

低轨卫星网络接入与传输技术



Access and Transmission Technology for LEO Satellite Networks

申佳伟/SHEN Jiawei, 洪涛/HONG Tao,
张更新/ZHANG Gengxin

(南京邮电大学, 中国 南京 210003)
(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003,
China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1705.008.html>

网络出版日期: 2024-10-17

收稿日期: 2024-08-10

摘要: 针对低轨卫星网络空口传输特征, 在地面 5G NR 体制的基础上利用智能化网络与轻量化终端间的协同, 实现用户的广域无感接入与自适应传输。梳理了低轨卫星网络空口传输关键技术, 认为需要采用内生智能的方法辅助空口设计, 从空口赋能 AI 和 AI 辅助空口两个方面构建完整闭环的研究体系, 最后展望了未来低轨卫星网络的研究趋势。

关键词: 低轨卫星网络; 波形; 多址; 接入与传输; 人工智能

Abstract: Through an analysis of the air interface transmission characteristics of low earth orbit (LEO) satellite networks, a method is proposed for achieving wide-area seamless access and adaptive transmission through the synergy between intelligent networks and lightweight terminals, built upon the terrestrial 5G NR framework. The key technologies for air interface transmission in LEO satellite networks have been systematically reviewed. It is believed that an endogenous intelligence approach should be employed to assist air interface design. The research framework is envisaged to be constructed as a complete closed loop, focusing on two main aspects: empowering AI through the air interface and utilizing AI to assist the air interface. Finally, future research trends in LEO satellite networks are anticipated.

Keywords: low earth orbit satellite network; waveform; multiple access; access and transmission; artificial intelligence

引用格式: 申佳伟, 洪涛, 张更新. 低轨卫星网络接入与传输技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 68-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405010

Citation: SHEN J W, HONG T, ZHANG G X. Access and transmission technology for LEO satellite networks [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 68-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405010

1 低轨卫星网络背景及意义

移动互联网和物联网应用需求的持续增长, 促使移动通信网络向全场景服务和全球深度覆盖发展, 但单纯依赖地面移动通信将难以满足此需求。目前, 发展低轨卫星互联网已成为下一代信息技术竞争新高地。通过部署低轨卫星互联网, 以增强并扩展地面网络的覆盖范围, 能够显著提升在海洋、山区等偏远区域的网络可达性。这种网络架构在自然灾害或突发事件发生时, 仍能保持通信服务的连续性, 同时也能有效支持大范围移动目标 (如飞机、轮船、火车等) 的网络需求并提供不间断的通信服务等。从全球来看, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 从 R15 开始重点关注非地面网络

(NTN), 尤其是卫星网络, 并在 R16、R17 以及 R18 中持续对 NTN 进行研究。美国联邦通信委员会 (FCC) 在 2023 年通过了太空补充覆盖的提案, 明确用卫星来补充地面移动通信网络覆盖, 支持手机直连卫星。此外, 中国也出台了《“十四五”信息通信行业发展规划》等政策, 确立卫星互联网的战略地位。这些文件的核心关注点都是如何在全球范围内满足爆炸式增长的“人连”与“物联”应用需求。

但与地面网络相比, 低轨卫星网络具有一些特殊性, 主要包括以下几个方面^[1-2]: 1) 传统地面网络是平面网络, 引入低轨巨型星座后网络发展为立体多层网络, 波束覆盖情况复杂, 多类型终端、多频段、多协议混合接入。2) 低轨卫星以高速绕地球运行, 致使多普勒频移效应尤为显著。此外, 卫星的高动态特性不仅引发了传输信道的时变性, 还导致终端与卫星网络之间的连接关系发生快速动态变化。3) 地面终端的通信距离通常为公里量级, 而低轨卫星终端的信号传播距离则通常达到数百到数千公里量级。这种大尺度的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A20450、62171234、61971440); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (BK20192002); 国家重点研发计划项目 (2022YFB2902600)

时空传输导致了大传播时延,从而使得信道状态信息(CSI)过时。低轨卫星信道以直射分量为主,信道特性是欠散射信道,难以获得多输入多输出(MIMO)分集增益。4)相比于地面基站,低轨卫星是存储、计算、传输资源受限平台,服务能力有限。5)卫星轨道移动、用户和业务需求的不均匀性,使得系统内多址干扰和系统外同频干扰在空间、时间、频率和功率维度呈现高度的不规则性,从而导致系统的可用资源具有动态时变性和高维不规则性。

因此,低轨星座通信技术需要在地面5G新空口(NR)体制基础上,根据上述低轨空口特征做适应性的改造,以提升低轨卫星网络下终端的接入与传输能力。本文从低轨卫星网络背景及意义、低轨卫星星座与NTN标准以及低轨卫星网络传输空口关键技术这3个方面论述低轨卫星网络通信技术。

2 低轨卫星星座与NTN标准

2.1 低轨卫星星座发展

1) 国外低轨星座发展

欧美等国对低轨星座的建设起步较早,在20世纪末便出现了Iridium、Globalstar、Orbcomm三大低轨卫星星座通信系统。近几年来,多家公司展开了低轨卫星星座部署的计划,其中包括:SpaceX公司的Starlink低轨星座、OneWeb公司的OneWeb卫星星座、亚马逊公司的Kuiper星座、铱星公司的NXET星座、AST SpaceMobile公司的手机直连BlueBird星座等^[1]。以Starlink为例,自2018年提出至2024年3月,该系统已成功完成超过5 000颗卫星的在轨组网并且涵盖了多个卫星型号。Starlink第一阶段星座计划在123个轨道面部署4 409颗卫星,轨道高度分布在550~1 325 km之间,并在用户端最低仰角为40°的条件下,实现了全球无缝覆盖。对于第二阶段星座及后续规划,SpaceX公司拟在轨道高度为330~350 km之间部署7 518颗V频段低轨巨型卫星。根据SpaceX向国际电信联盟提交的材料,其远期目标是实现多达42 000颗卫星的部署。

2) 国内低轨星座发展

中国于2021年4月成立了中国卫星网络集团有限公司,负责建设与运营中国的低轨卫星互联网星座系统。目前规划分为一期和二期星座。一期星座主要是由60颗近极轨窄带卫星和108颗倾斜轨道宽带卫星组成。其中,极轨卫星轨道高度为1 175 km,倾斜角为86.5°,共有6个轨道面,每个轨道面有10颗卫星;倾斜轨道高度为1 150 km,倾斜角为50°,共有12个轨道面,每个轨道面有9颗卫星。一期星座

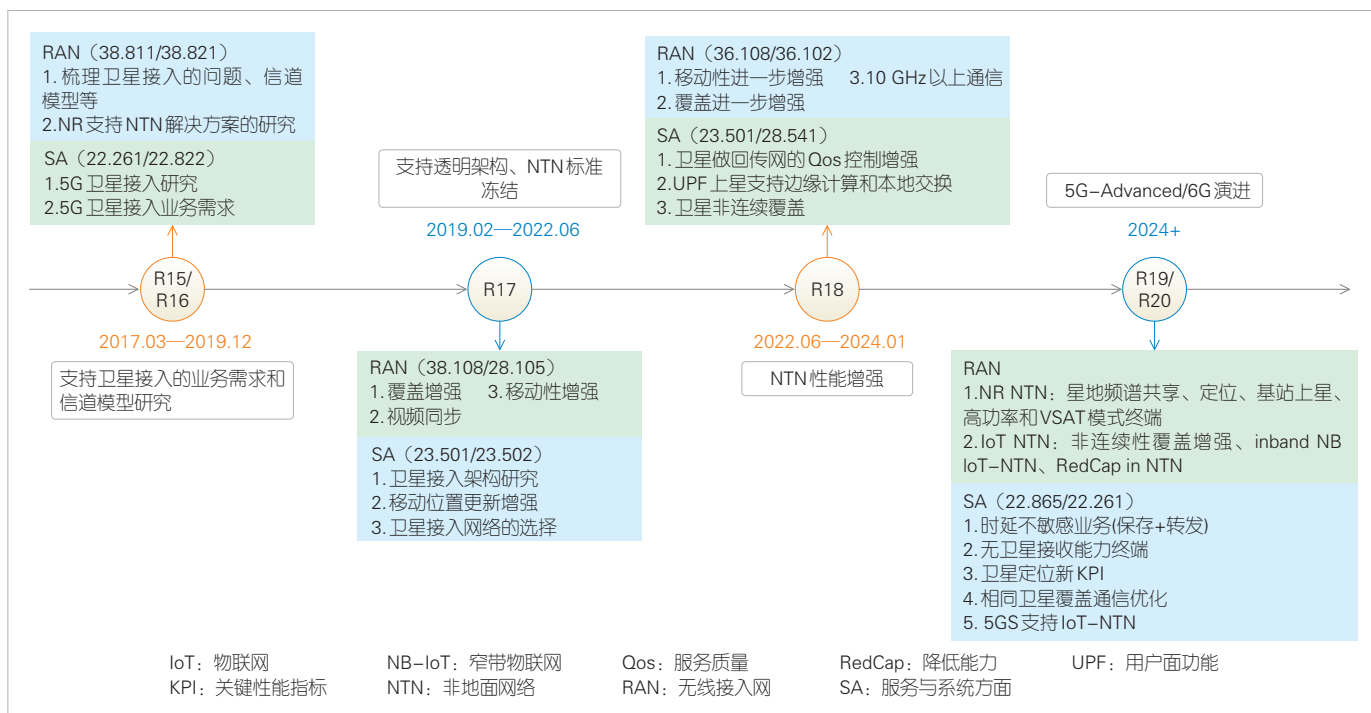
主要包括支持标准速率语音、数据、短消息、物联网服务的窄带体制,以数字视频广播协议为基础改进的宽带体制和以5G协议为基础改进的宽带演进体制。星网二期星座还处于研制建设之中,计划的轨道高度为500 km左右,一共由约4 080颗卫星组成,全部使用以5G为基础的宽带演进体制。中国民用航天企业也在参与低轨星座的建设。2020年1月16日,银行航天发射全球首颗Q/V高频毫米波频段的低轨宽带卫星,单星可覆盖300 000 km²,轨道高度1 200 km,截至2022年3月,已有7颗卫星在轨运行。上海垣信卫星科技有限公司提出的千帆低轨星座^[4],采用全频段、多层多轨道星座设计,将在2030年建设成拥有15 000颗卫星的星座,以提供宽带互联网服务。

综上所述,目前低轨星座的建设和发展方向在向巨型化星座方向发展。融合地面5G NR体制,低轨星座向巨型星座发展的原因如下:1)卫星网是一个相对均匀的稀疏网络,业务需求具有极不均匀性,需要通过资源调度在热点区域汇聚更多的卫星/波束资源,形成小区域内的密集波束覆盖场景,提升系统的容量;2)地面5G NR空口正交频分复用(OFDM)波形具有高峰均比的特征,低轨巨型星座通过增加系统中卫星数目增强了的系统总功率,从而提升了对于OFDM波形高峰均比的容忍度;3)低轨卫星星座全球运营,系统内外同频干扰严重,终端多星可视增加了系统的冗余度,并且可以通过选星接入策略利用空间隔离度规避同频干扰。

2.2 低轨卫星网络体系架构以及NTN标准

1) 3GPP NTN网络标准

针对NTN网络的体制标准制定,国际电信联盟、3GPP以及中国通信标准化协会等标准化组织正在开展卫星互联网相关研究和标准制定工作。其中,在3GPP R15到R18中,5G NTN技术规范最具代表性。3GPP 5G NTN标准演进过程如图1所示^[5]。3GPP R15主要定义了NTN的部署场景和参数,如体系架构、高度、轨道等,并确定对空口的潜在影响,研究了NTN的信道模型。3GPP R16针对先前研究中确定的空口方案,研究对无线接入网(RAN)协议/架构的影响。3GPP R17有两个目标:第一个目标是确定适用于物联网的NTN场景,包括支持基于透明有效载荷的LEO和GEO;第二个目标是对于上述确定的场景,研究并建议进行必要的适应性改造,以支持卫星上的窄带物联网(NB-IoT)和增强型机器类型通信(eMTC),尽可能重复使用3GPP TR 38.821中针对NR NTN进行的研究的结论。将用户设备(UE)中的全球导航卫星系统(GNSS)能力作为NB-IoT和



▲图1 3GPP 5G NTN 标准演进过程

eMTC设备的工作前提。有了这个前提，UE可以以足够的精度来估计和预补偿上行（UL）传输的定时和频率偏移。3GPP R18 聚焦透明转发模式，对NR NTN以及IoT NTN体制进行进一步增强，并针对NR NTN的增强功能，以进一步完善5G卫星组网能力为目标，这主要包括支持10 GHz以上频段部署、覆盖增强、移动性和服务连续性增强以及星上本地数据交换技术。3GPP R18还针对IoT NTN的增强功能沿用R17 NTN中引入的移动性增强技术，通过禁用混合自动重传请求反馈进行业务体验增强，并研究改进的接入和移动管理功能增强对不连续覆盖的支持。

5G NTN标准是基于前期的5G标准规范，针对非地面网络接入做了适应性调整。因此，对于从事相关的通信设备研发工程师而言，可以很容易融入到5G NTN体制的卫星互联网产业中，只需要针对NTN场景解决5G关键技术的适应性及改造问题，为智能手机和其他类型的大众市场用户设备通过低轨卫星接入到网络中打下了坚实的基础。

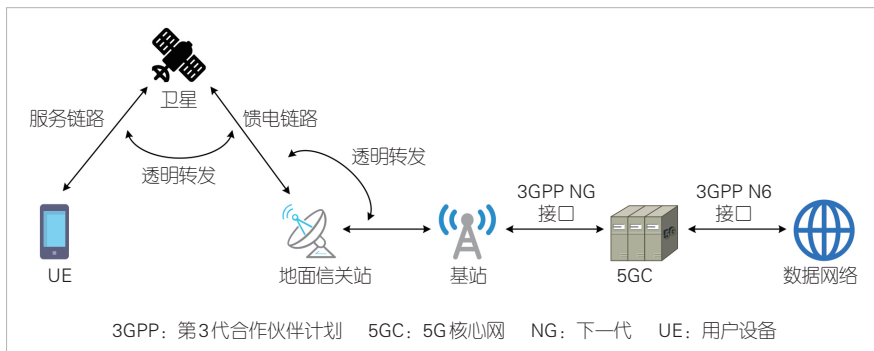
2) 低轨卫星网络体系架构

3GPP NTN在R17和R18版本中采用透明转发架构^[6]，卫星仅实现射频相关功能，对卫星能力要求低，有利于NTN组网的快速落地。如图2所示，卫星作为终端和NTN网关中间的射频处理单元，实

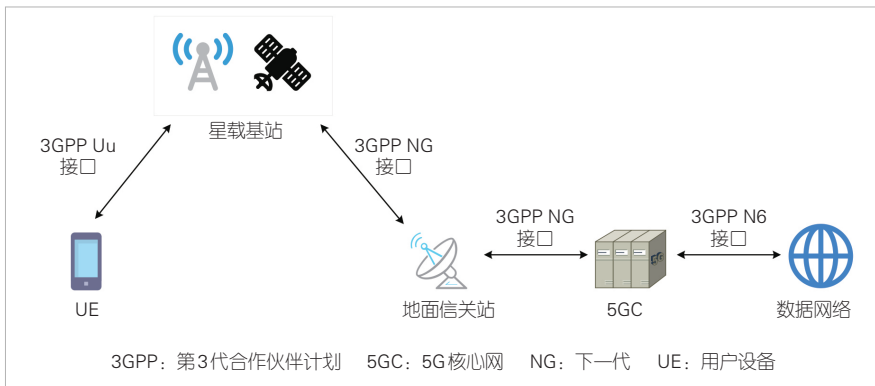
现无线信号的透明转发。信号的基带处理仍然放在地面基站去实现，因此该网络架构对卫星能力载荷和处理能力的要求较低，有利于网络的快速部署。

3GPP再生模式网络架构也在逐步完善，并在R19版本中已经可以支持再生载荷。除了射频部分，基站的部分（DU/CU）或全部功能、核心网的部分网元（例如用户面功能）或者全部功能均可以部署在星上。再生模式下服务链路采用Uu接口，馈电链路根据卫星所具备的功能实现Xn/N1/N2/N3等接口，如图3所示。

在低轨卫星网络特征下，移动终端如何自主接入到合适网络中，实现大跨度变化条件下的可靠适变传输？虽然体系架构设计中内生智能辅助的方法有利于实现上述的目标，但也带来了新的难题，例如：人工智能的应用将严重依赖于无



▲图2 5G非地面网络透明转发架构



▲图3 5G非地面网络的可再生网络架构

线网络交换数据、设备自身的计算资源以及端-边之间的相互合作，这将给空口传输带来前所未有的压力。因此，人工智能与无线通信的深度融合已成为关键技术方向，其中内生的人工智能体系架构尤为重要。不同于简单的人工智能辅助无线通信系统设计，在云-边-端架构上，以内生AI的方式研究AI辅助的空口设计，同时设计空口赋能AI的研究范式。AI辅助空口是在空口的设计中将通过终端设备、基站/卫星边缘节点、信关站云端的感知、存储、计算和通信能力，促成内生的AI去辅助空口设计。空口赋能AI是在设计前就综合考虑终端不同业务的需求、系统能够提供的资源、内生AI对于终端和卫星节点计算资源和传输资源的需求，充分开发基于AI的物理层和媒体接入控制（MAC）层的智能设计，利用深度学习算法，使模型从大量的无线物理层和MAC数据中自动学习、调整和升级，实现空口的智能化设计。具体而言，云层由地面云数据中心组成，负责集中式的数据处理和全局管理；边缘层由具有计算能力的卫星载荷、地面边缘节点构成，负责本地数据处理和快速响应；端层由直接与卫星网络交互的用户设备或传感器组成，负责数据的采集和指令的执行，如图4所示。

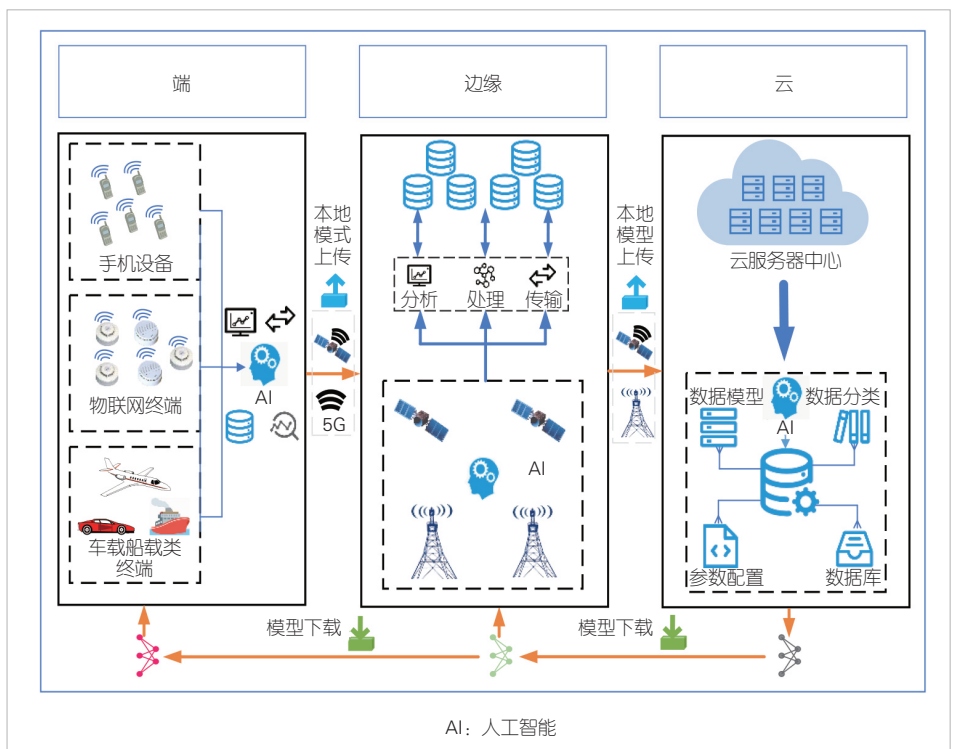
3 低轨卫星网络传输空口关键技术

低轨卫星网络是一个立体多层、动态变化的信息网络，不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大，系统内的多址干扰和低轨境外

波束系统外同频干扰动态变化，使得固定或事先设定模式的接入与传输方式很难适应时变复杂的网络接入与传输需求。核心问题需要解决在立体多层网络覆盖场景中，多频段、长变时延、协议各异的网络条件下，移动终端如何自主接入到合适网络中，实现大跨度变化条件下的可靠自适应传输。这需要打破原来单一系统僵化的固定式或事先设定接入与传输模式，利用智能化网络与轻量化终端间的协同，使得系统空口具备自学习、自演进能力，从而适应多样化的动态场景。

3.1 传输波形

空口传输波形直接关系着无线通信系统的接收性能和能谱效率，其中多载波波形，特别是OFDM凭借其卓越的抗多径衰落能力、高频谱效率及实现复杂度较低的特性，在第4代和第5代地面移动通信系统中得到了广泛应用。但是，当前OFDM波形较高的数据传输速率，以及其提供较高质量的服务是以在准静态或者低中速移动环境下为前提所得到的，在未来低轨卫星的高移动性和多样化业务场景下面临诸多的挑战^[7]。低轨卫星波束广、覆盖终端类型多样，且对地高速



▲图4 低轨卫星网络接入场景下的云边端架构

移动而导致多普勒频移现象显著。在高移动性场景下，多普勒效应会破坏OFDM波形子载波的正交性。为了维持正交性，通常需要增加子载波带宽或进行多普勒预补偿改善，但这会显著降低OFDM波形的频谱效率。此外，OFDM波形的频谱旁瓣较高，且由于载波间的严格正交性要求，使得OFDM波形的灵活配置能力受到了限制。OFDM波形由于多载波调制相位随机叠加，波形具有高峰均比的特征，而低轨卫星平台受限于平台载重是功率受限系统。高峰均比的OFDM波形需要回退，避免波形进入放大器的非线性区引起波形的严重畸变。放大器工作点的回退严重降低了放大器的功率效率。在低轨卫星高动态场景下研究具有多样化业务服务能力的性能稳定、灵活高效的新型波形具有重要的意义。

针对低轨高动态信道下传输波形的研究中，正交时频空(OTFS)是一种二维调制技术，其通过将低轨卫星场景下的高动态时频域信道模型映射为时延-多普勒域的稀疏慢变的信道模型，充分利用了时延-多普勒域的信号特征，从而更好地适应低轨卫星场景下高动态信道的特性。在实际应用中，OTFS波形采用时域矩形脉冲成形与匹配处理，既能满足理想信道条件下的正交性要求，又因其结构简单、高效，易于在硬件中实现。但是由于OTFS波形存在信号功率谱旁瓣衰减缓慢干扰相邻频带的问题，从而导致波形频谱利用率的降低。滤波成形OFDM技术是一种通过在子载波级对信号时频波形进行滤波成形的高级调制方法。该技术不仅在降低功率谱旁瓣方面表现出显著优势，而且对频偏具有较强的抗干扰能力。此外，它允许根据特定的传输需求灵活调整波形的时频结构，从而显著提升波形设计的灵活性。然而，与传统正交OFDM波形不同，滤波成形OFDM波形中的导频符号受到周围导频和数据符号的非正交干扰，给信道估计、导频设计以及符号恢复带来了较大的挑战。

3.2 多址技术

当前的卫星通信系统主要面向传统的连接型通信业务，如语音和视频传输，广泛采用了固定分配的正交多址接入技术，包括时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)和码分多址(CDMA)等。在现有系统中，TDMA和FDMA技术尤为普遍，应用范围涵盖了地球静止轨道(GEO)、中地球轨道(MEO)和低地球轨道(LEO)等多种轨道的通信系统。固定分配正交多址接入技术由于其具有技术成熟度高、信道利用效率高的优点，所以在长时连接型通信业务中表现出显著优势。但是由于低轨卫星互联网的终端类型多样，卫星互联网网络结构具有动态变化性、低轨卫星上资源受限以及星地传播时延较大的特点，固定分配正交多址接入技术在该环

境下因频繁的信令交互而显得低效。非正交多址(NOMA)多个用户可以使用同一个无线传输资源块，从信息论角度可以更好地逼近多用户信道容量。并且，在低轨多类型用户场景下多址问题的关键是大量用户能够得到保障目标速率的服务，而不是追求单个用户的极限传输容量。NOMA接入方式可以吸收某些单用户的峰值速率用来支持卫星波束覆盖的大规模用户的连接数，并且用户数据包可以碰撞，有利于在卫星长传播时延信道下的免授权传输方式。典型的MOMA技术包括：中兴通讯提出的多用户共享接入技术(MUSA)^[8]、华为公司提出的稀疏码多址技术(SCMA)^[9]等非正交接入技术。

在卫星物联网的应用领域中，典型的业务特征包括短小的数据包和高突发性的交互模式。与传统固定分配的多址接入技术相比，随机接入(RA)技术在这些环境中可以有效地提高系统资源的利用率。然而，这种接入方式对于数据包碰撞具有较低的容忍性，特别是在信道负载增加时，系统的性能可能会急剧下降，引发所谓的“雪崩效应”。考虑到随机接入技术的轻控制特性与物联网业务对短数据包和无连接通信的需求高度契合，物联网产业的演进对随机接入技术提出了新的挑战。具体而言，这些挑战涉及从传统的碰撞避免策略转变为未来的碰撞容忍和碰撞消除策略的发展方向。研究者们提出了一系列基于竞争解决的增强型随机接入技术，包括竞争解决分集时隙ALOHA技术^[10]、非规则重传时隙ALOHA技术^[11]、编码时隙ALOHA技术^[12]等。这些技术可以看作是NOMA技术与RA技术的结合，其核心思想是利用串行干扰消除技术消除碰撞对系统性能造成的影响，从而达到提升系统信道利用率的目的。

3.3 接入策略

低轨卫星网络的存在可以实现全球的网络覆盖。然而，在一些区域(如城郊等)，多种网络以及不同卫星波束会产生密集波束覆盖的场景，而用户接入不同的波束会对网络性能和用户体验带来极大的影响。因此，用户接入策略，即通过优化选择用户的接入波束以提升网络性能，成为研究的重中之重。当前多层网络覆盖接入选择策略主要分为：单目标决策、多目标综合加权决策、方案理论优化决策。1) 单目标决策：文献[13]介绍了异构网络中的负载均衡策略，用户终端在覆盖其的通信节点内基于信号强度和业务负载判断切换的必要性，以及选择需进行切换时的目标通信节点，避免了部分通信节点过载，实现了负载均衡。2) 多目标综合加权决策：文献[14]面向GEO/LEO异构卫星网络，提出了一种基于参数自适应的多属性接入和切换决策算法，综合考虑信

干噪比、用户需求带宽、流量传输成本和卫星负载状况,保证多媒体业务的服务质量(QoS),并定义了一个自适应参数,进一步平衡网络负载。3) 方案理论优化决策:文献[15]在异构卫星网络与用户层建立博弈模型,提出了一种双方博弈选择算法,综合考虑了网络满意度和用户多样化需求。

多波束覆盖可根据不同业务需求和外界环境影响为用户自主选择接入不同的网络,而终端业务需求、网络负载、接入信道状况、系统内外干扰、动态波束服务时间、接入用户公平性、系统吞吐量等不同的参数影响终端自主接入性能,多个参数相互作用难以优化求解。多频段、多协议混合接入,网络立体多层,卫星的高速运动和用户的随机移动,均会导致终端与地面网/卫星网的连接关系和传输环境动态变化,从而使得传播信道多样复杂、动态变化,难以建模,因此需要利用智能化网络与轻量化终端间的协同,通过人工智能辅助设计终端的广域自主接入方法。但终端和低轨卫星是存储、计算、传输资源受限的平台,需要适配终端/卫星能够提供的资源和使用的人工智能算法复杂度,才能实现智能化网络协助便携式终端的广域自主接入。

3.4 传输技术

大规模天线阵列是地面网络提升信道容量的主要手段。学术界提出了从空域上对设备进行分簇的思想^[16],其核心思想是利用多天线系统所特有的空间自由度,将空间上正交或者准正交的设备分为不同的簇。每个簇内的设备共享一个空间波束,通过设计发射波束,可以部分甚至完全消除簇间干扰。文献[17]在星地融合网络场景下研究了用户成组配对和功率分配以最大化系统的容量。多天线技术是5G等下一代无线网络的重要核心技术之一,东南大学在基于大规模天线阵的波分多址接入技术方面做了大量研究^[18-19]。借鉴地面5G网络中的多输入多输出技术,充分挖掘空域资源,是提升低轨卫星系统传输容量是一种有效解决方案。但与地面富反射环境信道不同,卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道,采用基于多天线收发时空编码技术并不能取得理想的分集增益。文献[20]在大规模低轨星座场景下提出了一种面向用户的虚拟MIMO传输架构,讨论了系统的双工模式、导频设计、波束成形、切换管理等系统问题,并在切换管理、功率分配、用户QoS需求约束下最大化系统的吞吐量。

卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道,采用地面5G网络中多天线收发时空编码技术并不能取得理想的分集增益,需要采用多波束成形技术提升系统资源的复用增益。而星地间长传播时延导致难以获得终端的实时信道信

息,低轨卫星的在轨高速运动和终端的随机移动又造成统计信道信息准确度低、生存周期短,从而无法辅助高动态环境下的无线传输。此外,不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大,系统内的多址干扰和系统外同频干扰动态变化,使得传统地面网络多天线MIMO传输方法以及固定或事先设定模式的传输方式很难适应时变复杂的低轨卫星网络。立体多层动态网络场景难以建模、服务终端海量、卫星处理能力有限使得信道参数难以准确获得、多个约束和性能参量相互作用的问题难以求解、这些都需要通过AI辅助空口设计的方法实现系统适变传输的需求,同时需要研究适配终端和卫星存储、计算、传输资源的空口赋能AI的部署方法,从而实现自学习、自演进能力的传输技术。

4 结束语

低轨卫星网络具有覆盖范围广、网络立体多层、应用场景多样、终端需求差异大、服务对象多样、服务终端海量、星地传输时延大、卫星处理能力受限等系统特征,并且由于卫星的高速运动和用户的随机移动,终端与网络连接关系和传输环境会动态变化。不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大,系统内的多址干扰和低轨境外波束系统外同频干扰动态变化,使得原来单一系统僵化的绑定式接入与传输模式不再适用。低轨卫星高动态使得场景时变复杂难以建模,并且低轨卫星网络中终端业务需求、传输信道特征、网络负载、系统内外干扰、动态波束服务时间、用户的成组分簇、接入用户公平性等多个约束参数和性能指标形成相互作用的NP-hard问题难以求解,需要采用内生智能的方法辅助空口设计,从空口赋能AI和AI辅助空口两个方面构建完整闭环的研究体系实现系统接入与传输的需求,从而实现自学习、自演进能力的接入与传输方式以适应多样化的低轨动态场景。

参考文献

- [1] 吴魏,张更新.天基物联网技术[M].北京:电子工业出版社
- [2] 汪春霆,翟立君,李宁,等.关于天地一体化信息网络典型应用示范的思考[J].电信科学,2017,33(12):36-42. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2017322
- [3] 方芳,吴明阁.全球低轨卫星星座发展研究[J].飞航导弹,2020,5:88-92. DOI:10.16338/j.issn.1009-1319.20190258
- [4] 高梓贺,姚海鹏,张磊,等.低轨巨型星座体系架构设计与关键技术分析[J].天地一体化信息网络,2024,5(2):43-52. DOI:10.11959/j.issn.2096-8930.2024015
- [5] 孙建成,孙嘉颖,缪德山,等.5G NTN网络架构标准化演进的思考[J].电信科学,2023,39(9):76-86. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2023168
- [6] 3GPP. Study on management aspects of Internet of things (IoT) non-terrestrial networks (NTN) enhancements: 3GPP TR 28.841[S]. 2023
- [7] 杨刚华,何高宁,陈睿荣,等.6G无线空口传输技术研究进展与展望

- [J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1078–1113. DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2021.06.001
- [8] YUAN Z F, YU G H, LI W M, et al. Multi-user shared access for Internet of Things [C]//Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2016: 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504361
- [9] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]//Proceedings of IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2013: 332–336. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666156
- [10] CASINI E, DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): an enhanced random access scheme for satellite access packet networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2007, 6(4): 1408–1419. DOI: 10.1109/TWC.2007.348337
- [11] LIVA G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA [J]. IEEE transactions on communications, 2011, 59(2): 477–487. DOI: 10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
- [12] PAOLINI E, LIVA G, CHIARI M. High throughput random access via codes on graphs: coded slotted ALOHA [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2011: 1–6. DOI: 10.1109/icc.2011.5962871
- [13] YONEYA R, MEHBODNIYA A, ADACHI F. Two novel handover algorithms with load balancing for heterogeneous network [C]//Proceedings of IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). IEEE, 2015: 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2015.7391183
- [14] SONG H Y, LIU S J, HU X, et al. Load balancing and QoS supporting access and handover decision algorithm for GEO/LEO heterogeneous satellite networks [C]//Proceedings of IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2018: 640–645. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8781039
- [15] JIANG J, GUO D. A mutual satellite heterogeneous network selection algorithm of multiuser based on game theory [J]. Application of electronic technique, 2014: 591–598. DOI: 10.3969/j.issn.0258-7998.2014.10.032
- [16] RIAZUL ISLAM S M, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(2): 721–742. DOI: 10.1109/comst.2016.2621116
- [17] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Non-orthogonal multiple access based integrated terrestrial-satellite networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(10): 2253–2267. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2724478
- [18] XIONG X, WANG X D, GAO X Q, et al. Beam-domain channel estimation for FDD massive MIMO systems with optimal thresholds [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(7): 4669–4682. DOI: 10.1109/TWC.2017.2701371
- [19] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for millimeter-wave/terahertz massive MIMO transmission with per-beam synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1550–1563. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699100
- [20] ABDELSEDEK M Y, YANIKOMEROGLU H, KURT G K. Future ultra-dense LEO satellite networks: a cell-free massive MIMO approach [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473753

作者简介



申佳伟, 南京邮电大学在读硕士研究生; 研究方向为卫星物联网。



洪涛, 南京邮电大学副教授; 研究方向为卫星物联网、卫星通信等; 发表论文 11 篇。



张更新, 南京邮电大学教授、博士生导师; 研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络; 作为项目负责人完成科研项目 30 余项, 获省部级科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 8 项; 发表论文 100 余篇, 授权国家发明专利 30 余项, 出版学术著作 5 部。