

## 2.6 GHz 频段走廊环境下 MIMO 信道特性的研究

朱甜甜<sup>1,2</sup> 李朋朋<sup>2</sup> 王萍<sup>2</sup> 郑国莘<sup>1</sup>

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 通信与信息工程学院 上海 200072;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050)

**摘要:** 本文采用高密度  $8 \times 29$ MIMO 天线,在 2.6 GHz 和 20 MHz 带宽情况下测量获得走廊环境下的信道特性。在信道测量时采用了 RUSK 信道探测器来获得高分辨率的测量数据。测量的实际场景选择了典型的办公走廊和半开放式的走廊场景。本文重点分析在不同天线极化方式下的信道时延扩展和信道相关性,同时也分析了不同场景下的天线交叉极化功率比和角度扩展。

**关键词:** MIMO 信道;走廊环境;多径衰落特性;天线极化

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

### Research on MIMO channel characteristics in corridor environment at 2.6 GHz

Zhu Tiantian<sup>1,2</sup> Li Pengpeng<sup>2</sup> Wang Ping<sup>2</sup> Zheng Guoxin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, (SCIE) Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, CAS, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** In this paper, we obtain the MIMO channel characteristics of the corridor environment with a high density  $8 \times 29$  MIMO channels at 2.6 GHz with 20 MHz bandwidth. The RUSK channel sounder is applied in the channel measurement campaign, which can obtain the high-resolution measurement results. The channel measurement campaign has been performed in classical office corridor and semi-open corridor scenarios. We focus on the characteristics of delay spread and correlation with different antenna polarization. For different scenarios, the cross-polarization power ratio (XPR) and angle spread are also analyzed.

**Keywords:** MIMO channel; corridor environment; multipath fading characteristics; antenna polarization

## 1 引言

随着无线通信网络的迅猛发展,许多关键技术在下—代移动通信系统中起到至关重要的作用,其中 MIMO 技术把空间域开拓为一种新的资源,为下一代移动通信系统追求更高的频谱效率,提供了关键的解决方案。许多 MIMO 技术,例如空间复用、空时编码、波束赋形、空间分集等已经应用于 4G 无线通信系统,在未来的 5G 通信中,MIMO 等大规模天线阵列技术也将在主要技术场景中发挥着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。在特定环境下,研究电磁波的传播特性及 MIMO 信道特性,对研究和发展下一代无线通信系统全面普及应用具有重要意义。在室内环境下对无线业务的需求日益增加,走廊环境是一个典型的无线电波传播场景。本文在走廊场景中采用  $8 \times 29$ MIMO 天线在 2.6 GHz 频段宽带情况下获得 MIMO 信道特性。我们选择典型的办公室走廊和半开放式的走廊场景进行实地测量,在测量中采用

RUSK 信道探测器,它可以获得高分辨率的测量结果。最后我们分析不同天线极化方式在两种走廊环境下对均方根时延扩展以及它的 CDF 的影响。同时分析天线的交叉极化功率比和角度扩展。

本文首先介绍了基于测量的参数估计方法以及实测场景和测量系统,其次给出测量配置参数,并根据测量结果对 MIMO 信道参数进行分析,最后给出结论。

## 2 基于测量的参数估计方法

在走廊环境下,无线电信号的传播主要受到小尺度衰落的影响,在短时间或者短距离传播后其幅度、相位或者多径时延快速发生变化,以至于大尺度路径损耗的影响可以忽略不计<sup>[3]</sup>。小尺度衰落由同一传输信号沿多条传播路径传播,以微小的时间差达到接收机的信号相互干扰所引起的。接收天线将他们合成一个幅度和相位都急剧变化的复信号,其变化程度主要取决于多径信号的强度、相对传输时

延,以及信号的带宽。

移动无线信号的小尺度变化与移动无线信道的冲激响应直接相关。冲激响应是宽带信道特性,它包含了所有用于模拟和分析信道中任何类型的无线电传播的信息<sup>[4-5]</sup>。研究和测量走廊环境下的信道特性,首先是对限定环境下的无线信道建模为一个具有时变冲激响应特性的线性滤波器。而多径信号的幅度和时延之和将影响信道的滤波特性。设  $x(t)$  表示传播的带通信号波形,  $y(t)$  表示接受信号波形,  $h(t, \tau)$  表示时变多径信道的冲激响应。变量  $t$  表示信道的时变特性,  $\tau$  代表在特定的  $t$  时刻下信道的多径时延,他是一个时间的增量。接受信号  $y(t)$  可表示为发送信号  $x(t)$  和信道冲激响应的卷积<sup>[6]</sup>:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t, \tau) d\tau \quad (1)$$

信道冲激响应的多径时延  $\tau$  可离散化为相同的时延段,称为附加时延段。每段时延宽度均等于  $\tau_{i+1} - \tau_i$ , 其中  $\tau_0 = 0$ , 表示接收机第一次收到的信号。令  $i = 0$ , 则  $\tau_1 - \tau_0$  的时延宽度用  $\Delta\tau$  来表示。规定  $\tau_0 = 0, \tau_1 = \Delta\tau, \tau_i = i\Delta\tau$ , 其中  $i = 0$  到  $N-1$ 。  $N$  表示相等间隔的多径分量的最大数目, 其中包括第一条到达的分量。第  $i$  段内收到的多径信号表示多径信号分离出的具有时延  $\tau_i$  的信号。这种量化为时延段的技术确定了信道模型时延的精度。经过多径信道的接收信号由许多受损耗、有延时、有相移的传输信号叠加组成, 信道基带冲激响应<sup>[7]</sup>:

$$h_b(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) \exp[j\varphi_i] \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (2)$$

式中:  $a_i(t, \tau), \tau_i(t)$  分别表示为在  $t$  时刻第  $i$  个多径分量的实际幅度和附加时延。  $\varphi_i = 2\pi f_c \tau_i(t) + \varphi_i(t, \tau)$  表示第  $i$  个多径分量传输造成的相移,  $\delta(\cdot)$  是单位冲激函数。

在走廊环境下, 由于接收机移动速度低, 这样可假设信道的冲激响应在一段时间间隔或距离内具有时不变性<sup>[4]</sup>, 这样信道的冲激响应模型可简化为:

$$h_b(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \exp(j\theta_i) \delta(\tau - \tau_i) \quad (3)$$

在测量或预测  $h_b(\tau)$  时, 发送端采用一个近似等于  $h_b(\tau)$  函数的测试脉冲:

$$p(\tau) \approx \delta(t - \tau) \quad (4)$$

用该脉冲测量信道的  $h_b(\tau)$ 。

对于小尺度信道建模时, 采用基于本地的  $|h_b(t, \tau)|^2$  平均值来求解信道的功率延迟分布。在不同地方采用  $|h_b(t, \tau)|^2$  测试, 就可以得到一个功率延迟分布的综合结果。

研究表明, 若  $p(t)$  持续时间比多径信道冲激响应小很多, 则接收信号  $r(t)$  就无需做卷积的反变换来求出多径信号的相对强度, 本地功率延迟分布表示为:

$$p(\tau) \approx \overline{k |h_b(t, \tau)|^2} \quad (5)$$

平均附加时延  $\bar{\tau}$  是功率延迟分布的一阶矩, 定义为:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (6)$$

rms 时延扩展是功率延迟分布的二阶矩的平方根, 定义为:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (7)$$

式中:

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k p(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k p(\tau_k)} \quad (8)$$

角度扩展  $\Delta$  描述了空间选择性衰落特性, 表示了功率谱在空间上的色散程度。角度扩展  $\Delta$  等于功率角度谱  $p(\theta)$  的二阶中心矩的平方根, 即:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\theta - \bar{\theta})^2 p(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} p(\theta) d\theta}} \quad (9)$$

式中:

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{\infty} \theta p(\theta) d\theta}{\int_0^{\infty} p(\theta) d\theta} \quad (10)$$

角度扩展在  $[0, 360^\circ]$  分布, 角度扩展越大, 表明散射环境越强, 信号在空间的色散度越高; 相反, 角度扩展越小, 表明散射环境越弱, 信号在空间的色散度越低。高密度 MIMO 天线的波束成形依赖于角度扩展。

交叉极化功率比(XPR)定义为同向极化功率  $p_\omega(t)$  与垂直极化功率  $p_{\text{cross}}(t)$  的比值<sup>[8]</sup>:

$$XPR(t) = \frac{p_\omega(t)}{p_{\text{cross}}(t)} \quad (11)$$

### 3 测量场景与测量系统

#### 3.1 测试场景描述

下图1和图2为测量场景实景图, 选取中科院上海微系统与信息技术研究所办公楼的典型走廊环境和半开放式走廊环境作为实际测量场景。



图1 典型走廊环境



图 2 半开放式走廊环境

表 1 描述了两种走廊环境的具体情况。

表 1 走廊环境特性

特征	典型走廊	半开放式走廊
场景	视距	视距
测量距离/m	30	30
走廊宽度/m	2	4
走廊高度/m	3	3.5
人流密度	百人/小时	十人/小时
散射物	走廊周围混凝土墙	壁混凝土墙壁和侧壁玻璃墙

### 3.2 测试系统描述

图 3 和图 4 分别为典型走廊场景和半开放式走廊场景的测试路线示意图。

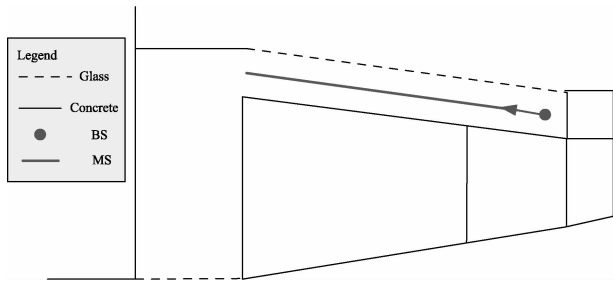


图 3 典型走廊环境测试路线

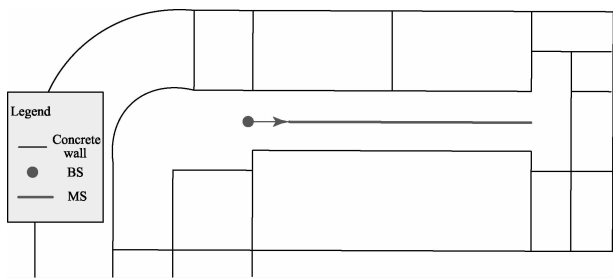


图 4 半开放式走廊环境测试路线

在实际的宽带 MIMO 信道测量过程中,采用德国 MEDAV 公司的 RUSK 信道探测器来进行 MIMO 信道中各子信道的冲激响应测量。信道探测器发送的测试信号工作在 2.6 GHz 频段 20 MHz 带宽,发送功率为 36 dBm。RUSK MIMO 信道探测器可以实时的测量信道的复杂的冲激响应,并且在收发端可以选择不同极化方式和阵列结构的的天线阵列<sup>[9-10]</sup>。

为了获得高分辨率的测量结果,我们采用了复杂的天线阵列,发送天线采用 8 个双极化均匀线性天线阵列(PULA),接收天线采用 29 个双极化均匀圆形贴片天线单元(SPUCAs)。

## 4 测量参数配置与测量结果

### 4.1 宽带 MIMO 信道测量参数配置

本文中在实测时采用的参数配置如表 2。

表 2 测量参数配置

特征	典型走廊环境	半开放式走廊环境
中心频率/GHz	2.6	2.6
带宽/MHz	20	20
发送功率/dBm	36	36
发送天线高度/m	2.2	2.2
接收天线高度/m	1.5	1.5
发送天线	PULA	PULA
接收天线	SPUCA	SPUCA
MIMO 信道	8×29	8×29
测试范围	Within 30 m	Within 30 m

### 4.2 测量结果分析

在测试过程中,通过设置发射天线和接收天线的不同极化方式,得到四种不同的组合即:HH, HV, VH, VV(H 代表水平极化,V 代表垂直极化)。测量到的不同极化组合条件下,在典型走廊和半开放式走廊场景下的时延分布情况。图 5 和图 6 给出了在 2.6 GHz 两种走廊场景下宽带 MIMO 信道的信号传输时延的累积分布,rms 时延扩展估计时,最大时延扩展设置为 30 dB。结果表明在典型走廊环境下的 rms 时延扩展大于相同条件下的半开放式走廊环境。这是因为典型走廊环境下由于周围都是混凝土墙壁,造成信号在传输过程中发生更多的反射和散射。除此之外,当收发天线采用交叉极化方式时<sup>[11-12]</sup>,在两种走廊场景下的 rms 时延扩展比其他方式都相应减小。

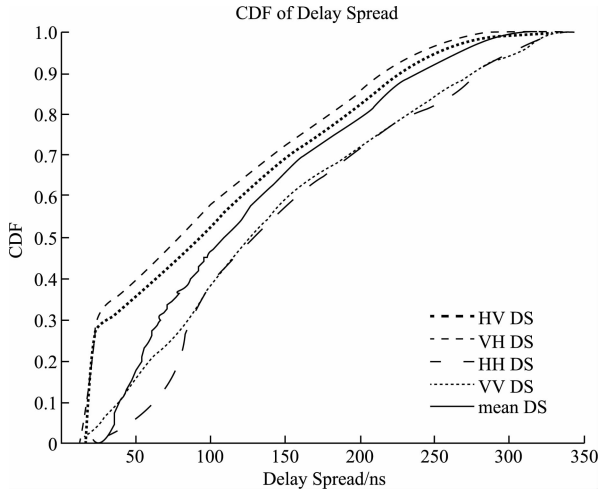


图5 典型办公走廊场景 rms 时延扩展累积分布

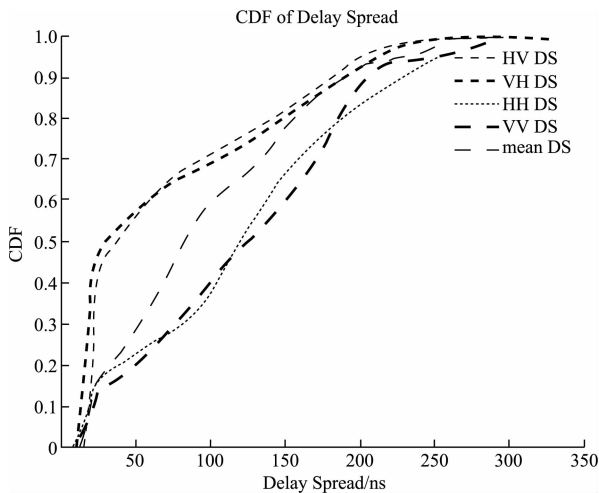


图6 半开放式走廊场景 rms 时延扩展累积分布

通过测量可得到角度扩展参数。在典型走廊环境下,角度扩展均值 $\bar{\Delta}=46.8^\circ$ ;在半开放式走廊环境下,角度扩展均值 $\bar{\Delta}=26.8^\circ$ 。结果表明在典型的走廊环境下的角度扩展大于半开放式走廊环境,所以在典型走廊环境下信号功率谱色散程度较大,散射环境比较强。通过对比不同走廊场景的交叉极化比参数,在典型走廊环境下 $\overline{XPR}=8.54$  dB,在半开放式走廊环境下 $\overline{XPR}=8.53$  dB。结果表明两种场景下的 XPR 基本相同。

## 5 结 论

本文主要针对两种不同的走廊场景,采用 RUSK 信道探测器,在 2.6 GHz 频段情况下的宽带  $8 \times 29$  MIMO 信道特性进行实地测量。分析了不同收发天线极化方式组合下的均方根时延扩展累积分布情况,并测量分析了 MIMO 信道角度扩展和交叉极化功率比特性。测量结果对提高在走廊环境下 MIMO 信道性能具有重要意义。

## 参考文献

- [1] LUTHER E. 5G 大规模多人多出(MIMO)测试台:从理论到实现[J]. 国外电子测量技术,2014,11:6-10,13.
- [2] 安捷伦最新版本 SystemVue 软件加速 MIMO 雷达和无线/4G 设计增强功能旨在推动新兴宽带技术更快部署[J]. 电子测量与仪器学报,2013(4):387.
- [3] YAO Y, ZHENG J F, FENG ZH H. Small-scale variations of cross-polar discrimination in Nakagami-m fading channels [J]. Communications Letters, IEEE, 2012, 16(11): 1820-1823.
- [4] 张华,李懿,尧文彬,等. 2.6GHz 频段传播模型校正及分析[J]. 电信工程技术与标准化,2011(9):5-8.
- [5] 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]. 国外电子测量技术,2009(8):35-37.
- [6] ZUO X Y, DONG X D, WANG Y SH, et al. A simple parallel ray approximation based stochastic channel model for MIMO UWB systems with measurement verification [C]//2010 International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC). IEEE, 2010, 3: 102-106.
- [7] HANEDA K, POUTANEN J, LIU L f, et al. Comparison of delay and angular spreads between channel measurements and the COST2100 channel model [C]//Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2010 Loughborough. IEEE, 2010: 477-480.
- [8] 宋媛媛,王萍. 基于实测数据的 MIMO 信道容量研究[J]. 电子测量技术,2015(1):120-122.
- [9] 芮艳华,张焱,刘杉坚,等. 多天线无线信道探测器及室内信道分析模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009(4):538-542.
- [10] 田大为,王争,刘国强,等. MIMO 信道的 RUSK 探测法[J]. 电信快报,2014(2):45-48.
- [11] 王鹏,郑剑峰,高旭,等. 室内信道中多极化 MIMO 系统的容量[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011(7):993-998.
- [12] GAMPALA G, REDDY C J. Compact LTE antenna design using the theory of characteristic modes for smart phone applications [C]//Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), 2013 USNC-URSI. IEEE, 2013(11): 7-13.

## 作者简介

朱甜甜,1988 年出生,研究生,主要研究方向为宽带无线通信、无线电信号传播、车载通信。

E-mail: tiantianzhu@mail.sim.ac.cn

王萍(通讯作者),1973 年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为超宽带无线通信、无线电波传播等。