

室内分布式大规模 MIMO 信道的多径特性实验分析

Yingjie Xu, *Student member, IEEE*, Xuesong Cai, *Senior member, IEEE*, Sara Willhammar, *Member, IEEE*, and Fredrik Tufvesson, *Fellow, IEEE*

摘要—分布式大规模多输入多输出 (MIMO), 也称为无小区大规模 MIMO, 作为第六代 (6G) 无线网络的有前途技术而出现。本文介绍了一项室内信道测量活动, 旨在探索分布式大规模 MIMO 信道中多径分量 (MPCs) 的行为。在八个分布式的均匀平面阵列 (总共 128 个元素) 与一条 12 米长的用户设备路径之间进行了完全相干信道的测量。此外, 介绍了一种方法来确定利用地图信息和 MPC 参数的 MPC 交互顺序 (单次或多次反射)。另外, 使用卡尔曼滤波器框架识别 MPC 交互机制 (反射或散射/衍射/混合)。最后, 基于所测得的信道进行了全面的 MPC 级特征描述, 包括单次反射 MPC 的重要性、球面波前特征、MPC 的生灭过程以及反射的空间分布。这些发现为理解 MPC 传播行为提供了有价值的参考, 这对于准确建模室内分布式大规模 MIMO 信道是必要的。

Index Terms—信道测量, 分布式大规模 MIMO, 多径特性, MPC 生灭过程, 球面波前。

I. 介绍

作为一种有前景的第六代 (6G) 无线网络技术, 分布式大规模多输入多输出 (MIMO), 也称为无小区大规模 MIMO [1], 预计将结合大规模 MIMO 和无小区网络的优点。与集中式大规模 MIMO 相比, 分布式大规模 MIMO 旨在促进均匀覆盖并提高通信可靠性 [2]。

为了优化分布式大规模 MIMO 系统的设计, 需要进行测量活动以实验性地调查其基础传播信道。在此方面已经进行了广泛的研究。例如, 在 [3] 中报道了户外信道测量, 使用了一个广泛分布的天线阵列, 覆盖范围

为 46.5 米。关键信道属性, 包括时变延迟扩展、多普勒扩展和路径损耗, 均被调查。在 [4] 中进行的信道测量集中在城市场景上, 分析了 80 个用户设备 (UE) 与超过 2 万个接入点 (AP) 位置之间的多链路信道, 在路径损耗、阴影效应和延迟扩展方面进行了研究。关于室内信道测量, [5] 从多种天线拓扑结构的多用户容量性能的角度调查了工业办公室中的分布式 MIMO 信道。此外, 在 [6] 中介绍了一个具有十二个全相干分布天线的系统用于工业信道测量。在 [7], [8] 中进一步的测量集中在室内实验室环境中, 其中研究了所测信道的用户可分离性和非宽义平稳性。

前述研究为通道的大尺度衰落特性提供了有价值的见解。然而, 它们在探究小尺度衰落, 尤其是多径效应方面受到限制, 这是影响系统性能的关键因素。[9]–[11] 的研究表明, 部署大规模天线会导致空间变化的多径分量 (MPCs)。这在分布式大规模 MIMO 中表现得更为明显, 因为接入点之间的距离更大。具体来说, 分布式的 AP 可能会观察到具有不同传播行为的各种 MPC, 进一步增加了通道中的 MPC 特征多样性。理解基于射线的通道模型的准确参数化不仅以 MPC 级别的通道表征为基础, 而且对于系统设计和实际应用也很重要。例如, 波束成形和无线电定位技术的性能高度依赖于通道的基础多径传播特性 [12], [13]。

据我们所知, 使用实际测量数据强化的分布式大规模 MIMO 信道中的 MPC 特征化尚未完全解决。为填补这一空白, 本通信介绍了一项室内分布式 MIMO 信道测量活动。然后引入一种确定 MPC 相互作用顺序的方法, 并随后提出一个基于卡尔曼滤波器的框架, 旨在识别反射的 MPCs。该框架可以同时估计虚拟散射体 (VSs) /锚点, 这对于信道建模及其他应用是必要的, 例如无线传感和定位。最后, 研究了所测量信道的 MPC

This work was supported by the Swedish strategic research area EL-LIIT, by NextG2Com funded by the VINNOVA program for Advanced Digitalisation with grant number 2023-00541, and by REINDEER which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 101013425. (*Corresponding author: Yingjie Xu.*)

Y. Xu, S. Willhammar, and F. Tufvesson are with the Department of Electrical and Information Technology, Lund University, Lund, Sweden (e-mail: {yingjie.xu, sara.willhammar, fredrik.tufvesson}@eit.lth.se).

X. Cai is with the School of Electronics, Peking University, Beijing, 100871, China (email: xuesong.cai@pku.edu.cn).

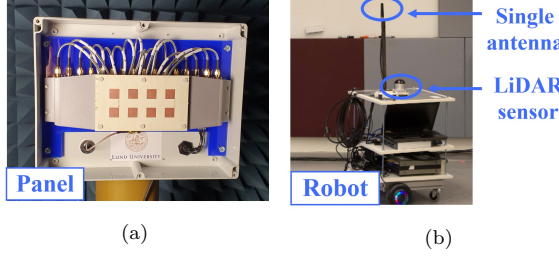


图 1. (a) BS 侧面板和 (b) UE 侧单天线的照片。

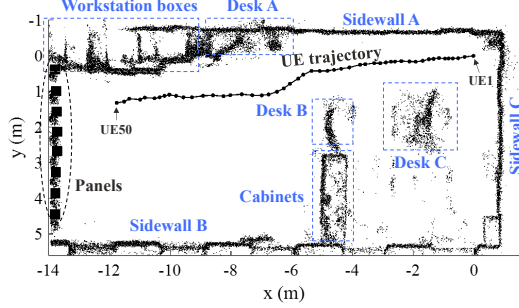


图 2. 测量环境的激光雷达点云。

特征，包括单次反弹 MPC 的重要性、球面波前特性以及 MPCs 的生灭过程，还有通道内反射的空间分布。

II. 室内分布式 MIMO 信道测量

室内信道测量在瑞典隆德大学的一个实验室房间内进行。该房间的环境包含各种物体，这些物体会导致丰富的散射环境。信号可以通过反射、衍射或散射与这些物体相互作用，从而允许对具有不同传播行为的多径分量进行研究。

一个基于开关的宽带分布式 MIMO 信道探测器 [14] 被部署，集成了多个 NI 通用软件无线电外设 (USRPs)、SP16T 射频 (RF) 开关和一对铷钟。在基站 (BS) 侧部署了八个均匀平面阵列 (UPAs)，这里称为“面板”。如图 1a 所示，每个面板配备了八组双极化贴片天线 (16 个端口)，设计用于 5-6 GHz 频段 ($S_{11} < -10$ dB)。相邻贴片天线之间的间距为 26.7 毫米，相当于该频段内大约半波长的距离。在 UE 侧，使用了一个单向单极天线，工作频率范围为 3.5-8 GHz。

测量在 5.7 GHz 的载波频率和 400 MHz 的带宽下进行。在测量过程中，UE 天线安装在一个机器人上，如图 1b 所示，该机器人以 0.012 m/s 的速度从房间的一端向面板移动。机器人的轨迹由 Lidar 传感器记录，并同时收集了环境的点云数据，如图 2 所示。面板沿着房间的一侧分布，彼此之间的间距为 60 cm。总共测量了沿

12 米长的 UE 路线的上行链路信道，并从 50 个不同的位置（快照）收集了信道脉冲响应 (CIR)。为了从 CIR 中提取 MPC 参数，包括复极化矩阵、到达角 (AoA)、延迟和多普勒频率，应用了空间交替广义期望最大化 (SAGE) 算法 [15]。

III. MPC 传播特性

A. MPC 交互顺序（单跳与多跳）

在传播过程中，MPC 可能与物理物体发生相互作用。根据发生的相互作用次数，MPC 可以被分类为单次反弹（仅一次相互作用）或多次反弹（多次相互作用）。区分每个 MPC 的相互作用顺序对于信道特征化、建模和环境映射至关重要。在本节中，介绍了一种利用提取的 MPC 参数和激光雷达点云来区分具有不同相互作用顺序的 MPC 的方法。

考虑一个双向通道模型，每个 MPC 都与第一跳和最后一跳散射器/相互作用相关。对于单次反射的 MPCs，它们相关的相互作用重合。由于我们的测量中仅提供了 MPC 们的入射角，因此计算了最后一跳散射体的位置。令 $\mathbf{s}_{l,k}^{\text{LH}} = (x_s, y_s, z_s)$ 表示在面板 k -UE 通道链路中 MPC l 的最后一跳散射体位置。给定到达角度 $\boldsymbol{\Omega}_{l,k} = [\phi_{l,k}, \theta_{l,k}]$ ，从面板 k 的位置定义一条射线 $\xi_{l,k}$ ，即 $\mathbf{P}_k = (x_{p_k}, y_{p_k}, z_{p_k})$ ，其参数方程为

$$\xi_{l,k} : \begin{cases} x = x_{p_k} + d \cdot \cos \phi_{l,k} \cdot \sin \theta_{l,k}, \\ y = y_{p_k} + d \cdot \sin \phi_{l,k} \cdot \sin \theta_{l,k}, \\ z = z_{p_k} + d \cdot \cos \theta_{l,k}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $0 < d \leq \tau_{l,k} \cdot c$ 是距离参数， $\tau_{l,k}$ 是 MPC l 的延迟， c 表示光速。然后可以通过找到 $\xi_{l,k}$ 与点云的第一个有效交点来获得 $\mathbf{s}_{l,k}^{\text{LH}} = (x_s, y_s, z_s)$ ，如在 [16] 中所述。

为了清晰起见，假设 $\zeta = \zeta_1$ 表示 MPC l 是单跳，而备择假设 $\zeta = \zeta_2$ 表示它是多跳。给定条件 $\zeta = \zeta_1$ ，可以通过求解一个非线性优化问题来估计与 MPC l 相关的散射体的位置，该问题定义为

$$\hat{\mathbf{s}}_{l,k} = \min_{\mathbf{s}_{l,k}} \left\| \mathbf{s}_{l,k} - \mathbf{P}_k - (\tau_{l,k} \cdot c - \|\mathbf{s}_{l,k} - \mathbf{u}\|_{\text{F}}) \cdot \mathbf{e}_{l,k} \right\|_{\text{F}}^2, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{u}$ 和 $\|\cdot\|_{\text{F}}$ 分别表示 UE 位置和 Frobenius 范数运算，以及范数向量 $\mathbf{e}_{l,k} = [\cos \phi_{l,k} \sin \theta_{l,k}, \sin \phi_{l,k} \sin \theta_{l,k}, \cos \theta_{l,k}]^T$ 。理论上，MPC l 是否为单跳由检查 $\hat{\mathbf{s}}_{l,k} = \mathbf{s}_{l,k}^{\text{LH}}$ 来决定。考虑到

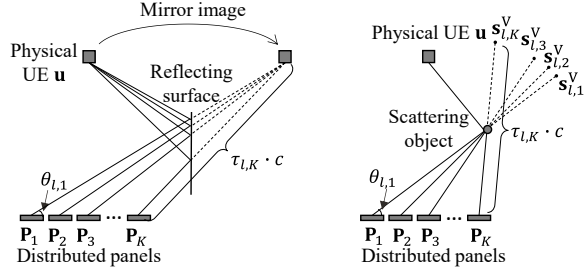


图 3. 具有不同 MPC 相互作用机制的虚拟散射体：单次反射（左）和单次散射（右）。

潜在的测量噪声和估计不确定性，MPC l 的交互顺序通过以下指标确定：

$$\zeta = \begin{cases} \zeta_1, & \|\hat{\mathbf{s}}_{l,k} - \mathbf{s}_{l,k}^{\text{LH}}\|_{\text{F}} \leq \delta_{\zeta}, \\ \zeta_2, & \text{others,} \end{cases} \quad (3)$$

其中 δ_{ζ} 是一个预设阈值，在本工作中其值设置为 1.5，基于实际的测量设置和配置。

B. 多方计算交互机制（反射与其他）

由于复杂的散射环境，MPC 可能通过各种机制与物理物体相互作用，包括反射、衍射、散射或这些机制的组合。研究 MPC 的交互机制对于理解信道的空间一致性是必要的。特别是，仅经历镜面反射的 MPC，这里称为“反射 MPC”，已经引起了相当大的兴趣。由于这些 MPC 与环境的几何形状和收发器之间存在确定性的关系，它们为各种应用提供了更大的潜力，如波束成形跟踪、用户定位和环境感知。

为了识别反射的 MPCs，首先，给定一个来自面板 k -UE 链路且具有延时 $\tau_{l,k}$ 和入射角 $\boldsymbol{\Omega}_{k,l} = [\phi_{k,l}, \theta_{k,l}]$ 的 MPC l ，定义它的 VS $\mathbf{s}_{l,k}^{\text{v}} = (x_s^{\text{v}}, y_s^{\text{v}}, z_s^{\text{v}})$ 为

$$\begin{cases} x_s^{\text{v}} = x_{p_k} + \tau_{l,k}c \cdot \cos \phi_{k,l} \sin \theta_{k,l}, \\ y_s^{\text{v}} = y_{p_k} + \tau_{l,k}c \cdot \sin \phi_{k,l} \sin \theta_{k,l}, \\ z_s^{\text{v}} = z_{p_k} + \tau_{l,k}c \cdot \cos \theta_{k,l}. \end{cases} \quad (4)$$

对于来自不同面板-UE 信道的同一单次反射 MPCs，它们的 VS 在 UE 镜像位置上重合，如图 3 所示。在多次反射 MPCs 的情况下，它们的 VS 将是 UE 的迭代镜像。对于涉及其他相互作用机制的不同链路中的 MPCs，它们的 VS 占据不同的位置。受这些特征启发，使用基于卡尔曼滤波器的框架来跟踪不同链路上重合的 VS，并随后识别与其相关的 MPCs 为反射 MPCs。

具体地说，假设在一个快照内 VS 是静态的， $\mathbf{s}_{l,k}^{\text{v}}$ 的状态模型由 $\mathbf{s}_{l,k}^{\text{v}} = \mathbf{s}_{l,k-1}^{\text{v}} + \mathbf{w}_k$ 给出，其中 $\mathbf{w}_k$ 表示协方差矩阵为 $\mathbf{Q}$ 的状态处理噪声。测量/观测模型表示为 $\mathbf{z}_{l,k}^{\text{v}} = \mathbf{s}_{l,k-1}^{\text{v}} + \mathbf{v}_k$ ，其中 $\mathbf{z}_{l,k}^{\text{v}}$ 和 $\mathbf{v}_k$ 分别是所测 VS 的位置和具有协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 的测量噪声。给定来自面板 $(k-1)$ -UE 链路的 $\mathbf{s}_{l,k-1}^{\text{v}}$ ，预测的 VS $\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}}$ 和误差协方差矩阵 $\mathbf{M}_{k|k-1}$ 在面板 k -UE 链路上分别由 $\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}} = \mathbf{s}_{l,k-1}^{\text{v}}$ 和 $\mathbf{M}_{k|k-1} = \mathbf{M}_{k-1} + \mathbf{Q}$ 获得。然后，执行预测的 $\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}}$ 与测量的 $\mathbf{z}_{l,k}^{\text{v}}$ 之间的数据关联。这里利用了互最小距离方法 [17]。具体来说，任意 $\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}}$ 和 $\mathbf{z}_{j,k}^{\text{v}}$ 之间的距离被计算为 $d(i,j) = \|\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}} - \mathbf{z}_{j,k}^{\text{v}}\|_{\text{F}}$ 。只有当预测的 VS 和测量的 VS 是相互最接近时，它们才会被追踪为同一个 VS。确定了 $\mathbf{z}_{l,k}$ 对于 $\mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}}$ 后，执行卡尔曼更新过程如下：

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{M}_{k|k-1} (\mathbf{M}_{k|k-1} + \mathbf{R})^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k) \mathbf{M}_{k|k-1}, \quad (6)$$

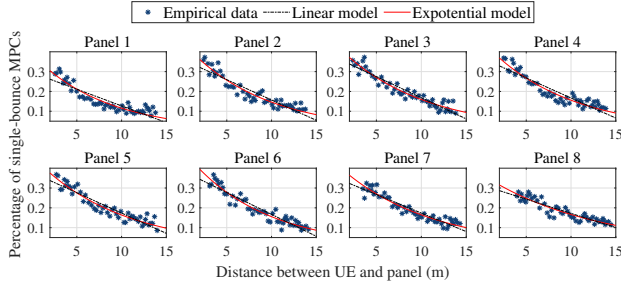
$$\mathbf{s}_{l,k}^{\text{v}} = \mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_{l,k} - \mathbf{s}_{l,k|k-1}^{\text{v}}), \quad (7)$$

其中， $\mathbf{K}_k, \mathbf{M}_k, \mathbf{s}_{l,k}^{\text{v}}$ 分别代表卡尔曼增益、更新后的误差协方差矩阵和来自面板 k -UE 链路的更新 VS。最后，通过上述框架追踪的 VS 来确定反射的 MPCs。同时，迭代估计 VS 的位置。

IV. 结果与分析

在本节中，根据 MPCs 之间的交互顺序和交互机制，研究了测量通道中 MPCs 的特性。

不同面板-UE 链路中单跳 MPC 的百分比 η_{SB} 如图 4 所示。所有链路的结果表现出一致的趋势：随着 UE 和面板之间的通信距离 d_c 增加，该百分比减少。这是合理的，因为较长的通信距离使得 MPC 通过单次交互到达接收器的可能性更低，即经历多次交互的可能性更高。此外，在 UE 移动过程中，所有链路测量得到的 η_{SB} 均低于 0.4。这表明信道中的大量 MPC 是多跳的，展示了所测场景复杂的散射环境。测量的 η_{SB} 与 d_c 之间的关系进一步用线性和指数模型拟合。所得的拟合参数和 R^2 总结在表 I 中。从同一链接的结果来看，指数模型给出了较大的 R^2 ，这表明指数模型更适合描述测量通道中 η_{SB} 与 d_c 之间的关系。需要注意的是，可能需要更多的测量，特别是在较远的距离下，以进一步验证这一趋势。

图 4. 单跳 MPC 的百分比 η_{SB} 与通信距离 d_c 的关系。表 I
单次反弹 MPCs 的百分比统计模型

Panel	Linear model $\eta_{SB} = a \cdot d_c + b$			Exponential model $\eta_{SB} = a \cdot e^{b \cdot d_c}$		
	a	b	R^2	a	b	R^2
1	-0.017	0.296	0.786	0.388	-0.121	0.883
2	-0.017	0.362	0.854	0.452	-0.113	0.914
3	-0.021	0.381	0.9	0.459	-0.106	0.924
4	-0.020	0.369	0.851	0.458	-0.101	0.914
5	-0.021	0.379	0.876	0.456	-0.108	0.924
6	-0.022	0.389	0.895	0.463	-0.104	0.914
7	-0.019	0.360	0.884	0.497	-0.116	0.916
8	-0.014	0.315	0.840	0.445	-0.099	0.925

对于测量信道中的 MPC 交互机制，图 5 展示了第 15 帧和第 29 帧中反射的 MPC 示例，并叠加在捕获的激光雷达点云上。测量和估计的 MPC 的 VS 分别用“*”和正方形表示。为了更好地可视化，该图省略了与天花板和地板相互作用的反射 MPC。可以发现，房间的侧墙对信道有主导性的反射贡献。此外，观察到多次反射，例如左图中的 VS 3，假设这是 UE 的镜像作为二级反射。在不同的快照中观察到了不同的反射 MPC，这表明由于 UE 的移动，信道是动态变化的。此外，估计的 VS 与 UE 位置之间保持一致的几何关系验证了提出的 MPC 交互机制识别框架的表现。

此外，快照 15 中反射 MPC 的方位入射角显示在图 6 中。为了清晰起见，MPC 1、MPC 2 和 MPC 3 分别指的是与图 5 中 VS 1、VS 2 和 VS 3 相关的 MPC。“测量”MPC 的入射角是基于 SAGE 算法直接从测量结果中提取出来的，而“估计”MPC 的入射角则代表了从估计的 VS 映射出的结果。正如预期的那样，不同面板观察到相同 VS 的不同角度，表明了 MPC 传播的球面波前。此外，在测量信道中还观察到了 MPC 的生命过程，即某些 MPC 仅在部分面板中可见，并且由于复杂的散射环境，它们在整个分布式面板上的寿命各不相同。估计结果与测量数据的良好拟合进一步验证了所提出框架的表现。

最后，随着 UE 的移动，反射 MPC 的空间分布如

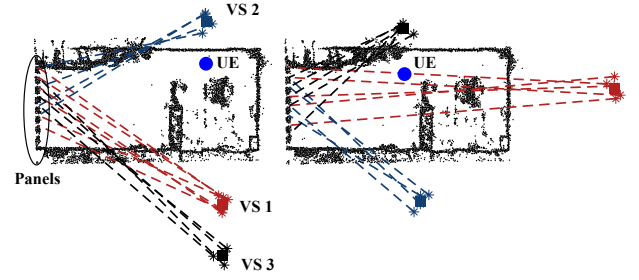


图 5. 示例在快照 15 (左) 和快照 29 (右) 时反射的 MPCs，可视化于捕获的激光雷达点云上。

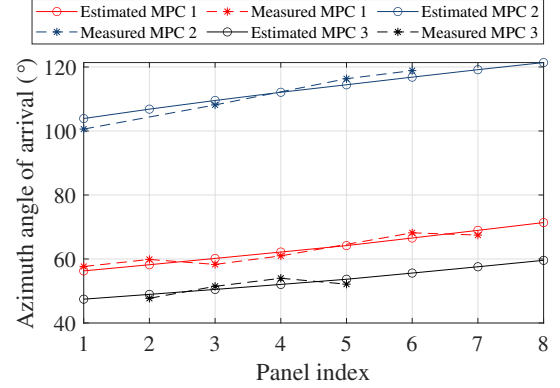


图 6. 示例在第 15 个快照时反射 MPCs 的测量和估计攻角。

图 7 所示。在 UE 移动的早期阶段，观察到最高的反射 MPC 百分比来自侧墙。当 UE 朝向面板移动时，来自天花板的反射 MPC 的百分比增加。在 UE 移动结束时，超过一半的反射 MPC 源自天花板。这可以解释为较短的传播距离增加了 MPC 与悬挂在天花板上的金属灯相互作用的可能性。反射 MPC 的动态分布表明，随着 UE 的移动，MPC 增益以及因此产生的信道都在发生变化。

V. 结论

在这封信中，进行了一项室内分布式大规模 MIMO 信道测量活动。对信道的多径分量 (MPC) 特性进行了研究，重点在于交互顺序和 MPC 的交互机制。结果表明，在测量到的信道中，单次反射的 MPC 百分比与通信距离呈负相关关系，这可以用指数分布很好地建模。此外，在分布式面板上观察到了球面波前以及多径分量的生灭过程。最后，观察到反射的分布随时间变化。这些发现为室内分布式大规模 MIMO 信道中多径分量传播行为提供了有价值的见解，对于信道建模是必要的。

参考文献

- [1] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Cell-free massive MIMO versus small cells,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834–1850, Mar. 2017.

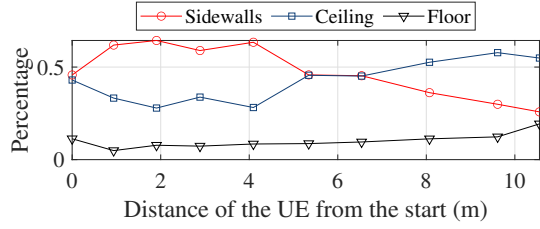


图 7. 反射 MPC 的分布与 UE 移动距离。

- [2] H. A. Ammar, R. Adve, S. Shahbazpanahi, G. Boudreau, and K. V. Srinivas, "User-centric cell-free massive MIMO networks: A survey of opportunities, challenges and solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 611–652, 1st Quart., 2022.
- [3] D. Lschenbrand, M. Hofer, L. Bernad, S. Zelenbaba, and T. Zemen, "Towards cell-free massive mimo: A measurement-based analysis," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 89232–89247, 2022.
- [4] Y. Zhang et al., "Cell-free massive MIMO channels in an urban environment—measurements and channel statistics," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, submitted for publication, <https://arxiv.org/pdf/2406.01850>.
- [5] T. Choi, P. Luo, A. Ramesh, and A. F. Molisch, "Co-located vs distributed vs semi-distributed MIMO: Measurement-based evaluation," in *Proc. 54th Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput.*, Nov. 2020, pp. 836–841.
- [6] C. Nelson, S. Willhammar, and F. Tufvesson, "A measurement-based spatially consistent channel model for distributed MIMO in industrial environments," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, submitted for publication. <https://arxiv.org/abs/2412.12646>.
- [7] Y. Xu, M. Sandra, X. Cai, S. Willhammar, F. Tufvesson, "Spatial separation of closely-spaced users in measured distributed massive MIMO channels," in *Proc. IEEE SPAWC'24*, Lucca, Italy, 2024, pp. 1–6.
- [8] Y. Xu, M. Sandra, X. Cai, S. Willhammar, F. Tufvesson, "Characterization of non-wide-sense stationarity for distributed massive MIMO channels," in *Proc. IEEE EuCAP'25*, accepted for publication.
- [9] W. Fan et al., "Near-Field channel characterization for mid-band ELAA system: sounding, parameter estimation, and modeling," *IEEE Commun. Mag.*, submitted for publication. <https://arxiv.org/abs/2405.06159>.
- [10] Z. Yuan, J. Zhang, V. Degli-Esposti, Y. Zhang, and W. Fan, "Efficient ray-tracing simulation for near-field spatial non-stationary mmWave massive MIMO channel and its experimental validation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, pp. 8910–8923, Aug. 2024.
- [11] P. Tang et al., "XL-MIMO channel measurement, characterization, and modeling for 6G: a survey," *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 25, pp. 1627–1650, Nov. 2024.
- [12] F. Fuschini, M. Zoli, E. M. Vitucci, M. Barbiroli, and V. Degli-Esposti, "A study on millimeter-wave multiuser directional beamforming based on measurements and ray tracing simulations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2633–2644, Apr. 2019.
- [13] X. Li, E. Leitinger, M. Oskarsson, K. Åström, and F. Tufvesson, "Massive MIMO-based localization and mapping exploiting phase information of multipath components," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 9, pp. 4254–4267, Sep. 2019.
- [14] M. Sandra, C. Nelson, X. Li, X. Cai, F. Tufvesson, and A. J. Johansson, "A wideband distributed massive MIMO channel sounder for communication and sensing," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, accepted for publication, doi: 10.1109/TAP.2025.3537292.
- [15] X. Yin, B. H. Fleury, P. Jourdan, and A. Stucki, "Polarization estimation of individual propagation paths using the SAGE algorithm," in *Proc. PIMRC'03*, Beijing, China, Sept. 2003, pp. 1795–1799.
- [16] Y. Xu, M. Sandra, X. Cai, S. Willhammar, and F. Tufvesson, "Interacting Object-Enabled Clustering and Characterization of Distributed MIMO Channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, submitted for publication.
- [17] X. Cai et al., "Dynamic channel modeling for indoor millimeter-wave propagation channels based on measurements," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 9, pp. 5878–5891, Sep. 2020.