

空时频 MIMO 信道建模与实现

孙华丽 孟维晓 张乃通

(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要: 该文根据角度功率谱、多普勒谱、功率时延谱及收发两端天线的结构, 建立了一种多抽头的宽带 MIMO 信道模型。在建模过程中提出了一种改进的成形滤波器法, 通过加入随机相移来消除各条路径的相关性, 从而能够更好地仿真出独立的衰落信道。利用 Matlab 软件, 创建了一个无线 MIMO 信道仿真平台, 并针对 3GPP 标准 MIMO 信道模型进行了仿真。仿真结果表明用该文方法产生的信道特性与理论结果十分接近, 从而验证了改进信道模型能够较好地模拟 MIMO 系统的空间信道。

关键词: MIMO 信道模型; 功率时延谱; 多普勒谱; 角度功率谱

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2279-04

Modeling and Implementation of Space-Time-Frequency MIMO Channel

Sun Hua-li Meng Wei-xiao Zhang Nai-tong

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A multi-tap broadband channel model is established according to Power-Azimuth-Spectrum(PAS), Doppler-Power-Spectral-Density(DPSD), Power-Delay-Profile(PDP) and the antenna structures of both transmitter and receiver. An improved shaping-filter method, which can eliminate correlation of different taps by adding a random phase-shift, is proposed to simulate the independent fading channel. A simulation platform of the wireless MIMO channel is proposed using Matlab, then simulate the MIMO channel model based on 3GPP standard. The simulation results show that the obtained channel characteristics are close to the theory results, which proves the effectiveness of the improved channel model proposed in the paper.

Key words: MIMO channel model; PDP; DPSD; PAS

1 引言

MIMO 系统利用无线信道的多径传播特性, 开发空间资源, 建立空间并行矩阵传输通道, 通过空时联合处理达到提高无线通信系统的容量与可靠性的目的。当前探索 MIMO 无线信道的空时特性成为研究的焦点之一。MIMO 系统大容量的实现和系统其它性能的提高以及 MIMO 系统中使用的各种信号处理算法的性能优劣都极大地依赖于 MIMO 信道的特性, 特别是各个天线之间的相关性^[1]。最初对 MIMO 系统性能的研究与仿真通常都是在独立信道的假设下进行的, 这与实际的 MIMO 信道大多数情况下具有一定的空间相关性是不太符合的。因此, 建立有效的能反映 MIMO 信道空间相关特性并且适用于系统级和链路级仿真的 MIMO 信道模型以选择合适的处理算法并评估系统性能就变得相当重要了。

目前用于 MIMO 信道建模的方法主要有两大类^[2], 一类是确定性衰落信道建模方法, 另一类建模方法是基于统计特征的建模方法。与确定性建模方法相比, 这类方法试图利用统计平均的方法重新产生观察到的 MIMO 信道的衰落现

象。当前在 MIMO 信道模型研究领域中使用最普遍的建模方法是: 射线跟踪法、几何分布统计建模法和基于衰落相关性建模法。本文采用基于收发衰落相关统计特性的建模方法建立宽带 MIMO 无线衰落信道模型。

2 基于相关特性的统计 MIMO 信道建模及仿真平台的设计

建立 MIMO 信道模型就是要得到信道冲击响应, 而得到它的关键就是要确定抽头矩阵^[3]。本文利用 Matlab 软件建立了一个无线空时频 MIMO 衰落信道的仿真平台, 该仿真平台可用于移动通信的上行和下行链路的 MIMO 信道仿真。具体工作流程如下图 1 所示。

3 3GPP 标准 MIMO 信道模型的建模与实现

根据上节描述的仿真流程完成了 MIMO 信道仿真平台的搭建, 为了测试该平台的实用性能, 这里以 3GPP 标准 MIMO 信道模型为例进行信道的建模与实现。3GPP 所规定的 MIMO 无线信道模型是基于空时相关特性的统计 MIMO 信道模型^[4]。这里以 Case 2 宏小区为例, 进行 MIMO 信道建模和测试。下面首先介绍一下 MIMO 建模过程中的关键模块。

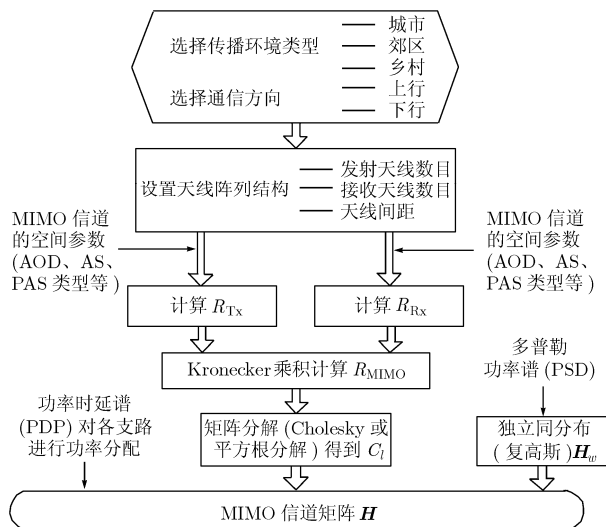


图1 基于相关特性的MIMO信道仿真流程图

(1) 相关系数矩阵 R_{UE} 和 R_{Node_B} 的计算 根据角度功率谱(PAS)的类型来确定相关系数矩阵。Case2 中移动台(UE)的 PAS 为均匀分布, 则相距为 d 的两个全向天线接收到的信道基带信号的实部和实部之间以及实部与虚部之间的相关函数分别如式(1)和式(2)所示^[5]。

$$R_{XX,U}(D) = J_0(D) + 4 \sum_{k=1}^{N_c} Q_{U,k} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{J_{2m}(D)}{2m} \cos(2m\varphi_{0,k}) \sin(2m\Delta\varphi_k) \quad (1)$$

$$R_{XY,U}(D) = 4 \sum_{k=1}^{N_c} Q_{U,k} \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{J_{2m+1}(D)}{2m+1} \sin[(2m+1)\varphi_{0,k}] \sin[(2m+1)\Delta\varphi_k] \quad (2)$$

其中 $D = 2\pi d/\lambda$, d/λ 表示归一化天线间距, J_m 为第一类 m 阶贝塞尔函数。利用式(3)计算复相关系数 $\rho_c(D)$ 。

$$\rho_c(D) = R_{XX}(D) + jR_{XY}(D) \quad (3)$$

此时得到的复相关系数 $\rho_c(D)$ 即为相关系数矩阵 R_{UE} 中的元素。

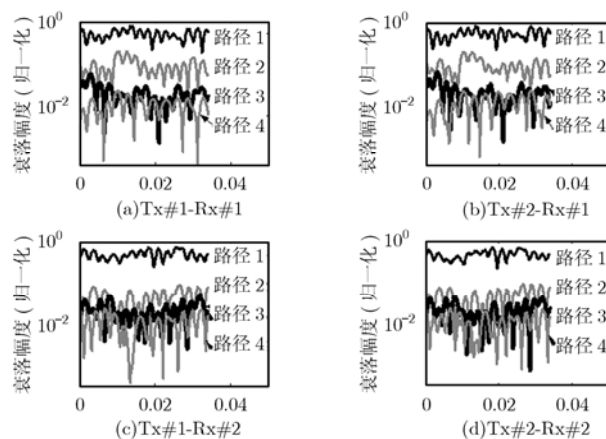
同理, 利用 PAS 为截短拉普拉斯分布的相关函数计算公式得到相关系数矩阵 R_{Node_B} 。

(2) 具有特定多普勒谱的复高斯随机过程的产生方法

这里提出了一种改进的成形滤波器法, 即在 Smith 介绍的成形滤波器方法^[6]的基础上加入均匀分布的随机相移, 从而有效地消除了不同路径间的相关性。具体方法如下: 第 1 步应该确定出代表“Classical”型多普勒谱的频域点的数目 (N) 及最大多普勒频移 (f_m)。对“Classical”型多普勒谱进行 N 点抽样, 得到离散“Classical”型多普勒谱; 其次, 用随机复数发生器产生基带线状频谱, 其正频率段(即 $N/2$ 正频率分量)具有复数权重, 利用实信号的性质, 负频率分量可由正频率的高斯复数值取共轭得到, 从而得到整个噪声源频谱; 然后, 将噪声源与离散“Classical”型多普勒谱相乘, 并加入均匀分布的随机相移, 以消除不同路径间的相关性; 最后,

对得到的频域信号进行快速傅里叶反变换(IFFT), 得到长度为 N 点的复随机序列, 即具有“Classical”型多普勒谱的独立的复高斯随机过程。

建模时设定用户端(UE)和基站(Node B)的天线数目都为 2, 天线之间的归一化距离都为 0.5 个波长, 链路方向为下行, 载波频率为 2.15GHz, 移动速度为 120km/h。对 Case2 传播环境下的信道进行建模, 得到信道矩阵 H 的时域衰落特性曲线图 2。由于 Case 2 有 4 条可分辨路径, 因此建模得到的信道矩阵 H 的每个元素的时域衰落特性图中有 4 条衰落曲线。另外, Case 2 的传播环境中存在直接视距分量(LOS)的情况, 建模时将 LOS 矩阵叠加在 MIMO 信道第 1 条可分辨径的信道矩阵上。

图2 信道矩阵 H 的时域衰落特性曲线

4 3GPP 标准空时频 MIMO 信道模型的验证

由前面关于 MIMO 信道模型的介绍我们已经知道, 信道建模就是求解信道矩阵 H 的过程。因此, 检测一个 MIMO 信道模型的正确性也就是看生成的信道矩阵 H 是否正确。下面分别从信道矩阵的空间相关性曲线、多普勒谱分布及功率时延谱分布 3 个方面来考察已建立的 MIMO 信道模型在空时频三维的衰落特性, 如图 3 至图 5 所示, 从而达到验证该空时频 MIMO 信道模型正确性的目的。

(1) 信道矩阵的空间相关特性 利用信道矩阵 H 计算各个元素之间的空间相关系数, 如图 3 所示, 绘出了各条路径的信道矩阵的各个元素之间的空间相关特性曲线。其中, 图 3(a)和图 3(b)是加入了随机相位的改进后的 MIMO 信道模型的空间相关特性曲线, 图 3(a)为立体图, 图 3(b)为平面图; 图 3(c)和图 3(d)是未改进的 MIMO 信道模型的空间相关特性曲线, 图 3(c)为立体图, 图 3(d)为平面图。

首先, 我们对改进后的 MIMO 信道模型的相关特性进行考察。由于 3GPP 标准的 Case 2 规定有 4 条可分辨路径, 因此分别得到 4 个描绘空间相关特性的立体图和平面图。图 3(a)中的虚线表示理论值(即根据信道环境参数得到的信道

相关系数矩阵 \mathbf{R}_{MIMO} 中的元素值), 实线表示仿真值(即利用信道矩阵 \mathbf{H} 计算得到的各个元素之间的空间相关系数值)。 $\langle h_{ij}^l, h_{pq}^l \rangle$ 表示考察第 l 条可分辨路径时, 从发天线 i 到收天线 j 的衰落系数与从发天线 p 到收天线 q 的衰落系数之间的相关系数。图 3(a)中的 z 轴与图 3(b)中的 y 轴代表的是各条路径间的相关系数。

如图 3(b)所示, 由于仿真中受迭代次数的影响, 实际得到的各个元素之间的空间相关性和理论值存在一定的误差。假设迭代次数为 N , 则 N 越大表明采样得到的瑞利衰落信道点数越多, 由于各衰落点的衰落幅度服从瑞利分布, 当 $N \rightarrow \infty$ 时才能更好地生成服从瑞利分布的衰落信道, 但是 N 不可能取无穷大, 所以就存在误差; 另外, N 越大对滤波器的采样率要求也越高, 运算复杂度也越大, 所以为了降低运算量, 对仿真中的迭代次数也需要有一定的限制。

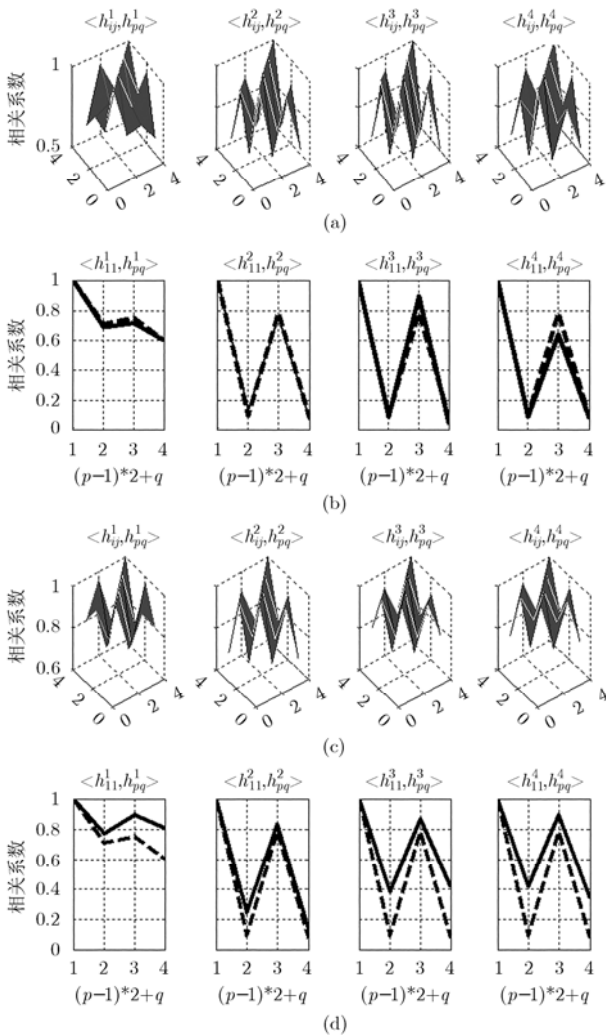


图3 各条路径的信道矩阵中各元素之间的空间相关曲线

然后, 我们对改进前后的 MIMO 信道模型的特性进行比较。对比图 3(b)和图 3(d)中的实线部分可以看出, 改进后的 MIMO 信道中各条可分辨路径间的相关系数减小, 即相

关性降低。从而验证了本文所提出的改进的成形滤波器法——通过加入随机相移来消除各条路径的相关性, 确实具有一定的有效性, 能够更好地仿真出独立的衰落信道。

(2)抽头系数的多普勒谱(PSD) 图4中给出了各条路径的多普勒谱。横坐标表示归一化的频率(f/f_m), 其中 f_m 为最大多普勒频移, 纵坐标表示归一化的多普勒功率值。3GPP 标准规定 Case 2 的多普勒谱为“Classical”型谱, 即完全对称的“U”型谱。仿真得到的各个抽头系数的多普勒谱近似于对称的“U”型谱。同样, 由于仿真中受迭代次数的影响, 实际得到的仿真结果和理论值存在一定的误差。

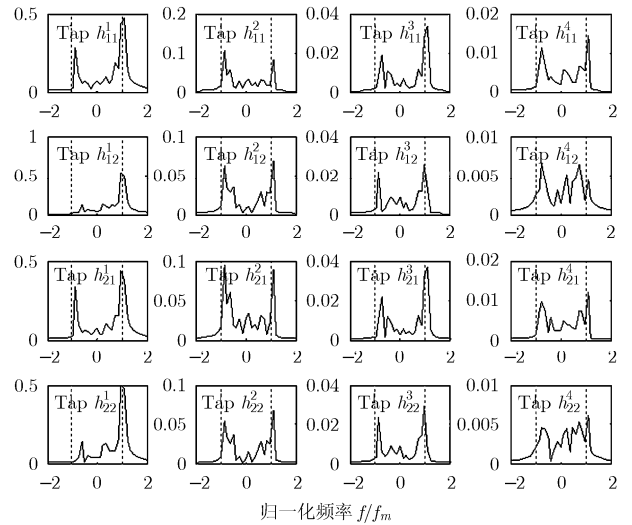


图4 各条路径的各个抽头系数的多普勒谱

(3)抽头系数的功率时延谱(PDP)曲线 图5为抽头系数的 PDP 曲线, 其中方点表示理论值, 圆点表示仿真值。由于在仿真中各条可分辨径的总功率都相对于第1条可分辨路径作了归一化, 即保证第一条路径的功率为 1(等效为 0dB)。因此从图5中可以看到第1个抽头理论值和仿真值是重合的, 只看到一个点。另外, 第2, 3, 4个抽头的仿真结果和理论值存在一定的误差。

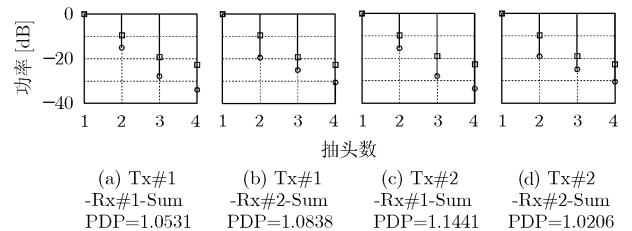


图5 抽头系数的功率时延谱(PDP)曲线

通过上面仿真结果与理论值的比较与分析可以看出, 所建立的空时频 MIMO 信道模型与实际信道模型很接近, 能够较好地模拟 MIMO 系统的空间信道。从而验证了该空

时频 MIMO 信道模型的正确性。

5 结束语

本文利用 Matlab 仿真软件搭建了基于相关特性的统计 MIMO 信道仿真平台,并针对 3GPP 标准规定的信道模型进行了仿真,并将仿真结果与理论值进行分析和比较,结果证明仿真值和理论值之间有很好的吻合,从而验证了模型的正确性。本文所建立的 MIMO 无线信道仿真平台完全可以用于 3GPP、IEEE802.16、IEEE802.11n 等无线 MIMO 系统中,作为研究这些系统下基于 MIMO 的各种关键技术和处理算法的一个仿真平台,用于评估各种处理算法和性能的优劣。

参考文献

- [1] Weichselberger W, Herdin M, Ozcelik H, and Bonek E. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006, 5(1): 1-2.
 - [2] Yu Kai. Modeling of multiple-input multiple-output radio propagation channels. [Ph. D. dissertation]. KTH university, 2002: 11-28.
 - [3] Kermoal J P and Schumacher L. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation. *IEEE J Select Areas Communication*, 2002, 20(6): 1-2.
 - [4] 3GPP. MIMO discussion summary. 3GPP TSG R1-02-0181, January 2002.
 - [5] Schumacher L, Pedersen K I, and Mogensen P E. From antenna spacings to theoretical capacities-guidelines for simulation MIMO system. Proc. IEEE PIMRC'2002, Lisbon, Portugal, Sept. 2002: 587-592.
 - [6] 杨大成. 移动传播环境. 北京: 机械工业出版社, 2003 年 8 月第 1 版: 228-230.
- 孙华丽: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为无线 MIMO 信道模型.
- 孟维晓: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为宽带无线传输、多天线无线信号处理.
- 张乃通: 男, 1934 年生, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为移动通信、卫星通信、数据通信.