非正交多址超大规模多输入多输出中的拥挤场景下的机器类通信随机接入

Thiago Augusto Bruza Alves电气工程系- *UEL*隆德里纳，巴西。thiagobruza@outlook.com

Taufik Abr˜ao电气工程系 -*UEL*隆德里纳，巴西。taufik@uel.br

arXiv:2303.00539v1 [eess.SP] 1 Mar 2023

摘要—**大规模多输入多输出是支持设备海量接入尝试增长的关键技术之一，例如海量机器类通信（mMTC）。天线阵列技术的发展带来了近期的超大规模多输入多输出（XL-MIMO）系统，这是一种有望在高用户密度场景下提供极高数据速率的技术。由于超大规模阵列的尺寸与用户设备（UE）间的距离处于同一量级，其整个巨大延展范围内都会出现空间非平稳性和可见区域（VR）。我们研究了拥挤场景下超大规模多输入多输出中的随机接入（RA）问题。所提出的非正交多址可见区域超大规模阵列（NVR-XL）协议利用功率域非正交多址接入，使两个或更多在同一超大规模子阵列（SA）中发生碰撞、并选择相同导频序列的用户能够接入。随着SA数量增加，NVR-XL可减少网络接入尝试次数，同时提升平均和速率。**

索引词—**非正交多址；机器类通信；XL-MIMO；拥挤场景。**

I. 引言

活跃设备的数量不断增长，不同类型服务（例如车辆、传感器、移动终端等）的接入请求数量也随之增加。在 5G 及后续应用中，例如大规模机器类通信（mMTC）和拥挤移动宽带（cMBB）场景，基站（BS）需要同时服务能力和部署方式各不相同的设备。

功率域非正交多址接入最初旨在通过发射端的叠加编码和接收端的串行干扰消除（SIC），让无线网络共享相同的正交资源（时间和频率），从而提高频谱效率 [1]。

大量设备试图同时接入网络，这对媒体接入控制构成了挑战。传统随机接入（RA）方案无法处理如此大量的请求 [2]。纯随机接入方案（如 ALOHA）存在严重的性能局限。通过允许两个或更多用户在同一频率的同一时隙中接入，采用非正交多址能够显著提升系统性能[3]。

在海量随机接入场景中，用户连接尝试的数量远远超过可用导频序列的数量。

本研究部分由巴西 CAPES（资助代码 001）和国家科学技术发展委员会（CNPq）资助，资助编号为 310681/2019-7。

因此，为实现相干通信，采用冲突解决协议至关重要。拥挤的大规模多输入多输出（MIMO）系统中，一种广为人知的分布式授权型随机接入协议是最强用户冲突解决（SUCRe）；该协议利用 MIMO 的特性 [4]，优先选择信道条件良好的用户。

结合非正交多址与 SUCRe 是一项重要进展。与经典的 SUCRe 方案相比，所提出的 NOMA-RA 协议允许使用相同导频信号尝试接入信道的用户通过在功率域中区分彼此来解决冲突，并在降低平均时延的同时获得更高的和速率性能。

本文提出了 SUCRe 在超大规模场景中的一种改进方案。在超大规模多输入多输出的背景下，本文探讨了可见区域的概念，因为地理区域与从该区域可见的阵列部分之间存在关联。当某个用户设备位于该区域时，相应的可见区域即可被访问；另一方面，当用户设备离开可见区域时，会遇到一组新的簇。可以利用子阵列 b 对用户设备 k 可见的概率来改进随机接入。

本文的贡献有两方面：**a**）探索所提出的 NVR-XL 随机接入协议中的重叠可见区域，通过结合超大规模多输入多输出方案和非正交多址的优势，使两个用户能够在同一子阵列上选择相同的导频序列。叠加信号按子阵列进行处理，并通过串行干扰消除解码每个用户的信息。**b**）通过采用三种不同的指标，将所提出的 NVR-XL 方案与文献中的 SUCRe-XL 协议进行比较，开展全面的数值仿真分析。

II. 系统模型

我们考虑一种超大规模多输入多输出系统，其中基站部署了一个超大规模天线阵列，并采用时分双工（TDD）模式。一般性不失，假设一个均匀矩形阵列（URA）放置在 y-z 平面上，包含 M 个天线单元，即 $M_y \times M_z$，其中M_y 和 M_z 分别表示沿 y轴和 z轴排列的天线单元数量，阵列的第一行从原点 O 开始并沿纵轴部署，如图 1 所示。与 [6], [7],类似，我们在超大规模多输入多输出系统中考虑一种简化的二部图模型，该阵列被划分为 B 个子阵列（SA），每个子阵列由固定数量的

个 $M_b = M/B$ 天线组成，以确保天线单元数达到最小值（$M_b \geq 50$），从而实现大规模多输入多输出的固有特性。

所有单天线用户设备均随机分布，并划分为集合 $\mathcal{U}$；$\mathcal{A} \subset \mathcal{U}$ 表示活跃用户设备的子集，这些设备暂时拥有专用数据导频；$\mathcal{K} = \mathcal{U} \setminus \mathcal{A}$ 表示非活跃用户设备（初始接入用户设备）的集合。集合 $\mathcal{K}$ 中的设备没有专用导频；若要变为活跃设备，必须为其分配一个导频。因此，小区中的初始接入用户设备数量为$|\mathcal{K}| = K$。基站仅向活跃设备分配导频，并在需要时回收这些导频。初始接入用户设备以概率 P_a进行随机接入尝试。

令 $\mathcal{M}$ 表示所有基站天线单元的集合，$\mathcal{V}_k \subset \mathcal{M}$ 表示对第 k 个用户设备可见的子阵列子集。为构建数学模型，我们假设子集 $\mathcal{V}_k$ 是随机生成的，其中每个子阵列对用户设备 k 可见的概率为 P_b，如 [6], [7]所示。该概率模拟环境中的随机障碍物和散射体与用户设备收发的信号相互作用所产生的影响，从而形成可见区域。测量结果也证明了可见区域的存在，见 [8]。

我们考虑一种基于时频相干块的多用户通信系统，非活动用户设备通过随机接入块进行随机接入尝试。我们将 τ_{RA} 定义为可能的随机接入正交导频序列数量$\mathbf{s}_1, \ldots, \mathbf{s}_{\tau_{\text{RA}}} \in \mathbb{C}^{\tau_{\text{RA}} \times 1}$，每个序列的长度为 τ_{RA}，且 $\|\mathbf{s}_{\tau_{\text{RA}}}\| = \sqrt{\tau_{\text{RA}}}$。

由于每个子阵列的可见性服从成功概率为 P_b的伯努利分布，因此需要注意：当天线对某用户可见时，意味着该用户可以通过该天线发送或接收信号，且信道增益 [7] 非零。我们假设在过载场景下，K 个初始接入用户设备（$K \gg M$）随机分布在一个方形小区内，其最大距离和最小距离分别为 d_{max} 和d_{min}，如图 2 所示。

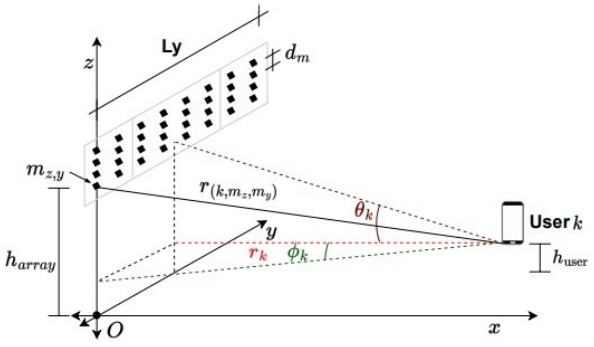

图 1. 均匀矩形阵列超大规模多输入多输出系统中第 k个用户的示意图，入射球面波的仰角为 θ ϕ $M = M_y \times M_z$，方位角为 。天线在水平方向和垂直方向上均匀排列，间距为 d_m。

A. 信道模型

接下来，我们根据每个 URA 天线阵列单元 $m_{z,y}$ 的位置对 NLOS 信道进行建模，如图 1 所示。$m_{z,y}$号阵列单元的具体位置由三维向量 $\mathbf{w}_{m_{z,y}}$ 表示。URA 沿y轴和 z轴的物理尺寸分别为 Ly $=(M_y)d_m$ 和 Lz $=(M_z)d_m$，其中d_m 为阵列单元之间的距离。用户k 的位置由三维向量 $\mathbf{q}_k$ 表示，第 k个 UE 到指定天线阵列单元 $m_{z\,y}$ 的距离由 $r_{k\,m_y\,m_z} = \|\mathbf{w}_{m_{z\,y}} - \mathbf{q}_k\|$ [9] 确定。大尺度衰落包括路径损耗和阴影衰落，其依据是以下城市微蜂窝场景模型：

$$\beta_{k,m_z,m_y} = 10^{-\kappa \log(r_{k,m_z,m_y}) + \frac{g+\varphi}{10}}, \tag{1}$$

其中 $g = -34$。53 dB 是参考距离处的路径损耗，路径损耗指数为 κ = 3。8，$\varphi \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{sf}}^2)$为阴影衰落，即标准差为 σ_{sf} = 10 dB 的对数正态随机变量。

同样地，如 [6], [7],，我们采用第 k 个用户在第 b 个 SA 处的平均大尺度衰落，$\beta_k^{(b)} = \frac{1}{M_b}\sum_{m=1}^{M_b} \beta_{k,\,m}$。令 $\mathbf{h}_k^{(b)} \in \mathbb{C}^{M_b \times 1}$ 表示 UE $k \in \mathcal{K}$ 与 SA b之间的瑞利衰落信道向量，满足 $\mathbf{h}_k^{(b)} \sim \mathcal{CN}\left(0, \beta_k^{(b)} \mathbf{I}_{M_b}\right)$。

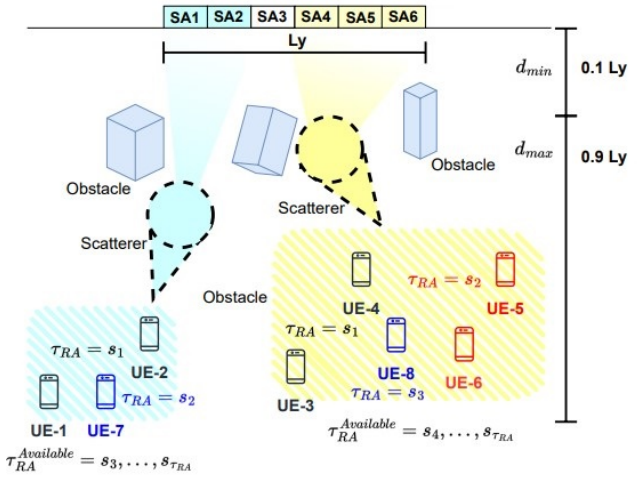

图 2. 划分为 6 个 SA 的均匀矩形阵列拥挤机器类通信系统；每个 SA 中的彩色区域定义了可见用户设备，P_b 为可见成功概率。

III. 非正交多址超大规模多输入多输出的随机接入

A. SUCRe协议

SUCRe协议 [4] 是一种在用户侧解决导频碰撞的分布式方法。该协议包括以下步骤：**a)** KP_a 用户随机选择一个上行链路（UL）随机接入导频并发送；**b)** 基站接收此类用户设备信号，并回复经预编码的下行链路（DL）导频；**c)** 利用接收到的信号，用户设备可以估计与其所选同一随机接入导频竞争的用户设备的信号强度总和，将该估计值与自身的信号增益进行比较；如果判断自己是竞争者中信号最强的用户设备，则重新发送所选的随机接入导频；**d)** 最后，基站为在前一步骤中未发生碰撞的用户设备分配专用数据导频。在海量机器类通信场景中，K 相较于天线数量 M（$K \gg M$）较大，与 $P_a \ll 1$形成对比。

B. 探索 SUCRe 协议中的可见区域与非正交多址

所提出的 NVR-XL 协议结合了沿着各子阵列为单个用户设备设置不重叠可见区域，以及当两个用户可以沿着各子阵列选择同一导频时采用重叠可见区域的改进。步骤 1 和步骤 2 与 SUCRe-XL 协议 [6] 中提出的步骤类似。

步骤 I: KP_a 用户设备发起随机接入尝试。
步骤 II: 服务区从步骤 I 向用户设备发送预编码下行导频。**步骤 III**: 通过利用功率域非正交多址，使用冲突导频的用户可以在同一资源（空间（服务区）、频率、时间、导频）上获得服务。由于串行干扰消除过程存在不完善之处，在本文中，我们接受最多两个用户发生碰撞，即最多执行一个串行干扰消除步骤。然而，当至少一个服务区中有三个或更多用户发生碰撞时，该协议无法解决碰撞问题，并指示未成功的用户设备以概率P_{na}在下一次随机接入中重试，最多进行 10 次尝试。

冲突消解遵循分布式决策规则；如果 $\rho_k \sum_{m\in\mathcal{V}_k} \beta_k^{(m)} \tau_{\text{RA}} > \hat{}\alpha_{t,\ k}/2 + \epsilon_k$ 为真，则用户决定重复其导频传输；否则，用户决定保持非活动状态，退出此次随机接入尝试，并以概率 P_{na}在下一随机接入阶段尝试进行通信。

在此决策规则中，偏置项 ϵ_k 为:

$$\epsilon_k = \frac{\delta}{\sqrt{M_b} \cdot \sum_{b\in\mathcal{V}_k} \beta_k^{(b)}}, \tag{2}$$

其中， δ 是一个可调节的缩放因子，用于改进某些系统指标。我们通过穷举搜索方法对缩放因子 δ进行数值调整, 即 [5], , 使其最大化和速率；因此，每种 K-用户设备和 B-子阵列配置都会得到一个最优的 $\delta^{K,\ B^*}$ NVR-XL。

我们的NVR-XL协议提出的主要特征是修改 [6], 的竞争过程：当集合 $\mathcal{S}_t$ 中发生导频碰撞且可见区域发生重叠时，在每个子阵列中处理信号，以解码叠加信号。因此，采用串行干扰消除策略，以消除并解码共享同一导频序列的用户信号。

不失一般性地，假设在双用户设备情况下$\|\mathbf{h}_1\| > \|\mathbf{h}_2\|$, 基站以子阵列为单位，按照信道增益的降序执行串行干扰消除，即，首先在不应用串行干扰消除的情况下解码最强的用户设备1信号，随后从最弱的用户设备2信号中重构并消除用户设备1信号。因此，在考虑两个重叠用户 $\gamma_1^{(b)}$ 和 $\gamma_2^{(b)}$ 选择同一导频序列 τ_{RA} 的情况下，每个子阵列上的信干噪比（SINR）可定义为:

$$\gamma_1^{(b)} = \frac{\rho_1 \beta_1^{(b)}}{\rho_2 \beta_2^{(b)} \sigma^2}, \qquad \gamma_2^{(b)} = \frac{\rho_2 \beta_2^{(b)}}{\varpi_1 (\rho_1 \beta_1^{(b)}) + \sigma^2}. \tag{3}$$

其中， ϖ_1 是考虑信号重构不完美时，经过第一步串行干扰消除后的残余干扰因子。
步骤 ***IV***: 基站利用步骤 3 中发送的导频信号估计用户的信道，并尝试解码相应的消息 [5]。如果解码成功，基站便识别出集合 $\mathcal{S}_t$ 中的用户，并通过分配专用数据导频序列将其接入有效载荷相干块。如果解码失败，协议便未能解决碰撞，并指示解码失败的用户设备在一个随机间隔后重试，最多尝试 10 次；随后停止发送导频序列，并将该数据包视为丢失。

C. 系统和速率

定义和速率指标以比较各系统。在 SUCRe-XL 中，非重叠可见区域内每个导频序列仅接受一个用户；另一方面，在 NVR-XL 中，竞争者中还会有两个用户认为自己是获胜者。NVR-XL 基于子阵列的和速率可按式 3 定义为:

$$R_{\sum}^{\text{NVR-XL}} = \sum_{b=1}^{B} \sum_{t=1}^{\tau_{\text{RA}}} \sum_{k=1}^{|\mathcal{S}_t|} \log_2\left(1 + \gamma_{t,k}^{(b)}\right), \quad [\text{bpcu}] \tag{4}$$

SUCRe-XL 的和速率可定义为:

$$R_{\sum}^{\text{SUCRe-XL}} = \sum_{b\in\mathcal{V}_k} \sum_{t=1}^{\tau_{\text{RA}}} \log_2\left(1 + \frac{\rho_k \beta_k^{(b)}}{\sigma^2}\right), \quad [\text{bpcu}] \tag{5}$$

假设每个导频序列仅接受一个用户。IV. 数值结果

假设在一个 200 x 100 m^2 的小区中，有一个边长为 100 米、包含 $M = 500$ 根天线的均匀矩形阵列（URA），且 K 个非活跃用户（iUES）随机分布，如图 1 所示；可用导频数量为 $\tau_{\text{RA}} = 10$，归一化发射功率为 $\rho_k = 1$ W。主要仿真参数列于表 I。该场景使用 Matlab 2019 进行仿真，所用设备包括一块 Intel HD Grafics 6000 GPU、Intel(R) Dual-Core(TM) I5 CPU @ 1.6 GHz 和 8 GB 内存。

表 I 仿真参数。

参数	值
用户到阵列的距离	$r_{k,m_z,m_y} \in [10; 180$米$]$
用户长度	$h_{user} \in [1; 1.7$米$]$
天线单元 y 轴、z 轴	$M_y = 100, M_z = 5$
基站天线数量（均匀矩形阵列）	$M = M_y \times M_z = 500$
天线单元间距	$d_m = 1$m
阵列高度	$h_{array} = 12$米
阵列长度	Ly $= M_y \times dm$
用户发射功率	$\rho_k = 1$W
噪声功率	$\sigma^2 = 1$W
初始接入用户设备数量	$K \in [0; 5000]$
接入概率（1st 次尝试）	$P_a = 0.01$
接入概率（新尝试）	$P_{na} = 0.5$
可用导频序列数量	$\tau_{\text{RA}} = 10$
串行干扰消除不完美因子	$\varpi = 0.1$
蒙特卡洛实现次数	5000

A. 平均接入尝试次数

图3显示，所提出的拥挤场景下的 NVR-XL 协议（$1000 < K < 5000$）实现了更优的随机接入性能。冲突消解方面的改进在于，得益于功率分集，NVR-XL 能够接受在重叠可见区域上发生碰撞的两个用户；因此，每个子阵列中的叠加信号都可以通过串行干扰消除进行处理。随着子阵列数量的增加 B，但受信道硬化和有利传播特性的限制，在每个子阵列中通过在各子阵列间共享重叠可见区域而发生碰撞的概率会增加。由于缺少干扰消除步骤，这种冲突消解配置无法通过 SUCRe-XL 处理。因此，即使同一子阵列中存在强干扰，NVR-XL 仍可减少接入尝试次数。

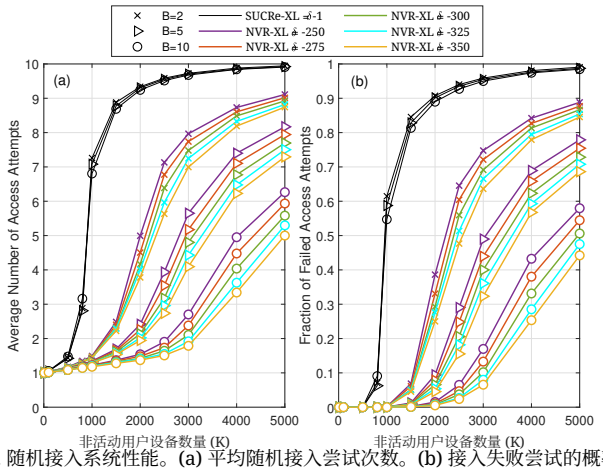

图3. 随机接入系统性能。(a) 平均随机接入尝试次数。(b) 接入失败尝试的概率。

图4给出的归一化用户设备接受数量，即被接受的用户数量与尝试接入的用户数量之比，与 NVR-XL 在接受用户设备进行传输方面取得的改进结果相一致，因为每个子阵列中的叠加信号都可以通过串行干扰消除进行处理。

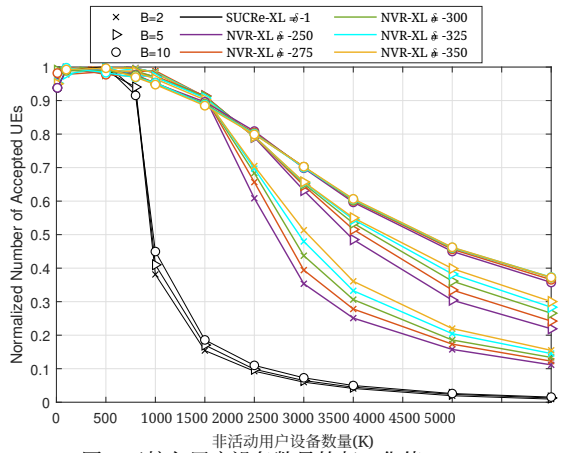

图4. 已接入用户设备数量的归一化值。

B. 系统和速率

为数值确定缩放因子的最佳取值，$\delta^{K,\ B^*\ \text{NVR-XL}}$，我们选择了包含 $B = 10$ 个服务区的场景，并采用穷举搜索方法找到使和速率最大化的最佳 δ；最终得到区间 $\delta^{(K,10)^*}{}_{\text{NVR-XL}} = [-350 : -250]$。图 5 展示了两种协议的和速率性能；SUCRe-XL 要求每个服务区中的可见区域互不重叠，设备才能被接受；因此，即使增加服务区的数量，性能增益也较为有限。最高和速率出现在可用导频尚未饱和时。另一方面，NVR-XL 会处理每个服务区中叠加的信号，消除较强用户的信号，同时残余干扰约为 $\varpi_1 = 0.1$，并在 B 增加时取得更好的结果。此外，当每次随机接入尝试中每个服务区处理一对用户时，和速率便达到上限，因为串行干扰消除只能消除一个干扰信号；而在拥挤程度不断增加的场景中，每个服务区中的干扰仍会不断增加（三个或更多用户使用相同导频接入同一服务区）。

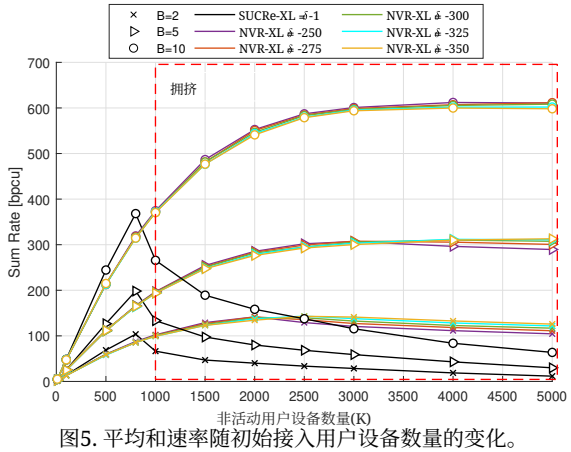

图5. 平均和速率随初始接入用户设备数量的变化。

V. 结论

本文提出利用功率域来提升 SUCRe-XL 基于授权的随机接入协议的性能；具体而言，超大规模多输入多输出通过不同服务区处理接收信号，提供了一个新的自由度；结合非正交多址引入的另一个自由度，并在基站侧的每个服务区应用串行干扰消除，可以解决两个用户使用同一导频序列时发生的碰撞。数值结果表明，与近期文献中的 SUCRe-XL 方法相比，所提出的随机接入协议显著提升了性能：在所分析的拥挤场景中，接入尝试次数有所减少，同时和速率大幅提高$(1000 < K < 5000)$。

参考文献

[1] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu 和 S. M. Sait，《面向未来无线网络赋能技术的速率最优功率域非正交多址接入综述》，*IEEE Communications Surveys Tutorials*，第 22 卷，第 4 期，第 2192–2235 页，2020 年。[2] F. Clazzer、A. Munari、G. Liva、F. Lazaro、C. Stefanovic 和 P. Popovski，《从 5G 到 6G：现代随机接入的时代是否已经到来？》，*arXiv:1903.03063*，2019 年。[3] M. V. da Silva、S. Montejo-S´anchez、R. D. Souza、H. Alves 和 T. Abr˜ao，《面向基于非正交多址的机器类通信网络的设备到设备辅助 Q学习随机接入》，*IEEE Access*，第 10 卷，第 30 694–30 706 页，2022 年。[4] E. Bj¨ornson、E. de Carvalho、J. H. Sørensen、E. G. Larsson 和 P. Popovski，《拥挤的大规模多输入多输出系统中用于导频分配的随机接入协议》，*IEEE Transactions on Wireless Communications*，第 16 卷，第 4 期，第 2220–2234 页，2017 年。[5] H. D. Pereira、G. Brante、J. Farhat、R. D. Souza、J. C. M. Filho 和 T. Abr˜ao，《大规模多输入多输出中的非正交多址竞争消解和速率研究》，*IEEE Access*，第 9 卷，第 24 965–24 974 页，2021 年。[6] O. S. Nishimura、J. C. Marinello 和 T. Abr˜ao，《超大规模大规模多输入多输出系统中的授权型随机接入协议》，*IEEE Communications Letters*，第 24 卷，第 11 期，第 2478–2482 页，2020 年。[7] J. C. M. Filho、G. Brante、R. D. Souza 和 T. Abr˜ao，《探索超大规模多输入多输出随机接入与调度中的非重叠可见区域》，*IEEE Transactions on Wireless Communications*，第 1–1 页，2022 年。[8] E. D. Carvalho、A. Ali、A. Amiri、M. Angjelichinoski 和 R. W. Heath，《超大规模大规模多输入多输出中的非平稳性》，*IEEE Wireless Communications*，第 27 卷，第 4 期，第 74–80 页，2020 年。[9] H. Lu 和 Y. Zeng，《多用户超大规模多输入多输出通信的近场建模与性能分析》，*IEEE Communications Letters*，第 26 卷，第 2 期，第 277–281 页，2022 年。