

# 面向卫星通信与导航的下一代多址接入



## Next Generation Multiple Access for Satellite Communication and Navigation Networks

侯天为/HOU Tianwei, 关达/GUAN Da, 孙昕/SUN Xin

(北京交通大学, 中国 北京 100044)  
(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202401010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240226.1524.009.html>

网络出版日期: 2024-02-26

收稿日期: 2023-12-18

**摘要:** 面向卫星通信与导航 (SCAN) 系统多样复杂的应用场景, 下一代多址接入 (NGMA) 技术可以提供更高的通信速率、更多的接入数量和更广的覆盖面积。面向 SCAN 系统, 对基于多功能 NGMA、基于多资源 NGMA 和基于多技术 NGMA 展开研究, 分析了现有的 NGMA 技术对 SCAN 系统的性能增益。最后, 总结 SCAN-NGMA 面临的挑战, 展望了未来发展的方向, 为 SCAN-NGMA 架构的进一步演进提供了参考依据。

**关键词:** NGMA; SCAN; 多功能 NGMA; 多资源 NGMA; 多技术 NGMA

**Abstract:** In the context of diverse and intricate application scenarios within satellite communication and navigation (SCAN) systems, next generation multiple access (NGMA) technology offers the potential for increased communication rates, expanded access capacity, and broader coverage. It focuses on investigating the application of multi-function-based NGMA, multi-resource-based NGMA, and multi-technology-based NGMA within the SCAN system. It also analyzes the performance enhancements that existing NGMA technology can bring to the SCAN system. Furthermore, this paper concludes by summarizing the challenges inherent in SCAN-NGMA system. It also looks ahead to the future development direction, providing valuable insights that serve as a reference for the ongoing evolution of SCAN-NGMA architecture.

**Keywords:** NGMA; SCAN; multi-function NGMA; multi-resource NGMA; multi-technology NGMA

**引用格式:** 侯天为, 关达, 孙昕. 面向卫星通信与导航的下一代多址接入 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 55-59. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401010

**Citation:** HOU T W, GUAN D, SUN X. Next generation multiple access for satellite communication and navigation networks [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(1): 55-59. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401010

多址接入技术作为移动通信系统中的重要组成部分之一, 一直被誉为无线通信“皇冠上的明珠”。随着 5G 的全面商用, 6G 已经开始被研究。为了满足下一代移动通信系统对超高速率、海量接入和多功能复用信号的需求, 下一代多址接入 (NGMA) 技术就显得至关重要<sup>[1]</sup>。

随着无线通信系统的发展, NGMA 可以被分为多功能 NGMA (MF-NGMA)、多资源 NGMA (MR-NGMA) 和多技术 NGMA (MT-NGMA)<sup>[2]</sup>。在 MR-NGMA 中, 多种技术正在持续挖掘时域、频域、码域、功率域、空域和多普勒域等资源的非正交性。MT-NGMA 主要关注多种先进通信技术与

NGMA 的结合, 例如智能超表面、去蜂窝通信、毫米波通信等<sup>[3-5]</sup>。多种先进技术的结合, 可以针对性地提高无线通信系统性能。在 MF-NGMA 中, 空域、功率域等非正交算法使无线信号具有多种不同的功能, 包括通信感知一体化或通信导航一体化等<sup>[6]</sup>。

### 1 面向卫星通信与导航的 MR-NGMA

卫星通信与卫星导航作为 6G 中不可或缺的部分, 具有全天候、全覆盖等优点。与传统地面通信相比, 卫星通信系统具有超高移动性的特点, 在多址接入技术方面具有较大的不同, 受到了广泛的关注。

#### 1.1 正交时频空接入技术

近年来, 随着学界对 6G 技术的研究, 卫星通信和导航

**基金项目:** 中央高校基础科研业务费重点项目 (2023JBZY012); 国家自然科学基金青年项目 (62201028); 北京市自然科学基金“海淀联合”项目 (L232041); 中国科协青年人才托举项目 (2022QNRC001); 欧盟“玛丽居里学者”项目 (101106428)

技术蓬勃发展。与传统地面移动通信系统相比,卫星移动速度快、多普勒频移高,传统正交频分复用(OFDM)无法实现面向卫星的高可靠通信,亟需更适合卫星通信的方案。

由于卫星通信系统对数据速率、灵活性和可靠性需求不断增加,正交时频空(OTFS)接入技术受到了广泛的关注。相比于OFDM技术,OTFS将时变信道转换为多时域的时延多普勒信道,是一种面向快时变信道场景的解决方案,具有更显著的性能优势<sup>[7]</sup>。OTFS的关键技术是将时变多径信道转换为时延多普勒域内的二维信道,再通过时延多普勒域的均衡技术,使一个传输帧的所有符号经历相同的信道增益。相比于在时频域进行均衡,在时延多普勒域均衡具有信道增益矩阵的稀疏性和低变化性等优点。在调制过程中,OTFS系统首先利用辛有限傅里叶逆变换(ISFFT)将收到的时延多普勒域信号转到时频域。然后在时频域中对信号做Heisenberg变换,将时频域信号转变为连续的时域信号。之后对信号做Wigner变换,将连续时域信号转变为离散时域信号。最后对信号进行辛有限傅里叶变换(SFFT),将信号重新变换回时延多普勒域。OTFS技术利用信道的稀疏性,使原始的时延多普勒域信号在时延域和多普勒域上均得到了扩展,相比于OFDM,减小了信道估计的开销<sup>[8]</sup>。

根据不同的应用场景,目前OTFS有不同的研究侧重点。

1) 面向毫米波的OTFS系统:相比于5G系统,毫米波系统相位噪声更高,多普勒扩展更大,利用OTFS调制可以优化系统性能。与OFDM的基波波形高度局域化相反,OTFS将信号与载波的乘积扩展到整个平面,以获得高分集增益。在高多普勒扩散和信道状态信息未知的情况下,OTFS的性能要高于OFDM。但是当存在相位噪声时,接收机处理多普勒扩展的能力将受到限制,导致接收机性能因自干扰而降低<sup>[9]</sup>。

2) 基于大规模MIMO的OTFS系统:OTFS在大规模MIMO系统中面临的困难是下行信道的信道估计。由于OTFS-MIMO信道具有时延域的普通稀疏性、多普勒域的块稀疏性和角度域的突发稀疏性,故基于三维结构稀疏的信道,OTFS-mMIMO下行信道的信道估计问题可以被代替为稀疏信号恢复问题。但是,如何降低均衡器复杂度、如何提高下行预编码和信道反馈的效率是进一步研究的难点<sup>[10]</sup>。

3) 非正交多址接入赋能的OTFS系统:OTFS-NOMA系统同时使用时延多普勒域和功率域,在单移动用户OTFS-NOMA系统中,一个移动用户和多个静止用户共享频谱。移动用户在使用时延多普勒域的同时,可以将时频域中的资源与静止用户共享,通过设计波束成形,可以最大化用户的通信速率。同时,均衡器可以保证在时延多普勒域中不存在干

扰。目前,设计面向多用户的高可靠OTFS-NOMA系统是进一步研究的方向<sup>[11]</sup>。

## 1.2 随机接入技术

通过随机接入,用户设备和网络之间可以建立无线链路,取得与基站的上行同步,获取上行资源,从而提高系统资源利用率,节约终端功耗。为了满足无线通信系统的发展要求,下一代随机接入技术应增加随机接入的用途,更新导频发送机制,扩大覆盖范围和加快波束故障恢复过程。此外,由于地面终端和卫星之间的传播时延大,传统握手协议的效率低,迫切需要新型随机接入技术来解决这些问题。目前对于随机接入的研究分为以下几种:

1) 潜在活跃系统中的免授权大规模随机接入:在用户具有零星访问特点的卫星通信系统中,每个时间只有一个活跃的用户子集,为每个设备分配唯一的导频会浪费无线通信资源,降低网络效率。采用免授权的随机接入方式,上行用户直接向卫星发送信息可以解决握手协议带来的巨大时延问题。针对导频碰撞的问题,我们可以利用导频域非正交多址接入技术,将不同的非正交导频分配给多个设备从而避免导频碰撞,提高频谱效率,降低中断概率<sup>[12]</sup>。

2) 面向卫星网络的全球覆盖随机接入:卫星网络表现出超大链路距离的特征,使得为固定地面网络拓扑设计的随机接入协议失效。为此,使用基于无模型的随机接入方法,可以通过与非平稳网络环境的交互,提高网络吞吐量和降低平均时延,并可以灵活调整吞吐量-冲突之间的权衡问题<sup>[13]</sup>。

3) 面向万物互联(IoE)的随机接入:IoE被定义为将人、组织、数据和事物结合一起的网络,是6G的研究热点之一。其中,物联网(IoT)和设备到设备(D2D)是IoE中的重要研究方向。对于卫星IoT,复杂的情况和长距离的传输使得目前的随机接入方案无法适用。在边缘卫星节点上,使用训练序列填充的多载波系统可以避免同步失败,同时可利用训练序列来检测设备活动和估计信道。利用地面-卫星链路固有的稀疏性和IoT终端的零星流量特征,随机接入使用正交近似消息传递多测量向量算法来估计信道时延和终端的活跃情况,再利用旋转不变性等技术来增强信道估计,但面向卫星的随机接入尚未关注动态变化网络<sup>[14]</sup>。对于D2D网络,用户设备可以从多天线维度方面入手,利用正交的随机波束低时延方法进行随机接入。通过该方法,用户设备可以在信道状态信息未知的情况下,从不同设备中识别各自的随机接入申请,减少波束成形的时延和计算复杂度,充分利用空间分集,解决具有相同前导码的信息无法同时解调的问题。未来,我们仍需对握手过程进行简化,降低通信时延<sup>[5]</sup>。

针对MR-NGMA的特点，我们在表1中对面向卫星通信的MR-NGMA技术及适用场景进行了总结。

## 2 面向卫星通信与导航的MT-NGMA

为了符合6G系统的发展需求，多种新兴的无线通信技术和NGMA技术的结合将大幅提高无线通信系统性能。本章重点综述智能超表面赋能和空天地一体化辅助的NGMA技术。

### 2.1 RIS赋能的SCAN-NGMA系统

智能超表面 (RIS) 技术可以主动修改无线信道环境，成为下一代无线通信研究中的关键技术和研究热点。RIS具有易于部署、绿色无污染、稳定性强和频谱效率高等优点<sup>[16]</sup>。针对单用户通信场景，借助RIS的信号叠加能力，可以增大信号的信噪比、通信速率和频谱效率；针对多用户通信场景，可以利用RIS的被动波束成形提高其他用户的通信速率<sup>[3]</sup>。由于使用了MIMO技术，商业5G网络接收到的信干噪比 (SINR) 普遍在3~23 dB<sup>[17]</sup>，如果通过部署RIS使接收信噪比由20 dB提升到23 dB，那么根据香农公式可以计算出整体的通信速率只提升了14.91%。而对于SINR普遍在-20 dB的卫星通信场景中，若将接收信噪比由-20 dB提升到-17 dB，那么整体的通信速率将提升99.01%。据此，目前热点研究方向是建立RIS赋能的SCAN-NGMA系统。该系统将高效复用卫星导航和通信信号，利用RIS等关键技术来拓展网络覆盖范围，增大用户接入数量，提升卫星信号接收功率，满足通信系统对信道容量的需求。此外，RIS和NOMA的联合使用起到了相互促进的效果。NOMA可以利用用户的信道状态信息进行叠加编码，从而达到共享频谱的目的。RIS则可以合理地改变多用户的信道状态信息，进一步增加NOMA的频谱效率和能量效率，实现共赢。

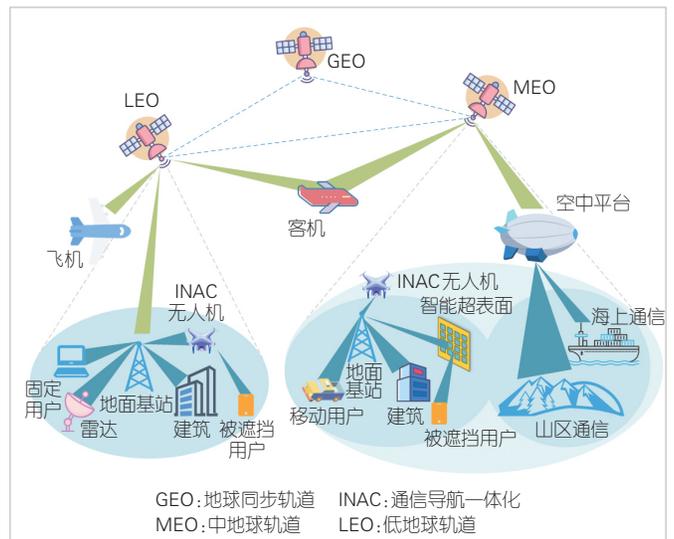
随着材料学技术的发展和RIS技术在应用中遇到的问题，学界提出了同步透射反射RIS (STAR-RIS)。将入射信号转化为透射信号和反射信号进行传输，实现全空间灵活服务，例如实现STAR-RIS辅助的移动边缘计算等<sup>[18-19]</sup>。为了减轻无源RIS (PRIS) 在大尺度衰落方面的乘性衰落效应对系统性能带来的影响，学界提出了有源RIS (ARIS) 的概念。ARIS在原有RIS功能的基础上增加了信号放大的功能，

可以将系统的通信速率提升量从22%增加到130%，进一步提高系统的通信速率和频谱效率<sup>[20]</sup>。此外，ARIS也能够进一步增强NGMA系统的性能。通过智能地优化RIS振子的相位，可以根据不同的优化目标选择将小信号增大，增加NGMA系统的策略灵活性，进一步增大系统的总通信速率。

### 2.2 空天地一体化辅助的SCAN-NGMA系统

空天地一体化网络 (SAGIN) 是集成了航天、航空和地面的网络，其技术挑战为异构性、时变性、资源有限性和网络的不平衡性。SAGIN因其扩展覆盖范围和节省资源成本的特性而成为了6G的重点研究方向。图1为SAGIN的架构。

根据运行轨道的高度，环绕地球的卫星可分为地球同步轨道 (GEO) 卫星、中地球轨道 (MEO) 卫星和低地球轨道 (LEO) 卫星，大多数卫星网络是由3种卫星组成的异构多层系统，节点类型和网络边缘变化快。由于MEO和LEO与地面的周期性相对移动，卫星网络的边缘将随着时间的推移不断变化，因此传统的多址接入技术很难适用于庞大的异构多层网络<sup>[21]</sup>。针对该问题，目前的研究热点是如何在动态的异构多层网络中提高无线资源的利用效率，并降低计算复杂度。一种方法是利用不同网络层到用户之间的信道增益差使用NGMA技术，再使用RIS技术作为辅助，解决接收信号功率过小的问题<sup>[22]</sup>。



▲图1 空天地一体化网络(SAGIN)架构示意图

▼表1 面向卫星通信的多资源-下一代多址接入(MR-NGMA)技术及其适用场景

技术	域	资源种类	适用场景	
传统多址接入技术	正交频分多址	时域、频域	时间、频率	LTE、4G、5G
下一代多址接入技术	非正交多址接入	功率域	时间、频率、功率	用户信道状态具有特异性
	正交时频空接入	时延-多普勒域	时延、多普勒频移	用户或基站高速移动
	随机接入	时域、频域、导频域	时间、频率	具有稀疏性的物联网

无人机是SAGIN中重要的组成部分,与地面基站相比,在移动性、能量限制、用户分布、大尺度衰落信道和小尺度衰落信道等方面有所不同。同时,无人机在通信和导航中可以扮演不同的角色。在通信系统中,无人机既可以被视为移动的基站,为被遮挡的用户或缺少蜂窝的地区提供服务,也可以被视为空中移动用户,接收卫星发送的下行信息。在导航系统中,无人机可以被视为导航服务提供商,为用户的导航服务提供额外的链路,也可以作为导航服务的用户,通过导航信息获取自己的位置并完成移动。无人机的三维移动性和有限能源是影响无人机组网的关键因素,如何实现更高的频谱效率和能源效率是基于无人机的空天地一体化系统的研究重点<sup>[23]</sup>。我们可以使用NGMA技术,将不同信道状态的用户根据叠加编码原理进行分组,利用连续干扰消除的技术提高系统总通信速率,增大系统频谱效率<sup>[24]</sup>。

### 3 面向卫星通信与导航的MF-NGMA

在NGMA技术中,实现多功能信号复用是一个广受关注的研究方向。利用多种新兴的无线通信技术,可实现通信、导航、感知等多功能复用,大幅节约频谱资源和能量资源。

#### 3.1 通信导航一体化技术

传统的卫星通信系统和卫星导航系统相互独立,需分别部署独立的硬件系统<sup>[25]</sup>。而通信导航一体化(INAC)技术则可以使通信系统和导航系统共享一套硬件,具有总体积小、重量轻、功耗低等优势,理论价值和工程前景较好。目前的研究方向有面向低轨卫星系统和在中轨卫星系统的通信导航一体化技术<sup>[26]</sup>。

1) 面向低轨卫星的INAC技术:得益于低轨卫星普遍具有的超宽带通信能力和较高通信速率的特点,INAC不但可以将传统的卫星精密轨道和精密钟差等导航信息传输至用户,还可以同时传输精密时间戳和通信信息至地面用户。此外,低轨卫星与地面用户间可采用双向时间同步,消除时延对时间同步精度的影响,提高时间偏移的估计精度,进一步提高卫星通导一体化系统的性能。此外,根据导航信息的广播性,可以利用新兴的NGMA技术,将导航信息融入到通信信息中,使得无论在强干扰还是弱干扰的情况下,都能够有效提高频谱效率。

2) 面向中轨卫星的INAC技术:利用新兴的叠加编码技术,可实现导航信号和通信信号的复用。接收机利用连续干扰消除技术,地面用户可顺利接收并分别解调通信信号和导航信号,实现通信导航一体化。但传统卫星导航普遍采用中轨卫星和高轨卫星,无法实现高速率的无线通信。针对中轨

卫星的信道特点,在通导一体化用户附近部署RIS阵列,可以有效增强卫星信号,实现高速率通导一体化系统。此外,在城市峡谷或室内定位中,用户可能无法收到足够的卫星信号。利用RIS可以扩展出额外的卫星-RIS-用户链路,实现卫星通信和卫星导航功能<sup>[27]</sup>。NGMA赋能的卫星通信导航一体化技术仍处于研究初期,尚未完全挖掘系统的性能增益。

#### 3.2 通信感知一体化技术

随着无线通信行业的飞速发展,频谱成为稀缺资源。为了实现通信和感知的同频复用,学术界和工业界提出了通信感知一体化(ISAC)技术。在ISAC系统中,通信和传感可以在一个硬件平台上同时实现,从而减少对无线资源的需求。SCAN系统具有时延大和移动性强的特点,这会导致瞬时信道状态信息估计困难,故需要设计基于统计信道状态信息的卫星ISAC系统。此外,还可以利用波束成形技术和信道状态信息对通信和感知两方面进行无线资源分配,以提高能量利用效率和频谱利用效率<sup>[28]</sup>。

面向SCAN系统的ISAC的主要研究难点是通信和感知对波束成形的不同要求,在适用于感知系统的高频段面临着巨大的路径损耗。在这种情况下,传感需要时变的多向扫描波束,而通信需要稳定和精确指向的波束,以实现更大的波束成形增益。传统的单波束方法仅提高了通信的性能,而通过使用两个模拟天线阵列,可以实现感知功能和通信功能的集成,在智能汽车和无人机等平台上具有良好的应用前景,具有重要的未来研究前景<sup>[29]</sup>。

### 4 结束语

在6G中,面向卫星通信与导航的NGMA将在实现万物智联、全球覆盖等功能中起到重要作用。本文提出了MR-NGMA、MT-NGMA和MF-NGMA的概念和特征,分析了面向SCAN系统的学术研究,指出了多种SCAN-NGMA的关键技术和使用场景,为未来面向SCAN-NGMA发展提供了参考。

#### 参考文献

- [1] CALVANESE STRINATI E, BARBAROSSA S, GONZALEZ-JIMENEZ J L, et al. 6G: the next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2019, 14(3): 42-50. DOI: 10.1109/mvt.2019.2921162
- [2] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(3): 55-61. DOI: 10.1109/mcom.001.1900411
- [3] HOU T W, LIU Y W, SONG Z Y, et al. Reconfigurable intelligent surface aided NOMA networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2575-2588. DOI: 10.1109/jsac.2020.3007039
- [4] ZHANG J Y, FAN J Y, ZHANG J, et al. Performance analysis and optimization of NOMA-based cell-free massive MIMO for IoT [J].

- IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(12): 9625–9639. DOI: 10.1109/ijot.2021.3130026
- [5] DAI L L, WANG B C, PENG M G, et al. Hybrid precoding-based millimeter-wave massive MIMO-NOMA with simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2019, 37(1): 131–141. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2872364
- [6] LI A N, BODANESE E, POSLAD S, et al. A trajectory-based gesture recognition in smart homes based on the ultrawideband communication system [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(22): 22861–22873. DOI: 10.1109/ijot.2022.3185084
- [7] SINHA A K, MOHAMMED S K, RAVITEJA P, et al. OTFS based random access preamble transmission for high mobility scenarios [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(12): 15078–15094. DOI: 10.1109/tvt.2020.3034130
- [8] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1–6. DOI: 10.1109/wcnc.2017.7925924
- [9] HADANI R, RAKIB S, MOLISCH A F, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems [C]//Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2017: 681–683. DOI: 10.1109/mwsym.2017.8058662
- [10] SHEN W Q, DAI L L, AN J P, et al. Channel estimation for orthogonal time frequency space (OTFS) massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2019, 67(16): 4204–4217. DOI: 10.1109/TSP.2019.2919411
- [11] DING Z G. Robust beamforming design for OTFS-NOMA [J]. IEEE open journal of the communications society, 2020, 1: 33–40. DOI: 10.1109/ojcoms.2019.2953574
- [12] LIU Y X, ZHAO M, XIAO L M, et al. Pilot domain NOMA for grant-free massive random access in massive MIMO marine communication system [J]. China communications, 2020, 17(6): 131–144. DOI: 10.23919/jcc.2020.06.011
- [13] LEE J H, SEO H, PARK J, et al. Learning emergent random access protocol for LEO satellite networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(1): 257–269. DOI: 10.1109/twc.2022.3192365
- [14] YING K K, GAO Z, CHEN S, et al. Quasi-synchronous random access for massive MIMO-based LEO satellite constellations [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1702–1722. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3273699
- [15] LEE J H, KIM Y, LEE I G. Random beam-based random access for low-latency device-to-device communication systems [J]. IEEE access, 2020, 8: 79887–79895. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2990448
- [16] LIU Y W, LIU X, MU X D, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23(3): 1546–1577. DOI: 10.1109/comst.2021.3077737
- [17] ANDREWS J G, BAI T Y, KULKARNI M, et al. Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems [J]. IEEE transactions on communications, 2016: 1. DOI: 10.1109/tcomm.2016.2618794
- [18] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(5): 3083–3098. DOI: 10.1109/twc.2021.3118225
- [19] QIN X T, SONG Z Y, HOU T W, et al. Joint resource allocation and configuration design for STAR-RIS-enhanced wireless-powered MEC [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(4): 2381–2395. DOI: 10.1109/tcomm.2023.3241176
- [20] ZHANG Z J, DAI L L, CHEN X B, 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
- [21] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Capacity analysis of multi-layer satellite networks [C]//Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, 2020: 251–256. DOI: 10.1109/iwcmc48107.2020.9148095
- [22] GUAN D, SUN X, WANG J, et al. RIS-NOMA-aided LEO satellite communication networks [C]//Proceedings of 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). IEEE, 2022: 409–413. DOI: 10.1109/isctech58360.2022.00071
- [23] HOU T W, LIU Y W, SONG Z Y, et al. Exploiting NOMA for UAV communications in large-scale cellular networks [J]. IEEE transactions on communications, 2019, 67(10): 6897–6911. DOI: 10.1109/tcomm.2019.2929806
- [24] HOU T W, LIU Y W, SONG Z Y, et al. UAV-to-everything (U2X) networks relying on NOMA: a stochastic geometry model [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(7): 7558–7568. DOI: 10.1109/tvt.2020.2994167
- [25] ZHAO Q C, GONG W F, HOU T W, et al. Global navigation satellite system (GNSS): a reconfigurable intelligent surface (RIS)-aided approach [C]//Proceedings of GLOBECOM 2022 – 2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 3162–3167. DOI: 10.1109/globecom48099.2022.10001462
- [26] HOU T W, LI A N. Performance analysis of NOMA-RIS aided integrated navigation and communication (INAC) networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(10): 13255–13268. DOI: 10.1109/tvt.2023.3277581
- [27] ZHAO Q C, GONG W F, HOU T W, et al. Integrated-navigation-and-communication (INAC): a reconfigurable intelligent surface (RIS)-aided approach [C]//Proceedings of IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). IEEE, 2023: 1–6. DOI: 10.1109/vtc2023-spring57618.2023.10199514
- [28] YOU L, QIANG X Y, TSINOS C G, et al. Beam squint-aware integrated sensing and communications for hybrid massive MIMO LEO satellite systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(10): 2994–3009. DOI: 10.1109/jsac.2022.3196114
- [29] ZHANG J A, HUANG X J, GUO Y J, et al. Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(1): 671–685. DOI: 10.1109/tvt.2018.2883796

## 作者简介



侯天为，北京交通大学副教授；主要研究领域为下一代多址接入、智能超表面、卫星通信与导航系统等；中国科协青年人才托举对象，欧盟“玛丽居里学者”；先后主持和参与基金项目10余项；已发表论文50余篇。



关达，北京交通大学在读博士研究生；主要研究方向为智能超表面、卫星通信导航一体化。



孙昕，北京交通大学教授；主要研究领域为下一代多址接入、专业移动通信等；先后主持和参与基金项目40余项；已发表论文100余篇。