

动态 MIMO 散射无线信道模型及性能分析

李 忻^{1,2}, 聂在平², 黄绣江³

(1. 上海贝尔阿尔卡特公司研创中心, 上海 201206; 2. 电子科技大学, 四川成都 610054; 3. 中国电子科技集团公司第 23 所, 上海 200043)

摘 要: 基于多入多出(MIMO)散射无线信道模型,提出一种动态 MIMO 散射无线信道模型,分析散射体及其收发多天线的运动对 MIMO 无线信道空域相关性及其容量的影响,得出这种影响是由收发天线的初始位置、运动速度及其传播环境决定的.数值模拟验证了这种影响,并指出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.

关键词: 动态; MIMO 信道; 信道容量; 空域相关性; 多天线

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1660-04

Dynamic MIMO Scattering Wireless Channel Model and Its Performance

LI Xin^{1,2}, NIE Zai-ping², HUANG Xiu-jiang³

(1. Alcatel Shanghai Bell Research & Innovation Center, Shanghai 201206, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

3. The 23rd Research Institute China Electronic Technology Group Co., Shanghai 200043, China)

Abstract: A dynamic MIMO scattering wireless channel model is proposed, based on the multiple-input-multiple-output (MIMO) scattering wireless channel model and is used to analyze the effect of mobility of the scatterers and transceiver antennas on the spatial correlation and capacity of the MIMO wireless channels. The conclusion is attained, which states that the effect is determined by original positions of transceiver antennas, the velocity as well as environments. The simulation results validate the effects and show 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: dynamic; MIMO channels; channel capacity; spatial correlation; multiple-antenna

1 引言

多入多出(MIMO)无线信道能够提供分集增益与并行空间信道复用增益,在特定条件下,其容量随多天线单元数目线性增长^[1].如果传播环境中散射稀少或天线元间距有限,空间衰落信号间存在一定的空域相关性,MIMO无线信道性能就会下降^[2].室外MIMO散射无线衰落信道模型^[3~5]比独立同分布(iid)模型更接近实际,但该模型没有考虑散射体及收发天线的运动影响,是一个“静态”模型.在实际无线移动通信系统中,收发多天线可能处于运动之中,传播环境也不是恒定的,有必要计及收发多天线及有效散射体的运动影响.由于已有文献对无线传播环境的时变特性导致多普勒频移而引发的信道时间选择性衰落进行了深入研究,特别是在时域相关性与频域相关性方面^[6,7],因此本文在空域相关性^[8]的研究框架下,考虑散射体与收发天线的运动,并将有效散射体数目建立为生灭随机过程,提出一种动态MIMO散射无线信道模型,分析散射体与收发天线的运动对MIMO信道的空域相关性及其容量的影响,通过数值模拟验证该模型的性能,拓展MIMO散射无线信道模型^[3~5]的研究.

2 动态 MIMO 散射无线信道模型

首先,分析接收多天线的运动对接收信号角度扩展的影响.基于MIMO散射无线衰落信道模型^[3~5],

本文提出如图1所示的动态MIMO散射无线信道模型,其收端散射信号的角度扩展为

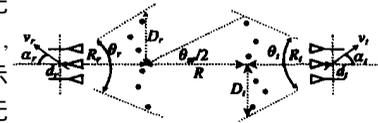


图1 动态 MIMO 散射无线信道模型

$\theta_r = \theta_r/2$;接收天线运动速度为 v_r ,与接收多天线轴线成 α_r 角; D_r 是有效散射体距多天线轴线的最大距离; R_0 是有效散射体至接收多天线相位中心的初始距离; R 是收端散射体中心与发端散射体中心的距离, $\theta_r/2$ 是收端散射体接收发端散射信号的角度扩展,其它参数的涵义类似.假定多天线单元附近的散射体位于其辐射场区,可认为散射信号以平面波形式入射多天线单元.在仅考虑接收天线的运动下,散射来波的扩展角度由接收多天线的初始位置及其运动速度确定,可表示为

$$\theta_r(t, v_r, \alpha_r) = \arctan\left(\frac{D_r}{R_0 + v_r t \cos(\alpha_r)}\right) \quad (1)$$

此时, D_r 恒定, 令 $R_r = R_{r0} + v_r t \cos(\theta_r)$, 代入式 (1) 并对两边微分化简得

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

实际中的 D_r 远大于 1 且 $\theta_r \in [0, \pi/2]$. 因此, 式 (2) 表明扩展角度 θ_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 θ_r 越大, 其减小越快, 即接收天线距散射体越近, 其运动对 θ_r 影响越大, 接收天线距散射体越远, 其运动对 θ_r 影响越小.

统计测试表明, 散射来波方位在扩展角内可能服从确定均匀分布、随机均匀、高斯与拉氏 (Laplacian) 分布等, 可统一用其分布的标准差 σ_r 来衡量其扩展角度 θ_r . 比如, 在来波方位均匀分布下, 其标准差可表示为

$$\sigma_r(t, v_r, \theta_r) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{D_r}{R_{r0} + v_r t \cos \theta_r}\right) \quad (3)$$

类似的, 可以分析发射天线的运动对发射信号角度标准差 (也称角度扩展) $\sigma_t(t, v_t, \theta_t)$ 的影响. 因此, 在 MIMO 无线信道模型中, 若仅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 散射无线信道动态收发模型.

其次, 分析散射体的运动对收、发信号角度扩展及其散射信号角谱分布的影响. 不妨称对接收天线有贡献的散射体所在的区域为散射区, 散射区内的散射体为有效散射体. 由于散射体的运动, 可认为在时段 $[0, T]$ 进入散射区的有效散射体数目服从泊松分布, 在单位时间内增加的有效散射体平均数为 λ_i , 有效散射体在散射区内滞留时间服从负指数分布, 它们在平均滞留 $1/\mu_i$ 时段后离开散射区. 因此, 某时刻散射区内的有效散射体数目形成一个非齐次生灭随机过程 $\{N(t), t \geq 0\}$, 其出生率为 λ_i , 消亡率为 μ_i . 其转移概率矩阵^[9]为

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda_0 & \lambda_0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_1 & -(\lambda_1 + \mu_1) & \lambda_1 & 0 & \dots \\ 0 & \mu_2 & -(\lambda_2 + \mu_2) & \lambda_2 & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于平均有效散射体数目构成状态空间 $\{0, 1, 2, \dots, j\}$, 包含可数无穷多个状态, 由 Kolmogorov-Feller 后向方程 $PQ = 0$ 及 $P_k = 1$, 可求其平稳分布如下

$$P_0 = \left[1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_j}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_j} \right]^{-1}, P_k = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_k} P_0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

在该随机过程平稳后, 收端有效散射体的平均数目为

$$S_r = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k = \sum_{k=1}^{\infty} k \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_k}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_k} P_0 \quad (6)$$

可作如下讨论: 若 $\mu_i = 0$, $N(t)$ 是纯生过程, 即无有效散射体离开散射区 (比如, 接收天线进入相对封闭的房间、大厅或运动场); 若 $\lambda_i = 0$, $N(t)$ 是纯灭过程, 即没有散射体进入散射区, 或进入散射区的散射体不是有效散射体 (比如, 接收多天线离开相对封闭的房间、大厅或运动场); 若 $\lambda_i = \mu_i$, 该过程达到瞬时动态平衡, 即有效散射体进入与离开散射区的速率总是相等 (比如, 散射体分布比较均匀的传播环境). 当 $\mu_i > \lambda_i$ 时, $N(t)$ 是齐次生灭随机过程, 其有效散射体的增

长与减少速率与时间无关, 再若 $\lambda_i < \mu_i$, 则平稳分布为

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i}, P_k = \left(\frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right), \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

$$S_r = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k = \frac{\lambda_i}{\mu_i - \lambda_i} \quad (8)$$

以上分析表明, 散射区内的有效散射体数目是由有效散射体的增长与减少速率以及初始有效散射体数目 (即传播环境) 决定的. 对于实际无线移动通信系统, 传播环境处于变动之中, 有效散射体在散射区内也是运动的, 其运动的速度 v_r 决定了散射区的大小 D_r 及散射体的分布 A (散射波角谱) 特征. 因此, 若仅考虑有效散射体运动的影响, 多天线接收散射信号的扩展角度可表示为

$$\sigma_r(D_r, R_r) = \arctan\left(\frac{D_r(S_r, V_r)}{R_{r0}}\right) \quad (9)$$

若同时计及有效散射体及接收多天线的运动, 多天线接收的散射信号的扩展角度可表示为

$$\sigma_r(t, v_r, \theta_r, S_r, V_r) = \arctan\left(\frac{D_r(S_r, V_r)}{R_{r0} + v_r t \cos \theta_r}\right) \quad (10)$$

其散射信号的角度分布的标准差为

$$\sigma_r(t, v_r, \theta_r, S_r, V_r) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{D_r(S_r, V_r)}{R_{r0} + v_r t \cos \theta_r}\right) \quad (11)$$

类似的, 可以分析发射天线附近的有效散射体平均数目 S_t 与运动速度 v_t , 得出发射散射信号角度分布的标准差为

$$\sigma_t(t, v_t, \theta_t, S_t, V_t) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{D_t(S_t, V_t)}{R_{t0} + v_t t \cos \theta_t}\right) \quad (12)$$

收端附近的有效散射体接收发端附近的有效散射信号的角度分布的标准差为

$$\sigma_{r-s}(R, t, S_r, V_r) = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{D_r(S_r, V_r)}{R}\right) \quad (13)$$

因此, 若同时考虑多天线与散射体的运动, 其影响可以归并到三种散射信号角度分布的标准差参数中. 另外, 在计及收发多天线的方向性以及散射体非理想散射的情形下, 其影响也可归并到这三种标准差参数中.

3 动态 MIMO 散射无线信道的空域相关性及其容量

根据散射信号在扩展角内的分布特性, 可评估收发信号的空域相关性. 在动态 MIMO 散射无线信道模型中, 三种散射信号角度分布的标准差是多天线运动速度及有效散射体运动速度的函数, 其运动直接影响到无线衰落信号的空域相关性及其信道容量. 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^[10]

$$[R_{r,d_r}]_{m,k} = \frac{1}{S_r} \exp\left[-2 \sum_{i=-S_r/2}^{S_r/2} \sin^2(\theta_{r,i})\right] \quad (14)$$

式中, 离散来波方向角 $\theta_{r,i} = i \pi / (S_r - 1) = i 2 \pi / (S_r - 1)$, $i = -S_r/2, \dots, S_r/2$; S_r 是收端有效散射体数目, R_{r,d_r} 为收端的空域相关系数矩阵. 类似的, 散射信号角在其它分布下, 也可求其相应的空域相关系数及其空域相关系数矩阵.

在该模型中, 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

$$H = \frac{1}{\sqrt{S_r}} R_{r,d}^{1/2} G_r R_{sr,2D_r/S_r}^{1/2} G_r R_{r,d}^{1/2} \quad (15)$$

式中, $G_r = [g_1, g_2, \dots, g_{N_r}]$ 与 $G_t = [g_1, g_2, \dots, g_{N_t}]$ 分别是 $S_r \times N_r$ 与 $S_r \times N_t$ 的 iid 瑞利衰落矩阵; R_{r,d_r} 与 R_{t,d_t} 分别是 $N_r \times N_r$ 与 $N_t \times N_t$ 的多天线/发信号相关系数矩阵, 它们受收发多天线运动的影响; $R_{sr,2D_r/S_r}$ 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, 受散射体运动的影响. 在发端天线单元等功率发射下的 MIMO 无线信道的瞬时容量^[4]为

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{1}{N_t} H H^H \right) \right] \quad (\text{Bits/s/Hz}) \quad (16)$$

式中, H 是 $N_r \times N_t$ 随机信道矩阵, I_{N_r} 是 $N_r \times N_r$ 单位矩阵, 是各接收天线单元的平均信噪比. 将式 (15) 代入式 (16) 可得 MIMO 信道容量与信道相关系数矩阵的关系

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{1}{S_r N_t} R_{sr,2D_r/S_r}^{1/2} G_r R_{r,d_r}^{1/2} G_t^H R_{st,2D_t/S_t}^{1/2} G_t^H R_{r,d_r}^{1/2} G_r \right) \right] \quad (17)$$

式 (17) 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, 从而收发多天线以及有效散射体的运动可能影响 MIMO 无线信道的容量. 由于 H 是随机的, C 也是随机的, 若假定衰落分段恒定以及在多个独立衰落周期进行编码, 可以把 C 的均值 $E_{Hf} \{C\}$ 视为随机 MIMO 无线信道的遍历容量^[11].

4 数值模拟与分析

首先采用蒙特卡罗仿真模拟收发天线的运动对 MIMO 无线信道容量的影响. 图 2 给出接收多天线的运动对 MIMO 系统遍历容量的影响的模拟结果, 这里接收天线运动速度设为 $v_r = 100$ /s, 收发天线单元间距均为 3, 给出在其运动第 3 秒时信道的遍历容量, 其它参数同文献 [3~5]. 显然, 接收天线指向 ($\sigma_r = 0$) 与背离 ($\sigma_r = \pi$) 散射区中心的两种典型运动对系统容量的影响是相反的, 这是因为当 $\sigma_r = 0$ 时, 多天线接收信号的角度扩展 (σ_r) 减小, 信号相关性可能增强, 容量下降, 反之, σ_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比其远离散射区中心更大. 这些结论与理论分析吻合. 类似的, 模拟发射天线的运动影响, 可以得出相似的结果, 这里从略.

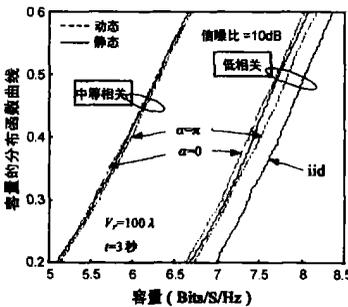


图 2 接收天线的运动对 3x3 MIMO 系统容量的影响

图 2 接收天线的运动对 3x3 MIMO 系统容量的影响

由于有效散射体的运动决定了散射区的大小及信号散射角谱的分布特征, 在同时考虑收发天线与散射体的运动时, 只

需考察接收散射信号角度扩展的标准差 (设为 σ_r) 对信道的影响, 即统一用 σ_r 来衡量有效接收散射体在随机均匀分布、高斯分布与拉式分布下的分散程度, 模拟 σ_r 与接收散射体间距 (设为 d_r) 对散射信号空域相关性的影响.

图 3 给出了在 $\sigma_r = 2$ 与 $\sigma_r = 10$ 以及来波中心角 $\phi_0 = 30$ 时, d_r 对信道空域包络相关系数 ($|R| = |R_{xx} + jR_{xy}|$) 的影响. 结果表明: 空域相关性随 d_r 增大而减小, 但在均匀分布下, 相关性存在波动; 只在 d_r 较小时, 三种来波分布下的空域相关性接近, 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; 而 σ_r 较小时, 空域相关性较高.

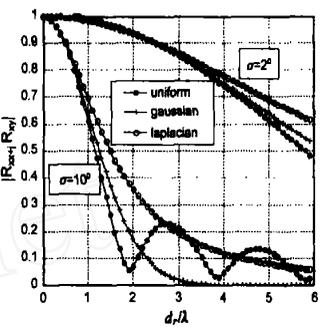


图 3 收端散射体间距影响信道空域相关性 ($\phi_0 = 30^\circ$)

图 4 给出了在 $d_r = 0.5$ 与 $d_r = 2$ 以及 $\phi_0 = 30$ 时, σ_r 对信道空域包络相关系数的影响. 显然, 空域相关系数随 σ_r 增大非一致减小, 存在使相关性最小的 σ_r ; 三种分布预测的最低相关系数对应的 σ_r 随虚拟接收天线单元间距增大而减小, 并且在相同间距下, 最低相关性对应的角度扩展在均匀分布下最低, 在拉氏分布下最高.

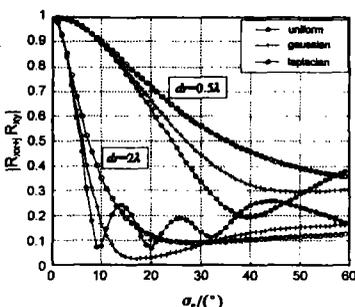


图 4 散射信号角度扩展影响信道空域相关性 ($\phi_0 = 30^\circ$)

5 结束语

本文基于 MIMO 散射无线衰落信道模型, 提出了一种动态 MIMO 散射无线信道模型, 将有效散射体数目建立为生灭随机过程, 在空域相关性的研究框架下分析了散射体与收发天线的运动对 MIMO 无线衰落信道的相关性及其容量的影响, 拓展了 MIMO 散射无线衰落信道模型的研究^[5,12]. 数值模拟结果验证了该模型的性能, 并得出了有用的结论: 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更大; 空域相关性随接收多天线间距增大而减小, 随角度扩展增大非一致减小, 存在使相关性达最小的角度扩展值. 在本文假定多天线单元附近的散射体位于其辐射场区而认为散射信号以平面波形式入射多天线单元的情形下, 收发天线以及散射体的相对运动引发的信道时变特性主要体现在散射信号角度扩展与散射波角谱分布的时变上, 因而传播环境的时变特性导致的多普勒频移不影响空域相关性, 但是它影响时域、频域以及空时频联合相关性, 这些可参考相关的研究文献 [6,7].

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 , FOSCHINI D J , GANS M J , et al . Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems[J] . IEEE Trans Comm ,2000 ,48(3) :502 - 513 .
- [3] GESBERT D , BOLCSKEI H , CORE D , et al . MIMO wireless channels : capacity and performance prediction[A] . Proc IEEE GlobeCom Conf . ' 00 [C] , San Francisco , CA : IEEE Press , 2000 , (2) :1083 - 1088 .
- [4] GESBERT D , BOLCSKEI H , CORE D , et al . Performance evaluation for scattering MIMO channel models[A] . Proc 34th Asilomar Conf Signals , Systems and Computers '00[C] . Pacific Grove , CA : Iospan Wireless Inc . , 2000 , (1) :748 - 752 .
- [5] GESBERT D , BOLCSKEI H , CORE D , et al . Outdoor MIMO wireless channels : models and performance prediction[J] . IEEE Trans Comm , 2002 ,50(12) :1926 - 1934 .
- [6] 付景兴 , 杨大成 , 常永宇 . 信道相关性对多人多出系统性能的影响[J] . 北京 : 北京邮电大学 , 2003 , 26(1) :23 - 26 .
FU J X , YANG D CH , CHANG Y Y . The impact of channel correlation variation on the performance of multiple input - multiple output systems [J] . Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications , 2003 , 26(1) :23 - 26 . (Chinese Source)
- [7] 杨大成 , 等 . 移动传播环境理论基础 , 分析方法和建模技术 [M] . 北京 : 机械工业出版社 , 2003 .
YANG D CH , et al . Mobile propagation environment : principles , analysis methods and modeling techniques [M] . Beijing : China machine press , 2003 . (Chinese Source)
- [8] 李忻 , 聂在平 . MIMO 信道中衰落信号的空域相关性评估[J] . 电子学报 , 2004 , 32(12) :82 - 86 .
LI X , NIE Z P . Evaluating the spatial correlation of fading signals in MIMO channels[J] . Acta Electronica Sinica , 2004 , 32(12) :82 - 86 . (Chinese Source)
- [9] POPOULIS A . Probability , Random variables , and Stochastic Process [M] , 2nd ed . , New York : McGraw-hill , 1984 .
- [10] ERTEL R B , CARDIERI P , SOWERBY K W , et al . Overview of spatial channel models for antenna array communication systems [J] . IEEE Personal Commun , 1998 , 5(1) :10 - 22 .
- [11] TELATAR I E . Capacity of multiple antenna gaussian channels [R] . AT&T tech . memo , 1995 .
- [12] LI X , NIE Z P . Dynamic MIMO scattering wireless channel model and performance [A] . Proc IEEE Int Conf Commun , Circuits and Systems (ICC-CAS 04) [C] . Chengdu , China : IEEE Press June 2004 , 1 :269 - 272 .

作者简介:



李忻男, 1975 年生于四川南充, 电子科技大学博士毕业, 上海贝尔阿尔卡特股份有限公司博士后, 1999 年毕业于重庆邮电学院无线电通信工程系, 获工学学士学位; 同年在该校攻读通信与信息系统专业硕士学位, 从事无线通信技术、智能天线技术、3G 联合检测、干扰消除技术等研究, 2002 年在电子科技大学电子工程学院攻读信息与通信工程专业博士学位, 兼修电磁场与微波技术, 从事无线通信中的新型天线技术、移动通信新技术、智能天线技术、后 3G 技术、MIMO 无线通信技术与 OFDM 技术等研究, 申请中国专利 8 项, 主持并完成 6 项科研项目, 在国内外发表学术论文 40 余篇。

E-mail : Y99LX @163 . com .



聂在平男, 1946 生于陕西西安, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 1981 年在现电子科技大学获硕士学位; 1987 ~ 1989 年在美国伊利诺依大学电磁实验室从事研究工作; 1990 年以来主持并完成 20 余项研究课题, 先后获国家科技进步二等奖一项, 省、部级科技进步一、二、三等奖共五项, 在国内外发表学术论文 200 余篇, 主要研究兴趣包括: 计算电磁学、电磁散射与逆散射、非均匀介质中的场与波、新一代移动通信中的多天线技术等。