

# 基于可重构 OTA 装置的非平稳多维无线信道 重构模型与应用性能分析

刘元安<sup>1</sup>, 王卫民<sup>1</sup>, 张震<sup>1</sup>, 王珩<sup>1</sup>, 高华强<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学电子工程学院安全生产智能监控北京市重点实验室, 北京 100876;  
2. 奥尔堡大学电子系统系天线传播和毫米波系统实验室, 丹麦奥尔堡 9220)

**摘要:** 大规模多入多出(massive MIMO)天线阵列是 5G 及下一代移动通信的关键使能技术, 可靠可信可行且可按需灵活构建的室内多维度性能测试与验证对推动 massive MIMO 系统技术的基础理论研究、关键技术突破和商用部署至关重要. 为了进行大规模 MIMO 设备的技术验证、场景完备性测试与技术缺陷评估, 发展真实可靠的室内模拟性能测试方法至关重要, 其核心挑战是如何为待测设备(Device Under Test, DUT)在测试装置中重建丰富、完备的目标电波传播环境. 本文在早期提出的虚拟探头快速位置优化方法及其探头权重计算闭式解和不同信道场景下精确多维度信道重构工作的基础上, 提出了一种基于可重构 OTA 装置的非平稳多维无线信道重构方法, 为 DUT 测试提供了拟真的目标非平稳多维无线信道重构机制, 能够有效克服传统多探头微波暗室法(Multi-Probe Anechoic Chamber, MPAC)、辐射两步法(Radiated Two Stage, RTS)以及混响室法(Reverberation Chamber, RC)等三种方法难以满足工作于动态信道环境中大规模 MIMO 天线系统及其波束性能功能描述问题. 本文引进可构建不同比特(bit)数的移相器, 重构信道空间谱变化, 可开展最大空间相关性误差、加权空间相关性均方根误差(weighted root mean square correlation error)、空间功率角度谱(PAS)相似性(PAS similarity)和固定波束功率损失(fixed beam power loss)评估. 本文通过全场景多维度信道重构环境分析表明, 4 bit 精度移相器可以在保证最佳成本效益的前提下, 为室外场景的室内近真实重构提供理想精度的相位矩阵, 这也为量化分析移相器误差对虚拟 OTA 方法影响提供了理论基础和技术途径. 本文通过迄今为止未见报道的移相器分辨率因素引入, 为传统的相位矩阵虚拟 OTA 测试装置用于真实复杂电磁传播环境 massive MIMO 无线设备及其模拟重构, 通过相控矩阵调节 DUT 中各个天线单元的相位响应, 模拟探头天线辐射电磁波在自由空间中的传播变化, 仿真自适应 massive MIMO 核心指标与验证, 提供了一种有效方法, 达成了实际应用场景的信道重构. 此外, 实验还表明, 在虚拟探头数量足够多的情况下, 3 bit 移相器也能够提供较为理想的信道重构性能, 可指导用于室内装置的移相器选择以及低复杂度相控矩阵构建, 同时本文也指出虽然 4 bit 移相器已经能够提供精确信道重构, 但也可以选择 5 bit 移相器提供 1 bit 安全冗余. 进一步, 为深入验证本文结果对非标准测量信道场景重构的有效性, 本文重构了一个射线追踪模型的动态信道环境, 同时, 该模型信道在多个空间位置的精确重构也证明了本文方法的广泛适用性与可行性.

**关键词:** 大规模多输入多输出; 信道重构; 空口测试; 相位矩阵

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2022)12-2935-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221138

## Non-Stationary Multi-Dimensional Wireless Channel Model Emulated with Reconfigurable OTA Setup and Its Application Analysis

LIU Yuan-an<sup>1</sup>, WANG Wei-min<sup>1</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>1</sup>, GAO Hua-qiang<sup>2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Work Safety Intelligent Monitoring, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Antenna Propagation and Millimeter-wave Systems (APMS) Section, Department of Electronic Systems, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark)

**Abstract:** Massive multiple input multiple output(MIMO) is regarded as the crucial enabling technology of the fifth generation(5G) mobile communication. Reliable, feasible, and reconfigurable indoor multi-dimensional performance testing

and verification are significant to boost basic theoretical research, key technology breakthrough, and commercial deployment for the massive MIMO system. To implement the technique validation, scenario completeness test, and defect assessment for the massive MIMO device, developing reliable and realistic indoor emulated performance testing methodology is essential. The key challenge is how to reconstruct the rich and complete target propagation environment for the device under test(DUT). Based on early research, i.e., efficient virtual probe position determination method and closed-form probe weighting strategy, which realize accurate multi-dimensional emulation for various channel scenarios, this paper proposes a multi-dimensional channel emulation methodology for non-stationary wireless propagation with reconfigurable over the air (OTA) setup. The proposed channel emulation mechanism effectively tackles the challenge of the conventional OTA techniques, i.e., multi-probe anechoic chamber(MPAC), radiated two stage(RTS), and reverberation chamber(RC), to test the realistic performance of the beam-steerable massive MIMO device typically operating in dynamic channel. By employing the phase shifters with various bit numbers, this paper investigates the emulation results of the reconstructed channel spatial profiles in terms of maximum spatial correlation, weighted root mean square correlation error, power angular spectrum(PAS) similarity, and fixes beam power loss. According to the complete scenario and multi-dimensional channel emulation in this paper, it is concluded that the 4 bit phase shifter can cost-effectively provide an accurate phase matrix for indoor realistic propagation channel reconstruction. It also provides the theoretical basis and technical approach for quantifying the impact of phase shifter errors on the virtual OTA method. This paper introduces the phase shifter resolution factor, which has not been reported so far, to the phase-matrix-based virtual OTA test setup for the performance testing of the massive MIMO wireless devices in the realistic complex electromagnetic propagation environment with the reconstructed communication link. Specifically, it mimics the propagation of the waves radiated from probe antennas by adjusting the phase responses among the DUT elements in the phase matrix to enable the emulation of the target channel scenario where the key performance indicators of the adaptive massive MIMO DUT are validated. In addition, the 3 bit phase shifter could also provide satisfying emulation performance using sufficient virtual probes, leading to meaningful guidance for the phase shifter selection and low-complexity phase matrix construction. On the other hand, one can select the 5 bit phase shifter for safety redundancy to ensure emulation accuracy. Furthermore, this paper emulates a more realistic dynamic channel environment based on the ray tracing model to further validate the effectiveness of the derived conclusion on the non-standard measured channel scenario. The accurate ray-tracing channel emulation on multiple positions experimentally demonstrates the applicability and feasibility of the obtained conclusion.

**Key words:** massive multiple input multiple output; channel emulation; OTA testing; phase matrix

## 1 引言

近年来,智能终端及其多样化物联网设备数量的快速增加,引起了无线通信数据流量的爆炸性增长.在此背景下,具有低延迟、高频谱效率和高可靠性的5G通信系统正在加速部署中,以实现提高通信网络容量、数据速率和网络灵活性的目的<sup>[1]</sup>.其中大规模多天线(massive MIMO)系统可以同时相同电磁频谱资源内与多终端设备通信,极大程度提高了频谱利用率,受到工业界和学术界的广泛关注<sup>[2]</sup>.另外,得益于massive MIMO波束赋形模式提供的高阵列增益(array gain),5G/6G通信系统可以利用毫米波频段,从而获得超大带宽的电磁频谱资源并提高信道容量<sup>[2]</sup>.因此massive MIMO技术被视为未来移动通信系统的关键组成部分.为了确保大规模密集接入网络的稳定性,通信设备在真实复杂电磁传播环境中的多维度性能验证与分析必不可少<sup>[3]</sup>.

大规模自适应天线系统可以在实际的密集接入网络中进行性能验证与评估,即所谓的现场试验.然而在大多数情况下,由于天气和实际环境条件的不可控性

和场景多样性(包括立体自适应天线体系、异构无线网络、三维电波传播和复杂信号的电波传播信道的时变性),现场试验无法重复,更难以覆盖所有场景,很难在开发阶段确定设计缺陷.因此人们提出了室内环境中物理可控地重构复杂多维电磁传播信道的方法,即通过在信道模拟器中设计包括多普勒效应,信道空间特性、极化特性、噪声干扰等多维特征的信道重构矩阵,并将信道模拟器(Channel Emulator, CE)输出端口与无线设备的射频前端用同轴电缆相连,可以实现待测设备(Device Under Test, DUT)的多电磁环境、多通信制式的验证<sup>[4]</sup>.该方法即所谓的传导测试,并在过去数十年被工业界广泛应用.然而自适应massive MIMO天线系统装配有大量天线单元需要相应数量的CE端口以及相关的硬件资源,这将导致极高的传导测试系统成本.另外,在毫米波频段,小型化、紧凑化设计的massive MIMO阵列将不再提供用于测试的射频端口,传导测试法也将不再适用.因此5G massive MIMO无线通信设备的评估需要一种以空口(Over The Air, OTA)方式重构的多维度电波传播环境.为此,工业界和学术界为推进OTA接入认证付出了巨大努力,其中多探头微波

暗室法 (Multi-Probe Anechoic Chamber, MPAC) 和辐射两步法 (Radiated Two Stage, RTS) 方法已被第三代合作伙伴计划 (Third Generation Partnership Project, 3GPP) 和美国无线通信和互联网协会 (Cellular Telecommunications and Internet Association, CTIA) 采用和标准化, 并应用于 4G Long-Term Evolution (LTE) 终端测试<sup>[5]</sup>。目前, 3GPP 工作组正在进行 5G 终端 OTA 验证的标准化工作。MPAC 方案已被选为 sub-6 GHz 的 5G 终端的参考方法, 且三维 (3-D) MPAC 解决方案也被选择用于毫米波 5G 终端测试<sup>[6]</sup>。而 RTS 法由于不能验证自适应天线系统而不被选择为首选方案。

尽管 5G 终端测试的标准化工作正在稳步进行, massive MIMO 基站 (Base Station, BS) 的 OTA 验证仍面临许多挑战。现阶段的标准方案无法满足 5G massive MIMO BS 在波束赋形模式下的测试要求, 阻碍了 5G BS OTA 测试标准化以及工业化应用。针对这一难点, 文献中主流研究方向是扇形 MPAC 方案。该方案具体为在微波暗室中, 将大量探头天线安装在一个覆盖特定空间角度区域的扇形探头墙上, 并使用探头切换电路与信道模拟器相连。利用探头选择算法将目标信道模型的空间功率角度谱 (Power Angular Spectrum, PAS) 映射到所有探头天线上, 并结合预衰落合成技术 (Prefaded Synthesis, PFS) 以适当的权重激励部分探头实现复杂电磁信道重构<sup>[4]</sup>。然而基于扇形 MPAC 的大规模 massive MIMO BS OTA 测试仍有许多问题亟须解决, 核心挑战和局限可以被总结为以下三点。

(1) 电磁环境重构精度取决于扇形探头墙的几何布局<sup>[7]</sup>, 并将最终影响到场景再现的可靠可信性。然而, 由于 BS 端传播信道的空间稀疏性, 高精度的信道重构需要密集的探头分布, 这可能导致 OTA 多探头天线之间的电磁耦合, 影响信道重构精度。

(2) 与传统的终端测试所需要的平稳信道环境不同, massive MIMO BS 的波束操作, 如波束对齐、波束追踪、波束置零等通常发生在非平稳 (动态) 传播信道中<sup>[8]</sup>。因此对于实现具有高空间分辨率的自适应天线设备的多维度 OTA 测试, 扇形 MPAC 方案难以在保证重构精度的前提下快速选择出最优探头。另外, 探头切换电路也需要考虑开关速度、插入损耗、通道隔离度、系统成本和设备尺寸等实际因素。

(3) 用于 massive MIMO BS 性能测试所需的 PFS 技术需要确保探头天线到 DUT 的距离满足远场传播条件, 这极大提高了对微波暗室物理维度的要求, 导致测试设备成本过高<sup>[9]</sup>。此外受限于成本因素, 目前主流扇形 MPAC 方案设计的探头墙空间角度覆盖范围有限, 仅覆盖目标信道模型 PAS 的一部分。换言之, 扇形 MPAC 方案所能重构的目标电磁传播环境有限, 难以遍历全

场景的多维信道环境。

无线信道的全场景遍历对全面、灵活和低成本 OTA 性能测试具有重要意义。文献 [10] 提出了一种基于相位矩阵的虚拟 OTA 测试方法。其优势在于扇形 MPAC 中的密集探头墙、远场测试距离、探头切换电路的作用可以用相位矩阵所实现和替代。具体而言, 相位矩阵能够调整每个输入端口到所有输出端口链路的相位, 从而重构由任意方向电磁波所表征的理想远场阵列响应, 这与在实际微波暗室中安装真实 OTA 探头的效果相同, 并且该方法同样适用于多电波的复杂电磁环境。由于阵列响应是由相位矩阵而不是实际电磁传播生成的, 因此该方法被称为虚拟 OTA 测试装置<sup>[10]</sup>。该方法由于解决了实际扇形 MPAC 装置的局限性并具备极高成本效益, 因此被工业界视为 massive MIMO BS 性能验证的可靠方案<sup>[11]</sup>。文献 [12] 提出了用于重现和遍历复杂多维动态信道所需的最佳虚拟探头位置和功率权重的方法, 从而可在较少系统资源的情况下准确重构任意目标信道特性。

然而, 仍有一些相位矩阵的实际工业因素需要考虑<sup>[13,14]</sup>。相位矩阵中的一个关键问题是相位是离散变化的, 其步进间隔取决于所采用移相器的分辨率。分辨率过低的移相器将在 massive MIMO 波束形成中引入相位噪声, 影响性能测试。而高分辨率移相器又将增加测试成本, 不利于该方法的大规模推广。为此, 为系统地探索和解决实际应用中多维虚拟探头协同和多维信道重构和映射的问题, 本文对多种 3GPP 标准信道模型进行了全面多维度的电磁模拟, 挖掘移相器分辨率对信道重构的量化影响, 建立合适可信的设计参数规范。此外, 为了验证所得结论对全场景遍历信道重构的有效性, 本文重构了近真实的非平稳室内射线追踪 (ray tracing) 信道, 完成了模拟电磁波在空间域中的动态电波簇演化过程。

## 2 系统模型

### 2.1 基于相位矩阵的信道重构装置模型

图 1 是扇形 MPAC 装置示意图。 $K$  和  $M$  分别表示探头数量和 DUT 的天线单元数量。以上行链路为例, 阐述该系统工作原理, 在真实的扇形 MPAC 中, 测试信号由终端模拟器生成, 并经过同轴线缆传输至 CE。测试信号与 CE 中生成的信道传输矩阵  $\mathbf{H}_{\text{OTA}}(f, t)$  卷积后从所选择的探头辐射到 DUT。 $\mathbf{F}(f, t)$  表示  $K$  个探头到  $M$  个 DUT 天线单元的自由空间传输矩阵。

为了解决微波暗室、探头墙及探头切换电路的局限性, 一种基于相位矩阵的信道重构装置被提出<sup>[10]</sup>, 如图 2 所示。该装置主要由终端模拟器、CE、 $K$  个输入端口和  $M$  个输出端口的相位矩阵以及 DUT 组成。相位矩

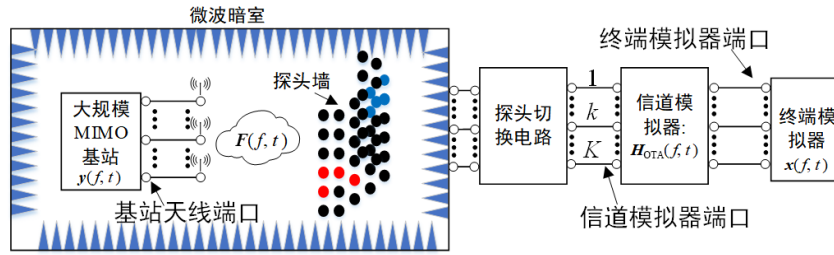


图1 三维扇形MPAC OTA装置示意图

阵的内部结构如图2右侧所示,主要由信号分离器、移相器、信号合路器组成.在无线设备性能验证中,相位矩阵可以起到虚拟可重构探头电磁传播的作用.在扇形MPAC中,真实探头辐射的电磁信号经自由空间传播后到达DUT时将对各天线单元产生由探头空间位置所表征的电波相位差.研究人员可以利用相位矩阵人为设置传输信道到达DUT的相位分布,使DUT观测到的信号如同是从某一特定位置的探头辐射出的.具

体来讲,第 $k$ 个相位矩阵的输入端经信号分离器分为 $M$ 路信号.利用移相器对这 $M$ 路信号分别调整相位后连接到 $M$ 个DUT天线上.因此每个相位矩阵输入端口都可被视为一个虚拟探头.根据线性叠加性原理,所有虚拟探头分离出的信号可利用信号合路器叠加后输入到DUT设备,进而模拟 $K$ 个探头重构的多径传播信道.因此相位矩阵的功能可以由 $M \times K$ 维矩阵 $W$ 表示.

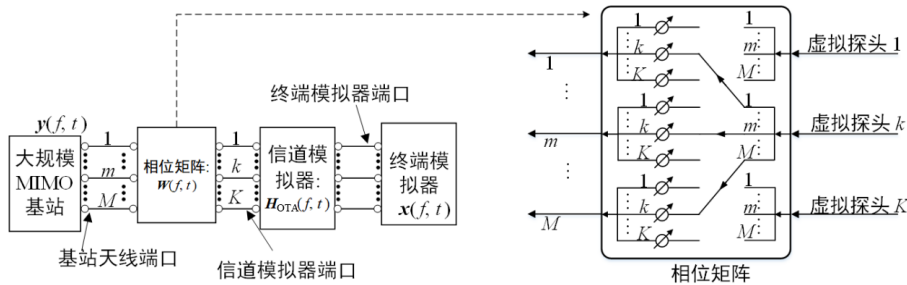


图2 基于相位矩阵的信道重构装置以及相位矩阵内部结构

显然,这种基于相位矩阵的虚拟OTA装置是一种传导测试方法.对于没有天线射频接口的毫米波段或集成射频收发器设计的sub-6 GHz波段的测试,以辐射方式实现的无线电缆(wireless cable)方法更加逼近真实场景,更加可靠可信.如图3所示,DUT被放置在射频屏蔽箱内,并且若干OTA探头也被安装在内壁上. $A$ 是OTA探头和DUT天线端口之间的传输矩阵,由OTA探头、屏蔽箱中的电磁传播、DUT天线元件等确定.无线电缆方法实际上是一种射频电缆更换方法.基本思想是构造一个校准矩阵 $T$ ,其实现 $AT=I$ , $I$ 是单位矩阵.这样可以实现相位矩阵输出端和DUT天线端

口之间的直接链路,而无需射频电缆连接.在理想情况下,这种无线电缆可以在没有任何串扰的情况下被构建,使得相位矩阵和DUT直接连接一样.许多文献讨论了如何获得传递矩阵 $A$ 和校准矩阵 $T$ <sup>[15-17]</sup>.此外,校准矩阵和相位矩阵可以集成到幅度相位控制网络 $E=TW$ 中.

### 2.2 MIMO信道传输模型

对于在终端和基站端分别包含 $S$ 和 $M$ 个天线单元的MIMO无线传输系统,其广泛应用的非平稳上行几何信道传输矩阵可以表示为

$$H(f,t) = \{h_{m,s}(f,t)\} \in \mathbb{C}^{M \times S} \quad (1)$$

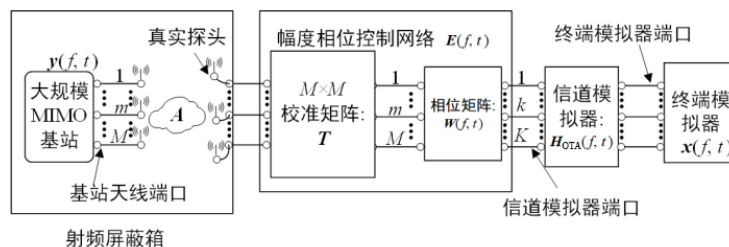


图3 虚拟OTA测试系统中相位矩阵到DUT阵列的OTA连接

其中,第  $s$  个发射天线到第  $m$  个接收天线的动态传输系数可以写为

$$\begin{aligned} h_{m,s}(f,t,\boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l},\boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}) &= \sum_{l=1}^{L(t)} \sqrt{p_l} \sqrt{\mathbf{G}_{\text{tx}}(\boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l}(t))} \sqrt{\mathbf{G}_{\text{rx}}(\boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}(t))} \\ &\times \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}(\boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l}(t)r_s^{\text{tx}})\right) \times \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}(\boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}(t)r_u^{\text{rx}})\right) \quad (2) \\ &\times \exp\left(j2\pi \int^t v_l(t')dt' + j\psi_l\right) \times \exp(-j2\pi f\tau_l(t)) \end{aligned}$$

其中,  $t$  和  $f$  分别表示时间和频率;  $L$  表示电磁环境中的多径数量;  $\mathbf{G}_{\text{tx}}$  和  $\mathbf{G}_{\text{rx}}$  分别表示发射端和接收端的天线方向图;  $p_l, \tau_l, \boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l}, \boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}$  和  $v_l$  分别表示第  $l$  个电波传播路径的功率、时延、发射角、接收角以及多普勒频移;  $r_s^{\text{tx}}$  和  $r_m^{\text{rx}}$  分别表示第  $s$  个发射天线和第  $m$  个接收天线的位置向量;  $\boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l}$  和  $\boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}$  分别表示关于  $\boldsymbol{\varphi}^{\text{tx},l}$  和  $\boldsymbol{\varphi}^{\text{rx},l}$  的单位方向向量;  $\psi_l$  是第  $l$  个电波传播路径的独立同分布的随机初始相位. 显然式(1)和式(2)全面表征了 MIMO 无线动态信道包括空间域、时延域、多普勒域在内的多维度电磁特征.

### 2.3 信道重构模型

信道重构的目标是在 DUT 周围重建目标时变电磁环境. 一般而言, CE 中生成的  $\mathbf{H}_{\text{OTA}}(f,t)$  可以完美地包含时域和频域衰落、天线特性、噪声干扰等多维信道特征. 因此核心挑战是如何利用有限硬件资源重构目标信道空间特性. 为了重建多径环境的空间特性,理想的实现方式是将探头放置在所有多径方向,然后根据多径功率对探头进行加权. 该方法可被视为全空间采样法. 然而,由于成本极高,这实际上是不可行的. 对于空间分辨率有限的 DUT,目标电磁环境中信道空间特性可以通过几个主要的有效路径来再现. 换句话说,要重构的信道可以由几个空间电波表示,这可以被视为部分空间采样法. 在 OTA 测试中,多个探头能够表征目标信道的相似空间特性的有效路径.

基于广义平稳不相关散射 (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering, WSSUS) 假设,空间相关性可以表征电磁环境空间特征,并被用来衡量重构信道与目标信道的匹配程度. 本研究中, DUT 端第  $i$  个天线对 (第  $u$  个天线和第  $v$  个天线) 的目标空间相关性  $\rho$  可以表示为

$$\rho_i(u,v) = \mathbb{E}\{h_{m,u} \cdot h_{m,v}^*\} = \oint P(\boldsymbol{\Omega}) \times \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{\Omega}(r_u^r - r_v^r)\right) d\boldsymbol{\Omega} \quad (3)$$

其中,  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  表示数学期望计算,  $(\cdot)^*$  为共轭计算  $P(\boldsymbol{\Omega})$  代表目标信道的 PAS 谱,  $\boldsymbol{\Omega}$  表示空间角  $\boldsymbol{\Omega}$  的单位方向向量. 利用  $K$  的虚拟探头,重建的第  $i$  个天线对的电磁环境空间相关性  $\hat{\rho}$  可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\hat{\rho}_i = \omega_k \times \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{\Phi}_k(r_u^r - r_v^r)\right) \quad (4)$$

其中,  $\boldsymbol{\Phi}_k$  表示第  $k$  个虚拟探头所表征的空间位置;  $\omega_k$  代表第  $k$  个虚拟探头 (CE 端口) 的权重. 显然,根据式(3)和式(4)可以发现,信道重构精度取决于虚拟探头的位置和权重. 因此可以构造如下目标函数:

$$\min_{\omega, \boldsymbol{\Phi}} \|\hat{\rho} - \boldsymbol{\rho}(\omega, \boldsymbol{\Phi})\|_2^2 \quad (5)$$

其中,  $\hat{\rho} \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$  和  $\boldsymbol{\rho} \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$  表示分别包含  $Q$  个天线组合的重构空间相关性向量和目标空间相关性向量;  $\|\cdot\|_2^2$  表示二阶范数计算;  $\omega$  和  $\boldsymbol{\Phi}$  分别代表包含  $K$  个虚拟探头权重和位置信息的向量. 作者在文献[12]提出了一种求解探头最优权重的闭式解,低复杂度可以满足全场景动态电磁环境重构,其可以表示为

$$\omega = (\mathbf{A}_{\text{Re}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Re}}^T + \mathbf{A}_{\text{Im}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Im}}^T)^{-1} \cdot (\mathbf{A}_{\text{Re}}^T \cdot \boldsymbol{\rho}_{\text{Re}} + \mathbf{A}_{\text{Im}}^T \cdot \boldsymbol{\rho}_{\text{Im}} - \frac{\alpha \bar{\mathbf{I}}}{2}) \quad (6)$$

其中,  $\bar{\mathbf{I}}$  表示包含  $K$  个元素的单位列向量. 定义  $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_K] \in \mathbb{C}^{Q \times K}$ ,  $\mathbf{A}_{\text{Re}}$  和  $\mathbf{A}_{\text{Im}}$  表示  $\mathbf{A}$  的实部和虚部. 同理,  $\boldsymbol{\rho}_{\text{Re}}$  和  $\boldsymbol{\rho}_{\text{Im}}$  被定义为  $\boldsymbol{\rho}$  的实部和虚部. 其中  $a_k$  可以表示为

$$a_k = \left[ \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{\Phi}_k(r_{1,u}^r - r_{1,v}^r)\right), \dots, \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{\Phi}_k(r_{Q,u}^r - r_{Q,v}^r)\right) \right] \in \mathbb{C}^{Q \times 1} \quad (7)$$

式(6)中  $\alpha$  表示超参数,其最优值可以被计算为

$$\alpha = \frac{2\bar{\mathbf{I}}(\mathbf{A}_{\text{Re}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Re}}^T + \mathbf{A}_{\text{Im}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Im}}^T)^{-1}(\mathbf{A}_{\text{Re}}^T \cdot \boldsymbol{\rho}_{\text{Re}} + \mathbf{A}_{\text{Im}}^T \cdot \boldsymbol{\rho}_{\text{Im}}) - 2}{\bar{\mathbf{I}}^T(\mathbf{A}_{\text{Re}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Re}}^T + \mathbf{A}_{\text{Im}}^T \cdot \mathbf{A}_{\text{Im}}^T)^{-1}\bar{\mathbf{I}}} \quad (8)$$

此外,针对文献[12]的低复杂度连续相消虚拟探头选择方法,为解决最优探头位置和权重中实际物理因素限制信道重构精度的问题,本文将在后面深入分析移相器分辨率对 DUT 性能验证的影响.

### 2.4 移相器量化误差

文献[12]假设可以任意调整相位矩阵的相位实现信道重构,然而,在实际应用中,虚拟探头的相位只能量化赋值,即非连续. 其相位分辨率取决于所使用移相器的比特(bit)位数. 比特数越高,相位分辨率越高. 这种量化的相位调整将对 DUT 观测到的重构信道环境产生影响. 以一个简单的二维单簇(single cluster)信道环境为例,分析移相器误差对信道重构的影响. 设 DUT 为一个包含 16 个天线单元的线性阵列 (Uniform Linear Array, ULA). 图 4 展示了相同到达角 (Angle of Arrival, AoA)、不同角度扩展 (Angle Spread, AS) 重构信道下 DUT 端所看到的 PAS 谱, 16 bit 移相器提供了  $\frac{360^\circ}{2^{16}}$  的相移精度,可以被视为理想情况. 显然,无论是波束功率、

零点还是旁瓣位置在非理想重构环境中都会发生畸变,且受影响程度因不同信道特征而改变.

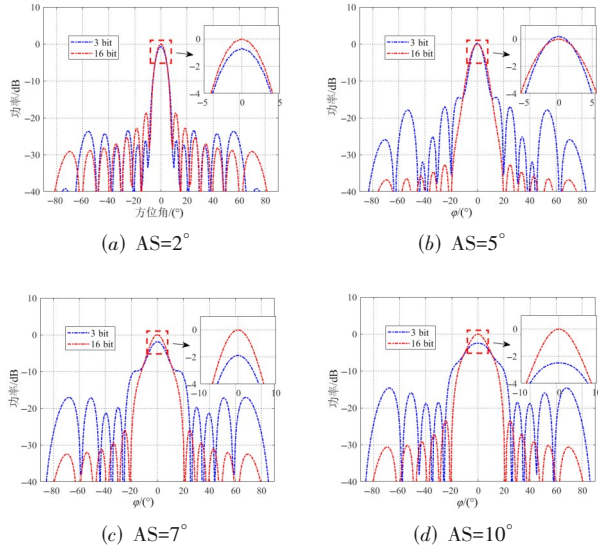


图4 不同角度扩展重构信道下 DUT 所估计的 PAS 谱

鉴于在实际应用中,移相器通常是窄带设计,为了实现多频段复用,硬件上需要多套移相器组合.因此从工业成本效益出发,可在满足信道重构精度的前提下,尽可能使用低比特数的移相器.下文将从全面的数值分析中讨论不同目标信道环境对移相器分辨率的要求,并提出准确的合理参数设计.

### 3 数值分析

#### 3.1 评估指标

为了验证重构信道的多维电磁特征,本文采用最大空间相关性误差、加权空间相关性均方根误差、PAS 谱相似性和波束功率损失这四个维度的评估指标来分析移相器对传播环境重建的影响.不同维度指标对不同通信技术测试至关重要,其中空间相关性特性重构精度直接决定了对多天线设备空间复用技术的评估与验证,而 PAS 谱相似度和波束功率损失指标旨在重建理想的信道 PAS 空间特性,该指标包含了测试系统对待测设备波束选择、波束对齐、波束追踪等自适应技术以及波束方向图的影响,是实现 5G NR 大规模 MIMO 性能验证的关键,如空间复用、波束赋形和波束链路连接等.

(1)最大空间相关性误差:重构空间相关性精度可直接影响多天线设备的空间复用技术验证,定义最大空间相关性误差为

$$\max_i |\hat{\rho}_i - \rho_i| \quad (9)$$

(2)加权空间相关性均方根误差 (weighted root mean square correlation error):该指标可以衡量 DUT 所

处的重构电磁环境的全局偏差.并且根据文献[19]所述,具有较大空间相关性系数的采样点的误差比小空间相关性采样点的误差影响更大,因此定义加权均方根误差为

$$e_\rho = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |\hat{\rho}_i - \rho_i| \max(\hat{\rho}_i, \rho_i)} \quad (10)$$

(3)PAS 谱相似性 (PAS similarity):对于有限辐射孔径的 DUT,该指标用来衡量 DUT 所观测到的重构 PAS 谱和理想 PAS 谱的偏差.具体而言,使用 Bartlett 波束形成算法可以计算 DUT 所经历电磁环境的 PAS 谱:

$$\tilde{P}_o(\Omega) = \mathbf{b}^H(\Omega) \mathbf{R}_o \mathbf{b}(\Omega) \quad (11)$$

$$\tilde{P}_e(\Omega) = \mathbf{b}^H(\Omega) \mathbf{R}_e \mathbf{b}(\Omega) \quad (12)$$

其中,  $\tilde{P}_o(\Omega)$  和  $\tilde{P}_e(\Omega)$  分别代表理想和重构环境下 DUT 所观测的 PAS 谱;  $\mathbf{R}_o$  和  $\mathbf{R}_e$  分别表示理想和重构信道条件下的 DUT 空间相关性矩阵;  $\mathbf{b}(\Omega)$  代表阵列导向矢量 (steering vector);  $(\cdot)^H$  表示共轭转置.进而可以定义 PAS 谱相似性为

$$D_e = \left[ 1 - \frac{1}{2} \int \left| \frac{\tilde{P}_e(\Omega)}{\int \tilde{P}_e(\Omega) d\Omega} - \frac{\tilde{P}_o(\Omega)}{\int \tilde{P}_o(\Omega) d\Omega} \right| d\Omega \right] \times 100\% \quad (13)$$

其中,  $D_e$  取值范围在  $[0, 100]$ , 其中 100 代表重构环境与目标环境完全一致.

(4)固定波束功率损失 (fixed beam power loss): massive MIMO 无线设备会根据所收到的阵列相位分布形成特定的波束.然而,分辨率受限的移相器会扭曲 DUT 的相位场.因此本文采用固定波束的功率损失来衡量移相器量化误差对 DUT 波束赋形测试的影响.第  $K$  个虚拟探头所造成的功率损失可以被计算为

$$\epsilon_k = \left| \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\hat{\beta}_m - \beta_m) \right|^2 \quad (14)$$

进而平均波束功率损失可以被表达为

$$\epsilon_{av} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \epsilon_k \quad (15)$$

当  $\epsilon_{av}$  是 0 dB 时,则表明无功功率损失.

#### 3.2 仿真结果

本节以 3GPP Clustered Delay Line (CDL) 标准信道模型<sup>[20]</sup>为目标环境来演示移相器 bit 数对信道重构的影响.一个  $8 \times 8$  均匀二维天线阵列被设为 DUT.

图 5 展示了当以 CDL-A 模型为目标信道并采用 8 个虚拟探头重建目标电磁环境时,不同分辨率移相器为不同虚拟探头和天线单元链路所提供的相位与实际所需要的相位的偏差.可以发现,当使用 8 bit 移相器时,相位偏差不足  $1^\circ$ .然而高分辨率移相器成本较高,

难以满足宽带验证时的成本效益,并且会增加系统复杂度.图6计算了利用不同分辨率移相器所重构的天线单元空间相关性误差.当使用2 bit移相器时,最大空间相关性误差高达0.75.随着移相器bit数的增加,空间相关性重建精度显著提高.当使用4 bit移相器时,该虚拟OTA装置表现出了接近性能上限(16 bit)的信道重构精度,其中空间相关性最大误差和加权均方根误差分别为0.28和0.082,而理想情况下该误差分别为0.25和0.069.

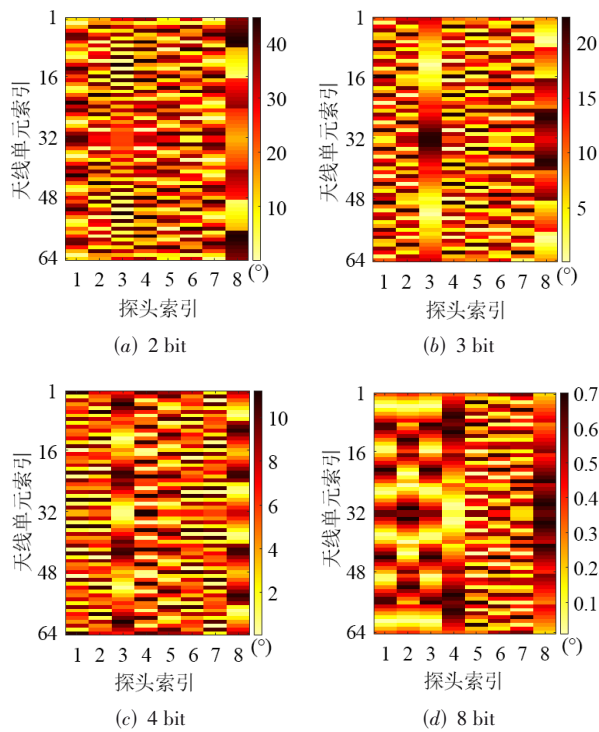


图5 不同比特数移相器对虚拟探头相位偏差的影响

以CDL-C模型为目标信道环境,图7研究了移相器分辨率对电磁环境PAS谱重构的影响,其中圆点代表目标信道中簇所在位置.由图7(c)可以发现,在大多数空间角位置,重构PAS谱表现出了相当小的误差,受限于信道模拟器资源,仅在较小的范围内(方位角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,俯仰角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ )的位置有一定偏差.然而,在这个位置理想信道的PAS功率很低,因此该偏差的影响可以忽略不计.与空间相关性指标类似,4 bit移相器可以提供足够的信道重构精度.另外,3 bit移相器同样表现出了较好的PAS相似度,可以在对精度要求不高的情况下被视为降低成本的一种选择.

图8~10更全面地研究了移相器分辨率与相位矩阵配置对信道重构的影响,并考虑了多种信道模型和性能指标.可以发现在不同性能指标和虚拟探头数量配置下,4 bit移相器可以提供理想的信道重建精度,这与

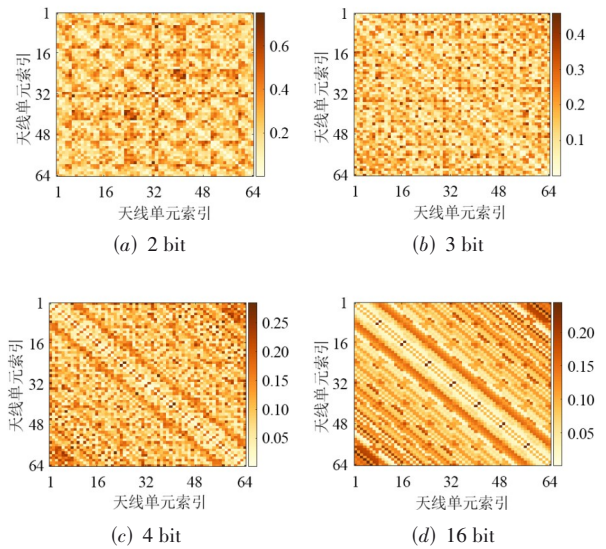


图6 不同比特数移相器的相位矩阵重构的DUT空间相关性误差

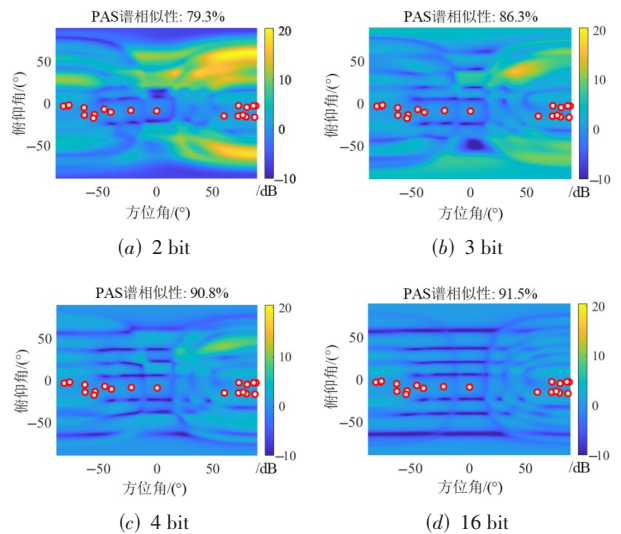


图7 不同比特数移相器的相位矩阵重构的PAS谱误差

前文的推论一致.另外,当虚拟探头数量足够多时,使用3 bit移相器虚拟OTA装置同样可以精确的重构目标电磁环境.因此在实际应用中可以使用较多的信道模拟器资源实现降低相位矩阵复杂度,提高系统稳定性的目的.

除了 $8\times 8$ 天线阵列,本文还验证了当天线阵列规模增大时,如 $10\times 10$ ,基于所述OTA装置的信道重构性能,经过多维度指标验证可知,信道重构精度有轻微变化,但影响很小,上述结论同样成立.在实际应用中,虽然4 bit移相器提供了相当精确的信道重构,但可以选择多1 bit移相器作为安全冗余,即在成本允许的条件下,使用5 bit移相器从而适应全场景多制式通信设备的OTA测试需要.

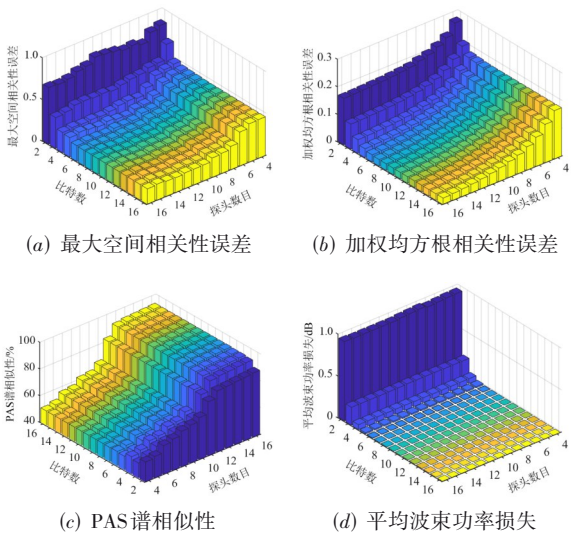


图8 对于CDL-A信道环境,移相器比特数和虚拟探头数目对不同信道重构指标的影响

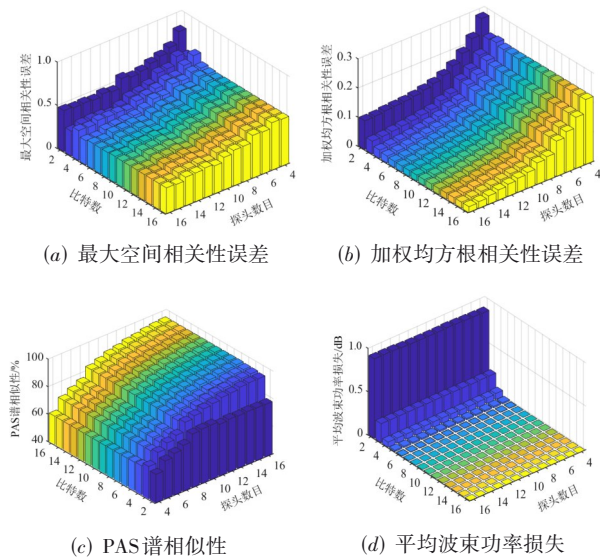


图9 对于CDL-B信道环境,移相器比特数和虚拟探头数目对不同信道重构指标的影响

### 4 射线追踪信道验证

射线追踪信道可以生成更逼真的信道模型数据,并进行特定环境或特定路线的通信设备评估.本节以射线追踪信道参数进行信道重构,分析移相器分辨率的影响.

本文采用商业平台 Remcom Wireless Insite 进行射线追踪模拟,选择 2.4 GHz 室内图书馆场景,如图 11 所示,通过移动发射器位置,分析路径损耗、时延扩展、角度扩展等方面的仿真结果来进行射线追踪.首先,依照实际建筑尺寸和结构,在仿真平台上对室内环境进行建模,图中可以看出整体的仿真场景,包括 Tx, Rx 以及

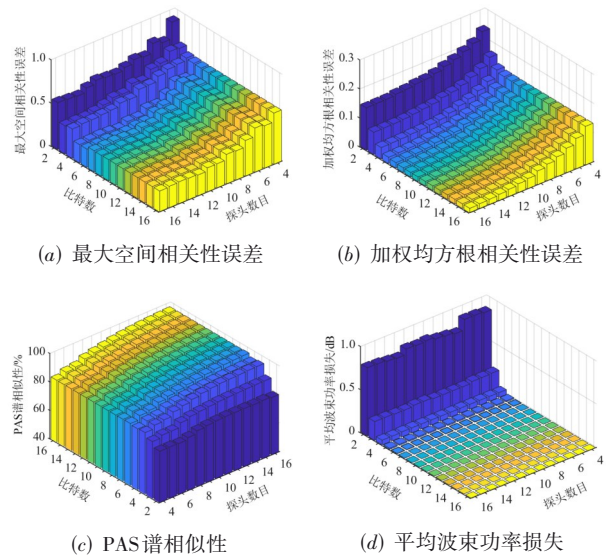


图10 对于CDL-C信道环境,移相器比特数和虚拟探头数目对不同信道重构指标的影响

周围环境.室内环境的尺寸为 60×30×3 m<sup>3</sup>.在仿真场景中,主要环境包括木制书架、混凝土墙、玻璃窗和地板等,并对材料特性进行单独设置. Tx 和 Rx 天线的高度均设置为 1 m,通过移动 Tx,依次测量 21 个间距为 4 m 的测量点.在每一个发射点,以 0.25° 为间隔分割射线束,并允许射线在 6 阶反射、1 阶透射和 1 阶衍射之后到达接收天线,在每个点记录 150 条路径信息,运用 X3D 传播模型来分析多径分量传播参数,即路径损耗、时延扩展、水平到达角.

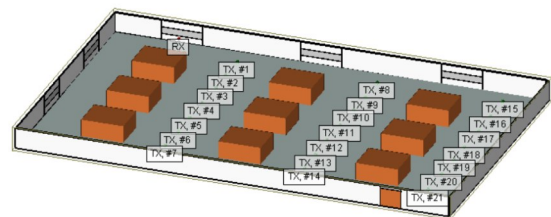


图11 测量场景的几何布局示意图

与 3GPP 中基于簇的标准信道模型相比,射线追踪信道更加杂乱和真实,如图 12 所示,多径分布上没有明显的簇边界.当使用 4 个虚拟探头时,DUT 所经历的多空间位置的非平稳信道重构结果如图 13 所示,其中使用 4 bit 移相器的重构信道提供了 94.3% 的 PAS 相似度.此外,在信道动态演变过程中无论是信道中的视线 (Line-Of-Sight, LOS) 电磁传播或是非视线 (Non-Line-Of-Sight, NLOS) 电磁传播,使用 4 bit 移相器的多径变化趋势与使用 16 bit 相位矩阵重构的电磁环境中的演变趋势一致.可以推论 4 bit 移相器同样适用于非标准测量信道环境,这与上文所获得结论一致.

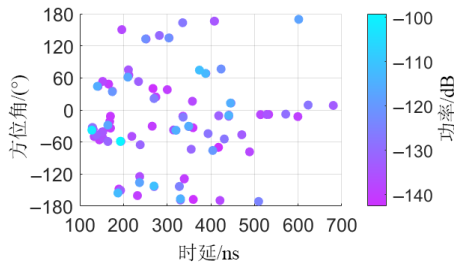
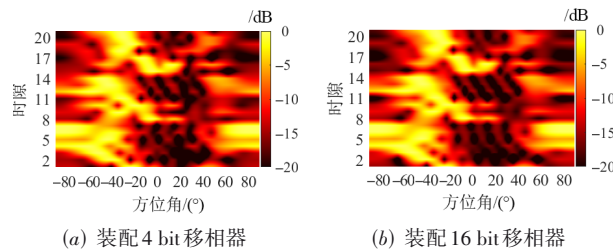


图 12 图 11 中位置 12 处的多径信道时延-角度-功率分布



(a) 装配 4 bit 移相器

(b) 装配 16 bit 移相器

图 13 基于相位矩阵虚拟 OTA 装置的动态射线追踪信道的重构 PAS 谱

## 5 总结

本文围绕基于相位矩阵的虚拟 OTA 信道重构装置,研究了移相器的离散控制机理对复杂多维电磁环境重构的影响. 仿真结果显示,移相器量化性能不足造成的虚拟探头相位偏差会对信道重构精度造成不利影响,使得测试系统不能正确验证 DUT 核心组件技术. 为平衡系统成本和复杂度与传播信道重构精度,本文利用多维指标研究了移相器分辨率对 3GPP 标准信道重建的影响. 经过对比可知,4 bit 移相器可以在保持低成本前提下,最大化电磁环境模拟精度. 为验证所得结论对全场景信道模型的有效性,本文构建了基于射线追踪机理的室内多时隙动态非平稳信道环境,经过数值电磁计算可知,4 bit 移相器对于非标准信道模型重构同样可以提供足够精度. 该结论为虚拟(可重构) OTA 装置模型中的多移相器联合复用提供了理论指导,对搭建低成本与大规模相位矩阵进而实现全场景多维信道重构与虚拟 OTA 测试验证具有重要意义. 本文方法通过简化相位矩阵的复杂度和成本,提高了该虚拟 OTA 测试设备的成本效益和稳定性,为该装置的大规模推广和工业实践提供了参考.

## 参考文献

- [1] ERIK G L, OVE E, FREDRIK T, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186-195.
- [2] LU L, GEOFFREY Y L, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [3] XIAO M, MUMTAZ S, HUANG Y M, et al. Millimeter Wave communications for future mobile networks, Part I [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(7): 1425-1431.
- [4] PEKKA K, TOMMI J, JUKKA-PEKKA N. Channel modelling for multiprobe Over-the-Air MIMO testing[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012, 2012: 1-11.
- [5] CTIA Certification Program. Test Plan for 2x2 Downlink MIMO and Transmit Diversity Over-the-Air Performance [EB/OL]. (2017-09)[2022-10]. [https://api.ctia.org/wp-content/uploads/2018/05/CTIA-Test-Plan-for-2x2-Downlink-MIMO-and-Transmit-Diversity-Over-the-Air-Performance-v1.1.1\\_.pdf](https://api.ctia.org/wp-content/uploads/2018/05/CTIA-Test-Plan-for-2x2-Downlink-MIMO-and-Transmit-Diversity-Over-the-Air-Performance-v1.1.1_.pdf).
- [6] GAO H Q, WANG Z Q, ZHANG X, et al. Over-the-Air performance testing of 5G new radio user equipment: Standardization and challenges[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2022, 6(2): 71-78.
- [7] PEKKA K, LASSI H, FAN W, et al. On Radiated performance evaluation of massive MIMO devices in multiprobe anechoic chamber OTA setups[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(10): 5485-5497.
- [8] FAN D, GAO F F, LIU Y W, et al. Angle domain channel estimation in hybrid millimeter wave massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(12): 8165-8179.
- [9] PEKKA K, FAN W, GERT F P, et al. On dimensions of OTA setups for massive MIMO base stations radiated testing[J]. IEEE Access, 2016, 4: 5971-5981.
- [10] GAO H Q, WANG W M, WU Y L, et al. A virtual Over-the-Air method for 5G massive MIMO base station testing with flexible virtual probes[J]. IEEE Access, 2019, 7: 108474-108485.
- [11] ALFONSO R, JOHN D R. Massive MIMO array testing using a programmable phase matrix and channel emulator [P]. US:10313034B2. 2019.
- [12] WANG H, WANG W M, WU Y L, et al. On efficient non-stationary channel emulation in conductive phase matrix setup for massive MIMO performance testing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8030-8041.
- [13] MIHAI-ALIN B, JUSTIN P C. Communication through a large reflecting surface with phase errors[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(2): 184-188.
- [14] QIAN H Z, ZHANG B, L X. High-resolution wideband phase shifter with current limited vector-sum[J]. IEEE

Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(2): 820-833.

- [15] YU W, QI Y H, LIU K F, et al. Radiated two-stage method for LTE MIMO user equipment performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1691-1696.
- [16] FAN W, PEKKA K, LASSI H, et al. MIMO terminal performance evaluation with a novel wireless cable method [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4803-4814.
- [17] GAO H Q, WANG W M, FAN W, et al. Over-the-Air Testing for carrier aggregation enabled MIMO terminals using radiated two-stage method[J]. IEEE Access, 2018, 6: 71622-71631.
- [18] FAN W, ISTVAN S, NIELSENET J O, et al. Channel spatial correlation reconstruction in flexible multiprobe setups[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 1724-1727.
- [19] FAN W, PEKKA K, NIELSENET J O, et al. Wideband MIMO channel capacity analysis in multiprobe anechoic chamber setups[J]. IEEE Trans. Vehicular Technology, 2016, 65(5): 2861-2871.
- [20] ETSI. Study on Channel Model for Frequencies From 0.5 to 100 GHz: TR 138 901[S/OL]. [2022-10]. <https://itec-spec.com/archive/3gpp-specification-tr-38-901/>.

#### 作者简介



刘元安 男,1963年出生,四川乐至人.北京邮电大学电子工程学院教授,博士生导师.主要研究方向为电磁场与微波技术.  
E-mail: yuliu@bupt.edu.cn



王卫民(通讯作者) 女,1977年出生,山东临沂人.北京邮电大学电子工程学院副教授,博士生导师.主要研究方向为微波电路与天线测试.  
E-mail: wangwm@bupt.edu.cn



张震 男,1997年出生,山西晋中人.北京邮电大学电子工程学院硕士研究生.主要研究方向为无线通信与信道建模.  
E-mail: zzz915@bupt.edu.cn



王琦 男,1994年出生,山东泰安人.北京邮电大学电子工程学院博士生.主要研究方向为无线设备射频性能验证与天线测试.  
E-mail: hengwang@bupt.edu.cn



高华强 男,1994年出生,湖北洪湖人.2022年于北京邮电大学获得工学博士学位.现为丹麦奥尔堡大学研究助理/博士后.主要研究方向为无线设备的空口测试、天线测量和相控阵校准.  
E-mail: gaohq@ieee.org