系统中,收-发天线可能处于运动之中,且传播环境也不是恒定的,有必要研究收发多天线的运动对系统性能的影响。本文在考虑收发天线的相对运动下,提出MIMO无线信道动态收发模型,分析收发天线的运动对MIMO信道的空域相关性及其容量等性能的影响。

1 MIMO无线信道动态收发模型

基于MIMO散射无线衰落信道模型^[2-4],本文首先提出如图1的MIMO无线信道动态接收模型。图中:接收端来波散射信号角度扩展 $\Delta_r = \alpha_r/2$;接收天线运动速度为 v_r ,与天线轴成 α_r 角; D_r 是有效散射体距多天线

收稿日期:2004-01-20

基金项目:国家863计划资助项目(No.2002AA123032)

作者简介:李忻(1975-),男,博士生,主要从事新一代无线通信技术以及新型天线与分集技术的研究。

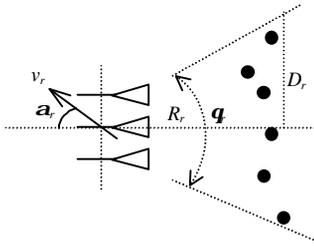


图1 MIMO信道动态接收模型

轴线的最大距离； R_{r0} 是有效散射体至接收多天线相位中心的初始距离。假定散射体位于多天线单元的辐射场区，可认为散射信号以平面波形式入射多天线单元。若仅考虑接收天线的运动，接收来波散射信号角度扩展由接收多天线的初始位置及其运动速度决定，可表示为

$$\Delta_r(t, v_r, \mathbf{a}_r) = \arctan\left(\frac{D_r}{R_{r0} + v_r t \cos(\mathbf{a}_r)}\right) \quad (1)$$

此时， D_r 恒定，令 $R_r = R_{r0} + v_r t \cos(\mathbf{a}_r)$ ，代入式(1)并两边微分化简得

$$-D_r(1 + \cot^2(\Delta_r))d\Delta_r = dR_r \quad (2)$$

实际上， D_r 远大于1，且 $\Delta_r \in [0, \pi/2]$ ，故式(2)表明角度扩展 Δ_r 随有效散射体与接收多天线相位中心的间距增大而减小，并且 Δ_r 越大，其减小越快，即接收天线距散射体越近，其运动对 Δ_r 影响越大，接收天线距散射体越远，其运动对 Δ_r 影响越小。

统计测试发现，散射信号在扩展角内可能服从确定均匀分布、随机均匀分布、高斯分布与拉氏分布等^[5]，可统一用其分布的标准差 s_r 来量度其角度扩展 Δ_r 。因此，在考虑接收天线的运动下，来波散射信号角度的标准差为

$$s_r(t, v_r, \mathbf{a}_r) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{D_r}{R_{r0} + v_r t \cos(\mathbf{a}_r)}\right) \quad (3)$$

其次，类似MIMO无线信道动态接收模型，可以建立MIMO无线信道动态发射模型，分析发射天线的运动对发射信号角度扩展 s_t 的影响。因此，在MIMO无线信道模型中，若同时考虑收发天线的运动，其影响可以归并到以上两个标准差参数中，构成MIMO无线信道动态收发模型。另外，若计及收发多天线的方向性，其影响也可归并到这两个标准差参数中。

2 MIMO信道的空域相关性与容量

根据散射信号在扩展角内的分布特性(即分布的标准差)，可求得收发信号的空域相关性。在MIMO无线信道动态收发模型中，多天线收发散射信号的角度扩展(或标准差)是多天线运动速度的函数，因此，收发多天线的运动直接影响到收发信号的空域相关性。比如，在来波散射信号角度为确定均匀分布下，多天线接收的散射信号间的空域相关系数为^[6]

$$[\mathbf{R}_{q_r, d_r}]_{m, k} = \frac{1}{S_r} \sum_{i=-(S_r-1)/2}^{(S_r-1)/2} \exp\left[-2\pi j(k-m) \frac{d_r}{l} \sin(q_{r, i})\right] \quad (4)$$

式中 来波方向角 $q_{r, i} = i q_r / (S_r - 1) = i 2\Delta_r / (S_r - 1)$ ， $i = -(S_r - 1)/2, \dots, (S_r - 1)/2$ ； S_r 是有效接收散射体数目， \mathbf{R}_{q_r, d_r} 为接收端的空域相关系数矩阵。类似的，散射信号角在其他分布下，也可求其相应的空域相关系数及其空域相关系数矩阵。

在MIMO无线系统中，设多天线系统包含 N_t 元发射天线， N_r 元接收天线，将收发天线附近的有效散射体视为虚拟收发天线，其信道矩阵可表示为^[2~4]

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{S_r}} \mathbf{R}_{q_r, d_r}^{1/2} \mathbf{G}_r \mathbf{R}_{q_{tr}, 2D_r / S_r} \mathbf{G}_t \mathbf{R}_{q_t, d_t}^{1/2} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{G}_r = [g_1, g_2, \dots, g_{N_r}]$ 与 $\mathbf{G}_t = [g_1, g_2, \dots, g_{N_t}]$ 分别是 $S_r \times N_r$ 与 $S_r \times N_t$ 的独立同分布瑞利衰落矩阵； \mathbf{R}_{q_r, d_r} 与 \mathbf{R}_{q_t, d_t} 分别是 $N_r \times N_r$ 与 $N_t \times N_t$ 的多天线收/发信号相关系数矩阵，它们受收、发多天线运动的影响； $\mathbf{R}_{q_{tr}, 2D_r / S_r}$ 是 $S_r \times S_r$ 的收端散射体接收的发端散射信号间的相关系数矩阵。因此，在发端多天线单元等功率发射下的MIMO无线信道的瞬时容量(bit/s · Hz⁻¹)为^[4]

$$C = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\mathbf{r}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] \quad (6)$$

式中 \mathbf{H} 是 $N_r \times N_t$ 的随机信道矩阵， \mathbf{I}_{N_r} 是 $N_r \times N_r$ 单位矩阵， \mathbf{r} 是各接收天线单元的平均信噪比。将式(5)代入式(6)可得MIMO信道容量与信道相关系数矩阵的关系

$$C = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\mathbf{R}}{S_r N_t} \mathbf{R}_{q_s, 2D_r/S}^{1/2} \mathbf{G}_t \mathbf{R}_{q_r, d_r} \mathbf{G}_t^H \mathbf{R}_{q_s, 2D_r/S}^{H/2} \mathbf{G}_r^H \mathbf{R}_{q_r, d_r} \mathbf{G}_r \right) \right] \quad (7)$$

上式表明, MIMO无线信道的容量是由收、发多天线及其虚拟多天线收、发信号间的空域相关系数矩阵决定的, 从而收发多天线的运动可能影响MIMO无线信道的容量。由于 \mathbf{H} 是随机的, 故 C 是随机的, 在衰落分段不变以及多个独立衰落周期进行编码的假定下, 本文可以将 C 的均值 $E_H\{C\}$ 视为随机MIMO无线信道的遍历容量^[7]。

3 数值模拟与分析

采用Monte Carlo仿真模拟收发天线的运动对MIMO无线信道的空域相关性及其容量的影响。图2给出接收天线在 $V_r=100\lambda/s$ 的运动速度下、第3s时信道的遍历容量。结果表明, 接收天线指向($\alpha_r=\pi$)与背离($\alpha_r=0$)散射区中心的两种运动对系统容量的影响是相反的, 这是因为当 $\alpha_r=0$ 时, 多天线接收信号的角度扩展(Δ_r)减小, 信号相关性可能增强, 容量下降, 反之, Δ_r 增大, 信号相关性可能减弱, 容量上升; 在信道容量较大时, 接收天线运动对信道容量影响较大, 这是由于此时接收天线距散射区中心较近的缘故; 在信道容量较大时, 接收天线指向散射区中心的运动对信道容量的影响程度比其远离散射区中心更大。这些结论与第1节的分析吻合。类似的, 本文模拟发射天线的运动影响, 可得出相似的结论。

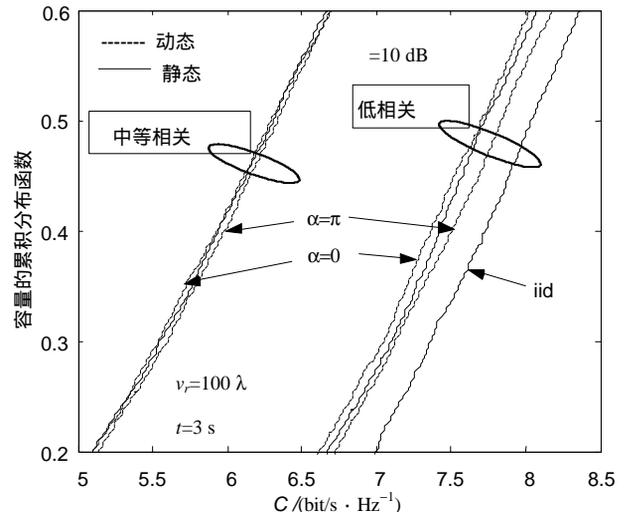


图2 接收天线的运动对3×3MIMO容量的影响

图3给出了在 $s_r=2^\circ$ 与 $\sigma_r=10^\circ$, 来波中心角 $F_0=30^\circ$ 时, d_r 对信道空域包络相关系数($|R_{xx+j} R_{xy}|$)

的影响。显见, 相关性随 d_r 增大而减小, 并在均匀分布下存在波动; 在 d_r 较小时, 三种来波分布下的相关性接近, 随 d_r 加大, 均匀分布下的相关性最低, 拉氏分布下的相关性最高; s_r 较小时, 相关性较高。

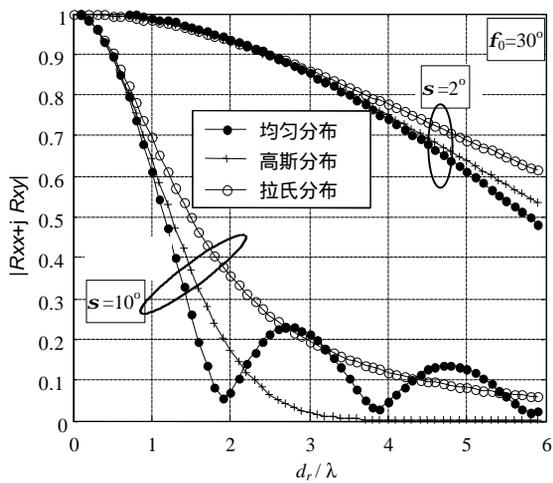


图3 多天线单元间距对信道空域相关性的影响

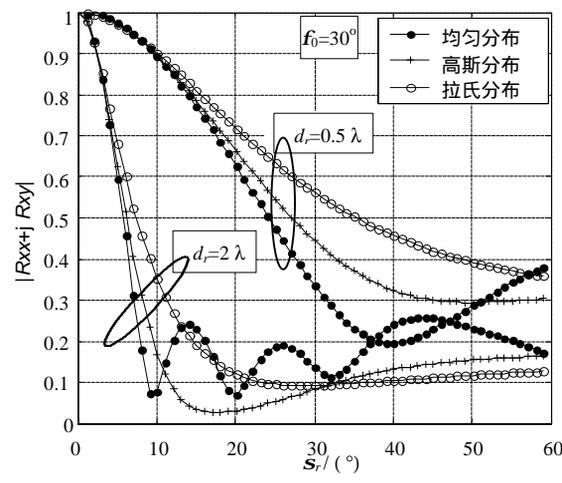


图4 来波角度扩展对信道空域相关性的影响

图4给出在接收天线单元间距 $d_r=0.5l$ 与 $d_r=2l$, $F_0=30^\circ$ 时, 来波角度分散程度 s_r 对信道空域包络相关系数的影响。图4表明: 空域相关系数不是随 s_r 增大一致减小, 存在使相关性最小的 s_r ; 三种分布预测的最低相关系数对应的 s_r 随接收天线单元间距增大而减小, 并且在相同单元间距下, 最低相关系数对应的来波分散程度在均匀分布下最低, 在拉氏分布下最高。

4 结 论

本文提出MIMO无线信道动态收发模型,分析收发天线的运动对MIMO信道的相关性及其容量的影响,得出这种影响是由收发天线的初始位置及其运动速度决定的;在信道容量较大时,收发天线的运动对信道容量影响较大,且指向散射区中心的运动对信道容量的影响程度比其远离散射区中心的运动更大;空域相关性随收发多天线间距增大而减小,随散射信号角度扩展增大不是一致减小,存在使相关性达最小的最佳角度扩展,通过数值模拟验证了这些影响,拓展了MIMO散射无线衰落信道模型的研究。在实际无线通信环境中,传输路径中的电磁散射体可能也处于运动之中,收发天线的方位也可能改变,天线单元间距可能较小,这些研究已由文献[8~10]中作了讨论^[8-10],从而比较全面地评估传输环境与天线特征对MIMO无线信道性能的影响。

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): 311-335
- [2] Gesbert D, Bolcskei H, Gore D, *et al.* MIMO wireless channels: capacity and performance prediction[C]. In Proc. IEEE Globecom conf.'00, 2000. 1 083-1 088
- [3] Gesbert D, Bolcskei H, Gore D, *et al.* Performance evaluation for scattering MIMO channel models[C]. In Proc: Signal, system and computer'00, 2000. 748-752
- [4] Gesbert D, Bolcskei H, Gore D, *et al.* Outdoor MIMO wireless channels: models and performance prediction[J]. *IEEE Trans. on Comm.*, 2002, 50(12): 1 926-1 934
- [5] Pedersen K, Mogensen P, Fleury B H. Spatial channel characteristics in outdoor environments and their impact on BS antenna system performance[C]. In proc: 48th IEEE Vehi. Tech.Conf., 1998. 719-723
- [6] Ertel R B, Cardieri P, Sowerby K W, *et al.* Overview of spatial channel models for antenna array communication systems[J]. *IEEE Personal Commun. Mag.*, Feb.1998, 10-22
- [7] Telatar I E. Capacity of multi-antenna gaussian channels[J]. *European Trans. Telecomm.*, 1999, 10(6): 585-595
- [8] Li Xin, Nie Zaiping. Dynamic MIMO scattering wireless channel model and performance[C]. In Proc: IEEE Int. Conf. Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)'04, vol.1, Chengdu, China, June 27~29, 2004, 269-272
- [9] Li Xin, Nie Zaiping. Effect of array orientation on performance of MIMO wireless channels[C]. In Proc: Progress in electromagnetics research symposium (PIERS)'04, Nanjing, China, Aug 28-31, 2004, 375
- [10] Li Xin, Nie Zaiping. Effect of mutual coupling on performance of MIMO wireless channels[C]. In Proc: 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)'04, Beijing, China, Aug. 18-21, 2004, 150-153

编 辑 徐安玉