

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211088

天线极化和阵元间距对地铁隧道 MIMO 性能的影响*

纪文莉¹ 钱竞元² 郑国莘²

(1. 上海申通地铁集团有限公司技术中心 上海 201103; 2. 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海大学 上海 200444)

摘要: 在上海地铁隧道环境中对 5.6 GHz 多输入多输出系统开展了基于伪随机序列的信道测量。通过相关运算获得了子信道冲激响应, 分析了不同天线极化和阵元间距对 2×2 MIMO 信道条件数、等效自由度和信道容量的影响。结果表明, 当交叉极化天线的条件数均值约为 10 时, 分别比垂直同极化和水平同极化约低 5 和 8。当交叉极化的等效自由度均值约为 1.6 时, 分别比垂直同极化和水平同极化约高 0.3 和 0.2。当交叉极化的信道容量均值约为 5.8 bit/s/Hz, 分别比垂直同极化和水平同极化约高 0.7 bit/s/Hz 和 0.8 bit/s/Hz。3 个结果都一致表明交叉极化天线有利于 MIMO 性能的提高。另外, 天线阵元间距对于同极化 MIMO 的信道容量影响较大, 而对于交叉极化 MIMO 的信道容量影响较小, 表明采用交叉极化能以较小的阵元间距获取较大的信道容量, 这些结果对于地铁隧道狭小空间中减少天线尺寸提升信道容量有参考意义。

关键词: 地铁隧道; 多输入多输出; 天线极化; 阵元间距

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

Antenna polarization and array spacing on MIMO performance influence in subway tunnel

Ji Wenli¹ Qian Jingyuan² Zheng Guoxin²

(1. The Technology Center of Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai 201103, China;

2. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The channel measurement based on pseudo-random sequence was carried out for 5.6 GHz Multiple Input Multiple Output (MIMO) system in Shanghai metro tunnel environment. The impulse response of subchannel is obtained by correlation operation. The effects of antenna polarization and array element spacing on the condition number, equivalent degree of freedom and channel capacity of MIMO channels are analyzed. The results show that when the average number of cross polarization conditions of the antenna is about 10, it is about 5 and 8 lower than vertical polarization and horizontal co polarization respectively. When the mean value of cross polarization equivalent degree of freedom is about 1.6, it is about 0.3 and 0.2 higher than that of vertical polarization and horizontal homopolarization respectively. When the average cross polarization capacity is about 5.8 bit/s/Hz, it is about 0.7 bit/s/Hz and 0.8 bit/s/Hz higher than that of vertical polarization and horizontal polarization respectively. All three results agree that the cross polarization of antenna is beneficial to the improvement of MIMO performance. It is also found that the antenna array element spacing has a greater impact on the channel capacity of co polarized MIMO. The channel capacity of cross polarized MIMO is less affected. It shows that cross polarization can obtain larger channel capacity with smaller array element spacing. These results have reference significance for reducing antenna size and increasing channel capacity in narrow space of subway tunnel.

Keywords: subway tunnel; MIMO; antenna polarization; element spacing

0 引言

城市轨道交通是第五代移动通信技术 (the 5th generation mobile communication technology, 5G) 的重要

业务场景^[1]。随着基于通信的列车控制 (communication-based train control, CBTC) 无人驾驶模式的出现和乘客日益增长的通信娱乐需求, 对轨道交通通信系统提出了更高的要求^[2]。多输入多输出 (multiple-input-multiple-output,

收稿日期: 2022-08-16

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61871261) 项目资助

MIMO)作为 5G 的核心技术之一,能提升无线通信系统的信道容量和高速率传输的可靠性^[3]。为确保 MIMO 子信道间的去相关性,需根据实际传播环境选择合适的天线极化方式,并保持较大阵元间距^[4]。

目前,国内外对不同天线极化和阵元间距与 MIMO 性能的影响开展了大量的研究工作。文献[5]结合射线跟踪仿真和实际信道测量研究了室内走廊环境中阵元间距对 60 GHz 频段垂直极化 2×2 MIMO 性能影响,发现可以通过增大阵元间距来提高信道容量。文献[6]采用随机散射体分布模型,分析了接收端阵元间距对室内蜂窝 2 GHz 频段单极化 4×4 MIMO 系统各子信道相关性和信道容量,确定了接收端阵元间距对信道容量的有限。文献[7]对办公室场景中的 2.4 GHz 频段混合极化 2×2 MIMO 系统的信道相关性和容量进行测量,该研究发现当单极化阵元间距约为 0.4 个波长时,单极化天线阵列的信道容量与交叉极化天线阵列相当。文献[8]针对矿井巷道环境建立了信道相关性模型,证明只有当阵元间距达到 10 个波长及以上时, 3×3 MIMO 的信道容量接近瑞利信道。

在设计 5G 通信系统时,第 3 代合作伙伴计划(the 3rd generation partnership project, 3GPP)并未提供隧道环境的信道模型,且现有研究针对 5.6 GHz 的 MIMO 信道测试和分析的研究较少。另外,由于隧道空间限制,天线阵元间距难以保证 MIMO 子信道间的相互独立性。为此,本文在实际地铁隧道中开展信道测量的基础上,分析了 5.6 GHz 不同天线极化和阵元间距条件下 2×2 MIMO 信道的条件数、等效自由度和信道容量,为地铁隧道环境中部署 MIMO 通信系统提供了可靠的配置依据。

1 地铁隧道场景 MIMO 信道测量

1.1 信道测量场景和系统

本次 MIMO 信道测量开展于上海地铁 7 号线上海大学站至祁华路站内的拱形截面单轨隧道内,如图 1 所示,发射天线(Tx)和接收天线(Rx)分别位于隧道中央的平板小车上, Tx 和 Rx 距离地面的高度均为 2.65 m。由于天线的高度足够高,测试人员对信道测量的影响可以忽略。为了在隧道中的多个位置进行测量,可由测试人员推动平板小车沿轨道移动。接收端从距离发射端 10 m 处开始进行测量,逐渐远离发射端,采样间隔为 10 m,直至收发距离为 350 m,总共有 35 个测量位置。

MIMO 信道测量系统的连接图如图 2 所示,发射端主要由函数信号发生器(NI PXIe-1085 平台)、功率放大器、发射开关和发射天线阵列组成。发射端采用二进制相移键控调制,在频率为 5.6 GHz 的载波上调制了带宽为 160 MHz 长度为 1 023 个码片的伪随机序列(pseudo-noise, PN),经功率放大后,由开关控制发射端阵元依次发送信号。

接收端由接收天线阵列、接收开关、低噪声功率放大器、频谱分析仪(NI PXIe-1085 平台)和磁盘阵列组成。接

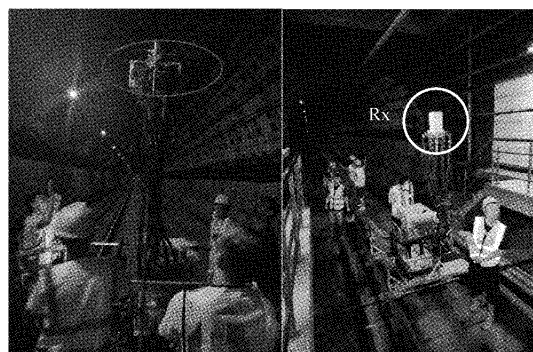


图 1 地铁隧道 MIMO 信道测量场景

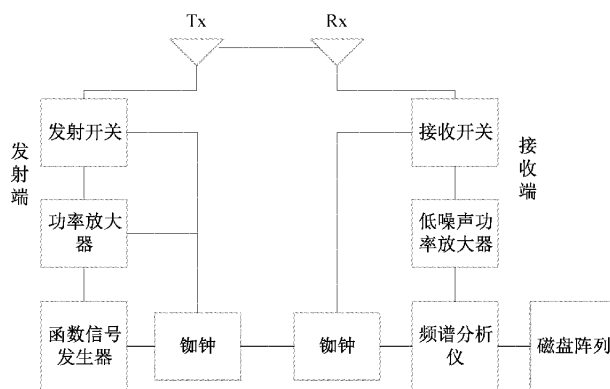
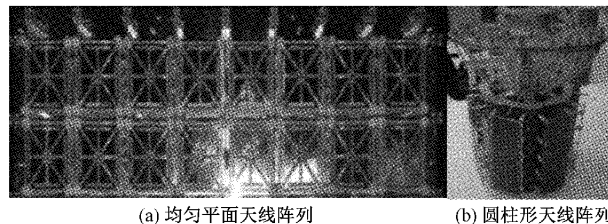


图 2 MIMO 信道测量系统逻辑连接图

收端通过开关分为 8 个通道并行接收测量数据,经低噪声放大器改善接收信号的信噪比,再由频谱分析仪进行模拟-数字转化(analogue-to-digital conversion, ADC),最后将采集的数据保存到磁盘阵列中。另外,两个经过时间同步的高精度铷钟分别位于收发端发送时钟信号,保证测量系统的时间同步。

发射和接收天线均采用定向贴片天线阵列,天线的拓扑结构与文献[9]相一致,如图 3 所示。发射天线阵列由 16 组均匀平面天线对构成,而接收端的圆柱形天线阵列分为 8 个扇区,每个扇区排列 4 组天线对。每组天线对均包含一个垂直和水平极化天线。因此,收发端构成 32×64 的混合极化 MIMO 系统。测量系统的相关参数如表 1 所示。



(a) 均匀平面天线阵列

(b) 圆柱形天线阵列

图 3 收发端 MIMO 天线阵列图

1.2 信道测量方法

本文采用 PN 序列相关方法^[10]对信道进行测量。发射端发送 PN 序列作为信道探测信号,接收端使用相同的 PN

表 1 信道测量系统相关参数

参数描述	参数值
信号类型	PN 10
中心频率/GHz	5.6
带宽/MHz	160
采样速率/MHz	200
参考电平/dBm	10
低噪放增益/dB	60
功率放大器增益/dB	47
收发天线阵元数	32×64

序列进行相关运算,即可得到信道冲激响应(channel impulse response,CIR)^[11]。假设发射信号为 $x(t)$,则接收信号 $y(t)$ 可以表示为:

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

式中: \otimes 表示卷积运算, $h(t)$ 表示 CIR, $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 可以表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

互换式(2)中的 t 和 τ ,将式(1)代入式(2)可得:

$$R_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau)x(\tau-t)d\tau = y(t) \otimes x(-t) = x(t) \otimes h(t) \otimes x(-t) = x(t) \otimes x(-t) \otimes h(t) = R_{xx}(t) \otimes h(t) \quad (3)$$

式中: $R_{xx}(t)$ 为 $x(t)$ 的自相关函数,由于 $x(t)$ 为 PN 序列,具有良好的自相关性,其自相关函数 $R_{xx}(t)$ 近似于狄拉克函数 $\sigma(t)$,则:

$$R_{xy}(t) \approx \sigma(t) \otimes h(t) = h(t) \quad (4)$$

因此,将接收信号 $y(t)$ 与发射信号 $x(t)$ 相同的 PN 序列进行相关运算,即可获得所测量的 CIR。

为减少噪声对后续信道分析的影响,本文设定了动态阈值门限对多径信号进行提取。在图 4 中,先对测量得到的 CIR 进行复平方运算得到多径的相对功率。通常,相对时延尾部几百 ns 内的信号为噪声,将这部分噪声的均值 P_{noise} 加上 3 dB 作为第一阈值,再将最大功率径 P_{max} 减去 20 dB 作为第二阈值。最终的噪声阈值 $P_{threshold}$ 选为两者中的较大值,小于该阈值的多径信号均被视为噪声,不参与后续的计算分析。

$$P_{threshold} = \max(P_{noise} + 3, P_{max} - 20) \quad (5)$$

2 MIMO 信道衡量指标

2.1 信道矩阵条件数

条件数是 MIMO 信道性能的重要衡量指标之一,其能不受信噪比等因素的影响,直接由信道矩阵评价信道状况的好坏^[12]。条件数越大说明子信道间相关性越大,信道状况就越差,MIMO 系统的性能就越差。

对于一个有 N 根发送天线, M 根接收天线的 MIMO

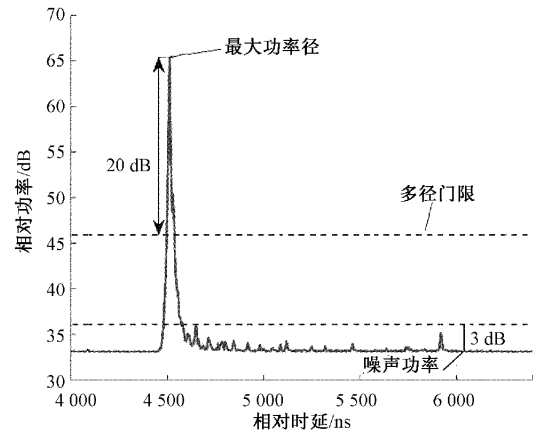


图 4 多径提取阈值门限

通信系统,其信道矩阵 \mathbf{H} 可以表示为^[13]:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \cdots & h_{1N}(t) \\ h_{21}(t) & h_{22}(t) & \cdots & h_{2N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1}(t) & h_{M2}(t) & \cdots & h_{MN}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:信道矩阵元素 $h_{ji}(t)$ 表示在 t 时刻发送天线 i 到接收天线 j 之间的信道衰落系数。若 $r(\mathbf{H})$ 表示信道矩阵 \mathbf{H} 的秩,则对 \mathbf{H} 的奇异值分解可以定义为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_H \sum_H \mathbf{V}_H^H \quad (7)$$

式中: \mathbf{U}_H 、 \mathbf{V}_H 分别为 $N \times r(\mathbf{H})$ 和 $M \times r(\mathbf{H})$ 维的首矩阵。 \sum_H 是对角阵, σ_i 为矩阵 \mathbf{H} 的奇异值。

$$\sum_H = \text{diag} \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{r(\mathbf{H})} \} \quad (8)$$

\sum_H 中最大奇异值 σ_{max} 和最小奇异值 σ_{min} 之比即为信道矩阵 \mathbf{H} 的条件数:

$$\text{cond}(\mathbf{H}) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (9)$$

2.2 信道矩阵等效自由度

等效自由度(effective degrees of freedom, EDoF)表征了 MIMO 信道可以等效为单输入单输出(single-input-single-output,SISO)的信道个数,体现了 MIMO 信道的复用增益^[14]。MIMO 系统每个子信道的增益可由信道相关矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值,则 EDoF 的表达式为:

$$\text{EDoF} = \sum_i^n \frac{\frac{\rho}{n}\lambda_i}{1 + \frac{\rho}{n}\lambda_i} \quad (10)$$

式中: λ_i 表示信道相关矩阵的特征值, ρ 为平均信噪比, n 为发射和接收天线数量的较小值:

$$n = \min(M, N) \quad (11)$$

2.3 信道容量

信道容量的增加是使用 MIMO 技术最主要好处之一,也是衡量信道状况的重要性能指标。信道容量分析的重要

步骤是对信道矩阵进行归一化,本次实验中采用恒定信噪比方法^[13]。

恒定信噪比方法是将每个测量位置的所有信道接收功率分别进行归一化,即保证每个测量点是一个恒定的值。这种归一化方法可以集中考察小尺度衰落对 MIMO 性能的影响,而忽略大尺度的因素。经过恒定信噪比方法归一化后的信道矩阵 \mathbf{H}_{nor} 为:

$$\mathbf{H}_{nor} = \mathbf{H} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot M}{\|\mathbf{H}\|_F^2}} \quad (12)$$

式中: $\|\mathbf{H}\|_F$ 表示求解信道矩阵的 F 范数。因此, MIMO 信道容量 C 的计算公式^[16]为:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}_{nor} \mathbf{H}_{nor}^H \right) \quad (13)$$

式中: $(*)^H$ 定义为厄米特转置, ρ 为平均信噪比, \mathbf{I} 为单位矩阵, \det 表示求解矩阵行列式运算。

3 地铁隧道场景 MIMO 信道分析

3.1 天线极化对 MIMO 信道的影响

首先,研究天线极化对信道性能的影响,将 32×64 MIMO 天线系统通过极化关系排列组合出多组阵元间距为 0.5 个波长(λ)的收发端垂直同极化(VV)、水平同极化(HH)和交叉极化(HV)的 2×2 MIMO 系统。在 350 m 隧道信道测量范围内,分析 35 个测量点上不同天线极化对 2×2 MIMO 信道条件数、等效自由度和信道容量的影响。

在图 5(a)中,垂直和水平同极化的平均条件数较大,而交叉极化的平均条件数在所有测量位置上都是最小的。在图 5(b)中,3 种不同极化的 2×2 MIMO 等效自由度都小于 2,这说明它们能等效的 SISO 信道个数均小于理想情况。其中,交叉极化的等效自由度最大,垂直同极化次之,而水平同极化最小。根据条件数和等效自由度可以分析出:在地铁隧道环境中,交叉极化天线阵列的信道矩阵状况优于同极化天线阵列,子信道间的相关性更小。

另一方面,信道容量能直观地反映出 MIMO 信道的整体性能。如图 6 所示,在信道容量的概率累积分布为 0.5 处,垂直和水平同极化分别约为 5.1 bit/s/Hz 和 5.0 bit/s/Hz,而交叉极化可达到约 5.8 bit/s/Hz,明显大于同极化天线阵列。结果表明在阵元间距相同的情况下,使用交叉极化天线阵列能提升地铁隧道环境中 MIMO 系统的信道容量。

3.2 阵元间距对 MIMO 信道的影响

其次,分析天线阵元间距对信道性能的影响,通过将 32×64 MIMO 系统按照阵元间距分成了 0.5λ 、 1λ 和 1.5λ 的 2×2 MIMO,从信道矩阵条件数、等效自由度和信道容量三方面分析了阵元间距对不同极化 MIMO 系统性能的影响。

在图 7 中,随着天线阵元间距的增加,垂直和水平极化天线阵列的信道矩阵条件数明显降低,等效自由度也有增大趋势,说明阵元间距的增大能改善了同极化 MIMO 的信

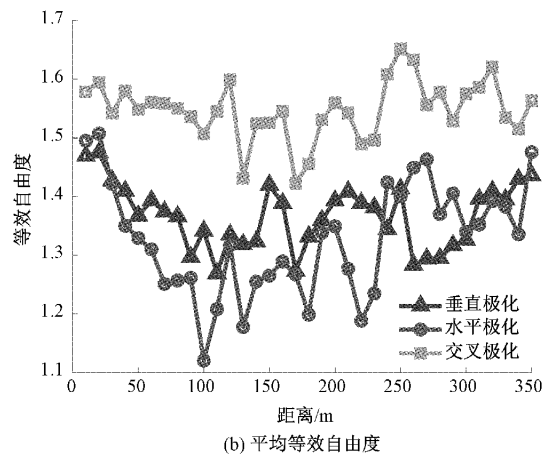
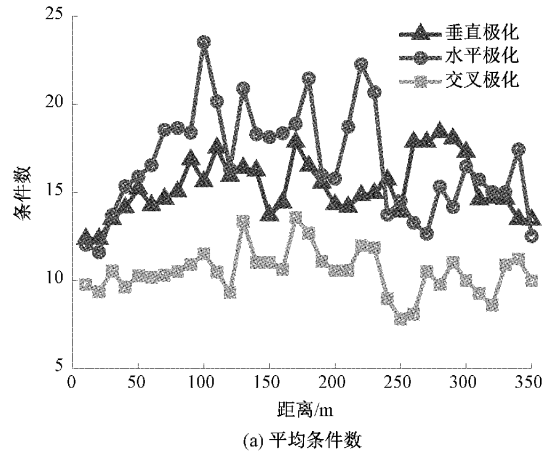


图 5 不同极化的 2×2 MIMO 信道条件数和等效自由度

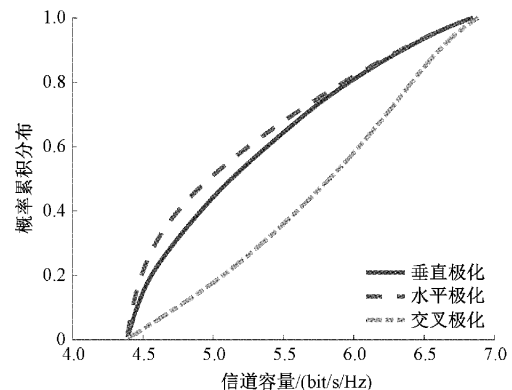


图 6 不同极化的 2×2 MIMO 信道容量的概率累积分布

道矩阵状况,减小了子信道间的相关性。然而,交叉极化的条件数和等效自由度随阵元间距的增大变化并不明显,这表明阵元间距对交叉极化的信道矩阵状况改善很小。

另一方面,不同阵元间距的信道容量概率累积分布如图 8 所示,在图 8(a)和图 8(b)中,垂直、水平同极化的信道容量随阵元间距的增大有明显提升。然而,在图 8(c)中,不同阵元间距的信道容量概率累积分布曲线几乎重合,表明阵元间距对交叉极化 MIMO 信道容量影响极小。

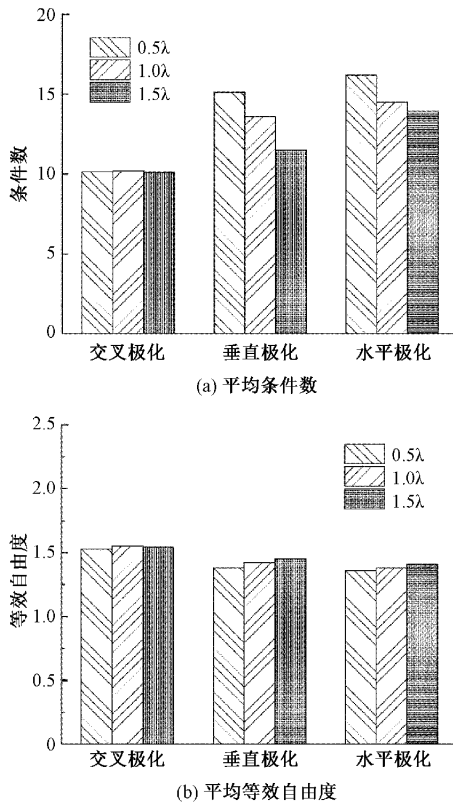


图 7 不同阵元间距的 2×2 MIMO 信道条件数和等效自由度

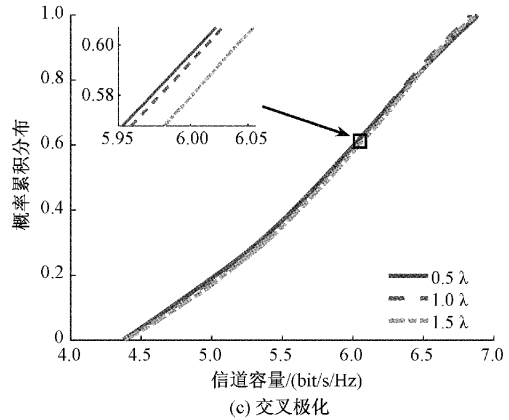
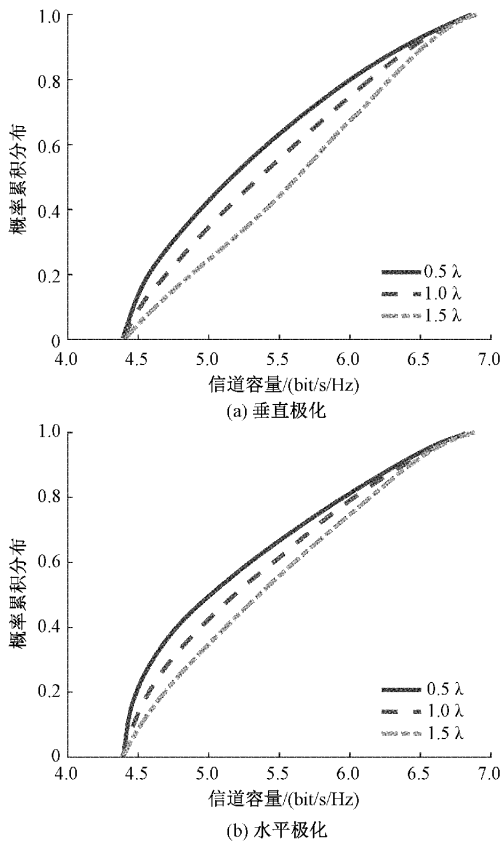


图 8 不同阵元间距的 2×2 MIMO 信道容量

综上所述,对于同极化天线阵列,阵元间距的增大有助于减小子信道间的相关性,并提升信道容量。然而,阵元间距的增大限制了一定空间范围内可配置的天线数目,增大了 MIMO 系统的体积。相比之下,交叉极化天线阵列能以较小的阵元间距实现较高的 MIMO 分集增益,更适合应用于地铁隧道这类狭长的限定空间。

4 结 论

本文搭建了 32×64 MIMO 信道测量系统,采用 PN 序列相关方法测量了地铁隧道场景中的 5.6 GHz 频段 MIMO 信道冲激响应。基于实测信道数据,分别从信道矩阵条件数、等效自由度和信道容量 3 个方面研究了天线极化和阵元间距对 2×2 MIMO 系统性能的影响。实验发现,当交叉极化天线的条件数均值约为 10 时,分别比垂直同极化和水平同极化约低 5 和 8。当交叉极化的等效自由度均值约为 1.6 时,分别比垂直同极化和水平同极化约高 0.3 和 0.2。当交叉极化的信道容量均值约为 5.8 bit/s/Hz,分别比垂直同极化和水平同极化约高 0.7 bit/s/Hz 和 0.8 bit/s/Hz。3 个结果都一致表明交叉极化天线有利于 MIMO 性能的提高。另外,阵元间距的增大能明显改善同极化信道矩阵的状况,并且提升 MIMO 系统的信道容量。然而,交叉极化时阵元间距对 MIMO 信道容量影响较小。该研究表明隧道环境中交叉极化既提供较大信道容量,又可以减小体积,更适用于地铁通信系统。

参考文献

- [1] ZHAO J, LIU J, YANG L, et al. Future 5G-oriented system for urban rail transit: Opportunities and challenges[J]. China Communications, 2021, 18(2): 1-12.
- [2] JINXING L I, ZHAO Y, ZHANG J, et al. Radio channel measurements and analysis at 2.4/5 GHz in subway tunnels [J]. China Communications, 2015, 12(1): 36-45.
- [3] WU Y, ZHENG G, SALEEM A, et al. An

- experimental study of MIMO performance using leaky coaxial cables in a tunnel[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1663-1666, DOI: 10.1109/LAWP.2017.2662209.
- [4] 吴静. Massive MIMO 系统信道状态信息数字 PID 控制反馈[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(6):44-48.
- [5] FOROOSHANI A E, LEE C, MICHELSON D G. Effect of antenna configuration on MIMO-based access points in a short tunnel with infrastructure[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(5): 1942-1951.
- [6] 叶安拓, 张立东, 郑国莘. 走廊环境 60 GHz 毫米波 MIMO 信道特性测量与仿真[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(13):131-137.
- [7] 顾朝志, 李俊红. 阵元间距对室内 MIMO 系统信道容量的影响[J]. *电子设计工程*, 2014, 22(6):103-105.
- [8] INOUE Y, KOMIYA K, YAMAGUCHI R. Experimental evaluation of antenna element spacing with mixed polarized MIMO antenna system in LOS environment[C]. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, 2010: 1-5.
- [9] 张晓光, 李蕾蕾, 郑红党, 等. 煤矿井下 MIMO 系统建模与信道容量分析[J]. *西安科技大学学报*, 2011, 31(3):366-370.
- [10] HAO L, RODRIGUE-PINEIRO J, YIN X, et al. Measurement-based massive MIMO polarimetric channel characterization in outdoor environment[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 171285-171296, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956118.
- [11] 胡卓敏, 纪文莉, 郑国莘. 地铁隧道场景下大规模 MIMO 信道容量分析[J]. *工业控制计算机*, 2021, 34(10):62-63.
- [12] 王成建, 纪文莉, 郑国莘. 地铁隧道中 5G 通信频段大规模 MIMO 特性分析[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(15): 128-135.
- [13] 何怡刚, 程彤彤, FARHAN A, 等. 大规模 MIMO 系统下的低复杂度迫零预编码技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(6):140-146.
- [14] SHIU D S, FOSCHINI G J, GANS M J, et al. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(3):502-513.
- [15] PAN Y, ZHENG G, WANG T. Investigation of MIMO channel correlation and capacity in curved subway tunnel [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016: 1698-1702, DOI: 10.1109/LAWP.2016.2524469.
- [16] PU X, SHAO S, KAI D, et al. Analysis of the capacity statistics for 2×2 3D MIMO channels in short-range communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(2):219-222.

作者简介

纪文莉, 高级工程师, 主要研究方向为城市轨道交通通信系统。

E-mail: jiwenli818@163.com

钱竞元, 硕士研究生, 主要研究方向为地铁隧道场景的信道特性研究和建模。

E-mail: sitqianjingyuan@163.com

郑国莘, 教授, 主要研究方向为限定空间无线通信。

E-mail: gxzheng@staff.shu.edu