

# 基于射线跟踪的 MIMO 信道容量分析

杨晋生 曹敏

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

**摘要:** 随着无线通信的发展, MIMO 已经成为无线通信领域中的研究热点, 场强和信道容量的分布预测是通信系统进行网络规划、管理和维护通信网的基础, 对无线网络的优化有着十分重要的意义。选用确定性模型射线跟踪模型, 采用镜像法来建立室内 MIMO 信道模型, 并使用 MATLAB 软件对所建立的模型进行仿真。首先建立特定的室内场景, 对其路径损耗进行预测, 并与实际测量值进行对比, 验证了该模型的正确性及有效性; 然后, 在理论上对 MIMO 容量进行分析; 最后, 仿真分析信噪比(SNR)以及天线数目对 MIMO 信道容量的影响。

**关键词:** MIMO; 射线跟踪; 路径损耗; 信道容量

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

## Channel capacity analysis for MIMO system based on ray-tracing

Yang Jinsheng Cao Min

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the development of wireless communication, MIMO has become a hot research in the field of wireless communication. The prediction of the distribution of field and the channel capacity is the basic of communication system network planning and management which has important significance of the wireless network optimization. In this paper, we select the ray-tracing model and the mirror image method to establish indoor MIMO channel model and use the Matlab software to simulate the model. Firstly, we should establish the specific indoor scene and predict the path loss. By the comparison of the predicted and measured values, we can verify the correctness and validity of the model. Then, we analyse the MIMO capacity in theory. Lastly, we simulate and analyse the effect of SNR and the number of antennas on the MIMO channel capacity.

**Keywords:** MIMO; ray-tracing; path loss; channel capacity

## 1 引言

多输入多输出系统(multiple-input multiple-output, MIMO), 具体来说是指通过采用多个发射天线, 多个接收天线来实现空间分集和时间分集的一种领先的无线通信技术。理论和实践已经证明, MIMO 技术能够在不增加系统带宽的情况下, 大大地提高通信系统的容量和频谱利用率<sup>[1]</sup>, 因而被认为是现代无线通信系统中的关键技术之一, 已经被成功的用于 WiMAX 和 4G 等无线移动通信系统中。

在无线通信系统设计中电波传播预测是一个非常重要的环节, 建立的无线通信系统的性能在很大程度上取决于电波预测的准确性。许多学者和专家都花了大量的时间对电波传播预测进行了研究, 并提出了经验模型、半经验或半确定性模型和确定性模型 3 种电波预测模型<sup>[2-3]</sup>。从国内外研究现状可以发现, 基于射线追踪算法对室内 MIMO 信

道研究已经比较成熟, 但是一般采用的是基于镜像法的射线追踪算法。这种算法大部分的时间用来计算射线与物体面的相交测试, 计算复杂度高, 运算量比较大, 在对环境进行仿真时会消耗很长的时间。在室内 MIMO 通信系统中, 不同物体的尺寸、材料各不相同, 对电波预测准确性影响很大。确定性模型通过建立确定的场景数据库, 能够知道实际信道的详细信息, 得到更加准确的预测结果。镜像法是射线追踪法中的一种, 相较于其他的射线追踪法, 镜像法是简单的点到点的追踪, 因此没有其他方法烦琐, 计算效率较高<sup>[4]</sup>, 因此选用镜像法作为建模方法。同时, 对基于镜像法的射线追踪算法进行改进, 提出一种基于三维可见元数据库提取的方法, 可以有效减少参与射线跟踪计算的面和劈的数量, 降低算法复杂度, 从根本上提高射线跟踪的路径搜索效率。

## 2 射线跟踪原理

射线跟踪模型根据高频近似原理,将高频率的电磁波远场传播特性简化为射线模型。从源点发出的射线,在遇到障碍物的时候,会发生反射、折射、透射以及绕射等现象,根据几何光学(GO)理论可以追踪到无线电波从源点传播到场点的所有可能的传播途径<sup>[5]</sup>。通过接收点信号矢量叠加,计算得出接收信号场强。

对室内通信环境而言,只考虑直射、反射、绕射及反射和绕射的一些组合。在一般情况下,追踪所有能够从源点到达场点的路径是不可能的,考虑到电磁波传播过程中的衰减,可以忽略那些到达时衰减很大的传播路径<sup>[6]</sup>。只考虑直射、一次反射、一次绕射、两次反射、一次反射加一次绕射、一次绕射加一次反射、一次绕射加两次反射、两次反射加一次绕射、一次反射加一次绕射加一次反射等九种传播机制的路径追踪。

## 3 三维场景建模

用于射线跟踪的三维矢量数据库要求包含场景中物体几何信息和电磁特性信息。通过场景中物体的地理位置以及组成物体的基本元素(点、线、面)的拓扑关系可获取物体几何信息;通过查阅不同频率下各种材料的介电常数、电导率和磁导率,可确定物体电磁特性信息。在射线跟踪研究的初期,采用CAD手动绘制三维场景。

对于给定的射线跟踪三维场景,将场景中的建筑物简化为直棱柱,其底面按照建筑物实际的底面形状来确定。用CAD绘制该场景时,只需要用到3个基本指令:PL—绘制多线段、LINE—绘制线段以及EXT—拉伸指令。绘制出一个建筑物的具体的步骤如下:

- 1)使用PL指令,按照逆时针顺序依次绘制各顶点组合成为底面多边形;
- 2)使用LINE指令,从绘制的底面多边形中选出一个端点作为起始点,以该端点对应加上高度信息的点作为结束点绘制一条直线;
- 3)使用EXT指令,将其转化为三维实体图形。

在完成整个场景绘制的1、2两个步骤后,将文件存储为DXF文件格式。此时,DXF文件中存储了棱柱的底面顶点坐标信息以及棱柱的高度信息,跟据这些数据就可以提取出详细的场景三维矢量数据库。

如图1所示选择的仿真区域,天津大学某教学楼实验室。该场景模型底面为15 m×3.5 m,高度为3.5 m。房间前面是落地窗,材质为玻璃;后面有2个门,材质为木板;五面石灰石墙壁,地板为油面砖。室内物体有3个横梁,材质为石灰石;简化的实验桌,材质为木板;2个书架,材质为金属。设置源点坐标  $S=[8, 2, 2.6]$ ,场点坐标  $F=[3.76, 1.5, 1.2]$ ,如图1所示为直射、反射、绕射模式下的追踪到的射线。

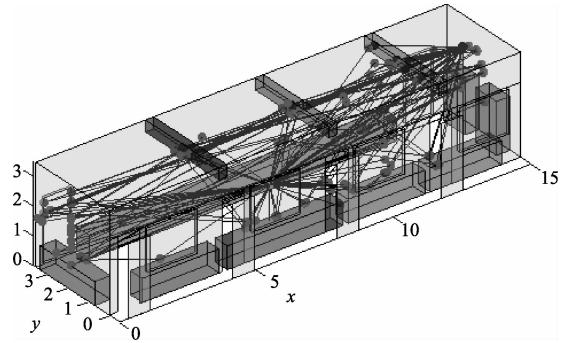


图1 射线跟踪室内场景建模

## 4 场强和容量的计算

### 4.1 场强计算

由电磁场理论可知,当各向同性天线的辐射功率为  $P_T$  时,距辐射源  $d$  m 处电场强度有效值  $E_0$  为:

$$E_0 = \frac{\sqrt{30P_T}}{d} e^{-jkd} \quad (1)$$

当电波发生反射或绕射时,需将电场分解成平行和垂直于入射平面的2个分量,即电场垂直极化分量和平行极化分量。通过反射定律以及一致性绕射理论计算求出反射波或绕射波的场强:

$$E_R = \sqrt{30P_T} R \frac{e^{-jk(s_1+s_2)}}{s_1+s_2} \quad (2)$$

$$E_D = \frac{\sqrt{30P_T}}{s_1} D \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1+s_2)}} e^{-jk(s_1+s_2)} \quad (3)$$

式中: $k$  为波数; $s_1$  为从源点到绕射边或者反射点的路径长度; $s_2$  为从绕射边或反射点到接收点的路径长度; $R$  为并矢反射系数, $D$  为并矢绕射系数<sup>[7]</sup>。

对于射线的多次反射和绕射,可以连续应用上面的公式。最后将所有到达场点的射线的电场矢量相叠加,即求得场点场强:

$$E = \sum_i E_i \quad (4)$$

接收功率为:

$$P_R = \frac{|E|^2 \lambda^2}{480\pi^2} \quad (5)$$

路径损耗表示信号衰减,定义为有效发射功率和接受功率之间的比值:

$$P_L(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_T}{P_R} = 10 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

### 4.2 容量计算

由于无线衰落环境的多径效应和时变性,系统的信道容量不再是一个固定的量,而是一个随机变量。对于发射天线和接收天线个数分别为  $N_t$  和  $N_r$  的窄带平坦衰落 MIMO 系统,从第  $j$  根发射天线到第  $i$  根接收天线的信道频率响应为<sup>[8-9]</sup>。

$$h_{ij} = \sum_{k=0}^{m-1} \sqrt{P_k} e^{j\theta_k} e^{-j2\pi f_s \tau_k} \quad (7)$$

式中:  $P_k$ 、 $\theta_k$ 、 $\tau_k$  分别为第条路径到达接收点的功率、相位角和相对时延,  $m$  为多径的总数量。

由各天线对之间的信道频率响应即可构造出信道传输矩阵  $H$ 。

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_r} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{N_t1} & \cdots & h_{N_tN_r} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据文献[10-11], MIMO 系统信道容量:

$$C = \log_2 \left[ \det \left( I + \frac{\rho}{N} H H^* \right) \right] \quad (9)$$

式中:  $\det(\cdot)$  表示矩阵的行列式,  $I$  为  $N_r \times N_t$  的单位阵,  $\rho$  为接收端的平均信噪比。  $H^*$  为  $H$  的共轭转置形式。

SISO 系统是单天线发送单天线接收,  $N_r = N_t = 1$ , 故  $H$  为单个复瑞利衰落系数, 信道容量为:

$$C_{SISO} = \log_2 (1 + \rho |h|^2) \quad (10)$$

SIMO 系统是单个天线发送, 多个天线接收系统, 也即接收分集系统。信道容量为:

$$C_{SIMO} = \log_2 \left( 1 + \rho \sum_{j=1}^N |h_{j,1}|^2 \right) \quad (11)$$

MISO 系统就是多个发射天线、单个接收天线系统, 发送端可以获分集增益。信道容量为:

$$C_{MISO} = \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N_t} \sum_{j=1}^N |h_{1,j}|^2 \right) \quad (12)$$

## 5 仿真结果及分析

### 5.1 路径损耗预测

在图1仿真场景中, 设置源点在房间边缘, 坐标  $S = [14.8, 2.5, 2.2]$ , 选取  $y$  坐标为 1.5,  $z$  坐标为 1.3,  $x$  坐标从 2~14 的一条直线上间隔为 0.02 的 601 个点作为接收点。仿真参数设置如下: 发射天线和接收天线均为理想的全向天线, 发射天线和接收天线均为垂直极化方式, 工作频率为 2.6 GHz, 发射功率为 10 mW, 信噪比为 20 dB。图2为运用

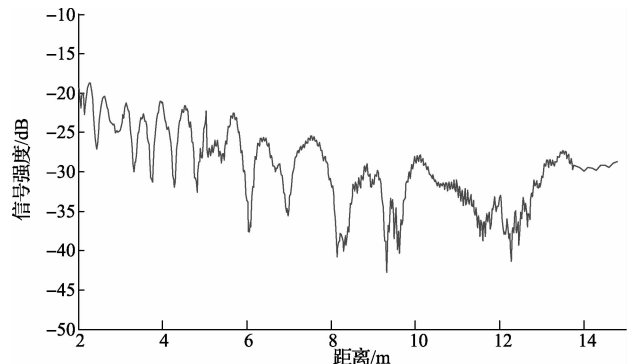


图2 路径损耗预测值与收发端间距的关系

射线跟踪方法得到的路径损耗的预测值, 图3为实际测量值。从图中可以看出: 随着收发端间距的增大, 路径损耗逐渐增大。曲线整体呈现慢衰落, 在数个波长变化内呈现出快衰落。与实际测量值进行比较, 验证了该模型的正确性及有效性。

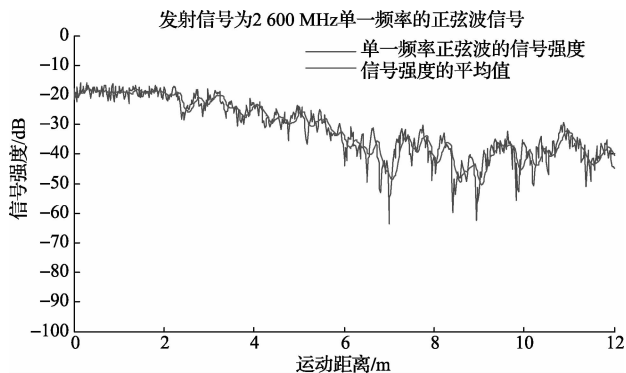


图3 路径损耗实测值与收发端间距的关系

### 5.2 MIMO 容量三维分布图

设置源点在房间中间, 坐标  $S = [7.5, 1.5, 2.6]$ , 选取  $z$  坐标为 1.3,  $x$  坐标从 1~14 间隔为 0.02,  $y$  坐标从 1~3 间隔为 0.02 的平面为接收点。图4为对于  $2 \times 2$  MIMO 系统的仿真, 两发射点对称分布于系统的发射点的两侧, 接收点对称分布于接收点的两侧, 天线间隔为 0.5 个波长。

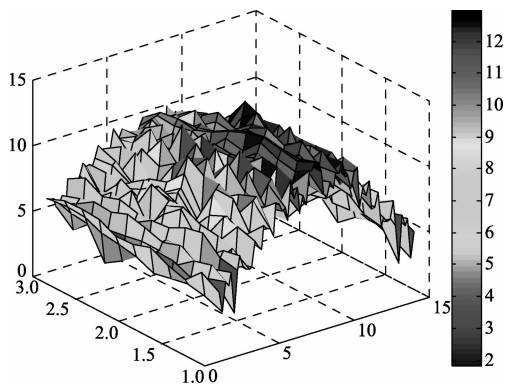


图4 MIMO 三维容量

可以从图中看出, 靠中央位置的容量最大, 这是因为发射天线的位置在中央, 越靠近发射点直射路径的贡献就越大。

### 5.3 不同系统的信噪比对容量的影响

图5给出了在  $1 \times 1$ 、 $2 \times 2$ 、 $4 \times 4$  的系统中容量随信噪比的变化情况, 从曲线的变化趋势来看, 当天线数目不变时, 容量都随着信噪比的增大而增大, 这是与理论相符合的。随着接收天线数目的增多, 容量随信噪比的增长幅度也明显增大。

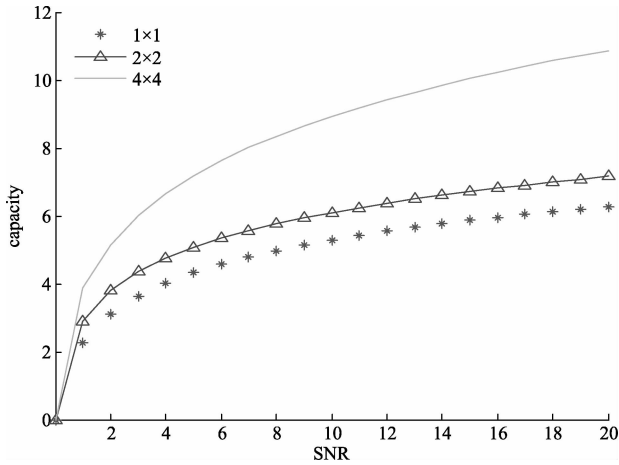


图 5 不同天线数目下容量与 SNR 的关系

图 6 给出了在 SISO、MISO、SIMO、MIMO 4 个不同系统中容量随信噪比的变化情况,从曲线的变化趋势来看,当天线数目不变时,容量都随着信噪比的增大而增大,这是与理论相符合的。但是它们增长的幅度不一样:MIMO 增长的幅度最大,因为 MIMO 系统可以利用多副天线发送、多副天线接收对空间进行复用,信道容量有了很大的提高。其次是 SIMO,因为 SIMO 在接收端可以收到发送信号的多个复本,这样就提高了信道容量。MISO 相对于 SISO 来说,在相同信噪比的情况下容量并没有什么增长,这是由于 MISO 虽然具有多个发射天线,但是发射总功率没有提高,只是具有了分集增益却没有阵列增益。

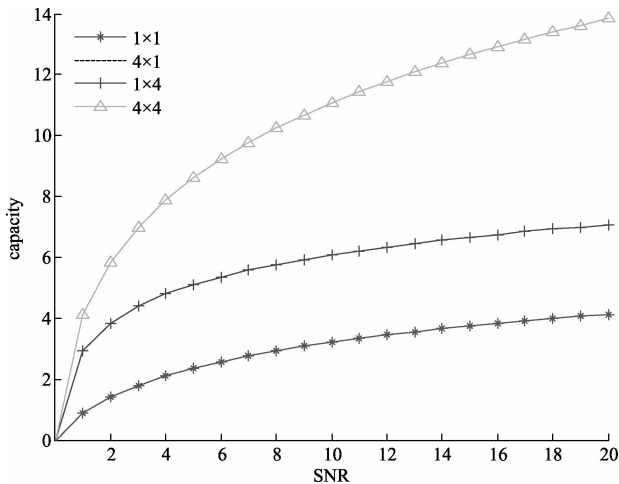


图 6 不同系统下容量与 SNR 的关系

## 6 结 论

根据几何光学原理,运用射线跟踪方法对室内环境进行建模。通过 CAD 手动绘制三维场景,并使用 MATLAB 仿真软件进行仿真,将预测到的路径损耗与实际测量值进行对比,验证了该模型的正确性。仿真分析了在不同天线数目的 MIMO 下以及在不同系统下,信道容量与 SNR 的

关系,仿真结果显示与理论值相符合。

## 参 考 文 献

- [1] 吕剑刚. 多人多出无线通信技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2006.
- [2] MAGDY F. I, YUN ZH Q. Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 662-673.
- [3] 杨晋生,董伯平,陈为刚,等. 基于三维射线跟踪的信道特性可视化研究[J]. 电子测量技术, 2011, 12(17): 58-61.
- [4] 徐寅. 基于镜像法的 MIMO 信道研究[D]. 南京邮电大学, 2011.
- [5] LOREDO S, RODRIGUEZ-ALONSO A, TORRES R P. Indoor MIMO Channel Modeling by using Ray-tracing Techniques based on GO/UTD[C]. Wireless Communication Systems, 2006. ISWCS'06. 3rd International Symposium on. IEEE, 2006: 640-644.
- [6] 吴彦鸿,王聪,徐灿. 无线通信系统中电波传播路径损耗模型研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(8): 35-41.
- [7] LOREDO S, RODRIGUEZ-ALONSO A, TORRES R P. Indoor MIMO Channel Modeling by using Ray-tracing Techniques based on GO/UTD[C]. Wireless Communication Systems, 2006. ISWCS '06. 3rd International Symposium on. IEEE, 2006: 640-644.
- [8] STABLER O, HOPPE R. MIMO channel capacity computed with 3D ray tracing model[C]. Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on. IEEE, 2009: 2271-2275.
- [9] BURR A. Evaluation of capacity of indoor wireless MIMO channel using ray tracing [C]. Broadband Communications, 2002. Access, Transmission, Networking. 2002 International Zurich Seminar on. IEEE, 2002: 28-1-28-6.
- [10] CHUAH C N, TSE D N C, KAHN J M, et al. Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2002, 48(3): 637-650.
- [11] Cerasoli C. The use of ray tracing models to predict MIMO performance in urban environments [C]. Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE. IEEE, 2006: 1-8.

## 作者简介

杨晋生,副教授,硕士生导师。主要研究方向为无线通信。

曹敏,硕士研究生。主要研究方向为无线通信。