



基于室内场景的多天线技术应用

李崇鞅^{1,2}, 胡国安¹, 范波勇¹, 朱永平^{1,2}

(1. 湖南邮电职业技术学院, 湖南 长沙 410015; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 多天线技术是无线接入网宽带化、高速化的关键技术, 在 4G 移动通信系统中有着广阔的应用前景。室内覆盖是移动通信的主要业务, 运用 MIMO 技术有效解决室内无线通信系统具有重要意义。围绕无线 MIMO 技术在室内覆盖中的运用这一主题, 对 MIMO 信道容量、室内信道建模、室内覆盖系统等方面进行了深入的研究。

关键词: MIMO; 室内覆盖; 室内信道模型

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017181

Application of multi-antenna technology based on the indoor scene

LI Chongyang^{1,2}, HU Guoan¹, FAN Boyong¹, ZHU Yongping^{1,2}

1. Hunan Post and Telecommunication College, Changsha 410015, China

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Multi-antenna technology is the key technology of high speed broadband wireless access network, it has a broad application prospect in the fourth generation mobile communication systems. Indoor coverage is the main business for mobile communication. It is very important to use the MIMO technology to solve the problem of indoor wireless communication. Focused on the theme of wireless MIMO technology in the indoor coverage, MIMO channel capacity, indoor channel modeling, indoor coverage systems were mainly analyzed.

Key words: MIMO, indoor coverage, indoor channel model

1 引言

多天线 MIMO (multiple input multiple output) 技术是无线接入网宽带化、高速化的关键技术。据统计, 70% 以上的移动业务发生在室内, 运营商收入的 80% 以上来自室内^[1], 所以, 室内信号的质量对未来的移动通信起着决定性作用。可

以毫不夸张地说, 谁占领了室内市场, 谁就能在将来的竞争中获胜。所以各大运营商都不遗余力地投资室内系统的研究工作。在下一代移动通信系统中, MIMO 技术是解决室内覆盖的一个关键技术, 它在宽频领域的应用具有很大的潜力。解决好 MIMO 在室内覆盖系统中的运用, 具有重要意义。

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-06-05

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (No.16C1188, No.16C1189)

Foundation Items: The Scientific Research Project of Hunan Provincial Education Department (No.16C1188, No.16C1189)

2 MIMO 理论基础及室内覆盖的特点

2.1 MIMO 理论基础

自马可尼于 1908 年提出采用 MIMO 技术应对无线信道的衰落以来，MIMO 技术已经取得了惊人的成就，表 1 统计了移动通信系统中，下行链路在平衰落环境下，电磁波频段为 2~4 GHz、载波间隔为 5 MHz 时，采用 MIMO 技术后，获得的数据下载峰值速率^[2]。在未来的几年中有望将数据速率提高到 400~600 Mbit/s。

MIMO 技术包括发送分集、空间复用和波束成形等传输模式^[3]。其中，发射分集通过不同的电波传播路径传输同样的信息，以提高接收的可靠性和覆盖，适用于需要保证可靠性或覆盖的环境；空间复用通过不同的电波传播路径发送异样的信息^[4]，如果传播路径不相关，网络速率可以成倍增长，密集城区建筑物较多、电波反射多，尤为适合；波束成形利用多天线矩阵实现空分多址，可以明显地减少小区内用户之间的干扰，提高小区的覆盖性能和小区的容量。

天线矩阵为 $N \times M$ 的 MIMO 无线通信系统架构如图 1 所示。发送端数据流被映射成并行的 N 个子数据流，经过射频调制之后，通过 N 个天线发送出去^[5]。在无线传播环境下，经过多条路径散射传播，到达接收端之后，并行的子数据流的信

号被 M 个天线接收，然后对各路信号进行联合处理，获得原来的数据流。

2.2 室内覆盖环境的特点

在室内覆盖环境中，室内信道中发送的无线电波由于墙体和窗户的存在，会形成大量的反射波和散射波。室内信道和室外信道类似，可以采用类似数学模型对信道进行描述，但是室内信道与室外信道又存在以下几个方面的差别。

- 在室外信道中，基站覆盖范围较大，无线电波的反射和散射是由于固定的建筑物造成的，短时间内移动用户的移动可以忽略，因此室外信道可以近似看成是时间静止的。而在室内信道中，天线高度较低，覆盖范围较小，移动用户在室内移动时，室内信道是统计时变的。
- 室内信道的路径损耗比室外信道的路径损耗更大，室外信道按负指数变化的传播模型并不总适用于室内信道的传播环境。
- 室外信道中由于存在快速运动（车载时）的移动用户，因此不可避免地存在多普勒频偏效应。而在室内环境中，移动用户的运动速度一般在 5 km/h 以内，所以室内信道中的多普勒频偏效应可以忽略。
- 室外信道由于天气、空气质量和距离等因素的影响，接收端获取的信号幅度和相位等参数随机变化，需要考虑到快衰

表 1 MIMO 技术不同天线数的数据下载峰值速率统计

天线矩阵	发射技术	编码速率	调制方式	子数据流速率/(kbit s ⁻¹)	子数据流数	数据流总速率/(Mbit s ⁻¹)
(1,1)	传统	3/4	64QAM	540	20	10.8
(2,2)	MIMO	3/4	16QAM	360	40	14.4
(2,2)	MIMO	3/4	QPSK	180	80	14.4
(4,4)	MIMO	1/2	8PSK	540	80	21.6

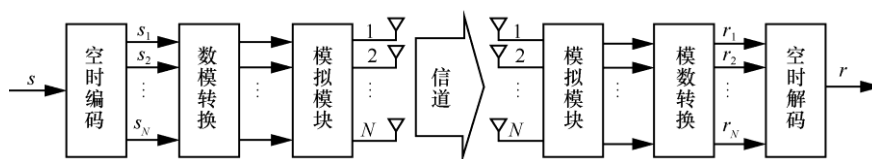


图 1 MIMO 无线通信系统架构



落、深度平坦衰落和长时延扩展等因素。对于系统带宽较大的系统，还需要考虑频率选择性衰落等情况。对于接收天线的接收灵敏度要求允许信号衰减上百 dB。而在室内信道中，由于建筑物的内部结构、楼层高度及建筑材料等因素的影响，使得室内信道具有更复杂的多径传播环境，室内信道表现为慢衰落和较小的时延扩展，因此比较容易使通信速率达到兆数量级以上。

- 室内传播距离一般要比室外传播距离短，因此室内信道的传播时延和多径时延差也会比室外信道小得多。对于室外信道因为传播距离远，且考虑到远处地形地物对电磁波反射的影响，室外信道的最大附加时延将大于 100 μs 。若不考虑远处地形地物的影响，RMS 时延扩展 (delay spread) 约为几微秒。而对于室内信道因为传播距离短，附加时延小于 1 μs ，RMS 时延扩展一般低于 100 ns。因此在相同的符号间干扰的影响下，室内信道的数据传输速率比室外信道要高得多。

3 室内不同环境下的信道模型

室内覆盖环境根据场景的不同主要分为家庭住宅、办公室、宾馆酒店、写字楼、大型场馆等。TGn 信道模型^[6]适用于 2.4 GHz 和 5 GHz 频段，其应用场合比较广，可以在家庭住宅、办公室、酒店和展厅等环境中使用。在不同的应用场合当中，室内传播具有不同的信道传播模型，见表 2。TGn 信道模型分类具体如下：模型 A，0 ns RMS 时延扩展；模型 B，15 ns RMS 时延扩展；模型 C，30 ns RMS 时延扩展；模型 D，50 ns RMS 时延扩展；模型 E，100 ns RMS 时延扩展；模型 F，150 ns RMS 时延扩展。TGn 信道模型的参数可以从参考文献[7]中获得。

表 2 信道模型和环境对应关系

室内场景	传播路径	信道模型
家庭住宅	视距传播	模型 B
	非视距传播	模型 B
办公室	视距传播	模型 B
	非视距传播	模型 C
酒店宾馆	视距传播	模型 C
	非视距传播	模型 D
写字楼	视距传播	模型 D
	非视距传播	模型 E
大型场馆	视距传播	模型 E
	非视距传播	模型 F

对于路径损耗模型，表达式写成：

$$\begin{aligned} L(d) &= L_{\text{FS}}(d), d \leq d_{\text{BP}} \\ L(d) &= L_{\text{FS}}(d) + 3.51\lg(d/d_{\text{BP}}), d \geq d_{\text{BP}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $L_{\text{FS}}(d)$ 为自由空间损耗^[8]， d_{BP} 为断点距离，用于判断收发天线之间的传播路径是否存在直射路径分量^[9]。

4 MIMO 在室内覆盖系统中的应用方案

4.1 室内覆盖系统建设的原则

室内覆盖系统的建设过程中，应遵循以下原则。

- 在设计过程中应该充分考虑业务量需求、信号覆盖效果、工程升级改造便利性以及建设成本等指标，不仅要满足上述指标要求，还不影响现网系统运行的稳定性和安全性。
- 在实际建设过程中应根据室内建筑的具体情况，采用新建或场景改造的手段，进行双路室内覆盖系统建设，以便很好地支持 MIMO 上下行容量增益。
- 应该遵循资源共享的利旧原则，与现有的通信系统进行共建共享。当多个通信系统共存时，应确保系统之间的隔离度符合规范要求，以免出现系统间互干扰。
- 应该遵循室内室外覆盖统一协调的原则，严格控制好室内覆盖系统的信号外泄，以免对室外覆盖区域造成干扰。

- 应该遵循便于扩容的原则，在尽可能不改变网络拓扑结构的情况下，采用增加载频、空分复用等方式快速扩容，以满足业务量的需求。
- 室内覆盖系统与室外系统应遵循异频组网的原则，合理规划分配好不同频点。此外，室内覆盖系统可根据室内应用场景的特点灵活选择同频组网或者异频组网。
- 应该遵循多点小覆盖的原则，严格控制天线的发射功率，使电磁辐射标准满足国家及通信行业的标准。

4.2 MIMO 的室内覆盖方案

通过以上的分析，为了尽可能地减少不同系统之间的相互干扰，又能充分利用现有的网络资源，合理地管理无线资源，解决大型室内环境中因流动造成的突发影响等诸多问题，借助软件无线电的思想和 MIMO 的特性，现提出室内覆盖解决方案——数字式传输系统+数字计算与处理平台+MIMO 天线。

所有信号通过现有的数字传输系统（包括互联网、数字电视网、固定和移动通信网等）传输到以小区为单位的数字计算与处理平台上（计算机以及 DSP 和 FPGA 等处理平台）经过处理的信号，传送到离目标客户最近的 MIMO 天线上，可以根据用户的状态信息动态调整资源的分配（数据率和功率）以及最优的传输方式。

这样可以最大限度地利用现有的数字传输系统，不需要过多地更新硬件设备资源。

数字计算和处理平台通过软件切换和 FPGA 的代码擦写和升级，实现根据用户的终端设备动态提供特有的服务。比如，在某一时间学校某个教室中用的大部分是 4G 的手机，则计算中心就找到 4G 手机协议的相关代码，切换或者重新擦写 FPGA 的服务代码，这样数字信息就可以转化为 4G 的数字信号送到 MIMO 天线端，发给用户使用；过一段时间下课了，来该

教室上课的人换了，新来的用户使用的是 4G 手机，还有手提电脑的无线上网，那么计算中心同样根据用户的请求，切换到 4G 和无线网的服务代码；对于同时具有 4G、3G 和 2G 的情况，同样可以根据用户等级和用户量的大小决定资源的分配。

对于突发问题也能得到有效的解决。通过调制运用数据的带宽和资源的分配即可有效解决突发用户的增加问题。用户是动态的，对用户的服务量也可以根据用户的需要，进行动态调整。由于三大数据系统是可以相互使用的，这样可以充分利用闲置的资源提供服务。

计算和处理平台在国内大致相同，便于大规模的生产，从而最大限度地降低成本，服务代码可以重复利用和不断复制，安装和更新成本变得很低。

而现有体制的运营商将由竞争变为合作，要联合起来共同搭建计算和处理平台，将所有的数字系统联系在一起，为顾客提供最优质的服务。不难看出，最终由用户来决定运营商的服务质量。

4.3 MIMO 的室内覆盖信道容量仿真分析

对于仿真参数的选取如下：信噪比 $\rho=10$ dB，采用室内办公环境，其传播路径损耗因子^[10]为 2.6，天线为 3×3 MIMO，发射矩阵和接收矩阵^[11]给出的参数如下：

$$R_T = \begin{bmatrix} 1 & -0.3566+0.22i & 0.2505-0.1643i \\ -0.3566-0.22i & 1 & -0.3566+0.22i \\ 0.2505+0.1643i & 0.3566-0.22i & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_R = \begin{bmatrix} 1 & -0.6961-0.0053i & 0.3543+0.0201i \\ -0.6961+0.053i & 1 & -0.6961-0.0053i \\ 0.3543-0.0201i & -0.6961+0.0053i & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过重复仿真 5 000 次，得到容量的累积分布函数与容量的关系如图 2~图 6 所示。

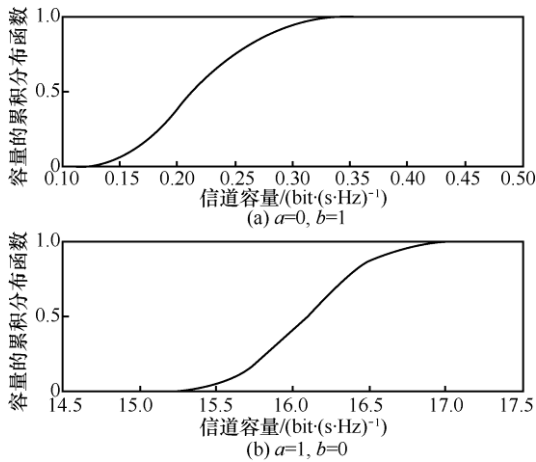


图2 天线数目为3×3, LOS信道为满秩时信道容量的累积分布

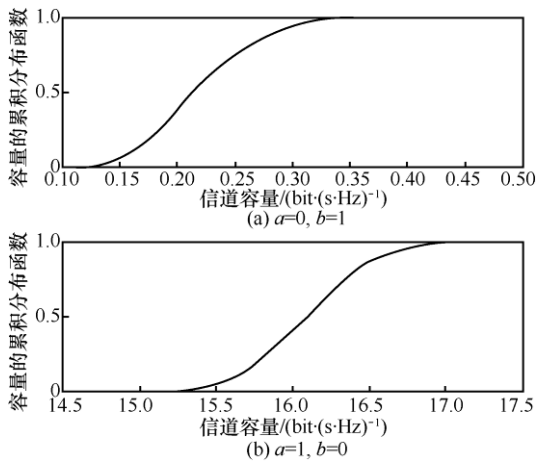


图3 天线数目为3×3, 直射LOS信道和散射NLOS信道同时存在时信道容量的累积分布

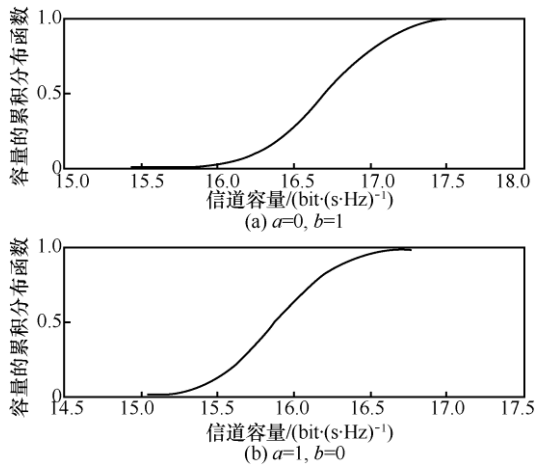


图4 天线数目为3×3, LOS信道秩为1时信道容量的累积分布

图2中显示的 a 为NLOS信道的系数, b 为LOS信道的系数,从图2可以看出,在LOS信道为满秩,只有LOS信道作用时,系统的信道容量较小,而只

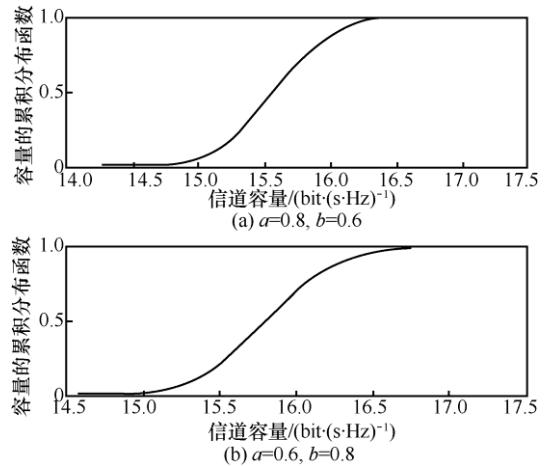


图5 天线数目为3×3, NLOS和LOS信道同时存在时信道容量的累积分布

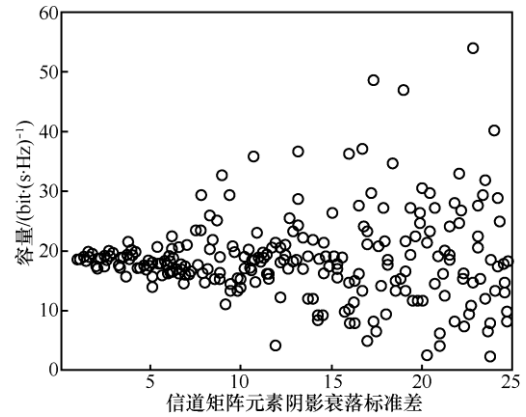


图6 信道矩阵元素阴影衰落标准差与系统的容量关系

有NLOS信道时,系统的信道容量比较大。

图3显示的是直射LOS信道和散射NLOS信道同时存在时,信道容量的累积分布情况,散射NLOS信道的分量占比越大,系统的容量越大。由于电波散射传播时,各传播路径的不相关程度较高,传播路径的相关阵列特征值较大,很容易通过不同的电波传播路径发送异样的信息。

此外,对比图2与图3发现,只有散射NLOS信道存在时的信道容量,没有直射LOS与散射NLOS信道同时存在时的信道容量大。其主要原因在于真实场景中的信道绝非IID瑞利信道,仅有不多的特征传输信道,因而无法大幅提高MIMO传输系统的容量。

从图4和图5可以看出,LOS信道秩为1,只

有 LOS 信道存在时,系统的容量没有很大的变化,而当有 NLOS 和 LOS 信道同时存在的时候, LOS 信道秩为 1,系统的信道容量均有减小的趋势。

电波传播路径存在散射时,不同传播路径的信号混乱程度会影响信道矩阵元素阴影衰落标准差^[12,13]。从图 6 可以看出,标准差越大,系统的容量就越趋近分散和不确定。

5 结束语

通过对室内信道模型的信道容量累积分布仿真分析,得出 NLOS 和 LOS 信道同时存在时,系统的信道容量与室内散射体的丰富程度呈正相关,散射分量越多,系统的信道容量越大,信道相关性越大,系统的容量就越小。同时,对于相关性很小的收发矩阵,也有可能使得信道矩阵的特征值减少,系统容量也较小,这能合理地解释室内的针孔信道效应。

参考文献:

- [1] 郑伟. TD-LTE 室内覆盖部署探讨[J]. 电信技术, 2010(12): 29.
ZHENG W. Discussion on TD-LTE indoor coverage deployment[J]. Telecommunications Technology, 2010(12): 29.
- [2] 康桂华, 张朝阳, 仇佩亮. 基于校验矩阵构造 BCM 网格的一般方法[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(1): 6-12.
KANG G H, ZHANG C Y, CHOU P L. A general approach to the construction of BCM trellis based on parity-check matrix[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(1): 6-12.
- [3] XU H, CHIZHIK D, HUANG H. A generalized space time multiple-input multiple-output (MIMO) channel model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(3): 966-975.
- [4] 宋燕辉. 基于 LTE 系统软频率复用改进方案性能评估[J]. 电讯技术, 2012, 52(4): 503-507.
SONG Y H. Performance estimation of improved soft frequency reuse for inter-cell interference coordination in LTE networks[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(4): 503-507.
- [5] WINNER II channel models D1.1.2 v1.1[EB/OL]. (2007-09-30) [2017-04-29]. <http://www.docin.com/p-1218801651.html>.
- [6] 杨德智. 基于 802.11n 的 MIMO 信道建模研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
YANG D Z. Research on MIMO channel modeling based on 802.11n[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006.
- [7] IEEE P802.11 wireless LANs(TGn channel models)[EB/OL]. (2004-05-30)[2017-04-29]. <http://www.doc88.com/p-459274556755.html>.
- [8] 马润. 室内无线信道的传播模型及其在家庭网中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
MA R. Propagation model of indoor radio channel and its application in home network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [9] 李波. 超宽带室内信道模型的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
LI B. Research on UWB indoor channel model[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [10] GUO D N, SHAMAI S, VERDU S. Mutual information and minimum mean-square error in Gaussian channels information theory[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(4): 1261-1282.
- [11] 肖海林. 新一代无线通信系统中的 MIMO 信道建模与信道估计[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
XIAO H L. MIMO channel modeling and channel estimation in new generation wireless communication system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
- [12] 高峰, 和凯, 宋智源, 等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 36-41.
GAO F, HE K, SONG Z Y, et al. Research on large scale antenna arrays for 5G mobile communication technology [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 36-41.
- [13] 毕奇, 谢伟良, 陈鹏, 等. LTE 多天线技术发展趋势[J]. 电信科学, 2014, 30(10): 1-7.
BI Q, XIE W L, CHEN P, et al. Progress and trends of multiple antennas technology in LTE network[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(10): 1-7.

[作者简介]



李崇鞅 (1983-), 男, 湖南邮电职业技术学院讲师, 华中科技大学讲师, 主要研究方向为移动通信技术。

胡国安 (1976-), 男, 湖南邮电职业技术学院副教授, 主要研究方向为无线通信。

范波勇 (1974-), 男, 湖南邮电职业技术学院副教授、高级工程师, 主要研究方向为移动通信技术。

朱永平 (1971-), 男, 湖南邮电职业技术学院副教授, 华中科技大学副教授, 主要研究方向为通信电源。