

文章编号:1005-6122(2008)01-0068-04

基于多天线的微蜂窝微波移动通信信道建模研究*

蒋 泽¹ 付 钰²

(1. 重庆邮电大学光电工程学院,重庆 400065;2. 安徽省邮电规划院,合肥 230031)

摘要: 城市微蜂窝移动通信电波传播环境相当复杂,因此建立这种无线传播信道的有效模型无论对理论分析、系统优化设计以及网络工程规划来说都是非常重要的。特别是针对未来陆地蜂窝移动通信系统基于智能天线应用的规范标准要求尤其如此。为此从多径色散信道的特性分析出发,采用电磁散射理论建立了基于多天线的微蜂窝多输入多输出物理信道模型,对刻画信道特性的一些重要性能参数,如空间相关性、容量和时间演化等进行了研究和仿真分析。与有关文献结果的比较表明了所建立的微蜂窝移动通信信道模型的有效性。

关键词: 微蜂窝移动通信,无线电波传播,多天线,多输入多输出信道,自相关函数

Study of the Multi-Element Antenna Based Micro-Cellular Microwave Mobile Communication Channel Modeling

JIANG Ze¹, FU Yu²

(1. College of Electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Institute of Posts and Telecommunications Planning and Designing of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: In urban micro-cellular mobile communication scenarios, the radio propagation conditions are very atrocious. For this reason, it is important that establish an efficient radio propagation channel model for theoretical analyzing, system optimal design and networks planning. It is true, especially, for future land mobile cellular communications, in which the smart antennas will be invoked under the standard stated. With the review of the multi-path dispersion channels properties studies, the multi-input multi-output physical channel model based on the multi-element antenna has been derived using the electromagnetic scattering theory. Some crucial performance parameters for channels, such as spatial correlation, capacity, and time evolvement have been investigated and simulated. The results show that the presented model is validity for micro-cellular mobile communications, by comparing with those of the other literatures.

Key words: Micro-cellular mobile communications, Radio propagation, Multi-element antenna, Multi-input multi-output channel, Autocorrelation function

引言

移动无线信道模型对移动通信系统仿真分析、研发设计和网络工程规划发挥着重要作用,因此一直以来都是移动通信理论和工程界研究和关注的热点。欧洲科学与技术研究合作组长期致力于无线信道模型的理论研究工作,分别以 COST 207, 231, 259 和 273 命名、建立了一系列针对不同无线传播环境的信道特征描述,极大地丰富了移动无线信道的研究内容。

随着以第三代移动通信系统为代表的未来新型移动通信系统的发展,多天线技术已作为其标准的重要组成部分,因此传统的单输入单输出结构将转化为具有多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 结构的新型系统^[1~8]。为了实现系统提供高速高质量信息传输的预期目标,首先应对无线传播信道特性进行深入研究,并进而研究特定信道环境中的系统输出响应,构建合理的多天线拓扑结构,选择稳健的阵列信号处理技术,实现系统与无线传播信道之间的最佳耦合。

* 收稿日期:2006-06-16;定稿日期:2007-10-17

基金项目:重庆市科委自然科学基金计划(CSTC2006BB2360)

本文将在对 MIMO 信道研究工作进展进行简要介绍的基础上,从多径色散信道的特性分析出发,采用电磁散射理论和电波传播原理建立基于多天线的微蜂窝多输入多输出信道等效的物理信道模型,对刻画信道特性的一些重要特征函数进行较为系统的分析和研究,为未来新型移动通信系统的研发提供有益的参考。

1 微蜂窝 MIMO 信道建模

室外微蜂窝区域的电波传播特性可简单概括为视线(Line-of-Sight, LOS)传播和非视线(Non-Line-of-Sight, NLOS)传播两大类。根据空间波传播的菲涅耳区概念,前者表示电波传播环境符合自由空间中的传播条件,后者则表示电波收发之间第一菲涅耳区被严重遮挡的传播场景。对于室外微蜂窝区域,特别是城市微区,移动台和基站台之间存在大量的散射团簇,每一散射团簇又包含大量的独立散射体,因此,是 LOS 和 NLOS 传播并存的场景。

图 1 所示为移动台和基站台之间电磁波通过散射体相互作用的传播情景。此时,发送天线单元 j 和接收天线单元 i 之间信道的时变基带复冲激响应可表示为^[1]:

$$h_{ij}(\tau, t) = \sum_{q=1}^{N_s} \frac{\text{sinc}[\omega_b(\tau - \tau_q)]}{(|\mathbf{r}_{m_{pq}}| + |\mathbf{r}_{s_{pq}}|)^{\gamma}} G_i(\mathbf{r}_{m_{pq}}) \cdot G_r(-\mathbf{r}_{s_{pq}}) \mathbf{g}_r(-\mathbf{r}_{s_{pq}}) \cdot \mathbf{S}_q \cdot \mathbf{g}_i(\mathbf{r}_{m_{pq}}) \quad (1)$$

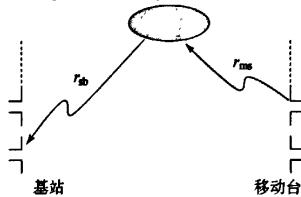


图 1 移动台和基站之间电磁波通过散射体的传播路径

式中, ω_b 为系统带宽, $\tau_q = (|\mathbf{r}_{m_{pq}}| + |\mathbf{r}_{s_{pq}}|)/c$ 为散射传输时延, c 为自由空间电磁波传播速度, γ 为路径损耗因子, G_r (G_i)、 \mathbf{g}_r (\mathbf{g}_i) 分别表示接收(发射)天线单元的方向性函数和场强方向矢量, N_s 为散射体数目, \mathbf{S}_q 为散射作用张量, $\mathbf{S}_q = A\rho\mathbf{S}_0$, A 表示散射场幅度, ρ 刻画散射场的形状和旁瓣宽度, 对多数散射体可表示为:

$$\rho = \text{sinc}(a \|\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i + 2(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}\|) \quad (2)$$

散射场的极化特性由 \mathbf{S}_p 描述为:

$$\mathbf{S}_p = \frac{-1}{\sin^2 \theta_0} [R_1(\mathbf{n}_0 \cos 2\theta_0 + \mathbf{k}_i \cos \theta_0) \mathbf{n}_0 - R_2(\mathbf{n}_0 \times \mathbf{k}_i) \mathbf{n}_0 \times \mathbf{k}_i] \quad (3)$$

式(2)、(3)中, a 为与散射体尺寸有关的参数, \mathbf{k}_s 、 \mathbf{k}_i 表示入射场和散射场波矢量, \mathbf{n} 为散射体表面法向基矢量, $\mathbf{n}_0 = (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i)/\|\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i\|$, $\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n}_0 = -\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n}_0 = \cos \theta_0$, R_1 、 R_2 为反射系数。当满足 $\omega_b \ll 2\pi/\Delta\tau$ 时, $\Delta\tau$ 为时延扩展, 则可得到式(1)的窄带近似表示为:

$$h_{ij}^{nb}(t) = \sum_{q=1}^{N_s} \frac{e^{-j\omega_b \tau_q}}{(|\mathbf{r}_{m_{pq}}| + |\mathbf{r}_{s_{pq}}|)^{\gamma}} G_i(|\mathbf{r}_{m_{pq}}|) \cdot G_r(-\mathbf{r}_{s_{pq}}) \mathbf{g}_r(-\mathbf{r}_{s_{pq}}) \cdot \mathbf{S}_q \cdot \mathbf{g}_i(\mathbf{r}_{m_{pq}}) \quad (4)$$

文献[2]从电波传播的物理机理出发,将传播过程分解为自由空间传播、镜面反射、绕射、导波传播等一系列形式,并进一步讨论了在移动台和基站台附近均存在局域散射体时,双重散射的信道传递函数表示式,构造了基于电波传播结构特性的信道模型。

上述处理技术各有其优缺点,特别是将 N_s 视为与时间无关的常数,虽然使得相关的研究得以简化,但对于深入分析 MIMO 系统的性能是不够全面的。为此,本文拟将 N_s 作为由泊松分布所描述的随机变量,并对远离移动台和基站台的远端散射体和其附近的局域散射体作统一处理,即基于微蜂窝电波传播环境,将它们统一描述为具有某种随机空间分布的散射体簇,从而获得 $h_{ij}(\tau, t)$ 时空特性的完整描述。

为突出主要特性,可忽略散射团簇之间的相互作用,即如文献[1]一样,仅考虑单次散射传播过程。同时,当 $N_s = 0$ 时,

$$H_{ij}(\tau, t) = \begin{cases} H_{ij}^{LOS} + h_{ij}(\tau, t) & \text{莱斯信道} \\ h_{ij}(\tau, t) & \text{瑞利信道} \end{cases} \quad (5)$$

式中,LOS 路径分量 H_{ij}^{LOS} 为:

$$H_{ij}^{LOS} = \frac{1}{|\mathbf{r}_{m_{ij}}|} G_i(\mathbf{r}_{m_{ij}}) G_r(-\mathbf{r}_{m_{ij}}) \mathbf{g}_r(-\mathbf{r}_{m_{ij}}) \cdot \mathbf{g}_i(\mathbf{r}_{m_{ij}}) \quad (6)$$

2 微蜂窝 MIMO 信道仿真

如图 2 所示,设散射体分布于半径为 R 、包含移动台和基站台在内的球形区域内,则各散射体的空间位置可表示为:

$$\mathbf{r}_s = \left(\frac{D}{2} + R \sin \theta \cos \varphi \right) \mathbf{a}_x + R \sin \theta \sin \varphi \mathbf{a}_y + R \cos \theta \mathbf{a}_z \quad (7)$$

式中,设散射体簇半径 R 为 $R \in [0.05D, 1.25D]$ 的均匀分布,角度 θ 、 φ 满足 $\theta \in [0, \pi]$ 和 $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。对每一散射体,其散射特性假设如下:

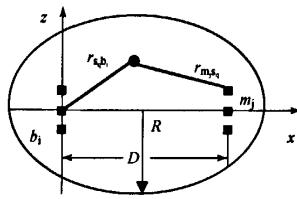


图2 微蜂窝传播场景

$$\alpha \in U[0.01, 0.5], A \in N(0, 1), n \in U[0, 1] \quad (8)$$

式(8)表明散射体表面法向等概率指向空间各个方向,而散射体尺寸参数的选择可以导致较大的旁瓣分布,表明能量来自较多的散射体,因而可以更好地模拟散射团簇的散射作用。散射振幅则模拟为零均值,方差为1的复高斯分布。对于反射系数 R_1, R_2 ,均可表示为 $R = \Gamma e^{j\alpha}$ 的形式,其中, $\Gamma \in U[0, 1], \alpha \in U[0, 2\pi]$ 。最后,由于移动台的运动,导致小区内散射体数目的随机性变化由泊松分布描述为:

$$P(N_s = i) = \frac{e^{-\bar{\lambda}} \bar{\lambda}^i}{i!} \quad (9)$$

式中, $i = 0, 1, 2, \dots, \bar{\lambda}$ 为平均散射体数目。

现通过分析天线单元接收功率随时间的演化及多普勒谱分布、不同单元接收信号之间的空间相关性及信道容量来研究信道的空-时特性。MIMO信道的空间相关性定义为^[4]:

$$\rho_{n_1 m_1}^{n_2 m_2} = \frac{E^2[H_{n_1 m_1} H_{n_2 m_2}^*]}{E[|H_{n_1 m_1}|^2]E[|H_{n_2 m_2}|^2]} \quad (10)$$

式中, n_1, n_2, m_1, m_2 分别表示基站台和移动台的第 n, m 个天线单元。

在加性高斯白噪声环境中,当各发射单元的输入功率相等时,由 n_R 个接收单元、 n_T 个发射单元构成的 $n_R \times n_T$ MIMO信道的容量可表示为^[3]:

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \det \left(I_{n_R} + \frac{\rho_s}{n_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \text{bps/Hz} \quad (11)$$

式中, ρ_s 为信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR), \dagger 表示厄米共轭。

图3为基台和移动台均为沿 z 向排列的偶极子单元时,基台阵元接收功率随时间的变化关系。由于散射体之间的相互作用及移动台的运动性,导致接收信号表现出明显的衰落特性,这即是移动通信中通常所说的信号的多径衰落效应。

图4为载波频率 $f_c = 5\text{GHz}$ 、移动台运动速率为 2m/s 时信道的多普勒谱。根据物理学原理知对应的最大多普勒频率为 33.3Hz 。仿真结果很好地体

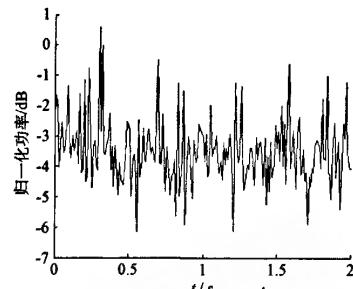


图3 图2所示传播场景下基站接收信号功率分布

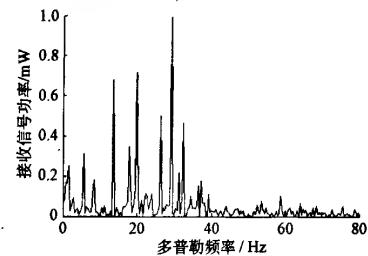


图4 图2所示传播场景下基站接收信号的多普勒谱

现了这一基本原理的要求。同时,由于空间散射体分布的非均匀性,导致信道多普勒谱的快速变化,而非传统的均匀散射体分布假设下的U型分布。

图5(a)、(b)分别描述了基站台和移动台单元之间的空间相关性。可以看出:①信道两端的空间相关性是对称的,这与我们关于微蜂窝模型的基本假设是完全一致的;②随着单元间距的增加,信道两端的空间相关性减小,这与关于空间分集的基本思想是吻合的;③与文献[2]的理论分析结果相似,信道两端的空间相关性是近似独立的,因此信道的空间相关矩阵可以近似地由基站台和移动台天线单元自相关矩阵的直积得到。

图6为在图2假设的信道环境中,基于 2×2 的MIMO系统容量的变化关系。其中,移动台和基站台天线单元之间的间距分别为 0.5λ 和 2λ , λ 为载波波长。可以看到,系统容量具有较大的波动性。尽管如此,与文献[1]的比较表明:一方面,与单输入单输出系统相比,系统的容量得到显著提高;另一方面,多天线系统的应用使得移动通信系统容量的变化较为平稳。因此,为基于高速数据的应用系统提供了良好的支撑。

3 结论

本文从多径色散信道的特性分析出发,采用电

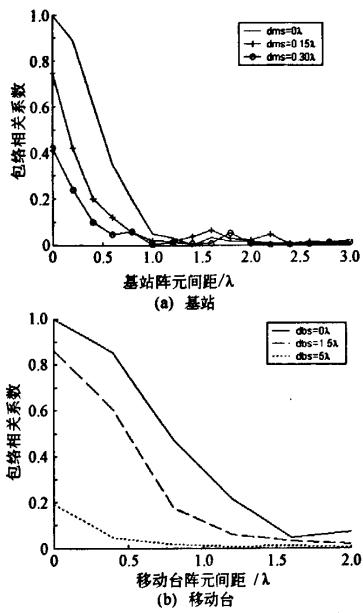


图5 基站和移动台接收信号包络相关系数
 $\rho_{n1n1}^{(1)}$ 随阵元间距的变化关系

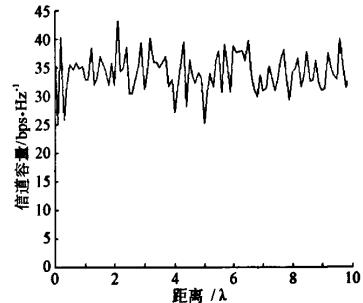


图6 2×2 MIMO系统信道容量随移动路径的变化(路径长度为 10λ (0.6m), 平均路径 SNR 为 10dB)。磁散射理论和电波传播原理建立了基于多天线的微蜂窝多输入多输出物理信道模型, 对刻画信道特性的一些重要性能参数, 如空间相关性、容量和时间演化等进行了仿真分析和研究。与有关文献比较表明, 所建立的微蜂窝移动通信信道模型有效, 可以进一步开展信道的时延扩展、角谱分布及极化特性等性能的研究, 为未来新一代移动通信系统的优化设计提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] Svantesson T. A physical MIMO radio channel model for multi-element multi-polarized antenna systems. In Proc IEEE VTC 2001 Fall, Atlantic City, NY, 2001: 1083 ~ 1087
- [2] Molisch A. A generic model for MIMO wireless propagation channels in macro- and microcells. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52(1): 61 ~ 71
- [3] Stridh R, Yu K, Ottersten B, Karlsson P. MIMO channel capacity and modeling issues on a measured indoor radio channel at 5.8 GHz. IEEE Trans Wireless Commun, 2005, 4(3): 895 ~ 903
- [4] Byers G J, Takawira F. Spatially and temporally correlated MIMO channels: modeling and capacity analysis. IEEE Trans Veh Technol, 2004, 53(3): 634 ~ 643
- [5] Konanur A S, Gosalia K, Krishnamurthy S H, Hughes B, Lazzi G. Increasing wireless channel capacity through MIMO systems employing co-located antennas. IEEE Trans Microwave Theory and Technol., 2005, 53(6): 1837 ~ 1844
- [6] Oestges C, Erceg V, Paulraj A J. A physical scattering model for MIMO macrocellular, broadband wireless channels. IEEE J Select Areas Commun, 2003, 21(5): 721 ~ 728
- [7] 李忻, 聂在平. MIMO信道中衰落信号的空域相关性评估. 电子学报, 2004, 32(12): 1949 ~ 1953
- [8] 王君, 朱世华, 王磊. 多输入多输出系统信道容量研究. 电子与信息学报, 2005, 27(4): 588 ~ 591

蒋 泽 男, 1964 年生, 重庆邮电大学光电工程学院副院长, 教授、博士。主要研究方向为无线通信电波传播理论、自适应信号处理与智能天线技术。

E-mail: jiangze@cqupt.edu.cn

付 钰 女, 1982 年生, 硕士。2002 年毕业于内蒙古大学, 获得学士学位, 2006 年毕业于重庆邮电大学, 获得硕士学位。现在安徽省邮电规划设计院工作, 主要从事无线网络规划、光纤光栅器件及其在 DWDM 全光网络中的应用研发工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>