

# 基于无线光通信的非正交多址接入技术研究



## Non-Orthogonal Multiple Access Technology Based on Optical Wireless Communication

李亮/LI Liang<sup>1</sup>, 董宇涵/DONG Yuhan<sup>1,2</sup>, 关迅/GUAN Xun<sup>1,2</sup>, 宋健/SONG Jian<sup>1,2,3</sup>, 张晓平/ZHANG Xiaoping<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 中国 深圳 518055;

2. 鹏城实验室, 中国 深圳 518000;

3. 清华大学, 中国 北京 100084)

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

2. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518000, China;

3. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240226.1616.013.html>

网络出版日期: 2024-02-27

收稿日期: 2023-12-20

**摘要:** 将非正交多址接入 (NOMA) 技术应用于无线光通信系统, 可以提高系统容量和频谱效率。首先阐述了基于无线光通信 (OWC) 的非正交多址技术的基本原理和系统结构, 并综述了功率分配、用户分组、波束控制等优化技术的研究进展。之后, 展示了该项技术与无人机 (UAV)、智能反射面 (IRS)、混合光/射频 (RF) 等新兴技术的融合, 这些融合技术可以使能更多的通信场景和需求。最后, 通过使用强化学习来优化一种新型无人机辅助无线光通信非正交多址方案, 并展示了该方案在新型系统中综合性能提升的效果。

**关键词:** OWC; NOMA; 功率域NOMA; 深度强化学习

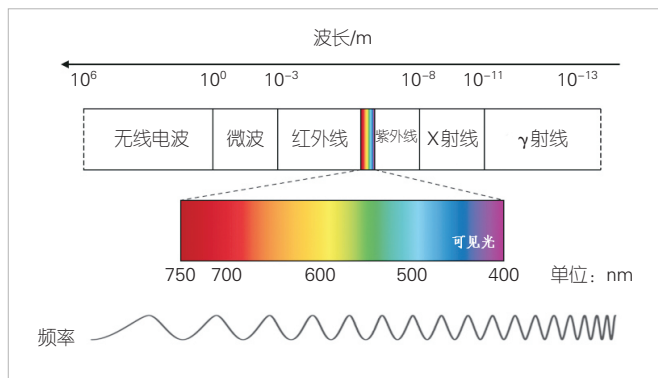
**Abstract:** Applying non-orthogonal multiple access (NOMA) technology to optical wireless communication (OWC) systems can improve system capacity and spectral efficiency. The basic principle and system structure of OWC-NOMA are first presented, and the related research progress including power allocation, user grouping, beam control, and other optimization techniques is summarized. Then, the integration of OWC-NOMA with emerging technologies such as unmanned aerial vehicles (UAV), intelligent reflecting surface (IRS), and hybrid optical-radio frequency (RF) is introduced, which is capable of facilitating more communication scenarios and requirements. Finally, the overall performance improvement of the system by applying reinforcement learning on a novel UAV-assisted OWC-NOMA scheme is demonstrated.

**Keywords:** OWC; NOMA; power domain NOMA; deep reinforcement learning

**引用格式:** 李亮, 董宇涵, 关迅, 等. 基于无线光通信的非正交多址接入技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 12-18. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401004

**Citation:** LI L, DONG Y H, GUAN X, et al. Non-orthogonal multiple access technology based on optical wireless communication [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 12-18. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401004

近年来, 无线光通信 (OWC) 技术受到了学术界和产业界的关注。当前, 射频 (RF) 通信存在频谱资源不足、设备间干扰严重, 以及电磁辐射等问题。OWC具有工作频带宽、免授权频谱、不受电磁干扰、时延低、成本低、部署方便等优点, 将作为6G时代射频通信技术的重要补充<sup>[1]</sup>。如图1所示, OWC包括红外、可见光、紫外等频段。目前, OWC技术主要包括可见光通信 (VLC)、自由空间光



▲图1 电磁波谱图

基金项目: 广东省自然科学基金 (2022A1515010209)

通信 (FSO)、紫外通信 (UVC) 等。其中, VLC 可以用于室内、水下、车载等场景, 具有巨大的应用前景; FSO 则凭借高速率远距离的优势, 用于深空通信、数据中心等场景; UVC 基于紫外光子散射, 具有非视距、抗干扰、低窃听等优势, 适用于短距离军用和民用场景。OWC 技术的研究领域涵盖器件、物理层技术、异构组网和高速光互联, 涉及多种技术的创新。可以预见, OWC 技术将在 6G 时代大放异彩, 成为射频通信技术的重要补充, 并与之有机融合以提供更好的服务。

传统的 OWC 系统通常采用正交多址接入 (OMA) 技术, 如频分多址接入 (FDMA)、时分多址接入 (TDMA)、码分多址接入 (CDMA)、正交频分复用多址接入 (OFDMA) 等, 来实现多用户接入。这些技术的基本原理是将信道的频率、时间或码域划分为正交的子信道, 然后分配给不同的用户。然而, 这些技术所能服务的最大用户数量受限于可用正交资源的数量, 并存在信道利用率低、信道分配复杂、同步或滤波要求高等问题。这些问题导致 OMA 技术无法提供足够的资源服务大量用户, 也不能提供大规模的覆盖和连接, 而这却是 6G 网络的重要要求之一<sup>[2]</sup>。

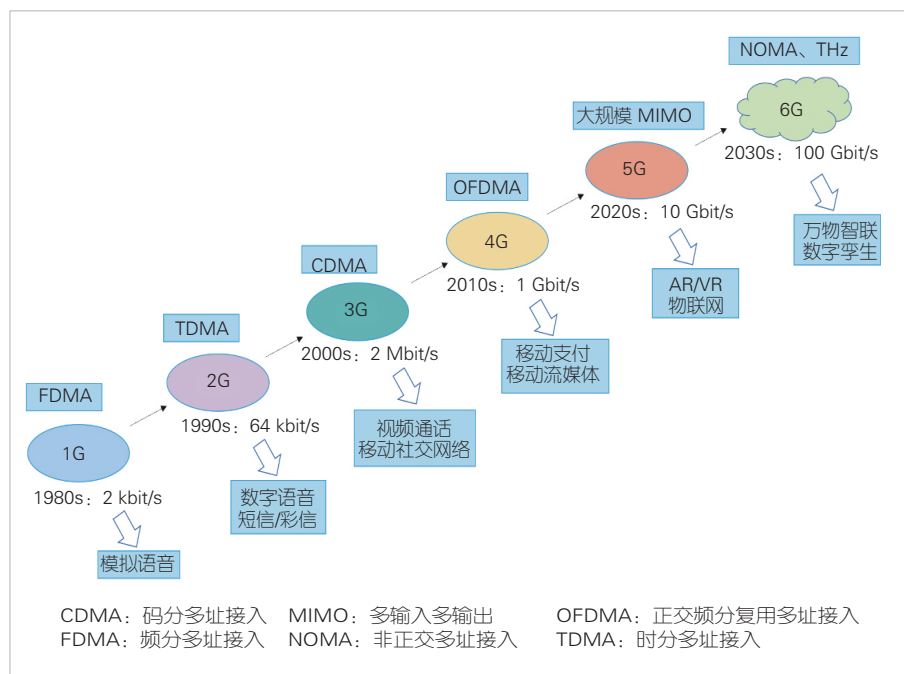
为了克服这些缺点, 一种新型的多址技术——非正交多址接入 (NOMA) 被提出。NOMA 技术的基本思想是允许多个用户在一个时频资源块上同时传输信息, 从而提高信道的利用率和系统的容量。如图 2 所示, 在 1G—5G 时代中, 研究者分别应用 FDMA、TDMA、CDMA、OFDMA 以及大规

模多输入多输出 (MIMO) 技术来提升通信速率、增加用户接入数量。相对于 4G, 尽管 5G 的性能有了显著改进, 但仍无法满足超低时延、超密集连接、超低功耗的需求。而 NOMA、太赫兹 (THz) 等技术将作为 6G 时代的重要技术, 有效满足复杂场景下低成本、低时延、高吞吐、超密集连接的需求<sup>[1]</sup>。NOMA 技术包括功率域非正交多址 (PD)-NOMA 和编码域非正交多址 (CD)-NOMA 两种类型。PD-NOMA 是通过在发射端对不同用户的信号进行不同的功率分配, 然后在接收端利用连续干扰消除 (SIC) 等技术来实现多用户接入的。CD-NOMA 是通过在发射端对不同用户的信号进行不同的编码, 然后在接收端利用联合检测技术来实现多用户接入的<sup>[3]</sup>。

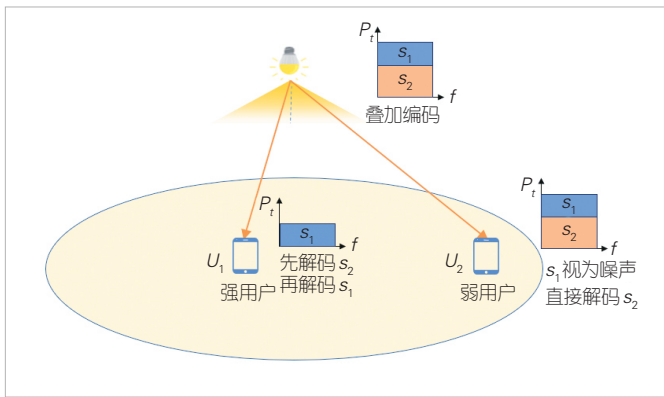
基于 OWC 的 NOMA 技术是将 NOMA 技术应用于 OWC 系统的一种通信技术, 可有效地提高 OWC 的频谱效率和系统容量, 同时也可以降低系统的复杂度和同步要求<sup>[2]</sup>。PD-NOMA 在 OWC 系统中具有良好的适用性, 主要有以下几个原因: 首先, NOMA 在执行 SIC 解码过程时, 需要准确的信道状态信息 (CSI) 来辅助实现用户复用、解码顺序、功率分配等一系列的功能。在射频通信系统中, 接收端及时获取准确的 CSI 是不容易的, 这是在射频通信中应用 NOMA 的一个主要的限制。但是在 OWC 系统中, 信道状态大多数时间里都是恒定的或者准恒定的, 只会随着用户位置的变化而变化。其次, NOMA 在高信噪比 (SNR) 场景下可以获得更优的性能。在 OWC 系统中, 光源与探测器之间距离较近且多为视距 (LOS) 链路, 因此 SNR 很高。最后, 在 OWC 系统中, 可以动态调整光源和探测器的发射角度和视场角, 增强用户之间信道增益的差异, 从而可以更好地提升 NOMA 的性能。

### 1 系统结构

PD-NOMA 的主要目标是为不同用户设置不同的功率分配水平。下面我们以一个最简单的情形为例来介绍 PD-NOMA 的系统结构。如图 3 所示, 下行 OWC 基站服务两个用户, 距离较近的用户拥有更好的信道条件, 称为强用户, 而较远的称为弱用户。此时, 基站作为发射端, 为弱用户分配更高功率, 而为强用户分配低功率, 采用叠加编码 (SC) 的方式将这两个用户的期待信号合成, 并将叠加后的信号同



▲图2 移动通信技术的演进:从1G到6G



▲图3 无线光通信-非正交多址接入(OWC-NOMA)系统结构

时发送给这两个用户。而接收时，弱用户最先解码，并将强用户的信号视为噪声。强用户则需要经历SIC的过程，即首先解码弱用户信号并去除，然后解码自己的信号。拓展到多用户情形时，同样是从弱用户到强用户依次解码，每个用户都必须先解码出比自己信道条件弱的用户信号才能获得自己的信号。显然，随着用户数量的增加，解码过程也将变得更加复杂。并且信道估计的误差以及SIC过程中产生的误差，也会累计得更多。因此，我们有必要将NOMA与OMA的技术相结合，并将所有用户分割为多个小组，小组之间采用OMA的技术，小组内则采用NOMA技术。这样的技术方案可以更好地确保小组间不会互相干扰，从而进一步地提升频谱效率。

## 2 研究进展

NOMA在OWC系统中的应用目前已有大量的研究。早期的研究工作主要集中在通过理论推导和仿真实验来论证在VLC系统中NOMA相较于OMA的优势和性能提升。例如，H. MARSHOUD等<sup>[4]</sup>首次将NOMA技术引入VLC系统中，并提出了增益比功率分配(GRPA)的策略，建立了一个完整的NOMA-VLC网络框架。R. C. KIZILIRMAK等<sup>[5]</sup>在双用户场景的下行VLC链路中使用NOMA，并与基于OFDMA技术的VLC网络进行比较，仿真结果表明VLC中使用NOMA技术优于OFDMA技术。L. YIN等<sup>[6]</sup>针对下行VLC链路推导了系统覆盖概率的解析表达式，并给出了在高SNR条件下，NOMA相较于OMA的总速率增益的上限。作者通过理论和仿真结果证明了NOMA相较于OMA的性能增益，并且可以通过对LED的选择进一步扩大增益，从而实现更好的效果。

随着VLC系统中NOMA技术的应用，研究者将NOMA技术逐步拓展到了FSO以及UVC的非视距链路(NLoS)。例如，L. ZHANG等<sup>[7]</sup>采用了垂直腔面发射激光器(VCSEL)实现了基于NOMA的QAM-OFDM的OWC系统，通过调节功率

分配策略，实现两种不同数据流的同时传输，获得1.6 Gbit/s的传输速率。G. C. WANG等<sup>[8]</sup>考虑了基于离散时间泊松信道的非视距紫外CDMA和NOMA系统，并推导了可达速率、最佳功率分配的表达式。

近年来，研究者主要研究了功率分配、用户分组、波束控制等技术，进一步优化OWC-NOMA系统的性能。在NOMA系统中，影响系统性能最关键的因素就是对每个用户的功率分配。合理的功率分配是确保SIC解码过程的前提，也会影响系统的吞吐量、用户公平性等。因此，很多研究者提出了不同的功率分配策略，以最大化系统的总速率，最小化误码率，提高用户公平性等。例如，H. MARSHOUD等<sup>[4]</sup>提出了GRPA的算法，来确定用户的功率分配系数，从而最大化用户的总速率。

用户分组技术是指在OWC-NOMA系统中，将用户分为几个互不干扰的小组，每个小组之间对应OMA正交的子载波，而在小组内采用NOMA技术。用户分组技术在NOMA中同样至关重要。首先，NOMA在同一资源块中复用的用户数量是有限的，复用过多的用户会导致SIC过程无法执行。其次，有必要在动态的场景中，动态调整用户的分组，简单地将用户分组固定，这样会导致系统性能的下降。因此，很多研究者提出了不同的用户分组策略，以最大化系统的总速率，最小化用户间的干扰，提高用户公平性等为目标。例如，Q. LI等<sup>[9]</sup>提出了VLC-NOMA系统中自适应用户关联策略，并比较了无分组和固定分组的性能，通过仿真实验验证了用户分组对性能的影响。

最后，波束控制是OWC-NOMA系统中充分考虑了光源的指向性所产生的技术。随着近年来微机电系统(MEMS)的发展，光源和探测器都可以根据环境动态调整位置和方向，从而在OWC-NOMA系统中跟踪用户，提高信号强度，并在不同VLC接入点之间提供更平滑的切换。基于此，很多研究者提出了不同的波束控制策略，来优化前述的系统总速率、用户间干扰、用户公平性等指标。例如，Y. S. EROGLU等<sup>[10]</sup>研究了比例公平速率分配中的最优波束控制参数，特别是用户数量大于波束控制数量的情况。在这种情况下，通过分簇和功率优化，获得的总速率可以达到无转向方案和速率的13倍。

## 3 新兴技术的融合

### 3.1 无人机辅助通信

近年来，随着无人机技术的迅猛崛起，通信领域迎来了一场革命性的变革。无人机不再仅是高空俯瞰地表的遥感工

具，它正逐渐演变为多个领域的全方位服务平台。当前基于射频的无人机辅助通信技术存在频率不足、电磁干扰、能耗过高的问题。而将 VLC-NOMA 技术引入无人机辅助通信中，可以在通信的同时提供照明，更适用于救灾的场景，并且具有免许可频谱资源、高速率、低功耗、高安全性、强抗干扰能力的优势。因此，很多学者研究了无人机辅助 VLC-NOMA 系统的性能和优化问题。例如，Q. V. PHAM 等<sup>[11]</sup>研究了无人机功率分配和放置的联合问题，通过共同考虑最大功率约束来最大化总数据速率、用户的服务质量和无人机的位置。他们使用哈里斯鹰优化算法和前馈神经网络来输出无人机的位置和功率分配。A. SULEIMEN 等<sup>[12]</sup>采用了一种实验方法来验证无人机辅助 VLC-NOMA 系统的可行性，并通过优化无人机位置来最大化下行链路系统的总容量，表现出良好的误码率和吞吐量性能。

### 3.2 智能反射面

智能反射面 (IRS) 是一种利用超材料和无源器件实现对电磁波反射的技术，它可以根据不同的通信场景和需求，动态调整反射单元的参数，从而改变信号的幅度、相位等特性，实现信号波束成形的控制。IRS 具有低成本、低复杂度、高灵活性、高性能等优势，可以用于解决信号盲区，提升通信安全，提高通信质量。

传统的 OWC 系统在面临多用户接入的场景时，往往会存在个别用户由于障碍物遮挡处在光信号的盲区，从而无法建立直射链路的问题。将 IRS 应用于 OWC-NOMA 系统中，可以制造出反射路径，服务光信号盲区的用户，完成多用户接入的需求。例如，Y. H. JIAN<sup>[13]</sup>等提出将空间光调制器 (SLM) 作为 IRS 进行光束控制，通过理论和实验分析了 SLM 在担任 IRS 时的一些特点。基于 SLM 的 IRS 可以独立同时控制多个波束，从而实现多用户的接入需求。P. SINGH<sup>[14]</sup>等通过在无人机上搭载 IRS 解决基站与移动用户之间的跳区问题，并设计了基于 SNR 的镜像分配策略，将 IRS 的多个镜像单元分组并分配给用户，从而实现了每个用户的最大吞吐量和比例公平。

### 3.3 混合光/射频技术

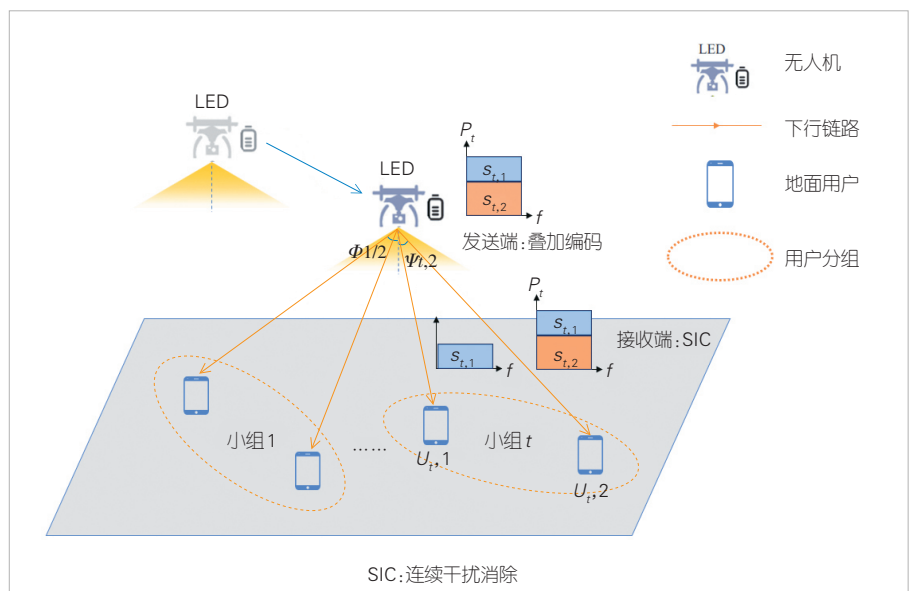
在 6G 的愿景中，OWC 并非要取代射频通信，而是作为射频通信的重要补

充。OWC 在下行直射链路中展示了其高速率、低延迟、低能耗的优势；但是当面临非直射链路以及上行链路时，与射频通信系统互补是一个很好的选择。因此，开发出混合 OWC/RF 技术，从而融合 OWC 和 RF 各自的优势很有必要。M. B. RAHAIM<sup>[15]</sup>等已经证明了混合 RF/VLC 网络可以显著提升能量效率，扩大服务范围，提高总系统容量，可以作为室内通信网络的优先选择。将 NOMA 技术引入 RF/OWC 系统同样是有利的。D. Y. SHI<sup>[16]</sup>等提出了一种与 NOMA 相结合的混合 RF-VLC 链路，支持多用户同时从服务器获取数据，以及从本地物联网设备中获取传感器数据。由于 RF 与 VLC 信道之间不存在干扰，以及 NOMA 可以分配给用户更多的时频资源，这些因素有效提高了通信性能并降低了误码率。

## 4 基于强化学习的无人机辅助 VLC-NOMA

如图 4 所示，考虑一个无人机辅助 VLC 系统。无人机通过搭载 LED 可以同时实现通信和照明的服务，以应对灾后救援、流量卸载等场景。为应对当前商用 LED 中调制带宽不足的问题，考虑引入 NOMA 技术来提高系统的频谱效率和用户接入的数量。

在无人机辅助 VLC-NOMA 系统中，需要联合优化无人机的轨迹、用户分组和功率分配从而提升系统性能。这是一个非凸且 NP-hard 的问题，传统的优化算法难以求解。强化学习是机器学习的一个重要分支，可通过与环境交互获得奖励，进而指导智能体学习最优决策，达到累计奖励最大化的目标，非常适用于应对无人机辅助通信中轨迹规划的序列决



▲图 4 无人机辅助可见光通信-非正交多址 (VLC-NOMA) 系统

策问题。

#### 4.1 系统模型和问题表述

对于通信信道，考虑无人机和地面用户之间的 LoS 链路，无人机和用户  $U_{i,k}$  之间的信道增益可以表示为<sup>[11]</sup>：

$$h_{i,k} = \begin{cases} \frac{A(m+1)}{2\pi d_{i,k}^2} g(\psi_{i,k}) T_s(\phi_{i,k}) \cos^m(\phi_{i,k}) \cos(\psi_{i,k}) \\ 0 < \psi_{i,k} < \Psi_c \\ 0, & \psi_{i,k} > \Psi_c \end{cases}, \quad (1)$$

其中， $\psi_{i,k}$ 、 $\phi_{i,k}$  和  $\Psi_c$  分别是入射角、辐照度角、接收器视场的半角， $A$  是探测器面积， $d_{i,k}$  是无人机到用户  $U_{i,k}$  的距离， $T_s(\phi_{i,k})$  为滤光片增益。 $g(\psi_{i,k})$  表示光学集中器的增益，当  $0 \leq \psi_{i,k} \leq \Psi_c$  时， $g(\psi_{i,k}) = \frac{n_r^2}{\sin^2 \Psi_c}$ ，否则为 0。 $m$  与发射器半发散角  $\Phi_{1/2}$  有关，并且  $m = -\ln 2 / \ln(\cos \Phi_{1/2})$ 。

我们将总带宽  $B$  平均划分为  $T$  个子信道，对应不同无干扰小组。小组内采用 NOMA 方式实现时频资源共享。考虑 NOMA 中最简单的情况，即每小组 2 个用户，并假设  $h_{i,1} \geq h_{i,2}$ 。根据 NOMA 的规则，功率分配系数  $a_{i,1} \leq a_{i,2}$ ，且  $a_{i,1} + a_{i,2} = 1$ ，可以得出  $a_{i,1} \leq 0.5$ 。则小组  $t$  中所有用户的下行可达速率可以表示为：

$$R_t = \underbrace{\log_2 \left( 1 + \frac{h_{i,1} a_{i,1} P_t}{n_0} \right)}_{R_{i,1}} + \underbrace{\log_2 \left( 1 + \frac{h_{i,2} a_{i,2} P_t}{n_0 + h_{i,2} a_{i,1} P_t} \right)}_{R_{i,2}}. \quad (2)$$

在给定功率  $P_{\max}$  时，以最大化所有用户的总速率为目标，优化问题可以数学表示为：

$$\begin{aligned} & \max_{w, \mathcal{T}, \alpha} \sum_t R_t \\ & \text{s.t. } h_{i,1} \geq h_{i,2} \\ & \quad a_{i,1} \leq 0.5 \\ & \quad R_{i,k} \geq R_{th} \\ & \quad w \in \mathcal{D} \\ & \quad P_t \geq 0 \\ & \sum_{t \in \mathcal{T}} P_t \leq P_{\max}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $w = (x_u, y_u, z_u)$  是无人机位置， $\mathcal{T}$  为用户分组策略， $\alpha = \{a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{T,1}, a_{T,2}\}$  为功率分配系数。优化  $\{w, \mathcal{T}, \alpha\}$  受到如下多个约束：NOMA 功率分配规则； $R_{th}$  是所有用户满足服务质量 (QoS) 条件的最小速率要求；无人机限制在  $\mathcal{D}$  区域内飞行；每小组  $t$  的功率非负且总和不超过总功率  $P_{\max}$ 。该问

题非凸且 NP-hard，传统优化算法很难求解。此外，VLC 信道模型形式也导致传统凸近似算法不适合求解。因此，我们采用深度强化学习来解决该问题。

#### 4.2 深度强化学习算法

在强化学习中，环境通常被建模为马尔科夫决策过程，包括状态空间、动作空间、奖励、转移概率分布和折扣因子。公式 (3) 中的优化问题可转化为强化学习环境。

状态空间包括无人机位置、用户的信道增益、用户通信速率、总通信速率，可表示为： $s = [w, h_{1,1}, h_{1,2}, \dots, h_{i,1}, h_{i,2}, R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{i,1}, R_{i,2}, \sum_{t \in \mathcal{T}} R_t]$ 。

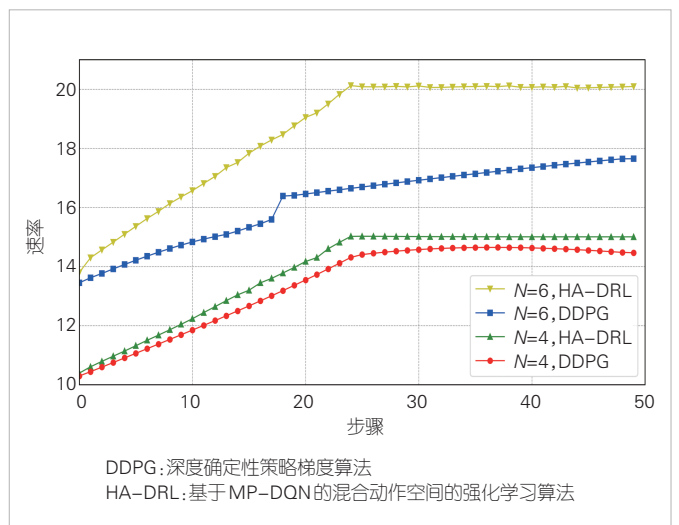
动作空间包括离散和连续两种类型，离散动作包括用户分组，所有分组的可能性为  $K$ ；连续动作包括无人机位移和功率分配系数，可表示为  $x_k = (v_x, v_y, v_z, a_1, a_2, \dots, a_T)$ 。

奖励函数与总通信速率正相关，可表示为  $\mathcal{R} = \sum_{t \in \mathcal{T}} R_t - \mathcal{C}$ ，其中， $\mathcal{C}$  为一个常数，用来控制奖励值在一个合理的范围。

在算法层面，我们提出了基于多通道深度 Q 网络 (MP-DQN)<sup>[17]</sup> 的混合动作空间的强化学习 (HA-DRL) 算法来分别处理离散和连续的动作。为了体现混合动作空间的优势，我们还与单一连续动作空间的深度确定性策略梯度算法 (DDPG)<sup>[18]</sup> 进行比较。

#### 4.3 结果与分析

经过 2 500 个回合的训练后，我们将保存 HA-DRL 和 DDPG 的模型参数并测试。测试结果如图 5 所示，可以看出，当用户数量由 4 增加到 6 后，HA-DRL 相较于 DDPG 算法的



▲图5 不同强化学习算法的测试曲线比较

优势进一步增加。这是因为随着用户数量增加,映射到离散动作所需要的连续动作也更多,动作空间增加的也更多。此时传统DDPG算法更难探索到更好的策略,训练也更容易收敛,相应的测试结果也会更差。

## 5 结束语

本文中,我们介绍了OWC-NOMA技术的基本原理、系统结构、研究进展和新兴技术的融合,展示了OWC-NOMA技术在6G时代的巨大应用潜力和应用前景。OWC-NOMA技术可以有效地提高OWC的频谱效率和系统容量,同时也可以降低系统的复杂度和同步/滤波要求。OWC-NOMA技术还可以与无人机、智能反射面、混合光/射频等一系列新兴的技术相结合,服务更多的通信场景和需求。最后,介绍了一项无人机辅助VLC-NOMA的研究进展,并通过深度强化学习方法优化了系统的性能。OWC-NOMA技术是一种具有创新性和前瞻性的通信技术,值得我们进行进一步的研究和探索。

## 参考文献

- [1] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(2): 905–974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835
- [2] MOHSAN S A H, SADIQ M, LI Y, et al. NOMA-based VLC systems: a comprehensive review [J]. Sensors (basel), 2023, 23(6): 2960. DOI: 10.3390/s23062960
- [3] DAI L L, WANG B C, DING Z G, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(3): 2294–2323. DOI: 10.1109/comst.2018.2835558
- [4] MARSHOUD H, KAPINAS V M, KARAGIANNIDIS G K, et al. Non-orthogonal multiple access for visible light communications [J]. IEEE photonics technology letters, 2016, 28(1): 51–54. DOI: 10.1109/pt.2015.2479600
- [5] KIZILIRMAK R C, ROWELL C R, UYSAL M. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for indoor visible light communications [C]//Proceedings of 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW). IEEE, 2015: 98–101. DOI: 10.1109/iwow.2015.7342274
- [6] YIN L, POPOOLA W O, WU X P, et al. Performance evaluation of non-orthogonal multiple access in visible light communication [J]. IEEE transactions on communications, 2016, 64(12): 5162–5175. DOI: 10.1109/tcomm.2016.2612195
- [7] ZHANG L, WEI Z X, CHEN Y J, et al. VCSEL-based multi-user optical wireless communication system using non-orthogonal multiple access [C]//Proceedings of 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020). IEEE, 2020. DOI: 10.1364/cleopr.2020.c3f\_5
- [8] WANG G C, GONG C, XU Z Y. Signal characterization for multiple access non-line of sight scattering communication [J]. IEEE transactions on communications, 2018, 66(9): 4138–4154. DOI: 10.1109/tcomm.2018.2830766
- [9] LI Q, SHANG T, TANG T, et al. Adaptive user association scheme for indoor multi-user NOMA-VLC systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(5): 873–877. DOI: 10.1109/lwc.2023.3247420
- [10] EROGLU Y S, ANJINAPPA C K, GUVENC I, et al. Slow beam steering and NOMA for indoor multi-user visible light communications [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2021, 20(4): 1627–1641. DOI: 10.1109/tmc.2019.2960495
- [11] PHAM Q V, HUYNH-THE T, ALAZAB M, et al. Sum-rate maximization for UAV-assisted visible light communications using NOMA: swarm intelligence meets machine learning [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(10): 10375–10387. DOI: 10.1109/jiot.2020.2988930
- [12] SULEIMEN A, KIZILIRMAK R C. UAV assisted vehicular communication with VLC using NOMA [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/csndsp49049.2020.9249511
- [13] JIAN Y H, WANG C C, CHOW C W, et al. Optical beam steerable orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) non-orthogonal multiple access (NOMA) visible light communication using spatial-light modulator based reconfigurable intelligent surface [J]. IEEE photonics journal, 2023, 15(4): 1–8. DOI: 10.1109/jphot.2023.3294834
- [14] SINGH P, BOHARA V A, SRIVASTAVA A. On the optimal assignment of mirror element in UAV and OIRS-assisted OWC based architecture [C]//Proceedings of IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). IEEE, 2023: 1–7. DOI: 10.1109/vtc2023-spring57618.2023.10199990
- [15] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid Radio Frequency and broadcast Visible Light Communication system [C]//Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2011: 792–796. DOI: 10.1109/glocomw.2011.6162563
- [16] SHI D Y, ZHANG X, SHI L N. A joint backscatter and VLC-NOMA communication scheme for B5G/6G umMTC system [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2021: 1–4. DOI: 10.1109/bmsb53066.2021.9547027
- [17] BESTER C J, JAMES S D, KONIDARIS G. Multi-pass Q-networks for deep reinforcement learning with parameterised action spaces [EB/OL]. (2019-05-10) [2024-01-04]. <https://arxiv.org/abs/1905.04388>
- [18] LILLICRAP T, HUNT J J, PRITZEL A, et al. Continuous control with deep reinforcement learning [EB/OL]. (2019-07-05) [2024-01-04]. <https://arxiv.org/abs/1509.02971>

## 作者简介



李亮, 清华大学深圳国际研究生院在读硕士生; 主要研究方向为无人机辅助无线光通信, 具体包括无人机路径规划、深度强化学习等。



**董宇涵**，清华大学深圳国际研究生院副教授、数据与信息研究院院长助理，IEEE Senior Member、中国光学工程学会高级会员；长期从事无线通信与网络、机器学习与优化、智能传感器网络及应用、人工智能与医疗、智能交通车路协同等方面的研究；作为项目（技术）负责人承担国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、省部级项目、企业委托项目30余项；发表论文200余篇，申请专利60余项，授权专利40余项。



**关迅**，清华大学深圳国际研究生院助理教授、加拿大拉瓦尔大学客座教授；主要研究方向包括光通信、光电集成、通信系统与信号处理；担任《IEEE JSAC》《Journal of Lightwave Technology》《IEEE Photonics Technology Letters》等国际期刊审稿人和IPC、ONDM等多个国际会议的程序委员会成员；主持和参与多项各级科研项目；发表论文50余篇。



**宋健**，清华大学电子工程系教授、清华大学深圳国际研究生院数据与信息研究院副院长，IEEE Fellow，IET Fellow，中国电子学会会士，中国通信学会会士，国际电联《智能融合网络》创始主编，《IEEE Transaction on Broadcasting》副主编，《IEEE Access for BTS》主编，现任清华大学数字电视技术研究中心主任，数字电视国家工程实验室（北京）主任；主要研究方向为无线数字广播、网络融合、无线通信、可见光通信与电力线通信等；发表论文300余篇，授权专利80余项，出版中英文专著6部。



**张晓平**，清华大学鹏瑞教授、清华大学深圳国际研究生院数据与信息研究院院长，加拿大工程院院士，加拿大工程研究院院士，IEEE Fellow，清华-伯克利深圳学院（TBSI）信息和数据科学首席教授，《IEEE 信号处理专刊》主编，IEEE 信号处理学会图像视频及多维信号处理技术委员会主席，IEEE 信号处理学会杰出讲座学者以及IEEE 电路和系统学会杰出讲座学者；研究方向为信号处理和大数据的理论及应用，主要从事统计模型、信号处理、机器学习和人工智能、物联网和电子信息系统、多媒体、生物信息及金融经济模型和大数据等方面的研究。