

不同极化条件下 28 GHz 毫米波频段在地铁隧道中的多输入-多输出信道性能分析

刘 玺

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海//高级工程师)

摘 要 针对未来 5G(第 5 代移动通信技术)毫米波应用于地铁隧道的特殊问题,通过现场实测试验与射线跟踪仿真试验,计算 28 GHz 毫米波在隧道环境中的信道相关性,得到了不同发射与接收机天线阵位置下、不同极化配置对多输入-多输出信道特性的影响。研究发现,仿真结果与现场实测结果匹配度高,验证了射线跟踪仿真试验的正确性。试验结果显示,采用 HH(水平极化)时,在 5G 毫米波隧道通信中的多输入-多输出信道性能更佳。

关键词 地铁隧道;信道特性;毫米波;多输入-多输出;信道容量

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.025

Analysis of MIMO Characteristics of 28 GHz Millimeter Wave in Metro Tunnel under Different Polarization Configuration

LIU Xi

Abstract Targeting the specific scenario of 5G millimeter wave applied in metro tunnel in the future, the channel correlations of 28 GHz millimeter wave in tunnel environment is calculated by field test and ray tracing simulation, and the influences of the antenna array position and different polarization configuration on the MIMO channel characteristics are obtained. Results show that simulation results are highly matching with field measurement results, validating the results of ray tracing simulation. Experiment results show that HH (horizontal polarization) encourages better MIMO performance in 5G millimeter wave communications in the tunnels.

Key words metro tunnel; channel characteristics; millimeter wave; MIMO (multiple-input-multiple-output); channel capacity

Author's address China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

为了预测地铁隧道环境中 5G(第 5 代移动通信技术)MIMO(多输入-多输出)信道的性能,开展了

5G 主要频段——28 GHz 毫米波频段的传播特性研究。本文分别在 HH(水平极化)及 VV(垂直极化)偏振配置结构下,比较了同一特定位置的实测结果和仿真结果,通过仿真模型预测隧道其他位置的 MIMO 信道容量。

1 毫米波的传播试验

1.1 实测环境及探测装置

测试工作在中国南通中天技术公司的隧道中进行。图 1 为隧道模型示意图,图 2 为矩形隧道和拱形隧道截面图,图 3 为发射-接收阵列位置图,图 4 为信道测试设备设置图。

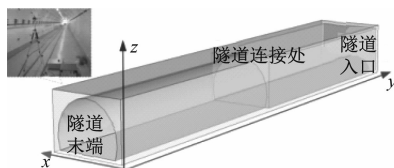


图 1 隧道模型示意图

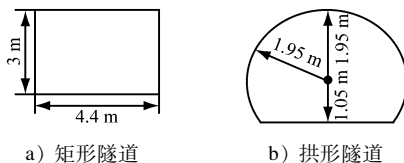
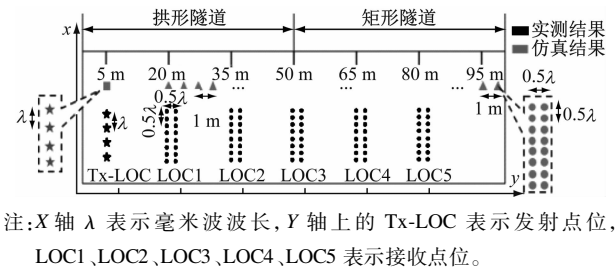


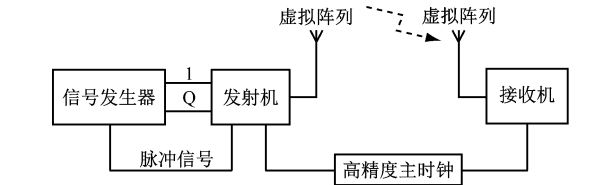
图 2 隧道截面图

MIMO 测试采用虚拟天线阵方法。由于毫米波波长很短,仅几毫米,为了保证测试的准确性,发射端和接收端使用了线性手动平移台。将天线架设在手动平移台上,使其可以在 X 轴和 Y 轴移动。该手动平移台精度可达 10 μm 。将收发机喇叭天线分别固定于收发机三脚架上的手动平移台,形成 MIMO 测试系统。通过手动平移台来移动收发射天线的空间位置,进而实现虚拟阵列 MIMO 测试。^[1]



注: X轴 λ 表示毫米波波长, Y轴上的 Tx-LOC 表示发射点位, LOC1、LOC2、LOC3、LOC4、LOC5 表示接收点位。

图3 发射-接收阵列位置图



注: 信号发生器为 Tekronix AWG7122C; 发射机为 Keysight E8267D 信号发生器; 高精度主时钟为 Rubidium Clock; 接收机为 Keysight N9030B 频谱分析仪。

图4 信道测试设备设置图

虚拟阵列用于实现 MIMO 测试。在测试过程中,考虑了 VV 及 HH 两种极化配置偏振结构。试验采用定向喇叭天线,半功率波束宽度为 16° ,增益为 19.25 dBi。VV 与 HH 为相互转置关系,可通过调整天线位置来实现二者的转换。例如,可将 VV 结构的 天线孔径长边垂直放于地面上,再将其与地面平行 90° 旋转,即可实现 HH 发射及接收信号。

在 VV 极化结构中,所有发射和接收天线阵元都是垂直极化的。在 HH 极化结构中,所有发射和接收天线阵元都是水平极化的。发射信号采用 PN 序列(Pseudo-Noise Code),测试参数取值见表 1。

1.2 仿真试验

为了将测试结果与理论预测进行比较,本研究采用 Wireless InSite 射线跟踪软件来获得仿真 MIMO 性能,并利用 Autocad 软件建立基于测试环境的三维仿真模型,见图 1 所示。100 m 长的隧道模型由 50 m 长矩形隧道和 50 m 长拱形隧道组成。隧道的宽度和高度分别为 4.4 m 和 3.0 m。

为了进一步研究,将图 3 中发送(Tx)-接收(Rx)距离范围设为 15~94 m,将间隔设为 1 m,仿真计算其它位置上的 MIMO 信道容量。无线隧道洞壁的特征参数如表 2 所示。

2 信道容量 MIMO 分析

2.1 信道容量计算

CIR(信道冲激响应)是通过收集数据与发送序列副本的互相关而直接生成的^[2]。为了将 MPC(有

表 1 信道测试参数

参数	取值
中心频率/GHz	28
发射功率/dBm	23
频宽/MHz	100
采样率/MHz	200
延迟分辨率/ns	10
最大时延/ns	5 110
PN 序列长度/片	511
发射天线高度/m	1.6
接收天线高度/m	1.6

表 2 无线隧道洞壁的特征参数

材料	厚度/m	粗糙度	电导率/(s/m)	介电常数
混凝土	0.5	0.001	0.48	5.31

效多径分量)与背景噪声分离,本文基于相对于原始功率延迟分布的平均热噪声基底 SNR(信噪比)为 5 dB 来计算阈值。其相互信息容量基于 MIMO 测试系统基本属性。为计算 MIMO 信道容量,需先计算窄带 CIR^[3]:

$$h_{\text{narr}}(t,s,u) = \sum_{i=1}^{N_\tau} \bar{h}(t,\tau_i,s,u) \quad (1)$$

式中:

$h_{\text{narr}}(t,s,u)$ —— t 时刻,第 u 根 Tx(发射)天线到第 s 根 Rx(接收)天线的窄带信道冲激响应;

$h(t,\tau_i,s,u)$ —— t 时刻,第 i 个子径,第 u 根 Tx 天线到第 s 根 Rx 天线的窄带信道冲激响应;

τ_i ——第 i 个子径的时延;

N_τ ——多径数。

在分析 MIMO 信道容量之前,应规范化 MIMO 信道矩阵。每个信道实现的归一化信道矩阵为^[4]:

$$\mathbf{H}_{\text{nor}} = \mathbf{H} \sqrt{\frac{N_{\text{Tx}} N_{\text{Rx}}}{\|\mathbf{H}\|_F^2}} \quad (2)$$

其中, $\|\mathbf{H}\|_F$ 为 Frobenius 范数:

$$\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{Rx}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{Tx}}} |h_{ij}|^2} \quad (3)$$

假设在 Tx 处没有可用的信道状态信息,则 MIMO 信道的容量可表示为:

$$C_a = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_{\text{Rx}}} + \frac{\rho}{N_{\text{Tx}}} \mathbf{H}_{\text{nor}} \mathbf{H}_{\text{nor}}^* \right) \right] \quad (4)$$

式中:

ρ ——接收端单一天线平均信噪比;

$\mathbf{H}_{\text{nor}}^*$ —— \mathbf{H}_{nor} 矩阵的厄米转置;

N_{Tx}, N_{Rx} ——分别是 Tx 和 Rx 天线单元的个数;

$I_{N_{Rx}}$ —— $N_{Rx} \times N_{Rx}$ 的单位矩阵。

2.2 仿真结果与实测结果

为了重点考察不同区域环境对 MIMO 的影响,忽略传输距离的因素,采用恒定的 SNR 10 dB。在图 5 和图 6 为用于恒定 SNR 的 2×2 和 4×4 MIMO 信道容量。

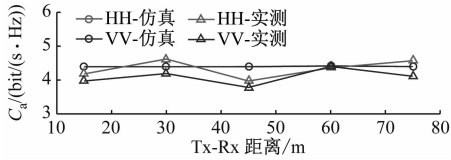


图 5 Tx-Rx 距离的 2×2 MIMO 信道容量图

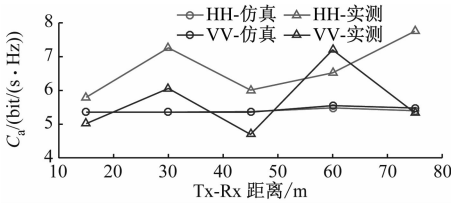


图 6 Tx-Rx 距离的 4×4 MIMO 信道容量图

由图 5 及图 6 可见,仿真结果低于实测结果。这是由于实测环境的墙壁上有一些小的散射,而仿真试验环境为理想环境,未考虑散射情况,故仿真值低于实测值。在 Tx-Rx 距离为 30 m 处,仿真结果与实测结果趋势相同,但该位置附近 MIMO 信道容量实测值高于仿真值。经分析,因该处实测环境有金属材料,故而导致了强烈反射。由此可知,仿真结果与实测结果基本一致,仿真结果有效。

2.3 配置偏振结构不同对信道容量的影响

根据国际电信联盟的建议,在 28 GHz 毫米波段下,混凝土的电导率和相对介电常数分别为 0.48 s/m 和 5.31。对于非理想导电表面上的反射,垂直偏振(\perp)和水平偏振(\parallel)的平面波菲涅耳反射系数为^[5]:

$$R_{\perp}(\theta) = \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2(\theta)}} \quad (5)$$

$$R_{\parallel}(\theta) = \frac{\varepsilon' \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon' \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon_1 - \sin^2(\theta)}} \quad (6)$$

其中,

$$\varepsilon_1 = \varepsilon / \varepsilon_0 - j\sigma / (\omega \varepsilon_0);$$

$$\omega = 2\pi f;$$

式中:

ε_r ——相对介电常数;

ε_0 ——常量, $\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{ f/m}$;

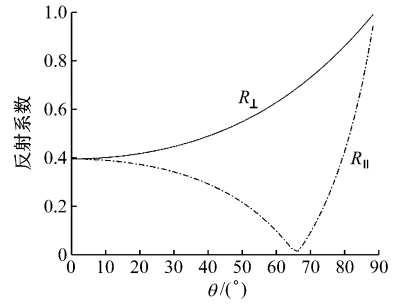
ε ——材料的介电常数, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$;

σ ——电导率;

f ——载频;

θ ——入射角。

垂直和水平偏振的反射系数 $R_{\perp}(\theta)$ 与 $R_{\parallel}(\theta)$ 随 θ 的变化如图 7 所示。



注:恒定 SNR = 10 dB。

图 7 反射系数与 θ 的关系图

由图 7 可见: $R_{\perp}(\theta)$ 随 θ 的增大而增大; $R_{\parallel}(\theta)$ 具有布鲁斯特角,且总是低于 $R_{\perp}(\theta)$ 。

在水平偏振配置下,隧道天花板和地板上的入射光线是水平极化的,但在隧道壁上却观察到垂直极化电磁波信号;相应的,在垂直极化偏振配置下,在隧道壁上却观察到水平极化电磁波信号。根据反射系数,与 VV 偏振配置相比,HH 偏振配置下隧道壁上的反射射线功率更大。由于隧道宽度大于隧道高度,隧道壁上的反射光线比隧道天花板和地板具有更大的到达角。这导致 HH 的角展度高于 VV。因此,HH 偏振配置具有比 VV 偏振配置更大的信道容量。

此外,本文还对隧道其他位置的 MIMO 信道容量进行了仿真。仿真中设置了 80 处接收机,每处有 $2 \times 8 = 16$ 个天线。Tx-Rx 距离为 15 ~ 94 m,两处接收机之间的间隔为 1 m。在恒定信噪比下,仿真预测的 2×2 MIMO 和 4×4 MIMO 信道容量分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 及图 9 可见:当 Tx-Rx 距离从 15 m 到 45 m 时,HH 和 VV 偏振配置下的 MIMO 信道容量几乎是重叠的。这是由于 Ricean 信道 k 因子较高。其中 k 因子即为 LOS(视线传输)分量和 NLOS(非视线传输)分量的功率比。当 Tx-Rx 距离从 45 m 增长到 95 m 时,在 10 dB 恒定信噪比下的 MIMO

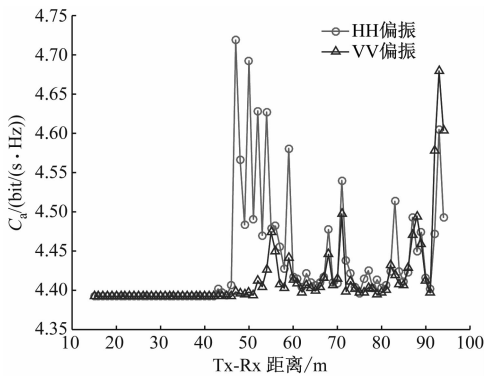


图8 隧道其它位置 Tx-Rx 距离的 2×2 MIMO 信道容量仿真图

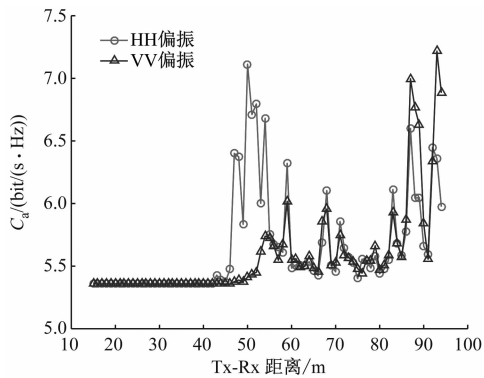


图9 隧道其它位置 Tx-Rx 距离的 4×4 MIMO 信道容量仿真图

信道容量因 k 因子的减小而增大,且 HH 偏振配置下高于 VV 偏振配置下。因此,HH 被认为是未来毫米波 MIMO 信道中更好的极化配置方式。

由于 MIMO 系统非常复杂,因此有必要将其性能与 SISO(单输入单输出)系统进行比较。恒定信噪比为 10 dB 时,不同极化方式下所有 Tx-Rx 距离的平均信道容量如表 3 和表 4 所示。

表 3 SNR 为 10 dB 的平均信道容量				
试验方式	极化结构	平均信道容量/(bit/(s·Hz))		
		4×4 MIMO 信道	2×2 MIMO 信道	SISO 信道
实测	VV	5.7	4.1	3.5
	HH	6.7	4.3	3.5
仿真	VV	5.40	4.39	3.46
	HH	5.42	4.39	3.46

由表 3 及表 4 可见:无论是实际测试还是仿真,HH 极化结构的信道容量更好,2×2MIMO 信道和 4×4MIMO 信道的平均信道容量都高于 SISO 信道

表 4 预测 SNR 为 10 dB 时的平均信道容量				
试验方式	极化结构	平均信道容量/(bit/(s·Hz))		
		4×4 MIMO 信道	2×2 MIMO 信道	SISO 信道
测试	VV	5.59	4.41	3.46
仿真	HH	5.65	4.44	3.46

容量。

3 结语

本文针对 5G 未来应用于城市轨道交通的需求,以南通隧道为测试环境,采用 VV 及 HH 偏振配置,开展了 28 GHz 毫米波频段的 MIMO 信道效果实测试验和仿真模拟试验。试验还采用了高增益定向锥喇叭天线,以克服毫米波频段的高衰减。

试验发现:在恒定信噪比下,HH 和 VV 偏振配置的平均信道容量实测值分别为 6.7 bit/(s·Hz) 和 5.7 bit/(s·Hz),仿真值分别为 5.42 bit/(s·Hz) 和 5.40 bit/(s·Hz)。可见,在恒定信噪比下,无论是实测试验还是仿真试验,HH 偏振配置的平均信道容量都高于 VV 偏振配置的平均信道容量。因此,对于隧道中的毫米波 MIMO,HH 是未来地铁隧道中毫米波 MIMO 通信系统更好的偏振配置方式。

参考文献

[1] YIN X, LIU X, ZHENG G, et al. 28-GHz Channel characterization for a short tunnel[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(12):1146.

[2] TRUFFER P, AND LEUTHOLD P E. Wide-band channel sounding at 24 GHz based on a novel fiber-optic synchronization concept [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(4):692.

[3] BOETTCHER A, SCHNEIDER C, NARANDZIC M, et al. Power and delay domain parameters of channel measurements at 2.53 GHz in an urban macro cell scenario[C]// IEEE. Fourth European Conference on Antennas & Propagation, Barcelona: IEEE, 2010:1.

[4] MABROUK I B, TALBI L, NEDIL M, et al. Effect of antenna directivity on performance of multiple input multiple output systems in an underground gold mine[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2012, 6(5):555.

[5] FONTAN F P. Modelling the wireless propagation channel: A simulation approach with MATLAB[M]. Hoboken: Wiley, 2008.

(收稿日期:2020-10-10)