

# 最大化 NOMA 辅助上行抓取天线系统的和速率

Ming Zeng, Ji Wang, Xingwang Li, Gongpu Wang, Octavia A. Dobre and Zhiguo Ding

**Abstract**—本文研究了一种上行通信场景，其中多个用户通过非正交多址接入 (NOMA) 与接入点 (AP) 进行通信。在 AP 处部署了一个可沿介质波导任意位置激活的夹持天线，以动态重新配置用户信道。目标是通过联合优化夹持天线的位置和用户的发射功率来最大化系统的总速率。所制定的优化问题是非凸的，并采用粒子群优化 (PSO) 算法进行解决。为了性能基准测试，考虑了两种时分多址接入 (TDMA) 方案：一种基于单独为每个用户激活的夹持天线，另一种基于服务于所有用户的单个夹持天线配置。数值结果表明，与传统的天线架构相比，使用夹持天线显著提高了系统的总速率。此外，基于 NOMA 的方案优于具有单一夹持天线的 TDMA 方案，但在为每个用户自适应配置夹持天线时，被基于 TDMA 的方法超越。最后，所提出的基于 PSO 的方法显示了在共同使用夹持天线配置的 NOMA 和 TDMA 中实现近最优性能的能力。

**Index Terms**—钳夹天线、上行链路、NOMA 和总率最大化。

## I. 介绍

最近，诸如流体天线系统等柔性天线系统因其能够动态重新配置无线信道的能力而受到广泛关注 [1]。通过优化天线位置，柔性天线系统在性能上优于传统固定位置的天线系统 [2], [3]。然而，在这些系统中天线的实际位移通常仅限于几个波长内，这限制了它们建立视距 (LoS) 链路的能力。这一限制在毫米波和太赫兹频段等高频带尤为关键，在这些频段中，缺乏视距链路会严重降低系统性能 [4], [5]。为应对这一挑战，NTT DOCOMO 引入了夹紧天线系统的概念 [4]。在其实验演示中，通过在介质波导上施加塑料夹来实现无线电波的辐射。通过策略性地放置夹子，可以为以前受到非视距 (NLoS) 条件限制的用户提供强视距链路，从而显著提升整体系统性能。

在多用户挤压天线系统中，通过给定的介质波导传输的信号本质上是所有服务用户的信号的叠加，从而推动了非正交多址接入 (NOMA) 技术 [5]–[7] 的采用。具体而言，[5] 中的作者研究了辅助挤压天线系统的 NOMA，其目标是最大

化总速率。[5] 中的分析结果表明，在总速率性能方面，辅助 NOMA 架构优于正交多址接入架构。然而，实现最佳系统性能依赖于在波导任意位置激活挤压天线的能力——这一要求提出了实际实施挑战。为了解决这个问题，[6] 提出了一个低复杂度且硬件友好的方法，在传输前预先将挤压天线安装在离散的固定位置。在运行期间，可以选择性激活这些天线的一部分来服务用户。与主要关注总和速率最大化的 [5] 和 [6] 不同，研究 [7] 解决了 NOMA 辅助的夹持天线系统中的功率最小化问题，满足每个用户的最低数据率要求，并提出了一种迭代功率分配算法。在 [7] 中的数值评估确认了夹持天线相较于传统天线的有效性和优越的节能性能。

请注意，上述研究 [5]–[7] 主要集中在挤压天线系统中的下行传输。据我们所知，只有有限数量的工作——即 [8], [9]——探索了上行传输。然而，这些专注于上行的研究中没有一项研究将 NOMA 整合到挤压天线系统中。为了解决这一空白，本文考虑了一个由 NOMA 辅助的上行场景，其中包含一个激活的挤压天线，并通过联合优化用户发射功率和天线位置来最大化系统的总速率。由此产生的优化问题被重新表述为广义钟形隶属函数，其本质是非凸的。为了解决这个问题，我们采用粒子群优化 (PSO) 算法，因为它在处理非凸问题方面非常有效。为了性能基准测试，我们考虑了两种时分多址 (TDMA) 方案：一种是在不同的时间槽中激活位置针对不同用户的挤压天线，另一种是激活一个挤压天线来服务所有用户。数值结果显示，使用挤压天线显著提高了总速率，超过了传统的固定天线设计。此外，基于 NOMA 的方案优于具有通用挤压天线的基于 TDMA 的方案，但当天线位置被动态调整以适应个别用户时，则不如基于 TDMA 的方案。

M. Zeng is Laval University, Quebec City, Canada (email: ming.zeng@gel.ulaval.ca).

J. Wang is Central China Normal University, Wuhan, China (e-mail: jiwang@ccnu.edu.cn).

X. Li is Henan Polytechnic University, Jiaozuo, China (email: lixingwang@hpu.edu.cn).

G. Wang is Beijing Jiaotong University, Beijing, China (email: gp-wang@bjtu.edu.cn).

O. A. Dobre is Memorial University, St. John's, Canada (e-mail: odobre@mun.ca).

Z. Ding is with Khalifa University, Abu Dhabi, UAE, and The University of Manchester, Manchester, UK (e-mail: zhiguo.ding@ieee.org).

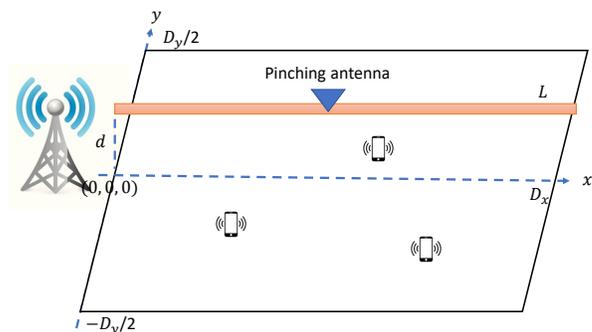


figure 1. 所考虑的上行 pinch-antenna 系统的示意图。

## II. 系统模型和问题表述

### A. 系统模型

如图 1 所示，我们考虑一个上行传输场景，在该场景中  $M$  个用户与配备单个介质波导的基站 (BS) 进行通信。我们认为在介质波导上激活单一夹持天线以建立与用户的视距链路。用  $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$  表示用户集。为了建模空间配置，我们采用三维笛卡尔坐标系。不失一般性地，假设波导长度为  $L$ ，并且平行于  $x$  轴位于固定高度  $d$  处，如图 1 所示。用户在位于  $x-y$  平面内的一个矩形区域内随机分布，该区域的尺寸为  $D_x$  和  $D_y$ 。令  $\Phi^{\text{Pin}} = (x^{\text{Pin}}, 0, d)$  表示夹持天线的位置，而  $\Phi_m = (x_m, y_m, 0)$  表示第  $m$  个用户的坐标，满足  $x_m \in [0, D_x]$  和  $y_m \in [-D_y/2, D_y/2], \forall m \in \mathcal{M}$ 。

在这项工作中，我们考虑了一种所有用户基于 NOMA 原则同时被服务的场景。在 BS 处，采用顺序干扰消除 (SIC) 来减轻用户间干扰。不失一般性，我们假设用户的信号按升序解码。那么，第  $m$  个用户的可实现数据率由以下给出：

$$R_m^{\text{NOMA}} = \log_2 \left( 1 + \frac{\eta P_m / |\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2}{\sum_{i=m+1}^M \eta P_i / |\Phi_i - \Phi^{\text{Pin}}|^2 + \sigma^2} \right), \quad (1)$$

其中  $\eta = \frac{c^2}{16\pi^2 f_c^2}$ ， $c$  和  $f_c$  分别表示光速和载波频率。此外， $P_m$  表示第  $m$  个用户的传输功率，满足  $P_m \leq P_m^{\text{max}}$ ，其中  $P_m^{\text{max}}$  表示最大功率约束。 $\sigma^2$  表示 BS 处的加性白高斯噪声的功率。

### B. 问题表述

在本文中，我们的目标是通过联合优化用户的传输功率和夹持天线的位置来最大化前述上行链路 NOMA 系统的总速率。所得的最优化问题可以表述如下：

$$\max_{x^{\text{Pin}}, P_m} \sum_{m=1}^M R_m^{\text{NOMA}} \quad (2a)$$

$$\text{s.t. } x^{\text{Pin}} \in [0, L], \quad (2b)$$

$$P_m \leq P_m^{\text{max}}, \forall m, \quad (2c)$$

其中 (2b) 限制夹持天线位于介质波导内，而 (2c) 则约束每个用户的传输功率不超过其最大功率。

## III. 提议的解决方案

问题 (2) 是非凸的，由于目标函数非凸 (2a)。为了解决这个问题，我们将 (2a) 重新表述如下：

$$\sum_{m=1}^M R_m^{\text{NOMA}} = \sum_{m=1}^M \log_2 \left( 1 + \frac{\eta P_m / |\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2}{\sum_{i=m+1}^M \eta P_i / |\Phi_i - \Phi^{\text{Pin}}|^2 + \sigma^2} \right) \quad (3a)$$

$$= \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{m=1}^M \eta P_m / |\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2}{\sigma^2} \right), \quad (3b)$$

其中最后一个等式来自于求和率表达式中的括号内项构成一个望远镜乘积 [10] 的事实。

在此基础上，问题 (2) 可以重写为

$$\max_{x^{\text{Pin}}, P_m} \log_2 \left( 1 + \frac{\sum_{m=1}^M \eta P_m / |\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } x^{\text{Pin}} \in [0, L], \quad (4b)$$

$$P_m \leq P_m^{\text{max}}, \forall m. \quad (4c)$$

可以很容易地验证公式 (4a) 中的目标函数是每个用户发射功率的单调递增函数。因此，为了最大化系统总速率，最优策略是每个用户都以最大功率级别进行传输，即  $P_m = P_m^{\text{max}}, \forall m \in \mathcal{M}$ 。基于这一推理，唯一剩下的优化变量就是夹持天线的位置，用  $x^{\text{Pin}}$  表示。为了进一步分析的便利，我们移除了目标中的  $\log(\cdot)$  函数，利用其单调性，并将问题重新表述为：

$$\max_{x^{\text{Pin}}} \sum_{m=1}^M P_m^{\text{max}} / |\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2 \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } x^{\text{Pin}} \in [0, L]. \quad (5b)$$

显然，问题 (5) 与原公式 (4) 具有相同的最优解，这是由于对数函数的单调性质。此外，通过用其对应的坐标替换  $\Phi_m$  和  $\Phi^{\text{Pin}}$  的表达式，目标函数 (5a) 可以重新表示为

$$\sum_{m=1}^M \frac{P_m^{\text{max}}}{|x^{\text{Pin}} - x_m|^2 + y_m^2 + d^2}, \quad (6)$$

其中  $x_m$  和  $y_m$  是第  $m$  个用户在  $x$ -和  $y$ -轴上的坐标，假定已知。

目标函数中的每一项都对应一个广义的钟形隶属函数，该函数呈现出对称的钟形轮廓 [11]。如图 2 所示，这些函数在其峰值附近（即中心附近）是凹的，在远离中心的区域是凸的，并且不是全局凸的。

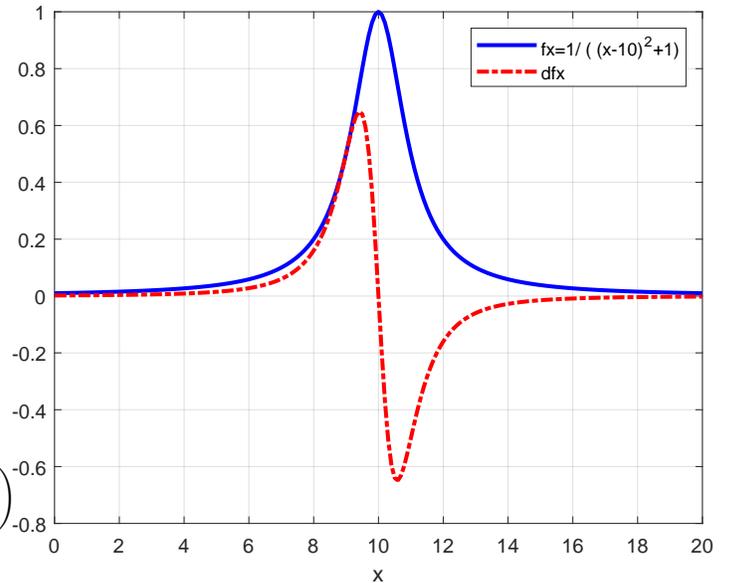


figure 2. 广义钟形隶属函数及其导数的示例。

如图 3 所示，多个对称钟形函数的和可能会表现出多个局部最大值，这使得推导封闭形式或解析解变得具有挑战性。

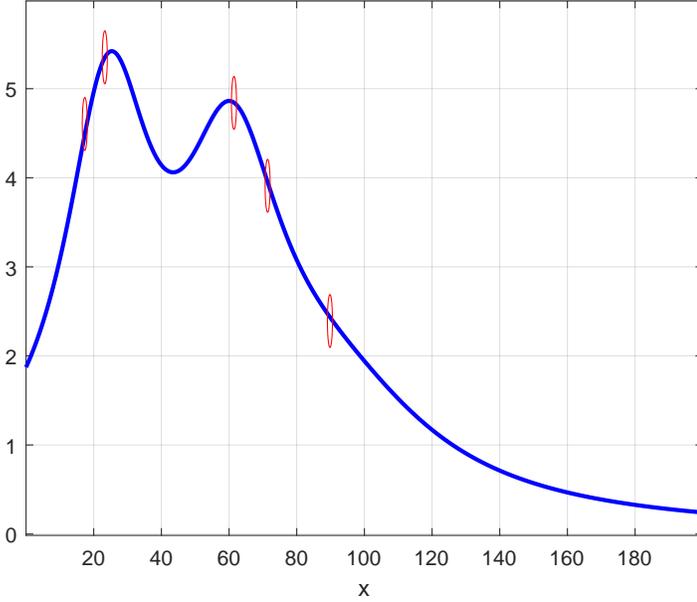


figure 3. 目标函数的一种实现方式，当  $M = 5$  时，使用随机生成的  $x_m$ 、 $y_m$  和  $d$  值。红色圆圈表示相应的  $x_m$  值。

值得注意的是，在两个相邻用户之间的  $x$  轴区间内也可能发生多个局部最大值。这一特征使传统方法（如二分法）不适合可靠地识别两个相邻用户之间的最大值。鉴于该问题涉及单个优化变量，始终可以采用一维穷举搜索来找到全局最优解。然而，这种方法的计算复杂度会随着搜索分辨率（粒度）的增加而增加。

作为穷尽搜索的替代方案，我们提出使用 PSO——这是一种在识别非凸问题近优解方面表现出色的启发式优化技术 [12]。我们在当前情境中实现 PSO 的方式如下：首先通过否定目标函数将原始最大化问题转化为最小化问题。令  $I$  表示群集中粒子的总数。迭代  $t$  中第  $i$  个粒子的位置由  $x_i^{\text{Pin}}(t)$  表示，每个粒子还与一个速度  $v_i^{\text{Pin}}(t)$  相关联。粒子位置被迭代更新，其中每个粒子在下次迭代中的新位置计算为：

$$x_i^{\text{Pin}}(t+1) = x_i^{\text{Pin}}(t) + v_i^{\text{Pin}}(t+1). \quad (7)$$

同时，粒子的速度按照以下规则进行更新：

$$v_i^{\text{Pin}}(t+1) = wv_i^{\text{Pin}}(t) + c_1r_1(pb\text{best}^i - x_i^{\text{Pin}}(t)) + c_2r_2(g\text{best} - x_i^{\text{Pin}}(t)), \quad (8)$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  是在范围  $[0, 1]$  内的随机变量； $w \in [0, 1]$  表示惯性权重，控制粒子先前速度的影响；而  $c_1$  和  $c_2$  分别称为认知和社会加速系数。这些参数共同决定了探索（全局搜索）和开发（局部优化）之间的平衡。术语  $pb\text{best}^i$  表示第  $i$  个粒子发现的个人最佳位置，而  $g\text{best}$  是群中任何粒子找到的全局最佳位置。这两个值在每次迭代时同时更新以反映迄今为止遇到的最佳解决方案。算法终止条件为达到最大迭代次数或连续两次迭代中全局最优目标函数值的相对变化低于预定义的容差阈值。在我们的问题背景下， $x^{\text{Pin}}$  的搜索空间是有界的。具体而言，下界设置为  $\min(x_m)$ ，上界由  $\min(\max(x_m), L)$  给出，

因为在该区间外的  $x^{\text{Pin}}$  值由于距离所有用户位置较远而保证会产生次优结果。

#### IV. 两个基于 TDMA 的基准测试

为了评估 NOMA 在夹持天线系统中的性能，我们考虑 TDMA 作为基准。在 TDMA 中，用户被单独分配在不同的时隙内服务。为了简化并确保公平性，我们假设所有用户的时间分配相等，其中用户  $m$  在第  $m$  个时隙中得到服务。在这种情况下，夹持天线的位置可以动态调整以分别服务于每个用户，或者固定不变以共同服务于所有用户，就像 NOMA 的情况一样。虽然前一种方法通过优化每个用户的天线位置可能实现更优的性能，但由于需要频繁调整位置而导致系统复杂性增加。在下文中，我们将分析这两种 TDMA 场景。

##### A. 针对每位用户的夹钳天线位置定制的 TDMA

在这种情况下，用户  $m$  的可实现速率由

$$R_m^{\text{TDMA}} = \frac{1}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{\eta M P_m}{|\Phi_m - \Phi_m^{\text{Pin}}|^2 \sigma^2} \right) \quad (9a)$$

$$= \frac{1}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{\eta M P_m / \sigma^2}{|x_m^{\text{Pin}} - x_m|^2 + y_m^2 + d^2} \right), \quad (9b)$$

给出，其中  $\Phi_m^{\text{Pin}}$  和  $x_m^{\text{Pin}}$  分别表示用户  $m$  的夹持天线的位置及其相应的  $x$  坐标。为了公平比较，因子  $M$  被包含在分子中以确保每个用户在 TDMA 和 NOMA 下的功率预算相等。显然，为了最大化速率，每个用户应在其最大发射功率下运行，即  $P_m = P_m^{\text{max}}$ 。此外，当  $|x_m^{\text{Pin}} - x_m|^2$  最小化时， $R_m^{\text{TDMA}}$  被最大化。鉴于夹钳天线的移动约束条件，我们有  $x_m^{\text{Pin}} = \min(L, x_m)$ 。也就是说，当  $x_m \leq L$ ， $x_m^{\text{Pin}} = x_m$  时，意味着夹钳天线直接对准用户。否则，夹钳天线定位在距离用户最近的点，即， $x_m^{\text{Pin}} = L$ 。

##### B. 所有用户单个夹钳天线位置的 TDMA

在这种情况下，所有用户共享相同的夹持天线位置，就像在 NOMA 配置中一样。因此，用户  $m$  的可实现速率可以表示为

$$R_m^{\text{TDMA}} = \frac{1}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{\eta M P_m}{|\Phi_m - \Phi^{\text{Pin}}|^2 \sigma^2} \right) \quad (10a)$$

$$= \frac{1}{M} \log_2 \left( 1 + \frac{\eta M P_m / \sigma^2}{|x^{\text{Pin}} - x_m|^2 + y_m^2 + d^2} \right). \quad (10b)$$

与 NOMA 情况类似， $R_m^{\text{TDMA}}$  表现出对称的钟形曲线，其总和可能包含多个局部最优解。因此，我们可以应用一维穷尽搜索或 PSO 来识别其解决方案。

#### V. 数值结果

数值仿真被用来评估所提出的夹钳天线系统与传统的固定天线系统的性能，其中天线位于固定的  $(0, 0, d)$  米位置。默认的仿真参数如下 [13]：载波频率  $f_c = 28\text{GHz}$ ，天线高度

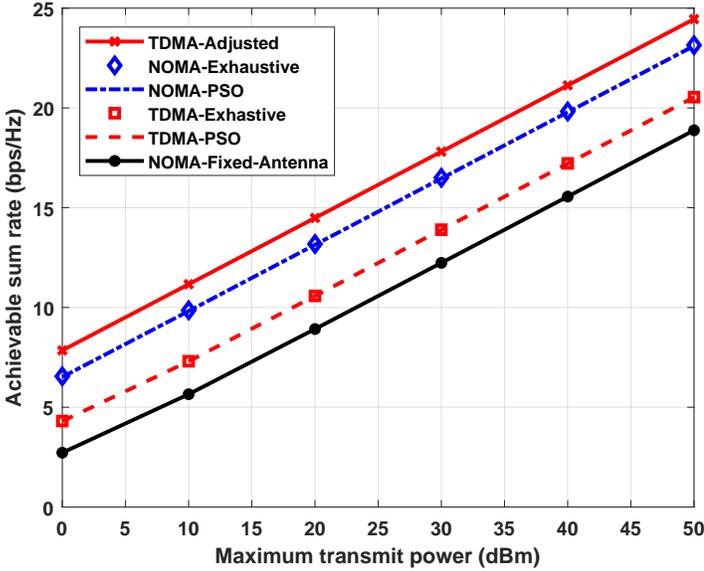


figure 4. 可达总速率与用户处的最大发射功率约束的关系。

$d = 3$  米，噪声功率  $\sigma^2 = -90$ dBm。用户数量设定为 5，随机部署在一个服务区域的  $D_x = 120$  米和  $D_y = 20$  米范围内。每个用户的最大发射功率限制在  $P_m^{\max} = 25$ dBm,  $\forall m$ 。此外，介质波导的长度设置为  $L = D_x$ 。所有呈现的结果都是基于  $10^4$  次独立随机实现的平均值。

图 4 展示了可达总速率与用户最大发射功率的关系。如预期的那样，所有方案的总速率随发射功率的增加而增加。对于传统的固定天线系统，仅显示了基于 NOMA 的性能，因为 TDMA 变体在总速率性能方面本质上受到 NOMA 的限制 [14]。结果清楚地表明，夹持天线系统显著优于固定天线系统，得益于其动态重新定位天线以靠近用户的这一能力。在夹持天线配置中，基于 NOMA 的方案实现了比单个天线位置（“TDMA-Exhaustive”和“TDMA-PSO”）的基于 TDMA 的方案更高的总速率，但当为每个用户动态重新定位天线时（“TDMA-Adjusted”），则被基于 TDMA 的方案超越。此外，提出的基于 PSO 的优化所实现的总速率与 NOMA 和 TDMA 场景中的穷举搜索结果非常接近，证实了其近最优性能。

图 5 说明了可实现的总速率随  $D_x$  的变化情况，这定义了用户服务区沿  $x$  轴的范围。 $y$  轴的范围固定为  $D_y = 20$  m，介质波导长度设置为  $L = D_x$ 。对于所有考虑的方案，除了具有用户特定挤压天线调整的 TDMA，总速率随着  $D_x$  的增加而降低。这种下降归因于沿  $x$  轴上用户之间的空间分离增大，导致信道增益减小。然而，挤压天线系统始终优于固定天线基线，性能差距随  $D_x$  增加而扩大，从而突显了天线重新定位能力的优势。此外，基于 NOMA 的方案继续优于具有共同挤压天线的 TDMA，在较大的  $D_x$  处，性能差异变得更加明显。相比之下，为每个用户自适应调整挤压天线位置的 TDMA 方案总速率保持不变，无论  $D_x$  如何。这是由于能够重新定位天线以与每个用户的  $x$ -坐标对齐，即确保

$|x^{\text{Pin}} - x_m|^2 = 0$ 。这些观察进一步验证了在无线系统中使用夹持天线的性能优势。

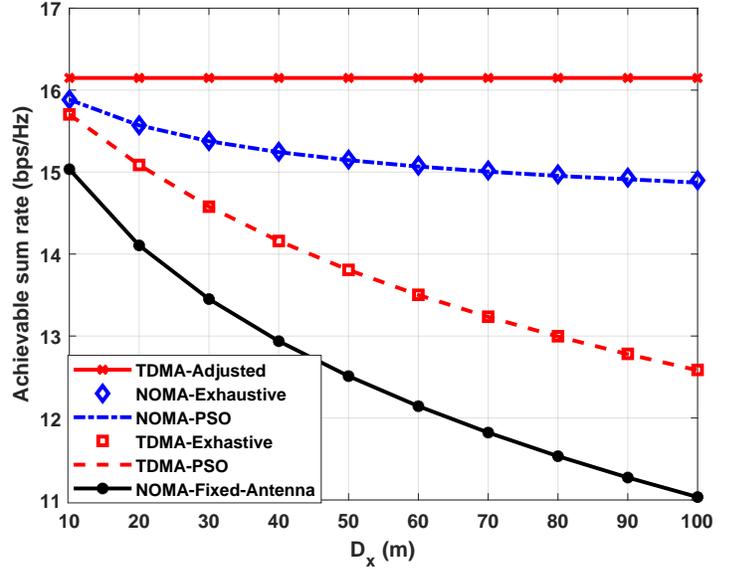


figure 5. 可实现的总速率与  $D_x$ ，其中  $D_y = 20$ m 和  $L = D_x$ 。

## VI. 结论

在本文中，我们研究了一个采用夹持天线的上行通信系统中的总和速率最大化问题。对于基于 NOMA 的传输场景，我们证明了相关的优化问题是非凸的，并提出了一种 PSO 方法来高效地获得接近最优的解。所提出的 NOMA 方案的性能与两种 TDMA 基准进行了对比：一种是单独为每个用户激活夹持天线的情况，另一种则是使用单一夹持天线配置服务于所有用户的情况。数值仿真表明，采用夹持天线的系统在可实现的总和速率方面显著优于传统的固定天线架构。此外，基于 NOMA 的方法相较于具有共同夹持天线配置的 TDMA 提供了更优的表现，但在针对每个用户的天线位置进行自适应优化时，则会被 TDMA 超越。这些发现突显了夹持天线系统的潜力，并为将其与多种接入技术结合以提高频谱效率提供了洞见。

在本文中，考虑了单个激活夹持天线的场景。未来研究的一个重要方向是研究由多个激活夹持天线支持的 NOMA 辅助夹持天线系统的性能，在这种情况下可能会得出关于 NOMA 与 TDMA 方案之间比较的不同结论。

## REFERENCES

- [1] K.-K. Wong, A. Shojaefard, K.-F. Tong, and Y. Zhang, “Fluid antenna systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 1950–1962, Mar. 2021.
- [2] S. Pakravan, M. Ahmadzadeh, M. Zeng, G. A. Hodtani, J.-Y. Chouinard, and L. A. Rusch, “Robust resource allocation for over-the-air computation networks with fluid antenna array,” in *2024 Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, 2024, pp. 1–6.

- [3] M. Ahmadzadeh, S. Pakravan, G. A. Hodtani, M. Zeng, J.-Y. Chouinard, and L. A. Rusch, "Enhanced over-the-air federated learning using AI-based fluid antenna system," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2407.03481>
- [4] A. Fukuda, H. Yamatoto, H. Okazaki, Y. Suzuki, and K. Kawai, "Pinching antenna using a dielectric waveguide as an antenna," *Technical Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 5–12, Jan. 2022.
- [5] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, "Flexible-antenna systems: A pinching-antenna perspective," *IEEE Transactions on Communications*, to appear in 2025.
- [6] K. Wang, Z. Ding, and R. Schober, "Antenna activation for NOMA assisted pinching-antenna systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, to appear in 2025.
- [7] Y. Fu, F. He, Z. Shi, and H. Zhang, "Power minimization for noma-assisted pinching antenna systems with multiple waveguides," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2503.20336>
- [8] T. Hou, Y. Liu, and A. Nallanathan, "On the performance of uplink pinching antenna systems (PASS)," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.12365>
- [9] S. A. Tegos, P. D. Diamantoulakis, Z. Ding, and G. K. Karagiannis, "Minimum data rate maximization for uplink pinching-antenna systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, p. 1 – 1, 2025. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/LWC.2025.3547956>
- [10] M. Zeng, X. Li, G. Li, W. Hao, and O. A. Dobre, "Sum rate maximization for IRS-assisted uplink NOMA," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 234–238, Jan. 2021.
- [11] A. Dorzhigulov and A. P. James, "Generalized bell-shaped membership function generation circuit for memristive neural networks," in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2019, pp. 1–5.
- [12] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *Proc. IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, 1998, pp. 69–73.
- [13] X. Xie, F. Fang, Z. Ding, and X. Wang, "A low-complexity placement design of pinching-antenna systems," 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.14250>
- [14] M. Zeng, N.-P. Nguyen, O. A. Dobre, Z. Ding, and H. V. Poor, "Spectral- and energy-efficient resource allocation for multi-carrier uplink NOMA systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 9293–9296, Sept. 2019.