

文章编号: 1001-893X(2012)04-0544-04

一种新的 MIMO 信道模型*

刘 辉¹, 周 灵², 陈东锋¹, 张复春¹

(1. 空军航空大学航空 理论系, 长春 130022; 2. 华东交通大学外国语学院, 南昌 330013)

摘 要: 实际无线通信环境中发送天线之间以及接收天线之间存在相关性。针对以上特点, 从多径 MIMO 信道的特性出发, 首先建立发射天线相关系数矩阵和接收天线相关系数矩阵, 并将它们引入无线信道的莱斯 MIMO 信道模型中。最后通过分析 LOS MIMO 信道相关模型和瑞利衰落 MIMO 信道相关模型, 给出了具体的建模步骤。仿真结果表明采用本文方法产生的信道模型的 MIMO 系统误码率更低, 从而验证了该信道模型能够较好地模拟 MIMO 系统的空间信道。

关键词: 无线信道; 莱斯 MIMO 信道; 相关性; 信道模型; 系统误码率

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.024

A New MIMO Channel Model

LIU Hui¹, ZHOU Ling², CHEN Dong-feng¹, ZHANG Fu-chun¹

(1. Aviation Theory Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

2. Foreign Languages Department, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The transmitter antennas or receiver antennas are correlated in the practical wireless telecommunication environment. According to the above feature, the correlation coefficient matrixes of transmitter antennas and receiver antennas are first constructed based on the characters of multi-path MIMO channel. And the matrixes are taken into the Rice MIMO channel model. Finally, the detailed steps of constructing channel model are presented through analysing the LOS and Rayleigh MIMO channel correlation mode. Simulation results show that the bit error rate of MIMO system adopting the channel model proposed in this paper is lower and the effectiveness of the proposed channel model is proved.

Key words: wireless channel; Rice MIMO channel; correlation; channel model; bit error rate of system

1 引 言

MIMO 系统利用无线信道的多径传播开发空间资源, 建立空间并行矩阵传输通道, 利用空时联合处理提高无线通信系统的容量与可靠性。然而, 决定空时处理性能的关键因素在于无线传播信道的空时特性。研究表明^[1-2]只有在无线信道散射传播的多径分量足够丰富, 各对发-收天线单元间的多径衰落才趋于独立, 从而信道矩阵才趋于满秩。如果散

射不够丰富或天线单元间距较小等, 多径衰落将不完全独立, 信道矩阵也非满秩^[3], MIMO 信道的空间优势得不到充分发挥, MIMO 系统传输方案的性能将下降, 即信道传播条件决定了 MIMO 系统的信道容量; 另一方面, MIMO 系统需开发更稳健的空时处理算法, 比如空时编解码、空时均衡与 MIMO 收发信机算法, MIMO 无线信道模型可以模拟各种实际信道条件, 评估各种空时处理算法相对性能, 仿真与优化设计高性能的通信系统。

* 收稿日期: 2011-11-30; 修回日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102120)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61102120)

自 Ertel 等发表关于空间信道建模的综述文章以来, MIMO 信道建模就一直是该领域研究的热点^[4], 已有大量文献对该领域进行了广泛而深入的研究^[5-6]。但这些研究都是在不考虑天线之间的相关性的前提下进行的, 因此本文根据无线信道的传播特性, 建立了莱斯 MIMO 信道的相关模型, 并给出了具体的建模步骤。

2 莱斯 MIMO 信道的相关模型

文献[7]和[8]已经证明: 只有相邻的天线环境产生阵列元素之间的相关, 而对链路另一端的阵列元素没有影响。因此为了简化分析, 假设接收天线之间的相关性不依赖于发射天线, 反之亦然。

考虑图 1 具有 M 个发射天线和 N 个接收天线的 MIMO 系统, 它的信道矩阵可以表示为

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \cdots, \mathbf{h}_j, \cdots, \mathbf{h}_N]^T \quad (1)$$

式中, $\mathbf{h}_j = [h_{j1}, h_{j2}, \cdots, h_{jM}]$, $j = 1, 2, \cdots, N$ 。

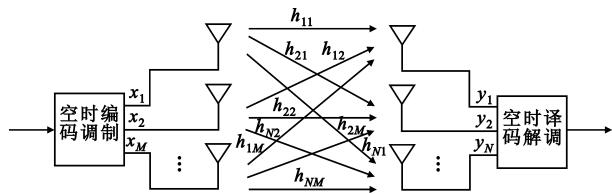


图 1 MIMO 系统框图
Fig.1 Structure of MIMO system

为了计算天线的相关系数, 将 MIMO 系统的信道矩阵 $\mathbf{H}$ 矢量化得 NM 个元素的矢量 $\mathbf{h}$:

$$\mathbf{h} = \text{vec}(\mathbf{H}) = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \cdots, \mathbf{h}_j, \cdots, \mathbf{h}_N] \quad (2)$$

定义 $NM \times NM$ 维的信道相关矩阵 $\mathbf{\Theta}$, 如下所示:

$$\mathbf{\Theta} = E[\mathbf{h} \mathbf{h}^H] \quad (3)$$

由于已假设发射天线和接收天线之间的相关性互不依赖, 因此定义接收天线相关系数

$$\rho_{mn}^R = E[h_{mp}^* h_{np}], m = 1, 2, \cdots, N; n = 1, 2, \cdots, N \quad (4)$$

发射天线相关系数

$$\rho_{pq}^S = E[h_{mp}^* h_{mq}], p = 1, 2, \cdots, M; q = 1, 2, \cdots, M \quad (5)$$

根据式(4)和式(5), 可以为接收天线和发射天线分别定义 $N \times N$ 维的接收天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_R$ 和 $M \times M$ 维的发射天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_S$, 它们具有以下形式:

$$\mathbf{\Theta}_R = \begin{bmatrix} \rho_{11}^R & \rho_{12}^R & \cdots & \rho_{1N}^R \\ \rho_{21}^R & \rho_{22}^R & \cdots & \rho_{2N}^R \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho_{N1}^R & \rho_{N2}^R & \cdots & \rho_{NN}^R \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (6)$$

$$\mathbf{\Theta}_S = \begin{bmatrix} \rho_{11}^S & \rho_{12}^S & \cdots & \rho_{1M}^S \\ \rho_{21}^S & \rho_{22}^S & \cdots & \rho_{2M}^S \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho_{M1}^S & \rho_{M2}^S & \cdots & \rho_{MM}^S \end{bmatrix}_{M \times M} \quad (7)$$

通常将无线信道建模为 LOS 分量(视距传播分量)和 Rayleigh 分量(即瑞利衰落分量)之和, 这种 LOS 传播的瑞利衰落模型称为莱斯(Rice)模型。莱斯随机变量 x 的概率密度函数为^[9]

$$p(x) = 2x(1 + K)e^{-K - (1 + K)x^2} I_0(2x\sqrt{K(K + 1)}) \quad (8)$$

式中, $x \geq 0$, $I_0(\cdot)$ 是第一类修正零阶贝塞尔函数, K 称为 Rice 因子,

$$K = \frac{D^2}{2\sigma_r^2} \quad (9)$$

式中, D^2 和 $2\sigma_r^2$ 分别是 LOS 平均功率和散射平均功率, 当功率归一化时有:

$$D^2 + 2\sigma_r^2 = 1 \quad (10)$$

于是, 莱斯 MIMO 模型的信道矩阵可分解为

$$\mathbf{H} = \mathbf{D}\mathbf{H}_{\text{LOS}} + \sqrt{2}\sigma_r\mathbf{H}_{\text{Ray}} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{H}_{\text{LOS}}$ 是 LOS 传播而无 Rayleigh 衰落时的信道矩阵, $\mathbf{H}_{\text{Ray}}$ 是瑞利衰落而无 LOS 时的信道矩阵。当考虑天线的相关性时, 将接收天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_R$ 和发射天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_S$ 引入式(11)可得莱斯 MIMO 信道的相关矩阵为

$$\mathbf{H}_C = \mathbf{D}\mathbf{K}_{\text{RLOS}}\mathbf{H}_{\text{LOS}}\mathbf{K}_{\text{SLOS}} + \sqrt{2}\sigma_r\mathbf{K}_{\text{RRay}}\mathbf{H}_{\text{Ray}}\mathbf{K}_{\text{SRay}} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{K}_{\text{RLOS}}$ 、 $\mathbf{K}_{\text{SLOS}}$ 分别为在 LOS 传播条件下接收天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_{\text{RLOS}}$ 和发射天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_{\text{SLOS}}$ 的 Cholesky 分解, 且均为下三角矩阵, 即:

$$\mathbf{\Theta}_{\text{RLOS}} = \mathbf{K}_{\text{RLOS}}\mathbf{K}_{\text{RLOS}}^H \quad (13)$$

$$\mathbf{\Theta}_{\text{SLOS}} = \mathbf{K}_{\text{SLOS}}\mathbf{K}_{\text{SLOS}}^H \quad (14)$$

$\mathbf{K}_{\text{RRay}}$ 、 $\mathbf{K}_{\text{SRay}}$ 分别为在 Rayleigh 衰落传播条件下接收天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_{\text{RRay}}$ 和发射天线相关系数矩阵 $\mathbf{\Theta}_{\text{SRay}}$ 的 Cholesky 分解, 都为下三角矩阵, 即:

$$\mathbf{\Theta}_{\text{RRay}} = \mathbf{K}_{\text{RRay}}\mathbf{K}_{\text{RRay}}^H \quad (15)$$

$$\mathbf{\Theta}_{\text{SRay}} = \mathbf{K}_{\text{SRay}}\mathbf{K}_{\text{SRay}}^H \quad (16)$$

从式(12)中可看出, 要想得到莱斯 MIMO 信道的相关矩阵 $\mathbf{H}_C$ 的表达式, 有必要分别对 LOS 和 Rayleigh 衰落传播条件下的 MIMO 信道相关模型进行研究, 以分别得到在两种传播条件下的发射天线和接收天线的相关系数矩阵。以下将分别讨论如何估计得到这两种传播条件下的天线相关系数。

3 LOS MIMO 信道的相关模型

LOS MIMO 信道的相关模型^[9]是只有 LOS 传播而无瑞利衰落时的信道模型。考虑该 LOS MIMO 系统模型有 M 根发射天线和 N 根接收天线,发射天线和接收天线均为线性阵列,其间距分别为 d_s 和 d_r ,假设发射天线和接收天线之间的距离(用 R 表示)远远大于 d_r 或 d_s 。

由于系统为无瑞利衰落、视距传播的系统,信道矩阵的元素(用 h_{np} 表示)可表示如下:

$$h_{np} = e^{-j2\pi\frac{R_{np}}{\lambda}}, n = 1, 2, \cdots, N; p = 1, 2, \cdots, M \quad (17)$$

其幅度已经归一化, R_{np} 是接收天线 n 和发射天线 p 之间的距离。

由于已假设接收天线和发射天线元素之间的相关系数是独立的,于是,可以对一个固定的发射天线元素(比如第一个, $p = 1$)计算接收天线元素的相关系数,显然这样的分析不失一般性。在这种情况下,对于 LOS MIMO 系统模型来说,接收天线相关系数为

$$\rho_{mn}^R = E[h_{m1}^* h_{n1}], m = 1, 2, \cdots, N; n = 1, 2, \cdots, N \quad (18)$$

将式(17)中的信道元素代入式(18)中,可得相关系数

$$\rho_{mn}^R = E[e^{-j2\pi\frac{R_{n1}-R_{m1}}{\lambda}}] \quad (19)$$

当侧向阵列的方位角为 $\pi/2$, 且 R_{n1} 和 R_{m1} 很大时,式(19)的相关系数可近似为

$$\rho_{mn}^R = \begin{cases} e^{-j2\pi\frac{d_{mn}}{\lambda}\sin\alpha}, & m \neq n \\ 1, & m = n \end{cases} \quad (20)$$

式中, d_{mn} 是接收天线元素 m 和 n 之间的距离, α 是波达方向(DOA)。

按照上述方法,同样可类似地得到发射天线的相关系数。将它们分别代入式(6)和(7)可得在 LOS 传播条件下的接收天线相关系数矩阵 Θ_{RLOS} 和发射天线相关系数矩阵 Θ_{SLOS} 。

4 瑞利衰落 MIMO 信道的相关模型

对于瑞利衰落 MIMO 信道的传播模型^[9],它由 N 根全向接收天线和 M 根全向发射天线组成, N 根接收天线和 M 根发射天线均按线性排列,间距分别为 d_r 和 d_s ,天线阵列周围布满散射体。发射天线发射的信号被环绕接收天线的散射体反射,从散射体到接收天线的信号的平面波到达方向为 α 。

对规则排列并且方位角为 $\pi/2$ 的线性天线阵列来说,天线 m 和 n (距离为 d_{mn})接收到的信号的相关系数为

$$\rho_{mn}^R = E[e^{-j2\pi\frac{R_{n1}-R_{m1}}{\lambda}}] \quad (21)$$

式中, $(R_{n1} - R_{m1})$ 可近似为 $R_{n1} - R_{m1} \approx d_{mn}\sin\alpha$ 。

接收天线的相关系数可进一步写为

$$\rho_{mn}^R = \begin{cases} \int_{-\alpha_r/2}^{\alpha_r/2} e^{-j2\pi\frac{d_{mn}}{\lambda}\sin(\alpha)} p(\alpha) d\alpha, & m \neq n \\ 1, & m = n \end{cases} \quad (22)$$

式中, $p(\alpha)$ 是波达方向的概率分布,或者称角度谱; α_r 是接收天线的角度扩展。

当角度谱满足 $-\pi$ 到 π 之间的均匀分布(即 $p(\alpha) = 1/(2\pi)$) 时,相关系数 ρ_{mn}^R 由下式给出^[10]:

$$\rho_{mn}^R = J_0\left(2\pi\frac{d_{mn}}{\lambda}\right), m \neq n \quad (23)$$

式中, $J_0(\cdot)$ 是零阶贝塞尔函数。

与 LOS 传播条件下的方法类似,在求得相关系数后,根据式(6)和(7)可得在瑞利衰落下接收天线相关系数矩阵 Θ_{RRay} 和发射天线相关系数矩阵 Θ_{SRay} 。

概括起来,实现莱斯 MIMO 信道的相关模型的方法如下:

(1)根据特定的几何分布,包括发送和接收端的天线阵列元素间隔、到达角度和离开角度、角度扩展及其分布等几何参数,按照一定的空间相关函数分别计算出在 LOS 传播和瑞利衰落下的发送端和接收端天线的相关系数,即本文的式(20)和式(23);

(2)将两种情况下的发送端和接收端天线的相关系数代入式(6)和式(7)中,得到接收天线的相关系数矩阵 Θ_{RLOS} 和 Θ_{RRay} 以及发射天线的相关系数矩阵 Θ_{SLOS} 和 Θ_{SRay} ;

(3)按照式(13)~式(16)对第 2 步得到的 4 个天线相关系数矩阵进行 Cholesky 分解;

(4)将 Cholesky 分解的结果代入式(12)即可得到莱斯 MIMO 信道的相关模型。

5 仿真结果

为了验证上述 MIMO 信道模型的有效性,建立以下 MIMO 仿真系统:发射天线个数为 4,接收天线个数为 2,收发两端都采用均匀直线阵列,天线阵元的间距为半波长,调制方式为 BPSK。

图 2 仿真了采用不考虑天线相关的信道模型(传统模型)和本文信道模型的 MIMO 系统的误码率性

能。由图可以看出,采用本文信道模型的系统误码率性能要高于采用传统信道模型的 MIMO 系统。这是由于实际天线之间存在相关性,考虑天线相关性的本文 MIMO 信道模型更接近实际测量信道模型。

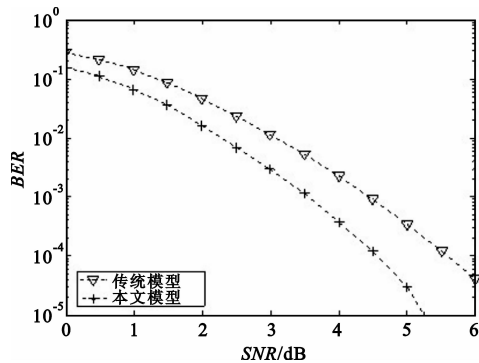


图 2 采用不同信道模型的系统误码率性能比较
Fig.2 Comparison of system bit error rate using different channel model

6 结 论

本文在传统莱斯 MIMO 信道模型的基础上,建立了一种考虑天线相关性的 MIMO 信道模型。通过仿真分析可知本文的模型更接近实际测量的信道模型。该模型能够为 MIMO 无线链路性能仿真、系统容量分析以及实现算法性能评估提供有力工具。

参考文献:

- [1] 刘辉,张复春,姜斌,等.频率选择性衰落 MIMO 信道容量分析[J].电讯技术,2010,50(1):15-20.
LIU Hui, ZHANG Fu-chun, JIANG Bin, et al. Analysis of MIMO Channel Capacity under Frequency Selective Fading [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(1): 15-20. (in Chinese)
- [2] Katie P L, Intarapanich A, Sesay A B, et al. Spatial Correlation and Capacity Measurements for Wideband MIMO Channels in Indoor Office Environment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1560-157.
- [3] Weichselberger W, Herdin M, Ozelik H, et al. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(1): 1-2.
- [4] Kermoal J P, Schumacher L. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation[J]. IEEE Journal on

- Select Areas Communications, 2002, 20(6): 1-2.
- [5] Alamouti S M. A simple transmitter diversity scheme for wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [6] YU K, Ottersten B. Models for MIMO propagation channels: a review[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2002, 2(7): 653-666.
- [7] Oestges C, Erceg V, Paulraj A J. A Physical scattering model for MIMO macrocellular broadband wireless channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 721-729.
- [8] Moustakas A, Baranger H, Balents L. Communication through a diffusive medium: coherence and capacity [J]. Science, 2000, 287(5451): 287-290.
- [9] Branka Vucetic, Jinhong Yuan. 空时编码技术[M]. 王晓海, 黄开致, 白红军, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004: 34-35.
Branka Vucetic, Jinhong Yuan. Space-Time coding[M]. Translated by HUANG Xiao-hai, HUANG Kai-zhi, BAI Hong-jun, et al. Beijing: China Machine Press, 2004: 34-35. (in Chinese)
- [10] Bolcskei H, Gesbert D, Paulraj A J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(2): 225-234.

作者简介:

刘 辉(1978—),男,江西吉安人,博士,讲师,主要研究方向为多天线技术、多载波技术、多用户检测;

LIU Hui was born in Ji'an, Jiangxi Province, in 1978. He is now a lecture with the Ph.D. degree. His research interests include multi-antenna technology, multi-carrier technology and multi-user detection.

Email: 15151515@126.com

周 灵(1980—),女,江西吉安人,硕士,讲师;

ZHOU Ling was born in Ji'an, Jiangxi Province, in 1980. She is now a lecture with the M.S. degree.

陈东锋(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为智能信息处理;

CHEN Dong-feng was born in 1979. He is now a lecture with the Ph.D. degree. His research direction is intelligent information management.

张复春(1971—),男,博士,副教授、硕士生导师,主要研究方向为系统工程。

ZHANG Fu-chun was born in 1971. He is now an associate professor with the Ph.D. degree and also the instructor of graduate students. His research direction is system engineering.