

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106754

地铁隧道中 5G 通信频段大规模 MIMO 特性分析*

王成建¹ 纪文莉² 郑国莘¹

(1.上海大学特种光纤与光接入网重点实验室 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室 上海先进通信与数据科学研究院 上海 200444;2.上海申通地铁集团有限公司技术中心 上海 201103)

摘要:大规模多输入多输出(MIMO)技术作为5G移动通信中的关键技术,极大提高了通信容量,是轨道交通通信的重要发展方向。在真实的地铁隧道环境中针对3.5 GHz与5.6 GHz频段,对32×32的大规模MIMO系统进行了信道测量。根据测量数据,分析了地铁隧道中大规模MIMO信道特性。发现5.6 GHz频段的路径损耗指数略低于3.5 GHz频段。通过对比极化交叉率,发现拱形隧道内对+45°极化与水平极化有更强的去极化特性。隧道内信号的均方根时延扩展(RMS-DS)普遍分布在10 ns以内。此外,发现信道容量随收发距离的增大逐渐减小,3.5 GHz频段时32×32的MIMO信道容量为54.64 bit/s/Hz,略高于5.6 GHz频段时的53.35 bit/s/Hz。并且发现当天线阵元的极化方式与信道极化特性相匹配或阵元数目增加时,均会引起信道容量的增加。这些发现可以对未来地铁隧道中大规模MIMO技术的应用提供依据。

关键词:地铁隧道;大规模MIMO;信道测量;信道特性

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Analysis of massive MIMO characteristics at 5G communication band in subway tunnel

Wang Chengjian¹ Ji Wenli² Zheng Guoxin¹

(1. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Technical Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: Massive multiple-input multiple-output (MIMO) technology, as a key technology in 5G mobile communications, greatly improves communication capacity, and is an important development direction for rail transit communications. In this paper, the channel measurement of the 32×32 massive MIMO system is carried out at 3.5 GHz and 5.6 GHz frequency bands in a real subway tunnel environment. According to the measurement data, the characteristics of the massive MIMO channel in subway tunnels are analyzed. It is found that the path loss index of the 5.6 GHz band is slightly lower than that of the 3.5 GHz band. By comparing the polarization crossing rate, it is found that the arc tunnel has a stronger depolarization characteristic for +45° polarization and horizontal polarization. The root mean square delay spread (RMS-DS) of the signal in the tunnel is generally distributed within 10 ns. In addition, it is found that the channel capacity gradually decreases with the increase of the transceiver distance. The 32×32 MIMO channel capacity at 3.5 GHz frequency band is 54.64 bit/s/Hz, which is slightly higher than the 53.35 bit/s/Hz at 5.6 GHz frequency band. And it is found that when the polarization mode of the antenna element matches the channel polarization characteristics or the number of elements increases, the channel capacity will increase. These findings can provide a basis for the application of massive MIMO technology in subway tunnels in the future.

Keywords: the subway tunnel; massive MIMO; channel measurement; channel characteristics

0 引 言

在“智能铁路交通”的新时代,轨道交通通信系统不仅

要处理关键信息,还需要满足车载高清视频监控等一系列无缝高数据速率无线连接业务^[1]。为了满足越来越高的数据速率,大规模多输入多输出(multiple-input multiple-

收稿日期:2021-05-22

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(NSFC61871261)、上海申通地铁集团有限公司科研项目(JS-KY19R031)资助

output, MIMO) 技术在未来将用于轨道交通通信系统。无线传播信道的特性决定了无线通信系统的表现性能, 大规模 MIMO 技术的应用研究也必须建立在传播模型的基础之上^[2]。因此, 在真实的隧道环境中测量分析大规模 MIMO 信道特性有着至关重要的意义。文献[3]中发现隧道内信号的传播损耗与开放空间存在明显差异。文献[4-6]在隧道场景下进行了 MIMO 信道测试, 分析了不同天线组合方式对信道容量的影响。文献[4]中发现由双极化阵元构成的天线阵列的信道容量要优于同极化。文献[5]中发现天线间距对最大理论容量的影响很小, 即使增大天线间距, 信道容量的增大也是有限的。文献[6]发现极化分集技术可以有效提高 MIMO 系统性能, 但拱形隧道的去极化特性会导致 MIMO 系统性能的降低。文献[7]在隧道中开展信道测量, 研究了 28 GHz 时 2×2 和 4×4 MIMO 信道容量, 分析了天线间距对信道容量的影响, 并采用射线跟踪方法进行了验证。文献[8-10]分别在轨旁与有列车隧道中进行了大规模 MIMO 信道测量。其中, 文献[8]在 6 GHz 与 11 GHz 频段开展测量, 发现信号的均方根时延扩展符合对数正态分布。文献[9-10]则分别研究了地铁列车与收发距离对大规模 MIMO 信道特性的影响。

可以发现, 目前地铁隧道场景中 MIMO 信道测量使用天线阵元数目普遍较少, 缺少大规模 MIMO 的信道测量。因此, 本文在真实的地铁隧道环境中, 针对 5G 通信中的重要频段, 3.5 GHz 频段与 5.6 GHz 频段, 使用 32×32 的天线阵列, 对大规模 MIMO 系统进行了宽带信道测量。采用伪噪声序列实时相关方法处理测量得到的大量信道冲击响应(channel impulse response, CIR)数据, 分析了 MIMO 信道特性, 包括路径损耗(path loss, PL)、极化交叉率(cross-polarization discrimination, XPD)、均方根时延扩展(root mean square delay spread, RMS-DS)以及信道容量, 并进一步研究了天线的极化方式与阵元数量对 MIMO 信道容量的影响, 可以对未来地铁隧道场景中大规模 MIMO 技术的部署提供依据。

1 大规模 MIMO 信道测量

1.1 测量场景描述

本文的信道测量活动在上海地铁 7 号线上海大学站至祁华路站直隧道段展开, 隧道环境如图 1(a) 所示。隧道墙体由钢筋混凝土制成, 隧道横截面为拱形, 如图 1(b) 所示, 高 5 m, 拱形半径为 2.78 m, 底部宽 3.4 m, 铁轨高为 0.2 m, 轨距 1.5 m。测试距离全长为 650 m, 测试过程中, 收发端设备均放置于隧道中央的轨道小车上, 可以沿轨道自由移动, 发射端位于隧道起始端, 接收端距离发射端 20 m 时开始采样, 此后逐渐远离发射端, 收发距离在 350 m 以内时, 采样间隔为 10 m, 收发距离在 350~650 m 时, 采样间隔为 50 m, 共有 40 个采样点, 如图 2 所示, 收发端天线高度均设置为 2.65 m。

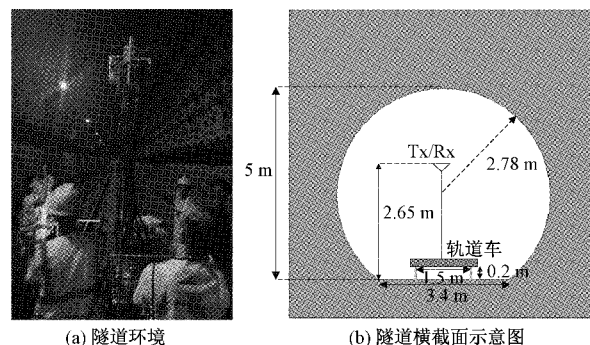


图 1 隧道环境与横截面示意图

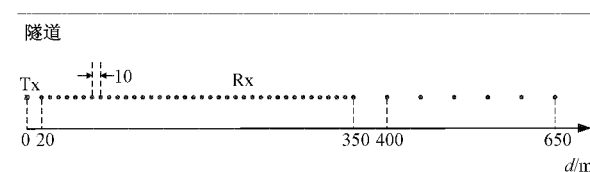


图 2 采样间隔设置

1.2 信道测量系统

本文使用的宽带信道测量平台如图 3 所示, 在发射端, 函数信号发生器产生长度为 1 023 个码片的伪噪声(pseudo-noise, PN)序列信号, 经过增益为 47 dB 的功率放大器后, 通过电控发射开关使得 32 个发射天线阵元依次发出信号。在接收端, 电控接收开关控制接收天线阵元接收信号, 接收到的信号经过低噪声功率放大器后, 存入数据采集器。整个测试过程中, 收发端的时钟信号由已完成同步的高精度铷钟提供。测试设备参数如表 1 所示。

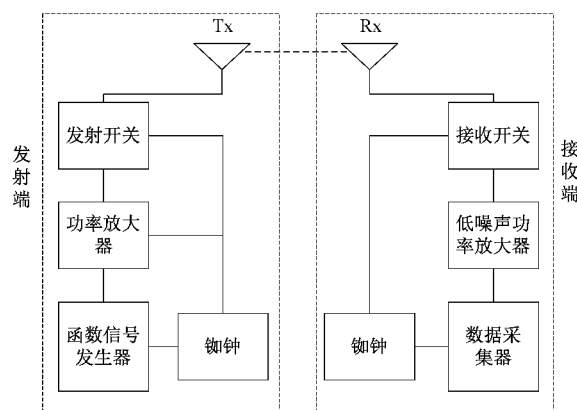


图 3 信道测量平台

在测试中, 发射天线(Tx)与接收天线(Rx)的拓扑结构与文献[11]中相同, 如图 4 所示。Tx 为均匀平面天线对阵列, 如图 4(a) 所示, 共有 32 个发射天线阵元, Rx 为均匀圆柱天线, 如图 4(b) 所示, 分为 8 个扇区, 每一个扇区面上排列有 4 组天线对, 本文在测量中每个扇面只使用了前两组天线对, 因此整个测量过程中接收天线只有 32 个阵元工作。Tx 与 Rx 的天线阵元对间距均为半波长, 每组天线对内包含一组双极化天线。3.5 GHz 频段时的收发天线阵元

表 1 信道测量设备参数

描述	参数
中心频率	3.5 GHz/5.6 GHz
发射功率/dBm	-10
信号类型	PN 10
带宽/MHz	160
功率放大器增益/dB	47
采样频率/MHz	160
收发天线阵元数	32×32
天线阵元对间距	半波长
收发端天线高度/m	2.65
天线极化方式	±45°(3.5 GHz 频段) 垂直水平(5.6 GHz 频段)

的极化方式为±45°极化,5.6 GHz 频段时天线阵元的极化方式为垂直和水平极化。

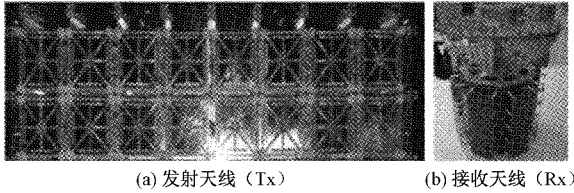


图 4 收发端天线阵列

2 测量原理

2.1 PN 序列相关法原理

本文使用 PN 序列实时相关的方法对 MIMO 信道进行测量。发射端发送 PN 序列,在接收端使用与发送端相同的 PN 序列和接收信号进行相关运算,就可以得到无线信道的 CIR。PN 序列相关法原理如下。

若发射端发送信号 $X(t)$,经过无线信道后被接收,假设无线信道的冲击响应为 $h(t)$,则接收信号 $Y(t)$ 可以表示为:

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

式中: \otimes 表示卷积运算。 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 的自相关函数 $R_{XY}(\tau)$ 可以表示为:

$$R_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t)X(t - \tau)dt \quad (2)$$

交换式(2)中的 t 和 τ ,并将式(1)代入式(2),可以得到:

$$R_{XY} = \int_{-\infty}^{\infty} Y(\tau)X(\tau - t)d\tau = Y(t) \otimes X(-t) = R_X(t) \otimes h(t) \quad (3)$$

式中: $R_X(t)$ 为 $X(t)$ 的自相关函数。因为 PN 序列具有良好的自相关性,所以有:

$$R_X(t) \approx \delta(t) \quad (4)$$

式中: $\delta(t)$ 为单位冲激函数。将式(4)代入式(3),可以得到:

$$R_{XY}(t) \approx \delta(t) \otimes h(t) = h(t) \quad (5)$$

所以,在接收端使用和发送端相同的本地 PN 序列与接受信号做相关运算就可以得到无线信道的 CIR。

2.2 多径提取方法

得到 CIR 后,本文设置一定的噪声阈值对 CIR 数据进行选择,以减少噪声对后续分析的影响。对 CIR 进行复平方运算后,可以得到信道的功率时延谱,利用功率时延谱可以对信号进行多径提取,方法如下。

如图 5 所示,一般将功率时延谱中最后几百 ns 内的信号视为噪声信号,该部分的平均功率为 P_{noise} ,作为噪声阈值之一。此外,将功率时延谱的最大径功率记为 P_{max} ,降低 35 dB 后作为另一噪声阈值。最终的噪声阈值 $P_{threshold}$ 为两者中的较小值,如下式:

$$P_{threshold} = \max\{P_{noise} + 5 \text{ dB}, P_{max} - 35 \text{ dB}\} \quad (6)$$

对于功率时延谱中功率值低于噪声阈值的信号径视为无效径,在后续的数据处理中只针对有效多径信号进行计算分析。

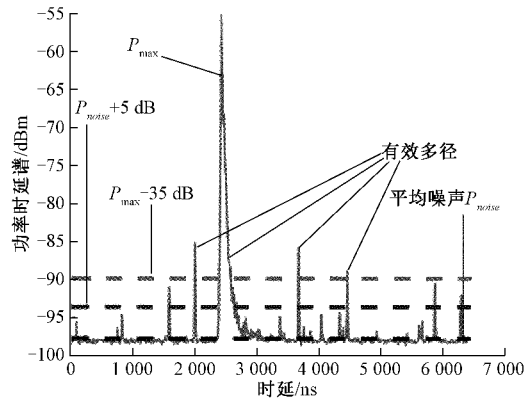


图 5 多径提取

3 大规模 MIMO 特性分析

3.1 路径损耗模型

路径损耗表示无线信号由于传播距离和环境阻碍而造成的功率上的衰减情况^[12]。本文使用经典的浮动截距路径损耗模型^[13],描述如下:

$$PL(d) = \beta + 10\alpha \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (7)$$

式中: α 表示拟合后路径模型的斜率,即路径损耗指数; β 表示拟合后的截距; X_σ 是零均值高斯随机变量(标准差为 σ); d 表示收发距离; d_0 为参考距离,通常为 1 m。整个测试距离中,隧道内中心频率为 3.5 GHz 与 5.6 GHz 时的路径损耗如图 6 中散点所示。

根据式(7),通过线性拟合得到了地铁隧道场景内的路径损耗模型,中心频率为 3.5 GHz 与 5.6 GHz 时的路径损耗模型参数如表 2 所示。此时 3.5 GHz 与 5.6 GHz 频段的路径损耗指数均小于开放空间(开放空间的路径损耗指数为 2),这是因为隧道中存在波导效应,降低了信号

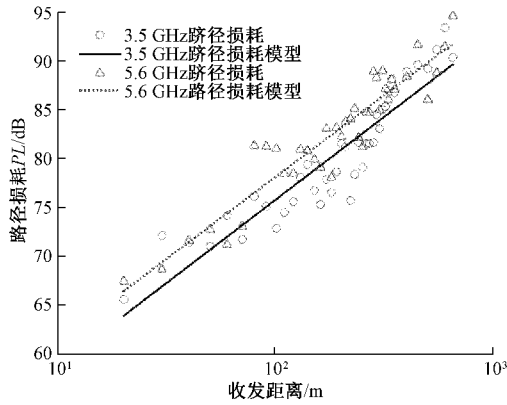


图6 路径损耗

传播时的衰减,导致路径损耗指数减小。对比隧道场景下相关的文献可以发现,此时的路径损耗指数要大于文献[14]中相似频段的路径损耗指数。原因是文献[14]中的隧道壁更加光滑,而本文中的则相对比较粗糙,造成信号的反射损耗增大。另一个可能的原因是本文中的隧道存在一定的倾斜坡度,造成测试过程中收发天线的高度发生改变,导致天线没有对准,这会使得接收功率变小,测得的路径损耗变大。

表2 路径损耗模型参数

中心频率/GHz	α	β	σ
3.5	1.70	41.82	2.47
5.6	1.67	44.67	2.11

3.2 信道极化特性分析

通过对MIMO系统天线极化交叉率的分析,可以了解隧道环境下信道的去极化特性,对于实际工程中不同极化天线的部署以及极化分集技术的研究都具有重要的指导作用。极化交叉率包括垂直极化(3.5 GHz频段时为+45°极化)交叉率 XPD_{+v} 与水平极化(3.5 GHz频段时为-45°极化)交叉率 XPD_{-h} ,计算方法如下:

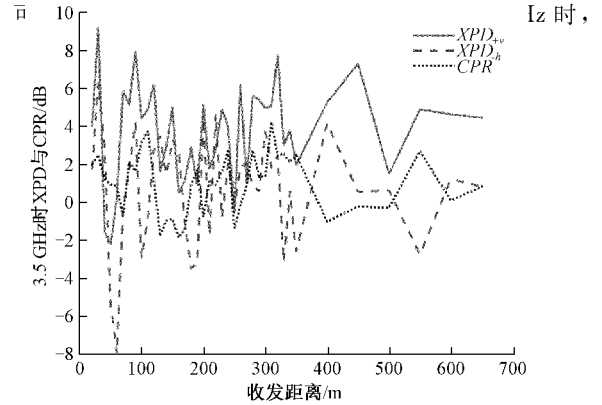
$$XPD_{+v} = P_{+v|+v} - P_{+h|+v} \quad (8)$$

$$XPD_{-h} = P_{-h|-h} - P_{+v|-h} \quad (9)$$

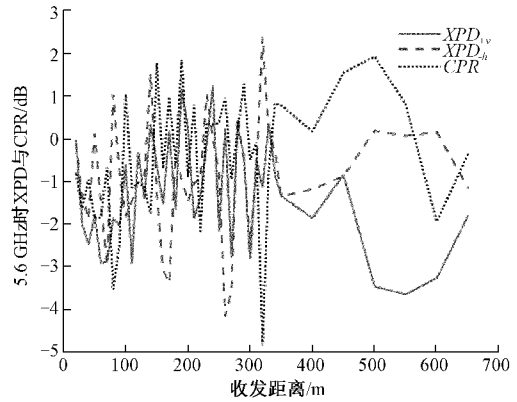
式中: $P_{+v|+v}$ 和 $P_{+h|+h}$ 分别为垂直同极化(3.5 GHz频段时为+45°同极化)天线和水平同极化(3.5 GHz频段时为-45°同极化)天线的接收功率; $P_{-h|+v}$ 和 $P_{+v|-h}$ 分别为水平垂直交叉极化(3.5 GHz频段时为-45°+45°极化)天线和垂直水平交叉极化(3.5 GHz频段时为+45°-45°极化)天线的接收功率。此外,同极化率(co-polarization ratio, CPR)也是衡量信道极化特性的重要指标,定义为:

$$CPR = P_{+v|+v} - P_{-h|-h} \quad (10)$$

根据式(8)~(10),计算得到隧道场景内3.5 GHz与5.6 GHz频段的极化交叉率与同极化率,分别如图7(a)与(b)所示。均值与标准差的统计结果如表3所示。



(a) 3.5 GHz极化交叉率与同极化率



(b) 5.6 GHz极化交叉率与同极化率

图7 极化交叉率与同极化率

表3 隧道内XPD与CPR均值与标准差

中心频率/GHz		XPD_{+v}	XPD_{-h}	CPR
3.5	均值/dB	3.79	0.70	1.62
	标准差/dB	2.60	2.97	1.57
5.6	均值/dB	-1.28	-0.91	-0.41
	标准差/dB	1.30	1.37	1.49

-45°极化交叉率明显小于+45°极化交叉率与同极化率,说明隧道环境对+45°极化具有更加明显的去极化特性。当中心频率为5.6 GHz时,垂直极化交叉率与水平极化交叉率比较接近且均为负数,说明隧道环境对垂直极化与水平极化有相似的较强去极化特性。垂直极化交叉率略低于水平极化交叉率。由于本文的测量场景中主要传播能量是由视距分量携带,水平极化天线的电场在水平面上指向视距方向,从而间接导致5.6 GHz频段时水平同极化接收功率更大,同极化率为负数。

3.3 RMS-DS

式(11)~(12)为RMS-DS计算方法^[16],其中 P 表示该点接收功率, P_i 与 t_i 分别是第 i 条径的接收功率与时延。

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i t_i}{P} \quad (11)$$

$$t_{\text{RMS-DS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_i t_i^2}{P} - \bar{t}^2} \quad (12)$$

根据式(11)~(12),在整个测试距离上,对信号传播过程中的所有有效多径进行计算得到的 RMS-DS 如图 8 所示。3.5 GHz 频段与 5.6 GHz 频段的 RMS-DS 累积分布如图 9 所示,均值与标准差如表 4 所示。可以发现,在整个测试距离上,信号的 RMS-DS 均在 10 ns 以内,在绝大多数的测试点上,RMS-DS 在 8 ns 以内,此外,RMS-DS 分布的范围较小,可以看出在测试过程中,随着收发距离的增大,隧道环境差异较小,多径的变化并不丰富。

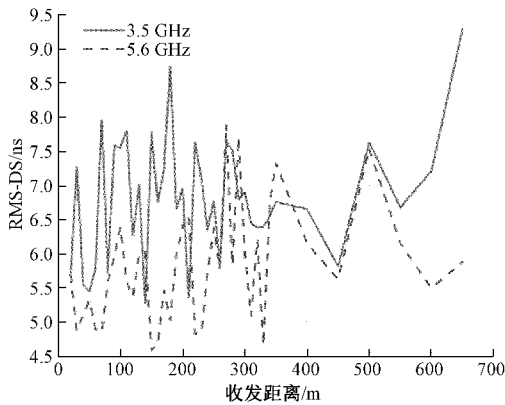


图 8 RMS-DS

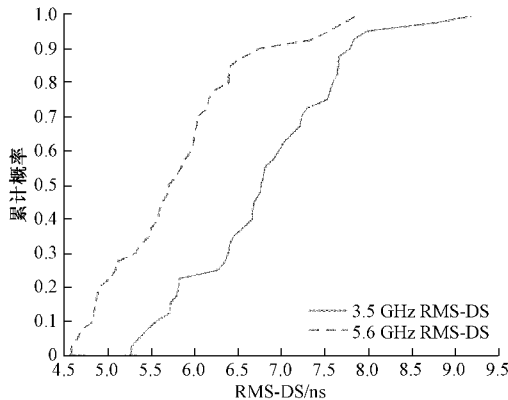


图 9 RMS-DS 累积分布

表 4 隧道内 RMS-DS 均值与标准差

中心频率/GHz	均值/ns	标准差/ns
3.5	6.82	0.91
5.6	5.81	0.84

3.4 MIMO 信道容量分析

信道容量是衡量 MIMO 系统性能的重要指标。为了便于比较不同 MIMO 方案下的信道容量,本文对信道矩阵 \mathbf{H} 进行归一化,并将接收端的平均信噪比设置为一个常数。归一化信道矩阵 \mathbf{H}_{nor} 如下:

$$\mathbf{H}_{\text{nor}} = \mathbf{H} \sqrt{\frac{N_T N_R}{\|\mathbf{H}\|_F^2}} \quad (13)$$

$$\|\mathbf{H}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} |h_{ij}|^2} \quad (14)$$

式中: $\|\mathbf{H}\|_F$ 为 Frobenius 范数矩阵, \mathbf{H} 是信道矩阵, N_R 是接收天线阵元数量, N_T 是发射天线阵元数量, h_{ij} 是信道传输系数, MIMO 信道容量 C 计算方法如下^[16]:

$$C = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}_{\text{nor}} \mathbf{H}_{\text{nor}}^* \right) \right] \quad (15)$$

式中: \mathbf{I}_{N_R} 是 N_R 维单位矩阵; ρ 是接收端的平均信噪比, 本文设置为 10 dB; \mathbf{H}_{nor} 是归一化后的信道矩阵; $(\cdot)^*$ 表示矩阵的 Hermitian 转置。

根据式(13)~(15),在每个测试距离下,得到 3.5 GHz 频段与 5.6 GHz 频段时的信道容量,如图 10 所示。

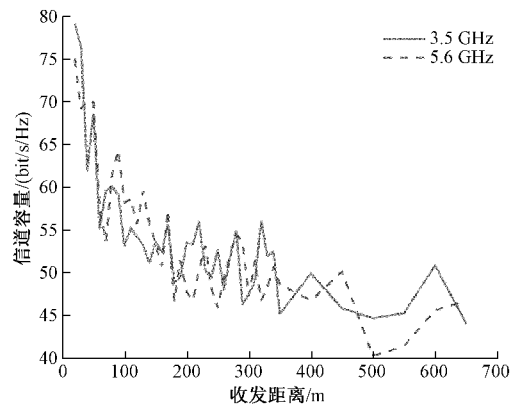


图 10 隧道内 32×32 MIMO 信道容量

由图 10 可以发现,随着收发距离的增大,3.5 GHz 与 5.6 GHz 频段的 32×32 MIMO 信道容量逐渐减小。当收发距离在 200 m 以内时,信道容量随着收发距离的增大迅速减小,3.5 GHz 频段的信道容量从 79.15 bit/s/Hz 下降到 53.4 bit/s/Hz,5.6 GHz 频段的信道容量从 74.97 bit/s/Hz 下降到 47.69 bit/s/Hz,说明随着收发天线距离增大,由隧道壁反射的多径分量与直射分量的时延差与角度差减小,多径之间的相关性提高,信道的空间分辨率降低,从而使得容量下降。收发距离在 200 m 之后,信道容量下降速率变缓,均值基本稳定在 50 bit/s/Hz 以下。统计整个测试距离上的 32×32 MIMO 系统信道容量的分布,信道容量的均值与标准差如表 5 所示。可以发现,3.5 GHz 频段的平均 32×32 MIMO 信道容量为 54.64 bit/s/Hz,略高于 5.6 GHz 频段。

表 5 隧道内 32×32 MIMO 信道容量均值与标准差

中心频率/GHz	均值/(bit/s/Hz)	标准差/(bit/s/Hz)
3.5	54.64	7.56
5.6	53.35	7.93

大规模MIMO系统中,收发天线的极化方式与阵元数量也会对MIMO系统容量造成一定影响,设计合理的天线参数,对5G通信系统的应用有着至关重要的作用。本文基于测试中使用的 32×32 天线阵列,分别分析了天线的极化方式与阵元数量对信道容量的影响。

1) 天线极化方式对信道容量的影响

对于本文的 32×32 大规模MIMO系统,收发端分别包含16个 $+45^\circ$ 极化(5.6 GHz频段时为垂直极化)天线阵元与16个 -45° 极化(5.6 GHz频段时为水平极化)天线阵元,分别选取不同极化方式的天线阵元可以构成 16×16 的MIMO系统,因此,可以组成的 16×16 MIMO系统共有4种极化方式: $+45^\circ$ 同极化(5.6 GHz频段时为垂直同极化)、 $-45^\circ + 45^\circ$ 交叉极化(5.6 GHz频段时为水平垂直极化)、 $+45^\circ - 45^\circ$ 交叉极化(5.6 GHz频段时为垂直水平极化)与 -45° 同极化(5.6 GHz频段时为水平同极化)。

根据式(15),在直隧道整个测试距离内,3.5 GHz频段时4种极化方式下的 16×16 MIMO信道容量如图11所示,中心频率为5.6 GHz时4种极化方式下的 16×16 MIMO信道容量如图12所示。3.5 GHz不同极化方式下的信道容量均值与标准差如表6所示。5.6 GHz不同极化方式下的信道容量均值与标准差如表7所示。

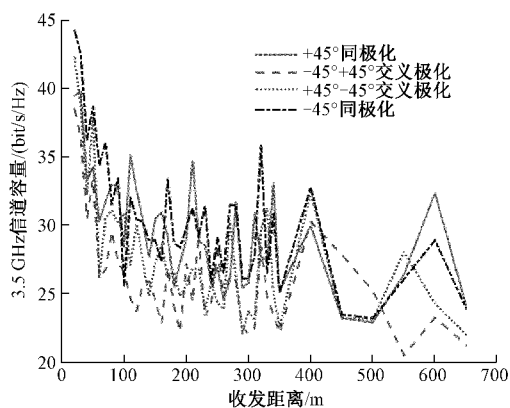


图11 3.5 GHz不同极化方式 16×16 MIMO信道容量

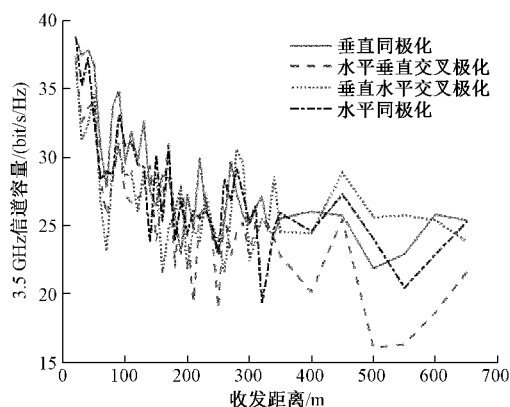


图12 5.6 GHz不同极化方式 16×16 MIMO信道容量

表6 3.5 GHz不同极化方式 16×16 MIMO容量均值与标准差

极化方式	均值/ (bit/s/Hz)	标准差/ (bit/s/Hz)
$+45^\circ$ 同极化	29.54	4.05
$-45^\circ + 45^\circ$ 交叉极化	26.07	3.87
$+45^\circ - 45^\circ$ 交叉极化	27.64	4.57
-45° 同极化	30.33	4.78

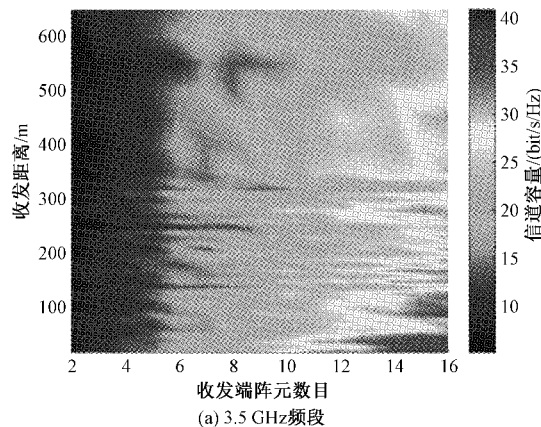
表7 5.6 GHz不同极化方式 16×16 MIMO容量均值与标准差

极化方式	均值/(bit/s/Hz)	标准差/(bit/s/Hz)
垂直同极化	28.19	4.37
水平垂直交叉极化	25.62	4.62
垂直水平交叉极化	26.85	3.46
水平同极化	27.39	4.20

可以发现,随着收发距离的增大,3.5 GHz频段时4种极化方式下的信道容量均单调递减,在200 m后,下降速率减缓,其中,在整个收发距离上 -45° 同极化时的信道容量明显高于其他极化方式, $-45^\circ + 45^\circ$ 交叉极化方式时的信道容量最低。中心频率为5.6 GHz时,在大多数的测试距离上,垂直同极化时的 16×16 MIMO信道容量大于其他极化方式,水平垂直极化时的信道容量最小。不同极化方式下的信道容量变化与3.2节中对信道极化特性的分析是相匹配的。

2) 天线阵元数目对信道容量的影响

针对本文使用的 32×32 天线阵列,使用同样极化方式、同样间隔的阵元,可以研究天线阵元数目对信道容量的影响。本文选取极化方式为 -45° 极化(5.6 GHz频段时为水平极化),间隔为半波长的天线阵元,因此收发端的最大阵元数目均为16。当收发端阵元数目从1逐渐增加到16时(始终保持发射端与接收端天线阵元数目相等),根据式(15),在3.5 GHz频段与5.6 GHz频段时不同阵元数目的MIMO信道容量分别如图13(a)与(b)所示,可以发现,



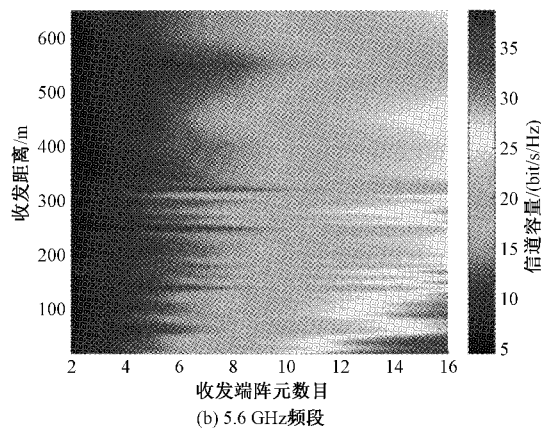


图 13 不同天线数目时信道容量

在绝大多数测试距离上,随着天线阵元数目的增大,信道容量有所增加,但并不是线性增加,当天线阵元数目增大到一定数目后,容量的增加是有限的。

4 结 论

本文根据在真实地铁隧道环境中对 32×32 大规模 MIMO 系统进行宽带信道测量,分析了 3.5 GHz 与 5.6 GHz 频段的大规模 MIMO 信道特性,包括路径损耗、极化交叉率、均方根时延扩展与信道容量。建立了隧道场景中 3.5 GHz 与 5.6 GHz 频段的路径损耗模型,中心频率为 3.5 GHz 时,路径损耗指数为 1.70,略大于 5.6 GHz 频段时路径损耗指数 1.67。通过比较极化交叉率,发现拱形隧道对 $+45^\circ$ 极化与水平极化有更强的去极化特性。隧道内大规模 MIMO 的 RMS-DS 普遍较小,分布在 10 ns 以内,其中,3.5 GHz 频段的 RMS-DS 均值为 6.82 ns,大于 5.6 GHz 频段的 5.81 ns。此外,大规模 MIMO 系统信道容量会随着收发距离的增大逐渐减小,并收敛到固定值附近,3.5 GHz 频段时的平均信道容量为 54.64 bit/s/Hz,5.6 GHz 频段时的平均信道容量为 53.35 bit/s/Hz。天线阵元的极化方式与阵元数目均会对信道容量造成影响,当阵元极化方式与隧道的极化特性相匹配或者阵元数目增加时,会引起信道容量的增加。因此,在未来设计大规模 MIMO 天线阵列时,为提高信道容量,可以优先选择与应用场景极化特性相匹配的阵元,并合理增加阵元数目。这些发现可以对未来在地铁隧道中应用大规模 MIMO 技术提供参考。本文的研究场景为空隧道环境,但是在实际的地铁通信中,地铁列车的存在也会对信号的传播特性造成影响,下一步作者将针对有列车隧道场景展开研究。

参考文献

[1] GUAN K, LI G, KURNER T, et al. On millimeter wave and THz mobile radio channel for smart rail mobility [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 7: 5658-5674.

- [2] 孙昊. 5G 通信测试技术发展分析[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(7): 17-21.
- [3] KALVANKAR S K, LEE Y H, YU S M. Two-slope path loss model for curved-tunnel environment with concept of break point [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020: 1-10.
- [4] 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, 38(1): 120-122.
- [5] VALDESUEIRO J A, IZQUIERDO B, ROMEU J. MIMO channel measurement campaign in subway tunnels[C]. Fourth European Conference on Antennas & Propagation, IEEE, 2010: 1-4.
- [6] VALDESUEIRO J A, IZQUIERDO B, ROMEU J. On 2×2 MIMO observable capacity in subway tunnels at C-band: An experimental approach [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010, 9(3): 1099-1102.
- [7] JIANG Y, ZHENG G, YIN X, et al. Performance study of millimetre-wave MIMO channel in subway tunnel using directional antennas[J]. Iet Microwaves Antennas & Propagation, 2018, 12(5): 833-839.
- [8] LI J, AI B, HE R, et al. Channel characterization for massive MIMO in subway station environment at 6 GHz and 11 GHz[C]. 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2018: 1-5.
- [9] CHALLITA F, RODRIGO-PENA V, RUBIO L, et al. On the contribution of dense multipath components in an intrawagon environment for 5G mmW massive MIMO channels [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(12): 2483-2487.
- [10] WANG Q, AI B, HE R, et al. Measurement-based massive MIMO channel characterization in subway station[C]. 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), 2018: 1-5.
- [11] HAO L, RODRIGUEZ J, CAI X, et al. Measurement-based double-directional polarimetric characterization of outdoor massive MIMO propagation channels at 3.5 GHz[C]. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2020: 1-5.
- [12] MABROUK B, HAUTCOEUR J, TALBI L, et al. Feasibility of a millimeter-wave MIMO system for short-range wireless communications in an underground gold mine [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(8): 4296-4305.
- [13] 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.

- [14] LI J, 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.
- [15] 朱甜甜,李朋朋,王萍,等. 2.6 GHz 频段走廊环境下 MIMO 信道特性的研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1):157-160.
- [16] FOROOSHANI A, LEE C, MICHELSON D. 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.

作者简介

王成建, 硕士研究生, 主要研究方向为 5G 通信信道测量和特性分析。

E-mail: 18717815562@163.com

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: jiwenli1985@163.com

郑国莘, 教授, 主要研究方向为限定空间无线通信。

E-mail: gxzhcng@staff. shu. edu. cn