arXiv:2304.03856v1 [cs.IT] 7 Apr 2023

利用非正交多址接入改进 mMTC 超大规模多输入多输出系统中的随机接入

Thiago Augusto BruzaAlves隆德里纳州立大学（*UEL*）电气工程系。86057-970，隆德里纳，巴拉那州，巴西。thiagobruza@hotmail.com

陶菲克·阿布~劳电气工程系 隆德里纳州立大学（*UEL*）。86057-970，隆德里纳，巴拉那州，巴西。taufik@uel.br

摘要

超大规模多输入多输出（XL-MIMO）架构已被认为是一种支持大规模机器类型通信（mMTC）的技术，能够在高用户密度场景下提供极高的数据速率。然而，阵列的大尺寸增加了瑞利距离（d_{Rayl}），此外，障碍物和散射体还会导致空间非平稳性，以及贯穿整个超大规模阵列的不同可见区域（VRs）。我们研究了拥挤的 XL-MIMO场景中的随机接入（RA）问题；所提出的基于授权的随机接入（GB-RA）协议结合了非正交多址接入（NOMA）和超大规模阵列中的最强用户碰撞消解（SUCRe-XL）的优势，被命名为NOMA-XL，能够允许在同一超大规模子阵列（SA）中选择相同导频序列的两个或三个发生碰撞的用户接入。以SA 为基础的接收信号处理改变了 d_{Rayl}，从而实现远场平面波前传播条件，同时改善系统性能。所提出的NOMA-XL GB-RA 协议能够减少接入 mMTC网络所需的尝试次数，同时随着 SA 数量的增加，提高平均和速率。

索引词

非正交多址接入；机器类通信；超大规模多输入多输出；随机接入协议；拥挤场景；均匀矩形阵列。

本研究部分得到了 CAPES（经费代码 001）和巴西国家科学技术发展委员会（CNPq）的资助，资助项目编号为 310681/2019-7。

I. 引言

在 B5G 中，随着活跃设备数量持续增加，以及车辆、传感器、移动终端等设备对多种服务的接入请求不断增长，基站（基站）需要同时支持具备各种能力、采用不同部署方式的设备，以及 5G 和 B5G 中的应用，例如海量机器类通信（mMTC）和拥挤移动宽带（cMBB） [1]。因此，为支持海量连接，作为下一代多址技术中一种很有前景的候选方案，非正交多址接入（NOMA）能够在同一个资源元素（RE）中服务多个设备。与标准正交多址接入（OMA）相比，NOMA 能够提高系统吞吐量、改善用户公平性、降低时延并支持大规模连接 [2], ，其实现方式是在发射端通过编码叠加共享相同的正交资源（时域和频域），并在接收端进行连续干扰消除（SIC） [3]。

大量设备试图同时连接网络是一个媒体访问控制问题；标准随机接入（RA）系统无法处理如此大量的请求 [4],，而像 ALOHA 这样的纯随机接入方法存在严重的性能限制。采用 NOMA 和 SIC 可显著提升性能，使每个时隙能够容纳两个或更多用户 [5], [6]。

在（过度）拥挤的场景中，用户连接尝试的数量远远超过可用导频序列的数量。因此，建立冲突解决技术对于实现高效通信至关重要。最强用户冲突解决（SUCRe）协议是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基于授权的随机接入（RA）协议，它利用 MIMO 的特性 [7],优先考虑信道条件良好的用户，同时损害边缘用户。因此，SUCRe协议经历了多次演进；例如，文献 [8] 提出了一种基于图的导频接入（SUCR-GBPA）协议，使所有在竞争消解中落败的用户都能随机选择新的导频。此外，文献 [9] 通过引入非正交多址接入（NOMA）改进SUCRe，并将NOMA-RA协议与经典的SUCRe方案进行了比较；该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消解冲突，从而以更低的平均时延实现更优的和速率性能。

大规模MIMO技术（超大规模多输入多输出）将天线单元分布在广阔的

空间，例如建筑立面、购物中心或体育场；因此，图1中整个均匀矩形阵列（URA）由五个子阵列（SA）组成，在这种情况下，设备、散射体和障碍物通常位于该阵列的瑞利距离之内，从而产生不同的信道条件，例如近场传播和空间非平稳性。因此，给定用户设备（UE）的接收信号能量会在整个阵列范围内显著变化；此外，根据可见区域（VR）的概念 [10]，阵列的不同区域会看到不同的散射体、障碍物和用户设备集合。

在本文中，我们采用超大规模多输入多输出场景下的远场模型，其中用户设备-阵列距离通常高于瑞利距离， $d_{\mathrm{UE}_k} > d_{\mathrm{Rayl}}$，因为接收信号处理是在子阵列基基础上完成的，从而减小了阵列孔径 D。瑞利距离与阵列孔径呈二次比例关系 D ，如下所示：

$$d_{\mathrm{Rayl}} = 2\frac{D^2}{\lambda_{\mathrm{C}}}, \tag{1}$$

其中， λ_{C} 为载波波长。因此，将整个阵列划分为子阵列会显著改变近场与远场的界限，使阵列孔径变为 $D_{\mathrm{SA}} = \frac{D}{B}$ ，其中 B 为子阵列的数量。因此，在考虑整个阵列时处于近场区域的用户，从单个子阵列的角度来看，可视为处于远场平面波传播区域。

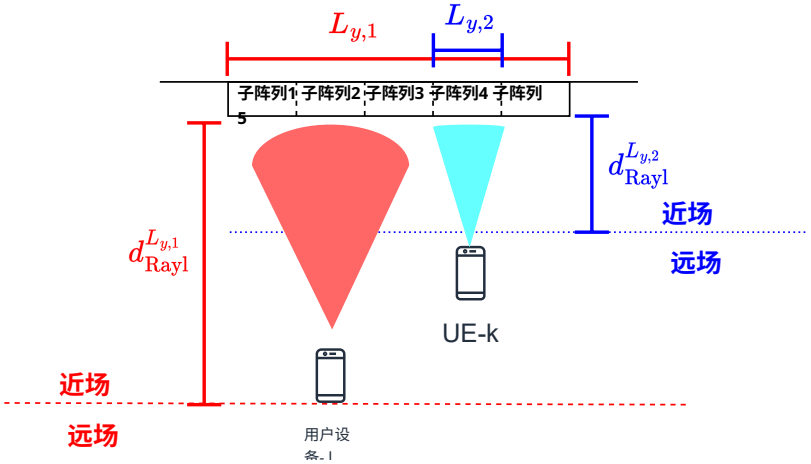

图1. 带有第 k个用户的均匀矩形阵列超大规模多输入多输出，展示阵列孔径从 D 变为 D' （子阵列 SA_i）时，瑞利距离 d_{Rayl}也随之改变。在我们的随机接入超大规模多输入多输出系统中，海量机器类通信设备随机分布在远场区域，即 $d_{\mathrm{UE}_k} > d_{\mathrm{Rayl}}$。

可以通过应用 VR 的概念来利用非平稳性，其中将小区的地理区域与阵列或子阵列的可见部分相关联，如所示。

在 [11] 中，SUCRe 已适配于超大规模多输入多输出场景。因此，某个用户设备位于一个区域内，并因相关散射体而拥有相应的可见区域。为简便起见，我们认为整个子阵列都可能被设备看到，即它属于该设备的可见区域。因此，可以利用第 b 个子阵列对第 k 个用户设备可见的概率，来提升超大规模多输入多输出中的随机接入协议性能。

在 [12], 中，通过联合估计超大规模多输入多输出系统中受远场传播场景非平稳性影响的用户设备活动状态及其信道，解决随机接入问题；所提出算法的有效性通过归一化均方误差 （NMSE）和活动错误率 （AER）性能指标加以验证。与 [13] 和 [14], 不同，本研究通过优化缩放因子 δ^*_{NOMA}，允许在非正交多址接入方案下，超过两个用户（最多三个用户）使用相同的导频序列发生碰撞，并针对不同的用户负载和子阵列数量最大化和速率。请注意，本文在子阵列层级处理接收信号；因此，将阵列划分为子阵列后，可以调节瑞利距离 d_{Rayl}，使用户仍处于远场条件。

贡献有两方面：**a)** 提出一种基于功率域非正交多址接入的基于授权的随机接入协议，并利用超大规模多输入多输出系统的重叠可见区域（NOMA- XL），结合超大规模多输入多输出系统与非正交多址接入的优势，允许最多三个用户在至少一个子阵列中选择相同的导频序列。**b)** 将阵列划分为子阵列，从而改变瑞利距离，使用户设备能够停留在远场区域；在此条件下，通过数值分析考察在子阵列基底上处理的叠加接收信号、最优缩放因子 δ^*_{NOMA}，并执行SIC以识别每个用户的信号。

II. 系统模型

考虑一个时分双工（TDD）系统，其中基站部署了一个置于 y-z 平面上的超大规模均匀矩形阵列（URA），其天线单元总数为 M，即 $M_y \times M_z$；其中， M_y 和 M_z 分别表示沿 y 轴和 z 轴的天线单元数量，阵列的第一行从原点 O 开始并沿纵轴部署。与 [11], [15], 类似，我们考虑 XL-MIMO 中一种简化的二部图模型，将阵列划分为 B 个子阵列（SA），每个子阵列由固定数量的 $M_b = M/B$ 根天线组成，以确保天线单元数达到最小值（$M_b \geq 50$）。

配备单天线的用户设备随机分布在方形小区内，且与阵列的距离超过瑞利距离 (d_{Rayl}) 限值，并归入集合 $\mathcal{U}$。其中，$\mathcal{A} \subset \mathcal{U}$ 是活跃用户设备的子集，拥有临时专用数据导频；$\mathcal{K} = \mathcal{U} \backslash \mathcal{A}$ 是非活跃用户设备（iUE）的集合。基数 $|\mathcal{K}| = K$ 表示小区内 iUE 的数量，它们没有专用导频；若用户设备需要变为活跃状态，则必须为其分配一个导频。基站仅向活跃设备分配导频，并会在需要时回收导频。iUE 以概率 P_a 尝试随机接入。

令 $\mathcal{M}$ 表示所有基站子阵列的集合，$\mathcal{V}_k \subset \mathcal{M}$ 表示对第 k 个用户设备可见的子阵列子集。为了构建数学模型，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 [11], [15]所示。该概率用于模拟环境中的随机障碍物和散射体与用户设备发送或接收的信号相互作用所产生的影响，从而形成可见区域。我们假设每个用户设备事先已知其可见区域 $\mathcal{V}_k$，这可通过采用与 [16]中相同的测量程序实现。

我们将 τ_{RA} 定义为随机接入中可能使用的相互正交的导频序列数量$\mathbf{s}_1, \ldots, \mathbf{s}_{\tau_{\mathrm{RA}}} \in \mathbb{C}^{\tau_{\mathrm{RA}} \times 1}$，每个导频序列的长度为 τ_{RA}，且 $\|\mathbf{s}_{\tau_{\mathrm{RA}}}\| = \sqrt{\tau_{\mathrm{RA}}}$。

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，因此必须注意，当天线对某个用户可见时，表示该用户可以向该天线发送信号或从该天线接收信号，且信道增益 [15] 非零。我们假设一个过载场景，其中 K 个 iUE （ $K \gg M$ ）随机分布在超大规模多输入多输出整个阵列前方的方形小区内。阵列孔径的变化*e.g.* 子阵列，会影响瑞利距离，因为阵列孔径从 $D = L_y$ 缩小至 $D_{\mathrm{SA}} = \frac{L_y}{B}$。因此，在子阵列层面，考虑到典型应用场景，超大规模多输入多输出信道可建模为远场传播，如图 2 所示。

—

A. 信道模型

我们对非视距信道传播进行建模，并采用三维表示 [17], 描述各单元的位置，确保海量机器类通信设备在物理上远离瑞利距离。均匀矩形阵列沿 y 轴和 z 轴的物理尺寸分别为 $L_y = (M_y) d_m$ 和$L_z = (M_z) d_m$，其中 M_y 和 M_z 分别表示沿 y 轴和 z 轴的天线单元数量，d_m 表示单元间距。我们采用基于瑞利距离的远场平面波前传播模型，该距离与阵列孔径直接相关，如式 (1) 所定义。因此，我们采用远场模型，其中设备 k 的位置为 $\mathbf{q}^k$ ，而

每个均匀矩形阵列天线单元 $m_{z,\ y}$ 的位置为 $\mathbf{w}_{m_{z,\ y}}$，因此，第 k 个用户设备到特定天线单元$m_{z,\ y}$ 的距离由 [17] 确定：

$$r_{k,m_{z,y}} = \left\|\mathbf{w}_{m_{z,y}} - \mathbf{q}_k\right\| > d_{\text{Rayl}} \tag{2}$$

考虑城市微蜂窝场景，大尺度衰落模型包括路径损耗和阴影衰落 [1]:

$$\beta_{k,m_z,m_y} = 10^{-\kappa \log(r_{k,m_z,m_y}) + \frac{g+\varphi}{10}}, \tag{3}$$

其中，$g = -34.53$ dB 是参考距离处的路径损耗，路径损耗指数为 $\kappa = 3.8$，$\varphi \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{sf}}^2)$ 是阴影衰落，为标准差为 $\sigma_{\text{sf}} = 10$ dB 的对数正态随机变量。与 [11], [15]，相同，我们采用第 b 个子阵列处第 k 个用户的平均大尺度衰落，$\beta_k^{(b)} = \frac{1}{M_b}\sum_{m=1}^{M_b}\beta_{k,m}$。令 $\mathbf{h}_k^{(b)} \in \mathbb{C}^{M_b \times 1}$ 表示用户设备 $k \in \mathcal{K}$ 与子阵列 b 之间的瑞利衰落信道向量，满足 $\mathbf{h}_k^{(b)} \sim \mathcal{CN}\left(0, \beta_k^{(b)}\mathbf{I}_{M_b}\right)$。

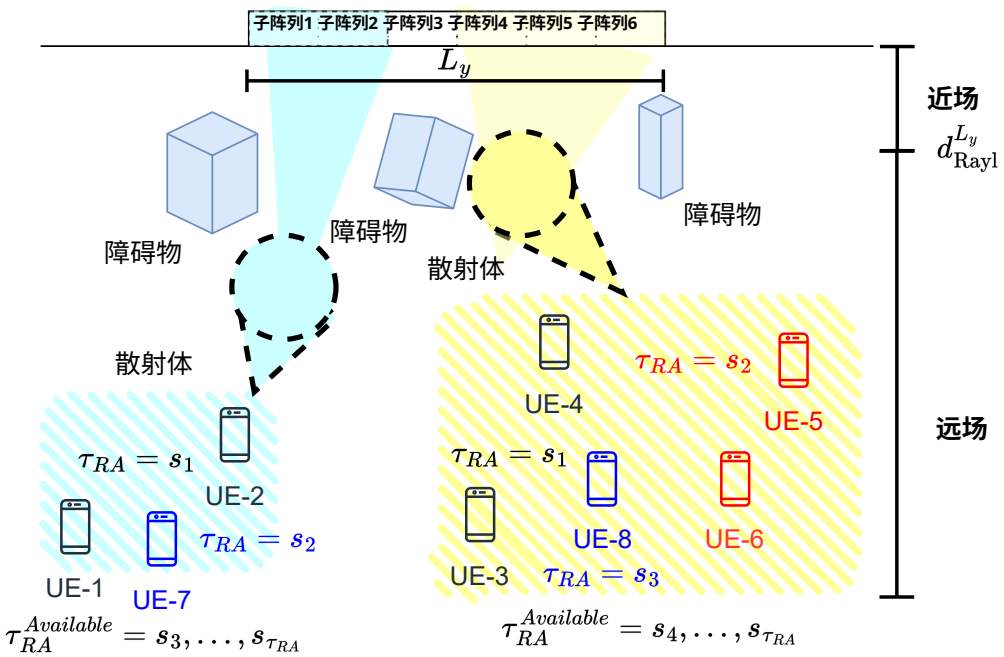

图 2. 采用均匀矩形阵列并划分为 6 个子阵列的拥挤 MTC 系统；每个子阵列中的彩色区域定义了远场区域内可见的用户设备，P_b 是可见成功概率。

III. 非正交多址接入超大规模多输入多输出的随机接入

SUCRe协议 [7] 是一种在用户侧解决导频碰撞的去中心化随机接入方法。该协议包括以下步骤：**a)** KP_a 用户随机选择一个上行（UL）随机接入导频并进行传输；**b)** 基站接收此类用户设备信号，并以预编码的

下行链路（DL）导频；**c)** 利用接收信号，用户设备可以估计与其选择的同一随机接入导频竞争的用户设备的信号强度总和，将该估计值与其信号增益进行比较；如果判断自己是竞争者中信号最强的用户设备，则重新传输所选的随机接入导频；**d)** 最后，基站将专用数据导频分配给在前一步中未发生冲突的用户设备。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，相比之下， $P_a \ll 1$。

A. 探索*NOMA-XL*协议中的可见区域、子阵列和非正交多址接入

所提出的NOMA-XL协议结合了SUCRe-XL协议 [11]下运行的沿子阵列特定用户设备非重叠可见区域的改进。此外，我们提出的协议可以让最多两名或三名处于重叠可见区域（基于子阵列）且物理上位于远场区域的用户继续执行，并选择相同的导频。步骤I和II与 [7]中的SUCRe协议类似。

步骤 I: KP_a 用户设备进行一次随机接入尝试。

步骤 II：子阵列向步骤 I 中的用户设备发送预编码下行导频。

步骤 III：通过探索功率域非正交多址接入，导频碰撞的用户可以在相同的资源（子阵列、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，本研究提出的协议最多可接受三个用户发生碰撞，即最多执行两次串行干扰消除步骤。然而，当至少一个子阵列中有四个或更多用户发生碰撞时，协议可能无法解决碰撞，因此会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，最多尝试 10 次。

冲突消解遵循分布式决策规则，即 每个用户决定是否继续进行接入尝试；决策规则如下 [11]:

$$\rho_k \sum_{m \in \mathcal{V}_k} \beta_k^{(m)} \tau_{\mathrm{RA}} \; > \; \frac{\widehat{\alpha}_{t,k}}{2} + \epsilon_k, \tag{4}$$

其中 $\widehat{\alpha}_{t,\ k}$ 是使用相同导频 τ_{RA}的竞争用户设备的信号增益总和的估计值，其自身 $\rho_k \sum_{m \in \mathcal{V}_k} \beta_k^{(m)} \tau_{\mathrm{RA}}$； ϵ_k 是偏置项。若式 (4) 中的不等式成立，则第 k个用户重复进行导频传输，并形成新集合 $\mathcal{S}_t$；否则，该用户保持静默，并以概率 P_{na}尝试在下一随机接入阶段进行通信。偏置项 定义如下:

$$\epsilon_k = \frac{\delta^*_{\mathrm{NOMA}}}{\sqrt{M_b} \cdot \sum_{b \in \mathcal{V}_k} \beta_k^{(b)}}, \tag{5}$$

其中， δ^*_{NOMA} 是应进行调整以提高系统平均和速率的最优缩放因子 。

我们的 NOMA-XL 随机接入协议的主要特点，是对 [11]中提出的竞争解决过程进行了修改。每个$\mathbf{h}_1\| > \|\mathbf{h}_2\| > \|\mathbf{h}_3\|$)，（也就是说）首先解码最强的 UE-1 信号，且不应用 SIC；随后解码 UE-2 信号，通过一次 SIC 部分消除 UE-1 信号以及 UE-3 的干扰；接着再通过两次 SIC 部分消除 UE-1 和 UE-2 的信号后，解码 UE-3 的信号。

选择相同导频序列 t 的各子阵列中的信号与干扰加噪声比（SINR）定义为 [14]:

$$\gamma_{t,k}^{(b)} = \frac{p_k \beta_k^{(b)}}{\varpi_1 \sum_{j=1}^{k-1} p_j \beta_j^{(b)} + \sum_{i=k+1}^{|\mathcal{S}_t|} p_i \beta_i^{(b)} + \sigma^2} \tag{6}$$

其中，ϖ_1 是应用 SIC 后的残余干扰因子，假设信号重构并不完美。

步骤 IV：我们假设基站使用步骤 III 中发送的导频信号，能够完美估计用户（或多个用户）的信道。之后，对相应消息进行解码。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，该协议也无法解决冲突。系统会指示未成功接入的用户设备在随机间隔后重试，最多尝试 10 次。随后它将停止发送导频序列，该数据包也会被视为丢失。

B. 系统和速率

为比较随机接入协议，我们定义和速率指标。在 SUCRe-XL 中，非重叠虚拟资源中的每个导频序列仅接受一个用户；另一方面，在 NOMA-XL 中，竞争者中还会有两个或三个认为自己获胜的用户。NOMA-XL 在子阵列基下的和速率可使用公式 (6) 定义为:

$$R_{\sum}^{\text{NOMA-XL}} = \sum_{b=1}^{B} \sum_{t=1}^{\tau_{\text{RA}}} \sum_{k=1}^{|\mathcal{S}_t|} \log_2\left(1 + \gamma_{t,k}^{(b)}\right), \quad [\text{bpcu}] \tag{7}$$

SUCRe-XL 的和速率可定义为:

$$R_{\sum}^{\text{SUCRe-XL}} = \sum_{b \in \mathcal{V}_k} \sum_{t=1}^{\tau_{\text{RA}}} \log_2\left(1 + \frac{\rho_k \beta_k^{(b)}}{\sigma^2}\right), \quad [\text{bpcu}] \tag{8}$$

ass假设每个导频序列只接受一个用户，并且 $\delta^{(K,B)^*}$ SUCRe-XL $= -1$.

IV. 数值结果

假设一个 $L_y = 10$ 米、配备 $M = 500$ 根天线的均匀矩形阵列，位于一个100 x100 m^2 小区中，该小区内有 K 个非活跃用户（iUE）随机分布在小区的远场区域，且可用导频数量为 $\tau_{\text{RA}} = 10$ 个序列。归一化发射功率为 $\rho_k = 1$W，其他仿真参数列于表 I。

A. 系统和速率

通过穷举搜索方法，以 [9]为依据获得缩放因子 $\delta^{(K,B)^*}$ NOMA-XL 的最优值；因此，从和速率最大化的意义上来说，该值是最优的；因此，每种 K-iUE和 B-SA配置都会得到一个最优参数。

图3 a)展示了通过穷举搜索方法针对K 和 B 的每种场景所获得的最优缩放因子参数，以及图3 b)中相应的最大NOMA-XL和速率。请注意，基线方案（SUCRe-XL）要求每个SA中具有非重叠虚拟资源才能接纳设备；因此，即使增加SA数量，其增益仍较为有限。最高和速率值出现在可用导频使用量达到饱和之前。另一方面，NOMA-XL处理每个SA中叠加的信号，消除较强用户的信号，并假设SIC残余干扰的量级为 $\varpi_1 = 0.1$，随着 B 增加而取得更好的结果。此外，在调整缩放因子 δ时，会达到最大和速率上限，将选择同一导频的用户数限制为三个；当iUE数量增加时，缩放因子会减小。当SA数量较少时，可以观察到这种衰减，这进一步表明，用户间干扰越强， δ 因子就越小。

B. 平均接入尝试次数

图 4 显示，在拥挤场景（$1000 < K <$15000）中，所提出的 NOMA-XL 协议能够提升随机接入性能。分布式冲突消解的改进之处在于，NOMA-XL 得益于功率分集，可以接受两个或三个用户在重叠可见区域发生碰撞；因此，可以在每个子阵列中经过 SIC 过程后处理叠加信号。随着子阵列数量 B 增加，受信道硬化和有利传播特性的限制，每个子阵列中因共享重叠可见区域而发生碰撞的概率也会增加。由于缺少干扰消除步骤，SUCRe-XL 无法处理这种冲突消解配置。因此，

表 I 仿真参数。

参数	**数值**
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	$d_m = 0.1$米
阵列孔径	$D = M_y \times d_m$
用户发射功率	$\rho_k = 1$瓦
噪声功率	$\sigma^2 = 1$W
iUE数量	$K \in [0; 15000]$
载波波长	$\lambda_c = 0.125$m
接入概率（1st 次尝试）	$P_a = 0.01$
新尝试的接入概率	$P_{na} = 0.5$
每个子阵列可见的成功概率	$P_b = 0.5$
可用导频序列数量	$\tau_{\mathrm{RA}} = 10$
SIC不完美因子	$\varpi_1 = 0.1$
蒙特卡罗实现次数	5000

子阵列数量	**子阵孔径，** D_{SA}	**瑞利分布，** d_{Rayl}
$B = 1$	10m	1600 米
$B = 5$	2m	64m
$B = 10$	1m	16m

即使同一子阵列中存在强干扰，NOMA-XL 也能减少接入尝试次数。

图5所示的归一化接入用户设备数，即成功接入的用户数与尝试接入的用户数之比，印证了 NOMA-XL 的改进效果：由于叠加信号可在各个子阵列中通过 SIC 处理，因此能够接入更多用户设备进行传输。

V. 结论

通过利用 NOMA 和各子阵列中的信号处理，可以提升基于授权的随机接入协议性能。实际上，超大规模多输入多输出通过由不同子阵列处理接收信号，增加了一个新的自由度；再加上功率域非正交多址接入引入的自由度，并在基站侧的各子阵列中应用 SIC 阶段，使得能够解决同一可见区域子阵列中最多三个用户使用相同导频序列所造成的碰撞。

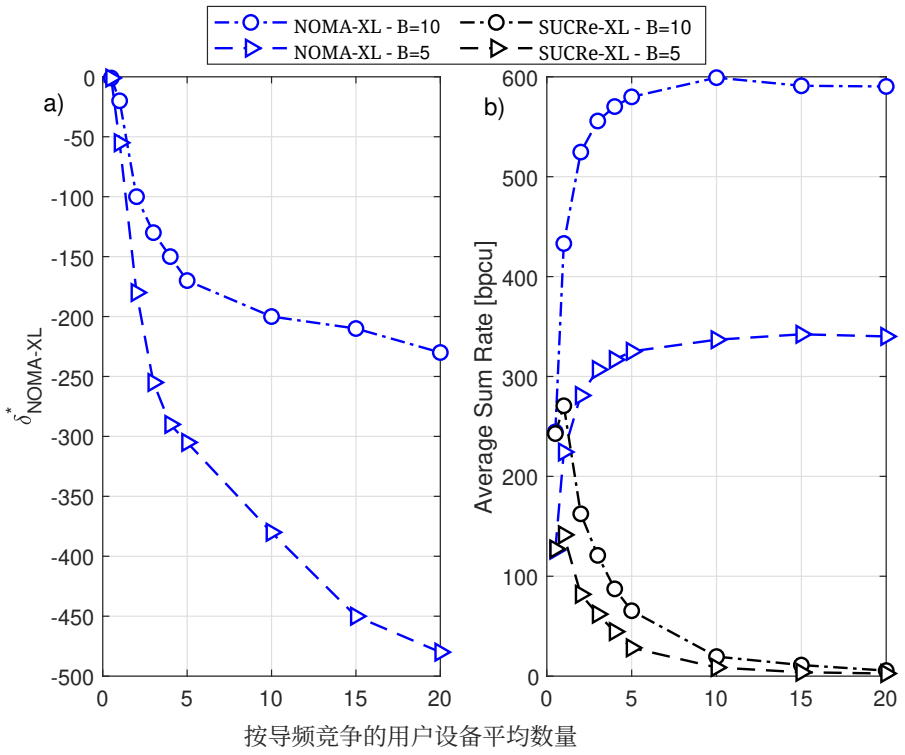

图 3. **a)** 针对每种 $\{K; B\}$ 场景，通过穷举搜索得到的平均和速率最大化的最优缩放因子 。**b)** 在调整 $\delta^*_{\text{NOMA-XL}}$后，每种 K 和 B 场景下达到的平均最大和速率。

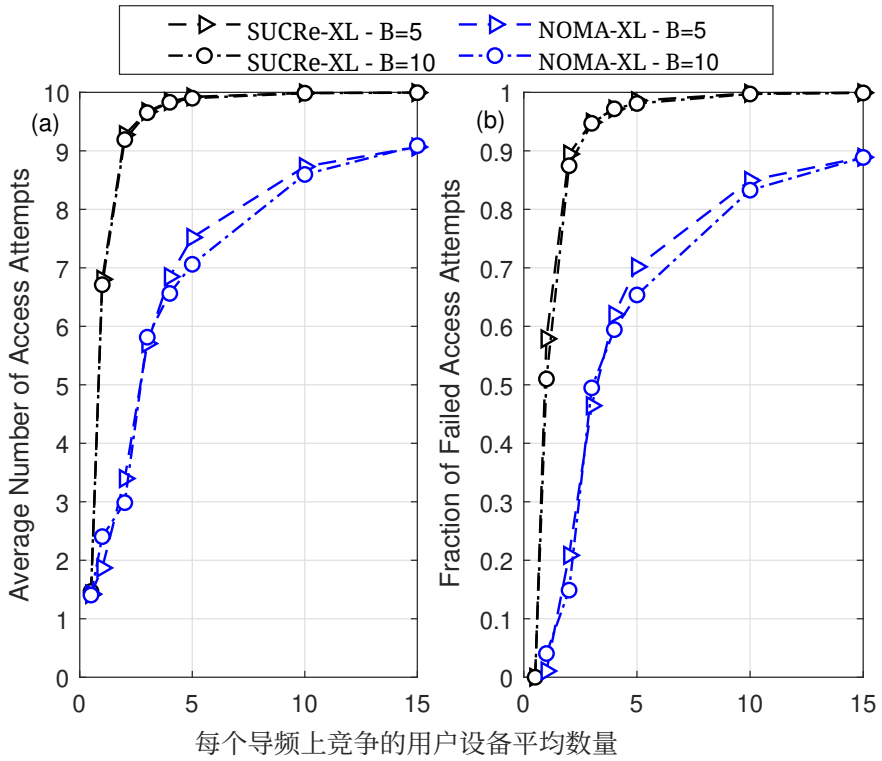

图4. 随机接入系统性能。基准 SUCRe-XL 与 NOMA-XL。(a) 平均随机接入尝试次数。(b) 接入尝试失败概率。

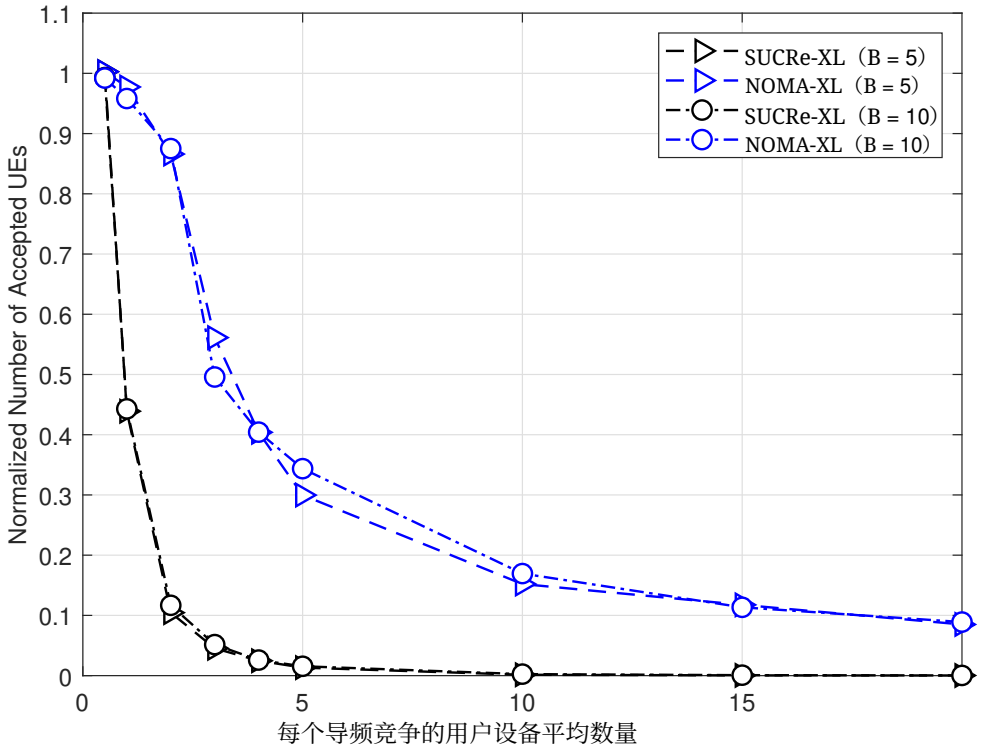

图 5. 使用 $\delta^{*}_{\text{NOMA-XL}}$得到的已接纳用户设备数量的归一化值。

我们证明，以子阵列为基础处理接收信号可以改变瑞利距离，并使用户位于远场区域。根据我们的数值结果，我们发现，相较于近期文献中的 SUCRe-XL 方法，所提出的随机接入协议有了显著改进，在所分析的拥挤场景下，既减少了接入尝试次数，又显著提高了和速率（$1000 < K < 15000$）。

参考文献

[1] M. Fallgren 和 B. Timus，交付成果 *D1.1*：*5G* 移动与无线系统的场景、需求和关键绩效指标。文档 ICT-317669-METIS，2013 年。[2] A. Akbar、S. Jangsher 和 F. A. Bhatti，“NOMA 与 5G 新兴技术：问题与解决技术综述”，计算机网络，第 190 卷，编号 107950，2021 年。[3] O. Maraqa、A. S. Rajasekaran、S. Al-Ahmadi、H. Yanikomeroglu 和 S. M. Sait，“面向未来无线网络使能技术的速率最优功率域非正交多址接入综述”，*IEEE* 通信调查与教程，第 22 卷，第 4 期，第 2192–2235 页，2020 年。[4] F. Clazzer、A. Munari、G. Liva、F. Lazaro、C. Stefanovic 和 P. Popovski，“从 5G 到 6G：现代随机接入时代是否已经到来？”，*arXiv:1903.03063*，2019 年。[5] D. Jakoveti´c、D. Bajovi´c、D. Vukobratovi´c 和 V. Crnojevi´c，“多基站系统的协作时隙 ALOHA”，*IEEE* 通信学报，第 63 卷，第 4 期，第 1443–1456 页，2015 年。

[6] M. V. da Silva, S. Montejo-S´anchez, R. D. Souza, H. Alves 和 T. Abr˜ao，“面向非正交多址接入的 MTC 网络中由设备到设备通信辅助的 Q 学习随机接入”，*IEEE Access*，第 10 卷，第 30694–30706 页，2022 年。[7] E. Bj¨ornson、E. de Carvalho、J. H. Sørensen、E. G. Larsson 和 P. Popovski，“拥挤大规模 MIMO 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。[8] H. Han、Y. Li 和 X. Guo，“拥挤大规模 MIMO 系统中一种基于图的随机接入协议”，*IEEE Transactionson Wireless Communications*，第 16 卷，第 11 期，第 7348–7361 页，2017 年。[9] H. D. Pereira、G. Brante、J. Farhat、R. D. Souza、J. C. M. Filho 和 T. Abr˜ao，“非正交多址接入大规模 MIMO 中冲突消解的和速率”，*IEEE Access*，第 9 卷，第 24965–24974 页，2021 年。[10] J. Flordelis、X. Li、O. Edfors 和 F. Tufvesson，“将大规模 MIMO 扩展至 COST 2100 信道模型：建模与验证”，*IEEE Transactions on Wireless Communications*，第 19 卷，第 1 期，第 380–394 页，2020 年。[11] O. S. Nishimura、J. C. Marinello 和 T. Abr˜ao，“超大规模大规模 MIMO 系统中的一种基于授权的随机接入协议”，*IEEE CommunicationsLetters*，第 24 卷，第 11 期，第 2478–2482 页，2020 年。[12] H. Iimori、T. Takahashi、K. Ishibashi、G. T. F. de Abreu、D. Gonz´alez G. 和 O. Gonsa，“超大规模 MIMO 系统中的联合活动检测与信道估计”，*IEEE Transactions on Wireless Communications*，第 21 卷，第 9 期，第 7253–7270 页，2022 年。[13] T. A. Bruza Alves 和 T. Abr˜ao，“非正交多址接入超大规模 MIMO 中拥挤的 MTC 随机接入”，*2022* 年物联网研讨会（*SIoT*），第 1–4 页，2022 年。[14] T. A. B. Alves 和 T. Abr˜ao，“基于非正交多址接入的 mMTC 超大规模 MIMO 随机接入”，*IEEE Access*，第 11 卷，第 1944–1954 页，2023 年。[15] J. C. M. Filho、G. Brante、R. D. Souza 和 T. Abr˜ao，“探索超大规模 MIMO 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。[16] E. D. Carvalho、A. Ali、A. Amiri、M. Angjelichinoski 和 R. W. Heath，“超大规模大规模 MIMO 中的非平稳性”，*IEEEWirelessCommunications*，第 27 卷，第 4 期，第 74–80 页，2020 年。[17] H. Lu 和 Y. Zeng，“多用户超大规模 MIMO 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。