

## 面向6G多维扩展的新型多址接入技术综述

逢小玮<sup>①</sup> 蒋旭<sup>②</sup> 卢华兵<sup>①</sup> 赵楠<sup>\*①</sup>

<sup>①</sup>(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116024)

<sup>②</sup>(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209)

**摘要:** 随着移动通信技术的不断演进,第6代移动通信(6G)将实现从万物互联到万物智联的跨越,满足更高的数据需求和更广泛的应用场景。新型多址接入技术和多维扩展技术将在6G中协同发挥作用,为构建高效、智能、可靠的通信网络提供关键支持,满足未来通信的多重需求。该文旨在探讨新型多址接入技术在6G多维扩展通信网络中的应用潜力。首先,该文对比了传统多址接入技术与6G潜在新型多址接入技术,并重点阐述了非正交多址接入技术在提升频谱效率和系统容量方面的优势。然后,详细介绍了卫星通信、无人机(UAV)通信和智能反射面(IRS)等多维扩展技术在6G场景下的优势。进一步,讨论了新型多址技术与卫星通信、UAV以及IRS相结合的优势及协同应用。最后,探讨了基于新型多址接入技术的多维扩展网络中的关键技术挑战,包括大规模多入多出技术、太赫兹技术、通感算一体化、用户信息安全、不完美信道状态信息(CSI)估计,同时对新型编码技术、人工智能和机器学习等研究方向进行了展望。

**关键词:** 6G移动通信; 多维扩展; 新型多址接入技术; 卫星通信; 无人机; 智能反射面

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)YU-0001-12

DOI: [10.11999/JEIT231265](https://doi.org/10.11999/JEIT231265)

## An Overview of Novel Multi-access Techniques for Multi-dimensional Expanded 6G

PANG Xiaowei<sup>①</sup> JIANG Xu<sup>②</sup> LU Huabing<sup>①</sup> ZHAO Nan<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

<sup>②</sup>(School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** With the evolution of mobile communication technology, the Sixth-Generation (6G) wireless networks will achieve a leap from the internet of things to the internet of intelligent things, meeting higher data demands and broader application scenarios. Novel multiple access technologies and multidimensional expansion techniques will jointly play a role in 6G, providing crucial support for building an efficient, intelligent, and reliable communication network to meet the diverse demands of future communications. Therefore, this review paper aims to explore the application potentials of novel multiple access technologies in multidimensional expansion 6G communication networks. Firstly, it compares traditional multiple access technologies with potential novel multiple access technologies in 6G, with a focus on the advantages of non-orthogonal multiple access technology in improving spectral efficiency and system capacity. Then, it provides a detailed introduction to the advantages and functions of multidimensional expansion technologies such as satellite communication, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), and Intelligent Reflecting Surface (IRS) in 6G scenarios. Furthermore, the advantages and collaborative applications of novel multiple access technologies in conjunction with satellite communication, UAV, and IRS are discussed. Finally, the paper discusses key technological

收稿日期: 2023-11-15; 改回日期: 2024-01-20; 网络出版: 2024-02-21

\*通信作者: 赵楠 [zhaonan@dlut.edu.cn](mailto:zhaonan@dlut.edu.cn)

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1807002), 国家自然科学基金(62101091, 62371087), 辽宁省应用基础研究计划(2023TH2/101300197)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2020YFB1807002), The National Natural Science Foundation of China (62101091,62371087), Application and Fundamental Research Planning Project in Liaoning Province (2023TH2/101300197)

challenges in a novel multi-dimensional extension network based on new multiple access technologies, including large-scale multiple-input-multiple-output, terahertz technology, integrated sensing, communication, and computing, user information security, and imperfect Channel State Information (CSI) estimation, while also providing prospects for new coding technologies, artificial intelligence and machine learning.

**Key words:** The 6th-generation wireless networks; Multi-dimensional expansion; Novel multiple access technology; Satellite communication; Unmanned aerial vehicle; Intelligent Reflecting Surface(IRS)

## 1 引言

随着5G技术的成功商用,移动通信与垂直行业的结合极大拓展了无线通信的广度和深度,为自动驾驶、智能工厂、虚拟现实等创新应用的涌现奠定了基础<sup>[1]</sup>。然而,随之而来的庞大数据需求以及日益复杂的通信场景催生了下一代移动通信系统,即第6代移动通信(6G)<sup>[2]</sup>。我国IMT-2030推进组发布的《6G总体愿景与潜在关键技术》白皮书<sup>[3]</sup>提出,6G将成为连接真实物理世界与虚拟数字世界的纽带,最终实现“万物智联、数字孪生”的总体愿景。尽管6G的愿景令人憧憬,但实现它仍面临着诸多挑战。首先,6G需要在带宽、时延和连接性等性能方面实现显著提升。目前,5G所使用的频谱资源已相对有限,而6G需要向更高频段扩展<sup>[4]</sup>、在全频谱范围内实现更高的传输速率和容量,同时还要满足物联网、自动驾驶<sup>[5]</sup>等对实时性的苛刻需求。其次,6G将面临更为复杂的通信场景和要求,包括高速移动、工业自动化以及沉浸式体验等<sup>[6]</sup>,这将给资源分配、信息交互、以及网络的计算能力等方面带来更大的挑战。与此同时,6G还将实现从“以运营商为中心”到“以用户为中心”的网络范式转变,这意味着6G需要为用户提供更为灵活且可定制化的通信服务<sup>[7]</sup>。

为了应对这些挑战并实现6G网络的极致性能,一系列新兴技术和新功能的研究已经应运而生。潜在的6G关键技术包括超大规模多入多出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术、智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)、通感一体化、新型多址接入技术、太赫兹通信、星地一体融合组网、网络内生安全等<sup>[8]</sup>。其中,多址接入技术是决定网络容量和性能的核心问题,并对无线通信系统的成本和复杂度产生根本性影响<sup>[9]</sup>。前几代网络主要采用正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)的方式,限制了系统容量和连接规模。当前,学术界和工业界普遍认为,具有优越过载性能的非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)将成为后5G和6G的代表性多址接入技术<sup>[10]</sup>。虽然NOMA可以有效提高频谱效率,但由于用户资源非正交,接收机不可避免

地会存在用户间干扰;因此,需要采用多用户检测算法和串行干扰消除结构对接收机进行迭代设计。在实际应用中,还需要考虑将NOMA与其他技术(如MIMO技术)进行结合,在系统性能和复杂度之间实现折中<sup>[11]</sup>。

6G 框架和总目标显示,6G 将突破平面限制,支持立体空间沉浸式体验,超越地面,实现天地一体化无缝覆盖。将天基、空基和地基网络深度融合的空天地一体化网络,将在不同空间维度上发挥各自功能,被广泛认为是未来无线通信系统发展的必然趋势<sup>[12]</sup>。多维扩展技术,如卫星通信、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)通信和智能反射面(IRS)技术,已引起学术界和工业界广泛关注<sup>[13]</sup>。首先,构成天基网络的卫星通信具有覆盖范围广、接入能力强、稳定性高等优点,可丰富地面移动通信应用场景,实现超广域宽带接入能力<sup>[14]</sup>。其次,UAV得益于高机动性和快速部署的特点,能够灵活适应各类环境,包括灾区、海洋、荒野和城市复杂地域,从而实现大范围网络覆盖<sup>[15]</sup>。最后,作为6G潜在关键技术之一的IRS由于其低功耗、低成本、可编程等特性成为研究的热点<sup>[16]</sup>。IRS能够智能重构无线信道,为系统提供新的自由度,达到增强接收端期望信号功率、抑制干扰信号功率的效果,从而提高通信质量。将这些技术结合应用可以进一步增强6G网络的多维扩展能力,为多样化的6G应用提供有力支持,同时还提升了网络灵活性、覆盖范围和能量效率等技术指标。

新型多址接入技术在提高频谱效率和系统容量方面具有显著优势,在6G多维扩展网络中展现出巨大的应用潜力。本文旨在全面深入地探讨新型多址接入技术与6G多维扩展技术的结合和应用。首先,本文对6G新型多址技术和多维扩展技术的原理和优势进行了介绍;然后,针对基于多址技术的6G多维扩展网络进行了深入讨论,并对其中的关键技术和所面临的挑战进行了探讨。

## 2 6G新型多址接入技术

6G的各项性能指标将在5G基础上实现10~100倍的提升,而传统的正交多址接入已无法满足下一代无线网络对海量连接、超高速率和超低时延

的要求。为了应对这些挑战，新型多址接入技术致力于在有限的无线射频资源下，实现大量用户和设备的高效、灵活接入。本节首先剖析了传统多址接入技术的不足，然后介绍了6G富有潜力的新型多址接入技术及其特点。

### 2.1 传统多址接入技术及限制

根据资源复用方式，多址接入技术可划分为正交和非正交两类，如图1所示。OMA方案主要包括1G的频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)、2G的时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、3G的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)和4G的正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)。它们的主要特点如下。

(1) FDMA<sup>[17]</sup>：通过将频谱划分为多个子频段，为每个用户分配独立的不重叠的频段，并利用保护间隔避免相邻用户间的干扰。然而，这种频谱划分方式降低了整个系统的频谱效率，由于频谱资源有限，不足以支撑大量用户同时接入网络。

(2) TDMA<sup>[18]</sup>：将时域划分为多个时隙，使不同用户在不同时隙传输数据，从而避免干扰。然而，这种方式需要精确的时钟同步，且只能容纳有限的用户和数据流。

(3) CDMA<sup>[19]</sup>：允许多个用户共享相同的时频资源，但通过正交或准正交的扩频码对不同用户或数据流进行区分。然而，这一方法需要依赖扩频序列和复杂的信号处理，且存在强信号和弱信号之间的干扰问题，也称为“近-远问题”。

(4) OFDMA<sup>[20]</sup>：将时频资源划分成小的资源粒子，并动态分配给不同用户或数据流，从而保障了资源使用的灵活性。由于子载波数目较多，能够有效抑制频率选择性衰落。然而，对时频同步要求

较高，且子载波之间的正交性容易遭到破坏。

### 2.2 新型多址接入技术及其原理

多址接入技术的趋势是从正交向非正交转变，即允许多个用户共享相同的资源，而非为它们分配正交资源。新型多址接入技术的目标是使大量用户能够利用给定的无线资源高效、灵活地接入网络。基于非正交理念，以下介绍了一些可能的新型多址接入技术候选及其原理。

#### 2.2.1 功率域NOMA(PD-NOMA)

功率域NOMA(Power-Domain NOMA, PD-NOMA)的基本策略是在相同的时/频/码资源下，通过不同的功率区分用户。发送端根据功率分配原则为每个用户分配不同的发射功率，主动引入多用户干扰，在同一资源上叠加多个用户的数据信息；接收端根据接收信号的强弱，利用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)接收机依次恢复出各个用户的信息<sup>[21]</sup>。与传统的OMA相比，这种方法虽然增加了接收机复杂度，但是显著提高了频谱效率。从信息论角度看，功率域NOMA在发送端采用叠加编码，在接收端利用SIC技术分离叠加编码前的各个用户的信息时，可以在性能上优于传统的正交复用技术，并实现下行广播信道的容量界<sup>[22]</sup>。

#### 2.2.2 码域NOMA(CD-NOMA)

码域NOMA(Code-Domain NOMA, CD-NOMA)的核心思想是在相同的时/频资源下通过采用特定的扩频序列为多个用户提供服务。CD-NOMA所采用的扩频序列为稀疏序列或非正交低互相关性序列<sup>[23]</sup>。在2008年，低密度签名(Low-Density Signature, LDS)-CDMA<sup>[24]</sup>被提出，它利用LDS稀疏性采用了基于消息传递算法的多用户检测方式。此后，LDS-NOMA的概念进一步扩展到稀疏编码多

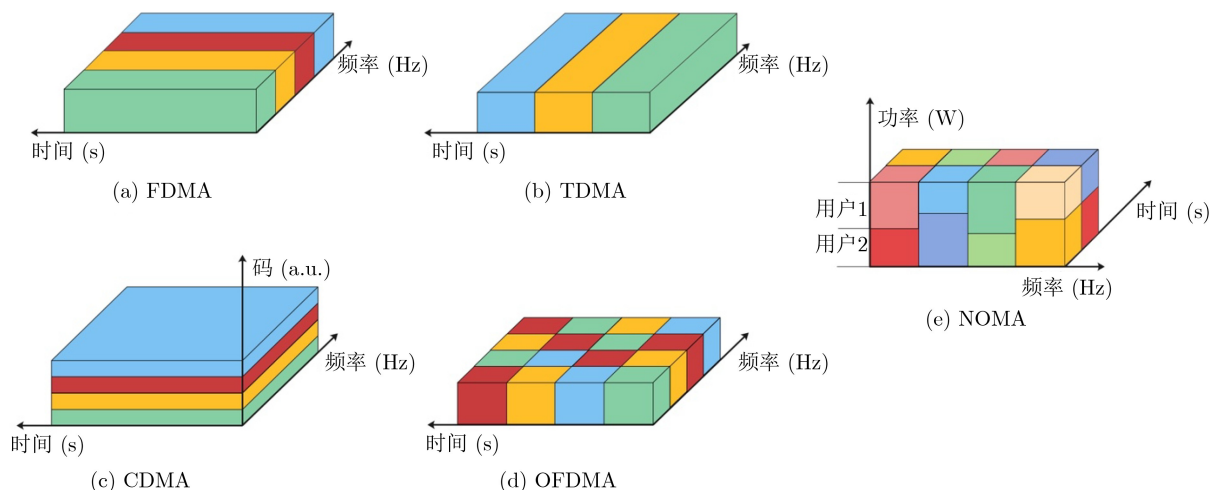


图1 正交与非正交多址接入方式资源利用图

址(Sparse Code Multiple Access, SCMA), 每个用户根据即时信息发送一个稀疏码字。此外, 第3代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)讨论中还提出了一系列基于序列的CD-NOMA方案<sup>[21]</sup>, 例如多用户共享接入、非正交编址接入和资源扩展多址。

### 2.2.3 空分多址(SDMA)

在5G大规模MIMO通信中, 为支持多终端的多流传输, 空分多址(Spatial Division Multiple Access, SDMA)技术至关重要。相较于单天线通信系统, 通过在发射端和/或接收端安装多个天线, 可充分利用额外的空间自由度<sup>[25]</sup>。SDMA的核心理念是在同一时间/频率/码域中服务多个用户, 通过空间域对用户进行区分, 从而实现更高的频谱效率。由于线性预编码复杂度低, 因此SDMA最常用的方法是线性预编码, 通过利用空间自由度设计合适的发射和/或接收波束成形, 有效减轻用户间干扰。然而, 受可用空间自由度所限, SDMA仅适用于欠负载和临界负载状态。

### 2.2.4 速率分拆多址(RSMA)

速率分拆多址(Rate Splitting Multiple Access, RSMA)是近年来建立在速率分拆概念基础上提出的新型非正交多天线传输方案。RSMA的主要思想是将用户信息分成公共部分和私人部分, 实现部分干扰解码和部分干扰作为噪声处理的能力<sup>[26]</sup>。这与SDMA和NOMA中使用的极端干扰管理策略形成了鲜明对比。当干扰较弱或较强时, RSMA可通过调整公共流和专用流的功率和内容, 自动转换为SDMA或NOMA。RSMA能够自然地衔接SDMA和NOMA, 包括在SDMA和NOMA之间的任何硬切换<sup>[27]</sup>。RSMA可在各种网络负载和用户信道条件下提高频谱效率、覆盖范围以及用户公平性, 并在信道状态信息不完美的情况下具有很高的鲁棒性<sup>[28]</sup>。

### 2.2.5 巨址接入(Massive Access)

互联网设备数量的巨大增长要求从根本上重新审视传统的多址接入技术, 以满足大规模机器类型通信(massive Machine-Type Communication, mMTC)的关键需求, 并采用适合大规模随机接入的新方案。对于mMTC来说, 基于授权的接入设计在支持大规模连接网络方面十分困难且效率低下。因此, mMTC应用中最有前途的接入控制模式是无授权随机接入, 巨址接入考虑了非正交介质接入和免授权接入控制。每个活动设备直接将其唯一的前置序列发送到基站, 而无需等待任何许可, 从而降低控制开销。基于非正交序列的免授权传输经常存在冲突, 即多个用户同时接入, 因此联合主

动用户检测和信道估计成为mMTC应用的关键问题<sup>[29,30]</sup>。

### 2.2.6 流体天线多址(FAMA)

流体天线系统打破了传统天线的空间限制, 通过软件控制与位置灵活的天线在预设空间内以最佳信号包络运行<sup>[31]</sup>。利用这一新兴天线技术, 多个用户可共享同一时间频率通道, 通过在每个用户端部署单个流体天线解决干扰问题, 这一方法被称为流体天线多址接入(Fluid Antenna Multiple Access, FAMA)。FAMA完全以用户为中心, 无需发射机与接收机之间的协调, 也不需要事先掌握干扰链路的信道信息。此外, FAMA用户呈现完全分散状态, 对一个用户的处理对其他用户无任何影响。其干扰抑制能力源自衰落现象, 自由度取决于环境中散射丰富程度和系统利用衰落包络的能力, 这些能力由每个用户处的端口数目和流体天线的尺寸等参数来决定<sup>[32]</sup>。

### 2.2.7 位分多址(LDMA)

随着天线数量的急剧增加, 超大规模天线阵列在近场的距离域引入了新的分辨率。这意味着许多通信过程发生在基于球形波的近场区域, 而非经典的基于平面波的远场区域。近场波束聚焦矢量在距离域的渐近正交性已被证明, 因此位分多址(Location Division Multiple Access, LDMA)的主要思想是利用近场波束的能量聚焦特性, 为不同角度、不同距离的不同用户提供服务, 同时避免产生严重干扰, 充分利用距离域的额外资源, 从而提高系统性能。针对LDMA的性能分析发现, 随着天线数目增加, 频谱效率可以达到渐近最优<sup>[33]</sup>。

## 3 6G多维扩展覆盖技术

当前, 全球移动通信网络主要覆盖陆地区域, 而对于偏远山区、海洋、沙漠、以及灾害现场等区域, 仍存在覆盖不足的问题。这对多维扩展技术的发展提出了迫切需求。在6G通信系统中, 卫星通信、UAV通信以及IRS技术等多维扩展技术的应用, 将为全球范围内的通信带来前所未有的便捷性和可靠性, 实现天地一体、覆盖全球的智能泛在无线网络<sup>[34]</sup>, 如图2所示。本节将重点介绍卫星通信、UAV通信和IRS技术等多维扩展技术在6G中的优势及其应用。

### 3.1 卫星通信

随着信息技术产业的数次迭代, 如今已步入空天信息时代, 卫星通信日渐成为推动移动通信领域发展的重要动力之一。卫星通信技术利用人造地球卫星作为中继站进行无线电波转发, 实现不同地面站之间的通信。根据运行的轨道高度, 卫星通信系

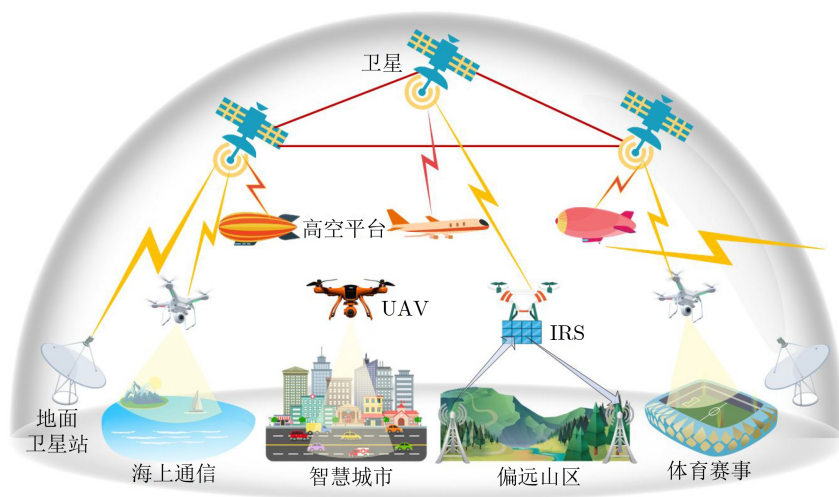


图2 空天地一体化网络架构

统可分为高、中、低轨道3种类型。其中，低轨道卫星因其相对较低的时延、路径损耗以及开发成本，备受卫星通信领域的青睐。卫星通信主要具有以下优势：

(1)覆盖范围广，通信距离远，不受地理条件限制，最大传输距离可达18 000 km。

(2)可用频带宽，通信容量大。卫星通信主要工作于微波频段，即1~10 GHz，可实现高达100 Mb/s的高速数据传输。

(3)可灵活组网，便于实现多址通信。卫星通信技术允许多种业务在同一通信网内组网，为用户提供更丰富的服务。

(4)传输质量高、稳定性强。无线电波主要在接近真空的外层空间传播，可以有效地减少传输损失，具备良好的抗干扰能力。

### 3.2 无人机通信

与卫星通信平台相比，UAV系统具有构筑简便和通信高速、灵活的优点。近年来，UAV数量大幅增长，利用蓬勃发展的5G及未来6G蜂窝网络支持UAV通信成为最具前景且成本效益高的方法。已有的UAV应急通信系统能够在基础设施遭到破坏的地区搭建临时通信平台，提供服务区域无线覆盖。相比高空通信平台，低空UAV通信系统可以根据需求提供性价比更高的通信服务，并为未来的无线网络提供显著的灵活性。UAV通信的主要优势包括：

(1)视距信道：相较于传统地面通信，UAV更容易与地面用户建立视距(Line of Sight, LoS)通信，提供较高质量用户接入服务，或为卫星通信提供中继转发服务。通过灵活调整自身状态，UAV还可获得更好的无线信道质量。

(2)按需部署：UAV是一种小型飞行器，具有

很好的机动性和可操控性，尤其适用于突发的、需要快速部署的应用场景。通过精心设计UAV悬停位置或飞行轨迹，可提高用户的网络连接性和通信速率，提供更稳定的通信服务。

(3)成本效益高：随着通信设备小型化以及UAV制造技术的不断进步，UAV通信成本也持续降低、将紧凑轻便的基站或中继器安装在UAV上变得越来越可行。因此，UAV通信系统具有建设速度快、投资少、经济效益和社会效益好等优点。

### 3.3 智能反射面技术

IRS可以改变现有无线通信网络范式，被视为一项革命性技术，同时也是6G无线通信系统的有力候选技术之一。IRS本质上是一种2维薄层人造电磁表面结构，由大量无源散射单元组成，并通过软件编程的方式控制散射单元的电磁特性，以调整入射信号的反射幅度和相移。IRS独特之处在于它可以重塑无线传播环境，且具备低功耗、易部署、灵活性和兼容性强等特点。具体而言，IRS技术的优势如下：

(1)易于部署：IRS具有轻量级的特点，可以轻松附着在建筑物的墙壁、天花板等表面，并且可以灵活移除，这为实际部署提供了高度的灵活性和卓越的兼容性。

(2)被动波束成形：IRS可以通过调整散射单元的相位来控制信号反射，从而实现被动波束成形。这意味着可以将信号聚焦到理想的接收机位置，并同时抑制其他方向上的干扰信号。

(3)增强容量和能效：使用低成本的IRS可以提高点对点通信链路的容量，并减少系统功耗，从而增加能效。此外，还能改善小区边缘用户的信号质量，并提升多用户网络总速率性能。

(4)探索新兴无线应用：IRS技术不仅可用于提

高传统无线通信系统性能, 还可广泛用于各种新兴应用领域, 如UAV通信、无线电窃听防范、无线能量传输和移动边缘计算等。

#### 4 基于多址技术的6G多维扩展

在6G通信时代, 多址技术将与其他多维扩展技术如卫星通信、UAV通信、IRS等相结合, 为通信网络带来前所未有的机遇与挑战。卫星通信带来了全球性覆盖, 将人类联系到了地球的最远角落。UAV通信将提供高度灵活的通信解决方案, 为垂直行业和公共服务等领域带来深刻变革。而IRS具有可编程特性, 能够操控无线信道, 减小信号传输盲区。本节将深入探讨卫星通信、UAV通信以及IRS与新型多址接入技术的融合, 揭示其应用场景和优势。表1总结了6G多维扩展网络与新型多址接入技术相结合的研究成果。

##### 4.1 卫星结合多址技术

6G通信有望进一步推动卫星通信的发展, 通过将多址技术与卫星通信相结合, 可以实现更高的频谱效率和更低的信号延迟。例如, 在全球范围内, 多址技术能让卫星更高效地服务于不同地区的用户, 扩大覆盖范围, 提高连接密度, 使得全球范围内的通信变得更加可靠。

NOMA可以在同一时频资源内叠加多个用户的传输功率以提高传输容量, 并通过免授权方案减少传输延迟。基于NOMA的卫星通信网络模型如图3(a)所示, 在Ka波段工作且具备多波束功能。相较于单波束卫星通信, 多波束卫星通信通过波束间的频率复用来集中能量并提高网络总容量。同时还可以根据需求灵活调整天线方向, 以满足多点通信和星载交换的要求。低轨卫星利用多个点波束覆盖多个不同的地面区域。在进行叠加编码操作之前, 发射端将通过调度策略选择要服务的用户。以其中一组用户为例, 在下行场景中为两个用户分配不同的功率, 并通过线性叠加这两个用户的信号进行广播。在接收端, 则采用不同的检测策略为各自用户执行解码操作。假设用户1更靠近波束的边缘和/或具有较低的天线增益, 则被分配更多的传输功率,

以确保由用户2引起的内部干扰相对较低, 并且它可以直接解码自己的信息; 而用户2采用SIC策略首先解码用户1的信息并消去干扰, 然后再解码自己的信息, 这是因为它获得了较少功率资源。

卫星通信在传输过程中易受到地面障碍物或建筑物影响, 导致视距传输受阻, 造成大规模的阴影衰落。这些问题可能会损害卫星系统的用户体验。基于中继转发的星地协作传输技术被广泛认为是一种有效手段, 用于改善卫星通信质量。相较于传统地面中继, UAV作为空中中继具有机动性强、通信组网方式灵活等优势, 能够协助卫星与地面用户进行通信, 增强接收信号功率、提高系统容量。另一方面, 认知无线电技术也被认为是提高频谱效率的有效方法, 通过对空闲授权频段的再次利用, 提高了无线频谱的利用率, 从而成为解决无线频谱资源匮乏问题的重要途径。图3(b)所示为UAV辅助的认知星地融合网络。在这一网络中, UAV充当空中中继辅助卫星服务主用户, 而地面基站则根据主用户频谱的利用情况, 确保主用户服务质量不受到明显影响的同时, 采用NOMA技术服务多个地面(次)用户。一方面, 认知无线电可以确保卫星网络(被视为主网络)和地面网络(作为次级网络)之间的频谱共享, 从而提高整个系统的频谱利用效率; 另一方面, 在星地融合网络中引入NOMA允许多个用户同时接入网络, 进一步提高了频谱利用率。

##### 4.2 UAV结合多址技术

通过将UAV与多址技术相结合, 通信网络能够为各种应用场景提供广泛支持。UAV作为空中通信平台可以提供更广范围的覆盖, 其高机动性使得它们能够快速适应不同的通信环境和需求。同时, 多址技术的应用可以提高信道容量, 减少通信时延, 增加连接密度。采用NOMA的两种应用方法包括基于NOMA的UAV辅助通信<sup>[41]</sup>和NOMA辅助的蜂窝连接UAV<sup>[37]</sup>, 如图4所示。将UAV集成到蜂窝网络中是一项双赢的技术, 不仅为UAV相关产业和蜂窝网络运营商创造了大量新的商机, 还有助于实现网络立体覆盖性能。

如图4(a)所示, 在基于NOMA的UAV辅助通

表1 6G多维扩展网络中新型多址接入技术研究总结

参考文献	多址接入技术	多维扩展技术	研究场景	主要研究目的
[35]	NOMA	低轨卫星	物联网大规模接入	最小化网络总功耗
[36]	NOMA	卫星, UAV	空天地一体化中继	最大化无人机能效
[37]	合作式NOMA	UAV	蜂窝连接UAV	最大化上行加权和速率
[38]	RSMA	UAV	UAV服务地面用户	最大化用户加权和速率
[39]	NOMA	UAV, IRS	移动边缘计算	最大化无人机计算能力
[40]	NOMA	UAV, 可同时反射和透射的智能表面	室内外全覆盖	最大化网络和速率

信场景中，UAV充当空中基站，为地面基础设施超载或完全缺失的区域提供无线服务，例如车联网、临时热点和数据收集等。采用NOMA有助于UAV基站满足异构要求，并通过资源共享提高连接密度，在性能上显著优于OMA系统。同时，多天线UAV基站可以利用波束赋形能力和基于簇的NOMA设计为多个地面用户提供服务。此外，UAV的机动性为UAV辅助通信带来的新的设计自由度，可以通过设计UAV轨迹优化通信性能。然而这也给NOMA网络引入了新的挑战：由于在NOMA传输中，用户的解码顺序主要取决于其信道质量，而用户的信道质量会随UAV基站的移动而动态改变。因此，如何协同设计UAV轨迹、用户信息解码顺序以及资源分配是基于NOMA的UAV网络亟需解决的关键问题。

如图4(b)所示，将UAV集成到现有的蜂窝网络中作为空中用户与地面用户共享频谱，对缓解频谱

资源紧张问题具有关键意义。然而，由于LoS主导的空-地链路强度通常比传统的地面链路强得多，蜂窝连接UAV可能对地面无线通信网络造成严重干扰。鉴于UAV和地面用户设备与地面基站之间的信道不对称性类似于传统NOMA中的近-远场景，运用NOMA的SIC技术管理空地干扰成为一种有效的策略。在这一场景下，基站首先解码空中UAV用户的信号，然后解码地面用户的信号，即遵循上行NOMA原则。此外，还可以借助基站之间的高速可靠回传链路实现上行协作NOMA方案，选择部分基站优先解码UAV的信号，并将其传递给邻近基站以实现干扰消除。

### 4.3 IRS结合多址技术

通过动态控制信号的反射，IRS能够定制无线信道，扩展信号覆盖范围、改善用户公平性以及提高网络能效。除优化IRS反射模式外，其灵活部署还为重新配置有利于信号传输的无线传播环境提

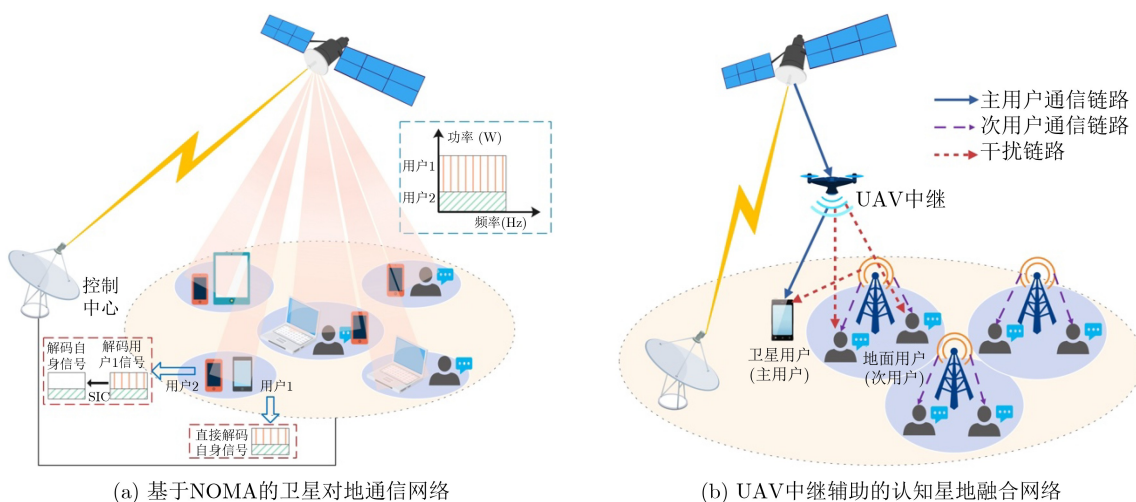


图 3 基于新型多址技术的卫星通信网络

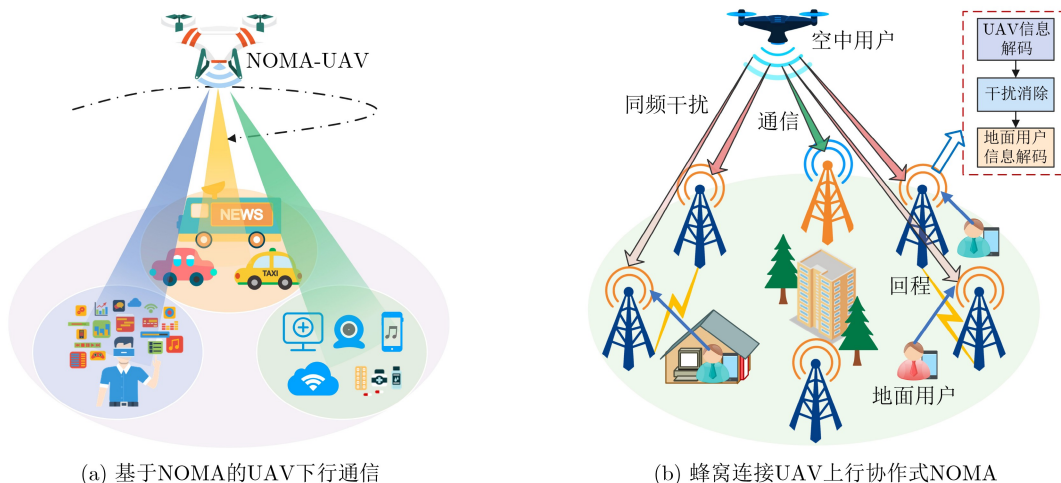


图 4 基于NOMA的UAV下/上行通信场景

供了另一个设计自由度。IRS与新型多址技术,尤其是NOMA的结合呈现出巨大的潜力,为满足未来6G网络的低延迟、大规模连接和数据速率方面的严格要求提供了潜在解决方案。将IRS引入NOMA网络不仅能提供额外信号分集,增强现有NOMA网络的性能,还能增加网络设计灵活性,可以利用更小的发射功率实现与传统MIMO-NOMA相当的性能。

对于仅采用NOMA而未配置IRS的系统,其性能增益将严重依赖于两个用户的信道状况。然而,在传统无线通信系统中,信道条件被视为仅由用户的传播环境决定且保持不变。IRS的引入为智能地重新配置用户的传播环境提供了可能,从而可以获得显著的NOMA性能提升。具体而言,当两个用户的信道增益相近时,结合IRS与NOMA为系统设计带来更多自由度。作为NOMA系统的关键组成部分,SIC解码顺序通常取决于用户的信道状况。而IRS可以通过调整反射系数和部署位置实现信道变化,提高NOMA网络的设计灵活性,实现“智能”NOMA网络设计。此外,使用IRS还可以减小多天线的NOMA网络中的约束。在传统的MIMO-NOMA网络中,发射端和接收端的天线数量需要满足一定约束,限制了基于簇的NOMA策略的实用性。借助于IRS提供的额外无源阵列增益,可以放宽这些约束条件,促进簇间干扰消除和簇内信号增强。图5(a)所示为一个典型的IRS-NOMA网络示意图,通过分布式部署IRS在不同用户簇附近以改善用户性能。每个IRS旨在增强其本地覆盖范围内的一个特定用户群的性能,这一分布式IRS增强的多簇NOMA策略适用于用户广泛分布的情况。

实际上,在地面密集网络中,受到现有基础设施(如建筑物外墙、灯柱和广告牌)的可用性限制,IRS的部署可能难以找到适当的安装位置。此外,

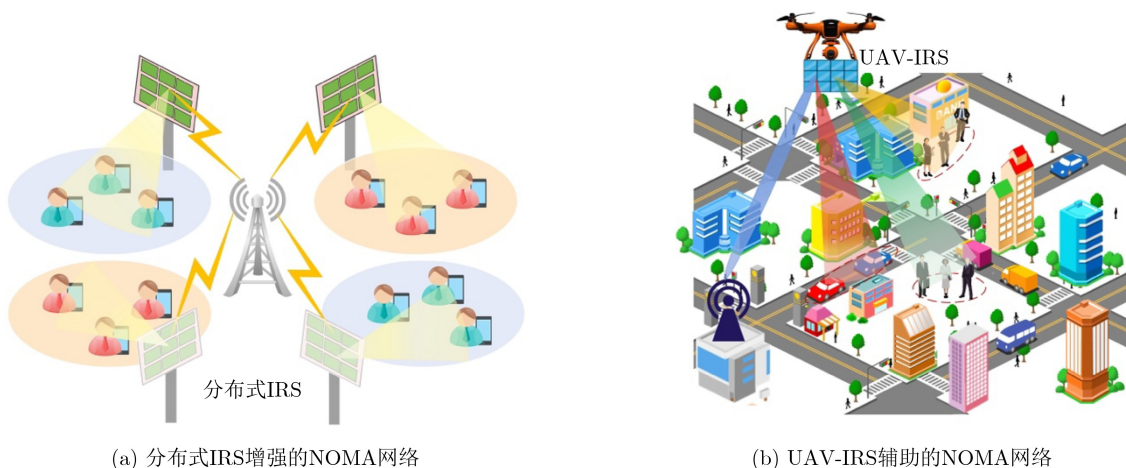
将IRS部署在建筑物外墙可能导致受到周围环境中其他建筑物的遮挡,从而影响覆盖范围。在这种情况下,由小型轻便的UAV携带IRS成为一种十分有吸引力的方案。UAV具有高机动性和灵活性,能够根据通信环境的变化动态调整其位置,从而为IRS提供新的放置自由度。当IRS安装在UAV上时,发射机和接收机可以通过IRS建立起虚拟LoS链路,从而实现全角度反射并扩展无线覆盖范围<sup>[42]</sup>。图5(b)所示为UAV携带的空中IRS辅助地面NOMA无线网络模型,利用IRS的可重构性和UAV的移动性可以为多组地面用户和车辆提供按需服务。NOMA为UAV-IRS辅助的通信提供了高度的灵活性和有效的资源分配。传统的NOMA根据信道条件判断强用户和弱用户以执行SIC解码,通过控制UAV的移动性和IRS的相移,可以重新配置这些信道条件。因此,UAV-IRS和NOMA的结合不仅可以增强频谱效率,还可以满足网络用户多样化的通信需求。

## 5 多维扩展多址接入的挑战与未来方向

卫星通信、UAV通信、IRS等多维扩展技术与新型多址接入技术的结合,为通信网络带来了巨大的潜力,然而也伴随着一系列挑战。本章将深入探讨这些技术融合面临的挑战与未来研究方向。

### 5.1 超大规模MIMO

大规模MIMO技术是实现6G网络高吞吐量和能效指标的关键技术之一。通过战略部署多种新兴地面与非地面网络节点,如卫星、高空平台、UAV和IRS,可以巧妙地控制网络拓扑和环境。与传统地面MIMO相比,这种新的MIMO形态可以改变无线信道特性,灵活适应不同网络环境,实现全频谱3D大规模MIMO架构。各种不同类型的天线将组成一个庞大的虚拟天线阵列,包括有源和无源、固



(a) 分布式IRS增强的NOMA网络

(b) UAV-IRS辅助的NOMA网络

图5 基于NOMA的IRS辅助网络场景



定和移动的天线，能够以智能且灵活的方式为用户提供服务。IRS辅助MIMO有助于优化信号传输路径，解决遮挡影响；还可以用于NOMA，在极低信噪比情况下提高可靠性，容纳更多用户。MIMO波束设计被认为是6G空口的基础，因此开发敏捷、可靠、低开销的波束管理系统是未来需要研究的重点。同时，MIMO性能主要受制于信道状态信息(Channel State Information, CSI)获取及预编码的精确性。随着天线阵列尺寸和规模不断增大，波束赋形和CSI实时获取将面临更大挑战。

## 5.2 太赫兹技术

随着每一代无线通信技术的发展，更高频率范围内的更宽频谱得以使用，而6G预计将进一步扩展无线频谱至太赫兹频段。太赫兹技术是6G无线通信的新机遇，在超高速率通信和超高分辨率感知方面展现出明显优势。在多维扩展多址接入通信网络中，太赫兹技术具有巨大的潜力，能够提供更大的带宽与更高的传输速率，但同时也面临着一些挑战，如太赫兹信号的传输距离相对较短，且易受大气吸收影响。通过利用IRS的波束赋形能力和UAV的高机动性，可解决建筑物遮挡等问题，提高信号质量、消除信号覆盖死角、保持高质量通信。太赫兹通信还有望在全息通信和超大容量数据传输等高速传输需求场景中发挥作用，但仍需攻克核心器件短缺、实时性及组网复杂性等技术挑战，充分挖掘太赫兹技术的应用潜力。

## 5.3 通感算一体化

受到6G新兴场景和业务需求的强烈驱动，通信-感知-计算融合网络成为新一代网络发展的必然态势<sup>[43]</sup>。通感算一体化网络不仅具备物理-数字空间感知能力，还拥有泛在智能通信与计算能力。以超能交通新场景为例，网络不仅要为UAV和无人驾驶车辆提供通信服务，还要全面感知环境并提供实时计算。通感算融合网络的特点在于各功能的互惠互助，通过深度耦合以提升整体性能。具体而言，通信功能可以利用感知信息优化性能，而计算能力则在感知和通信过程中发挥关键作用。然而，通感算融合网络也面临诸多挑战。首先，理论研究需建立通感算一体化性能指标；此外，通感算融合空口设计需通过一体化波形、参考信号等平衡各方面需求；最后，通感算组网设计需解决同步误差、信号干扰和高速移动性等问题。

## 5.4 用户信息安全

由于无线电波的广播特性，无线网络中的通信安全性始终受到关注，特别是在UAV网络中。UAV视距信道特性可能导致用户信息暴露，无论

空中还是地面窃听者，都容易与UAV建立稳定的通信信道，从而引发信息泄露问题。另一方面，虽然NOMA技术可以显著提高频谱效率，但多个用户的信号共享同一频带，可能增加信号泄露和干扰的风险<sup>[44]</sup>。在UAV-NOMA网络中，信号泄露的风险更大，对用户数据安全构成严重威胁。物理层安全致力于利用信道传输特性，而不仅依赖于传统的密钥和网络安全协议，以确保高质量的安全通信。在这一背景下，IRS能够发挥重要作用，具体而言，它可以动态调整波束，改变信号传输方向，并随时响应潜在威胁。因此，通过合理配置和充分利用IRS的波束赋形能力，我们可以提升UAV-NOMA系统的安全性能，降低潜在威胁，确保用户的通信隐私和数据安全性。

## 5.5 不完美CSI估计

在新型多址接入网络中，主/被动波束赋形设计和接收端SIC实现都依赖于CSI的实时性和准确性。在网络设计阶段，通常假设可以获得完美的CSI来进行系统优化和资源配置。然而，在实际应用中，由于信道估计存在高动态、高成本以及动态噪声等问题，发射端很难获得完美的CSI。在信道建模时，需要有效捕捉并提供相应得鲁棒优化方案来解决无人机飞行和抖动引起的CSI估计误差。此外，在6G网络中引入IRS也给CSI获取带来了新的挑战，因为IRS是一种无源超表面，既不能发送也不能接收导频信号。目前IRS等效级联信道估计方案开销较大，并不适用于多天线的终端，利用深度学习可以通过对输入数据进行大量训练从而自动获取CSI。因此，如何实现高效的CSI获取以及如何在不完美CSI下进行鲁棒系统设计是未来具有重要意义的研究方向。

## 5.6 新型编码技术

从2G时代的卷积码到5G时代的LDPC码和Polar码，每一代通信技术都见证了新的编码方案的诞生，旨在提升网络吞吐量及数据传输的可靠性。随着IRS、UAV通信、卫星通信等应用场景的拓展，新型编码技术的研发变得尤为重要。此外，6G通信技术还将在跨层设计方面进行探索，实现信源编码与信道编码的联合设计，以满足超高速率和超低时延业务的需求。在新型编码技术的创新发展中，除了经典的香农信息论，还需拓宽智能通信的定义。语义通信在众多6G场景中 will 得到广泛应用，要求无线传输信道不仅满足香农信息论的要求，还需与外部语义信道相结合，提取相关语义信息。这将成为6G通信中的一个全新研究领域。新型编码技术是未来通信系统的核心竞争力，伴随芯片技术

的进步, 6G也将解锁更多的信道编码方案。

### 5.7 人工智能和机器学习

随着技术进步、计算能力提升及移动网络大数据应用, 人工智能和机器学习有望解决传统算法无法处理的高维优化问题。将人工智能(Artificial Intelligence, AI)融入6G多维网络, 可应对异构接入挑战, 提升系统性能<sup>[45]</sup>。大量UAV、高空平台和低轨卫星将成为6G基础建设的重要组成部分, 管理复杂度增加。利用AI和深度学习, 可优化功率分配、频谱利用、波束赋形, 规划无人机航线, 协调通信节点合作。相比传统优化方法, 机器学习在利用本地无线电环境信息进行相位控制方面具有更大潜力, 有助于减少IRS与收发器间信息传递开销。此外, 丰富的散射元素及其感测能力为基于数据驱动的深度学习提供了支持。利用AI和机器学习, UAV还可以自主做出决策和规划飞行路径, 适应不同任务和环境。然而, 深度学习和AI仍面临数据需求大、模型复杂度高、训练开销大、可解释性较差等挑战。未来研究应致力于实现数据及模型驱动的AI, 提高可解释性, 采取以用户为中心的设计理念, 构建新型智能网络体系。

## 6 结论

构建空天地一体化的统一信息网络已成为6G网络的关键特征, 6G网络将形成立体覆盖的移动通信网络。本文深入探讨了基于新型多址接入技术的多维扩展, 详细阐述了其优势及应用潜力。首先, 全面剖析了6G中具有潜力的多址接入技术以及卫星通信、UAV通信和IRS等多维扩展技术的优势。接着, 探讨了基于新型多址接入技术的多维扩展网络在多种场景中的应用潜力和结合效果。最后, 阐述了超大规模MIMO、太赫兹技术、通感算一体化、用户信息安全以及不完美CSI估计等关键技术挑战, 并展望了新型编码技术、人工智能和机器学习等未来研究方向。

### 参考文献

- [1] 邓伟, 郝悦, 胡南, 等. 5G网络演进与6G展望[J]. 信息通信技术, 2021, 15(5): 8–14. doi: [10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.002).  
DENG Wei, HAO Yue, HU Nan, *et al.* 5G network evolution and 6G prospect[J]. *Information and Communications Technologies*, 2021, 15(5): 8–14. doi: [10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1285.2021.05.002).
- [2] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141–148. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2019022](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2019022).  
ZHANG Ping, NIU Kai, TIAN Hui, *et al.* Technology prospect of 6G mobile communications[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(1): 141–148. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2019022](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2019022).
- [3] 赛迪智库无线管理研究所. 6G概念及愿景白皮书[N]. 中国计算机报, 2020-05-11(008). doi: [10.28468/n.cnki.njsjb.2020.000054](https://doi.org/10.28468/n.cnki.njsjb.2020.000054).
- [4] YOU Xiaohu, WANG Chengxiang, HUANG Jie, *et al.* Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(1): 110301. doi: [10.1007/s11432-020-2955-6](https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6).
- [5] GUAN Yueshi, WANG Yijie, BIAN Qing, *et al.* High-efficiency self-driven circuit with parallel branch for high frequency converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(2): 926–931. doi: [10.1109/TPEL.2017.2724545](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2724545).
- [6] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).  
ZHAO Yajun, YU Guanghui, and XU Hanqing. 6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).
- [7] 施建锋, 杨照辉, 黄诺, 等. 面向6G的用户为中心网络研究综述[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(5): 1873–1887. doi: [10.11999/JEIT220242](https://doi.org/10.11999/JEIT220242).  
SHI Jianfeng, YANG Zhaohui, HUANG Nuo, *et al.* A survey on user-centric networks for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(5): 1873–1887. doi: [10.11999/JEIT220242](https://doi.org/10.11999/JEIT220242).
- [8] 张海君, 陈安琪, 李亚博, 等. 6G移动网络关键技术[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 189–202. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022140](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022140).  
ZHANG Haijun, CHEN Anqi, LI Yabo, *et al.* Key technologies of 6G mobile network[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(7): 189–202. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2022140](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2022140).
- [9] 毕奇, 梁林, 杨姗, 等. 面向5G的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 14–21. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2015137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2015137).  
BI Qi, LIANG Lin, YANG Shan, *et al.* Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(5): 14–21. doi: [10.11959/j.issn.1000-0801.2015137](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-0801.2015137).
- [10] 董园园, 巩彩红, 李华, 等. 面向6G的非正交多址接入关键技术[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 57–62, 69. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.009).  
DONG Yuanyuan, GONG Caihong, LI Hua, *et al.* The key

- technologies of non-orthogonal multiple access for 6G systems[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(6): 57–62,69. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2020.06.009).
- [11] DING Zhiguo, ADACHI F, and POOR H V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(1): 537–552. doi: [10.1109/TWC.2015.2475746](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2475746).
- [12] FANG Xinran, FENG Wei, WEI Te, *et al.* 5G embraces satellites for 6G ubiquitous IoT: Basic models for integrated satellite terrestrial networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18): 14399–14417. doi: [10.1109/JIOT.2021.3068596](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3068596).
- [13] 张平, 张建华, 戚琦, 等. Ubiquitous-X: 构建未来6G网络[J]. *中国科学:信息科学*, 2020, 50(6): 913–930. doi: [10.1360/SSI-2020-0068](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0068).  
ZHANG Ping, ZHANG Jianhua, QI Qi, *et al.* Ubiquitous-X: Constructing the future 6G networks[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(6): 913–930. doi: [10.1360/SSI-2020-0068](https://doi.org/10.1360/SSI-2020-0068).
- [14] ZHAO Yue, XIE Lei, CHEN Huifang, *et al.* Ergodic channel capacity analysis of downlink in the hybrid satellite-terrestrial cooperative system[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 96(3): 3799–3815. doi: [10.1007/s11277-017-4207-2](https://doi.org/10.1007/s11277-017-4207-2).
- [15] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).  
CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, *et al.* Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).
- [16] WU Qingqing and ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(1): 106–112. doi: [10.1109/mcom.001.1900107](https://doi.org/10.1109/mcom.001.1900107).
- [17] WONG C Y, CHENG R S, LATAIEF K B, *et al.* Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747–1758. doi: [10.1109/49.793310](https://doi.org/10.1109/49.793310).
- [18] STEELE R and HANZO L. *Mobile Radio Communications: Second and Third Generation Cellular and WATM Systems*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1999.
- [19] GILHOUSEN K S, JACOBS I M, PADOVANI R, *et al.* On the capacity of a cellular CDMA system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(2): 303–312. doi: [10.1109/25.289411](https://doi.org/10.1109/25.289411).
- [20] LI Junyi, WU Xinzhou, and LAROLA R. *OFDMA Mobile Broadband Communications: A Systems Approach*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [21] DING Zhiguo, LEI Xianfu, KARAGIANNIDIS G K, *et al.* A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2181–2195. doi: [10.1109/JSAC.2017.2725519](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519).
- [22] YU Wei, RHEE W, BOYD S, *et al.* Iterative water-filling for Gaussian vector multiple access channels[C]. 2001 IEEE International Symposium on Information Theory, Washington, USA, 2001: 322. doi: [10.1109/ISIT.2001.936185](https://doi.org/10.1109/ISIT.2001.936185).
- [23] DAI Linglong, WANG Bichai, DING Zhiguo, *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](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2835558).
- [24] HOSHYAR R, WATHAN F P, and TAFAZOLLI R. Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1616–1626. doi: [10.1109/TSP.2007.909320](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909320).
- [25] ZHANG Jiankang, CHEN Sheng, MU Xiaomin, *et al.* Evolutionary-algorithm-assisted joint channel estimation and turbo multiuser detection/decoding for OFDM/SDMA[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(3): 1204–1222. doi: [10.1109/TVT.2013.2283069](https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2283069).
- [26] CLERCKX B, JOUDEH H, HAO Chenxi, *et al.* Rate splitting for MIMO wireless networks: A promising PHY-layer strategy for LTE evolution[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 98–105. doi: [10.1109/mcom.2016.7470942](https://doi.org/10.1109/mcom.2016.7470942).
- [27] CLERCKX B, MAO Yijie, SCHOBER R, *et al.* Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NOMA, and multicasting in MISO broadcast channel: A simple two-user rate analysis[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(3): 349–353. doi: [10.1109/LWC.2019.2954518](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2954518).
- [28] MAO Yijie, DIZDAR O, CLERCKX B, *et al.* Rate-splitting multiple access: Fundamentals, survey, and future research trends[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 2073–2126. doi: [10.1109/COMST.2022.3191937](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3191937).
- [29] WU Yongpeng, GAO Xiqi, ZHOU Shidong, *et al.* Massive access for future wireless communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 148–156. doi: [10.1109/MWC.001.1900494](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900494).
- [30] LIU Liang and YU Wei. Massive connectivity with massive MIMO—Part I: Device activity detection and channel estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(11): 2933–2946. doi: [10.1109/TSP.2018.2818082](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2818082).
- [31] WONG K K, NEW W K, HAO Xu, *et al.* Fluid antenna system—Part I: Preliminaries[J]. *IEEE Communications*

- Letters*, 2023, 27(8): 1919–1923. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3284320](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3284320).
- [32] WONG K K and TONG K F. Fluid antenna multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(7): 4801–4815. doi: [10.1109/TWC.2021.3133410](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3133410).
- [33] WU Zidong and DAI Linglong. Multiple access for near-field communications: SDMA or LDMA?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(6): 1918–1935. doi: [10.1109/JSAC.2023.3275616](https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3275616).
- [34] GIORDANI M and ZORZI M. Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 244–251. doi: [10.1109/MNET.011.2000493](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000493).
- [35] CHU Jianhang, CHEN Xiaoming, ZHONG Caijun, *et al.* Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(3): 1959–1970. doi: [10.1109/JIOT.2020.3015995](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015995).
- [36] WANG Ningyuan, LI Feng, CHEN Dong, *et al.* NOMA-based energy-efficiency optimization for UAV enabled space-air-ground integrated relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4129–4141. doi: [10.1109/TVT.2022.3151369](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3151369).
- [37] MEI Weidong and ZHANG Rui. Uplink cooperative NOMA for cellular-connected UAV[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(3): 644–656. doi: [10.1109/JSTSP.2019.2899208](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2899208).
- [38] JAAFAR W, NASER S, MUHAIDAT S, *et al.* On the downlink performance of RSMA-based UAV communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 16258–16263. doi: [10.1109/TVT.2020.3037657](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3037657).
- [39] XU Yu, ZHANG Tiankui, ZOU Yixuan, *et al.* Reconfigurable intelligence surface aided UAV-MEC systems with NOMA[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(9): 2121–2125. doi: [10.1109/LCOMM.2022.3183285](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3183285).
- [40] SU Yuhua, PANG Xiaowei, LU Weidang, *et al.* Joint location and beamforming optimization for STAR-RIS aided NOMA-UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(8): 11023–11028. doi: [10.1109/TVT.2023.3261324](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3261324).
- [41] ZHAO Nan, PANG Xiaowei, LI Zan, *et al.* Joint trajectory and precoding optimization for UAV-assisted NOMA networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3723–3735. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2895831](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2895831).
- [42] PANG Xiaowei, ZHAO Nan, TANG Jie, *et al.* IRS-assisted secure UAV transmission via joint trajectory and beamforming design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1140–1152. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3136563](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3136563).
- [43] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告(2021年)[R]. 2022. China Institute of Communication. Advanced report on integrated communication, sensing, and computing networks (2021)[R]. 2022.
- [44] LI Qiang, XU Dongyang, NAVAIE K, *et al.* Covert and secure communications in NOMA networks with internal eavesdropping[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(12): 2178–2182. doi: [10.1109/LWC.2023.3312689](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3312689).
- [45] IMT-2030(6G)推进组. 无线AI技术研究报告[R]. 2021. IMT-2030(6G) Promotion Group. Wireless AI Technical Study Report [R]. 2021.
- IMT-2030(6G) Promotion Group. Wireless AI Technical Study Report [R]. 2021.
- 逢小玮: 女, 博士生, 研究方向为无人机通信、智能反射面、非正交多址接入、通感一体化.
- 蒋 旭: 男, 副教授, 研究方向为通感一体化、无人机通信、隐蔽通信.
- 卢华兵: 男, 助理研究员, 研究方向为通感一体化、无人机通信、物理层安全.
- 赵 楠: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为通感一体化、无人机通信、非正交多址接入、干扰管理、绿色通信.

责任编辑: 余 蓉