



专题: 5G+6G

6G 卫星通信接入及移动性管理技术

吴晓文^{1, 2}, 凌翔¹, 朱立东¹, 焦侦丰³, 程剑⁴, 杨博⁵

- (1. 电子科技大学, 四川 成都 611731; 2. 电子科技大学(深圳)高等研究院, 广东 深圳 518110;
3. 深圳市星网荣耀科技有限公司, 广东 深圳 518052;
4. 中国人民解放军陆军工程大学, 江苏 南京 210007; 5. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 对 6G 网络中的卫星通信接入和移动性管理技术进行了分析和展望。首先介绍了目前全球有代表性的卫星移动通信系统接入技术体制, 以及国际标准化机构对 5G NR 卫星接入技术的研究现状, 然后根据 6G 卫星通信网络接入所面临的挑战, 分别从极简接入和极智接入两个方面探讨潜在的 6G 卫星通信网络接入技术。此外, 还从 6G 卫星通信的高动态场景下的海量终端切换需求出发, 提出了基于云通道技术的海量终端跨星跨波束批量柔性切换的移动性管理方案建议。

关键词: 6G 卫星通信; 接入技术; 移动性管理; 极简接入; 极智接入

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021131

Access and mobility management technologies for 6G satellite communications network

WU Xiaowen^{1, 2}, LING Xiang¹, ZHU Lidong¹, JIAO Zhenfeng³, CHENG Jian⁴, YANG Bo⁵

1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China
2. Shenzhen Institute for Advanced Study, University of Electronic Science and Technology of China, Shenzhen 518110, China
3. Starnetworks Technology Co., Ltd., Shenzhen 518052, China
4. Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China
5. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China

Abstract: Analysis and outlook for satellite communication access and mobility management technology in 6G network was presented. Firstly, the access technology of current global representative satellite mobile communications system was introduced, as well as the international standardization organization research status of 5G NR satellite access technology. According to the challenges for 6G satellite communications network access, some solutions regarding to 6G satellite communications access were proposed respectively from the aspects of extremely simple access, extremely intelligent access. Furthermore, according to the demand of massive terminals handoff in the high dynamic scenario of 6G satellite communications, the flexible handoff scheme based on cloud channel technology, which supported batch massive terminals mobility management for across satellites and beams, was proposed.

Key words: 6G satellite communication, access technology, mobility management, extremely simple access, extremely intelligent access

1 引言

2019年被称为5G元年,而2020年是5G加速商用的一年,中国5G跑出了“中国速度”,全年新建5G基站超过60万个,实现所有地级以上城市5G网络全覆盖;5G终端连接数突破2亿个。2021年计划新建5G基站60万个,加速向有条件的县镇延伸^[1]。但5G网络覆盖仍以基站为中心,在基站未覆盖的沙漠、无人区、海洋等区域内依然存在大量通信盲区,预计5G时代仍将有80%以上的陆地地区和95%以上的海洋区域无移动网络信号^[2]。同时,5G的通信对象集中在陆地地表10 km以内高度的有限空间范围,无法实现“空天海地”无缝覆盖的通信愿景^[2],5G并不能真正实现“全球全域”和“万物互联”。

因此,人们的目光开始聚焦在6G的研究,以弥补5G网络的不足并实现真正意义上的全球全域随遇接入和万物互联。6G核心技术已被列入多个国家的创新战略中,将成为大国科技博弈的高精尖领域。中国、美国、日本、韩国、欧洲(如芬兰、德国)等多个国家和地区都已经启动了关于6G的研究,尚处于“场景挖掘”和“技术寻找”阶段。其中,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)已将卫星通信列为6G融合多类网络(ManyNets)的重要组成部分^[3]。6G的总体愿景是基于5G网络的进一步扩展和升级^[2],进一步融合卫星移动通信、人工智能(artificial intelligence, AI)与大数据^[3],打造“空-天-地-海”一体化网络,构成面向2030年之后的泛在移动通信信息基础设施。6G网络速率、空口时延以及网络接入容量等指标,均比5G网络有了数倍甚至千倍的性能提升,并将涌现更多的全新业务和全新应用场景。6G网络将由5G的增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)、超可靠低时延通信(ultra reliable and low latency communication, uRLLC)和大连接物联网(massive

machine type communication, mMTC)三大应用场景升级和扩展到未来增强型移动宽带(further-enhanced mobile broadband, FeMBB)、极高可靠低时延通信(extremely reliable and low-latency communication, eRLLC)、远距离高移动性通信(long-distance and high-mobility communication, LDHMC)、超大连接物联网(ultra-massive machine type communication, umMTC)和极低功耗通信(extremely low-power communication, ELPC)五大应用场景^[4]。为满足6G网络下的上述多层多维应用要求,建立终端及业务与网络连接的首先任务是实现高效、快速、智能的接入,研究和探索6G网络中卫星通信接入技术具有重要的意义。

本文首先通过对目前卫星移动通信系统接入技术体制,以及国际标准化机构对5G新空口(new radio, NR)卫星接入技术的研究现状进行介绍和分析,然后分别研究和提出了关于极简接入、极智接入和移动性管理等方面针对6G网络中的卫星通信相关解决方案和建议。

2 目前卫星移动通信的接入技术现状

2.1 卫星移动通信系统接入技术

卫星移动通信系统是提供卫星移动业务(mobile satellite service, MSS)的通信系统,可以提供语音、数据、传真、视频等业务,既适用于国内通信,也可用于国际通信,既适用于民用通信,也适用于军事通信^[5]。投入运营的代表性卫星移动通信系统主要有国际海事卫星通信系统(Inmarsat)、铱星(Iridium)、全球星(Globalstar)以及我国的“天通一号”卫星通信系统等。

Inmarsat是世界上第一个全球性的移动业务卫星通信系统,用户链路利用L波段,覆盖全球南北纬75°以内的范围,提供低速数字语音、数据通信、传真、电报(仅限于海事终端单元之间)。



其中, Inmarsat 三代星 (Inmarsat-P/ICO) 采用类似地面全球移动通信 (global system for mobile communication, GSM) 系统的 GMR-2 体制^[6]。GMR (GEO-mobile radio) 意为地球静止轨道卫星 (GEO) 移动无线电接口, 用于地球同步卫星的移动卫星业务。GMR 源于地面 GSM 标准, 支持接入 GSM 核心网^[7], 采用 TDMA 多址接入方式, 终端用户可在地面 GSM 和卫星之间自动切换。不同于前面三代星采用的传统电路交换技术^[8], Inmarsat 四代星全球宽带局域网 (broadband global area network, BGAN) 创建了世界第一个全球性的 3G 移动通信网络^[9], 将 3G 系统 WCDMA 空口替换为专用空口 (即 Inmarsat air interface-2, IAI2)^[10], 可采用不同的调制方式, 兼容地面 3G 网络 (3GPP Release 4)^[10]。Inmarsat 一到四代星用户链路均采用 L 频段, 而 Inmarsat 五代星采用 Ka 频段, 基于 DVB-S2 技术, 支持上行 5 Mbit/s、下行 50 Mbit/s 的宽带业务^[11]。Inmarsat 的全球服务商竞争对手为 Iridium 和 Globalstar。

Iridium 采用了星上处理、星上交换和星际链路技术。其中, 星际链路是一个巨大的突破和优势, 类似于地面蜂窝网络。Iridium 采用源于地面 GSM 的 GMR-1 技术体制^[12]。GMR-1 空口被称为 GMR-1 3G, 以欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) EDGE 标准空口为基础, 并针对卫星环境进行了优化^[13], 采用 TDMA 多址接入方式实现手持终端与卫星直接通信, 为用户提供了语音、数据、寻呼以及传真等业务。Iridium 公司 2017 年开始部署的 “Iridium NEXT” 星座, 支持移动用户 (手持终端) 的最高数据速率可达 128 kbit/s, 数据用户 (船载动中通 Iridium OpenPort[®] equipment 及其升级换代产品 Iridium Pilot[™]^[14-15]) 可达 1.5 Mbit/s, Ka 频段固定站不低于 8 Mbit/s^[16]。“Iridium NEXT” 主要瞄准 IP 宽带网络化和载荷能力的可

扩展、可升级等能力, 这些能力使得它能够适应未来空间信息应用的复杂需求。

Globalstar 在全球范围向用户提供无缝隙覆盖的低价卫星移动通信业务 (包括语音、传真数据、短信息、定位等), 采用 CDMA 技术, 能确保语音质量良好, 增加通话的保密性和安全性。全球星系统没有星间链路, 无须星上处理, 从而大大降低了系统投资费用, 而且避免了许多技术风险。Globalstar 用户既能在地面移动蜂窝网中工作, 也可以在蜂窝网络覆盖不到的地区转为卫星通信模式, 真正实现全球无盲区 (除南北极) 个人通信^[17]。

“天通一号”是我国卫星移动通信系统。天通-01 星主要覆盖我国领土和领海, 天通-02 星、天通-03 星分别在天通-01 星东西两侧设置, 形成对太平洋中东部、印度洋海域及 “一带一路” 区域的常态化覆盖。“天通一号” 卫星的技术指标与能力水平达到国际第三代移动通信卫星水平^[18]。用户链路为 S 频段, 馈电链路为 C 频段, 用户链路和馈电链路的上下行传输均为 FDD/TDMA-FDMA 方式^[19], 支持的数据速率为 1.2 kbit/s~384 kbit/s。

除了上述卫星移动通信系统外, 目前还有 Thuraya 和 ACeS 等区域性的卫星移动通信系统。其中, Thuraya 采用源于地面 GSM 的技术体制 GMR-1, 多址方式为 TDMA 多址接入方式, 支持 FDD 双工; 而 ACeS 则采用源自 GSM 的技术体制 GMR-2), 同样为 TDMA 多址方式, 且支持 FDD 双工。

近年来, 以 Starlink 和 OneWeb 为代表的低轨卫星互联网星座也得到蓬勃发展。Starlink 采用比 IPv6 技术更加轻量化并且原生支持 P2P 的全新连接协议^[20], 是一种类似区块链的去中心化网络, 卫星能够精确了解每个用户物理位置经纬度合理的分布其数据链路, 且采用端对端的硬件加密技术, 具有高度安全性。Starlink 从硬件芯片到协议的全新 Internet 系统是对目前地

面上使用的互联网技术的一次全新全面升级^[20]。Starlink 第二代系统将采用星间激光链路, 以提供无缝的网络管理和服务连续性。Starlink 用户通过 Wi-Fi 路由器将卫星信号进一步转化为 Wi-Fi 信号后接入互联网。目前可采用的路由器包括 TP-Link、ASUS 等多个品牌, 而且支持 Wi-Fi6 技术体制^[21]。

OneWeb 星座卫星之间没有星间链路, 采用“天星地网”组网方式^[22], 卫星之间不组网, 通过全球分布的地面站实现整个系统的全球服务能力, 卫星只是透明转发通道, 大部分的处理在地面完成。星上设备比较简单, 系统建设的技术复杂度低, 升级维护也比较方便。按照目前的建设方案, OneWeb 系统在全球设置了 50 多个信关站。每个信关站计划配置 10 幅以上的天线, 每幅天线口径为 2.4 m 或更大^[22]。OneWeb 用户链路采用 Ku 频段, 用户终端可以作为一个本地互联网接入点, 用户能通过 Wi-Fi 或蜂窝信号接入互联网, 目前设计支持通过 3G、LTE、Wi-Fi 或卫星链路接入互联网。

我国已于 2021 年 4 月成立了中国卫星网络集团有限公司, 将对我国低轨卫星互联网产业进行顶层设计和资源整合。此外, 我国也向 ITU 申报了由 12 922 颗卫星组成的“GW-A59”和“GW-2”星座, 将着力提高全产业链的创新能力和整体效能, 确保系统安全稳定、自主可控。

综上, Inmarsat、Iridium 和 Globalstar 以及我国“天通一号”等移动卫星通信系统采用类似陆地移动通信系统的 2G 或 3G 技术体制, 采用 FDMA/TDMA 及 CDMA 多址接入方式, 支持低速数据、语音服务, 只有近年规划和部署的卫星(如 Inmarsat 五代星)才开始支持宽带互联网业务。Starlink 和 OneWeb 等新兴的低轨卫星宽带互联网星座需要配置专用路由器将卫星信号转化为 Wi-Fi、微波等无线网络实现用户终端的互联网接入。将来的卫星移动通信发展趋势主要包括 4 个

方面: 卫星天线口径不断增大, 卫星功率不断提高; 多波束天线广泛使用、波束个数不断增加; 业务宽带化、IP 化, 数据传输速率不断提高; 与地面移动通信网络的融合趋势不断加大^[23]。而这些趋势和变化, 将为未来融合卫星通信的多类网络(ManyNet)的 6G 通信网络提供一定的技术积累和技术参考。

另一方面, 由第一代卫星广播电视标准 DVB-S/DVB-RCS 逐步发展和演变的 DVB-S2、DVB-RCS2 和 DVB-S2X 技术也得到了大量应用。但 DVB 系列标准更适用于广播卫星业务(broadcasting satellite service, BSS)和固定卫星业务(fixed-satellite service, FSS)方面^[24], 为支持叠加网状网和星上处理等技术预留了扩展的可能^[25], 对未来 6G 卫星通信也具有一定的参考意义。

2.2 国际标准化机构 3GPP 关于 5G NR 的卫星接入技术研究

国际标准化机构 3GPP 关于 5G 非陆地网络(non-terrestrial network, NTN)的研究主要聚焦在 R16 TR 38.811、TR 38.821 和 TR 22.822 3 个报告。关于接入技术的研究主要在 TR 38.821 中进行。TR 38.821 以 TR 38.811 提出的 4 种架构为基础, 对每种架构做了更加细致的刻画, 同时给出了每种架构下的协议栈, 并分析了该场景下对 5G NR 的接入网(NG-RAN)的影响层面, 提出了在 5G NR 采用该架构时的 NR 更新建议。

3GPP 更多关于 5G 卫星接入的研究, 将在 5G NR R17 及后续版本中公布。其中, R17 中与 5G 卫星接入相关的研究内容主要包括: 5G NR 的轻量化(NR-light)、小数据传输优化(small data transfer optimization)、覆盖增强(coverage enhancement)、非陆地网络的 NR(NR for non-terrestrial network)、移动接入集成回传增强(mobile integrated access back-haul(IAB) enhancement)、RAN 数据采集增强(RAN data collection enhancement)、5G 核心网边缘计算的支



持增强(enhancement of support for edge computing in 5GC)、集成接入和回传支持的增强(enhancement for the support of integrated access and back-haul)^[26]等。

3 6G 卫星通信潜在接入技术

业界已经开始讨论 6G 网络的愿景与概念化指标,卫星通信在 6G 网络中的关键作用也已成为共识。6G 网络中的卫星通信将包括 GEO、MEO、LEO 卫星,比 5G 及以往任何一代移动通信系统都更加复杂。而且,基于卫星与地面移动用户的距离较远,大时延是卫星通信的一个固有特点。6G 的连接密度将比 5G 网络高出 100 倍,能支撑 1 亿个连接/km²。如何实现 6G 卫星通信的极简极智接入,通过技术手段进一步减小接入时延,保障海量连接的无碰撞可靠接入和提高有限频谱资源的利用率,支撑 6G 网络的各项技术指标,都是 6G 卫星通信网络面临的重大问题,也是值得深入研究和探讨的重要方向。

3.1 6G 卫星通信极简接入技术

对于 6G 卫星通信 umMTC 业务,终端具有短突发数据、连接数大、功耗低、成本低的特点,这对存在信号损耗大、接入时延长、存在大频偏等固有特性的星载基站来说具有很大的挑战性。因此,需要简化 6G 卫星通信接入流程、减小接入时延、减少碰撞概率等技术手段提高接入成功率和接入效率。

3.1.1 面向非连接业务的免授权接入机制

6G 卫星通信 umMTC 场景下海量的 UE 在完成小区搜索过程之后,将根据星载基站广播信息与星载基站小区取得下行同步,此时,UE 已经具备了接收下行数据的条件。但是,UE 只有与小区取得上行同步才能进行上行传输。对于传统的地面网络中基于授权的随机接入方案,需经过 4 次握手达成许可后设备才能向基站传输数据,在大规模连接场景中该连接建立过程会导致信息处理

时延过高^[27-28]。由于星地信道长时延影响,接入时间过长,严重影响通信效率和服务质量,因此,地面网络传统的基于授权的接入机制不能够直接移植到 6G 卫星通信网络。基于上述原因并考虑超大规模用户的使用场景,这里提出基于非正交多址的免授权接入方案。

在本文的研究讨论中,将 6G 卫星通信网络的业务分为非面向连接的业务和面向连接的业务两大类型。图 1 给出了免授权随机接入流程。对于非面向连接的业务,UE 根据收到的星载基站广播信息预测可用资源,并根据到达数据的类型选择合适的可用资源,在信号时延和频偏的预补偿机制保障下发起非正交多址接入和业务数据传输;星载基站则根据 UE 的签名序列等信息通过多用户检测和联合译码算法译码解析 UE 及其发送的数据传输信息,然后向 UE 发送 ACK 信息。在此过程中,UE 根据卫星广播信息选定资源,而不需要像动态分配上行资源一样,每次都需要下行信道控制信息(downlink control information, DCI)的指示,节省 UE 发送调度请求(scheduling request, SR)、缓冲状态报告(buffer status report, BSR)以及星载基站通过 DCI 进行资源指示的空口传输时间,从而通过极简的接入流程,减小了 UE 接入时与基站的交互次数,有效降低接入信令开销和时延。

在上述免授权接入过程中,为了解决 6G 卫星通信网络低轨卫星高动态条件下免授权接入的适应性问题,本文提出了非面向连接的业务接入信号时延和频偏的预补偿机制。6G 卫星通信网络中,尤其是低轨卫星与 UE 的相对运动速度很大且呈现高动态特征,因此,UE 与星载基站需要通过定时提前(TA)来消除这种干扰。图 2 给出了接入过程的超前定时补偿。UE 向星载基站发送前导信号,星载基站对收到的 UE 前导进行测量,计算与 UE 的距离。由于卫星星历是已知的,星载基站可根据 UE 前导的测量数据以及星历计算

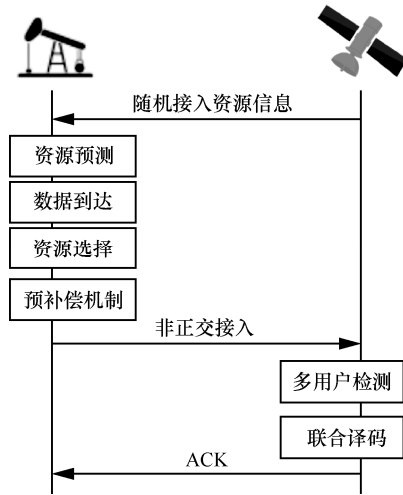


图1 免授权随机接入流程

与 UE 的距离变化趋势，并将同步信息通过下行信道发送给 UE，UE 据其完成与星载基站的同步，以此来消除 UE 间的码间干扰。同时，UE 和星载基站之间也可根据星历计算两者之间的频偏，并予以消除。

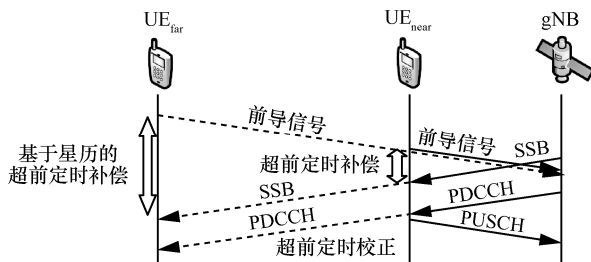


图2 接入过程的超前定时补偿

免授权接入时的非正交多址拟采用 SCMA 技术，根据 6G 卫星通信网络特性对其进行优化设

计，即在现有 SCMA 技术基础上进一步深入研究多址接入码本设计和多用户检测算法。由于无线传输链路的基本数学模型是线性模型，根据信号估计的基本方法，可利用最大似然估计器（maximum likelihood estimator, MLE）进行估算发送信号的最大后验概率。但是，ML 检测算法的检测复杂度随着大规模 MIMO 系统发送和接收天线数的增加，呈指数级增加，难以硬件实现，应在复杂度和性能之间折中。针对该问题，可通过 3 个方面对 SCMA 多用户检测进行优化^[29]：

（1）优化收敛条件，降低迭代次数，即通过节省时间成本的方式降低一定复杂度；

（2）从检测点数入手，降低多用户检测器需要遍历的点，从而降低检测复杂度；

（3）从发送端码本设计中的多维星座的设计入手，良好的星座设计可以直接增加用户分辨率，从而直接降低检测端的复杂度。

图3给出了卫星通信上行 SCMA 模型^[30]。在高轨静止卫星覆盖场景下， J 个终端同时向卫星发送数据，因此假定一个 SCMA 系统有 J 个数据层，即 J 个用户，这些用户同时共享 K 个正交资源（ $J > K$ ，过载因子定义为 $\lambda = J / K$ ，SCMA 是将 $\text{lb}|M| \text{ bit}$ 的二进制数据直接映射为一个大小为 $|M|$ 的 K 维复数域码字。定义第 j 个数据层的关联映射函数为： $f_j: B^{\text{lb}|M|} \rightarrow x$ ，其中 $x \in C^K$ ， $|x| \in M$ ， K 维复数码字是含有 N （ $N < K$ ）个非

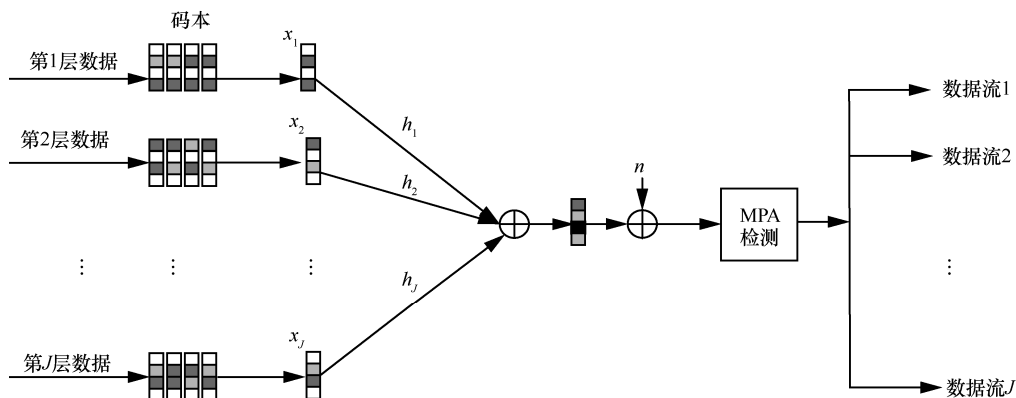


图3 卫星通信上行 SCMA 模型



零元素的稀疏向量。

采用并行 Max-log MPA 算法, 通过取对数运算, 把乘法转化为加法, 在实际计算时, 乘法器将减少, 加法器增加, 降低了算法复杂度^[30], 硬件的实现更加容易, 因而可使星上设备简单, 更适合运用于卫星通信系统。但是, 该算法是以牺牲误码率为代价的, 且是高轨卫星的通信仿真结果。在 6G 卫星通信网络中, 还需要进一步探讨适用于 GEO 和 N GEO(non-geostationary earth orbit, 非同步地球轨道卫星, 包括中轨和低轨卫星等) 卫星的低复杂度 MPA 算法, 使之应用于 6G 卫星通信的普适性更强。

3.1.2 面向连接业务的预共享密钥和轻量化鉴权协议

为了降低星地协议处理及加解密等过程导致的星载 CPU 计算开销, 本文提出预共享密钥方法。预共享密钥支持两方认证鉴权且具有较低复杂度和协议开销, 能够有效降低认证鉴权过程中信息交互次数, 减小认证鉴权过程中的信息处理时延。

选取基于随机数的轻量化认证鉴权架构, 能够避免基于时间戳/序列号的认证鉴权架构引入的同步开销。通过星上缓存预共享密钥、基于随机数方式等, 采用同等强度但具有较低计算复杂度的对称加密算法, 降低协议的握手次数。图 4 给出了轻量化鉴权流程。地面鉴权中心承担完整的鉴权功能, 而星载鉴权中心则承担轻量化鉴权功能。当终端处于地面网络覆盖范围内时, 所有鉴权流程全部在地面鉴权中心完成。当终端只处于卫星网络覆盖内时, 大部分鉴权流程在星载鉴权中心地面鉴权中心完成, 而星载鉴权中心与终端的交互只需要两个步骤。

3.2 6G 卫星通信极智接入技术

如上文所述, 6G 卫星通信网络可以包含 GEO、MEO、LEO 多种轨道卫星, 并支持 FeMBB、eRLLC、umMTC、LDHMC 等应用场景下的多种

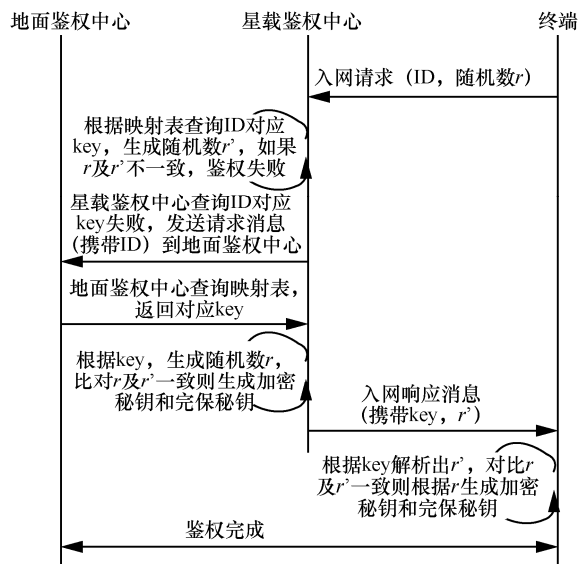


图4 轻量化鉴权流程

类业务类型, 针对上述网络特征下的不同业务需求共存、不同轨道链路相互干扰、不同节点资源存在差异的复杂状况, 需要在接入与切换过程中采用人工智能方法对空间节点进行高效智能的资源分配和管理, 根据不同的业务类型, 选择合适的资源。

为达到上述目标, 本文提出基于 AI 的频谱动态分配和卫星共线干扰协调技术, 提升频率利用率和通信质量; 同时, 以针对业务类型和业务量在时域和空域的不均衡分布特性而提出的基于业务热力图的资源智能分配技术为基础, 进一步提出高低轨融合的卫星跳波束解决方案, 将有限资源高效覆盖重点业务, 从而使卫星资源得到高效利用。

3.2.1 基于 AI 的频谱动态分配技术

6G 卫星通信网络向速率更高、接入更多、覆盖更广的方向发展, 对频谱资源的高效合理利用提出更多的挑战。频谱动态分配是提高接入成功率和频谱利用率的有效手段之一, 本文提出的频谱动态共享技术将频谱资源从静态独占向动态共享转变, 通过基于 AI 技术在复杂电磁环境中实现频谱分配的智能化的动态自主决策。

从网络架构层面来看, 频谱资源的分配是在

基站侧完成的。参考文献[31]提出了 AI 使能的未来 6G 卫星通信开放式接入网架构,图 5 是基于 AI 智慧面的无线接入架构。利用 AI 针对不同业务 QoS (服务质量)的要求,通过训练学习,进行智能化处理。其中,人工智能控制器非实时模块用于服务和策略管理、高层进程优化与模型训练;人工智能控制器近实时模块负责无线资源管理、无缝切换控制、服务质量管理和智能接入管理。

3.2.2 基于 AI 的 6G 卫星通信共线干扰协调技术

GEO 卫星在地球赤道上空的特定轨道来保持与地球表面相对位置不变,而 NGE0 卫星的位置随着时间快速地变化。相对 GEO 卫星,NGEO 卫星的主要优势是较小的自由空间衰减、较小的传播时延和较低的发射成本。目前,无线网络普遍采用固定频谱分配方式,几乎所有的无线终端都工作在一些频谱管理机构(如国际电信联盟、各国频谱管理机构)分配好的频谱之下。在该方式下,大部分已经分配好的频谱很多时候在很多地区没有被充分使用,其利用率为 15%~85%^[32]。频谱资源对任何一种无线通信技术来讲都是非常珍贵的,对 6G 通信网络也不例外。在 GEO 和 NGE0 网络频谱共存的背景下,特别是当 NGE0 卫星处于地面站和 GEO 卫星连线上时,共线干扰

可能是 6G 卫星通信网络中的一个严重的问题。因此,针对 6G 卫星通信网络中频谱共存的 GEO 和非 GEO 卫星网络,本文提出基于 AI 的动态频谱接入(dynamic spectrum access, DSA)方案。深度强化学习将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力相结合,不断以试错的方式与环境进行交互,通过最大化累积奖赏的方式来获得最优策略^[33]。本方案将 GEO 和 NGE0 分别定义为主用户(primary user, PU)和次用户(secondary user, SU),通过深度强化学习,使 SU 在缺乏底层系统统计信息的情况下,以分布式方式学习“适当”的频谱访问策略,仅依靠自己当前和过去的频谱感知结果来进行分布式频谱接入决策,帮助 SU 显著降低与 PU 和其他 SU 的冲突概率。

3.2.3 基于业务热力图的资源智能分配技术

为了使多维资源调度能够最优匹配业务需求,本文将首先分析业务需求在 6G 异构网络中的分布特征和影响这些特征的关键因素。图 6 给出了基于热力图的智能资源分配技术。考虑业务需求在时间、空间、业务类型等多维度上的不均衡特征,拟运用多元统计分析方法和网络科学理论,探索业务需求在时间特征、空间特征、业务到达规律和网络分布特征之间的内在联系,实现对业

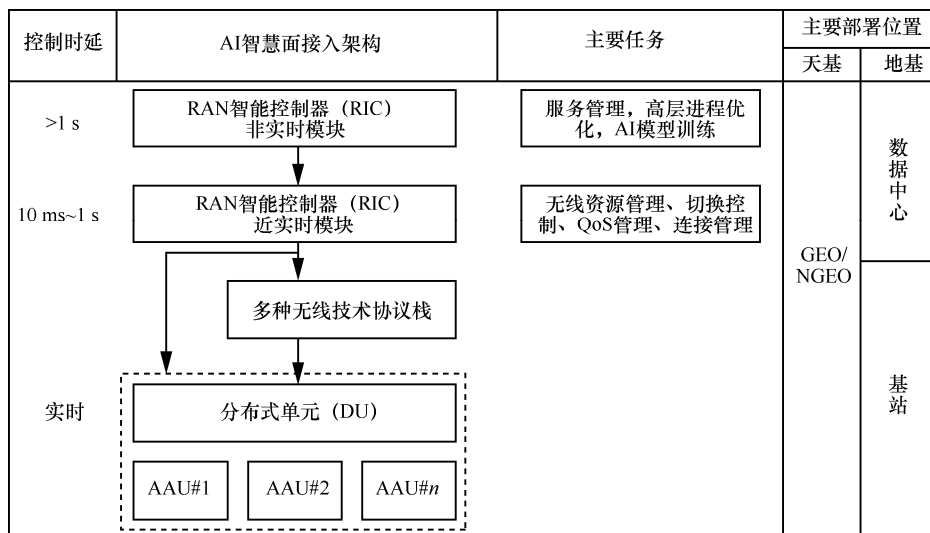


图 5 基于 AI 智慧面的无线接入架构

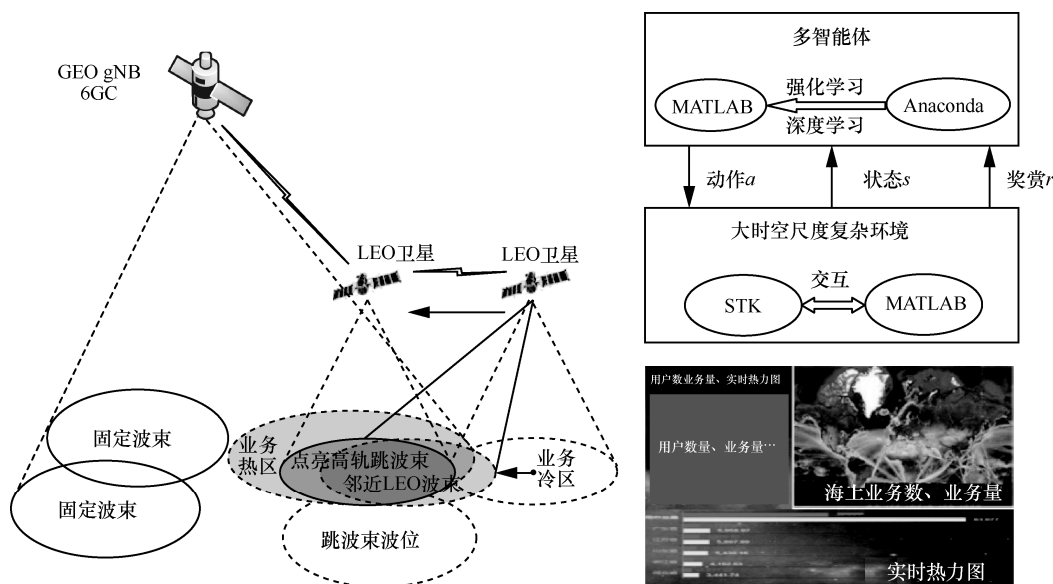


图6 基于热力图智能资源分配技术

务需求规律的多维认知。

基于上述业务需求分析,将进一步针对不同卫星节点在通信资源、计算资源等方面的差异性,通过分析系统性能增益与计算成本、通信成本之间的制约关系,设计协作式任务分配和分布式资源管理算法;并通过分析传输时延与存储容量、通信能力之间的关系,设计分布式数据存储算法,从而提高系统的资源利用效率和能量效率,降低传输和计算时延。

3.2.4 基于高动态需求的高低轨融合跳波束智能调度方法

将实现全球全域覆盖的6G网络具有业务类型的多样性、业务分布的空间不均匀性和时变性,对6G网络资源的需求呈现出时域和空域的不均衡性,对网络时、空、频域资源的需求呈现高动态性特征,而“跳波束”技术正是一种能够从时域角度对星上功率、带宽资源灵活的再分配^[34-35]、进一步提高卫星容量、提高卫星系统的工作效率与竞争力的技术手段。因此,可将基于业务热力图研究得到的业务需求规律多维认知结果输入6G卫星网络跳波束方案,实现将有限资源高效覆盖重点业务。由于6G卫星通信网络中,既有同步

轨道的GEO,也存在中低轨道的NGEO,因此,基于高低轨融合的“跳波束”方案对于6G卫星通信网络中的资源高效利用具有重要意义。图7是高低轨卫星融合的通信跳波束方案。

在高低轨融合的“跳波束”方案中,针对高轨卫星的星上功率和时隙资源联合优化,将问题分解成波束簇间功率分配和波束簇内时隙分配两个子问题,利用启发式算法分别进行求解,能够在避免系统资源浪费问题的同时提升用户波束的实际通信容量和业务需求满足率。而对于相对地面高速移动的低轨卫星,业务动态变化大,需要实时地计算卫星波束的跳变图案,可从空间、时间、频率和功率等维度进行“跳波束”资源分配,以最大化系统容量、最小化同信道干扰和传输时延为目标。

4 6G卫星通信网络潜在移动性管理技术

在6G卫星通信网络中卫星及地面终端的相对快速移动,终端相对卫星的位置信息管理、业务连续性管理尤为重要,而在此过程中将涉及波束切换、星间切换、信关站切换,以及由于移动性带来的时延扩展、测量时效性、频繁切换、批

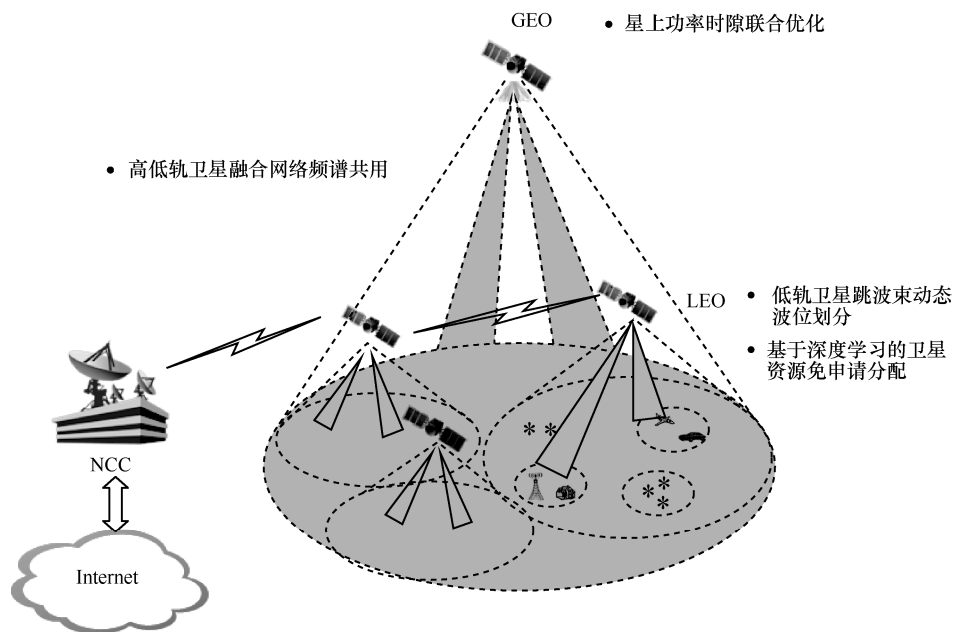


图7 高低轨卫星融合的通信跳波束方案

量切换等问题。因此，移动性管理成为6G卫星通信网络的一个重要课题，本文通过跨星跨波束批量柔性切换等技术手段加强移动性管理。

6G卫星通信网络中，LEO扮演着重要角色，LEO卫星与用户相对运动速度快，对于多波束卫星的快速移动，在用户静止的情况下单个波束扫过用户的时间长度仅为数十秒至数分钟，当用户终所处网络覆盖的卫星发生变化或所处卫星波束发生变化时，必须要进行切换操作才可实现业务的连续性。因此，用户在多个波束间的频繁切换问题是6G卫星通信网络的一个显著特征。另一方面，LEO波束远大于地面基站服务小区，可能存在一颗卫星甚至一个波束下具有海量用户的情况，解决由于卫星高速移动带来特有的批量用户跨星跨波束并发切换的问题异常重要。

为了实现卫星技术与全球电信和信息技术生态系统无缝集成，地面网络技术必须从专门构建的专有硬件架构向软件定义、灵活和可扩展的虚拟平台转变^[36]。当前正在建设的复杂卫星网络将要求朝着“完全虚拟化地面网络”方向加快努力。这种完全虚拟化地面网络将需要由通用服务定义

管理和编排多个抽象层，满足容量、灵活性、成本、服务创建和韧性方面的新需求。当前正在建设的复杂卫星网络将要求加快朝着“完全虚拟化地面网络”的方向努力。这种完全虚拟化地面网络将需要由通用服务定义管理和编排多个抽象层，满足容量、灵活性、成本、服务创建和韧性方面的新需求^[36]。这为面向2030年的星地网络的完全虚拟化融合的6G时代、构建以云原生为底层框架的AI赋能的6G空天地海一体化网络提供了技术条件。

6G网络技术的发展和建设不是一蹴而就，将根据卫星载荷的技术进展进行分阶段演进和分步骤实施。6G卫星的透明转发、星上处理和星上交换3种技术方案将长期共存。

针对卫星透明转发阶段的需求，拟通过建立以卫星地面设备虚拟化为基础的云通道技术，对信关站的天线、射频、基带、协议处理资源进行云化，统一调度，实现跨星跨波束柔性切换。图8给出了基于云通道的批量用户跨星跨波束切换方案。信关站通过云通道支持多星、多波束接入网处理，其跨星跨波束切换分为星上透明转发、处理转发两种模式。透明转发模式中，对于同站址

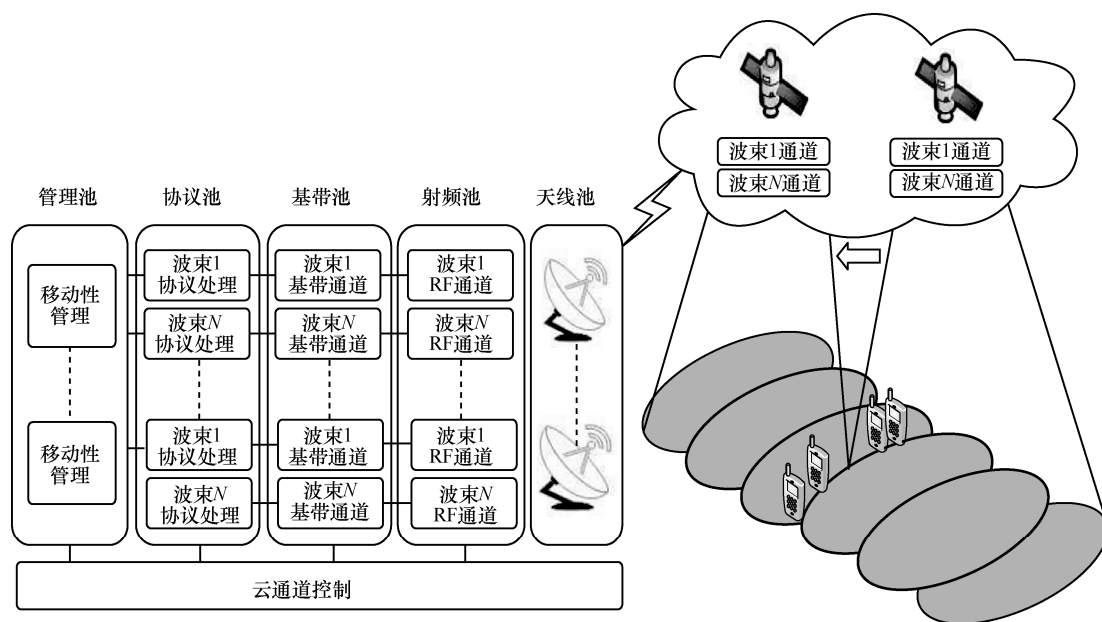


图8 基于云通道的批量用户跨星跨波束切换方案

内星内波束切换和星间波束切换，可通过天线池、射频池和基带池的云化操作，实时预补偿波束位置、接入频率、时间偏移等物理层影响，通过协议池数据共享实现云接入网内波束柔性切换。

针对星上处理模式，星内波束切换可采用多波束通道对射频基带进行物理层预补偿，波束间协议数据共享，而星间波束切换可采用双星双活设计，实现星间实时切换。

5 结束语

人们将支撑空天地海全球全域、人和物的多样化业务的重任寄托于6G网络，这要求6G网络相对于当前的5G网络性能指标实现10倍至1000倍的提升，而充分融合包括卫星通信在内的多类网络的6G移动通信接入技术，是实现智能化服务的先决条件。如何通过AI及其他技术手段克服6G网络中卫星通信接入的长时延、高动态等固有特性，实现大容量、高可靠接入，是未来一段时期内亟待解决的重要问题。本文通过轻量化鉴权和免授权接入等技术手段，分别实现了6G卫星通信面向连接和非面向连接系统的极简接入；通过AI

在6G卫星通信网络接入架构、卫星共线干扰协调、基于热力图的智能资源调度以及高效的高低轨融合的跳波束技术，实现了6G卫星通信的极智接入；通过基于云通道技术实现批量用户的柔性切换，为6G卫星通信移动性管理提供了参考解决方案。6G业务的多样化和应用场景的高动态化决定了网络技术的复杂性，从而也对网络的智能化和网元算力提出了较高的要求，6G卫星通信接入和移动性管理需要根据业务场景的不同采用不同的技术或方案，同时面临着高动态的网络拓扑对可靠接入、轻量化的星地通信协议研发、智能化的星地频谱动态分配和共享、相控阵天线小型化、同波束下的海量终端批量切换以及高效天基计算技术等一系列挑战，本文的分析和建议对未来6G卫星通信系统的进一步研究起到抛砖引玉的作用，具有积极的意义。

参考文献：

- [1] 央广网. 工信部：2021年计划新建5G基站60万个加速向有条件的县镇延伸[EB]. 2021.
CNR. MIIT: In 2021, it is planned to build 600000 5G base stations to accelerate the expansion to conditional counties and

- towns [EB]. 2021.
- [2] 赛迪智库无线电所. 6G 概念及愿景白皮书[R]. 2020.
Radio Management Research Institute of CCIDWISE. 6G white paper on concept and vision[R]. 2020.
 - [3] LI R. 5th ITU-T workshop on network 2030 concluding remarks[Z]. 2019.
 - [4] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28-41.
 - [5] 宋传志. 卫星移动通信发展现状与未来发展研究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(9): 121-122.
SONG C Z. Research on the current situation and future development of satellite mobile communication [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(9): 121-122.
 - [6] HU J, LI R L, TANG C J. A real-time inversion attack on the GMR-2 cipher used in the satellite phones[EB]. 2017.
 - [7] ETSI. GEO-mobile radio interface specifications; part 1: general specifications; sub-part 1: abbreviations and acronyms; GMR-2 01.004: ETSI TS 101 377-1-1 V1.1.1[S]. 2001.
 - [8] 邹榕洁. 第四代国际海事卫星技术的特点研究[J]. 中国海事, 2012(11): 53-56.
ZOU J J. A study on the characteristics of the fourth generation international maritime satellite technology[J]. China Maritime Safety, 2012(11): 53-56.
 - [9] Inmarsat. Global, mobile satellite connectivity[EB]. 2021.
 - [10] CHINI P, GIAMBENE G, KOTA S. A survey on mobile satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010, 28(1): 29-57.
 - [11] 穆宽林. 基于 DVB-S2 的第五代海事卫星通信系统[J]. 中国新通信, 2017, 19(20): 98-100.
MU K L. The fifth generation maritime satellite communication system based on DVB-S2[J]. China New Telecommunications, 2017, 19(20): 98-100.
 - [12] Vehere. Multi-service satellite monitoring[EB]. 2020.
 - [13] ETSI. GEO-mobile radio interface specifications (release 3); Third generation satellite packet radio service; part 1: General specifications; Sub-part 3: General system description GMR-1 3G 41.202: ETSI TS 101 376-1-3 V3.1.1 [S]. 2009.
 - [14] Argo. What Is Iridium NEXT? [EB]. 2017.
 - [15] Iridium. Iridium OpenPort® [EB]. 2021.
 - [16] WEI T, FENG W, CHEN Y F, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of Things: key technologies, opportunities, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 8910-8934.
 - [17] 庞江成, 徐小涛, 李超. 卫星移动通信系统发展现状分析[J]. 数字通信世界, 2020(1): 144-147.
PANG J C, XU X T, LI C. Analysis on the development status of satellite mobile communication system[J]. Digital Communication World, 2020(1): 144-147.
 - [18] 陈向东. 开启我国自主卫星移动通信系统应用的未来[J]. 数字通信世界, 2017(11): 19, 23.
CHEN X D. The start of future application of China's autonomous satellite mobile communication system[J]. Digital Communication World, 2017(11): 19, 23.
 - [19] 纪明星. 天通一号卫星移动通信系统市场及应用分析[J]. 卫星通信与网络, 2018 (4): 42-43.
JI M X. Market and application analysis of tiantong-1 satellite mobile communication system[J]. Satellite & Network, 2018 (4): 42-43.
 - [20] 博客园. 无线网络技术—“星链”计划[EB]. 2021.
Cnblogs. Radio networks technology-“Starlink” plan[EB]. 2021.
 - [21] Starlink router reviews[EB]. 2021.
 - [22] 林莉, 左鹏, 张更新. 美国 OneWeb 系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2018(9): 22-23, 18.
LIN L, ZUO P, ZHANG G X. Development situation and analysis of OneWeb system[J]. Digital Communication World, 2018(9): 22-23, 18.
 - [23] 秦红祥, 刘凡, 肖跃. 我国卫星移动通信系统发展现状及展望[C]//第十三届卫星通信学术年会论文集. 出版地不详: 出版社不详, 2017: 31-33.
QIN H X, LIU F, XIAO Y. Development status and prospect of satellite mobile communication system in China[C]//Proceedings of the 13th Annual Conference on satellite communication. [S.l: s.n.], 2017: 31-33.
 - [24] KOZAMERNIK F. Digital audio broadcasting—radio now and for the future[J]. EBU Technical Review. 1995: 1-27.
 - [25] 何健辉, 李成, 刘婵, 等. DVB-RCS2 通信网络拓扑与接入技术研究[J]. 通信技术, 2017, 50(8): 1696-1702.
HE J H, LI C, LIU C, et al. DVB-RCS2 communication network topology and access technology[J]. Communications Technology, 2017, 50(8): 1696-1702.
 - [26] DRYJANSKI M. 3GPP release-17: enhancing 5G[EB]. 2019.
 - [27] SAARNISAARI H, LAIYEMO A O, DE LIMA C H M, et al. Random access process analysis of 5G new radio based satellite links[EB]. 2019.
 - [28] 魏肖, 成俊峰, 王静贤, 等. 基于 5G 技术的低轨卫星物联网技术[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 14-21.
WEI X, CHENG J F, WANG J X, et al. Research on low-orbit satellite IoT based on 5G technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(3): 14-21.
 - [29] 唐梦雪. SCMA 系统低复杂度多用户检测算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
TANG M X. Research on the low-complexity multiple user detection of SCMA system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
 - [30] 蒋怡婷, 朱立东. 卫星通信系统中的非正交多址技术[C]//第十五届卫星通信学术年会论文集. 出版地不详: 出版社不详, 2019: 195-202.



- JIANG Y T, ZHU L D. Non-orthogonal multiple access technology in satellite communication system[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference on satellite communication. [S.l.:s.n.], 2019: 195-202.
- [31] SHAFIN R, LIU L J, CHANDRASEKHAR V, et al. Artificial intelligence-enabled cellular networks: a critical path to beyond-5G and 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 212-217.
- [32] 工业和信息化部电子科学技术情报研究所. 动态频谱管理技术: 从认知无线电到人工智能[J]. 电子元器件与信息技术, 2017, 1(5): 36-38.
Electronic Technology Information Research Institute, MIIT. Dynamic spectrum management technology: From cognitive radio to artificial intelligence [J]. Electronic Components and Information Technology, 2017, 1(5): 36-38.
- [33] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning: an introduction[M]. Massachusetts: MIT Press, 2017.
- [34] 赵旭东, 张晨, 张更新. 宽带卫星通信系统的跳波束技术综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019: 29-35.
ZHAO X D, ZHANG C, ZHANG G X. Overview of beam hopping technology in broadband satellite communication system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019: 29-35.
- [35] 冯琦, 李广侠, 冯少栋. 宽带多媒体卫星通信系统“跳波束”技术研究[C]//第八届卫星通信学术年会论文集. 出版地不详: 出版社不详, 2012: 193-200.
FENG Q, LI G X, FENG S D. The beam hopping technology for multi-beam broadband satellite systems[C]//Proceedings of the 8th Annual Conference on satellite communication. [S.l.:s.n.], 2012: 193-200.
- [36] NSR. Satellite ground network virtualization: NSR white paper[R]. 2020.

[作者简介]



吴晓文(1967-), 男, 博士, 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室教授, 主要研究方向为高通量卫星通信、低轨卫星星座系统、卫星物联网、天地一体化融合通信网络、移动通信系统和专网通信系统等。



凌翔(1972-), 男, 博士, 电子科技大学教授、信息与通信工程学院副院长, 主要研究方向为天地一体化通用处理平台、异构计算与并行信号处理、移动通信信号处理等。



朱立东(1968-), 男, 博士, 电子科技大学教授, 主要研究方向为卫星通信传输与组网、天地一体化网络、通信信号处理。



焦侦丰(1977-), 男, 深圳市星网荣耀科技有限公司系统方案总工程师, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化融合通信网络、移动通信、专网通信等。



程剑(1976-), 男, 博士, 中国人民解放军陆军工程大学教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航。



杨博(1982-), 男, 航天恒星科技有限公司研究员, 主要研究方向为卫星通信关键技术。