

6G 星地融合移动通信关键技术

陈山枝^{1,2*}, 孙韶辉^{2,3}, 康绍莉^{2,3}, 徐晖^{2,3}, 苏厉⁴, 张晓燕⁵, 胡博⁶,
张伟⁷, 虞志刚⁸

1. 中国信息通信科技集团有限公司, 北京 100083
2. 无线移动通信全国重点实验室, 北京 100083
3. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083
4. 清华大学天基网络与通信全国重点实验室, 北京 100084
5. 国家无线电监测中心, 北京 100037
6. 北京邮电大学计算机学院, 北京 100876
7. 中国空间技术研究院, 北京 100094
8. 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041

* 通信作者. E-mail: chensz@cict.com

收稿日期: 2023-11-04; 修回日期: 2024-03-13; 接受日期: 2024-04-09; 网络出版日期: 2024-05-16

国家重点研发计划(批准号: 2020YFB1807900)资助项目

摘要 星地融合移动通信朝着“5G 体制兼容、6G 系统融合”的技术路径发展, 6G 星地融合可以充分发挥卫星通信和地面移动通信各自的优势, 极大地提高网络的覆盖能力和系统性价比, 实现全球立体覆盖的目标。本文概述了星地融合移动通信发展背景与趋势, 分析了 6G 星地融合移动通信需求与技术挑战, 针对无线传输效率低、网络架构设计复杂、移动性管理难、网络质量保障难等系列问题, 从无线传输、网络架构、资源管控和移动性管理、天基计算、频谱共享等多个方面开展 6G 星地融合移动通信关键技术研究。针对各关键技术, 首先分析发展现状, 然后提出创新技术, 并开展相应的性能评估验证其有效性。

关键词 6G, 星地融合移动通信, 多波束协同, 弹性可重构网络架构, 频谱共享, 移动性管理, 天基计算

1 星地融合移动通信发展背景与趋势

卫星通信的发展始于半个多世纪之前, 苏联于 1957 年发射了斯普特尼克 I 号 (Sputnik I) 卫星, 这是人类历史上第 1 颗人造卫星, 其在轨运行时间长达 3 个月, 为后续卫星通信的发展奠定了基础。

引用格式: 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 1177–1214, doi: 10.1360/SSI-2023-0348
Chen S Z, Sun S H, Kang S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 1177–1214, doi: 10.1360/SSI-2023-0348

迄今为止, 卫星通信的发展已经经历了模拟卫星通信(20世纪60年代~70年代)、数字卫星通信(20世纪80年代~90年代)、窄带大容量卫星通信(20世纪90年代~2000年)、高通量卫星通信(2000年~2010年)、宽带低轨卫星互联网(2010年以后)等多个历史阶段, 在建设高速泛在、天地一体、智能敏捷的综合性数字信息基础设施方面发挥着越来越重要的作用^[1,2].

和卫星通信相比, 地面移动通信具有组网灵活、服务多样、规模经济等优势, 现已经历了五代发展, 正在向第六代移动通信标准(the sixth generation mobile communication, 6G)演进^[3]. 其中, 第五代移动通信系统(the fifth generation mobile communication, 5G)把万物互联和绿色通信作为重要目标, 采用了超大规模天线等关键技术, 支持增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)、高可靠低延时的通信(ultra reliability low latency communication, uRLLC)和大规模机器通信(massive machine type communication, mMTC)三大应用场景. 在5G三大应用场景的基础上, 6G提出了沉浸式通信、超大规模连接、超高可靠低时延通信、泛在连接、通信与人工智能(artificial intelligence, AI)、通信感知一体化等六大场景^[4], 并将支持各类先进的无线技术和网络功能, 进一步扩展网络融合和技术融合的广度和深度, 实现全球、全域、全时网络覆盖.

卫星通信和地面移动通信的融合(简称“星地融合移动通信”或“星地融合”)是移动通信发展的重要趋势. 早在20世纪80年代末~90年代初, 美国、欧洲和日本等国家或地区就已针对星地融合网络开展研究, 典型的卫星通信系统如Iridium, TerraStar和SkyTerra均不同程度地借鉴了地面第二代移动通信标准(the second generation mobile communication, 2G)、第三代移动通信标准(the third generation mobile communication, 3G)和第四代移动通信标准(the fourth generation mobile communication, 4G)的技术体制标准. 21世纪初, 我国开始布局研究星地融合网络, 提出建设天地融合的一体化网络^[5], 并提倡“5G体制兼容、6G系统融合”的技术发展路线^[1,6]. 国内外标准化组织于2016年开始从事卫星通信与地面移动通信5G/6G融合的技术标准研究工作, 其中第三代合作伙伴项目(3rd generation partnership project, 3GPP)于2022年6月Release 17(R17)完成了5G非地面网络(non-terrestrial network, NTN)的第一个标准版本, 根据卫星通信的需求和技术特点, 设计手机、物联网(Internet of Things, IoT)终端等多种终端类型与卫星进行通信; 随后, 3GPP在R18进一步开展覆盖增强、移动性增强与业务连续性增强等新特性的标准推动工作. 国际电信联盟无线电部(international telecommunication union radio communication sector, ITU-R)于2022年9月完成了IMT-2020卫星通信愿景与需求制定^[7], 2023年12月完成了技术提案的征集, 目前进入技术评估阶段; 2023年6月, ITU-R WP4B进一步通过了面向6G的IMT卫星未来技术趋势立项^[8]. 2023年, 中国通信标准化协会(China Communications Standards Association, CCSA)的无线通信委员会和航天通信委员会成立了多项标准立项, 涉及基于5G的卫星互联网、支持卫星接入的5G核心网、基于NTN的物联网窄带接入(narrow band Internet of Things, NB-IoT)等, 从技术要求、设备规范、测试规范等多个层面推进5G卫星通信标准制定. 此外, 国内IMT-2030(6G)推进组成立了天地一体化任务组, 研究面向6G的星地融合需求、网络架构和无线传输技术.

近两年来, 美国涌现出AST Space Mobile, OmniSpace, Lynk等一批新兴卫星创业公司, 专注于手机直连卫星网络领域, 引发了新一轮卫星通信和地面移动通信融合创新. 面向手机直连的星地融合移动通信已成为全球卫星互联网领域发展焦点, 国际通信运营商通过与设备商合作的方式, 正在加快布局手机直连卫星场景应用. 苹果公司(Apple)基于Globalstar卫星, 于2022年实现双向短消息发送功能; AST Space Mobile联合AT&T, 于2023年4月完成了天基双向通话; 中国信息通信科技集团(中国信科)2023年6月发布基于5G NTN透明转发的高低轨一体化系统及星地融合宽带业务验证; 华为公司2023年8月发布基于高轨卫星实现双向短消息和语音功能的智能手机Mate 60 Pro; 中国移动

2023 年 9 月完成 NR NTN 低轨卫星模拟验证, 支持手机直连卫星宽带业务; 星链 (Starlink) 2024 年 1 月通过美国 T-mobile 网络发送和接收了短信。手机直连卫星的快速发展和崛起, 将成为未来卫星互联网的主要商业形态之一, 并对未来信息通信产业格局产生重大影响。

总结来看, 在星地融合大趋势下, 面向星地融合的手机直连卫星通信作为电信行业新的消费增长点, 爆发大量用户需求和使用场景, 卫星通信和地面移动通信的标准化组织、运营商、设备商正在积极开展合作, 加速整合卫星通信和地面移动通信的最佳实践, 寻求在多业务场景下提供更好的通信服务, 满足全时全域泛在终端的多样化大容量服务需求, 实现卫星通信网络和地面移动通信网络的系统级深层次融合。

2 星地融合移动通信需求与技术挑战

2.1 典型应用场景

星地融合移动通信在个人移动通信、交通运输、航空航天、电信中继、物联网、航天、应急救灾等领域都有广泛的应用。

(1) 个人移动通信场景。手机是目前最为常用的个人通信工具, 在有地面移动通信网络信号覆盖的情况下, 可以通过地面移动通信网络接入; 在没有地面移动通信网络信号的地方、或者因不可抗力导致地面移动通信网络失效时, 手机通过卫星通信接入到网络, 实现真正意义上的随时随地接入。目前的个人移动终端主要通过“双模”手机的方式, 通过不同通信体制分别实现卫星通信接入和地面移动通信接入。未来将采用同一套通信体制和芯片实现真正意义上的星地泛在融合接入与移动通信服务。

(2) 交通运输场景。无论是行驶在陆地上的车辆和高铁, 还是江河湖泊上的船只, 都有专业通信、数据回传或向乘客提供互联网接入的需求, 仅靠地面移动通信难以保障服务的连续性。当有地面移动通信网络覆盖时, 可以通过地面移动通信网络接入; 当进入到沙漠、无人区、大江湖泊中心时, 可以通过卫星通信接入。此外, 终端高机动性还会带来频繁的越区切换问题, 而卫星通信具有天然的广域服务能力, 卫星通信和地面移动通信基础设施融合可以在陆空协同、立体交通运输中发挥重要的作用。

(3) 航空航海场景。在航空和航海场景中, 也存在 3 种通信需求: 专业通信、数据回传或向乘客提供互联网接入。当飞机停在机场、舰船泊在码头时, 飞机和舰船可以通过地面移动通信实现专业通信、数据回传; 而在航行的过程中, 则需要通过卫星通信实现专业通信、数据回传、或向乘客提供网络接入服务。其中, 数据回传和向乘客提供网络接入服务是未来星地融合移动通信的重要业务。

(4) 电信中继场景。星地融合移动通信可以以较低成本为边远地区、海岛、海上平台、移动平台提供基站回传业务、宽带接入业务和卫星中继业务, 卫星回传不仅具有容灾抗毁能力, 星地空间传输还提供了比光纤更低的传输时延, 未来在金融服务、能源调度等垂直行业有着广阔的应用前景。

(5) 智能物联网场景。星地融合移动通信可为垂直行业物联网终端提供窄带大容量传感、控制、监控数据接入传输业务, 可以应用在电网监控检修、环境监测、无人平台控制、海上浮标信息收集、远洋物流、农作物监控等服务以及相应的应急处理。宽窄带融合物联接入、低复杂度非正交多址大容量接入, 与星载边缘计算平台结合是未来的发展趋势。

(6) 导航与航天场景。2021 年美国在太空政策 7 号令中强调了导航战的重要性, 明确卫星通信可以提供导航信息传输的通道, 这对于军事和国防应用至关重要。星地融合移动通信未来可在北斗设施受到干扰时提供同等级别导航定位服务, 此外还可以支撑各类商业航天相关信息传输业务, 对 1000 km

以下的商业航天器提供高速数传业务、IP 测控业务.

(7) 应急救灾场景. 在战争或者灾害导致地面设施瘫痪的情况下, 利用卫星互联网的宽带回传和用户接入能力, 可快速整合星地通信网络资源, 恢复灾区的基本通信保障. 此外, 在日常的应急通信中, 在没有地面应急通信网络或地面移动通信网络覆盖时, 也可以通过卫星通信来实现应急通信.

2.2 关键技术指标

基于用户与业务的需要, 以及卫星通信技术、芯片/元器件和组件发展水平, 结合典型的卫星星座、频率资源和载荷配置, 以及相应的实际工程经验, 本文系统地分析了星地融合移动通信中卫星通信需要满足的关键技术指标^[9], 如图 1 所示.

(1) 峰值速率. 未来星地融合移动通信的卫星应具有部分或全部基站功能, 每颗卫星支持数十至数百个波束. 对于为低增益天线的终端(如手机、物联网终端)提供接入服务的波束来说, 单波束下行峰值速率可设在 10~50 Mbps 之间; 对于为高增益天线的终端(如 VSAT 终端)提供接入服务的波束来说, 单波束下行峰值速率可设在 50~1000 Mbps 之间; 每颗卫星的容量可设定在 10~100 Gbps 之间.

(2) 空口时延. 空口时延包括传播时延、处理时延、跳波束调度时延和重传引入的时延, 它与“接入网 – 核心网”间的时延、核心网内时延之和应满足所支持的通信业务的包时延预算的要求. 星上处理和透明转发的低地球轨道(low earth orbit, LEO)卫星通信系统的传播时延分别在 1.1~11 ms 和 2.3~23 ms 之间; 地球静止轨道(geostationary orbit, GEO)卫星的传播时延则超过百毫秒. 单侧处理时延一般在 1~2 ms 之间. 跳波束调度时延的最大值与平均值分别是实际回跳周期的一倍和一半, 跳波束周期一般设在 80 ms 以内, 并应根据业务的包时延预算和其他时延情况设置实际回跳周期. 重传引入的时延由重传次数、传播时延、处理时延和跳波束调度时延等因素共同决定, 当传播时延或跳波束调度时延比较大时, 或在传输实时交互业务时, 应尽量减少重传次数或避免使用重传机制.

(3) 多普勒(Doppler)频移. 多普勒频移由信号频率、卫星与终端/信关站之间的相对径向速度决定. 在通常的低轨卫星通信系统中, 对于频段为 L/S, C/X, Ku/Ka 的系统来说, 多普勒频移分别达到数十至数百千赫兹, 而且多普勒频移的变化率也比较大. 因此, 多普勒频移对同步、随机接入、信号检测等有明显的影响, 星地融合移动通信系统设计需要能够对抗大多普勒频移特性.

(4) 终端移动速度. 卫星通信系统支撑的典型终端类型为手持终端、固定终端、车载终端、船载终端和机载终端等. 对于机载终端, 其移动速度可高达 1000 km/h, 会影响对星、同步和移动管理的方案设计, 对波束宽度和波控也有一定的约束.

(5) 频谱效率. 卫星通信系统因功率受限, 功率回退不宜太多, 因此, 线性度、调制阶数(特别是用户链路)和频谱效率不会太高. 一般而言, 对于低增益天线的终端来说, 用户链路调制阶数在 4 以内; 对于高增益天线的终端来说, 用户链路调制阶数在 5 或者 6 以内, 最高频谱效率应大于 3 bit/s/Hz.

(6) 频段与频率复用. 地面移动通信系统一般使用 6 GHz 以下低频段, 大部分采用同频复用. 而 L, S, C, X, K, Ku, Ka, 甚至是 Q/V 频段都已被用于卫星通信, 通常基于波束空分及多色复用频分来组网. 在星地融合移动通信中, 不仅需要支持星内和星间的频率复用, 也需要支持星地频率复用, 频率复用因子不超过 4. 对于宽带卫星通信系统来说, 每颗卫星的波束数与频点数之比一般在 2~8 之间, 这也是频率复用的一个重要指标, 会从多个方面影响卫星通信系统的设计.

(7) 链路可用度. 卫星通信无线链路的可用性会受到电离层、大气、云、雨等无线环境的影响. 在计算链路预算时, 需要根据使用的频率考虑上述因素的影响. 一般而言, 在没有异地链路备份机制的条件下, 用户链路的可用度应不低于 98%, 馈电链路的可用度应不低于 99%. 在实际中, 可以从用户群、频率、覆盖区域和代价等方面综合考虑链路的可用度指标, 并与用户签订适合的服务水平协议.

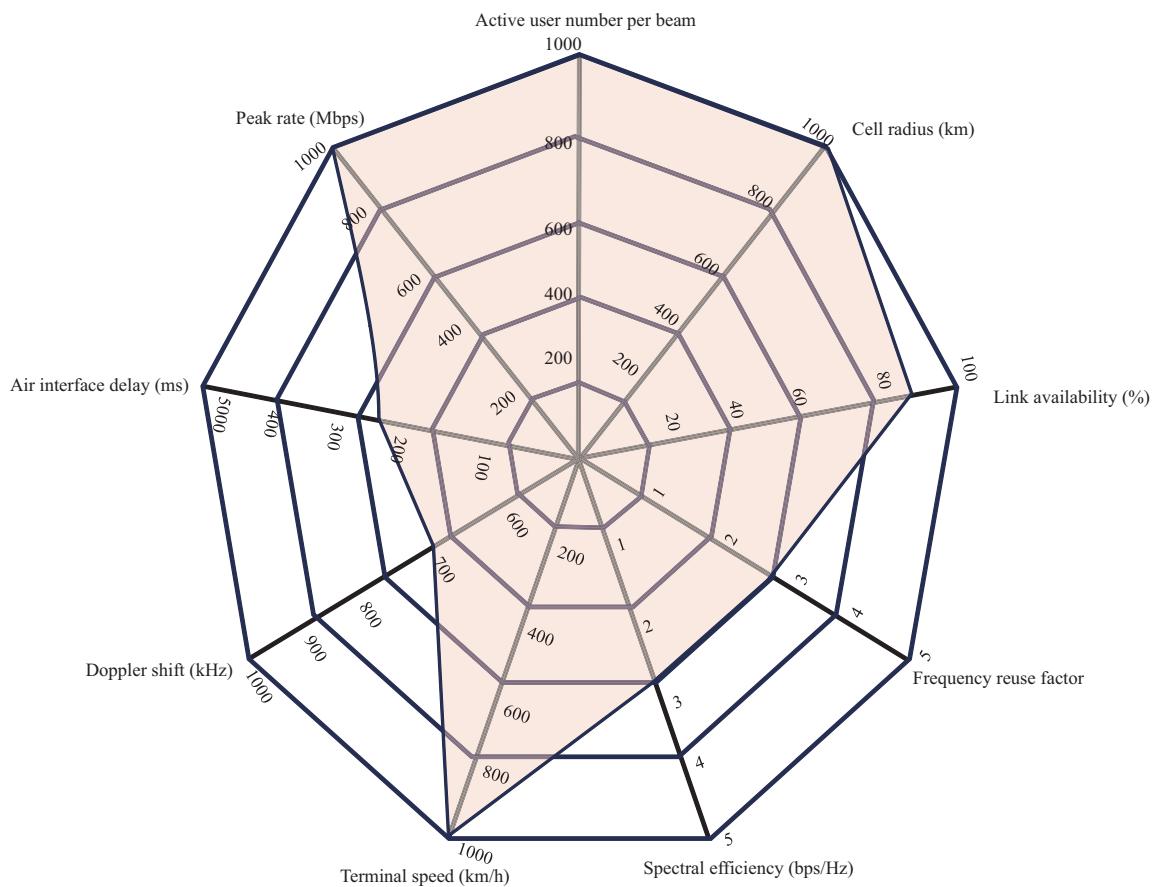


图1 (网络版彩图) 星地融合移动通信中卫星通信的关键技术指标

Figure 1 (Color online) Key performance indicators of satellite communication in the integrated satellite-terrestrial mobile communication

(8) 小区半径. 卫星通信系统的单波束对应的小区半径从数十公里到上千公里, 其覆盖范围可为数万平方公里, 比地面移动通信系统小区覆盖范围高出多个数量级.

(9) 单波束服务的用户数. 虽然城市区域人口稠密, 但是真正使用卫星通信系统的用户还是少数. 对于无地面移动通信网络覆盖或者覆盖不足的区域, 主要由卫星通信提供服务, 例如海洋、森林、沙漠等地广人稀的偏远区域, 用户密度也不会太大. 参照典型场景中用户分布情况和已有卫星通信系统的设计目标, 未来的卫星通信系统的每颗卫星和每个波束支持的激活用户数将分别超过 5000 和 500 个.

2.3 技术挑战

星地融合移动通信面临着星地空口体制不统一、网络架构不灵活、资源管控效率低、天基计算效能差、星地频谱共用难等诸多挑战.

(1) 同一通信体制对多种迥异部署环境的适应性. 不同于地面移动通信的典型多径衰落信道, 卫星通信信道以强莱斯 (Ricean) 信道为主, 而且两者在多普勒频移、信道衰减、传播时延、时间漂移等方面有显著的差异, 同时, 其射频通道 (含功放) 的线性度以及信号强度变化量也完全不同. 这些差异对统一空口设计带来巨大挑战, 直接影响到波形、同步、随机接入、自动重传请求 (hybrid automatic request, HARQ)、波束协同、多星链路协同等关键技术方案的设计, 也需要技术创新来优化相控阵天

线性能和功放效率.

(2) 网络架构对网络复杂环境的适应性. 星地融合网络是一个大时空尺度、大动态、多层次异构网络, 以业务/用户为中心, 需要灵活地适应各种动态业务以及空间网络环境, 而且星上载荷资源受限, 这不仅影响到网络的逻辑架构, 也影响到网络功能实现与部署架构, 同时还影响与架构相关的资源管控和移动性管理.

(3) 天基计算的效能. 在星地融合网络中, 天基计算能力与功能对于卫星通信性能与质量来说至关重要, 仅仅提升单个节点中载荷的计算能力难以满足实际应用需要, 更需要在星间与星地组网、星地资源共享、资源灵活调度的基础上执行星间与星地协同计算. 由于载荷算网资源优先, 而空间网络具有高动态、长距离特性, 如何预测通信业务量、如何实现云边协同、如何适应多业务特征将是提高天基计算效能的关键.

(4) 频谱资源紧缺. 由于频率资源严重紧缺, 使得 6G 星地融合异构场景, 存在大量的系统间频率共用的情况, 这会带来星地异构系统间与系统内的复杂严重干扰问题, 影响系统性能. 因此, 频谱共享策略与技术、以及相应的干扰管理技术将是星地融合移动通信的关键技术.

针对上述挑战, 本文重点研究星地融合移动通信中相关的无线传输技术、星地融合网络架构、资源管控和移动性管理技术、天基计算技术、频率分配与频谱共享技术.

3 星地融合移动通信关键技术

3.1 无线传输

未来 6G 星地融合移动通信传输距离长、时延大、不同链路时延差异显著, 卫星高速运动造成信道快速时变, 信道环境极其复杂, 传输特性差异巨大. 如何从波形、同步、接入、传输以及空间复用等角度出发, 利用时间、频率、空间、能量等不同维度资源提升无线传输效能面临巨大挑战.

3.1.1 发展现状

星地链路面临长延时和多普勒频偏影响, 同时信道动态变化, 对星地高效无线传输提出了挑战^[10~12]. 本文针对无线传输的典型技术进行分析, 包括星地融合波形、星地链路同步与接入、HARQ 反馈机制、多星多波束传输等.

(1) 星地融合波形. 地面移动通信自 4G 开始采用正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术, 把 OFDM 作为下行链路波形, 把离散傅里叶扩展正交频分复用 (discrete Fourier transform-spread OFDM, DFT-s-OFDM) 作为上行链路波形. 从文献 [13,14] 的性能分析看, 对于卫星通信场景来说, 这两种波形在时频偏和峰均比 (peak-to-average power ratio, PAPR) 等方面还有待改进. 依据文献 [15] 分析, 正交时频空调制 (orthogonal time frequency space, OTFS) 波形能够对抗大的多普勒频移, 在星地融合移动通信系统中具有潜在应用价值.

近年来, 飞速发展的 AI 技术被大量应用于星地融合移动通信波形设计. 例如, 文献 [16] 提出基于多重分形谱和深度学习的信号调制方式识别方法; 文献 [17] 针对 Q/V 波段卫星通信提出基于在线随机回归森林算法的信噪比时间序列预测方法; 文献 [18] 针对卫星信道中信号失真问题, 提出了两个 AI 框架, 分别用于已知预失真操作条件及未知预失真操作条件下的信号失真预补偿.

(2) 星地链路同步与接入. 与地面移动通信相比, 以 LEO 为代表的卫星具有运动速度快、距离远的特性, 所以, 随机接入过程受时间延迟和载波频率偏移的影响较大, 需不断地进行时频偏跟踪, 以保证时频同步的精度. 在星地融合场景下, 低轨卫星与用户终端间具有更大的相对移动速度和更高的载

波频率, 多普勒频偏远远大于地面移动通信场景, 同时由于其具有时变性, 对时频同步过程造成严重影响.

四步或两步随机接入机制在地面移动通信系统中得到了广泛应用, 但由于卫星通信的接入过程时延更长、接入用户量更多, 现有用于地面移动通信的四步或两步随机接入机制容易引起拥塞. 为此, 文献 [19] 分析了不同轨道高度下的多普勒频移和多普勒频移变化率; 文献 [20] 分析了透传模式下的高中低轨卫星和高空平台 (high-altitude platform station, HAPS) 的典型传输时延; 文献 [21~23] 从地面 5G 通信向手机直连卫星演进角度, 对时频同步问题进行分析, 重点是对 5G 系统中已有的同步信号检测方案进行改进; 文献 [24] 提出了基于多个短序列灵活级联的前导结构, 以及基于时频预补偿的两步随机接入流程.

(3) HARQ 反馈机制. HARQ 是一种将前向纠错编码和自动重传相结合的差错控制技术, 解决无线链路的可靠传输问题, 广泛应用于现有地面移动通信系统中. 在星地融合移动通信系统中, 卫星通信的传输时延比较长, 而现有的移动通信 HARQ 机制的并行 HARQ 进程数量较少, 传输资源不能充分利用. 为此, 可以增加最大 HARQ 并发数量, 并根据星地距离调整实际的并发数, 以提升并行 HARQ 机制下卫星通信的吞吐量, 但这会对基带处理功能的实现不利: 需要更多的算力、存储空间和功耗, 既不利于终端基带芯片的实现, 也不利于基站 (特别是星载基站) 的实现. 对于卫星通信场景来说, 目前高并发的 HARQ 机制仅可在 LEO 卫星通信系统中实现, 随着卫星有效载荷能力的增加, 高并发的 HARQ 机制也有望在未来的中地球轨道 (middle earth orbit, MEO)、GEO 卫星通信系统中实现^[25].

(4) 多星多波束传输. 卫星通信星座基于多颗卫星组成, 每颗卫星上有数个至几百个波束. 对于每个波束的信号来说, 既会受到本星其他各波束信号的干扰, 也会受到其他卫星的各波束信号的干扰. 该干扰会随着卫星波束数量和卫星数量的增加而增大, 传统上采用频率复用的方式来降低上述干扰. 因此, 对于卫星波束数量和卫星数量较多的卫星通信系统来说, 需要使用更大的频率复用因子, 但这会导致频谱利用率降低, 甚至会因可用频率资源有限而只能降低信道带宽.

跳波束技术可在空间上隔离各个波束, 通过波束调度, 可以避免同频波束同时服务相邻波位的情况, 从而降低波束间干扰^[26], 为卫星资源的灵活分配和高效利用提供了实现基础^[27]. 基于星地智能动态协作单元的深度信息交互, 利用不同网络的信息进行集中式的资源分配及波束管理, 最大程度地降低星地干扰^[28].

以同步轨道多星协同传输为背景, 文献 [29~33] 考虑了测控误差和多径分量, 深入地研究了系统传输性能, 并结合多输入多输出信号处理技术, 设计一种面向用户的星地一体化大容量高效通信方案. 文献 [34~38] 分析了星地链路波束覆盖与动态多用户信息传输容量间的关系机理, 提出基于梯度思想的“凝视波束”形成算法, 有效应对突发业务.

可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 利用大量低成本被动相控反射阵元实现无线信号的空间调控, 是未来 6G 实现多波束信号处理的重要技术^[39,40]. AI 技术在星地融合网络多星多波束方面已经得到应用. 针对卫星通信中的信道分配、功率分配和跳波束问题, 文献 [39] 总结了有关使用深度强化学习解决以上问题的研究. 而文献 [40], 从低轨卫星通信信号特点出发, 探讨了信号捕获与跟踪技术的未来发展方向. 星地融合网络中卫星移动会触发大量切换请求, 导致网络资源竞争加剧、有限的星上资源无法满足切换请求等问题, 文献 [41] 将 AI 技术应用到切换处理流程中, 以降低切换的整体开销.

综上所述, 针对卫星通信与地面移动通信在无线链路距离、时延、传播特性、移动性等方面存在的差异性, 为了实现无感知无差异化的网络服务能力, 星地融合移动通信需要采用统一空口机制实现卫星通信与地面移动通信技术体制一体化.

3.1.2 星地统一无线空口设计

未来 6G 星地融合必然是陆海空的全系统融合, 而体制融合是系统融合的基础。星地统一无线空口设计, 便于用户使用同一终端设备接入星地融合系统, 节约用户成本。星地统一无线空口设计的核心是构建星地融合空口的技术参数集合, 通过灵活配置可变参数集以适应不同的场景。针对卫星信号传播具有大时延、大多普勒频偏、覆盖区域大的特点, 通过卫星接入的无线空口需要配置更大的子载波间隔、更密集的导频序列以抵抗大多普勒频偏, 使用扩展循环前缀来抵抗大的定时同步偏差, 使用更多 HARQ 进程数、更大的定时偏移、更长的监听时机和更长的定时器来抵抗卫星通信的大时延, 使用高频、大带宽以适应大小区的高容量传输需求。对于双工方式, 可支持 TDD, FDD 等多种双工模式, 支持半双工和全双工终端。星地融合系统采用统一的无线空口架构和灵活可配置的参数集^[12], 实现地面移动网络和卫星网络一体化设计, 网络资源统一管理和配置, 终端设备实现星地间随遇、按需接入。表 1 给出了未来 6G 星地融合无线空口主要参数示例, 星地融合统一空口可变参数集包括但不限于这些参数。

3.1.3 星地融合新波形

(1) 宽带新波形。OTFS 是一种新型调制技术, 适合于多普勒频移和时延较大的场景, 可作为星地融合宽带波形的一个备选项。但是, 现有的 OTFS 波形会降低频谱效率, 且信号检测复杂。基于双模索引调制 (dual-mode index modulation, DM-IM) 的 OTFS 波形设计方法^[42], 如图 2(a) 所示, 可以有效地提升上述场景下的频谱效率。如图 2(b) 所示, 相较 OFDM、DM-OFDM-CPA^[43]、传统 OTFS 以及 OTFS-IM 等方案, OTFS-DM-IM 的性能优势更加明显。同时, 还设计了改进型的对数似然比 (log-likelihood ratio, LLR) 算法, 可以很好地降低检测复杂度, 使设计的波形更具有实用性。

此外, 针对 OTFS 波形如何与非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 结合的问题, 基于功率域 OTFS-NOMA 方案 (PD-OTFS-NOMA) 将稀疏码分多址 (sparse code multiple access, SCMA) 技术融合其中, 使得时频域上低速用户以非正交的 SCMA 方式接入正交子载波, 组合为双域非正交多址 (2D-OTFS-NOMA) 方案, 进一步提高系统整体的接入用户数, 仿真性能如图 3 所示。

(2) 窄带新波形。针对星地融合物联网的窄带波形方面, 基于分组的 LoRa-CSS 波形技术^[44]可以适应差异化的信道特征, 根据干扰和多普勒频偏情况适配不同的频谱效率, 最大频谱效率可达 0.5 bps/Hz, 如表 2 所示。同时, 基于索引调制和 Turbo 码的 LoRa 调制方法, 利用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 振幅谱, 可以提高通信距离。此外, 基于时分复用思想, 时域复用 TDM-LoRa^[45] 和 IQTDM-LoRa^[46] 波形调制技术, 在单位时间内成功传递的比特数分别为传统 LoRa 调制技术的 2 倍和 4 倍。

3.1.4 星地链路同步与接入

当通信系统同时存在多普勒频偏和终端晶振频偏时, 已有 OFDM 系统频偏估计算法得到的是两者的叠加值, 现有算法无法将其分离。在存在终端晶振频偏的情况下, 如果直接使用频偏估计算法得到的叠加值进行上行预补偿, 将会额外引入频偏, 影响卫星通信系统的性能。

基于信关站接收信号的终端晶振频偏估计算法在传统方案 (SOD 算法^[47]、PSS 共轭相关算法^[48]) 的基础上进一步有效地降低了终端晶振频偏估计的均方根误差, 性能不受环境温度影响。为了应对星地融合场景下的多普勒频偏影响, 基于追踪参考信号 (tracking reference signal, TRS) 的频率跟踪算法 (简称 “TRS-Corr”), 进一步利用最小二乘 (least square, LS) 算法进行优化, 提出 LS 和加权 LS (简称 “WEIGHTED-LS”) 跟踪算法^[49], 有效提升了频率跟踪性能, 如图 4(a) 所示。图 4(b) 显示了衰落信道

表 1 6G 星地融合无线空口可变参数集的主要参数列表^[1,2]
Table 1 Variable parameters of the air-interface of 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication [1,2]

Parameters	Reference range	Remarks
Transmission bandwidth	180 kHz~1 GHz	Adapt to various requirements such as Internet of Things, broadband data transmission.
Waveform	DFT-s-OFDM, CP-OFDM	Satellite communications tend to use single-carrier waveforms with low PAPR, while terrestrial communication can use multi-carrier waveforms.
Modulation	$\mu/2$ -BPSK, BPSK, QPSK, 8PSK, and QAM, APSK, etc. $m = 4, 6, 8; n = 4, 5, 6, 7, 8$.	Adapts to most modulation modes for terrestrial mobile and satellite communications.
Encoding	Convolution code, turbo code, polar code, and LDPC, etc.	Extensible to support other types of encodings.
Subcarrier spacing	$2^\mu \times 15$ kHz, $\mu = 0, 1, \dots, 4$	Supports a wide range of subcarrier spacing.
Pilot format	Support a variety of pilot types such as continuous pilot and comb-type pilot.	Configure the pilot type and pilot density as needed.
HARQ configuration	The number of HARQ processes can be flexibly configured, and HARQ feedback can be disabled.	Supports application scenarios with different latency ranges.
Multiple access	OFDMA, PDMA, etc.	Select different multiple access modes according to different scenarios.
Timing offset	Support timing offset of terrestrial mobile communications and satellite communications of different orbital altitudes.	Different timing offsets are supported according to different application scenarios.
Control channel format	Dedicated control channel or dynamic control channel.	Flexible selection or configuration according to different scenarios.
Random access configuration	Random access process: normal access, extremely simplified random access.	Select access based on service requirements and application scenarios.
Mobility management	Supports horizontal handover, vertical handover, prediction-based handover, seamless satellite-terrestrial handover.	Adaptive switching is performed based on the scenario and system requirements.

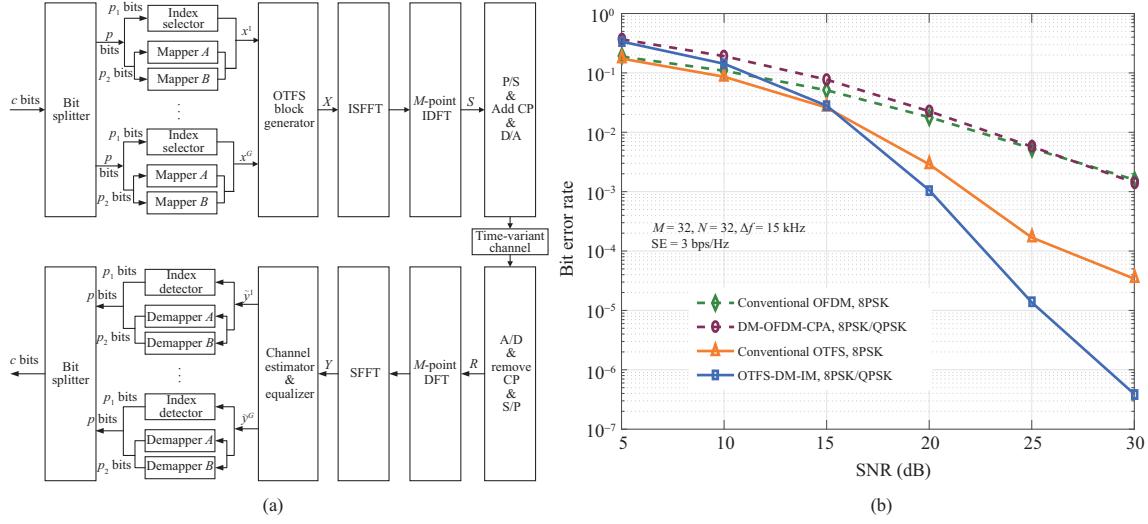


图 2 (网络版彩图) OTFS-DM-IM. (a) 系统框图; (b) 性能对比

Figure 2 (Color online) OTFS-DM-IM. (a) System diagram; (b) performance comparison

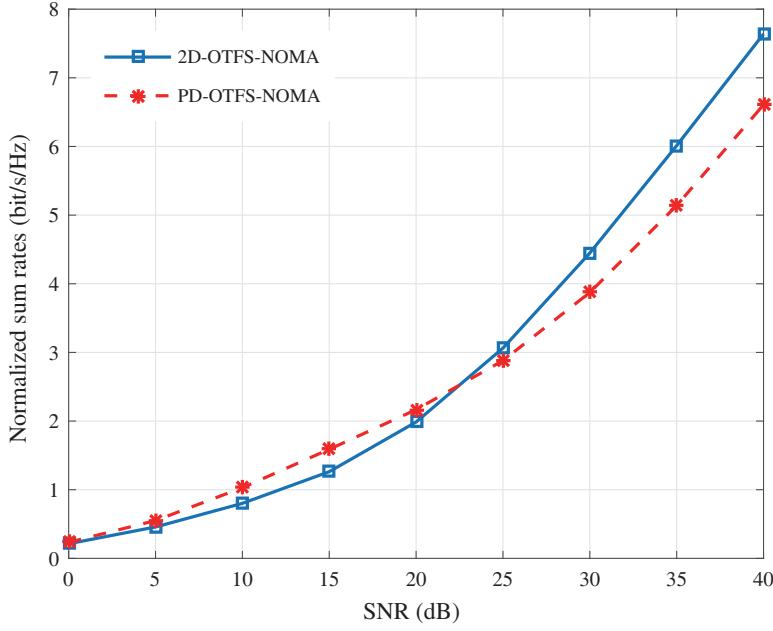


图 3 (网络版彩图) OTFS-NOMA 性能对比

Figure 3 (Color online) Performance of OTFS-NOMA

温度为 -10°C 的情况下终端发送信号经不同预补偿方案后到达卫星侧的载波频率性能对比。若直接采用多普勒频偏和晶振频偏的叠加值预补偿，则信号到达卫星时的载波频率反而比不补偿偏离标称载波频率更远。经过所提方案预补偿后，信号到达卫星时的载波频率近似于标称载波频率，当信噪比大于 -4 dB 时，卫星接收信号载波频率与标称载波频率的线条几乎重合。

传统地面移动通信的基于竞争随机接入的冲突检测是在随机接入流程的第 4 步进行的，由于卫星场景传输时延大，这样导致接入时延增大，本文作者所在课题项目组（以下简称“项目组”）提出一种

表 2 LoRa-CSS 波形的频谱效率^[44]
Table 2 Spectrum efficiency of LoRa-CSS waveform^[44]

Group No.	Spectrum efficiency (bps/Hz)	SNR loss (dB)
1	0.055	0
2	0.094	3
4	0.156	6
8	0.250	9
16	0.375	12
32	0.500	15

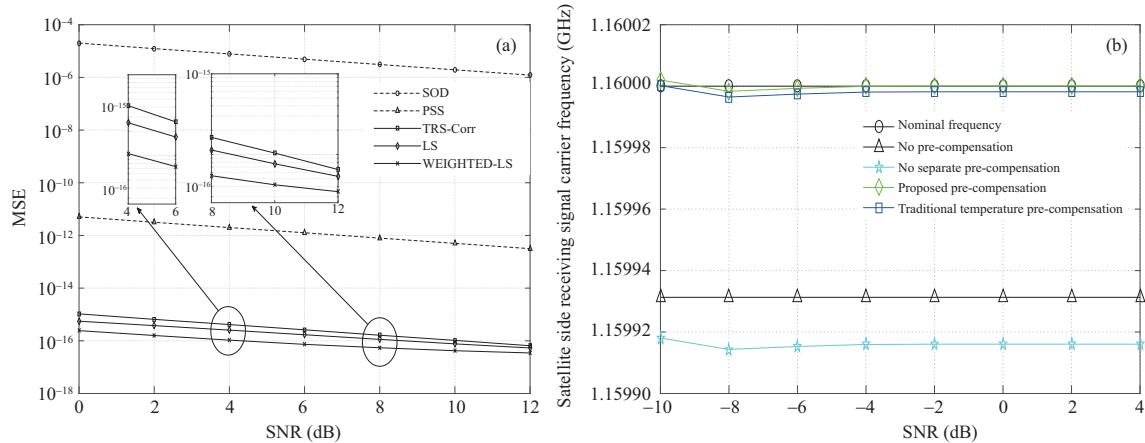


图 4 (网络版彩图) 频偏估计性能. (a) 多普勒频偏估计; (b) 卫星侧接收信号载波频率

Figure 4 (Color online) Performance of frequency shift estimation. (a) Doppler frequency shift; (b) carrier frequency from satellite side

基于标签的低轨卫星冲突检测算法, 不利用前导序列的部分作为冲突检测标识, 额外为每一个前导子序列叠加一个标签序列, 在接收端利用本地标签序列进行互相关运算即可得到功率时延谱, 基站接收到前导码后即可检测到接入冲突. 冲突终端停止随机接入流程并等待一段时间后, 再次发起随机接入.

3.1.5 HARQ 进程增强

HARQ 传输进程数目需要与传输时延相匹配才能充分利用物理信道的传输能力. 地面移动通信系统采用 16 个独立 HARQ 进程处理不同的传输数据包, 无法满足低轨卫星通信实时传输需求, 大量数据包需要在发送端排队等待 HARQ 进程来传输数据, 造成时间资源的浪费. 在再生处理低轨卫星场景下, 1200 km 轨道低轨卫星的最大往返时延高达 21 ms, 物理层处理数据时延约为 4 ms, 总时间达到 25 ms. 在理想情况下, 数据传输占满通信信道, 则所需最小进程数为 25. 当 HARQ 进程数目小于 23 时, 造成卫星通信信道处于空闲状态, 导致资源浪费.

对低轨卫星通信的 HARQ 进程增强方案进行了仿真评估, 一方面验证了 HARQ 进程数为 50 相对于 HARQ 进程数为 30, 16 的性能比较, 吞吐量提升了 1.2 倍和 3 倍; 另一方面验证了无 HARQ 反馈情况下, 通过时隙聚合能够提升传输可靠性, 其中 8 时隙聚合相比单时隙带来 9 dB 的性能增益, 如图 5 所示. 针对低轨卫星语音业务特点, 自适应时隙聚合 HARQ 方案可提高数据传输可靠性.

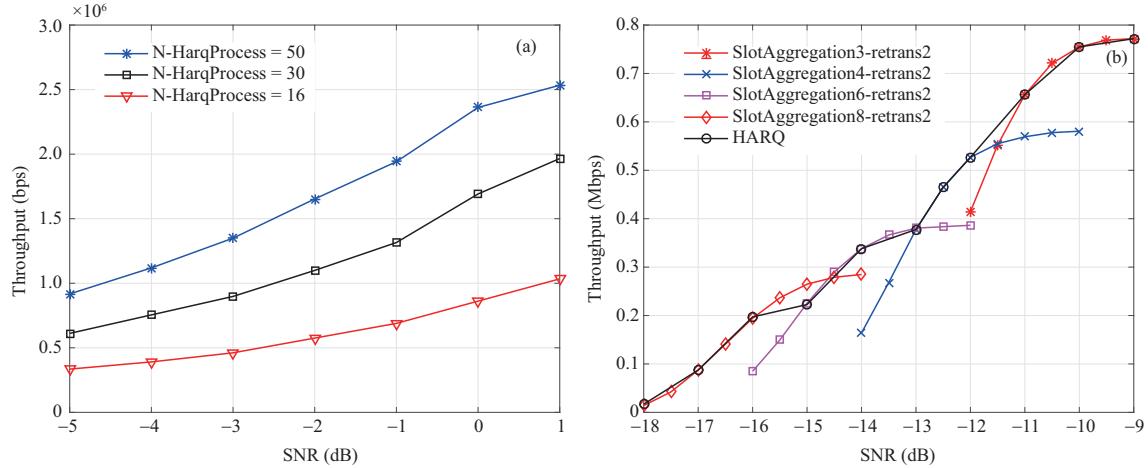


图 5 (网络版彩图) HARQ 优化性能. (a) 低轨卫星 HARQ 参数优化; (b) HARQ 自适应时隙聚合传输

Figure 5 (Color online) Performance of HARQ optimization. (a) HARQ parameter optimization; (b) HARQ adaptive slot aggregation transmission

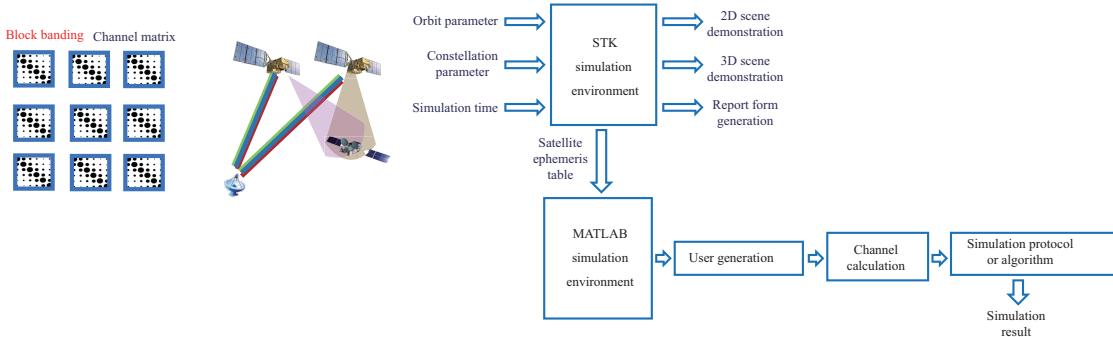


图 6 (网络版彩图) 多星多波束信道特性和多星多波束信道仿真平台. (a) 信道特性; (b) 仿真平台

Figure 6 (Color online) Channel characteristics and channel simulation platform. (a) Channel characteristics; (b) simulation platform

3.1.6 多星多波束协同

多星多波束间的干扰问题可以通过协同传输技术来解决, 包括用户协作和基站协作的协同传输技术。通过分析表明, 多星多波束干扰具有分块带状结构特征, 如图 6 所示, 为了对多星多波束场景下的干扰情况以及系统性能进行分析, 需要建立基于单星和多星的跳波束系统场景和优化数学模型, 同时通过联合 STK 和 MATLAB 软件平台的优势构建多星多波束仿真平台, 支持基于星座的多星系统动态仿真。

多星多波束协同传输需要建立多星之间的精准定时同步。在透明转发模式下, 地面信关站可以根据卫星实时轨道信息和地面用户信息统一协调多波束的协作传输。在再生处理模式下, 需要在卫星星座中存在一个主卫星, 掌握整个卫星星座的实时信息和用户分布信息, 由主卫星统一处理之后再通过星间链路分发给各个辅卫星。在跳波束模式下, 卫星通信终端需要具备突发波束对准和时频同步能力, 能够基于信标信号或者载波信号实现快速波束调整。在联合信号处理模式下, 需要终端具备多波束指向能力, 可以同时生成多个独立指向的波束。

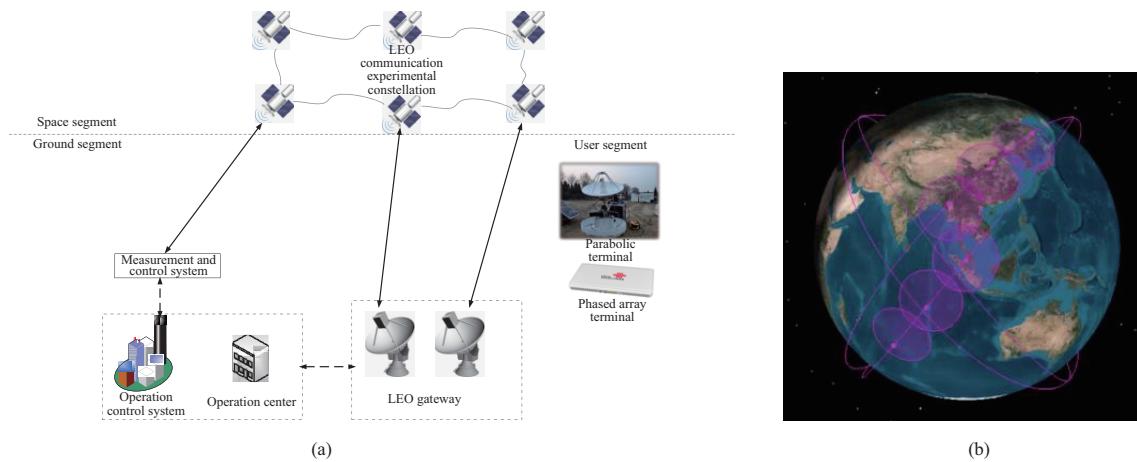


图 7 (网络版彩图) 低轨宽带多星多波束在轨测试系统. (a) 系统架构; (b) 星座轨道示意图

Figure 7 (Color online) Testing system for LEO multiple beams coordination. (a) System architecture; (b) constellation illustration

此外, 基于低轨星座对多星多波束协同传输进行了在轨测试, 如图 7 所示。测试系统主要由在轨低轨通信卫星、地面信关站及低轨宽带终端组成, 其中低轨卫星 3 颗, 每星 16 个用户波束、2 个馈电波束, 用户采用 Ka 频段。3 颗卫星工作于透明转发模式, 通过试验卫星构建用户终端与信关站之间的连续通信链路。在多星组网连续过境下, 开展链路通信性能和终端波束切换应用测试, 包括不同调制编码模式下的通信性能、前向信关站波束切换跟踪测试以及反向终端波束切换带来的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 与信号质量波动。

在轨测试验证了不同调制方式下的通信性能和多星组网连续过境下的切换性能, 为后续研究提供有力支撑。

3.2 星地融合网络架构

3.2.1 发展现状

全域覆盖是 6G 网络的一个重要特征。星地融合移动通信不仅需要在无线空口上融合, 还需要在网络架构上融合, 实现统一的用户管理、会话管理、移动性管理、资源管理与控制, 实现融合业务和统一的运营。

文献 [50] 提出了智能星地融合通信网络架构, 它结合了现有的地面移动通信网络架构和卫星通信网络架构, 全面地考虑了未来 6G 通信业务和应用场景的需求, 并把网络分成 3 层: 高轨卫星、中低轨卫星、地面节点。智能星地融合移动通信网络采用了软件定义网络 (software defined network, SDN) 和网络功能虚拟化 (network functions virtualization, NFV) 技术, 并按照表 3 部署网元与网络功能。

为了应对星地融合网络的大时空尺度和高动态拓扑特点, 星地融合网络体系架构^[51] 通过 SDN/NFV 和人工智能等技术, 感知星地融合网络资源状态, 通过人工智能进行学习和推理, 生成满足业务需求的网络部署策略。

为了高效地进行业务管理, 星地融合网络体系架构^[52] 强调业务管理功能的边缘化, 将业务管理下沉到网络的边缘, 通过对网络功能进行细粒度划分, 提高业务管理效率。由集中管控中心、区域管控中心和边缘接入控制组成了星地融合网络的管控体系。

表 3 网元与网络功能部署

Table 3 Network element and network function deployment

	GEO satellite	MEO/LEO satellite	Terrestrial network
Radio access network	Onboard radio access network unit	Onboard radio access network unit	Radio access network unit
Core network	Onboard lightweight core network (control plane and user plane)	Onboard lightweight core network (user plane)	Core network (control plane and user plane)
Gateway	None	None	Gateway
MEC	Onboard MEC	Onboard MEC	MEC
AI capability	Onboard AI	Onboard AI	AI

为了更好地适应业务需求, “结构可定义”的网络架构^[53]从底层到上层实现了全维度的灵活定义。该架构通过资源动态调度跨层实现了网络功能的定制, 满足业务的多样化和个性化需求。通过网络切片技术, 网络能够满足复杂业务场景, 同时实现了网络节点的统一管理和资源优化。

基于移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 的空天地一体化网络系统 (space-air-ground integrated network, SAGIN) 多维管理架构^[54]把 MEC 作为管理实体。该架构包含多层卫星网、空中自组网和地面异构网, 并在逻辑上被分为数据层、控制层和管理层。其中, 数据层的主要功能是为用户提供网络接入和数据传输服务, 数据层实体与子网络数据节点对应; 控制层的主要功能是信息采集、本地管理和策略转发, 控制层实体与子网络控制节点对应; 管理层的主要功能是内部资源的注册和查询、策略生成和网络系统对外的交互, 管理层管理的实体 (即管理节点) 的功能在 MEC 中实现。

以上研究分别从不同方面研究星地融合网络架构, 不仅包括了传统移动通信网络架构 (由接入网、核心网、网络与资源管控系统组成), 还考虑了空间传输网络架构及其特性。然而, 由于星地融合网络是一个分布式立体异构网络, 其资源受限、拓扑复杂多变, 并且需要以业务/用户为中心。因此, 综合考虑这些特点与要求可以发现, 星地融合网络在架构上应该能够支持分布式智能弹性重构、跨域智能管控和跨域统一网络功能编排的能力^[9, 55, 56]。

3.2.2 弹性可重构的星地融合网络架构

星地融合网络以卫星和地面网络基础设施为基础, 依靠星间链路组建全球覆盖连通的网络, 实现接入网到核心网之间流量及业务的传输。相比于传统地面移动通信网络, 星地融合网络具有动态性、大时空尺度、资源受限等特点。

卫星通信网络的空间尺度远超现有的地面移动通信网络, 其大空间尺度给卫星通信网络业务的实时性、灵活调度带来了巨大的挑战, 同时巨大的节点规模也给管控带来了较大开销。因此, 需要设计满足资源灵活调度、控制面可扩展的新型星地融合网络架构。

面向 6G 的星地融合网络将适配多种应用场景和业务, 因此星地融合网络架构应支持灵活组网、通过重构网络功能使星地融合网络具有弹性和适变能力, 最终构建立体网络^[9, 57~60]。为了实现网络的灵活组网能力和网络功能重构能力, 将构建网络原子化能力, 通过原子组件方式进行按需组合原子功能以构建满足不同应用场景需求的网络, 如图 8 所示。

弹性可重构的星地融合网络架构由数据转发平面、控制平面和管理平面组成。数据转发平面是由高轨卫星节点、中低轨卫星节点和地面网络协同构建, 共同组成一个高效的数据传输网络, 确保信息的高速、可靠传输。控制平面主要实现路由管控功能和网络控制面功能。网络控制功能在虚拟化技术

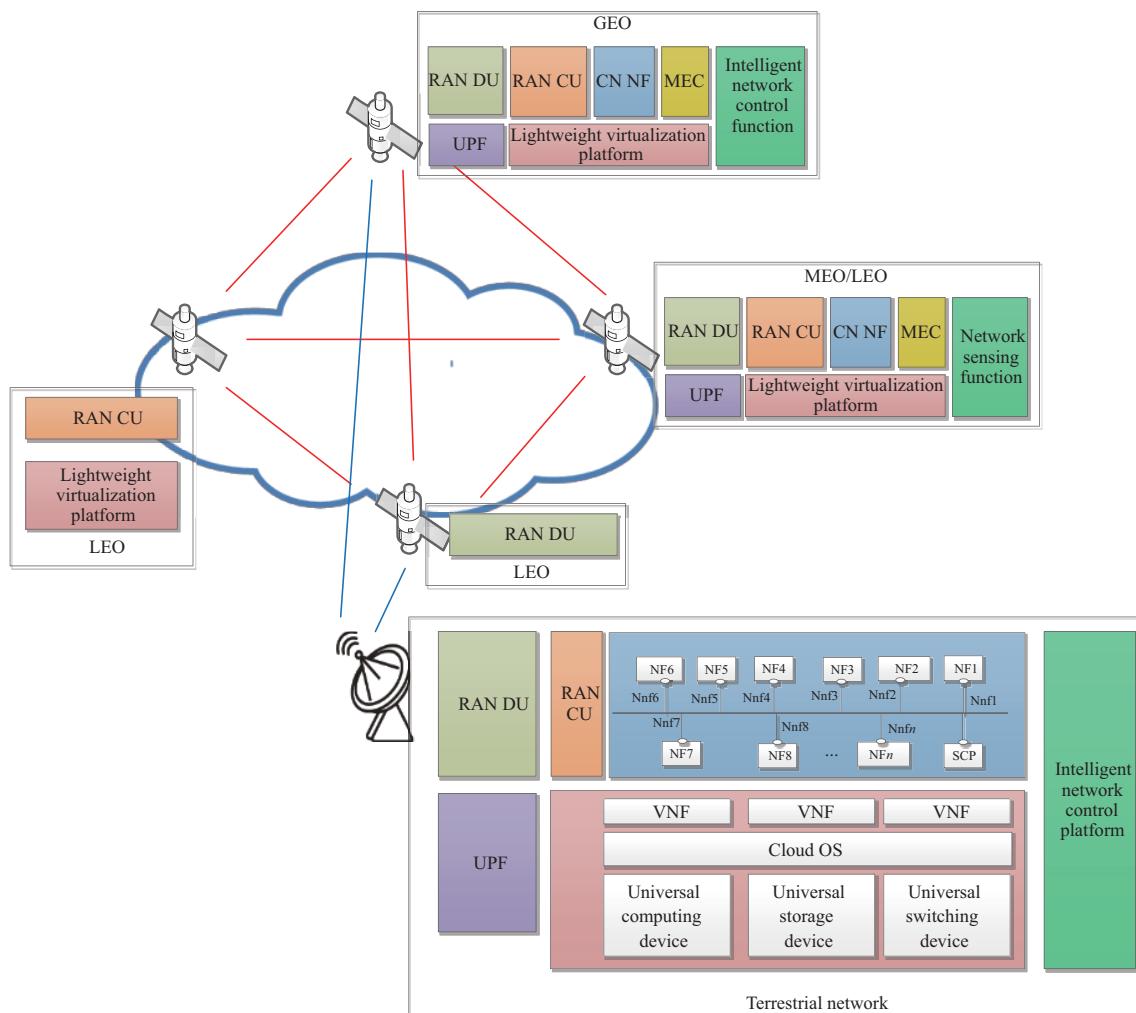


图 8 (网络版彩图) 星地融合移动通信网络架构

Figure 8 (Color online) Network architecture of the integrated satellite-terrestrial mobile communication

基础上结合云原生和服务化的理念,灵活部署各种网络功能,如用户接入、移动性追踪、会话建立与管理等,为用户带来流畅的服务体验。管理平面可以根据业务需求和网络资源的使用情况,动态进行路由规划和管理,并动态重构网络功能。通过引入智能化算法,实现了网络的自我管理和区域自治,使网络更加智能、高效。

在弹性可重构的星地融合网络架构中,网络功能可以根据业务需求动态调整和部署。例如,地面可以部署完整的移动通信系统,包括核心网和接入网;而卫星则可以根据自身能力和组网需求,灵活搭载部分网络功能,提供定制化的网络服务,从而大大增强了网络对各类场景的适应能力。面对星上资源的有限性,弹性可重构星地融合网络架构采用了轻量化的虚拟化技术和容器技术,在卫星上部署轻量级、高通用性的资源,实现了星上网络功能的快速重构。同时,对网络功能进行了轻量化设计和细粒度划分,确保它们能在卫星和地面节点之间高效部署,从而实现了网络功能的定制化和按需重构,为用户带来更加优质、个性化的网络服务体验。

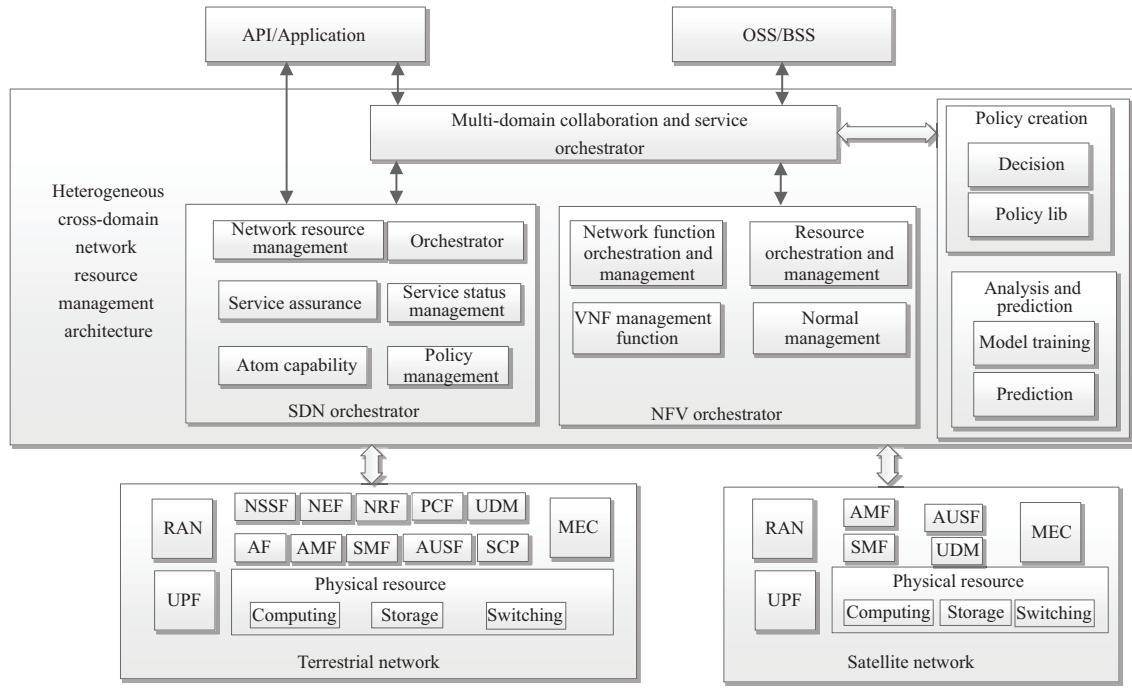


图 9 星地融合网络的智能网络管理与控制架构

Figure 9 Intelligent network management and control architecture for the integrated satellite-terrestrial mobile communication

星地融合网络是一个由高中低轨卫星和地面移动通信系统共同组成的具有大时空尺度特点的多层次异构网络, 每层通信系统的资源能力、处理能力等均不同。由于地面移动通信系统资源和处理能力不受限, 因此, 在部署星地融合移动通信系统时, 可以按需部署具备全功能的移动通信系统作为整个星地融合移动通信网络的核心, 通过智能网络管理与控制系统构建星地融合网络全局态势, 包括动态网络拓扑和网络资源状态, 统一管理地面移动通信系统和卫星通信系统。

由中低轨卫星组成卫星网络可以按需部署接入网功能, 也可以基于业务需求和卫星资源情况部署裁剪的、定制的核心网功能, 这样该卫星通信网络可以构成独立的网络, 也可以作为接入网络连接其他层/同层/地面核心网。当卫星上部署接入网络和核心网功能时, 既能减少信令时延, 又能实现业务星上处理, 还能减少对星间接口协议的影响, 使得星间链路可以采用统一的接口, 提供星间路由的灵活性。

GEO 卫星节点具有覆盖范围广、与地面站指向关系固定、数据处理能力相对强等特性, 可以作为星地融合网络的骨干节点, 与其管辖区内的中低轨卫星一起构成卫星通信网络中的单个自治域。进一步, 可以基于业务需求, 按需在中低轨卫星节点上部署网络功能, 以满足业务需求, 并提供差异化服务。

星地融合网络的智能网络管理与控制架构如图 9 所示。基于人工智能技术的管控平台利用多维数据模型, 通过多边协商和共享机制实现计算、数据和网络的融合, 通过分布式人工智能对星地融合网络进行态势感知和分析, 建立全局网络视图; 通过网络人工智能动态生成组网策略, 实现网络自治。

地面移动通信作为资源管理的集中点, 负责收集各层各域的资源与状态、以及业务特性与网络状态, 智能分析这些相关数据, 并根据各域网络特性按需分发训练好的 AI 用例、AI 模型等结果。地面通

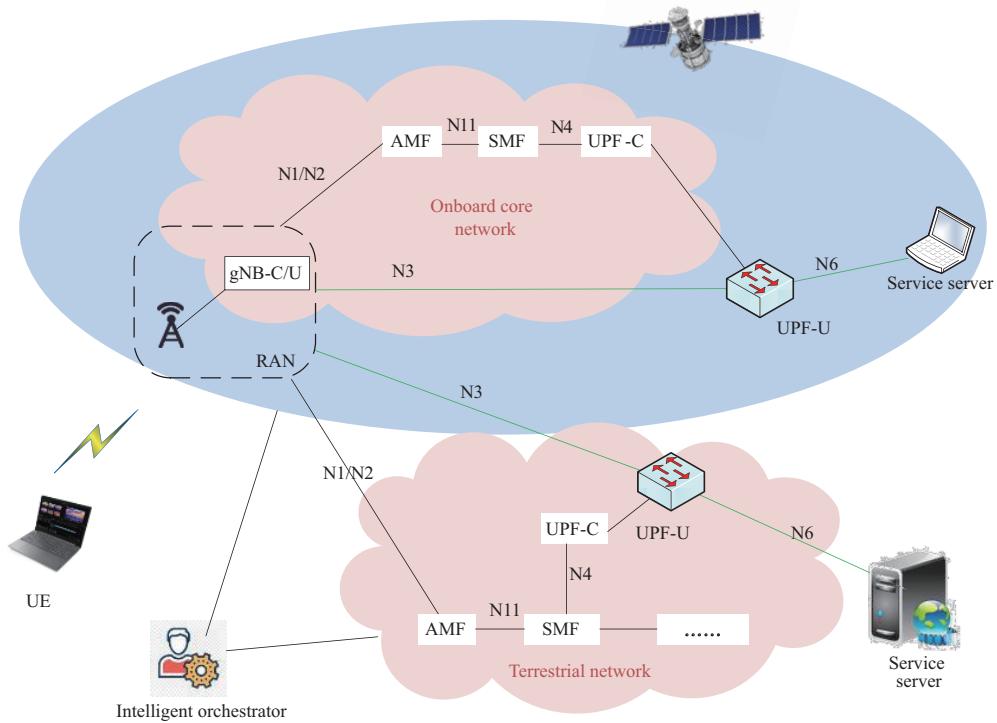


图 10 (网络版彩图) 融合网络业务场景与多维智能网络架构验证系统

Figure 10 (Color online) Network demo system for the integrated satellite-terrestrial mobile communication

信息系统具有丰富的算力和数据资源,可以为其他层和域提供离线训练的算力与数据资源。同时,通过将优化结果聚合不断地进行学习迭代,实现各层各域的自感知、自适应。

GEO 卫星可以支持域内管理和控制功能,也可以将管辖区域内的资源、网络状态、网络拓扑等信息发送到地面网络的管控中心,以便利用地面丰富的算力和数据资源进行离线训练。GEO 卫星还可以基于其收集的管辖区域内的卫星节点或者链路的异常情况,再结合业务特性、网络拓扑和负载等信息动态地调整网络。在紧急情况下,GEO 卫星可以根据来自地面智能控制中心的指令,并结合域内卫星网络节点的可用性、安全性、负载等信息重构网络。

中低轨卫星由于资源有限,只部署网络资源感知、上报和策略执行功能。中低轨卫星周期性地将其网络资源等信息上报给地面的智能管控平台或者部署在高轨上的域内管理和控制功能,并执行来自地面智能管控平台或者高轨域内管理和控制功能的调度指令,进行节点的重构。

为了验证上述提出的弹性可重构网络架构及多域多维网络管理架构,构建了融合网络业务场景与多维智能网络架构验证系统,如图 10 所示。基于该验证系统进行了弹性可重构的天地融合网络架构、基于人工智能的天地融合网络的智能网络管理与控制、移动性管理和端到端的网络切片管理等关键技术验证。

在卫星网络资源有限的情况下,必须尽可能地降低系统载荷和功耗,并且在部分设备发生异常、故障或损毁时,应尽可能地快速恢复或迁移业务,因此采用轻量化、易于移植的容器技术更适用于卫星通信网络。卫星通信网络的服务化将以容器技术为基础,构建云原生的网络功能原子能力,通过原

子能力的管理和编排, 实现卫星网络功能的定制化和动态弹性重构.

K3s 是由 Rancher Labs 推出的一款轻量级、通过 CNCF 一致性认证的 Kubernetes 发行版, 专为无人值守、资源受限、偏远地区、边缘节点上运行小型的 Kubernetes 集群而设计, 可以在基于 ARM 的硬件上很好地运行. 因此, 在天基网络控制原型系统中部署 K3s 集群, 验证卫星网络功能和网络切片的按需部署能力.

每个卫星网络节点自成集群, 需要同时安装 K3s server 和 K3s agent. 考虑到根据卫星星座的高动态性, 业务的时变性, 需要动态、弹性重构星载轻量化核心网, 在高轨卫星/地面搭建容器镜像管理仓库, 利用高轨卫星/地面的稳定性与资源充足性, 支持卫星网络功能构建时容器镜像的快速拉取.

3.3 资源管控和移动性管理

3.3.1 发展现状

星地融合网络的资源存在多维性、异构性和大时空尺度非均匀分布等特性, 面向多维资源跨域高效感知和智能协同管控模式的科学问题, 应探索星地融合网络的资源感知与高效适配的内在联系, 研究具有灵活适变能力的智能协同管控模式和移动性管理技术.

星地融合网络资源的统一标识和表征、创建维护多维跨域资源的关联图谱、探索资源内部属性关联和制约关系是实现网络资源智能管控和移动性管理的关键. 当前网络资源表征主要采用时间扩展图 (time-expanded graph, TEG) 和快照序列图 (snapshots sequence graph, SSG) 等方法, 空间复杂度高, 主要应用于单一业务属性的网络. 为实现星地融合网络跨域资源调度 (cross-domain resource scheduling, CDRS) 的高效执行, 文献 [61, 62] 基于卫星轨道的特征矩阵对网络资源进行稀疏表征. 文献 [61] 从时间和空间维度表征卫星网络通信资源, 提出一种基于稀疏表示的多智能体强化学习资源调度算法; 文献 [62] 提出一种分层稀疏资源表征方法, 设计跨域动态多资源调度算法, 引入优势因子和面向策略的超参数实现策略动态调度. 目前, 基于星地融合的资源管控技术研究仍处于初级阶段, 星地融合网络资源统一表征与管理困难. 为了实现高效资源智能管控, 需进一步研究其资源表征方案, 优化跨域异构资源管控能力.

在星地融合网络的移动性管理方面, 按照切换涉及的网元和位置差异, 可分为用户链路切换和馈电链路切换, 其中, 用户链路切换又可分为星内切换和星间切换^[63].

星内切换指用户在同一颗卫星内的不同波束之间切换, 按照信道分配方式, 可以分为动态信道分配 (dynamic channel allocation, DCA) 和固定信道分配 (fixed channel allocation, FCA) 两种^[64], 目前波束切换方案多基于资源利用率较高的 DCA 策略. 文献 [65] 提出一种基于差分博弈的 LEO 卫星网络信道分配方法以提升系统资源分配性能. 文献 [66] 构建 MEO-LEO 混合星座信道分配模型, 提出一种多轨道混合组网的信道分配迭代算法. 文献 [67] 构建 LEO 卫星网络的动态信道分配马尔可夫 (Markov) 决策过程模型, 提出一种基于时空相关分析和强化学习的自适应 DCA 算法. 文献 [68] 提出一种基于学习的混合动作深度 Q 网络 (hybrid-action deep Q-network, HADQN) 算法来解决动态资源分配的顺序决策优化问题, 在保障 QoS 的基础上降低了系统能耗.

星间切换是指用户在同一个信关站连接的两颗卫星间切换, 切换频率低于星内切换^[11]. 文献 [69] 构建卫星与地面用户的二部图模型, 并设计了一种基于位势博弈的切换算法, 该算法的实现依赖于软件定义卫星网络 (software defined satellite network, SDSN) 架构. 基于多智能体强化学习 (multi-agent reinforcement learning, MARL) 模型, 文献 [70] 设计了一种分布式 Q 学习方法, 用以寻找全局最优的负载分配和切换策略, 以减少切换次数、降低系统的阻塞率.

文献 [71] 提出一种以用户为中心的超密集 LEO 卫星网络切换方案, 通过缓冲多颗卫星对应用

户下行链路数据来降低切换时延、提升切换成功率。文献 [72] 提出一种基于网络流改进的切换策略 (handover strategy based on network-flows, HSNF) 算法以实现最大流量约束下的最小切换开销。针对大规模星座网络的星间切换/群切换复杂度高、开销大、失败率高等问题, 文献 [73] 以用户传输的数据量为奖励, 提出一种基于连续深度 Q 学习的分布式切换方案以降低状态空间的维数和切换的复杂度。文献 [72] 基于网络负载和用户属性对用户进行分组聚类, 提出一种基于网络流模型的分区约束卫星选择算法, 以降低信令开销、提高切换成功率、并提升用户体验质量 (quality of experience, QoE)。文献 [74] 提出一种基于边缘用户短包通信 (short packet communication, SPC) 的切换感知下行波束形成方案, 对小区所有用户的联合最大频谱效率进行优化以提升星间切换前的传输成功率。

为满足高动态拓扑环境下卫星互联网路由的实时可控, 业界提出将分段路由 (segment routing, SR) 应用到卫星互联网中。SR 是 SDN 的一种实现路线, 采用源路由的设计思想, 将集中式的路由配置限制在端到端路径的头节点处, 大大降低路由配置更新的复杂度。对于卫星互联网这种传播时延大、资源受限的场景, SR 可以避免逐跳配置的操作, 节省交互时延开销。文献 [75] 提出了一种流量工程智能路由方案 (intelligent routing scheme for traffic engineering, IRTE), 将最优性能问题表述为映射问题, 把不同流映射到关键分流点, 设计了具有分流路由的负载均衡算法 (load balancing algorithm with diversion routing, LBA-DR), 在有限的控制开销下实现负载均衡。Liu 等^[76] 针对地面站网关集中分布造成的拥塞问题, 提出基于 SR 的负载均衡路由算法, 根据负载大小, 对卫星网络进行动态分区: 轻负载区和重负载区, 并对不同负载区采用不同的路由策略, 不同的负载区将分别生成各自的路径段, 确保基于 SR 转发的一致性。为了向网络提供可靠稳定的服务, 确定性网络从网络时延、抖动、带宽、丢包率和数据传输路径几方面对流量进行控制, 提供确定性约束。通过时频同步、流量整形来保障确定性时延; 通过设置优先级队列、缓冲抖动来保障确定性抖动和丢包率; 通过边缘计算、网络切片等技术保障确定性带宽; 通过多径路由、冗余路由、包复制与消除等技术提升确定性网络的可靠性。

综上所述, 在天地融合网络中, 资源多维异构, 联合感知整合难; 资源管理功能分散, 适配效率低、协同管控决策难; 网络拓扑和资源状态高动态变化, 位置管理和切换控制复杂度高、网络服务质量按需保障难, 研究突破天地融合网络的多维资源跨域高效感知和智能协同管控模式具有以下三大挑战性。首先, 天地融合网络中, 节点资源异质异构、多维资源状态随时空不断变化, 导致天地网络节点资源和服务能力的差异化与融合网络服务的资源跨域整合需求之间的矛盾逐渐显现, 对天地网络资源的感知关联和跨域配置提出了新挑战。其次, 卫星高速运动导致网络拓扑变化快切换频繁, 由于网络资源管理功能在地面和卫星的分散部署, 网络资源状态的快时变性与资源协同管控决策高复杂性之间的矛盾日益凸显, 垂待突破高效移动性管理和路由快速迁移方法。最后, 天地融合网络中卫星网络中网络拓扑高动态、星上转发传输资源受限, 卫星高速移动导致路径频繁切换与用户确定性服务需求间的矛盾逐渐加剧, 按需确定性服务面临动态拓扑下业务服务时延抖动大、星上转发资源消耗大的挑战。

项目组通过分析天地异构网络环境中的多元业务时空特性, 提出跨域多维度资源统一表征方法, 通过本体进行关联模型的构建, 以二维有向图的形式建立基于属性参数和状态参数的资源关联图, 实现多维资源跨域高效感知和关联。针对多接入协同边缘网络中受限资源的孤立与失配性问题, 兼顾节点资源移动特性与空间几何约束, 提出适配多级边缘网络资源协同管理要求的最优资源配置方法, 保障了用户时延容忍, 降低了系统能耗; 针对异构网络资源在协同切换时难以协商决策和分配的问题, 提出基于模糊学习的天地协同切换决策方法, 通过进化算法与模糊学习相结合, 实现卫星网络与地面网络性能衡量指标同一维度协同切换决策, 突破异构网络性能差异性限制; 针对卫星网络长时延、高动态特性导致业务确定性服务需求难以保障的问题, 提出按需确定性服务架构以及高确定流量控制和保护方法, 实现对路由、队列的控制优化, 保障了控制面和数据面间的链路弹性。

3.3.2 星地多维资源跨域统一表征与管控

在星地融合网络中, 存在卫星通信网络和地面移动通信网络同时为用户提供服务的场景, 这两类网络的资源异质, 节点资源与其独立服务的覆盖区域之间相互耦合, 未能形成全局统一调度的资源配置方案, 导致资源利用率不高, 业务服务效率低下。面向上述问题, 兼顾面向下一代网络服务泛在、服务连续以及服务适配性需求, 考虑不同节点资源能力, 为了实现按业务需求提供服务、统一调度融合网络资源, 需突破不同节点资源状态对网络服务性能带来的影响, 对异质资源做统一表征并实现高效智能管控。

针对资源统一表征问题, 由于网络中节点类型不同, 信息传送过程中所使用协议不同, 其分布的地理位置不同, 逻辑功能分域亦不尽相同。因此需要通过研究星地融合网络资源类型及其在异构跨域网络中分布特性, 对频谱、链路等传输资源做统一标识和表征, 划分属性参数和状态参数, 构建资源通用化统一表征方法。基于资源之间相关性, 将接入、频谱、计算和缓存的资源统一表征为知识图谱, 实体包括资源属性参数、对应网络资源, 属性实体与资源实体的语义表示为状态参数, 资源实体与网络实体的关系表述为附属, 形成资源关联图。项目组采用二维有向图对资源关联图进行表征, 在资源关联图中, 每个节点可以表示一个卫星或地面资源实体, 节点的属性可以存储资源本体信息, 如资源名称、类型、位置等; 有向边可以表示资源之间的数据流、依赖关系或控制关系; 使用属性和权重为资源的计算能力、存储容量、带宽等属性分配权重; 通过在图中有向边的路径表示资源的流动或传递; 进行天地跨域资源管理时, 使用子图来表示一个资源池或资源集群用于管理和优化资源的集合。

在天地协同边缘网络中, 面向存储分发服务的资源利用相对孤立, 考虑到天地协同边缘网络中服务节点覆盖范围差异性大, 面对不同区域的缓存内容请求, 应充分借助卫星通信网络与地面移动通信网络协作存储资源, 对用户的随机存储文件请求进行协同响应。项目组针对存储资源的“孤立性”问题, 研究了地面接入小基站节点、地面宏基站节点、星上存储节点构成的多级协同网络架构下的存储分发策略, 如图 11, 在通信带宽与存储容量受限的约束下, 借助基于贪婪的优化方法, 考虑用户地理分布因素, 以优化服务请求成功率为目标, 探究存储资源配置方案, 使网络中的文件请求节点的整体服务成功率达到近似最优。

根据所提存储分发架构, 开展数值仿真进行验证, 详见参考文献 [77]。仿真表明, 所提多级网络存储分发架构能够充分利用网络中的存储资源, 在兼顾请求文件可得性以及网络边缘侧文件多样性的基础上, 根据网络结构可求解出各级所需存储的文件集合, 在网络参数给定的情况下, 文件大小、缓存节点大小与用户请求下的文件成功传输概率存在最优资源配置关系。所提存储架构方案一方面利用卫星与宏站文件存储来提高热度文件的成功传输概率, 另一方面通过在微站中部署次热文件来增强系统中存储的文件多样性, 其性能优于地面部署最热文件策略、卫星部署最热文件策略和天地融合网络随机部署最热文件存储策略。随着用户请求热度文件的概率增大, 所提存储分发架构能够自适应调整适配的文件存储集合, 从而保障了网络的性能。

3.3.3 星地协作的高效移动切换控制

星地融合网络将融合地面移动通信、高中低轨卫星通信等技术, 但是低轨卫星相对地面移动速度快, 导致网络拓扑变化频繁、星上锚点易丢失、资源时空分布不均, 低轨卫星为用户提供通信服务的时间短, 因此移动性管理机制的实现难度和性能要求更高。特别地, 当卫星高速移动引发多个用户和业务切换时, 触发大量切换请求导致网络资源竞争加剧, 有限的星上资源无法满足切换请求, 导致切换成功率显著下降。针对星间切换引起资源竞争问题, 项目组提出一种基于多目标优化的星间切换方法, 如

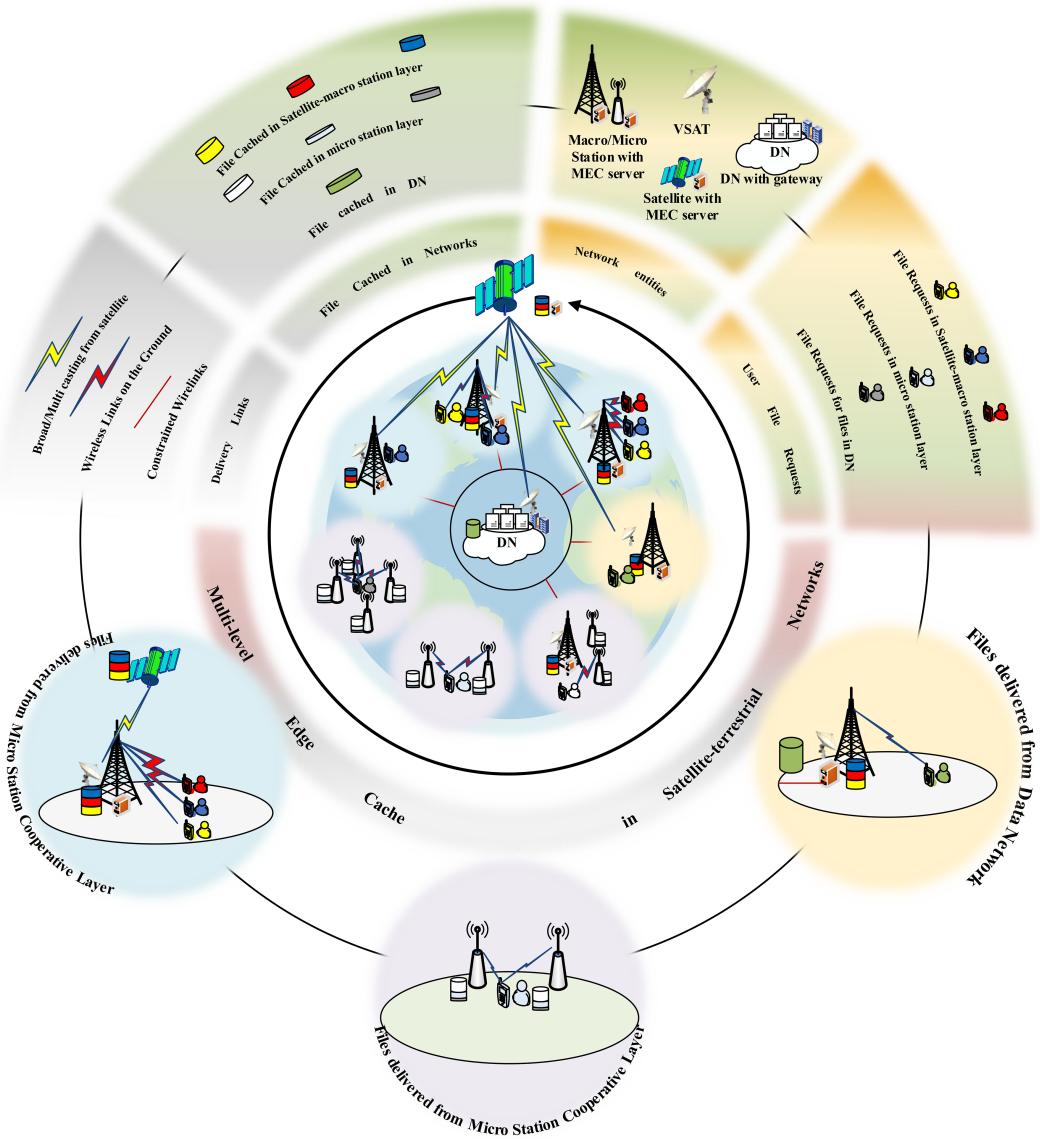


图 11 (网络版彩图) 多级网络存储分发网络架构
Figure 11 (Color online) Multiple-level store-distribution network architecture

图 12^[78], 引入卫星覆盖时空图, 将动态连续拓扑划分为静态离散快照, 全面表征了卫星节点与用户在不同时间与空间下的连接关系, 为切换决策提供了更为准确的信息基础, 描述卫星与用户间连接情况, 建立星间切换多目标决策模型, 利用自适应加速多目标进化算法 (adaptive accelerated multi-objective evolutionary algorithm, AAMOEA) 优化平均数据速率和网络负载, 针对低轨卫星高速运动引发的星地网络切换问题, 构建对应多目标优化模型, 避免人为权重设置导致某个目标适应度值无法收敛, 构造佳点集, 扩大解集搜索空间, 对平均数据速率与网络负载进行优化, 保证切换成功率, 提高网络服务能力。由于地面移动通信网络与卫星通信网络的性能衡量标准存在差异, 为统一衡量不同的切换性能指标, 提出了基于模糊学习的星地协作切换决策方法, 该方法将模糊学习与进化算法相结合, 通过引入模糊学习对网络切换开销进行计算, 从而将不同类型网络性能指标在同一模糊维度上进行衡量, 星地

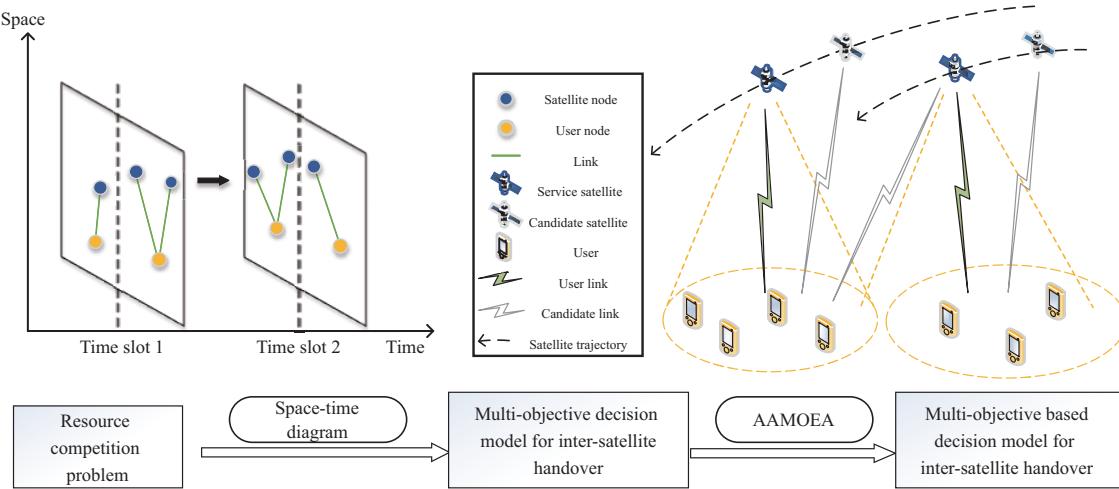
图 12 (网络版彩图) 基于模糊学习的星地协作切换决策^[78]

Figure 12 (Color online) Coordinated satellite-terrestrial handover decision based on fuzzy learning^[78]

协作切换决策模块通过判断源网络与目的网络的网络类型, 分别针对星地切换场景进行开销计算, 然后通过不同类型网络性能参数计算切换开销大小, 决策出最优目的切换网络, 实现星地融合网络的协作切换。

为了保证高速运动经过山区、郊外等偏远地区时服务连续性, 提出一种面向高速运动终端的群切换方法, 该方法在高速运动进入偏远地区时, 车载路由器对终端进行筛选, 将终端信息汇聚到星地融合路由器上, 星地融合路由器进行卫星切换决策, 高速运动载具上的终端作为群组在星地融合路由器与车载路由器之间进行切换。该方法借助卫星通信网络分担高速运动载具上的终端业务流量, 减轻地面基站负载, 能够有效提高高速运动载具上终端的通信业务质量和连续性。

利用 MATLAB 和 STK 卫星仿真工具搭建星地融合网络仿真环境, 对所提多目标切换方法进行仿真试验测试, 采用 Starlink 第一阶段一层卫星网络的轨道参数, 轨面数为 72, 每条轨道分布 22 颗卫星, 轨道高度为 550 km, 轨道倾角为 53°。仿真研究^[78]显示, 所提的多目标星间切换策略在减少网络负载不平衡方面显著优于基于最大仰角的切换策略, 这一优势源于多目标切换模型的设计, 其中通过定制的适应度函数, 在确保平均数据传输速率的同时, 避免了对单一卫星的大规模切换。此外, 多目标星间切换方法中采用了更为均匀的初始种群分布, 使用户的切换选择在多个临近卫星之间得到了更好的分散, 与基准算法相比, 所提切换策略可以提高切换成功率 20% 以上。

3.4 卫星网络的确定性服务

相较物理距离小且相对静态的地面网络, 大规模广域覆盖的卫星网络业务多元, 且星间链路高动态、传输时延大、误码率高, 其网络服务面临着数据重传、动态传播时延、排队拥塞等挑战, 使得星地融合网络存在广域承载的确定性问题。为实现高动态下的确定性服务, 需实现业务的全面感知、网络状况的实时监控及流量的精细管理。因此, 提出了高确定性按需服务分层架构, 研究以分段路由为基础的空间卫星网络管控架构, 以集中控制为基础的要求, 通过源路由的机制, 将管控的开销限定在中心控制节点与业务路径的头节点, 避免集中控制节点对路径逐跳节点的逐个配置, 提供灵活的调度能力, 提升网络管控的效率。分层架构如图 13 所示, 应用层进行网络态势感知并配置流量; 控制层维护全局流量信息, 管理网络拓扑; 数据层收集卫星节点、链路等资源信息向上传输给控制层。设计基于 SDN

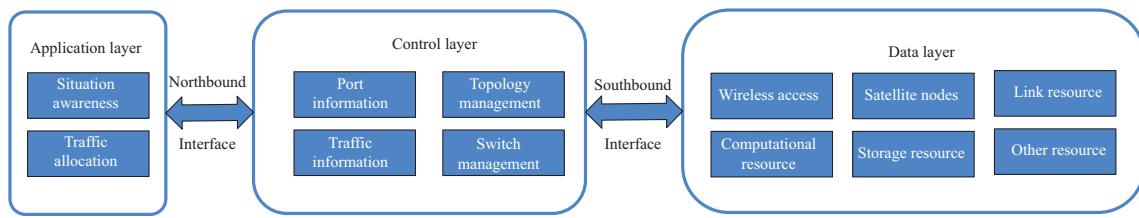


图 13 (网络版彩图) 高确定性按需服务分层架构

Figure 13 (Color online) High decision on-demand hierarchical architecture

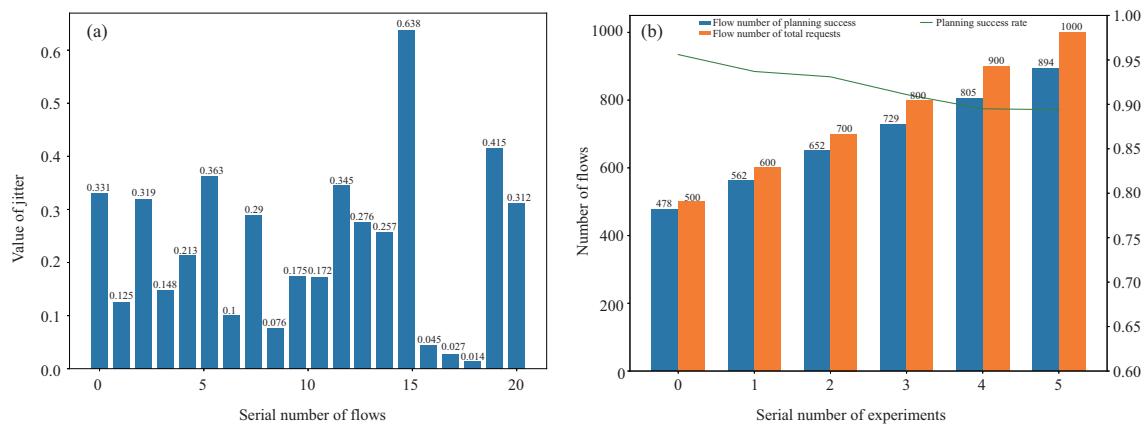


图 14 (网络版彩图) 确定性保障性能测试. (a) 业务并发规模; (b) 时延抖动

Figure 14 (Color online) Performance of service decision guarantee. (a) Service concurrent scale; (b) delay jitter

与分段控制的多路径传输控制协议 (multipath TCP, MPTCP) 机制, 考虑到多径的差异性, 结合网络层路由方案, 实现路径建立与控制, 将认证握手等控制消息在初始路径上传输, 后续数据信息则根据网络与业务可感知的路径与流量规划算法, 结合 SDN 与分段控制技术在卫星网络中的应用, 对时延敏感度不同的业务进行高质量传输, 预判卫星链路稳定性, 保证业务灵活传输, 考虑卫星通信网络链路丢包率性能, 保证业务可靠传输.

采用 Docker 容器模拟卫星网络节点搭建星地按需确定性服务试验环境, 支撑多队列调度及带宽自适应动态路由算法, 构建 100~150 颗卫星星座, 支持星间链路、星地用户链路、星地对点链路, 评估移动用户终端、固定用户终端以及视频点播等场景下的时延与丢包率性能, 每个场景下均进行多次仿真实验测试端到端性能, 最后取统计平均值作为仿真结果并进行验证, 如图 14, 在卫星星座 66 颗卫星规模下, 在网络中随机生成 100 条端到端业务, 每条业务带宽为 20 Mbps, 在仿真环境中选取 20 条确定性业务, 观测业务仿真结果, 抖动均小于 1 ms. 在高并发情况下, 与传统方案相比, 所提方案对确定性业务规划成功率达到 90% 以上, 基于队列的确定性转发方法时延较小, 进而保证抖动减小.

3.5 天基计算

3.5.1 发展现状

随着 5G 商用、6G 关键技术研究进入白热化阶段, 天基计算平台的架构和能力也得到了飞速的提升.

(1) 星地融合网络对天基计算能力要求. 针对星地融合移动通信, 卫星载荷的天基计算能力与功

能对卫星通信性能至关重要,不仅需要提升单个节点中载荷计算能力,更需要星间与星地协同计算。因此,天基计算应建立在星间与星地组网、星地资源共享、资源灵活调度的基础上^[79]。为此,天基计算的能力要求包括智能资源调度、卫星载荷能力、智能内生、安全内生、智能网络切片、智能服务预测、异构计算等方面。针对智能资源调度,需要结合大数据和人工智能算法,让计算平台能够快速、动态地进行智能资源分配。卫星载荷能力除了具有常规的频率转换等能力外,还可以具备通信协议处理能力、数据信息处理能力。针对智能内生,卫星通信载荷应支持轻量化 AI 的应用能力,以提高天基计算效率。针对安全内生,应支持 AI 赋能安全,自适应、精准且高效地监测安全风险与威胁、及时预警和处置。针对智能网络切片,应构建智能网络切片策略,基于星地融合统一的多维多域资源池,根据终端业务需求,实现全场景混合业务的资源按需灵活分配^[80]。针对智能服务预测,应根据大数据及预测模型,智能预测用户业务需求的时空分布及网络拓扑结构,并智能调度和分配相应资源,满足服务质量要求。针对异构计算,应根据 6G 网络及应用场景的复杂性,通过异构单元 (CPU, GPU, FPGA 等) 强强联合,按异构单元特点分配任务,多任务多线程并行来实现高性能,通过软硬件重构实现多种工作模式,提高资源利用率。

(2) 基于云边协同的高效天基计算。6G 星地融合网络由 GEO, MEO, LEO 及地面网络组成立体分层网络架构,高低轨卫星可以协同组网,利用高轨卫星的强算力和稳定性,提供天基云计算服务,轻量化核心网及数据中心可以装备在具备高算力的 GEO 卫星上。而由 MEO 和 LEO 卫星组成的非地球静止轨道 (non-geostationary earth orbit, NGEO) 卫星具有近地表和数量多优势,提供天基边缘计算服务,为实现高效天基计算的云边协同提供信息基础设施。在星地融合网络中,引入云边协同和边缘计算的计算框架,星间和星地计算资源共享和计算任务协同处理,提升星地融合网络计算效率。通过分析业务时延、天基/地基算力差异和星载能耗等约束,优化天基与地基协同计算策略,有效平衡计算需求与星载能耗的折中关系。

(3) 适应多业务场景的异构计算平台。随着通信的发展,网络嵌入人类生活方方面面,通信卫星也要面对多种多样应用场景和任务,因此,通信卫星星座多采用异构计算的方式,采用不同硬件架构的设备共同完成计算任务,系统在获取任务之后,根据调度算法管理任务,并为各硬件单元分配任务^[81]。通信卫星的有效载荷在体积、重量、功率和资源等方面受限,因此,卫星载荷既需要能够独立执行任务并管理系统,又需要与其他卫星载荷协作,这对 6G 天基计算平台提出了更高的要求。

(4) 星地协同 AI 技术。未来的 6G 星地融合网络是立体全球覆盖网络,具有高动态的网络拓扑结构,网络结构复杂,具有丰富的应用场景和业务类型,终端类型多样化,终端用户规模大,随着 AI 技术的发展,将人工智能技术应用到网络架构中,形成“感知 – 学习 – 决策”的网络智能管控机制,实现高效的业务管理。目前,基于 AI 的智能无线网络研究还处于起步阶段^[82],未来人工智能在星地协同架构^[83~85]、服务需求预测、星地分布式学习等方面有待深入发展。

综上,针对星地融合移动通信需要设计天基高效异构计算方案,实现多类型、多粒度通信业务的高效处理,需要突破动态可重构计算体系结构设计、高效能计算、在轨分布式计算存储以及在轨数据访问控制与快速交换等技术,实现星载 CPU/FPGA/DSP 等多种异构处理资源虚拟化。

3.5.2 空间高性能分布式混合异构计算架构设计

在基于云边协同的高效天基计算的基础上,提出一种融合高轨卫星节点、低轨卫星节点以及地面云节点的空间分布式异构计算架构,如图 15 所示,星间、星地通过激光、微波链路连接形成分布式系统,从而实现任务和数据的就近计算、分布存储、对等共享和按需服务。其中,高轨节点主要完成计算融合处理,包括联合任务规划、综合信息处理等功能;低轨星座主要完成边缘处理任务,利用通信卫

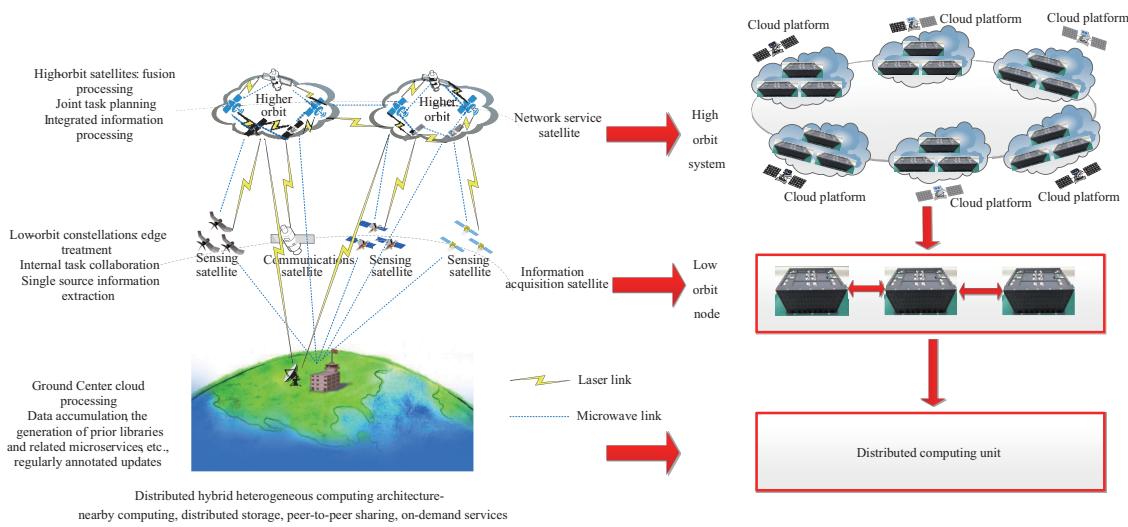


图 15 (网络版彩图) 空间分布式异构计算架构
Figure 15 (Color online) Spatially distributed heterogeneous computing architecture

星、感知卫星等信息获取类卫星实现内部任务协同和单源信息提取;地面云节点则是整个系统的计算处理中心,产生数据存储先验库和提供相关微服务,并定期完成服务和数据的上注及更新.

与空间高性能分布式混合异构计算架构相配合,设计天基资源虚拟化与动态管理实现方案,该方案是以任务为驱动的,其软件总体架构如图 16 所示,根据任务处理过程,可以把它可分为 4 个部分.

(1) 任务的划分和抽象建模. 根据所需资源类型的不同,可以把任务分成两类: 计算密集型任务和通信密集型任务. 前者是指执行过程中涉及较多的计算,系统调度需求少,在系统运行时,大部分的状况是处理资源使用多,串行或调度等需求短期内可迅速完成; 后者是指任务执行过程中涉及大量的资源协调,算法流程上迭代较多. 针对天基计算平台应用,如数据汇聚、大容量存储、数据预处理,图像特征提取、图像检测等计算和算法适合并行计算. 跟踪、确认、识别等算法由于迭代较多,并行时的资源协调代价较高,不如直接采用适合串行的 DSP 进行处理执行更优. 任务提交到系统后,系统需要根据任务和资源做出一个优化的分配方案,统一协调管理任务和资源.

(2) 资源虚拟化及动态管理. 按照一定的粒度虚拟化硬件资源,构建虚拟化资源池,这样一来,用户在应用层调用系统资源时,系统可以在某一层以某种粒度对资源重组,而不需要具体考虑底层硬件. 虚拟化技术在本质上是一种资源管理的手段,通过虚拟化技术,可以实现计算、存储、通信等硬件资源的统一化管理,并能够使用户合理、充分地控制与管理相关资源.

(3) 任务资源的动态调度和匹配. 通过高性能分布式混合异构计算技术中的任务调度与资源动态管理重构算法,在每个任务对应的多个资源组合实现方案中,按照一定准则(如执行时间最短、存储资源占用最少等)选择最优的解决方案,实现任务与可用资源模块一一对应,并按照实现方案生成对底层可配置计算资源和存储资源的配置文件. 任务调度与资源动态重构算法既要保证在不出现资源争用的前提下实现所有任务的执行,又要实现系统资源占用尽量少.

在任务调度功能模块取出任务的流程中,系统根据任务的优先级等属性,维持任务池为一个根据优先级进行排序的优先级队列. 当取任务时,取出队列的队首任务即可. 取出任务后,匹配符合要求的任务模板,此时得到的是可用任务模板集合,一个任务可能有在不同硬件架构平台上执行的方案,比如图像压缩算法可以在 FPGA 平台上执行,也可以在 DSP 平台上执行,或者多个 FPGA 或 DSP 平台

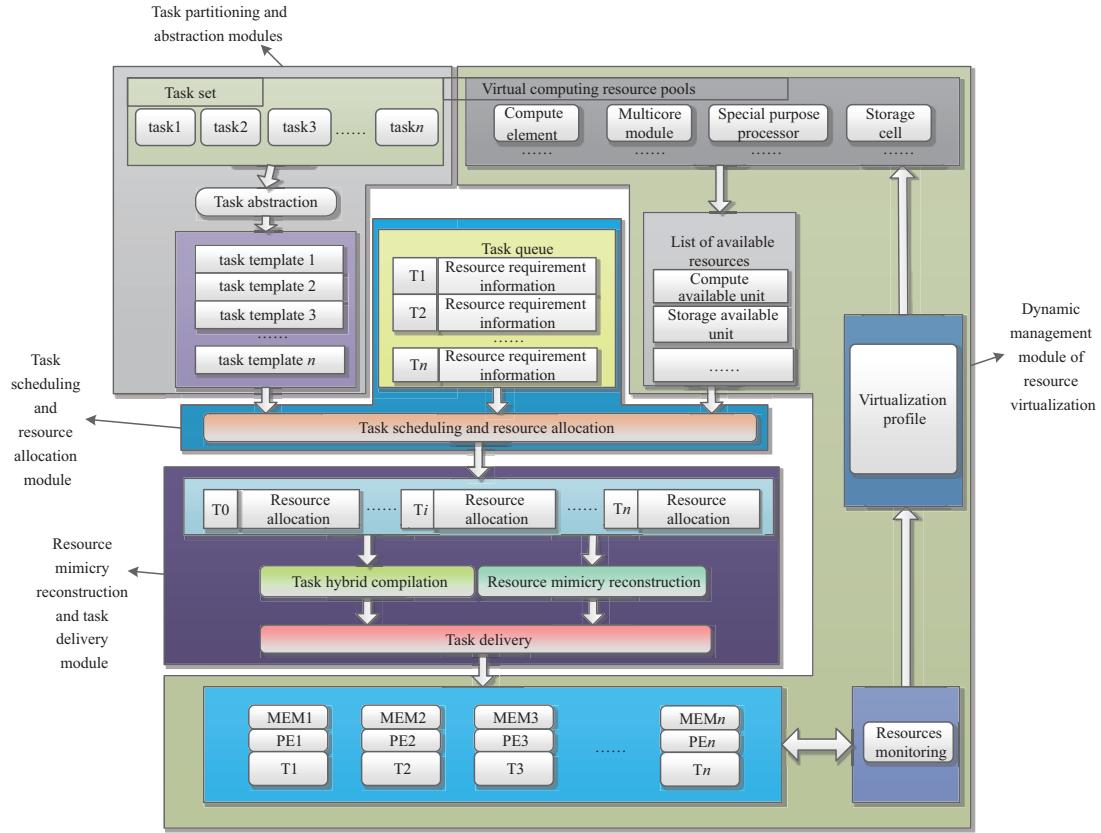


图 16 (网络版彩图) 天基资源虚拟化软件总体架构及模块划分

Figure 16 (Color online) Overall architecture and module division of satellite resource virtualization software

上执行。

(4) 天基资源的拟态重构及任务执行。天基资源拟态重构的基础是系统硬件资源细粒度的虚拟化技术。该平台的重构是通过任务驱动的，当任务到来时，系统会首先在任务模板中搜索相应的模板，匹配模板之后进行资源的分配，并形成配置文件。一方面对任务程序进行混合编译，使其能够在相应的资源上顺利执行；另一方面，通过硬件资源的拟态重构模块对底层可配置的计算资源和存储资源进行重构和配置，为该任务搭建执行所需的硬件环境；待两部分均执行完成后，将程序下载执行。任务执行结束之后，返回执行结果，同时释放系统资源，资源监测模块检测到系统资源的变化后，会通知配置软件更新相关配置文件，同时对虚拟计算资源库进行刷新。对于未出现在任务模板中的任务，则需要汇报执行任务所需要的计算资源、存储资源，在任务调度后，根据该任务所需求的资源信息，更新任务模板，以便下次任务到达时能够快速执行。

3.6 频率分配及频谱共享

3.6.1 发展现状

(1) 现有的频谱分配政策。目前全球现有的基本频谱分配政策为静态固定的频谱分配。在国际无线电联盟《无线电规则》的基础上，各国基于自身国情、无线电业务发展以及相关技术和产业发展优势等，对本国频谱进行划分、分配和指配。各国基本按照对不同的频谱或无线电台（站）采用分类的模

式进行管理,对不同频谱或无线电台(站)制定了或细或粗的设置使用条件、协调要求和运营要求等,对频谱使用者也给出了限制要求,不断提高频谱使用者进行协调和解决干扰的积极性,对频谱使用全生命周期进行监管,并兼顾国家和公共利益等。

我国现行的无线电频谱划分政策和管理制度是基于《中华人民共和国无线电管理条例》(自 2016 年 12 月 1 日起施行)并按照空间无线电业务和地面无线电业务分类管理的。不论是空间还是地面无线电业务,遵循先许可后使用的原则,在使用期间,都应根据《无线电频率使用率要求及核查管理暂行规定》和《无线电频率使用和在用无线电台(站)监督检查暂行办法》进行事中事后检查,以保证合理、充分、有效地利用被指配的无线电频谱资源,同时保证无线电业务正常运行,防止不同无线电业务间、各无线电台站间、以及各系统间出现有害的相互干扰。

为了进一步提高频谱使用率,避免频谱闲置,一方面管理部门明确要求了各类无线电业务的最低频率使用率门槛,而且随着无线电业务的发展,将那些利用率不高的频谱进行频谱重新规划,在美国和英国还出现了频谱招标制度,以提高频谱利用率和频谱资源价值;另一方面鼓励频谱使用者通过技术进步不断提高频谱的使用率,在维护好空中电波秩序的基础上,使用频谱感知等技术提高频谱使用率。可见,为了提高频谱利用率,无线电规则也在随着发展不断更新变化,而且通过技术进步改善频谱利用率的方式成为未来频率使用的重要方向。

(2) 星地频谱共享方法。频谱共享允许在多个候选认知无线电用户之间共享和管理未充分使用的可用无线电资源。频谱共享的过程中应避免干扰主用户的传输。根据传输方向,频谱共享分为上行链路频谱共享和下行链路频谱共享;根据实施方案,频谱共享又可分为静态频谱共享和动态频谱共享。在认知无线电技术的研究中,按照认知用户接入授权频谱的方式的不同,星地频谱共享模式通常分为 3 种,即交织式(interweave)频谱共享模式^[86]、填充式(overlay)频谱共享模式^[87]和下垫式(underlay)频谱共享模式^[88]。现有文献涉及的星地频谱共享的常见方法如表 4^[88~106]所示,主要分为 GEO 卫星与地面移动通信系统频谱共享场景和 LEO 卫星与地面移动通信系统频谱共享场景。

为了满足未来 6G 通信系统频率使用需求,一方面,需要增加新的频谱(如太赫兹和可见光);另一方面,现有频段的静态分配管理机制也需要更精细化,甚至还需要重新划分业务不饱和的频段。因此,动态频谱共享技术无疑是解决 6G 通信频谱供需矛盾的重要手段,通过星地共享频谱,大幅提高 6G 星地融合移动通信网络的频率利用效率。

3.6.2 动态频谱共享技术

针对卫星通信网络与地面移动通信网络异构系统频谱高效共享问题,需要开展星地异构网络物理及链路层协议感知优化技术、频谱智能融合共用策略与自主增强技术研究,突破异构系统频谱融合策略瓶颈,有效提高频谱利用效率,增强系统自主融合能力,为我国空间频轨资源的总体规划论证、动态频谱管理,以及国际电信联盟相关议题的研究及规则的制修订提供技术储备与支撑。具体的研究框架如图 17 所示。

面向天地异构网络高动态环境下空口采集数据量有限、信号连续可见时间短、波形异构、调制样式多样、普适算法实现难度高、部署难度大、低信噪比下识别准确率低的情况,通过深入研究高动态环境下的空口调制方式、信道编码与业务帧协议类型和特征,将感知的多维度特征信息进行融合与机器学习等方式相结合,挖掘出物理层空口与链路层协议与频谱使用的耦合映射机理,建立起了协议解析的数学模型,提升了物理层空口协议识别的时效性和准确率。所提方法与已有方法对比如图 18。通过仿真验证所提方法所需网络参数大幅下降至 4.2 万个、训练时间降至 45 s,但平均识别准确率在信噪比为 0~18 dB 时达到 92%,在信噪比为 -20~18 dB 时也可达 62%。面向异构系统链路层协议多

表 4 星地频谱共享常用方法
Table 4 Common methods for sharing satellite-terrestrial frequency spectrum

Scenario	system	mode	Optimization objectives	Optimized parameters	Solution
The GEO satellite shares the spectrum with the terrestrial mobile communication system	GEO	Underlay	Maximize the downlink user rate of the terrestrial mobile communication system	Power distribution matrix of the terrestrial mobile communication system	Spectrum-sharing approach of Lagrangian dual theory with subgradient iterations[89]
	GEO	Underlay	Maximize the downlink rate of GEO satellite and terrestrial mobile communication system users	satellite-terrestrial joint power matrix	Spectrum-sharing method based on game theory[90, 91]
	GEO	Overlay	Maximize the downlink user rate of the terrestrial mobile communication system	Spectrum-sensing detection probability and false alarm probability	Spectrum sensing based on energy detection and a spectrum sharing method based on service priority [92]
	GEO	Overlay	Maximize the downlink user rate of the terrestrial mobile communication system	Relay time, forwarding time, and utilization time distribution coefficient	Spectrum-sharing method based on improved heuristics [93]
Terrestrial	Terrestrial	Underlay	Maximize the GEO system uplink capacity	The GEO uplink power distribution matrix	Spectrum-sharing method based on the Meijer-G function [94]
	Terrestrial	Underlay	Maximize the uplink energy efficiency of the GEO satellite system	GEO user uplink power and subchannel distribution matrix	Spectrum-sharing method based on the Lagrangian dual method [95]
	LEO	Underlay	Minimize the completion time of the downlink transmission task of the terrestrial mobile communication system	Bandwidth and power distribution matrix	Spectrum-sharing method based on the gradient descent method [96~98]
	LEO	Underlay	Maximize the downlink rate of the terrestrial mobile communications system	Power and the subchannel distribution matrix	A spectrum-sharing approach based on genetic algorithms [99~101]
	LEO	Underlay	Maximize the downlink rate of the LEO satellite system	Relay power distribution matrix of the terrestrial mobile communication system	Spectrum sharing based on relay power control of terrestrial mobile communication [102]
	LEO	Overlay	Maximize the downlink rate of the ground mobile communications system	Spectrum-sensing detection probability and false alarm probability	An active spectrum sharing method based on the Lagrangian theory [104, 105]
LEO satellites share spectrum with terrestrial mobile communication systems	Terrestrial	Underlay	Maximize the uplink user rate and fairness weighting of the LEO satellite system	LEO user uplink channel distribution matrix and power distribution matrix	Optimal power control method based on the transformation of Jason inequality [88]
	Terrestrial	Underlay	Maximize the LEO satellite uplink rate	The LEO satellite user uplink power distribution matrix	Non-perfect CSI power control spectrum sharing method [104]
	Terrestrial	Underlay	Minimizes the uplink transmission interruption probability of the LEO satellite system	The LEO satellite user uplink power distribution matrix	Spectrum-sharing method based on NOMA and CR [106]
	Terrestrial	Overlay	Maximize the LEO satellite uplink rate	Sensing performance and the channel allocation matrix	

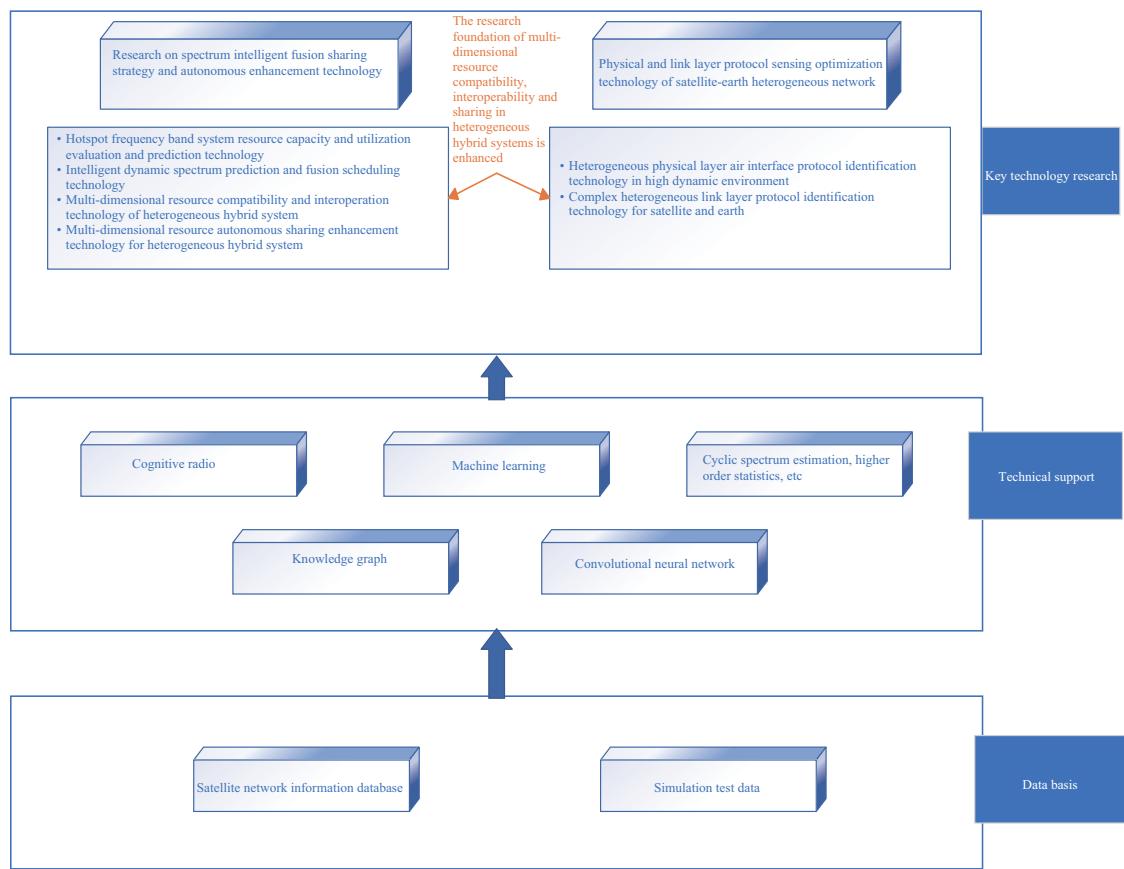


图 17 (网络版彩图) 星地融合移动通信高效频谱共享技术研究框架

Figure 17 (Color online) Research framework of efficient spectrum sharing technology for space-ground fusion mobile communication

样、协议间无法互通互融、全盲协议识别和信道编码识别刚起步的现状,开展了基于国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)协议测控和空间数据通信体系(TM/TC/AOS)的链路层通信的协议特征、链路层信道编码识别技术以及链路层数据同步特征盲识别技术研究,主要包含了对数据帧/码块进行同步和对信道编码方式进行识别。对于链路层同步特征盲识别,基于CCSDS TM/AOS 帧格式数据,生成测试用的CCSDS 链路层协议数据和编码;接着将测试用序列数据输入所提的码谱分析识别法、截短校验向量识别法或匹配编码后不变位识别法中,验证了所提算法的识别效果,如图 19 所示。上述研究为频谱有效共享利用、智能融合、频谱优化等提供了技术支撑。

面向固定频谱分配规则所带来的业务频率有限、频谱利用率低等突出问题,开展了空间频轨资源容量评估与预测技术研究。通过知识图谱技术对多源异构数据,包括国际电信联盟的空间无线电业务(space radio service, SRS)数据库、空间规划业务(space planning service, SPS)数据库、附录 30 和 30B 数据库,以及各类航天行业网站(如 celestrack 等网站)的统计和监测数据、国内行政许可审批和监测数据进行清洗重构,然后利用预训练的长短时记忆(long short-term memory, LSTM)网络模型提取网络公开数据,对所得的知识图谱进行相应的修正,从而获得卫星频轨资源态势分析的基础数据。在此基础上开展卫星频轨资源态势指标体系构建研究,形成了面向频轨资源分析的、超 500 项的“时 – 空

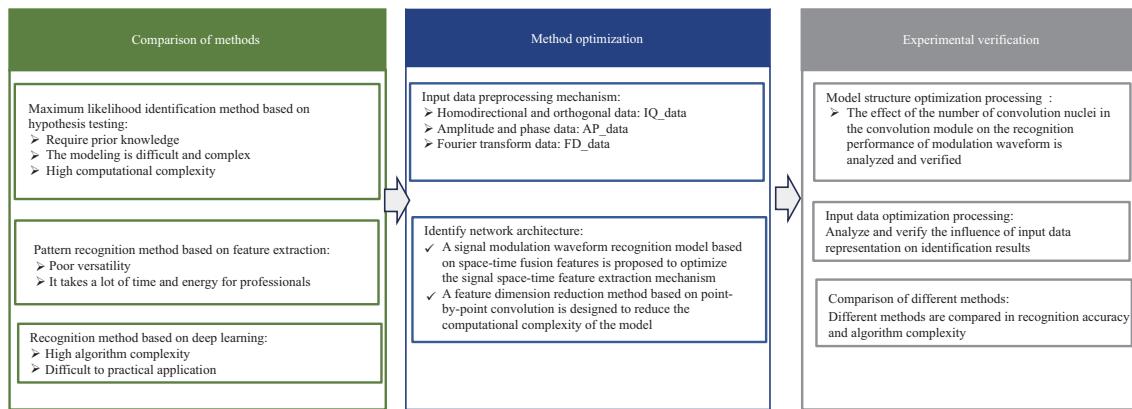


图 18 (网络版彩图) 高动态环境下的异构物理层空口协议识别技术比对

Figure 18 (Color online) Comparison of heterogeneous physical layer air interface protocol identification technologies in a highly dynamic environment

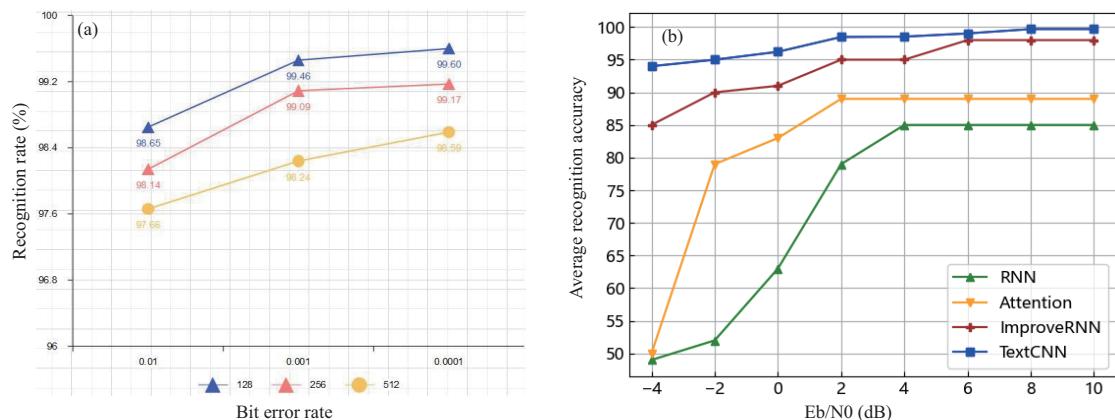


图 19 (网络版彩图) 所提天地复杂异构链路层协议识别方法效果. (a) 不同数据组下, 所提算法的特征识别准确率; (b) 不同算法识别准确率对比

Figure 19 (Color online) Effect of the protocol identification method of the complex heterogeneous link layer. (a) Feature recognition accuracy of the proposed algorithm under different data sets; (b) comparison of recognition accuracy of different algorithms

“频”多元卫星频轨资源态势评估体系和风险预警指标体系. 然后基于各项指标体系获得了相应规划部署条件下资源使用、资源容量和频率占用率的定量化分析结果, 还采用序列化的机器学习方法对频轨资源的发展态势进行了分析预测, 突破了热点频段系统容量及利用效率的定量化评估技术. 对 X, Ka, 以及 Q/V 等频段开展了示范验证, 在国内建成了首套卫星频轨资源态势分析系统, 为空间信息系统的用频及规划部署提供了支撑手段.

面向有限区域频谱监测与空间大尺度下的频谱分布感知矛盾、异常复杂的分析场景、高难度的建模等挑战, 在空间频轨资源容量评估与预测技术研究基础上, 研究了智能化动态频谱预测与融合调度、异构混合系统多维资源兼容互操作技术, 为异构混合系统的多维资源自主共享增强提供基础, 具体如图 20.

针对智能化动态频谱预测与融合调度技术, 开展了基于残差网络的频谱预测、基于卷积网络长短期记忆 (CNN-LSTM) 的频谱预测、基于图形卷积网络长短期记忆 (GCN-LSTM) 的频谱预测技术研

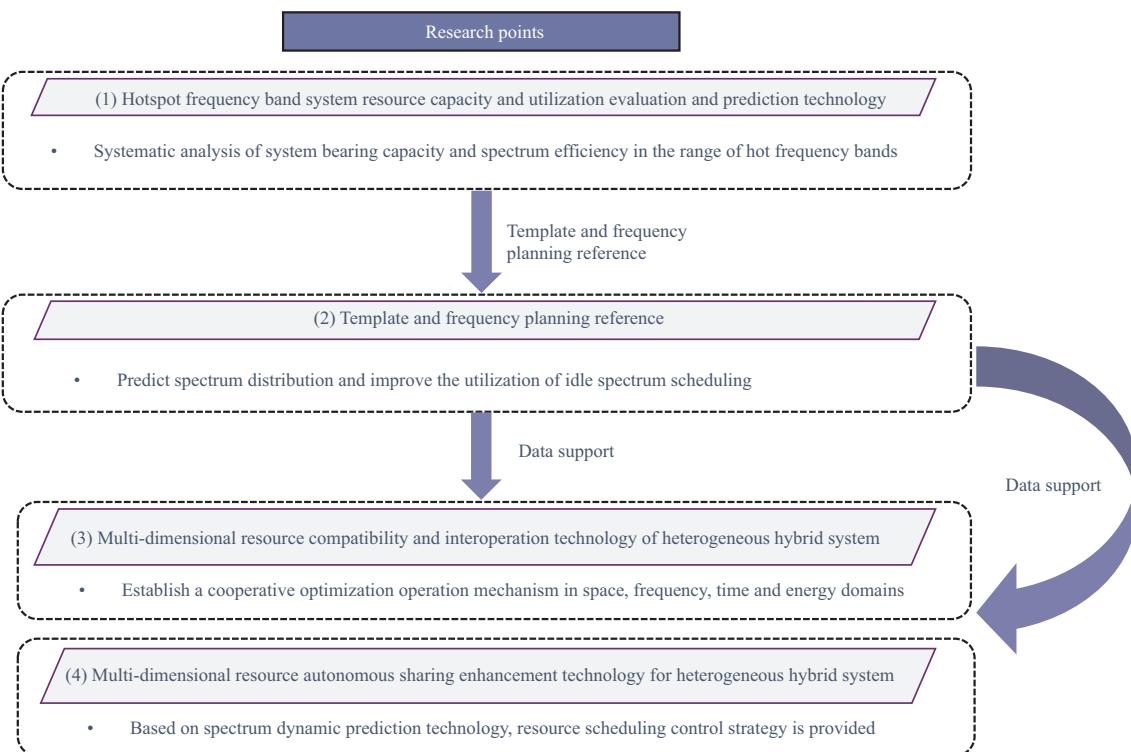


图 20 (网络版彩图) 星地融合异构系统频谱智能融合共用策略与自主增强技术研究内容

Figure 20 (Color online) Research content of spectrum intelligent fusion sharing strategy and autonomous enhancement technology for space-ground fusion heterogeneous systems

究。将信号功率谱或频谱等数据经所提的频谱预测模型, 提取出空间、时间、信号/噪声类型等相关性数据, 从而对频谱动态分布进行有效预测。针对异构混合系统多维资源兼容互操作技术, 通过研究以资源池技术为核心的多维资源动态共享和协同优化操作机制, 包括调度信息系统轨道资源(空域)、波束域资源(空域)、频率资源(频域)和时间资源(时域)等, 建立多维资源兼容互操作适配策略, 实时为各异构信息系统提供中枢资源调度控制策略, 实现了有效干扰规避。

项目组基于上述融合智能化的频谱资源调度策略, 以机器学习与辅助优化判决策略为技术手段, 完成了异构混合系统多维度资源自主共享增强技术研究, 具体开展了 NGSO-GSO 下行通信链路加权协作频谱感知、基于小样本数据的“地对天”频谱感知算法、分布式快速频谱感知算法和基于集中式深度确定性策略梯度 (deep deterministic policy gradient, DDPG) 的星地融合系统频谱共享算法研究, 为频谱智能化分配及高效共享利用提供了技术支撑。通过感知场景构建、感知信号模型和分布特性建模、融合判决策略求解, 得出了共享增强利用方式, 具体如图 21 所示。可以看出, 复用频谱的方法相对于不复用频谱的方法, 带来频谱效率的平均提升约 150%。

4 6G 星地融合发展趋势与标准化

4.1 6G 星地融合发展趋势

6G 星地融合移动通信将使用统一的网络架构和标准体制, 使用统一的无线接入、传输和网络技术, 使用统一的星地协同的无线资源分配与业务管理, 为手机、物联网终端、VSAT 终端、动中通终

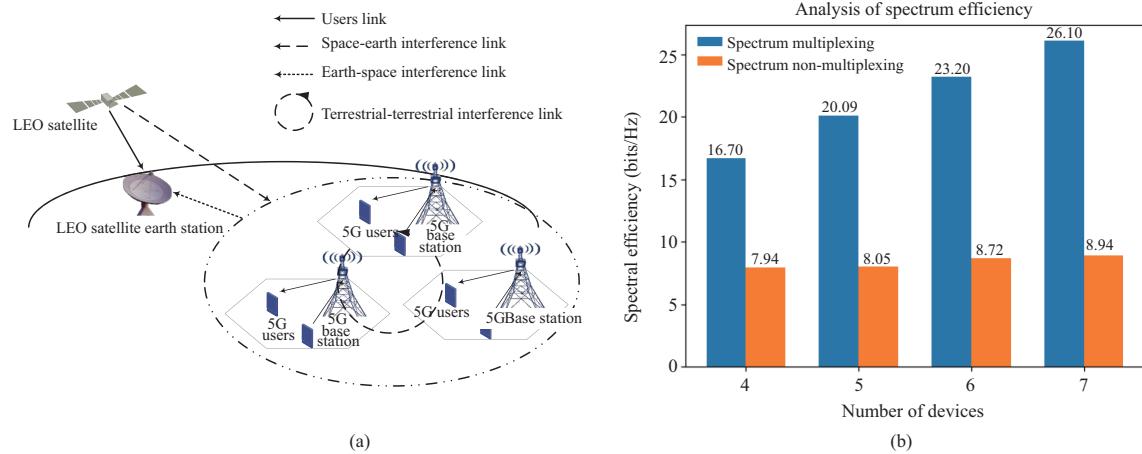


图 21 (网络版彩图) LEO 卫星通信与地面移动通信异构融合及其相应的频谱效率对比. (a) 星地融合通信场景示意; (b) 频谱效率分析

Figure 21 (Color online) Heterogeneous integration of LEO satellite-terrestrial mobile communication and its corresponding spectral efficiency comparison. (a) ITSC scenario illustration; (b) analysis of spectrum efficiency

端、大中型地面站提供宽带或窄带接入服务, 满足天基、空基、海基和陆基用户随时随地通信需要. 其发展趋势可以概括为:

- (1) 在通信业务方面, 6G 星地融合移动通信将基于同一通信体制提供陆地移动通信业务、卫星固定业务 (包含动中通业务、静中通业务)、卫星移动业务和卫星广播业务, 满足多样化的用户通信需要.
- (2) 在无线空口方面, 6G 星地融合移动通信将基于可变参数集实现统一的空口, 通过引入新波形并优化帧结构、时频同步、随机接入、前向纠错机制等方面的设计, 使之能够更好地适应卫星通信场景, 在降低系统实现难度的同时, 提升频谱效率.
- (3) 在网络架构方面, 6G 星地融合移动通信将采用以虚拟化技术、网络原子组件和网络全局视图为基础的弹性可重构的星地融合网络架构, 以业务/用户为中心配置网络资源为用户提供服务, 基于网络的弹性可重构能力优化网络灵活性.
- (4) 在资源管理方面, 6G 星地融合移动通信将在网络资源的统一标识和表征的基础上实现多维跨域资源管控; 在移动性管理方面, 6G 星地融合移动通信将把人工智能引入到用户链路、馈电链路和星间链路的切换方案中, 提高频繁切换的成功率; 在以上基础上, 基于 SDN、业务感知、网络实时监控及精细流量管理方法实现高动态环境下的确定性服务.
- (5) 在天基计算方面, 6G 星地融合移动通信将采用以天基/地基资源虚拟化为基础的空间高性能分布式混合异构计算架构, 支持资源的动态分配和任务的动态调度.
- (6) 在频率使用方面, 6G 星地融合移动通信将在频谱感知的基础上, 采用“空域/频域/时域”相结合的隔离措施、“静态/半静态/动态”隔离互为补充的方式实现不同层网络之间共用相同频段.

4.2 6G 星地融合标准化推进

2022 年 6 月, 国际标准化组织 3GPP 在 5G R17 版本完成了第 1 个关于低频段、透明转发模式的 NTN 标准版本. 针对目前的 R18 阶段, 网络侧正在推进核心网元用户面功能 (user plane function, UPF) 的天基部署, 无线接入网侧正在推进手机直连卫星所需的链路传输增强. 面向未来的 R19 版本, 预期 3GPP 会进一步考虑星上处理模式、跳波束技术等方面的标准工作, 从而使得星地融合移动通

信能够支撑多样化的组网模式,并在 2030 年实现 6G 的星地融合移动通信网络能力.

与此同时,星地融合移动通信的技术验证和组网通信,大致分为 3 个阶段:

2023~2025 年,可以基于 5G R17 版本的 NTN 进行手机直连卫星的技术验证和商业组网;

2025~2030 年,依据卫星能力的扩展,基于 5G NTN 后期版本开展手机直连卫星的技术验证和商业组网;

2030 年之后,实现基于 6G 星地融合的组网技术验证和商业组网应用.按照上述时间节点,3GPP 关于星地融合移动通信的标准化进度远远落后于目前如火如荼的卫星互连网建设的需要.这将导致目前卫星互联网系统存在较多的定制化设计与开发,增加系统建设的风险,也会加大未来不同系统与终端间互联互通的难度.

5 总结与展望

随着航天技术的迅猛发展,地面移动通信与卫星通信从竞争走向合作,并朝着星地融合的 6G 发展,6G 星地融合移动通信关键技术将成为未来构建天地一体化网络的重要手段.为了应对 6G 星地融合网络中无线传输受限、网络架构复杂、移动性管理难、网络质量保障难、频谱资源紧缺等挑战,本文从无线传输、网络架构、资源管控和移动性管理、天基计算、频谱分配及共享等方面系统地综述了 6G 星地融合移动通信关键技术的发展现状,提出了系列创新技术,并评估验证其有效性.面向未来,通过人工智能赋能,可以进一步优化网络架构,降低卫星通信网络拓扑复杂度;通过对无线传输方式优化,增加星地融合移动通信传输增益,提升通信系统质量;通过对频谱资源分配方式优化,可以合理分配卫星通信和地面移动通信的频谱资源,最大化发挥频谱资源的效用,进一步促进星地融合.面向未来,6G 星地融合移动通信关键技术将进一步融合卫星通信网络覆盖优势与地面移动通信网络容量优势,在网络架构、系统功能、组网模式、服务范式等方面实现变革,拓展新领域、新场景和新经济,具有广阔的应用前景和多元的发展方向,赋能各行业领域,满足人民多样化的网络服务需求.

致谢 本文在撰写过程中,项目成员以及中信科移动通信技术股份有限公司的缪德山博士、韩波、汪永明博士、杨帅博士、侯利明博士、孟萌博士生、付一阳博士生、宋继达博士生、石通博士生等进行了积极贡献,在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Chen S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China. *Telecommun Sci*, 2020, 36: 1–13 [陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议. 电信科学, 2020, 36: 1–13]
- 2 Wang C T, Zhai L J, Xu X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network. *Radio Commun Technol*, 2020, 46: 493–504 [汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望. 无线电通信技术, 2020, 46: 493–504]
- 3 IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G Vision and Candidate Technologies. White Paper, 2021 [IMT-2030(6G) 推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术. 白皮书, 2021]
- 4 ITU. Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond. Technical Report ITU-R M.2160, 2023
- 5 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想. 卫星与网络, 2016, 3: 30–36
- 6 Chen S, Sun S, Kang S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication — the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G. *China Commun*, 2020, 17: 156–171

- 7 ITU. Vision, Requirements and Evaluation Guidelines for Satellite Radio Interface(s) of IMT-2020. Technical Report ITU-R M.2514-0, 2022
- 8 ITU. Proposal for a New Study on Future Technology Trends of Satellite IMT Systems. ITU-R Document 4B/146, 2023
- 9 CICT Mobile. Integrated Terrestrial-Satellite Communication (ITSC) White Paper. 2023 [中信科移动通信技术股份有限公司. 星地融合通信白皮书. 2023]
- 10 Chen S, Chen L, Hu B, et al. User-centric access network (UCAN) for 6G: motivation, concept, challenges and key technologies. *IEEE Network*, 2024. doi: 10.1109/MNET.135.2200587
- 11 Chen S, Liang Y C, Sun S, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wireless Commun*, 2020, 27: 218–228
- 12 Kang S L, Miao D S, Suo S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G. *Inform Commun Technol Policy*, 2022, 48: 18–26 [康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向 6G 的空天地一体化系统设计和关键技术. 信息通信技术与政策, 2022, 48: 18–26]
- 13 ETSI. Satellite Earth Stations and Systems (SES); SC-FDMA based Radio Waveform Technology for Ku/Ka Band Satellite Service. TR 103 297 V1.1.1, 2017 [ETSI. 卫星地面站和系统 (SES); Ku/Ka 波段卫星服务的基于 SC-FDMA 的无线电波形技术. TR 103 297 V1.1.1, 2017]
- 14 Dalakas V, Mathiopoulos P T, Di Cecca F, et al. A comparative study between SC-FDMA and OFDMA schemes for satellite uplinks. *IEEE Trans Broadcast*, 2012, 58: 370–378
- 15 Hadani R, Rakib S, Tsatsanis M, et al. Orthogonal time frequency space modulation. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017. 1–6
- 16 Yang W C, Du Y, Wen W, et al. Modulation recognition of satellite communication signal based on intelligent analysis of multi-fractal spectrum. *Acta Electron Sin*, 2022, 50: 1336–1343 [杨伟超, 杜宇, 文伟, 等. 基于多重分形谱智能分析的卫星信号调制识别研究. 电子学报, 2022, 50: 1336–1343]
- 17 Ebert J, Bailer W, Flavio J, et al. A method for ACM on Q/V-band satellite links based on artificial intelligence. In: Proceedings of the 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), 2020. 1–5
- 18 Nguyen T M. Advanced mathematical modeling of machine learning and artificial intelligent addressing satellite transponder distortions. In: Proceedings of IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), 2020. 1–6
- 19 Luo Z Y, Xin N, Sun S H. Beamforming technology of LEO satellite in satellite-terrestrial integrated network. *Space-Integrated-Ground Inform Netw*, 2022, 3: 22–30 [罗志勇, 辛宁, 孙韶辉. 面向星地融合网络的低轨卫星多波束成形技术. 天地一体化信息网络, 2022, 3: 22–30]
- 20 Liao D S, Chai L, Sun J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network. *Telecommun Sci*, 2022, 38: 10–21 [缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术研究与演进展望. 电信科学, 2022, 38: 10–21]
- 21 Sun Y H, Peng M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions. *Telecommun Sci*, 2023, 39: 25–36 [孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望. 电信科学, 2023, 39: 25–36]
- 22 Wang D, Mei Z, Zhang H, et al. A novel PSS timing synchronization algorithm for cell search in 5G NR system. *IEEE Access*, 2021, 9: 5870–5880
- 23 Sun Q N, Zhang Z Z. Cell search PSS timing synchronization method in 5G system. *Telecommun Eng*, 2020, 60: 678–683 [孙倩楠, 张治中. 5G 系统小区搜索 PSS 定时同步方法. 电讯技术, 2020, 60: 678–683]
- 24 Zhu J F, Sun Y H, Peng M G. Preamble design for low earth orbit communication systems. *J Beijing Univ Posts Telecommun*, 2022, 45: 75–81 [朱剑锋, 孙耀华, 彭木根. 低轨卫星通信系统的前导序列设计. 北京邮电大学学报, 2022, 45: 75–81]
- 25 Cui X Y, Wu J, Zhou Y Q, et al. Challenges of and key technologies for the air-space-ground integrated network. *J Xidian Univ*, 2023, 50: 1–11 [崔新雨, 伍杰, 周一青, 等. 空天地一体化融合组网的挑战与关键技术. 西安电子科技大学学报, 2023, 50: 1–11]
- 26 Chen S, Sun S, Xu G, et al. Beam-space multiplexing: practice, theory, and trends, from 4G TD-LTE, 5G, to 6G and beyond. *IEEE Wireless Commun*, 2020, 27: 162–172
- 27 Sun S H, Hou L M, Miao D S. Beam switching solutions for beam-hopping based LEO system. In: Proceedings of the 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021. 1–5
- 28 Cheng J X, Deng W, Weng W W, et al. Research on 6G mobile and satellite convergence wireless network technology.

- Radio Commun Technol, 2023, 49: 788–794 [程锦霞, 邓伟, 翁玮文, 等. 面向 6G 的天地一体无线网络技术研究. 无线电通信技术, 2023, 49: 788–794]
- 29 Bai L, Zhu L, Choi J, et al. Cooperative transmission over Rician fading channels for geostationary orbiting satellite collocation system. IET Commun, 2017, 11: 538–547
- 30 Bai L, Li T, Liu J, et al. Large-scale MIMO detection using MCMC approach with blockwise sampling. IEEE Trans Commun, 2016, 64: 3697–3707
- 31 Li Q, Zhang J, Bai L, et al. Performance analysis and system design for hierarchical modulated BICM-ID. IEEE Trans Wireless Commun, 2014, 13: 3056–3069
- 32 Chen C, Bai L, Yang Y, et al. Error performance of physical-layer network coding in multiple-antenna two-way relay systems with outdated CSI. IEEE Trans Commun, 2015, 63: 3744–3753
- 33 Li M, Bai L, Yu Q, et al. Optimal beamforming for dual-hop MIMO AF relay networks with cochannel interferences. IEEE Trans Signal Process, 2016, 65: 1825–1840
- 34 Yu Q Y, Meng W X, Yang M C, et al. Virtual multi-beamforming for distributed satellite clusters in space information networks. IEEE Wireless Commun, 2016, 23: 95–101
- 35 Jia M, Gu X, Guo Q, et al. Broadband hybrid satellite-terrestrial communication systems based on cognitive radio toward 5G. IEEE Wireless Commun, 2016, 23: 96–106
- 36 Han S, Xu S, Meng W, et al. An agile confidential transmission strategy combining big data driven cluster and OBF. IEEE Trans Veh Technol, 2017, 66: 10259–10270
- 37 Sun W, Yu Q, Meng W, et al. Transmission mechanism and performance analysis of multiuser opportunistic beamforming in Rayleigh and Rician fading channels. IEEE Trans Veh Technol, 2018, 67: 9459–9473
- 38 Jia M, Liu X, Yin Z, et al. Joint cooperative spectrum sensing and spectrum opportunity for satellite cluster communication networks. Ad Hoc Netw, 2017, 58: 231–238
- 39 Xu J D, Yuen C, Huang C W, et al. Reconfiguring wireless environments via intelligent surfaces for 6G: reflection, modulation, and security. Sci China Inf Sci, 2023, 66: 130304
- 40 Xu W, Huang Y M, Wang W, et al. Toward ubiquitous and intelligent 6G networks: from architecture to technology. Sci China Inf Sci, 2023, 66: 130300
- 41 韩永锋, 张晨, 张更新. 基于深度强化学习的卫星动态资源管理研究综述. 见: 第十六届卫星通信学术年会论文集, 2020. 37–43
- 42 Zhao H, He D, Kang Z, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) with dual-mode index modulation. IEEE Wireless Commun Lett, 2021, 10: 991–995
- 43 Zhang X, Bie H, Ye Q, et al. Dual-mode index modulation aided OFDM with constellation power allocation and low-complexity detector design. IEEE Access, 2017, 5: 23871–23880
- 44 An S X, Lu Z P, Wang H, et al. A turbo coded LoRa-index modulation scheme for IoT communication. In: Proceedings of the 21st International Conference on Communication Technology (ICCT), 2021. 736–740
- 45 An S X, Wang H, Sun Y, et al. Time domain multiplexed LoRa modulation waveform design for IoT communication. IEEE Commun Lett, 2022, 26: 838–842
- 46 Yu Q, Wang H, Lu Z, et al. Group-based CSS modulation: a novel enhancement to LoRa physical layer. IEEE Wireless Commun Lett, 2022, 11: 660–664
- 47 Hou Z, Zhou Y, Shi J, et al. Doppler rate estimation for OFDM based communication systems in high mobility. In: Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Hangzhou, 2013
- 48 Tian D, Zhao Y, Tong J, et al. Frequency offset estimation for 5G based LEO satellite communication systems. In: Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Changchun, 2019. 647–652
- 49 Li L H, Huang J P, Chang K X, et al. Large Doppler frequency offset estimation for LEO satellite communication system based on 5G TRS. In: Proceedings of IEEE International Conference on Satellite Computing, 2023
- 50 Liu Z M, Wu Y F, Wei X, et al. 6G satellite-terrestrial convergence network on application scenarios, architecture and key technical challenges. Radio Commun Technol, 2022, 48: 1058–1064 [刘哲铭, 吴云飞, 魏肖, 等. 6G 星地融合网络应用场景、架构与关键技术挑战. 无线电通信技术, 2022, 48: 1058–1064]
- 51 Zhang T T, Wu N, Yao H P. Research on intelligent networking architecture for the integrated space-terrestrial networks. Space-Integrated-Ground Inform Netw, 2022, 3: 47–55 [张婷婷, 武楠, 姚海鹏. 天地融合网络智能组网体系架构研究. 天地一体化信息网络, 2022, 3: 47–55]
- 52 Fu S H, Zhou D, Sheng M, et al. An architecture and network slicing technology in space-air-ground-sea integrated

- network. *Mobile Commun*, 2021, 45: 8–14 [付书航, 周笛, 盛敏, 等. 空天地海一体化网络体系架构与网络切片技术. 移动通信, 2021, 45: 8–14]
- 53 Li D, Zhu D, Shen J. Networking architecture and slicing technology of space-ground cooperative network based on full-dimension definability. *Chin J Eng Sci*, 2021, 23: 30–38 [李丹, 朱棣, 申涓. 全维可定义的天地协同组网架构与切片技术研究. 中国工程科学, 2021, 23: 30–38]
- 54 Tan S H, Jin F L, Dun C Y, et al. Architecture design and intelligent management of space-air-ground integrated network. *Inform Technol Netw Secur*, 2021, 40: 84–89 [谭诗翰, 金凤林, 顿聪颖, 等. 空天地一体化网络系统架构设计与智能管理. 信息技术与网络安全, 2021, 40: 84–89]
- 55 Xu H, Miao D S, Kang S L, et al. Network architecture and key technologies for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system. *Space-Integrated-Ground Inform Netw*, 2020, 1: 2–10 [徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术. 天地一体化信息网络, 2020, 1: 2–10]
- 56 Sun S H, Dai C Q, Xu H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G. *J Chongqing Univ Posts Telecommun (Nat Sci Ed)*, 2021, 33: 891–901 [孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2021, 33: 891–901]
- 57 Sun J C, Sun J Y, Miao D S, et al. Thoughts on the standardization evolution of 5G NTN network architecture. *Telecommun Sci*, 2023, 39: 76–86 [孙建成, 孙嘉颖, 缪德山, 等. 5G NTN 网络架构标准化演进的思考. 电信科学, 2023, 39: 76–86]
- 58 Xu H, Sun S H. Research on network architecture for the space-integrated-ground information network in 6G. *Space-Integrated-Ground Inform Netw*, 2021, 2: 2–9 [徐晖, 孙韶辉. 面向 6G 的天地一体化信息网络架构研究. 天地一体化信息网络, 2021, 2: 2–9]
- 59 Liu X F, Xu H, Song Y Q. Resource management architecture and technology for coordination of computing and networking in the satellite-terrestrial integrated network. In: *Proceedings of SPIE*, 2023 [刘险峰, 徐晖, 宋雅琴, 等. 面向星地融合的算力网络资源管控架构和关键技术. 见: 2023 卫星网络与空间应用技术论坛, 2023]
- 60 Song Y Q, Xu H, Liu X F, et al. Cloud-edge collaboration architecture and key technologies for 6G integrated satellite and terrestrial network. *Space-Integrated-Ground Inform Netw*, 2023, 4: 3–11 [宋雅琴, 徐晖, 刘险峰, 等. 面向 6G 星地融合的云边协同网络架构和关键技术. 天地一体化信息网络, 2023, 4: 3–11]
- 61 Bao C X, Zhou D, Sheng M, et al. Resource scheduling in satellite networks: a sparse representation based machine learning approach. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2021. 1–6
- 62 Bao C, Sheng M, Zhou D, et al. Toward intelligent cross-domain resource coordinate scheduling for satellite networks. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2023, 22: 9610–9625
- 63 Chowdhury P, Atiquzzaman M, Ivancic W. Handover schemes in satellite networks: state-of-the-art and future research directions. *IEEE Commun Surv Tut*, 2006, 8: 2–14
- 64 Chen Q, Yang L, Guo J M, et al. LEO mega-constellation network: networking technologies and state of the art. *J Commun*, 2022, 43: 177–189 [陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状. 通信学报, 2022, 43: 177–189]
- 65 Xu H, Zhou X. A non-cooperative differential game model for frequency reuse based channel allocation in satellite networks. *Wireless Pers Commun*, 2014, 79: 405–416
- 66 Zeng G, Zhan Y, Xie H. Channel allocation for mega LEO satellite constellations in the MEO-LEO networked telemetry system. *IEEE Int Things J*, 2022, 10: 2545–2556
- 67 Wang J, Sun L, Zhou J, et al. An adaptive dynamic channel allocation algorithm based on a temporal-spatial correlation analysis for LEO satellite networks. *Appl Sci*, 2022, 12: 10939
- 68 Huang Y, Wu S, Zeng Z, et al. Sequential dynamic resource allocation in multi-beam satellite systems: a learning-based optimization method. *Chin J Aeronautics*, 2023, 36: 288–301
- 69 Wu Y, Hu G, Jin F, et al. A satellite handover strategy based on the potential game in LEO satellite networks. *IEEE Access*, 2019, 7: 133641
- 70 He S X, Wang T Y, Wang S W. Load-aware satellite handover strategy based on multi-agent reinforcement learning. In: *Proceedings of IEEE Global Communications Conference*, 2020. 1–6
- 71 Li J, Xue K, Liu J, et al. A user-centric handover scheme for ultra-dense LEO satellite networks. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2020, 9: 1904–1908
- 72 Zhang S, Liu A, Han C, et al. A network-flows-based satellite handover strategy for LEO satellite networks. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2021, 10: 2669–2673
- 73 Liu H T, Wang Y C, Wang Y X. A successive deep Q-learning based distributed handover scheme for large-scale

- LEO satellite networks. In: Proceedings of the 95th Vehicular Technology Conference, 2022. 1–6
- 74 Chen X, Luo Z. Handover-aware downlink beamforming design for LEO multibeam satellite communications. *IEEE Wireless Commun Lett*, 2023, 12: 947–951
- 75 Yang S, Chen R, Cui L, et al. Intelligent segment routing: toward load balancing with limited control overheads. *Big Data Min Anal*, 2023, 6: 55–71
- 76 Liu J, Luo R, Huang T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network. *IEEE Access*, 2020, 8: 155136–155144
- 77 Wang P, Zhang X, Zhang J, et al. Analysis and optimization on partition-based caching and delivery in satellite-terrestrial edge computing networks. *China Commun*, 2023, 20: 252–285
- 78 Liu R P, Hu B, Li H Q. Inter-satellite handover method based multi-objective optimization in satellite-terrestrial integrated network. *Space-Integrated-Ground Inform Netw*, 2023, 4: 59–66 [刘人鹏, 胡博, 李鹤群. 星地融合网络中基于多目标优化的星间切换决策方法. 天地一体化信息网络, 2023, 4: 59–66]
- 79 Wu X W, Jiao Z F, Ling X. High-efficiency space-based computing for satellite communications in 6G. *Mobile Commun*, 2021, 4: 50–53 [吴晓文, 焦侦丰, 凌翔. 6G 中的卫星通信高效天基计算技术. 移动通信, 2021, 4: 50–53]
- 80 IMT-2020(5G) 推进组. 基于 AI 的智能切片管理和协同. 白皮书, 2019
- 81 Liu Y Q. Design and implementation of integrated heterogeneous computing processing system. Dissertation for Master Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019 [刘运麒. 一体化异构计算处理系统设计与实现. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2019]
- 82 Zhou Y C, Yan S, Peng M G. Intent-driven 6G radio access network. *Chinese J Int Things*, 2020, 4: 72–79 [周洋程, 闫实, 彭木根. 意图驱动的 6G 无线接入网络. 物联网学报, 2020, 4: 72–79]
- 83 Saad W, Bennis M, Chen M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*, 2019, 34: 134–142
- 84 Wang H M. 6G vision: unified network enabling intelligent megalopolis. *ZTE Commun*, 2019, 25: 55–58 [王海明. 6G 愿景: 统一网络赋能智慧城市群. 中兴通讯技术, 2019, 25: 55–58]
- 85 IDC. 2018–2019 中国人工智能计算力发展评估报告. 2020. <http://www.doc88.com/p-29199085709289.html>
- 86 Wang X, Teraki Y, Umehira M, et al. A usage aware dynamic spectrum access scheme for interweave cognitive radio network by exploiting deep reinforcement learning. *Sensors*, 2022, 22: 6949
- 87 Sumithra Sofia D, Shirly Edward A. Overlay dynamic spectrum sharing in cognitive radio for 4G and 5G using FBMC. *Mater Today-Proc*, 2023, 80: 2781–2785
- 88 Xie B Y. Research on NOMA-based dynamic spectrum sharing technology in integrated satellite-terrestrial networks. Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 [谢冰玉. 基于 NOMA 的星地一体化网络动态频谱共享技术研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022]
- 89 Liu F, Yuan W J, Yuan J H, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: overview and prospect. *J Radar*, 2021, 10: 467–484 [刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望. 雷达学报, 2021, 10: 467–484]
- 90 Yang M C, Guan X, Miao X X. Spectrum sharing schemes in integrated satellite-terrestrial network. In: Proceedings of the 37th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2019), 2019. 1–14
- 91 Zhang L X, Sui Y S, Shi F. Efficient spectrum resource sharing method in hyperdense 6G network. *J Army Eng Univ PLA*, 2023, 2: 71–76 [张凌瑄, 隋元松, 石芳. 超密集 6G 网络中的高效频谱资源共享方法. 陆军工程大学学报, 2023, 2: 71–76]
- 92 Zhang X Y, Pan J. Dynamic spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial systems. *Radio Commun Technol*, 2021, 47: 633–637 [张晓燕, 潘冀. 星地混合系统的动态频谱共享. 无线电通信技术, 2021, 47: 633–637]
- 93 Konishi M, Nishimaki T, Shibata Y, et al. A study of co-channel spectrum sharing system between HAPS and terrestrial mobile communication networks. In: Proceedings of the 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), 2020. 1–5
- 94 Sharma S K, Chatzinotas S, Arapoglou P D. Satellite Communications in the 5G Era. London: Institution of Engineering and Technology, 2018 [张晓燕, 李明, 刘燕, 等. 5G 时代的卫星通信. 北京: 国防工业出版社, 2022]
- 95 Liu R, Zhu S B, Li C Q, et al. Review of spectrum sensing and resource allocation in cognitive satellite communication. *Telecommun Eng*, 2021, 61: 1048–1058 [刘瑞, 朱诗兵, 李长青, 等. 认知卫星通信频谱感知及资源分配技术综述. 电讯技术, 2021, 61: 1048–1058]
- 96 Liu Q Y, Zhang Z H, Li F C, et al. Dynamic spectrum sharing based on blockchain in 6G. *Mobile Commun*, 2020, 44: 44–47 [刘秋妍, 张忠皓, 李福昌, 等. 基于区块链的 6G 动态频谱共享技术. 移动通信, 2020, 44: 44–47]

- 97 杨亮, 李钊. 一种基于区块链技术的 6G 动态频谱共享方法. CN202211023022.0, 2022-12-27
- 98 Liu L, Liang W, Mang G, et al. Blockchain based spectrum sharing over 6G hybrid cloud. In: Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), 2021. 492–497
- 99 Wang H, Wang J, Ding G, et al. Robust spectrum sharing in air-ground integrated networks: opportunities and challenges. IEEE Wireless Commun, 2020, 27: 148–155
- 100 Ding P, Liu X, Wang Z, et al. Distributed Q-learning-enabled multi-dimensional spectrum sharing security scheme for 6G wireless communication. IEEE Wireless Commun, 2022, 29: 44–50
- 101 Wang L C, Peng H R, Huang A C S, et al. Latest advances in spectrum management for 6G communications. In: Proceedings of the 30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), 2021. 295–297
- 102 Cassiau N, Noh G, Jaeckel S, et al. Satellite and terrestrial multi-connectivity for 5G: making spectrum sharing possible. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2020. 1–6
- 103 Zhang X, Jia M, Gu X, et al. Intelligent spectrum management based on radio map for cloud-based satellite and terrestrial spectrum shared networks. China Commun, 2021, 18: 108–118
- 104 Zhang X Y, Tang C, Chen Y Y. A method of weighted cooperative spectrum sensing for NGSO-GSO downlink communication. Wireless Netw, 2024. doi: 10.1007/s11276-024-03656-x
- 105 Mang G. Blockchain based spectrum sharing over 6G hybrid cloud. Appl Electron Tech, 2021, 47: 10–14 [芒戈. 面向 6G 混合云频谱共享的区块链技术. 电子技术应用, 2021, 47: 10–14]
- 106 Du L, Fu Y, Chen Y, et al. Eigenvalue-based spectrum sensing with small samples using circulant matrix. Symmetry, 2021, 13: 2330

Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication

Shanzhi CHEN^{1,2*}, Shaohui SUN^{2,3}, Shaoli KANG^{2,3}, Hui XU^{2,3}, Li SU⁴, Xiaoyan ZHANG⁵, Bo HU⁶, Wei ZHANG⁷ & Zhigang YU⁸

1. China Information Communication Technology, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, Beijing 100083, China;
3. C-ICT Mobile Communication Technology Co., Ltd, Beijing 100083, China;
4. State Key Laboratory of Space Network and Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
5. The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China;
6. School of Computer Science, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China;
7. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
8. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

* Corresponding author. E-mail: chensz@cict.com

Abstract The integration of satellite communication and terrestrial mobile communication is developing from 5G system compatibility to 6G system integration. Through the advantage complementary and close integration of satellite network and terrestrial network, 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication (ISTMC) will expand the network coverage and improve the overall efficiency of the network, thus realizing the three-dimensional seamless global coverage network. This paper summarizes the development background and trend of ISTMC, analyzes the requirements and technical challenges of 6G ISTMC, and studies the key technologies of 6G ISTMC from wireless transmission, network architecture, resource management and mobility management, space-based computing, spectrum sharing and other aspects in view of a series of problems such as complex network architecture design, low wireless transmission efficiency and difficult network quality assurance. In view of each key technology, this paper first analyzes the development status, then puts forward innovative methods or algorithms, and carries out corresponding performance evaluation to verify their effectiveness.

Keywords 6G, integrated satellite-terrestrial mobile communication, multi-beam coordination, flexible and configurable network architecture, frequency sharing, mobility management, space-based computing