

面向6G的多维扩展通感一体化研究综述

徐金雷^① 赵俊溟^② 卢华兵^① 蒋旭^③ 赵楠^{*①②③}

^①(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116024)

^②(中国通信企业协会 北京 100846)

^③(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209)

摘要: 面对第6代移动通信(6G)网络立体覆盖的互联感知需求和无线设备广泛接入造成的频谱稀缺问题,基于无人机(UAV)的机动性和智能反射面(IRS)重构无线传播环境特性的多维扩展通感一体化可实现立体网络空间中通信和感知功能的相互协同,有效提升频谱效率和硬件资源的利用率,满足6G万物智联的无线网络愿景。该文针对6G多维扩展通感一体化网络架构展开综述。首先,概述了6G网络愿景和通感一体化的理论基础,并讨论基于UAV和IRS多维扩展通感一体化的应用场景、发展趋势和性能指标。然后,探讨了超大规模多输入多输出天线、太赫兹、无线携能通信、人工智能、隐蔽通信和有源反射面等6G关键前沿技术在基于无人机和智能反射面多维扩展通感一体化网络中的潜在应用。最后,展望了未来6G多维扩展通感一体化的发展方向及关键技术挑战。

关键词: 第6代移动通信; 无人机; 智能反射面; 多维扩展; 通感一体化

中图分类号: TN915.0

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)05-1672-12

DOI: 10.11999/JEIT231045

An Overview on Multi-dimensional Expanded Integrated Sensing and Communication for 6G

XU Jinlei^① ZHAO Junsheng^② LU Huabing^① JIANG Xu^③ ZHAO Nan^{*①②③}

^①(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

^②(China Association of Communications Enterprises, Beijing 100846, China)

^③(School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Facing the demand for interconnectivity sensing of three-dimensional coverage for the sixth-Generation mobile communication (6G) networks and the spectrum scarcity issue caused by the widespread access of wireless devices, the multi-dimensional expanded Integrated Sensing and Communication (ISAC), based on Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Intelligent Reflecting Surfaces (IRS), is capable of achieving synergistic communication and sensing functions in the three-dimensional network space. This can effectively enhance spectrum efficiency, hardware resource utilization, and align with the wireless network vision of 6G Internet of Everything. This paper provides an overview of the architecture for the 6G multi-dimensional expanded ISAC. Firstly, it summarizes the theoretical foundations of the 6G network vision and ISAC networks, and the application scenarios, development trends, and performance indicators of multi-dimensional expanded ISAC based on UAV and IRS are discussed. Then, it investigates the potential applications of 6G key technologies, such as ultra-massive multiple-input and multiple-output antenna, terahertz, simultaneous wireless information and power transfer, artificial intelligence, covert communication, and active IRS, in multi-

收稿日期: 2023-09-25; 改回日期: 2024-04-16; 网络出版: 2024-05-04

*通信作者: 赵楠 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(62371087, 62101091), 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 (62371087, 62101091), The Application and Fundamental Research Planning Project in Liaoning Province (2023TH2/101300197)

dimensional expanded ISAC networks based on UAV and IRS. Finally, the future development direction and key technical challenges of 6G multi-dimensional expanded ISAC are prospected.

Key words: The 6th-Generation wireless systems (6G); Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Intelligent Reflecting Surface (IRS); Multi-dimension expand; Integrated Sensing and Communication (ISAC)

1 引言

随着物联网、人工智能和大数据等技术的不断革新与深度融合, 面向未来的第6代无线通信(The 6th Generation Wireless Systems, 6G)系统, 将在5G原有的三大典型场景(增强移动宽带, 海量连接, 超可靠低延时)基础上拓展深化, 利用技术创新建立物理世界和数字世界的连接, 催生出无人驾驶、沉浸式体验、全息通信和数字孪生等虚拟空间为连接主体的一系列新业务^[1]。快速涌现的智慧城市、智慧交通、智慧工场等6G应用场景对无线通信提出了超低时延、超高可靠性、超高速率的通信需求^[2]。此外, 无线设备接入数目的指数级增长, 使得全球通信产业对无线频谱资源的需求日益迫切^[3]。

频谱资源是移动通信发展的基础, 为了解决有限带宽资源与泛在连接之间的矛盾, 亟需发掘额外的频谱资源并开发新的通信技术以满足日益增长的信息处理需求^[4]。一方面, 6G将持续开发优质可利用频谱, 在提高现有频谱资源利用率的基础上, 进一步向毫米波、太赫兹、可见光等更高频段探索。通过对不同频段频谱资源的综合高效利用来应对6G万物互联频谱稀缺和容量限制的挑战^[5]。另一方面, 无线通信与传统感知在硬件架构, 频段资源与数据处理等方面产生越来越多的重叠。基于软硬件资源共享或信息共享并同时实现感知与通信功能的通感一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)引起了学术界和工业界的广泛关注^[6]。ISAC可利用同一套设备发送的信号, 在相同频段同时实现通信与感知功能, 提升系统频谱效率、硬件效率以及信息处理效率, 有效缓解日益紧张的频谱资源和当前无线系统的容量限制。然而, 日益复杂的传播环境导致ISAC的传输受到严重衰减和安全威胁, 系统的性能下降^[7,8]。因此, 需要开发创新性的技术以满足6G ISAC网络的通感需求和性能指标。

以“万物智联”为愿景的6G无线网络在无线连接的维度、广度上都将得到巨大的提升, 并要求能够支持 10^7 台/ km^2 的设备密度以及至少1000 km/h的流动性。传统的无线传播方式依赖于地面基础设施, 受限于环境因素, 导致其网络覆盖不全且信号质量差, 难以快速适应多变的任务需求。无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)可作为临时基

站或中继节点, 将地面物联网拓展至立体空间, 实现低空通信网络与地面网络的相互协同。得益于高机动性和快速部署的特点, UAV能够灵活适应包括灾区、海洋、城市和荒野等复杂的环境, 实现大范围的网络覆盖^[9]。基于UAV立体扩展的6G ISAC网络在环境监测、城市规划、交通管理和灾区救援等领域具有广泛的应用前景。

另一方面, 由无源电磁元件集成的智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)可智能重构无线传播环境, 提升无线传输的性能, 得到了学术界和工业界的广泛关注^[10]。IRS可以根据信号传播反馈的通信链路信息, 以软件编程的方式实时有效地调整入射信号的幅度和相位等参数, 实现对电磁波的智能控制^[11]。此外, IRS易于安装部署, 可与UAV建立有效的视距(Line-of-Sight, LoS)连接, 改变信号传播路径, 帮助解决信号衰减和多径效应等问题, 进而增强UAV空地网络的信号质量和稳定性^[12]。同时, UAV的机动性也为IRS的部署提供了额外的自由度, 携带IRS的UAV可作为ISAC网络中移动资源和远程目标节点间的飞行中继为收发两端建立高质量的LoS链路, 借助波束成形和相干叠加等技术手段, 实现长距离、高速率的通感一体, 从而缓解系统过载和通感链路阻塞的问题, 提高ISAC的综合性能^[13,14]。因此, 利用UAV的机动性和IRS无线环境重构特性, 能够突破环境因素的制约, 建立高效覆盖的空地协同网络, 实现ISAC网络维度的空间扩展。本文首先综述了6G 愿景下ISAC的基本概念, 并探讨了基于UAV和IRS的多维扩展ISAC网络应用场景、技术趋势和性能指标。其次, 讨论了6G多维扩展ISAC网络中潜在的关键技术和面临的技术挑战。最后, 对全文做出了总结。

2 6G 通感一体化网络

6G通感一体化可将多种感知技术集成至6G网络基础设施中, 使智能系统和网络能够全面感知目标及其周围环境信息, 从而提供更智能和个性化的服务, 满足用户的多样化需求。得益于其双重并发功能, 通感一体化在执行传统通信任务的同时可实现定位、测距、跟踪和识别, 这将为新兴的6G应用提供更高效、更智能的技术支持^[15]。本节首先介绍了6G的网络愿景与发展需求, 然后综述了通感一体化的概念和发展趋势。

2.1 6G愿景与典型场景

自2020年以来,第5代移动通信(5G)网络已在全球部署。然而,以数据为中心的智能系统快速增长给5G带来了巨大的挑战。作为5G技术的进一步升级,6G旨在满足未来日益增长的互联与通信需求。如图1所示,应用和服务的改变与升级使得6G对数据传输速率和超低延迟的需求也随之增加,需要提供比5G更高的数据速率和更低的延迟水平,从而支持超高清视频、虚拟现实、自动驾驶、远程医疗等应用。此外,移动通信与人工智能、大数据以及先进计算技术的创新突破和深度融合促进了6G实现更智能、高效的网络管理和资源分配,不断拓展不同的地理区域和环境中移动物联网应用的广度和深度,推动全球各行各业的互联互通和数字经济的蓬勃发展。

未来6G网络将在5G的基础上深化扩展,全面支持超高速率、超低延迟、大规模物联网连接、智能网络管理的典型场景,打开数字化社会和智能化应用的全新发展前景。此外,通过融合通信技术和感知技术,6G还将超越传统通信的能力边界,从信息传递向信息采集、信息计算扩展,借助通信信号对目标进行感知,实现目标检测、定位、识别、成像等感知功能。利用获取的目标及其周边环境信息,精确分配无线资源,实现通信与感知的能力互助和网络互惠,提高基础设施利用率,增强用户体验,孵化6G通感一体新业务。

2.2 通感一体化的基本概念与技术趋势

无线通信和雷达探测是现代信息技术发展的两个热点研究方向,但一直以来相对独立。从两者的发展历程来看,它们工作在不同的频段,作为信息处理的前端与中间环节,分别负责执行信息传递和信息采集的任务。为了满足未来6G网络万物智联,与数字孪生的总体愿景和发展需求,雷达和通信两种功能的一体化设计得到了学术界和工业界的广泛关注^[16]。

ISAC是一项基于软硬件资源协作和信息共享,在相同频谱内相互协同实现通信与感知功能的新型信息处理技术,可有效缓解雷达与通信系统之间的频谱冲突。相比传统通信和感知互相独立的系统,ISAC可带来潜在的协作增益,实现通信网络和感知网络的互惠共赢。在通感一体化技术发展的过程中,根据通信组件与感知模块之间的融合程度与协作关系,可将其技术趋势分为业务共存、能力互助和网络互惠3个阶段^[17]。

(1) 业务共存。通信系统与感知系统共用同一硬件平台,系统的优化设计主要考虑通信或感知的单方面性能指标。当两个系统之间存在资源分配和干扰抑制等需求时,在满足系统各项基本性能指标的要求下,单独优化其通信功能或感知功能,尽可能地避免两项业务相互影响。因此,开发有效的资源分配算法,并抑制通信与感知两个模块之间的互干扰是该阶段的研究重点。

(2) 能力互助。基于软硬件资源共享和信息共享设计,加深了通信系统和感知系统的相互融合,实现通信和感知功能的相互协作。该阶段旨在满足其中一个系统的最低性能要求,增强另一个系统的性能,即通信辅助感知或感知辅助通信,重点在于通信和感知两个系统的波形设计、联合信号处理和频谱资源分配等一体化设计。能力互助阶段有效降低了两项业务之间的互干扰,可实现比通信与感知独立运作时更好的性能。

(3) 网络互惠。通信和感知一体化的成熟阶段,二者将实现包括频谱资源、硬件架构、波形设计、信号处理、协议接口、组网协作以及多点感知等全方位、多层次的深度融合。由于使用相同的频谱和信号处理模块来处理不同类型的通信和感知服务,通信设备发射的无线信号可在完成通信任务的同时对环境进行感知,通过收集周边环境的反射、散射、多路径传播后的回波信号,分析出周边的环境信息,从而在网络层快速做出决策,辅助通信接

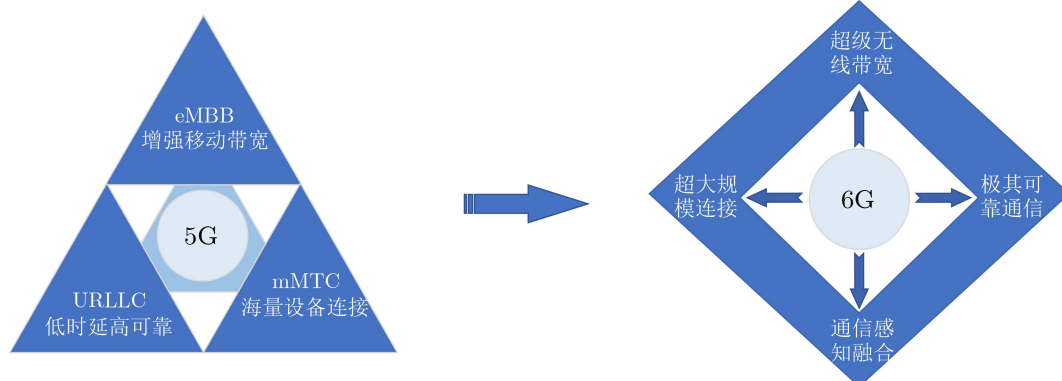


图1 面向6G的新场景演进

入和管理，以提高通信质量和效率，进而促进通信和感知的互惠共赢，催生出智能化、沉浸式、无人化等6G全新业务和应用场景。网络共惠阶段不再是单目标优化，而是多目标联合优化，在考虑通感一体化整体指标体系的基础上，需要引入新的性能指标表征一体化系统的性能边界，优化系统整体性能。如图2所示，通感一体化作为6G潜在关键技术之一，旨在通过一体化设计、多点协作和信息智能交互，实现6G从传统通信功能到通感功能并存的拓展。

3 6G多维扩展通感一体化

为解决未来高度智能化、数字化和信息化的社会对无线服务的泛在需求，6G网络亟需在无线连接的维度和广度上实现显著的提升，打造一个无处不在、服务共享的多维通感融合服务体系。随着数据挖掘、数据融合和数据同化等关键数字技术的攻克，UAV和IRS空地一体化集成运用打开了通感一体化多维复用的新思路，未来将渗透到社会发展和生产的各个领域，满足各业务部门的多元化需求。本节详细概述了UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC网络，讨论和分析了基于UAV和IRS多维扩展ISAC的应用场景、发展趋势和性能指标。

3.1 基于UAV和IRS多维扩展的通感一体化

得益于低成本、高机动性、部署灵活等优点，UAV辅助的空地一体化网络成为移动通信领域中一个活跃的研究热点，并在灾难救援、应急支持和网络多维扩展中发挥了重要作用。在雷达感知服务中，多径传播的非视距链路通常被视为有害干扰或杂波，仅能提取视距链路的有用信息。此外，远离基站或被障碍物遮挡的目标回波信号受到严重衰减，导致感知性能降低。悬停在空中的UAV可作为基站或中继为地面节点建立稳定可靠的LoS链路，实现盲区覆盖，为地面用户提供高速率且无处不在的感知与通信服务^[18]。此外，与基于固定基础

设施的通信相比，UAV可以利用其机动性选择最优的悬停位置或飞行路径克服地形和地面设施等环境因素的影响增强无线链路并降低干扰。因此，基于通信和感知共享基站成本，UAV通感一体化可降低系统的部署成本，提高UAV的智能化和自主性，使其能够更好地适应复杂多变的无线环境和任务需求^[19]。具体地，如图3所示，UAV辅助通感一体化网络主要具有以下优点：

(1)广域覆盖。UAV的覆盖范围更广，能够实现空对空、空对地和空对海等广域区域的感知。集成感知和通信的UAV通感一体化网络，可以弥补传统地面感知设备的局限性，对覆盖范围内的目标进行连续探测，定位、识别和跟踪，同时感知周围的物体和自然因素等环境信息，提供更全面的感知服务。

(2)灵活部署。借助自身的高机动性，UAV可以根据实际需求灵活部署和移动，无需依赖复杂的基础设施建设，快速到达需要感知的区域。尤其在灾难发生时，集成感知和通信的UAV能迅速作出响应，为灾区提供强大的感知服务和高效的通信支持。

(3)网络协同。根据实时回传的载荷数据，通信和感知模块获取的信息会进行数据融合与分析，促进UAV与其它感知和通信设备进行协同工作，提高系统通信与感知的综合性能，并实现避障、路径规划、目标追踪等功能，进而支持更复杂的应用场景，如智慧城市、智能交通和工业自动化等。

尽管UAV具有诸多优势，其仍存在一定的局限性，这极大地制约了在ISAC场景中的实际应用。首先，UAV通常具有严格的尺寸、重量和功率约束，除了收发器的功耗外，UAV还需要花费额外的能量为其在空中飞行与悬停提供动力。此外，虽然UAV在高度足够的情况下可与地面节点建立LoS链路，但空地信道也会被城市地区的树木和高层建筑阻塞，降低系统实际的无线传输性能。

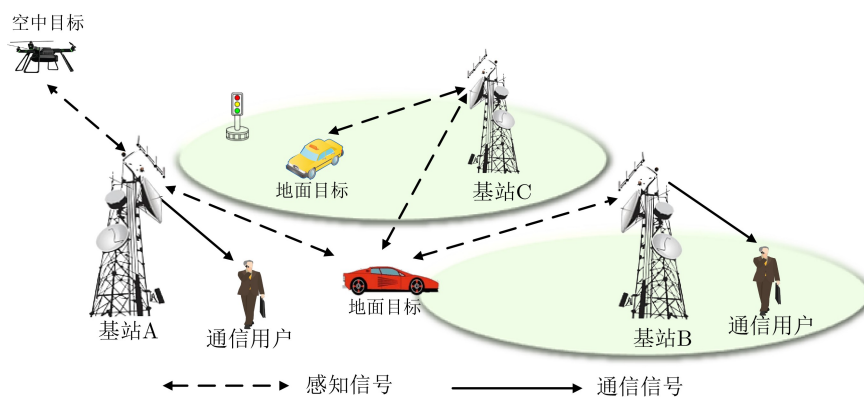


图2 多小区协作的通感一体化网络

为了克服UAV的上述缺点,一种重要的解决方案是在UAV辅助的空地网络中使用IRS,以改善传播环境,提高无线传输的性能。近年来,IRS被认为是6G无线系统的候选技术,其本质是由人工材料和无源电磁元件构成的阵列表面,通过软件控制器实时动态配置表面反射单元的电磁特性,优化入射信号的幅度和相移,形成指向期望接收端的无源波束,从而增强信号强度,提高系统性能^[20]。如图4所示,与地面终端相比,安装在高层建筑表面上的IRS可有效地规避环境障碍,与UAV和被遮挡的用户或感知目标建立LoS链路。另一种行之有效的方法是在UAV上安装IRS,无人机的机动性可为IRS部署提供额外的空间自由度,部署装备IRS的无人机可以为发送端和目标接收器建立可靠的LoS链路,进一步增强信号强度和覆盖^[21]。

充分利用UAV灵活移动和IRS相位可控的优势,可建立广域覆盖的空地协同通感一体化网络,实现多维扩展的通感一体化。UAV结合IRS可灵活重构无线传播环境,显著提升ISAC网络的综合性能。具体地,集成UAV和IRS的ISAC具有以下潜在优势^[22]:

(1)扩大信号覆盖范围。配备IRS的无人机通过调整反射信号的相位、幅度和频率等参数,可增强网络容量,提高无线信号强度,为通信用户和感知目标提供稳定可靠的LoS链路,弥补通感网络中的信号覆盖死区,提高小区边缘通信和感知的服务质量。

(2)灵活性和适应性。借助UAV的机动性,可以根据通信需求和无线环境实现IRS的灵活部署。此外,相比于安装在建筑物表层的IRS,集成在UAV上的IRS可以根据环境的变化来适应通感需求,包括天气、地形和人口密度的变化,从而增强通感网络的稳健性和可靠性。

(3)提高效率和降低成本。由无源电磁元件构成的IRS在接收信号时不需要模数/数模转换和功率放大器等耗能器件,具备低功耗和低复杂度特点,同时能够有效抑制噪声的引入和放大。集成IRS的UAV通感一体化网络可有效提高系统的能量效率,降低部署和维护成本。

(4)提高感知精度。UAV可以根据感知需求和目标特性进行自主调度与路径规划,提供高效的通

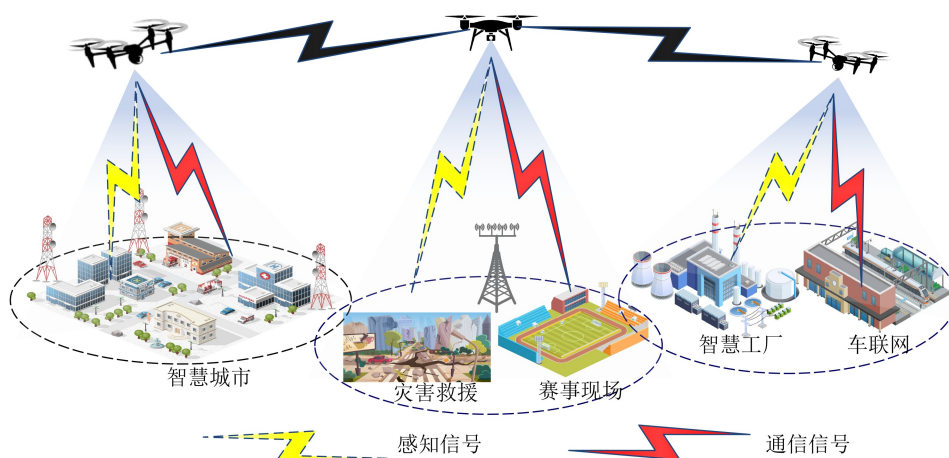
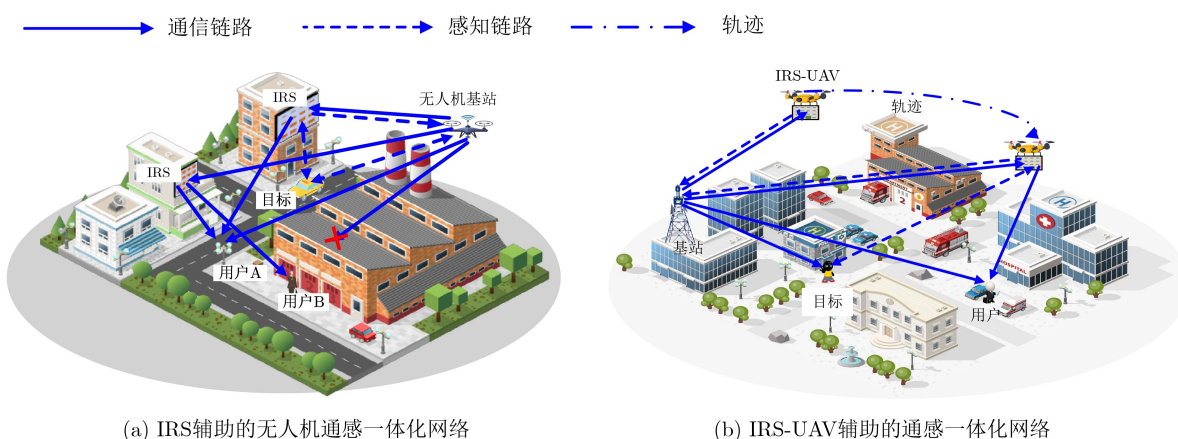


图3 无人机通感一体化网络



(a) IRS辅助的无人机通感一体化网络

(b) IRS-UAV辅助的通感一体化网络

图4 基于IRS-UAV多维扩展的通感一体化

信和感知服务。此外，IRS能够智能调控多径信号，从而提高感知和定位精度。

(5)安全性和保密性。UAV的快速机动能力可用于监测和对抗敌对攻击。通过联合优化IRS-UAV的发射波束成形、IRS相移和飞行轨迹，可显著增强传播路径上的有用信号，提高目标和用户的接收SINR，有效抑制恶意干扰和杂波，实现空地协同通感一体化网络的安全传输。

(6)多领域应用。基于UAV和 IRS辅助通感一体化网络不仅适用于通信领域，还可以扩展至其它领域，通过调整IRS的反射单元，灵活地配置通感网络的资源，以适应不同场景和需求，如环境监测、农业、交通管理、应急救援和军事应用等。

综上所述，UAV和IRS通过多维扩展有望成为未来ISAC网络的重要技术支撑，增强其感知和通信能力，为其发展与应用提供更强的安全保障，从而为人们提供更高效、可靠和智能的感知和通信体验。

3.2 多维扩展通感一体化的应用场景

通感一体化网络在完成高数据速率传输的同时，能够解锁目标定位、测距、跟踪、成像、环境重构等感知功能^[23]。基于UAV和IRS的6G多维扩展ISAC网络将满足基于5G-Advanced 空口的社会需求，实现更高效和智能的感知与通信功能。从一体化波形设计、硬件平台搭建以及信号处理技术等多个角度持续优化，UAV和IRS辅助的ISAC网络有望突破当前5G系统的局限和环境因素的制约，在地基网的基础上拓展至空基网，进而可以与天基网的卫星或海基网络进行互联，实现6G网络的空天地海一体化覆盖和场景互联等需求，同时支持包括同步成像与环境重构、高精度定位与跟踪、增强人类感官以及动作和表情识别等潜在的全新通感一体化应用场景^[24]，如表1所示。

3.3 多维扩展通感一体化的发展趋势

基于UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC可显著提升频谱效率、能量效率和硬件资源利用率，降低系统造价与成本。由于通信和感知功能的深度融合，ISAC实现的关键在于一体化波形设计。根据通信和感知在相互协作的程度，基于UAV和IRS的多维扩展ISAC在波形设计上通常分为以感知为基础、以通信为基础和通感一体联合的波形设计^[25]，如表2所示，具体分析如下：

(1)以感知为基础的一体化波形设计。将雷达感知波形作为通信调制信号的载波，在保证感知功能尽可能不受影响的情况下，实现通信功能。然而，通信辅助感知的一体化设计通常仅能应用于低速率数据传输的通信场景。借助通信数据的传递与融合，可实现不同节点间的协同感知，扩大感知服务的范围，提供高精度定位、高分辨率成像以及虚拟环境重构的感知服务。在UAV动态网络中，ISAC信号可能会受到多径传播、多普勒效应和时变信道等因素的影响，导致信号失真、时延和抖动等问题。为了实现最佳融合感知性能，以感知为中心的设计需要抑制不同节点间的同步误差并克服一体化系统中的干扰问题。

(2)以通信为基础的一体化波形设计。基于现有的通信波形、协议接口及帧结构，在满足频谱效率、误码率和信干噪比等通信性能指标的同时，感知目标对象自身或其周围环境的信息，实现定位、测距、成像、识别和环境重构等感知功能。借助回波获取的感知信息，可提高信道估计的准确性，从而提升通信性能。感知辅助通信的一体化设计，能满足高速率数据传输需求，实现良好的通信性能，而系统的感知性能较差，对环境依赖性强且难以调整。基于UAV和 IRS多维扩展的ISAC网络在以通信为中心的设计中面临信息

表 1 基于UAV和IRS多维扩展的通感一体化网络应用场景

场景/应用分类	同步成像与环境重构	高精度定位与跟踪	增强人类感官	动作和表情识别
智慧工厂	区域检测和环境感知	设备定位和安装	自动化测量和控制	产品质量检测
垂直行业 智慧农业	作物生理监测和生产	自动化收取和存储	种植环境检测	作物质量监管
智慧交通	3D道路成像	无人驾驶与辅助驾驶	雨雾天气路况监测	安全驾驶
环境监测	无人机集群管理	水利水文监测	污染与空气质量检测	残障保障服务
公共服务 公共安全	灾害应急管理和疏散	交通运输安全	无接触安全检测	突发事件预测
城市管理	城市环境监督	城市文明监察	建筑安全风险检测	全时段监控
灾难救援	灾情评估与灾后重建	人员定位与物资投送	灾区环境检测	人员搜救
极端场景 战场支援	实时情报获取	精确打击支持	敌对目标监视和侦测	敌情侦测与分析
应用 太空探测	地球和大气监测	太空垃圾探测	星际空间探测	航天员健康检测
海洋勘探	海洋资源勘探	海上巡逻与航行安全	海洋气象和气候监测	海洋生态监测

安全和隐私保障、频谱资源调度、多频段和多模态组网等挑战。

(3)通感一体联合波形设计。从系统架构、硬件平台设计、传输协议、时频空资源复用等角度促进通信网络与雷达系统的深度融合,提升频谱效率和硬件资源的利用率。由于通信和感知的评估指标以及算法迥异,通感一体化联合波形设计在通信方面要最大限度地提高频谱效率,在雷达探测方面则需侧重感知分辨率和精度的提升。实现通信与感知功能统一设计,使无线网络在进行高质量通信交互的同时,实现高精度、精细化的感知功能,促进网络整体性能和业务能力的提升。基于UAV和IRS的多维扩展ISAC系统需要同时兼顾通信和感知的需求与性能指标,灵活实现通信与感知功能的性能折中,在硬件设计和实现上存在巨大的挑战。

3.4 多维扩展通感一体化的性能指标

UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC网络应用场景在需求方面存在显著差异,需要综合考虑通信和感知两个维度满足不同场景相应的指标要求,从而为系统的评估、优化和改进提供可靠的指导,使其能够更加全面、灵活地适应复杂的环境与业务需求^[33,34]。因此,基于UAV和IRS多维扩展ISAC网络的指标体系主要包含通信性能、感知性能、多源数据融合性能、数据质量和准确性以及网络协同性能等方面^[35],具体的性能指标总结至表3。其中,通信性能指标为优化通信网络、保证通信服务质量以及改善用户体验提供了有力支持。在雷达感知方面,优化并改善感知性能指标可提高雷达在目标检

测、跟踪和定位任务中的可靠性和准确性。根据具体应用场景和业务需求,在设计基于UAV和IRS多维扩展的ISAC网络时,需要权衡与优化各个性能指标,提升多维扩展ISAC网络在复杂环境中的综合性能,实现高效的通信和感知服务。

4 UAV和IRS辅助6G通感一体化网络的关键技术与进展

集成UAV和IRS的多维扩展ISAC网络,有效适应了6G万物智联的发展愿景。为了满足未来新兴的业务需求,提高无线传输的效率和性能指标,学术界与工业界对超大规模天线阵列、太赫兹通信、无线携能通信、人工智能和隐蔽通信等6G新型空口技术进行了广泛的研究。结合多维扩展ISAC网络良好的技术兼容性,本节探讨了6G前沿关键技术UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC网络中的潜在应用。

4.1 超大规模天线阵列

超大规模MIMO是6G空口演进技术之一,通过在收发端部署更高数量级的天线阵列,深度挖掘空间维度资源,实现对电磁波的精准调控,带来高方向性的波束增益,进而提升系统频谱效率,扩大网络覆盖,并缓解路径损耗^[36]。超大规模天线可支撑实现超宽带(Ultra WideBand, UWB)通信,促进通信与感知功能相辅相成,实现高精度、高分辨率通感融合的6G新兴业务。具有低成本、低能耗、易部署特点的IRS可作为无线中继灵活配置无线传播环境,增强无线传输的性能指标,提升系统

表2 现有ISAC和波形设计简要总结

参考文献	ISAC波形设计	技术原理	优点	缺点
文献[26, 27]	以感知为基础的设计	将通信信号调制或引入感知系统中,在不影响感知功能情况下实现通信功能	与感知系统高度兼容	低数据速率
文献[28, 29]	以通信为基础的设计	利用通信波形、协议和架构进行感知,通过目标回波提取感知信息	与通信系统高度兼容	感知性能差
文献[30-32]	通感一体联合优化设计	兼顾通信和感知的需求和性能指标	高性能感知和通信	设计复杂度高

表3 基于UAV和IRS的多维扩展通感一体化网络性能指标

性能分类	性能指标	具体要求
通信性能	带宽和速率	传输数据的速度和容量,较大的带宽能够支持高分辨率图像、视频等大数据传输
	稳定性	保障UAV在高速运动和复杂环境中通信连接的可靠性,防止干扰和信号丢失
感知性能	感知范围	感知功能的有效覆盖区域,UAV和IRS可提供更广泛的环境信息
	感知精度	感知系统识别目标和获取环境信息的准确度和可靠性,影响系统的决策能力
多源数据融合性能	数据融合精度	不同传感器数据融合后的信息准确性,能够提供更全面、准确的环境认知
	传输时延	确保感知数据的快速获取和信息交互效率,提高系统的实时决策能力
数据质量和准确性	鲁棒性	在干扰和突发情况下,UAV的移动性和IRS环境重构能力保障系统功能的弹性设计
	隐私和安全性	提供安全的数据传输和存储机制,保障敏感信息的安全传输
网络协同性能	自适应性	基于IRS-UAV的无线网络需实现空地网络的相互协同,适应环境和任务需求的变化
	能耗和计算资源	保持低能耗,确保感知和数据处理和计算不过度消耗电力,提高UAV的续航能力

的鲁棒性。融合IRS与超大规模MIMO天线技术,可进一步发展为全息超表面赋能的超大规模MIMO,在降低硬件成本的同时最大化MIMO的空间复用增益。全息无线电技术能为UAV通感一体化提供更广阔的网络覆盖范围,同时感知多个方向的目标,并实时获取目标的位置、速度和其它相关信息。从而促进基于UAV的空地ISAC网络实现更全面的环境感知功能,提高UAV在任务执行、避障和协同工作等方面的能力。

4.2 太赫兹通信

频谱是移动通信的基础,现有的中低频段和毫米波频段难以满足6G网络中持续增长的高速率业务需求。因此,需要向更高频段的太赫兹方向延伸。太赫兹频段具有丰富的带宽资源,可支持100 Gbit/s至Tbit/s级的超高速率传输,有效应对当前无线系统频谱稀缺与容量限制的问题,是6G移动通信中极具潜力的频谱候选技术^[37]。太赫兹波在外层空间中可实现无损耗传输,以极小的功率完成远距离通信,广泛应用于空间通信,通过搭载卫星、UAV和飞艇等天基和空基平台,实现6G网络空天地一体化传输^[38]。此外,太赫兹波在很多物质中均具有良好的穿透性,可用于无线电对周围环境中的物体探测和穿透成像,并在安全检测、医疗诊断、环境监测、智能交通、虚拟现实等高精度中近距离的通信感知场景中得到了广泛应用。然而,由于大尺度衰落特性,太赫兹信号受雨雪天气和环境吸收的影响较大,且易被障碍物阻断。IRS可以在不同的频带上工作,实现波束的聚焦和定向传输,基于IRS提供的无源波束成形及空间复用增益,可缓解太赫兹信号由环境导致的衰减,提高能量效率。借助UAV的机动性,可实现IRS的灵活部署,为太赫兹通感一体化网络视距链路不可达或信号质量较差的盲区或小区边缘,建立低功耗LoS链路,从而有效解决太赫兹通信传输距离限制和信号衰减等问题,提高网络覆盖质量。因此,太赫兹通感一体化和IRS-UAV运动控制的融合调度有望成为下一代无线网络的重要研究热点。

4.3 无线携能通信

未来6G网络设备大规模接入以及海量传感器的使用必然导致能源的急剧消耗,因此,实现高速率低功耗数据传输,推动环境可持续发展的绿色通信是信息技术行业发展的使命。无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)是一种新型的无线通信类型,能够缓解移动终端由自然环境限制产生的能源危

机^[39]。SWIPT能够在实现高速信息交换的同时,采集传播环境中射频信号的能量为物联网设备提供持续的能量供应,从而缓解传统有线或电池供电带来的不便,减少能源的损耗,提升系统的能效。在IRS-UAV辅助的通感一体化网络中,根据信道状态信息,经IRS反射的信号能够与其它路径传播信号相干叠加,补偿长距离传播导致的射频信号衰减,增强接收信号的功率。此外,优化UAV部署或轨迹可在能量接收设备附近创建有效的能量采集区域,为ISAC网络的无线传感设备提供持续性的能量供应。

4.4 无线人工智能

无线人工智能(Artificial Intelligence, AI)是将AI技术融合于原生无线通信系统,深度挖掘无线大数据、无线算法和无线应用在内的一种新的智能无线通信技术体系^[40]。传统的无线网络设计往往基于静态参数和经验规则,难以适应复杂多变的环境和用户需求。无线AI可以借助机器学习和深度学习自动调整信道配置、功率分配和资源调度等关键参数,实现对无线网络中资源、环境、干扰、用户和业务等多维状态的深度感知、挖掘与利用,并通过数据驱动、算力协同实现算法优化部署,从而显著地提升无线系统的性能、容量和效率,实现网络自主运行与自我演进,有效支撑未来智能信息服务。利用从物理世界采集到的大量先验数据,无线AI可以协助基于UAV和IRS的ISAC网络快速高效地获取信道状态信息,并根据实时的信道状态和流量需求进行动态频谱分配、反射相移设计和飞行路径规划,从而提升数据传输速率并保证稳定性,实现通信、成像、感知和定位等一体化功能。

4.5 隐蔽通信

基于UAV和IRS多维扩展的通感一体化在网络容量和覆盖范围等方面均具有较强的优势和吸引力。然而,空地链路的开放性使得信息安全传输面临干扰、仿冒与窃听的风险^[41]。隐蔽通信,也称为低检测概率(Low Probability of Detection, LPD)通信,不同于传统信息加密技术和物理层安全技术,它通过隐藏机密信息的传输来满足无线网络和物联网中日益增长的安全与隐私需求,成为了6G万物智联的研究热点之一^[42]。一个完整的隐蔽通信模型中同时存在合法发送者、合法接收者和非法监听者。隐蔽通信技术利用信号检测理论分析监听者的检测性能,通过优化系统参数降低监测者的检测概率,进而实现合法收发端之间信息的隐蔽传输。融合隐蔽通信至UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC网络,可有效保护感知数据,实现节点间通信的隐

蔽性。具体地,利用IRS相位分配的随机性可以扰乱窃听的信号接收,降低其信号检测性能。另一方面,UAV具备高度的机动性与灵活性,可作为移动的通信节点,为合法接收者提供高质量的LoS链路,通过快速调整部署位置,降低非法监测者截获的风险。

4.6 有源智能反射面

无源元件集成的IRS不具备处理基带信号的能力,无法准确获取信道状态信息。此外,无源IRS会引入乘性衰落效应,即级联信道的路径损耗是基站到IRS和IRS到接收机路径损耗的乘积,这将导致严重的增益损耗。相比之下,有源IRS可以将低成本的功率放大器集成到表面单元中增加反射波束成形增益^[43],且易于获取信道状态信息。集成有源IRS和UAV的ISAC可以弥补无源IRS引入的双路径损耗,进一步增强接收端的信号强度,提高目标感知精度和通信质量。

5 多维扩展通感一体化发展的技术挑战

基于UAV和IRS辅助的多维扩展通感一体化在智慧城市、灾难救援和战场侦察等众多领域具有广阔的应用前景,其低成本、快速部署和环境感知的能力,极大推动了6G万物智联愿景的发展。尽管当前研究工作已经从无源波束成形、UAV轨迹优化和位置部署等角度对基于UAV和IRS多维扩展的ISAC网络进行了一些初步探索,但在网络优化、频谱管理、安全加密、协议设计、系统集成等不同层次的设计和实现中仍然存在一些技术挑战。

5.1 无人机集群协同感知

面对日益复杂的应用环境和多样化的任务需求,UAV的应用朝着越来越大规模的集群化方向发展。UAV集群具备更强的协同性、智能性与自主性,能以更低成本和更高效率保证在单架UAV故障或受损时任务的连续性和完成度。实现多UAV协同IRS辅助的通感一体化,能进一步挖掘UAV的机动优势,显著扩大任务范围和应用领域。UAV集群协同感知,能将多个UAV的感知能力和传感数据进行融合,实现大范围区域的覆盖与监测,提供更全面、准确的环境感知和通信服务。然而,面对高度动态变化的无线网络,IRS需要与UAV集群进行有效的协同操作,实现数据的高效共享,确保IRS能够准确地了解UAV集群的位置、速度和任务需求等信息,并相应地调整信号反射模式。突破基于UAV集群和IRS的无线网络的信道估计,设计IRS辅助UAV集群协作通感一体化网络的多维资源调度与管控方案是其中的关键挑战。

5.2 网络架构与组网设计

在高速移动环境下,UAV通常会产生高动态、稀疏性和间歇性连接的网络拓扑结构。因此,需要设计有效的网络连接,保证信号安全可靠地传输。由于雷达波束成形与大规模MIMO系统的相似性,在进行ISAC组网时迫切需要建立两者之间的抗干扰协调机制,保证在具体的环境和工作条件下感知与通信业务的连续性。在动态变化的网络中,IRS和UAV难以实现网络拓扑的快速重构与高效协同,从而导致组网效率恶化且难以识别恶意节点的伪装。因此,需要有效的组网协调、通信和感知资源的联合调度和干扰管理等方案,持续保障多维扩展的通感一体化网络服务质量。

5.3 物理层安全

通过共享通信和雷达频谱,基于UAV和IRS的多维扩展ISAC网络可以在提供传统通信服务的同时灵活地实现定位、测距和跟踪等感知功能,有效支持各种新兴的6G业务应用。然而,由于无线信道固有的开放性和广播特性,导致UAV提供的空地LoS链路易受到有源干扰和被动窃听的恶意攻击。当有源干扰参与时,系统的合法感知与接收将会被干扰信号降级。另一方面,窃听者可以估计合法收发器之间的信道状态信息,截获用户的机密信息。此外,与传统通信系统相比,ISAC的感知和通信能力高度融合,这将导致敏感信息泄露。如果目标存在敌对属性,甚至会引发信息安全事故。因此,物理层安全正成为基于UAV和IRS多维扩展通感一体化网络设计的关键挑战。

5.4 信道估计

UAV作为高速移动的无线通信平台,不断变化的位置与轨迹导致ISAC网络的无线信道在短时间内发生快速变化,使得信道估计变得愈加复杂。另一方面,IRS通常由不能执行基带信号处理功能的无源元件组成,因此无法获得完美的信道状态信息。与此同时,为了增加信号强度,需要准确估计反射面上的相位设置,实现反射信号的定向和聚焦。然而相位估计误差会导致信号衰减,从而降低通信性能。此外,环境中的障碍物和多径传播效应也会引入不确定性,使信道估计更具挑战性。因此,在时变信道模型下,发展一种新的低导频、低开销的信道估计方法以克服衰落和多径效应,从而提升基于UAV和IRS的多维扩展的ISAC服务质量势在必行。

5.5 波束成形设计

波束成形技术是利用较小间距的天线阵元之间的相关性,在不同阵元波束间形成干涉,集中能量

于特定方向上形成波束, 从而实现广域覆盖与干扰抑制。优化UAV和IRS辅助的多维扩展ISAC网络的主被动波束成形可增强信号强度, 提高通信速率和感知精度。当前, 波束成形技术在已有的标准通信中广泛应用。然而, 在通感一体化网络中, 由于感知和通信存在不同的性能要求, 其波束成形的设计也面临着独特的挑战。在一些感知场景中, 通常需要时变的扫描波束以扩大感知范围, 实现对大范围和多目标的估计与检测, 如车联网。而在通信方面, 往往需要集中能量形成定向波束从发射端传输至接收端, 以保障可靠稳定的高质量通信。因此, 在多维扩展通感一体化具体的应用场景中, 需要综合通信和感知各自的任务需求, 合理设计一体化波束成形。

5.6 太赫兹技术硬件研发和波束设计

太赫兹技术具有大带宽、超密集连接和隐私保护等优势, 可实现Tbit/s级的超高速率数据传输和毫米级的高分辨率感知, 借助IRS无线重构和UAV机动性的优势可为太赫兹无线网络应用提供更多的发展空间。然而, 与其它频段相比, 太赫兹通信领域的技术和设备相对不够成熟, 不能满足超大带宽太赫兹信号的数模转换和超高速率基带处理功能。在UAV和IRS辅助的空天地太赫兹无线网络中, 传统的信道建模方法难以权衡复杂度和准确性。此外, 太赫兹信号的波束成形和自适应调制面临着复杂的环境变化、路径损耗, 多径干扰和频率选择性衰落等挑战。因此, 亟需在太赫兹高频收发器件、信道建模方法和超宽带基带信号处理算法等方向加大研究投入, 弥补太赫兹通感一体化在器件设计、网络协议和硬件验证平台等领域的技术空缺, 推动太赫兹通感一体化网络在多层次、宽领域实现通信和感知功能的融合发展和应用创新。

6 结论

未来的6G网络将超越传统通信的能力边界, 扩展至感知与通信服务一体化的新场景。本文针对基于UAV和IRS辅助的6G多维扩展通感一体化网络研究展开了综述和分析。首先, 总结了6G通感一体化的基础理论和典型应用场景; 然后, 探讨了6G移动通信中超大规模天线、太赫兹、无线携能通信、人工智能、隐蔽通信和有源智能反射面等关键前沿技术在基于UAV和IRS多维扩展通感一体化中的发展和优势。最后, 明确了面向6G多维扩展通感一体化网络的发展方向和存在的关键技术挑战。

参考文献

[1] 易芝玲, 王森, 韩双锋, 等. 从5G到6G的思考: 需求、挑战与

技术发展趋势[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(2): 1-9. doi: 10.13190/j.jbupt.2020-024.

YI Zhiling, WANG Sen, HAN Shuangfeng, *et al.* From 5G to 6G: Requirements, challenges and technical trends[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(2): 1-9. doi: 10.13190/j.jbupt.2020-024.

[2] LIU Guangyi, HUANG Yuhong, LI Na, *et al.* Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030[J]. *China Communications*, 2020, 17(9): 92-104. doi: 10.23919/JCC.2020.09.008.

[3] ZHANG Shunqing, XIANG Chenlu, and XU Shugong. 6G: Connecting everything by 1000 times price reduction[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2020, 1: 107-115. doi: 10.1109/OJVT.2020.2980003.

[4] HAN Chong, WANG Yiqin, LI Yuanbo, *et al.* Terahertz wireless channels: A holistic survey on measurement, modeling, and analysis[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(3): 1670-1707. doi: 10.1109/COMST.2022.3182539.

[5] 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.

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.

[6] AKAN O B and ARIK M. Internet of radars: Sensing versus sending with joint radar-communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(9): 13-19. doi: 10.1109/MCOM.001.1900550.

[7] LIU Rang, LI Ming, LUO Honghao, *et al.* Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: Opportunities, applications, and future directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(1): 50-57. doi: 10.1109/MWC.002.2200206.

[8] 张嘉慧, 王新奕, 费泽松, 等. 6G通感融合网络中的物理层安全: 机遇与挑战[J]. 移动通信, 2023, 47(3): 55-61. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230204-0002.

ZHANG Jiahui, WANG Xinyi, FEI Zesong, *et al.* Physical layer security in 6G integrated sensing and communication systems: Opportunities and challenges[J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(3): 55-61. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230204-0002.

[9] 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.

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).
- [10] 朱政宇, 王梓暄, 徐金雷, 等. 智能反射面辅助的未来无线通信: 现状与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 025014. doi: [10.7527/s1000-6893.2021.25014](https://doi.org/10.7527/s1000-6893.2021.25014).
ZHU Zhengyu, WANG Zixuan, XU Jinlei, *et al.* Future wireless communication assisted by intelligent reflecting surface: State of art and prospects[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(2): 025014. doi: [10.7527/s1000-6893.2021.25014](https://doi.org/10.7527/s1000-6893.2021.25014).
- [11] 朱政宇, 徐金雷, 孙钢灿, 等. 基于IRS辅助的SWIPT物联网系统安全波束成形设计[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 185–193. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021060](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021060).
ZHU Zhengyu, XU Jinlei, SUN Gangcan, *et al.* Secure beamforming design for IRS-assisted SWIPT internet of things system[J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(4): 185–193. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2021060](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2021060).
- [12] PANG Xiaowei, SHENG Min, ZHAO Nan, *et al.* When UAV meets IRS: Expanding air-ground networks via passive reflection[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(5): 164–170. doi: [10.1109/MWC.010.2000528](https://doi.org/10.1109/MWC.010.2000528).
- [13] HE Yinghui, CAI Yunlong, MAO Hao, *et al.* RIS-assisted communication radar coexistence: Joint beamforming design and analysis[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2131–2145. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155507](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155507).
- [14] SU Yuhua, PANG Xiaowei, CHEN Shanzhi, *et al.* Spectrum and energy efficiency optimization in IRS-assisted UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(10): 6489–6502. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3201122](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3201122).
- [15] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUROS C, *et al.* Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728–1767. doi: [10.1109/JSAC.2022.3156632](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3156632).
- [16] 伍光新, 姚元, 祁琳琳. 雷达通信波形一体化发展综述[J]. 现代雷达, 2021, 43(9): 37–45. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.007).
WU Guangxin, YAO Yuan, and QI Linlin. An overview on radar-communication integration of waveform[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(9): 37–45. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.007](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.09.007).
- [17] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G Network Architecture Vision and Key Technology Outlook White Paper[R]. 2021.
- [18] CUI Yanpeng, FENG Zhiyong, ZHANG Qixun, *et al.* Toward trusted and swift UAV communication: ISAC-enabled dual identity mapping[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(1): 58–66. doi: [10.1109/MWC.003.2200207](https://doi.org/10.1109/MWC.003.2200207).
- [19] MENG Kaitao, WU Qingqing, MA Shaodan, *et al.* Throughput maximization for UAV-enabled integrated periodic sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(1): 671–687. doi: [10.1109/TWC.2022.3197623](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3197623).
- [20] SHAO Xiaodan, YOU Changsheng, MA Wenyan, *et al.* Target sensing with intelligent reflecting surface: Architecture and performance[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2070–2084. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155546](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155546).
- [21] YOU Changsheng, KANG Zhenyu, ZENG Yong, *et al.* Enabling smart reflection in integrated air-ground wireless network: IRS meets UAV[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(6): 138–144. doi: [10.1109/MWC.001.2100148](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100148).
- [22] 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).
- [23] 李国琳, 郭文彬. 雷达通信一体化波形设计综述[J]. 移动通信, 2022, 46(5): 38–44. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.006).
LI Guolin and GUO Wenbin. Waveform design for integrated radar and communication: A survey[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(5): 38–44. doi: [10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.006).
- [24] BAYESTEH A, 何佳, 陈雁, 等. 通信感知一体化——从概念到实践[EB/OL]. <https://www.huawei.com/cn/huaweitech/future-technologies/integrated-sensing-communication-concept-practice>, 2022.
BAYESTEH A, HE Jia, CHEN Yan, *et al.* Integration of communication and perception—from concept to practice[EB/OL]. <https://www.huawei.com/cn/huaweitech/future-technologies/integrated-sensing-communication-concept-practice>, 2022.
- [25] XIAO Zhiqiang and ZENG Yong, Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication [J] *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6):1823–1837. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155509](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155509).
- [26] HUANG Tianyao, SHLEZINGER N, XU Xingyu, *et al.* MAJoRCom: A dual-function radar communication system using index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3423–3438. doi: [10.1109/TSP.2020.2994394](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2994394).
- [27] NOWAK M, WICKS M, ZHANG Zhiping, *et al.* Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 28–35. doi: [10.1109/MAES](https://doi.org/10.1109/MAES).

- 2016.150236.
- [28] KUMARI P, MYERS N J, and HEATH R W. Adaptive and fast combined waveform-beamforming design for mmWave automotive joint communication-radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(4): 996–1012. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3071592](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3071592).
- [29] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Robust OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory[J]. *Signal Processing*, 2019, 162: 317–329. doi: [10.1016/j.sigpro.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.05.001).
- [30] LIU Fan, ZHOU Longfei, MASOUIROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(16): 4264–4279. doi: [10.1109/TSP.2018.2847648](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2847648).
- [31] XIAO Zhiqiang and ZENG Yong. Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1823–1837. doi: [10.1109/JSAC.2022.3155509](https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3155509).
- [32] BAXTER W, ABOUTANIOS E, and HASSANIEN A. Joint radar and communications for frequency-hopped MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 729–742. doi: [10.1109/TSP.2022.3142909](https://doi.org/10.1109/TSP.2022.3142909).
- [33] CUI Yuanhao, LIU Fan, JING Xiaojun, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 158–167. doi: [10.1109/MNET.010.2100152](https://doi.org/10.1109/MNET.010.2100152).
- [34] XU Yu, ZHANG Tiankui, LIU Yuanwei, et al. UAV-enabled integrated sensing, computing, and communication: A fundamental trade-off[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(5): 843–847. doi: [10.1109/LWC.2023.3245728](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3245728).
- [35] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告(2021年)[R]. 中国通信学会, 2021.
China Communications Society. Frontier Report on the Integrated Sensing, Communication and Computing Network[R]. China Communications Society, 2021.
- [36] ZHANG Zhengquan, XIAO Yue, MA Zheng, et al. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28–41. doi: [10.1109/MVT.2019.2921208](https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208).
- [37] CHEN Zhi, MA Xinying, ZHANG Bo, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1–35. doi: [10.12676/j.cc.2019.02.001](https://doi.org/10.12676/j.cc.2019.02.001).
- [38] IMT-2030(6G)推进组. 太赫兹通信技术研究报告[R]. 2022.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. Terahertz Communication Technology Research Report[R]. 2022.
- [39] CLERCKX B, ZHANG Rui, SCHÖBER R, et al. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(1): 4–33. doi: [10.1109/JSAC.2018.2872615](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2872615).
- [40] WANG Jiadai, LIU Jiajia, LI Jingyi, et al. Artificial intelligence-assisted network slicing: Network assurance and service provisioning in 6G[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2023, 18(1): 49–58. doi: [10.1109/MVT.2022.3228399](https://doi.org/10.1109/MVT.2022.3228399).
- [41] LIU Peng, FEI Zesong, WANG Xinyi, et al. Outage constrained robust secure beamforming in integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(11): 2260–2264. doi: [10.1109/LWC.2022.3198683](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3198683).
- [42] 王超, 安建平, 邢成文, 等. 面向空间信息网络的隐蔽通信技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2023. doi: [10.1360/SSI-2023-0101](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0101).
WANG Chao, AN Jianping, XING Chengwen, et al. A review of covert communication technologies for space information networks[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2023. doi: [10.1360/SSI-2023-0101](https://doi.org/10.1360/SSI-2023-0101).
- [43] ZHANG Zijian, DAI Linglong, CHEN Xibi, et al. Active RIS vs. passive RIS: Which will prevail in 6G?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(3): 1707–1725. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3231893](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3231893).
- 徐金雷: 男, 博士生, 研究方向为通感一体化、无人机通信、智能反射面。
赵俊渥: 男, 高级工程师/副教授, 研究方向为通信产业趋势、通感一体化、无人机通信。
卢华兵: 男, 博士, 研究方向为通感一体化、无人机通信、物理层安全。
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。
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、绿色通信。

责任编辑: 马秀强