

面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术



Satellite Integrated Sensing and Communication Network for 6G and Its Key Technologies

杨帅斌/YANG Shuaibin, 张昱/ZHANG Yu,
卢为党/LU Weidang

(浙江工业大学, 中国 杭州 310023)
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241012.1717.004.html>

网络出版日期: 2024-10-14

收稿日期: 2024-08-12

摘要: 通信感知一体化 (ISAC) 是6G网络的关键技术之一, 而卫星通信感知一体化是其中的重要一环。探讨了卫星通感一体化网络及其关键技术, 首先, 详细分析了卫星通感一体化网络架构, 包含相互协同的天基、空基和地基网络; 随后, 讨论了卫星通信感知一体化的关键技术, 包括通感波束形成、通感波形设计、星间链路技术、星上处理技术和卫星天线技术; 最后, 探讨了若干未来研究方向, 包括大规模多输入多输出 (MIMO) 通感一体化、空天地通感网络安全和新型天线架构, 以推动6G卫星通感一体化技术的进步。

关键词: 通信感知一体化; 卫星通信; 6G网络

Abstract: Integrated sensing and communication (ISAC) is one of the key technologies in 6G networks, wherein satellite integrated sensing and communication is an important part. This paper discusses the satellite ISAC network and its key technologies. Firstly, the satellite ISAC network architecture is introduced in detail, including the space-based, air-based and ground-based networks that cooperate with each other. Then, the key technologies of satellite ISAC are discussed, including ISAC beamforming, ISAC waveform design, inter-satellite link technology, on-satellite processing technology, and satellite antenna technology. Finally, several future research directions are explored, including ISAC with massive multiple input multiple output (MIMO), space-air-ground ISAC network security, and new antenna structure, in order to promote the progress of 6G satellite ISAC technology.

Keywords: integrated sensing and communication; satellite communication; 6G network

引用格式: 杨帅斌, 张昱, 卢为党. 面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 16-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405004

Citation: YANG S B, ZHANG Y, LU W D. Satellite integrated sensing and communication network for 6G and its key technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 16-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405004

随着第5代 (5G) 移动通信网络的商业部署, 第6代 (6G) 网络正逐渐从愿景演变为具体设计。6G网络旨在支持更低的延迟、更高的数据速率, 以及更多样化的用户终端 (UT), 可支持各类新兴应用, 包括智慧医疗、自动驾驶、工业控制等^[1]。6G作为最新一代的智能数字信息基础设施, 将与大数据、人工智能 (AI) 等前沿信息技术紧密结合, 实现通信、感知和控制的深层次融合^[2]。国际电信联

盟 (ITU) 面向2030的未来技术趋势研究报告指出, 通信感知一体化 (ISAC) 技术将成为新一代移动通信系统最有潜力的关键技术方向之一^[3]。6G通信感知一体化技术将利用无线电信号, 对目标进行检测、定位和识别, 从而捕捉和重建环境数据, 引领6G网络迈向物理世界与数字世界融合的新时代。

作为空天地的关键部分, 卫星通信系统在提供全球覆盖方面发挥着至关重要的作用。卫星移动通信系统结合卫星通信、计算机、航天等领域技术, 在地面移动通信系统的基础

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62171412、62271447); 浙江省自然科学基金项目 (LD21F010001)

上为用户提供大跨度、大范围的移动通信服务，有着地面系统难以企及的优势^[4]。一方面，卫星通信具有广泛的覆盖范围、较远的通信距离以及灵活的机动能力，其广播性又能与多址接入技术相融合，从而构成一个庞大的通信网络；另一方面，卫星通信的电磁波主要在真空环境下传输且以视距传输为主，传输损耗较为稳定。除此之外，卫星在感知方面也有重要作用，比如气象卫星可以利用搭载的仪器来监测极端天气事件，导航卫星可以提供精确的定位、路线和时间同步服务^[5]。

随着全球卫星通信网络的建设，以及卫星和地面移动通信的深度融合，卫星通感一体化系统越来越受到关注。卫星通感一体化技术通过空口及协议联合设计、时频资源的复用和硬件设备的共享，实现了通信与感知功能的无缝融合。这种设计不仅优化了卫星计算、通信、感知相关软硬件资源的利用，还提升了整体系统效率。卫星通感一体化为6G网络提供了新的通信层次和感知视角，能够提升6G网络通信质量以及感知精细度与准确度^[6]，为6G网络提供广泛、智能化、协同化和高效率的信息与通信服务提供有效支撑。

1 6G 卫星通信感知一体化网络架构

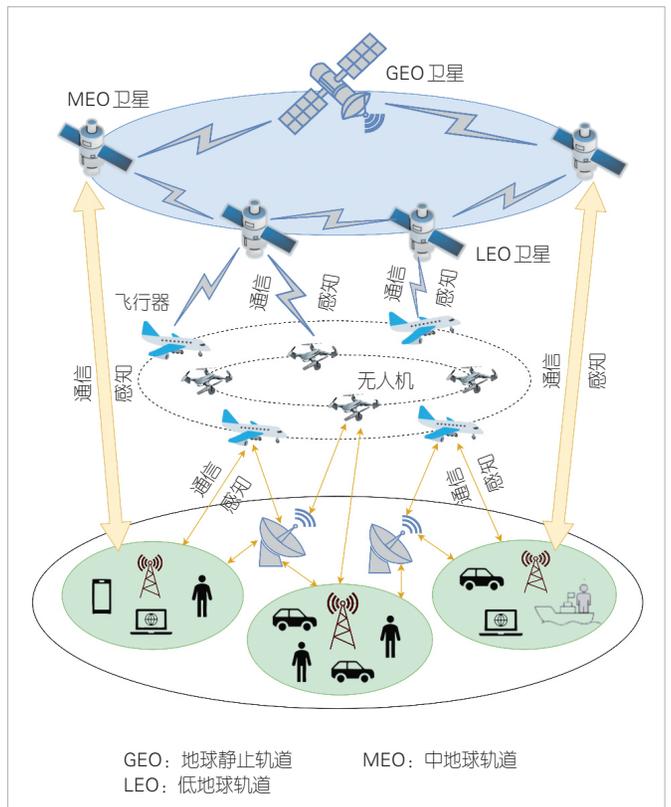
在6G网络中，卫星通信感知一体化网络将充分利用现代信息技术，实现天基、空基和地基网络的深度融合。它将通信、感知和智能技术融为一体，构建起一个三维的全球覆盖网络，以覆盖空中、太空和地面。空天地一体化是未来网络发展的关键趋势之一。

文献[7]探讨了非地面网络从5G向6G的演变，强调了非地面网络在5G网络中的重要性以及它在6G生态系统发展中的关键作用。非地面网络的优势在于能够提供全球覆盖，实现连续、无处不在的高容量连接。文献[8]中提出的空天地一体化网络架构通过整合卫星、空中和地面网络，实现了全球无缝覆盖和高效灵活的通信。该架构的优势在于其能够充分利用各网络段的计算和通信资源，通过协同计算技术，优化资源分配，满足不同服务需求。文献[9]中提出的空天地一体化网络架构通过结合AI和软件定义网络技术，实现了资源的高效管理和优化。该架构的优势在于其分层混合深度强化学习方法，能够适应空天地一体化网络的动态性和异构性，通过在不同网络层面部署本地和全局控制器，实现精准的资源分配和网络优化。如图1所示，6G中的卫星通信感知一体化网络架构主要包含空基网络、天基网络以及地基网络。这一架构不仅能够提供无缝的全球连接，而且还能集成

先进的感知技术和人工智能，使得网络不仅成为数据传输的通道，还是具备环境监测、目标跟踪等智能感知能力的综合体。

1) 天基网络：天基网络即卫星网。卫星轨道根据轨道高度来分类时，主要分为3种类型：地球静止轨道（GEO）卫星、中地球轨道（MEO）卫星和低地球轨道（LEO）卫星。天基网络通过部署在地球低轨道、中轨道和地球静止轨道上的卫星，实现对地球表面的全面覆盖，确保全球用户都能获得通信服务。利用卫星作为中继站，一方面天基网络能够为地面基站提供数据回传服务，增强现有5G网络的覆盖范围和容量，同时支持新兴的6G服务，如增强型移动宽带（eMBB）、大规模物联网（mMTC）和超可靠低延迟通信（URLLC）；另一方面，天基网络通过利用卫星搭载的传感器、雷达等进行感知，实现对环境、气候、灾害等的监测，并为地面用户提供精准的感知数据。在6G ISAC架构下，天基网络不仅提供通信服务，还能够通过感知数据辅助通信网络的优化和管理，如通过环境感知数据优化波束成形和信号覆盖，或利用感知到的用户分布数据进行网络资源的智能调度。

2) 空基网络：利用高空平台，如无人机、飞艇等，携



▲图1 6G卫星通信感知一体化网络架构

带先进的通信和感知设备，形成一个灵活、高效的网络服务和数据收集系统。这些平台在连接天基和地基网络中发挥着至关重要的作用。它们可以根据实际需求，快速部署到特定区域，为当地提供即时的通信和感知服务。这种快速响应能力在紧急情况下尤为重要，如自然灾害发生时，空基网络可以迅速覆盖受影响区域，提供关键的通信支持和数据收集服务。空基网络搭载的感知设备能够进行大范围的环境监测、交通监控等，收集关键数据并实时传输给地面站或用户。这种实时数据的收集和传输，对于优化资源分配和增强应急响应能力具有重要意义。空基网络的另一个重要特点是其与地面网络、卫星网络的协同工作能力。通过多维度的数据收集和融合，空基网络能够显著提高整体网络的感知能力。

3) 地基网络：作为6G架构中的主要通信枢纽，主要提供大容量、低延迟的宽带接入服务，可以支持大量用户和设备的数据传输需求，同时与天基网络和空基网络实现深度融合，以提供无所不在的通信和高精度的感知服务。地基网络能够提供多种无线接入技术，包括6G移动网、Wi-Fi、蓝牙等，实现与不同类型设备的无缝连接和互操作性。此外，地基网络节点可以搭载先进的感知计算设备，收集来自天基和空基网络的感知数据，并进行处理和分析，进而为任务决策、通信优化以及各类通感业务提供支持。通过与卫星和空基网络协同工作，可以提供更精准快速的感知服务，满足高可靠低时延、大连接、广覆盖等多样化通信服务质量需求，并支持智慧城市、工业自动化、远程医疗、智能交通等各类新兴应用场景，满足不同行业的通信和感知需求。

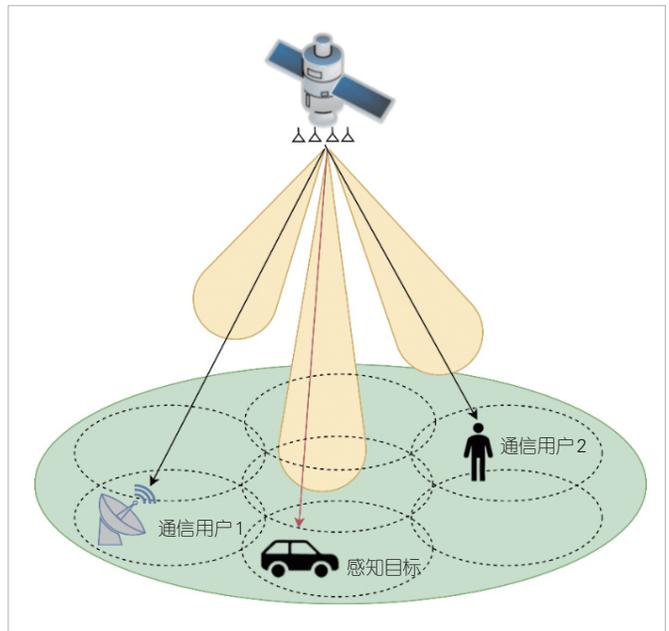
2 卫星通感一体化系统的关键技术

2.1 通感波束形成

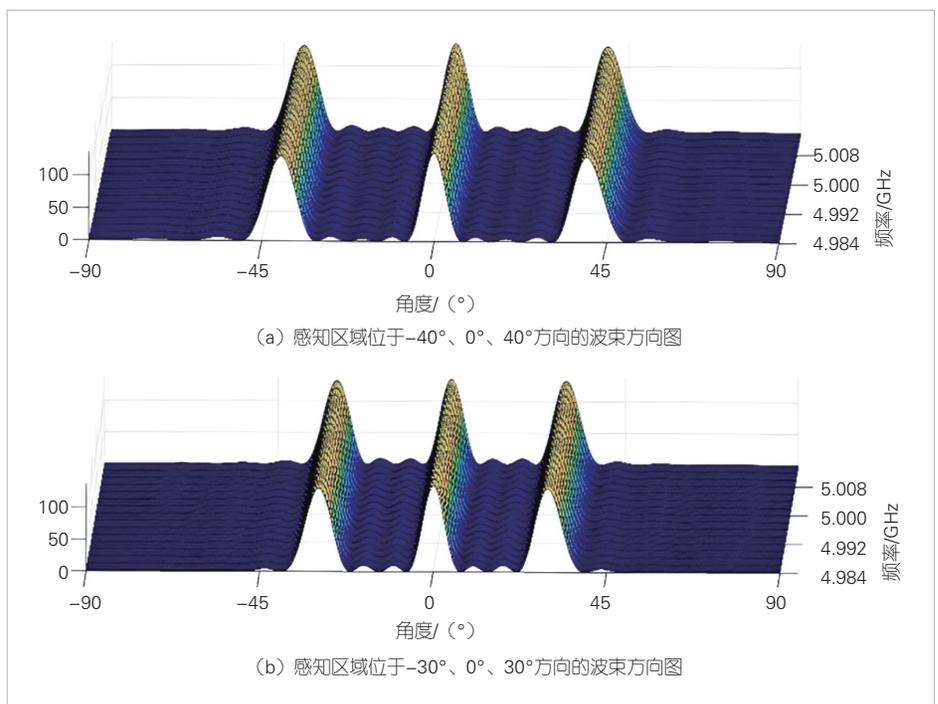
通感波束形成技术是6G通信感知一体化系统中的一项关键技术，它使得卫星能够同时进行高效的通信和精确的感知任务。通感波束形成技术整合了通信和感知功能，允许使用同一硬件资源执行两种任务，提高了系统的效率和灵

活性。

图2和图3分别是通感波束形成系统示意图和空-频通感波束图案示意图。通感波束形成技术使用先进的信号处理算法和相控阵天线，通过调整天线阵元的相位和幅度，形成指向特定方向（比如感知目标和通用户所在区域）以及能量集中于特定频段的波束，以提升通信和感知性能。在通信



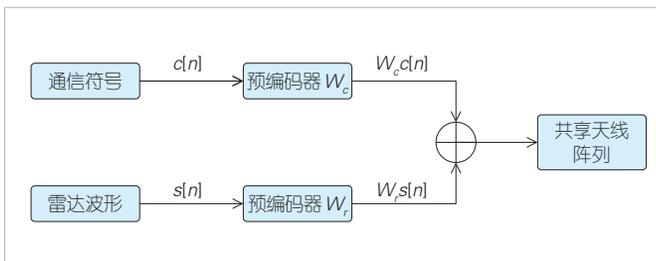
▲图2 通感波束形成系统示意图



▲图3 空-频通感波束图案示意图

方面,波束形成设计目标是增强信号强度,减少干扰,提高数据传输速率和通信质量,同时支持多用户接入。在感知方面,波束形成设计目标是增强波束指向性,提高空间分辨率,实现对目标的精确定位、成像和跟踪。围绕上述设计目标,文献[10]提出了一种全双工通信系统下的ISAC波束赋形和功率优化方法,通过联合优化基站的下行信号和上行接收波束赋形,以及上行用户的发射功率,最小化系统总功率消耗并最大化通信总速率。文献[11]提出了一种用于ISAC系统的广义收发波束成形设计方法,双功能基站同时作为多输入多输出雷达探测目标,并与多个多天线通信用户通信,通过联合收发器波束成形设计,实现了在保证雷达性能的同时提高通信速率。文献[12]提出了一种多天线网络ISAC系统中的最优协作传输波束成形设计方法,针对无法消除和能够消除专用感知信号干扰的通信用户,优化相应的波束成形,以最大化在特定目标区域的最小检测概率,同时保证通信用户的最小信干噪比(SINR)约束。另一方面,由于瞬时信道状态信息(CSI)的获取在动态环境中可能具有挑战性,通感波束形成技术可以利用统计CSI来实现更稳定的波束管理,减少计算复杂度^[13]。

卫星混合波束形成^[14]是一种先进的波束管理技术,它在卫星通信和感知一体化系统中发挥着至关重要的作用。混合波束形成技术结合了两种或多种波束形成方法,以实现更优的性能。在卫星系统中,通常结合固定波束和电子扫描波束的优势,以提供灵活的覆盖和高效的资源利用。固定波束形成是通过物理天线阵列实现的,波束的方向和形状是固定的,适用于提供稳定的覆盖区域。电子扫描波束形成则利用相控阵天线,通过改变天线阵元的相位来动态调整波束的方向,实现快速的波束指向调整。文献[15]验证了在毫米波ISAC系统中,通过设计模拟和数字混合波束成形,可以形成指向目标方向的期望雷达空间波束。混合波束形成技术可以根据用户需求和网络条件,动态调整波束的覆盖范围和形状,优化信号质量和系统容量^[16]。



▲图4 叠加形式的通信感知波形设计框架

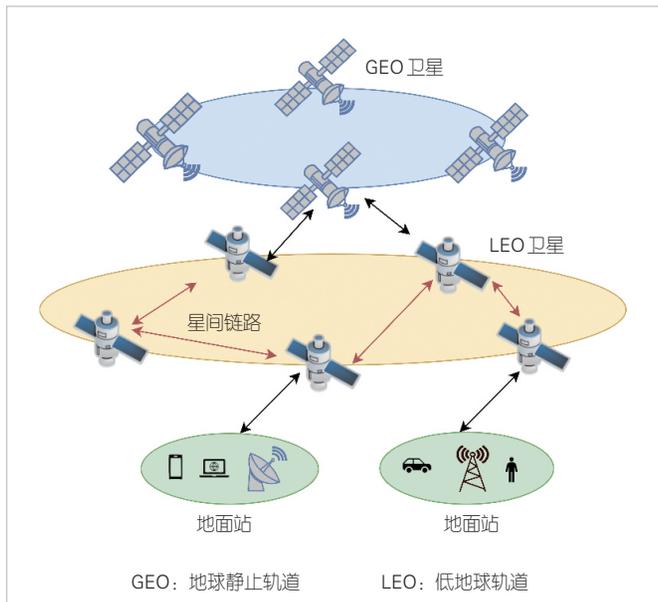
2.2 通感波形设计

在通信与感知功能融合的框架下,感知信号和通信信号能够通过一体化的波形设计和检测,共享同一硬件设备。这种设计允许系统在发送和接收信号时,同时进行信息的传输和环境的感知,大大提高了频谱和硬件资源的使用效率。使用精确的信号同步和优化算法,可以确保在不同模式下信号的稳定性和准确性,从而减少信号之间的干扰。图4为一种叠加形式的通感波形设计框架,即通感波形是由通信信号与雷达波形叠加而成的。

通感波形设计包括感知导向、通信导向以及通信感知折中。感知导向设计的目标是在满足通信需求下最优化感知性能,例如最大化雷达信干噪比、最小化感知误差或最小化通感波束图案均方误差等。文献[17]针对杂波环境中的双功能雷达通信系统,通过优化传输波形,保证通信用户的服务质量的同时,提高目标检测能力,最大化感测SINR。文献[18]研究了在杂波存在的环境下,双功能雷达通信系统的恒定模数波形设计问题,提出了一种基于循环优化和交替方向乘子法的迭代算法,对每个通信信号的合成误差施加了约束,保证每个通信用户的服务质量,同时最大化雷达SINR。通信导向设计目标是在满足感知指标下最优化通信性能(例如最大化用户接收信噪比或最大化用户传输速率等)。文献[19]研究了一种多用户多目标双功能雷达通信波形设计方法,提出了基于半定规划和矩阵空间投影方法的低复杂度波形设计,在保证雷达性能约束下,最大化用户通信速率。文献[20]提出了一种新颖的ISAC波形设计方法,通过可调节峰均功率比来最小化多用户通信干扰,同时保持与雷达信号的相似性。而为了灵活调节通信和感知性能,折中设计一般以两者加权和为设计目标。文献[21]研究了一种双功能多输入多输出雷达通信系统,在功率约束下通过加权优化ISAC波形设计,来逼近所需要的雷达波束图。文献[22]提出了一种面向多输入多输出正交频分复用的ISAC系统的波形设计方法,采用互信息(MI)作为统一的性能度量指标,通过调节通信MI和感知MI之间的权重,实现了在通信和感知性能之间取得平衡。借助通感一体化波形设计,一方面能够减少感知信号和通信信号之间的电磁干扰,降低雷达和通信双发射系统整体功耗,另一方面,还能显著提升软硬件以及空时频资源的利用效率。

2.3 星间链路技术

星间链路技术使得卫星之间能够建立高效通信链路,



▲图5 星间链路网络

即每颗卫星都能够作为网络中的一个节点，与其他卫星进行直接的数据交换，因此能够增强卫星通信以及感知效率。文献[23]探讨了面向6G的集成卫星-地面网络架构，强调了星间链路技术在实现卫星网络全球覆盖、增强网络连通性和可靠性方面的关键作用。星间链路技术通过在卫星之间直接建立通信链路，减少了对地面站的依赖，降低了传播延迟，并提高了信号传输的稳定性。文献[24-25]探讨了低地球轨道卫星星座网络中星间链路的动态建立问题，旨在最大化星座内部数据传输速率。通过使用星间链路技术，在LEO星座中动态建立星间链路，增加了卫星间的直接连接，提高了网络的连通性和自主性，对于实现全球覆盖、降低延迟、提升系统容量具有重要作用。图5为星间链路网络示意图，这样的网络不仅提升了通信的连续性和稳定性，而且通过感知数据的即时共享，增强了整个系统的监测和预测能力。通过星间链路的支持，卫星移动通信系统中的用户可以享受到更稳定、更抗干扰的通信服务。同时，星间感知数据的交互使得卫星网络能进行更精确的环境监测、目标跟踪和其他感知任务。

星间链路技术主要采用微波通信和激光通信两种形式。微波通信因其广泛的应用和相对成熟的技术而成为主流选择，尽管其传输速率的提升可能会受到带宽、尺寸和成本等因素的影响而受到限制。激光通信技术则展现出显著的优势，它提供的宽带能力可以显著提高卫星移动通信的潜在容量，同时减小卫星负载的尺寸和重量。更重要的是，激光通信技术能够实现广域上的大程度单跳连接，大幅度

减少信号通信延迟，这对于实时性要求高的感知任务尤为关键。

2.4 星上处理技术

当前的卫星系统仍面临着信号传输延迟、传输质量不佳和系统容量有限等问题，这些问题严重制约了系统的性能。为了克服这些限制，卫星系统需要具备强大的处理能力，这不仅包括通信任务中的信号切换、精准调制和高效波束形成，也涵盖了感知任务中对数据的深度处理、特征的智能提取和信息的精准融合。强大的星上处理能力，是提升通信感知能力的关键。文献[26]探讨了星上处理技术在卫星通信中的应用，星上处理技术作为卫星通信关键技术之一，通过在卫星上进行数字化处理，提高了系统的灵活性和效率。星上处理技术使得卫星能够执行复杂的信号处理任务，例如波束成形、频率复用，从而优化了通信链路。星上处理技术通过在卫星上直接进行数据处理和优化，能够有效减少信号在传输过程中的延迟，同时提升信号的传输质量。它使得卫星在传输过程中能够快速响应，优化信号质量，并有效扩展系统的处理容量，为卫星系统带来了更敏捷的数据处理速度，更高效的资源管理和更智能的任务执行。

在卫星通信感知系统中，星上处理技术主要包括星上处理与交换、完全透明转发和部分处理与交换共3种形式。这些技术能够在数字域中实现，可以为通信和感知任务带来显著的优势。具体来说，星上处理技术能够提高资源利用率，确保通信服务的实时性和感知任务的快速响应。文献[27]探讨了非静止轨道卫星系统在通信领域的进展，强调了星上处理技术的重要性。星上处理技术的优势在于能够实现高速数据传输、增强网络连通性，并支持实时的通信能力。此外，星上处理技术还有助于提升卫星网络的灵活性和动态性，使其能够更好地适应不断变化的通信需求和环境条件。使用星上处理技术可以减少地面站的数据处理负担，快速处理和分发通信与感知数据，迅速响应用户请求，提供低延迟的通信和感知服务，动态调整资源分配，提高系统效率。

2.5 卫星天线技术

全球卫星移动通信系统经历了一个很长的发展阶段，在发展过程中出现了很多形式的天线^[28]，其中相控阵天线技术对于卫星通信系统至关重要。文献[29]探讨了空间相控阵天线在结构设计方面的发展，强调了其在卫星系统中的关键作

用。相控阵天线具有轻质结构、高增益、远距离覆盖、快速波束扫描和多波束形成等优势，满足了现代卫星对数据传输能力的需求。文献[30]探讨了相控阵天线技术在卫星通信中的应用，相控阵天线可以形成和指向辐射波束，覆盖广泛的区域，这对于确保卫星通信系统能够覆盖偏远地区非常关键。

同样地，相控阵天线技术对卫星通感一体化的实现也具有重要作用，这主要基于以下优势：1) 多波束成形，相控阵天线能够在—个周期内转换波束，形成多个不同方向的发射和接收波束；2) 波束赋形，通过调整相控阵阵列中各单元的信号幅度与相位，可以改变天线方向图或波束形状；3) 抗干扰性能强，相控阵天线能够集中多个辐射单元的能量，将能量和增益集中到特定方向，从而大大增强抗干扰能力；4) 系统可靠性高，由于相控阵系统是由多个阵列组件并联组成的，即使部分组件失效，系统仍可以继续运行。

相控阵天线采用电扫的方式控制波束指向，而不会在所谓的“先通后断”的切换过程中失去链接。相控阵天线可采用模拟波束赋形、数字波束赋形和混合波束赋形3种方式。其中，模拟波束赋形网络是固定的，可实现波束少，无法实时改变波束数量与天线极化方式；数字波束赋形网络灵活，可实现波束多，但存在设备复杂、功耗大、成本高、散热难等问题；混合波束赋形结合模拟波束赋形和数字波束赋形的优势，能灵活改变波束数量，实现性能、成本、复杂度和功耗等因素的综合优化。

3 未来研究方向

3.1 大规模MIMO通感一体化

卫星通信感知一体化系统，旨在通过单一平台实现通信与感知的双重功能。然而，在实际运行过程中，卫星通信感知一体化系统在提供服务时可能会遇到覆盖范围的限制，这在一定程度上影响了其在大范围内提供连续、稳定服务的能力，同时其抗干扰能力也相对有限，容易受到外部噪声的干扰。为了解决这些问题，WANG等引入了大规模MIMO技术^[31]。这项技术部署于低轨道卫星，形成大规模天线阵列，从而增强信号的接收和处理能力，同时还能加强基于这些卫星的感知服务。

在卫星通信感知一体化系统中，利用大规模天线阵列接收通信和感知信号，可以有效地减少多径效应和信号衰减，大大提升通信和感知性能。利用波束成形并使用大量

天线集中能量形成针状波束，可以提升通信、感知的指向性，减少对拥塞和干扰的敏感度，有助于提高系统的整体效率。

3.2 空天地通感网络安全

在6G网络中，空天地ISAC系统的充分融合给通信和感知带来了可观的系统集成优势，这种集成不仅提升了网络的覆盖能力和服务质量，还为用户带来了更加丰富和高效的应用体验。然而，随着系统集成度的提高，网络安全问题也变得更加突出^[32]。例如，空天地一体化网络中的路由节点由于缺乏足够的物理保护，其移动性和灵活性在一定程度上限制了复杂密码算法的部署和应用。这种局限性不仅影响了网络的安全性，还增加了敌对势力控制或捕获路由节点的风险。此外，由于传感和通信功能的共享波形，关键信息可能会在不经意间泄露给传感目标，从而增加了信息泄露的风险。

为了应对这些安全挑战，迫切需要对集成系统中的安全问题进行深入调查和探索研究。这包括但不限于开发更加安全的路由协议、增强路由节点的物理和网络安全防护，以及设计更加安全的传感和通信共享机制，以减少关键信息泄露的风险，并保护用户的隐私；同时，还需要加强对网络安全威胁的监测和预警，提高网络的抗干扰能力和抗攻击能力，确保网络在面对复杂网络攻击时能够保持稳定运行。

3.3 新型天线架构

超大规模MIMO技术在6G网络中的重要性日益凸显，它将为低轨道卫星ISAC系统带来重要改进。这种技术通过成倍增加天线阵列的数量，能够显著提高频谱和能量的使用效率，从而实现更高的数据传输速率和更广泛的覆盖范围。然而，天线数量的增加也给物理空间和硬件管理带来挑战，包括天线阵列的体积增大和系统复杂度的提升。

为了应对这些挑战，全息超表面天线(HMA)作为一种新兴的天线架构^[33]，提供了有效的解决途径。HMA利用超材料元件，能够在亚波长尺度上精密排布天线单元，从而实现超大规模天线阵列的紧凑布局。这种布局不仅能够减少天线阵列的物理尺寸，还能够提高天线阵列的灵活性和可调性。

4 结束语

随着移动通信技术的迅猛发展，通信感知一体化技术已经成为6G网络的关键技术之一。卫星通信系统由于其覆盖范围大、算力强等特点，成为6G通信感知融合的重要一环。

通过将通信和感知功能集成到卫星系统中,可以实现更高效的数据传输和更广泛的覆盖范围。这种技术的集成不仅提高了通信效率,还增强了网络的感知能力,使得网络能够更好地适应各种复杂的环境和场景。卫星通信感知一体化技术的发展,推动了一系列行业的技术进步和应用创新。随着对关键技术的持续创新和应用,卫星通信感知一体化技术将为未来的通信和感知服务提供更加强大的支持。它将使得通信网络更加智能、灵活和可靠,能够满足未来社会对于高速、高效、智能化通信的迫切需求。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G典型场景和关键能力 [R]. 2022
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 2022
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告 [R]. 2021
- [4] LIU F, CUI Y H, 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
- [5] ZHOU D, SHENG M, LI J D, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2023, 25(2): 975–1019. DOI: 10.1109/COMST.2023.3245614
- [6] CHEN S, SUN S, MIAO D, et al. The trends, challenges, and key technologies of beam-space multiplexing in the integrated terrestrial-satellite communication for B5G and 6G [J]. *IEEE wireless communications*, 2023, 30(6): 77–86. DOI: 10.1109/MWC.004.2200085
- [7] AZARI M M, SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2022, 24(4): 2633–2672. DOI: 10.1109/COMST.2022.3199901
- [8] SHANG B D, YI Y, LIU L J. Computing over space-air-ground integrated networks: challenges and opportunities [J]. *IEEE network*, 2021, 35(4): 302–309. DOI: 10.1109/MNET.011.2000567
- [9] ZHANG P Y, CHEN N, SHEN S G, et al. AI-enabled space-air-ground integrated networks: management and optimization [J]. *IEEE network*, 2024, 38(2): 186–192. DOI: 10.1109/MNET.131.2200477
- [10] HE Z Y, XU W, SHEN H, et al. Full-duplex communication for ISAC: joint beamforming and power optimization [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2023, 41(9): 2920–2936. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287540
- [11] CHEN L, WANG Z Q, DU Y, et al. Generalized transceiver beamforming for DFRC with MIMO radar and MU-MIMO communication [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2022, 40(6): 1795–1808. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3155515
- [12] CHENG G Y, FANG Y, XU J, et al. Optimal coordinated transmit beamforming for networked integrated sensing and communications [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2024, 23(8): 8200–8214. DOI: 10.1109/TWC.2023.3346457
- [13] ZHAO Z Y, ZHANG L, JIANG R, et al. Joint beamforming scheme for ISAC systems via robust cramer – rao bound optimization [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2024, 13(3): 889–893. DOI: 10.1109/LWC.2024.3349488
- [14] LIU F, MASOUROS C. Hybrid beamforming with sub-arrayed MIMO radar: enabling joint sensing and communication at mmWave band [C]//*Proceedings of ICASSP 2019 – 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2019: 7770–7774. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683591
- [15] QI C H, CI W, ZHANG J M, et al. Hybrid beamforming for millimeter wave MIMO integrated sensing and communications [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(5): 1136–1140. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3157751
- [16] DEHKORDI S K, GAUDIO L, KOBAYASHI M, et al. Beam-space MIMO radar with OTFS modulation for integrated sensing and communications [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2022: 509–514. DOI: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814573
- [17] ZHU J K, LI W, WONG K K, et al. Waveform design of DFRC system for target detection in clutter environment [J]. *IEEE signal processing letters*, 2023, 30: 1517–1521. DOI: 10.1109/LSP.2023.3324298
- [18] WU W J, TANG B, WANG X Y. Constant-modulus waveform design for dual-function radar-communication systems in the presence of clutter [J]. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 2023, 59(4): 4005–4017. DOI: 10.1109/TAES.2023.3234927
- [19] DU Y, LIU Y, HAN K F, et al. Multi-user and multi-target dual-function radar-communication waveform design: multi-fold performance tradeoffs [J]. *IEEE transactions on green communications and networking*, 2023, 7(1): 483–496. DOI: 10.1109/TGCN.2023.3234275
- [20] BAZZI A, CHAFII M. On integrated sensing and communication waveforms with tunable PAPR [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2023, 22(11): 7345–7360. DOI: 10.1109/TWC.2023.3250263
- [21] LIU F, ZHOU L F, MASOUROS 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
- [22] WEI Z Q, PIAO J H, YUAN X, et al. Waveform design for MIMO-OFDM integrated sensing and communication system: an information theoretical approach [J]. *IEEE transactions on communications*, 2024, 72(1): 496–509. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3317258
- [23] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges [J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2022, 9(1): 437–461. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3126825
- [24] CHEN Q, GIAMBENE G, YANG L, et al. Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2021, 70(3): 2743–2755. DOI: 10.1109/TVT.2021.3058126
- [25] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2021, 20(6): 3430–3443. DOI: 10.1109/TWC.2021.3050335
- [26] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2021, 23(1): 70–109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247
- [27] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A

survey on nongeostationary satellite systems: the communication perspective [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(1): 101–132. DOI: 10.1109/COMST.2022.3197695

- [28] ABDU T S, KISSELEFF S, LAGUNAS E, et al. Flexible resource optimization for GEO multibeam satellite communication system [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(12): 7888–7902. DOI:10.1109/TWC.2021.3088609
- [29] WANG C S, WANG Y, LIAN P Y, et al. Space phased array antenna developments: a perspective on structural design [J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 2020, 35(7): 44–63. DOI: 10.1109/MAES.2020.2984300
- [30] CHEN Z N, QING X M, TANG X Y, et al. Phased array metantennas for satellite communications [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 46–50. DOI: 10.1109/MCOM.001.2100538
- [31] WANG Z, ZHANG J Y, DU H Y, et al. A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: fundamentals, signal processing, and applications [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2024, 26(3): 1560–1605. DOI: 10.1109/COMST.2023.3349276
- [32] GUO H Z, LI J Y, LIU J J, et al. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 53–87. DOI: 10.1109/COMST.2021.3131332
- [33] XU J, YOU L, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Near-field wideband extremely large-scale MIMO transmissions with holographic metasurface-based antenna arrays [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(9): 12054–12067. DOI: 10.1109/TWC.2024.3387709

作者简介



杨帅斌，浙江工业大学在读硕士研究生；主要研究方向为通信感知一体化、智能反射面、无人机通信、卫星通信网络等。



张昱，浙江工业大学副教授；主要研究方向为无线通信、通信感知一体化、云接入网、多天线通信、智能反射面、无速率编码等；主持国家自然科学基金面上项目、青年基金项目，中国博士后科学基金面上项目、浙江省自然科学基金等项目，获得浙江省通信学会科学技术奖一等奖、中国发明协会创业创新奖二等奖等奖励；发表论文30余篇。



卢为党，浙江工业大学教授、博士生导师，信息工程学院副院长，浙江省通信网技术应用研究重点实验室主任；主要研究方向为智能通信、无人机通信、安全通信和移动边缘计算；作为负责人主持国家自然科学基金和国防科技项目等国家级项目5项、省部级项目5项，相关研究成果获省部级科技奖励3项；发表论文50余篇。