

面向6G的星地融合无线传输技术

徐常志^{*①②} 靳一^② 李立^② 张学娇^② 谢天娇^②
汪晓燕^② 李明玉^③ 曹振新^①

^①(东南大学毫米波国家重点实验室 南京 210096)

^②(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

^③(重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044)

摘要: 随着5G移动通信网络走向商业化,围绕新一代移动通信系统(6G)的发展愿景、能力需求与关键技术开展研究正在成为新的热点。首先,该文概括了未来6G可能涉及的星地深度融合、新频段通信、分布式协作MIMO和智能通信等关键技术方向,重点探讨了基于星地深度融合的天地一体化网络(SGIN);然后,针对可能存在的两种典型网络拓扑架构,分析了星间高速链路、星地馈电链路和星地用户链路的特点和技术要求,综述了3种不同类型传输链路的高速通信进展情况。最后,对未来6G天地互联网络亟需突破的光学相控阵多用户接入、高效能星地激光通信和光电一体化组网等关键技术进行分析与展望,以期为后续相关研究指明方向。

关键词: 6G; 星地深度融合; 星地馈电链路; 光学相控阵; 光电一体化组网

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0028-09

DOI: 10.11999/JEIT200363

Wireless Transmission Technology of Satellite-terrestrial Integration for 6G Mobile Communication

XU Changzhi^{①②} JIN Yi^② LI Li^② ZHANG Xuejiao^② XIE Tianjiao^②
WANG Xiaoyan^② LI Mingyu^③ CAO Zhenxin^①

^①(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(China Academy of Space Technology-Xi'an, Xi'an 710100, China)

^③(School of Microelectronics and Communication Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the commercialization of 5G mobile communication networks, researches on the development vision, capability requirements and key technologies of the new generation mobile communication systems (6G) are becoming new hotspots. Firstly, the key technical fields are summarized that may be involved in the future 6G communication, including the deep satellite-terrestrial integration, the new spectrum communication, the distributed cooperative MIMO and intelligent communication. The Space-Ground Integration Network (SGIN) based on the deep satellite-terrestrial integration is discussed further. Secondly, for the two possible network topologies, the characteristics and technical requirements of the interstellar high-speed link, the satellite-terrestrial feeder links and the user links are analyzed. The progress of high-speed communication applied to three different types of transmission links is summarized. In the end, the key technologies which are urgently needed to break through in the SGIN are analyzed and prospected, such as the multiple-access based on optical phased array, the high-efficiency satellite-terrestrial laser communication and the optoelectronic hybrid networking, and the directions are pointed out for the subsequent related researches.

Key words: 6G; Deep satellite-terrestrial integration; Satellite-terrestrial feeder links; Optical phased array; Optoelectronic hybrid networking

收稿日期: 2020-05-08; 改回日期: 2020-08-26; 网络出版: 2020-09-02

*通信作者: 徐常志 sandy_xu@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61801377), 国家重点研发计划项目(2019YFB1803102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801377), The National Key Research and Development Program (2019YFB1803102)

1 引言

5G移动通信网络于2019年10月底开始商用,学术界和工业界围绕新一代移动通信系统(6G)的发展愿景、能力需求和核心技术进行了探索性研究。文献[1]构思了由“智慧连接”、“深度连接”、“全息连接”和“泛在连接”共同组成的“一念天地,万物随心”的6G总体愿景,重点分析了实现此愿景的挑战与潜在候选技术,以期为6G技术发展提供方向性指引。文献[2]探讨了通过扩展移动通信系统的覆盖范围和实现万物互联来构建泛在的智能移动社会的6G愿景,分析了6G的技术发展趋势、挑战以及可能的关键技术。文献[3]围绕6G应用范畴的再扩展与技术性能的再提升问题,概括了星地融合与覆盖扩展、毫米波与太赫兹通信、数据驱动的人工智能与内生安全、分布式协作MIMO等可能涉及的技术领域,展望了实现广域物联网所亟需突破的若干关键技术。

截止目前,国内外尚未就6G形成一致的共识。根据移动通信每10年更新1代的发展规律,6G可预期的商用时间约为2030年^[4]。可以预计,未来6G将具备更广阔的覆盖范围、更大的通信容量、更小的传输时延和更多的用户连接能力,辅以人工智能、大数据、云计算和区块链等技术,实现更加泛在、智能、安全、可信的公共移动信息基础服务能力^[5]。为实现这一目标,本文从网络通信角度出发,概括总结了一些认可度较高的核心技术,具体为:

(1) 星地深度融合:5G移动通信系统的覆盖范围受限于陆地,无法经济有效地解决航空、航海、沙漠等人口稀少地区,以及地震、火灾和泥石流等应急场景下的通信难题。充分利用地面移动通信的大容量传输能力,结合天基网络的广域覆盖优势,构建星地深度融合的天地互联网络系统,从而实现6G无处不在的宽带连接^[6];

(2) 新频段通信:5G移动通信系统使用的6 GHz以下频段,非常拥挤,且可用带宽有限。基于此,B5G正在考虑使用大带宽的毫米波频段(24.25~27.5 GHz, 37~43.5 GHz, 66~71 GHz),甚至有些学者认为太赫兹通信是未来6G的核心技术^[7],但均存在器件不成熟、信道测量与建模难和窄波束精密跟踪等难题,距离工程应用尚有距离。目前,以近红外作为业务波段的激光通信已应用于星间骨干链路,将会是6G应用的主要通信手段。此外,可见光、中红外激光等可能应用于6G场景的新频段通信,也值得去探索研究;

(3) 大规模分布式协作MIMO:面向未来6G大幅提升频谱效率的发展需求,我国学者提出了基于

网络云化与虚拟化的大规模分布式协作MIMO技术,充分利用时间、频率和空间3个维度资源,具备优异的传输性能和广阔的发展前景^[8,9]。进一步地,基于传统Shannon信息论及其扩展形式的非构造性特点,探讨了通过信道极化和特征模式传输来构造性逼近信道容量,从而为6G通信潜能的挖掘指明了方向^[10];

(4) 智能通信:将人工智能与通信系统有机融合,可显著提升移动通信系统的效能。早期的人工智能与通信融合局限于网络层和应用层,随着以深度学习为代表的机器学习飞速发展,将机器学习用于通信的物理层成为了当前的研究热点^[11,12]。

本文重点围绕基于星地深度融合的天地互联网络进行探讨,针对6G可能存在的两种网络拓扑架构,深入分析了星间高速链路、星地馈电链路、星地用户链路的特点和技术发展需求,综述了以上3种不同类型链路的高速通信进展情况。然后,对6G亟需突破的光学相控阵多用户接入、高效能星地激光通信和光电一体化组网等关键技术进行分析与展望。最后,进行了总结概述。

2 典型的星地融合网络架构

2020年4月20日,国家发展改革委员会首次将5G与卫星互联网建设同时纳入“新基建”范畴,使得未来两者深度融合上升为国家战略性工程,从而实现6G的宽带互联。6G将集成地面移动通信网络和卫星互联网络,借助智能移动性管理技术,在陆、海、空、天、地等多种复杂场景中提供高速互联服务,实现全球覆盖、按需服务、随遇接入、安全可信的网络通信能力^[2]。目前,一种典型的能够实现6G功能的网络架构主要采用“骨干网+接入网”的模式^[13],其总体框架如图1所示。该架构由天基网络和地面网络组成,天基网络包括天基骨干网和接入网络,地面网络包括Internet互联网和移动通信网络。其中,天基骨干网主要由同步地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星和地面站组成,为各类天基接入网提供全球范围的互联服务。天基接入网是由多颗中轨(Middle Earth Orbit, MEO)及低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星组成独立的星座网络,各星座网络独立管控和为用户提供服务。天基接入网通过一颗或多颗卫星接入天基骨干网,以为用户提供全球无处不在的互联互通服务。

随着航天技术的蓬勃发展,可实现全球无盲区覆盖的中低轨星座网络再次掀起了新的发展热潮。其中,最具代表性的有“另外的30亿(O3b)”、“一网(OneWeb)”和“星链(Starlink)”^[14],以及

我国航天科技集团的“鸿雁”、航天科工集团的“虹云”和部分民营企业筹划的卫星星座^[15],使人们看到一种新的6G网络架构,其总体框架如图2所示。6G系统通过卫星网络与地面网络相互融合,取长补短,可共同构成全球无缝覆盖的空域、陆地、海洋一体化综合通信网,满足用户无处不在的多种业务需求。在地面网络无法覆盖的偏远地区、飞机或者远洋舰艇上,卫星网络可提供可靠的网络服务,将6G网络延伸到地面网络无法到达的地方。

低轨星座不仅可以单独运行,也可以作为一个“接入网”与GEO卫星组成“主干网+接入网”的网络架构。“主干网+接入网”网络协议更复杂,但境外测控更简单,延迟更低。

综上所述,6G无论是采用“主干网+接入网”架构,还是低轨星座网络的架构,要实现宽带可靠的服务能力,均需要强大的物理层通信链路作为支撑。这里,6G网络系统主要包括星间链路、星地馈电链路和星地用户链路3种类型,不同类型链路的信道特性导致其潜在的候选技术存在差异,具体为:

(1)星间高速链路:属于自由空间传输信道,链路距离远,激光通信是其主要的发展方向;

(2)星地馈电链路:在卫星与地面进行大容量通信的过程中,作为信息载体的毫米波或激光经过地球表面大气层时,容易受到云、雾、降雨和大气湍流等天气因素的严重影响,导致可用度不高,实际应用效能受限。高效能的新型激光通信和激光/微波混合传输是其未来的主要选择;

(3)星地用户链路:随着馈电链路选用高频段的毫米波或激光进行通信时,可完全将Ka频段分配给用户链路使用,实现系统容量的大幅提升。

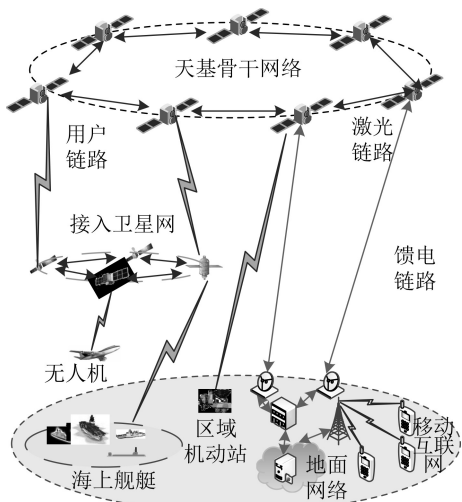


图1 “主干网+接入网”的网络架构

3 星地融合场景下的高速通信进展

本小节将分别从星间高速链路、星地馈电链路和星地用户链路出发,综述国内外高速通信的最新进展,分析其未来的发展趋势。

3.1 星间高速链路

激光通信具有信道容量大、保密性好、抗电磁干扰能力强和无需频率使用许可等优点,成为星间高速通信的主要发展方向。欧洲、美国和日本已陆续开展了多次星间激光通信试验,取得了一系列国际领先的研究成果。表1给出了2020年在轨和在研的典型激光通信链路。

随着国内外各类天基信息系统的建设提速,选用GEO卫星作为星间高速数据中继节点的需求与日剧增,GEO激光中继链路将成为构建天基信息网络的基石。2001年,欧空局(ESA)在SILEX计划中首次实现了高轨对低轨的双向激光链路,速率为50 Mbps。目前,在轨运行的高轨卫星激光链路主要有ESA的欧洲数据中继系统(EDRS)^[16]、美国的激光通信中继演示验证(LCRD)^[30]和日本的高速通信先进激光仪器(HICALI)^[31,32]。2016年,EDRS首颗正样星发射升空,正式提供商用激光数据中继服务,标志着星间激光链路已进入业务运营阶段。

与GEO系统相比,LEO通信系统具有传输时延低、终端体积小、发射成本低和便于快速部署等优点。将激光通信应用于中低轨星间链路,可在较短的建链时间内实现大容量数据传输。LEO-LEO链路方面,美国和德国在2008年联合进行了NFIRE和TerraSAR-X之间的高速激光通信试验,数据速率高达5.65 Gbps^[33]。面向未来商业航天的发展需要,国外相继开展了大量的立方卫星激光链路验证,如TESAT的CUBELCT和CUBESOTA等计划。

3.2 星地馈电链路

随着卫星载荷的数量越来越多,时、空、频分

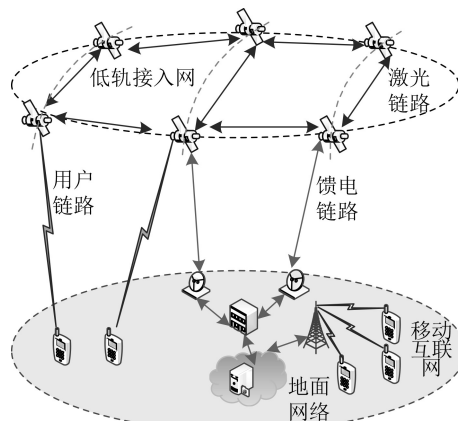


图2 低轨星座网络的架构

表1 国内外星间激光链路代表性研究成果

序号	任务名称	链路类型	国家/地区	发射时间	通信速率	链路状态	参考文献
1	EDRS/ Copernicus/ Airbus A310 AOC	高轨-地、 高轨-低轨、 高轨-飞机	欧洲	2016~2019	1.8 Gbps@BPSK	在轨	文献[16,17]
2	OCS-D	低轨-低轨 低轨-地	美国	2017	100 Mbps@OOK (立方星)	运行	文献[18]
3	HICALI/ CubeSOTA	高轨-低轨 高轨-地	日本	2021	10 Gbps@DPSK		文献[19]
4	EDRS-D	高轨-高轨	欧洲日本	2025	3.6 Gbps~10 Gbps @BPSK		文献[20]
5	CLICK/ Q4/ TBIRD	低轨-低轨	欧洲美国	2020~2024	100 Mbps~1 Gbps @OOK, BPSK; 200 Gbps(WDM) (立方星)	计划	文献[21-28]
6	Scylight	高轨-高轨、 高轨-低轨、 高轨-地	欧洲	2025	100 Gbps		文献[29]

分辨率越来越高，对星地馈电链路海量数据实时传输的需求与日剧增。目前，星地馈电链路主要采用C、Ku和Ka等微波频段，可用带宽非常受限，难以满足不断增长的高速传输需求。因此，星地馈电传输正朝着高频段、大带宽和小型化的毫米波和激光通信方向发展。这里，将分别从微波高速传输、星地激光通信、微波/激光混合传输等方面进行综述。

3.2.1 微波高速传输

国外IPSTAR, Spaceway和ViaSat等多颗通信卫星馈电链路主要使用Ka频段。为应对降雨对Ka信号带来的衰减，提升星地链路传输效能，这些卫星通过上行链路的功率控制和下行链路的自适应编码调制自动对链路衰减做出响应，从而实现高于99.6%的链路可用率^[34,35]。

随着Ka频段频谱资源的使用趋于饱和，Q/V频段的大带宽、窄波束和小型化等优势日益明显。一方面，可提升单信关站传输能力和增加管理的用户波束数量，减少所需的信关站，从而降低系统建设总成本；另一方面，可完全将Ka频段分配给用户链路使用，实现系统容量的大幅提升^[36]。然而，Q/V频段用作对地通信时，大气衰减明显高于Ka频段，且在雨、雪、雾等复杂天气环境下，空间链路损耗急剧增加。现有技术很难建立Q/V频段的降雨衰减模型，无法估算星地链路的通断，只能通过空间试验测试获得星地信道有效数据。意大利航空局在AlphaSat平台开展了Q/V频段信标测量试验，通过自适应编码调制技术，对Q/V频段在未来商业应用中的性能进行了评估^[37]。2019年12月，航天五院西安分院在实践二十号卫星上测试了Q/V频段的大气传输和雨衰特性，进行了抗雨衰试验，成功验

证了采用Q/V关口站的载荷系统方案，为未来超大容量通信卫星的研制奠定了技术基础。

3.2.2 星地激光通信

星地激光通信先后经历了理论研究、试验验证和工程应用3个阶段，具有代表性的已发射星地激光通信试验有：2010年，德国在地面站和NFIRE卫星(LEO)之间实现了5.625 Gbps的星地光通信链路，通信时长约为8 min^[38-40]。2014年，美国光学有效载荷项目实现了第1个国际空间站(ISS)对地约400 km的激光通信^[41]。美国的LCRD计划和日本的HICALI均开展了高轨对地的激光链路实验，验证10~100 Gbps的高速激光对地链路^[42,43]。2019年，ESA与日本计划共同开发高轨对地的激光数据传输业务，将于2025年实现全球空间激光通信网路业务。国内方面，哈工大的“海洋二号”和“实践十三卫星”、中科院的“墨子号”先后开展了星地激光通信试验。航天五院西安分院通过实践二十号卫星，实现了国际首个QPSK相干体制的星地激光通信链路，卫星激光终端如图3所示，其速率高达10 Gbps，为世界在轨的激光链路最高速率。



图3 实践二十号卫星激光终端

3.2.3 微波/激光混合传输

星地激光链路会受到恶劣天气和大气湍流等影响,导致其链路可用率较低,限制了其在星地馈电传输的应用。为解决此瓶颈难题,微波/激光混合传输思路应运而生:在星地之间分别建立微波和激光两条链路,当天气极好时,采用激光进行高速通信;当天气恶劣时,采用微波链路进行辅助传输,以保障链路的高可用度。美国宾州大学、弗吉尼亚大学等开展了微波/激光混合传输试验,显著提升通信容量的同时,实现了99.999%的链路可靠性^[44-46]。此外,实施了“自由空间光试验网计划”,搭建了一个综合自由空间光学和射频技术的高宽带通信系统,通过FSO和射频无缝切换,实现100%数据送达,且性能仍有提升空间^[47]。

3.3 用户链路

星地用户链路主要以低频段为主,国外正在尝试应用高频段(Ka)来实现卫星对地面用户通信。美国Spaceway3卫星系统采用了Ka频段、多波束及星上快速包交换技术,使终端之间能够实现网状通信,大大缩短了传输时延。欧洲新一代通信卫星KA-SAT设计了82个Ka波段点波束,通信总容量超过70 Gbps。

4 有待突破的关键技术

未来6G天地互联网络将是卫星互联网、地面互联网和移动通信网等多个异构网络的一体化融合,现有的各通信链路能力仍难以满足其跨越式发展需求,需重点从以下关键技术进行突破。

4.1 基于光学相控阵的多用户接入技术

通过星际链路实现多颗卫星互联互通,形成空间高速光通信网络,是星间激光通信的主要发展趋势。因此,研究激光组网技术迫在眉睫。空间激光组网的首要环节是同时对空间大范围内多个目标的快速捕获对准跟踪(APT)和切换,光束操控装置是APT系统的执行机构,其性能直接影响建链时间和链路稳定性。目前,工程上主要使用机械式、压电陶瓷或音圈电机驱动反射镜来改变光束偏转方向,存在响应带宽低、体积大和功耗高等缺点,无法适应星载设备小型化、低功耗发展需求。此外,单片反射镜无法同时独立控制多个光束。为使激光终端具备多目标接入能力,需要配备多个望远镜或探测器,使得终端重量和功耗成倍增加。

光学相控阵作为一种新型的任意方向光束指向控制技术,可独立控制多个光束的扫描偏转、偏转范围大、分辨率高,且不受机械转动影响,是未来多用户接入技术的发展方向。当前,最为成熟是液晶光学相控阵,仍然存在着响应速度慢、扫描角度

小等缺点,难以克服。发展高性能光学相控阵有以下难点有待突破:

(1) 大规模2维阵列结构:阵列规模越大,光束的发散角越小,扫描控制精度越高,容易与高增益的望远镜相匹配,更符合空间应用的需求,但随之而来会产生大量的功耗,是需要突破的一个难点;

(2) 高速、高效和高精准的相位调制:高速高效的相位调制是实现光束快速灵活扫描的前提,如何采用一种技术途径实现兼具高速度、高效率和高精准的相位控制是需要突破的另外一个难点;

(3) 大角度范围的波束控制:光学相控阵的扫描视场主要受栅瓣影响,需要突破新的器件结构,在亚波长阵列单元间距的前提下实现大扫描视场的波束控制。

上述难点均对光学相控阵的加工工艺提出了更高的要求,通过集成光电子技术来实现光学相控阵成为了新的发展趋势。DARPA在2013年通过集成光电子技术,验证了 64×64 单元阵列的硅基光学相控阵^[48],芯片尺寸为 $576 \times 576 \mu\text{m}^2$ 。其中, 8×8 阵列为基本单元,利用热光移相器调整波前,得到完美MIT图样,通过对整个相控阵周期的操控使MIT图样在横向偏转 6° ,实现了任意方向光束指向的雏形。首先,集成光电子技术能够实现光波导、光栅、调相等光学器件的片上集成,进而实现大规模的2维结构;其次,利用电光、热光等效实现快速、高效的相位调制,对光束进行快速灵活控制;最后,依托现有成熟的CMOS工艺,实现更小的器件单元尺寸。

4.2 高效能的星地激光通信技术

大气湍流是制约星地高速激光通信的主要瓶颈难题,严重时可直接导致链路中断。为对抗大气湍流的恶劣影响,世界各国都在从事高效能的星地激光通信研发,主要的研究方向有:

(1) 自适应光学(AO)预失真:在地面站的上行链路中,采用自适应光学系统进行预校正,以减小卫星接收机的光信号波动。欧洲DLR在真实的湍流场景中,进行了自适应光学预失真试验,以评估AO对发射和接收信道的影响。试验结果表明:光纤耦合效率和观察到的闪烁均有明显改善。在地面实验中,星载激光接收机收集到的功率统计数据显示:应用AO预校正时,上行传输光束性能获得大幅提升^[49]。

(2) 中长波红外激光通信:目前,星地激光通信主要采用800 nm, 1064 nm和1550 nm等近红外波段,但是这些波段受到大气湍流的影响较为严重,导致链路可用率不高。采用中长波红外波段作为载

波波长，在克服大气湍流影响等方面有明显优势，可显著提升星地激光链路对大气信道的适应能力^[50]。

(3) 锋芒激光通信：星地大气信道的传输介质具有随机性、多变性等特点，大气湍流会对所传输的激光光束引入随机横向波矢，从而导致光束性能急剧恶化。基于此，中国科学院在发射端构建了一种特殊的光场分布，使激光在传输过程中逐步消除横向波矢，从而产生能够抑制大气湍流影响的稳态光场。与传统大气湍流抑制方法相比，该方法应用难度和成本明显降低。2019年，中国光电院在传输距离为1 km、存在大气湍流时，实验验证了锋芒光束的接收性能。如图4所示^[51]，与常规高斯光束相比，锋芒光束可保持较为完好的光斑，传输性能提升3个数量级。

(4) 网络级效能提升：采用自适应光学预失真、中长波红外激光和锋芒激光可以显著改善单链路的星地激光效能，但单链路效能的最大化并不意味着全网效能的最优。未来，星间将采用激光进行高速通信，星地采用激光微波混合传输，6G网络本质上是一种激光与微波构成的光电混合网络。因此，通过光电混合网络的资源调度和分配，实现星地传输效能的显著提升，是一个新的研究方向。

4.3 光电混合组网

6G天基骨干传输要求满足激光链路承载的大吞吐量业务，以及不同用户接入时微波链路承载多类型、小吞吐量业务，因此需要研究具有激光和微波两种链路类型的星载光电混合交换技术^[52-54]。星载光电混合交换需要完成激光链路承载的光业务和微波链路承载的电分组业务的交换功能，其总体结构如图5所示。该交换结构具有激光数据输入接

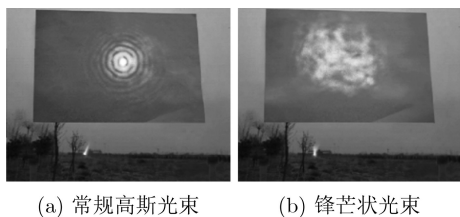


图4 穿过大气湍流的常规高斯光束和锋芒光束的光强模式比较

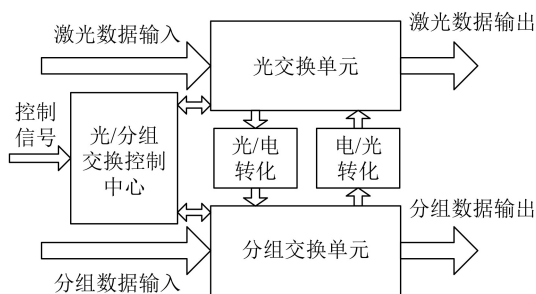


图5 星载光电混合交换结构

口、电信号分组数据输入接口以及控制信号接口，通过光/分组交换控制中心实现对光交换单元和电信号分组交换单元的集中控制，光/电转化及电/光转化模块可实现光电信号混合传输功能。

软件定义网络(SDN)作为一种控制与数据转发分离的新型网络架构，具有灵活性、开放性及可编程性等优点，从而成为未来6G网络架构的发展方向。卫星网络资源受限、成本高且不易维护，非常适合采用SDN的网络架构。目前，软件定义网络技术已经具备一定的研制基础^[55-58]，结合“骨干网+接入网”以及星载光电混合交换的SDN网络架构如图6所示。该网络通过控制平面下发规则对数据平面的各个模块进行编程调用。其中，控制器通过收集的拓扑信息和各个数据平面网络节点反馈的网络状态，根据网络场景变化，自适应地对所设计的数据平面模块，包括光电混合交换器进行调控。这里，数据平面的管理模块主要负责对卫星轨道高度、编队规则及下传节点的选取等进行配置。

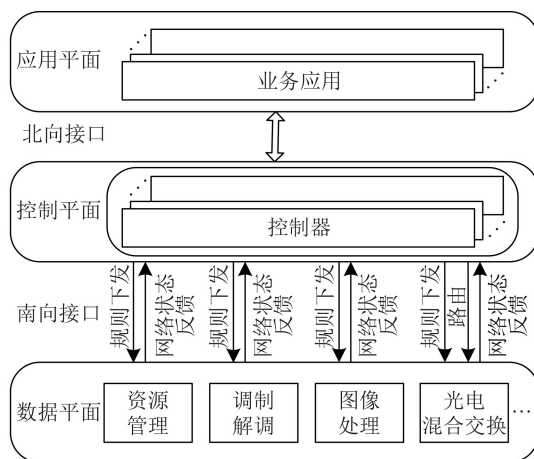


图6 6G软件定义网络的架构

5 结束语

面向现阶段可预计到的6G发展愿景，本文重点探讨了天地互联网络场景下的典型拓扑架构，综述了星间高速链路、星地馈电链路、星地用户链路的高速通信的国内外新进展，对未来6G亟需突破的相控阵多用户接入、高效能星地激光通信和光电一体化组网等关键技术进行了分析与展望。对于6G发展可能涉及的其他关键技术，如新型编码调制、轨道角动量、无蜂窝移动通信以及通信、感知和计算的多功能融合等，并未进行全面阐述。限于作者水平有限，本文仅起到抛砖引玉作用，以期对6G相关技术发展起到牵引作用。

参考文献

[1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景、挑战与关

- 键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).
- ZHAO Yajun, YU Guanghui, and XU Hanqing. 6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(8): 963–987. doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033).
- [2] CHEN Shanzhi, LIANG Yingchang, SUN Shaohui, *et al.* Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218–228. doi: [10.1109/MWC.001.1900333](https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900333).
- [3] 尤肖虎, 尹浩, 邬贺铨. 6G与广域物联网[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 3–11.
- YOU Xiaohu, YIN Hao, and WU Hequan. On 6G and wide-area IoT[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(1): 3–11.
- [4] CableFree. Beyond 5G: The roadmap to 6G and beyond[EB/OL]. <https://www.cablefree.net/wireless-technology/4glte-beyond-5g-roadmap-6g-beyond>, 2017.
- [5] NIEPHAUS C, KRETSCHMER M, and GHINEA G. QoS provisioning in converged satellite and terrestrial networks: A survey of the state-of-the-art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2415–2441. doi: [10.1109/COMST.2016.2561078](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2561078).
- [6] ZHU Xiangming, JIANG Chunxiao, KUANG Linling, *et al.* Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(3): 204–210. doi: [10.1109/MNET.2018.1800164](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800164).
- [7] CHEN Zhi, MA Xinying, ZHANG Bo, *et al.* A survey on Terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1–35.
- [8] YOU Xiaohu, WANG Dongming, SHENG Bin, *et al.* Cooperative distributed antenna systems for mobile communications [Coordinated and Distributed MIMO][J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 35–43. doi: [10.1109/MWC.2010.5490977](https://doi.org/10.1109/MWC.2010.5490977).
- [9] WANG Dongming, WANG Jiangzhou, YOU Xiaohu, *et al.* Spectral efficiency of distributed MIMO systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(10): 2112–2127. doi: [10.1109/JSAC.2013.131012](https://doi.org/10.1109/JSAC.2013.131012).
- [10] 尤肖虎. Shannon信息论与未来6G技术潜能[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(9): 1377–1394.
- YOU Xiaohu. Shannon theory and future 6G's technique potentials[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(9): 1377–1394.
- [11] WANG Tianqi, WEN Chaokai, WANG Hanqing, *et al.* Deep learning for wireless physical layer: Opportunities and challenges[J]. *China Communications*, 2017, 14(11): 92–111. doi: [10.1109/CC.2017.8233654](https://doi.org/10.1109/CC.2017.8233654).
- [12] 尤肖虎, 张川, 谈晓思, 等. 基于AI的5G技术——研究方向与范例[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(12): 1589–1602. doi: [10.1360/N112018-00174](https://doi.org/10.1360/N112018-00174).
- YOU Xiaohu, ZHANG Chuan, TAN Xiaosi, *et al.* AI for 5G: Research directions and paradigms[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2018, 48(12): 1589–1602. doi: [10.1360/N112018-00174](https://doi.org/10.1360/N112018-00174).
- [13] YAO Haipeng, WANG Luyao, WANG Xiaodong, *et al.* The Space-terrestrial integrated network: An overview[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(9): 178–185. doi: [10.1109/MCOM.2018.1700038](https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700038).
- [14] FOUST J. SpaceX's space-Internet woes: Despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12,000 satellites in 2019[J]. *IEEE Spectrum*, 2019, 56(1): 50–51. doi: [10.1109/MSPEC.2019.8594798](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2019.8594798).
- [15] 宋奕辰, 徐小涛, 宋文婷. 国内外卫星移动通信系统发展现状综述[J]. 电信快报, 2019(8): 37–41. doi: [10.3969/j.issn.1006-1339.2019.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1339.2019.08.008).
- SONG Yichen, XU Xiaotao, and SONG Wenting. Overview of the development of satellite mobile communication systems at home and abroad[J]. *Telecommunications Information*, 2019(8): 37–41. doi: [10.3969/j.issn.1006-1339.2019.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1339.2019.08.008).
- [16] HEINE F, SÁNCHEZ-TERCERO A, MARTIN-PIMENTEL P, *et al.* In orbit performance of tesat LCTs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10910: 109100U. doi: [10.1117/12.2510721](https://doi.org/10.1117/12.2510721).
- [17] HAAN H and SIEMENS C. Airborne optical communication terminal: First successful link from Tenerife to the GEO Alphasat[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11133: 1113306. doi: [10.1117/12.2529223](https://doi.org/10.1117/12.2529223).
- [18] ROSE T S, ROWEN D W, LALUMONDIÈRE S, *et al.* Optical communications downlink from a 1.5U Cubesat: OCSD program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 11180: 111800J. doi: [10.1117/12.2535938](https://doi.org/10.1117/12.2535938).
- [19] CARRASCO-CASADO A, DO P X, KOLEV D, *et al.* Intersatellite-link demonstration mission between CubeSOTA (LEO CubeSat) and ETS9-HICALI (GEO satellite)[C]. 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Portland, USA, 2019: 1–5. doi: [10.1109/ICSOS45490.2019.8978975](https://doi.org/10.1109/ICSOS45490.2019.8978975).
- [20] HAUSCHILDT H, LE GALLOU N, MEZZASOMA S, *et al.* Global quasi-real-time-services back to Europe: EDRS Global[J]. *SPIE*, 2018, 11180: 111800X. doi: [10.1117/12.2535952](https://doi.org/10.1117/12.2535952).
- [21] MATHASON B, ALBERT M M, ENGIN D, *et al.* CubeSat lasercom optical terminals for near-Earth to deep space communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10910:

1091005. doi: [10.1117/12.2508047](https://doi.org/10.1117/12.2508047).
- [22] MAYER D J and CAHOY K. CubeSat laser infrared crosslink[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20180006687>, 2018.
- [23] LONG M J. Pointing acquisition and tracking design and analysis for CubeSat laser communication[D]. [Master dissertation], Massachusetts Institute of Technology, 2018.
- [24] VELAZCO J E, GRIFFIN J, WERNICKE D, *et al.* High data rate inter-satellite omnidirectional optical communicator[EB/OL]. The 32nd AIAA/USU Conference on Small Satellites. <http://apdsl.eng.uci.edu/RecentConferences/High%20Data%20Rate%20Inter-Satellite%20Omnidirectional%20Optical%20Communicator.pdf>. 2019.
- [25] VELAZCO J E, GRIFFIN J, WERNICKE D, *et al.* Inter-satellite omnidirectional optical communicator for remote sensing[J]. *SPIE*, 2018, 10769: 107690L. doi: [10.1117/12.2322367](https://doi.org/10.1117/12.2322367).
- [26] ROBINSON B S, BOROSON D M, SCHIELER C M, *et al.* Terabyte infraRed delivery (TBIRD): A demonstration of large-volume direct-to-earth data transfer from low-earth orbit[J]. *SPIE*, 2018, 10524: 105240V. doi: [10.1117/12.2295023](https://doi.org/10.1117/12.2295023).
- [27] PARK E A, CORNWELL D, and ISRAEL D. NASA's next generation ≥ 100 Gbps optical communications relay[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190030264>, 2019.
- [28] HAUSCHILD H, ELIA C, JONES A, *et al.* ESAs ScyLight programme: Activities and status of the high throughput Optical Network "HydRON"[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 11180: 111800G. doi: [10.1117/12.2535935](https://doi.org/10.1117/12.2535935).
- [29] HAUSCHILD H, ELIA C and MOELLER H L. ScyLight-ESA's secure and laser communication technology framework for SatCom[C]. 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Naha, Japan, 2017: 250–254. doi: [10.1109/ICSOS.2017.8357400](https://doi.org/10.1109/ICSOS.2017.8357400).
- [30] EDWARDS B L, ISRAEL D J, and WHITEMAN D E. A space based optical communications relay architecture to support future NASA science and exploration missions[C]. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Kobe, Japan, 2014: S6–1.
- [31] KUBO-OKA T, KUNIMORI H, SUZUKI K, *et al.* Development of "HICALI": High speed optical feeder link system between GEO and ground[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 11180: 1118060. doi: [10.1117/12.2536135](https://doi.org/10.1117/12.2536135).
- [32] KOTAKE H, NAKAMURA J, GODA T, *et al.* Design and verification of a space-grade 10 Gbit/s high-speed transponder for an optical feeder link[J]. *SPIE*, 2019, 10910: 1091012. doi: [10.1117/12.2504367](https://doi.org/10.1117/12.2504367).
- [33] FIELDS R A, KOZLOWSKI D A, YURA H T, *et al.* 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station[J]. *SPIE*, 2011: 44–53. doi: [10.1117/12.894662](https://doi.org/10.1117/12.894662).
- [34] KANEKO K, NISHIYAMA H, KATO N, *et al.* Construction of a flexibility analysis model for flexible high-throughput satellite communication systems with a digital channelizer[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(3): 2097–2107. doi: [10.1109/TVT.2017.2736010](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2736010).
- [35] ROUMELIOTIS A J, KOUROGIORGAS C I, and PANAGOPOULOS A D. Optimal dynamic capacity allocation for high throughput satellite communications systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 596–599. doi: [10.1109/LWC.2018.2881693](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2881693).
- [36] 谢珊珊, 李博. 2019年国外通信卫星发展综述[J]. *国际太空*, 2020(2): 30–37.
- XIE Shanshan and LI Bo. Overview of the development of foreign communication satellites in 2019[J]. *Space International*, 2020(2): 30–37.
- [37] YU Jianjun, LI Xinying, and ZHOU Wen. Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 111101. doi: [10.1063/1.5042364](https://doi.org/10.1063/1.5042364).
- [38] 刁文婷, 宋学瑞, 段崇棣. 星地量子保密通信进展[J]. *空间电子技术*, 2016, 13(1): 83–88. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2016.01.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2016.01.018).
- DIAO Wenting, SONG Xuerui, and DUAN Chongdi. Advances in satellite-ground quantum secure Communication[J]. *Space Electronic Technology*, 2016, 13(1): 83–88. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2016.01.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2016.01.018).
- [39] GREGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, *et al.* Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7923: 792303. doi: [10.1117/12.873532](https://doi.org/10.1117/12.873532).
- [40] GREGORY M, HEINE F, KÄMPFNER H, *et al.* Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on Homodyne BPSK[J]. *SPIE*, 2010, 7587: 75870E. doi: [10.1117/12.847888](https://doi.org/10.1117/12.847888).
- [41] Oaida B V, WU W, ERKMEN B I, *et al.* Optical link design and validation testing of the Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) system[J]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710U. doi: [10.1117/12.2045351](https://doi.org/10.1117/12.2045351).
- [42] LUZHANSKIY E, EDWARDS B, ISRAEL D, *et al.* Overview and status of the laser communication relay demonstration[J]. *SPIE*, 2016, 9739: 97390C. doi: [10.1117/12.2218182](https://doi.org/10.1117/12.2218182).
- [43] WANG J P, BROWNE C A, BURTON C D, *et al.* Performance and qualification of a multi-rate DPSK modem[J]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710Z. doi: [10.1117/12.2057577](https://doi.org/10.1117/12.2057577).
- [44] WU Haiping and KAVEHRAD M. Availability evaluation of ground-to-air hybrid FSO/RF links[J]. *International*

- Journal of Wireless Information Networks*, 2007, 14(1): 33–45. doi: [10.1007/s10776-006-0042-1](https://doi.org/10.1007/s10776-006-0042-1).
- [45] TANG Y, BRANDT-PEARCE M, and WILSON S G. Adaptive coding and modulation for hybrid FSO/RF systems[C]. 2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, USA, 2009: 1644–4649. doi: [10.1109/ACSSC.2009.5469820](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2009.5469820).
- [46] ESLAMI A, VANGALA S, and PISHRO-NIK H. Hybrid channel codes for efficient FSO/RF communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(10): 2926–2938. doi: [10.1109/TCOMM.2010.082710.090195](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2010.082710.090195).
- [47] JUAREZ J C, YOUNG D W, VENKAT R A, *et al.* Analysis of link performance for the FOENEX laser communications system[J]. *SPIE*, 2012, 8380: 838007. doi: [10.1117/12.919928](https://doi.org/10.1117/12.919928).
- [48] SUN Jie, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, *et al.* Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195–199. doi: [10.1038/nature11727](https://doi.org/10.1038/nature11727).
- [49] CALVO R M, POLIAK J, SUROF J, *et al.* Optical technologies for very high throughput satellite communications[J]. *SPIE*, 2019, 10910: 109100W. doi: [10.1117/12.2513819](https://doi.org/10.1117/12.2513819).
- [50] BÜCHTER K D F, HERRMANN H, LANGROCK C, *et al.* All-optical Ti: PPLN wavelength conversion modules for free-space optical transmission links in the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 470–472. doi: [10.1364/OL.34.000470](https://doi.org/10.1364/OL.34.000470).
- [51] ZHANG Ze, LIANG Xinli, GOUTSOULAS M, *et al.* Robust propagation of pin-like optical beam through atmospheric turbulence[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(7): 076103. doi: [10.1063/1.5095996](https://doi.org/10.1063/1.5095996).
- [52] SHANG Yu, GUO Bingli, LI Xin, *et al.* Traffic pattern adaptive hybrid electrical and optical switching network for HPC system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(2): 270–273. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2886014](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2886014).
- [53] ESMAIL M A, RAGHEB A, FATHALLAH H, *et al.* Demonstration of photonics-based switching of 5G signal over hybrid all-optical network[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(13): 1250–1253. doi: [10.1109/LPT.2018.2841974](https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2841974).
- [54] WANG Xiaoyu, VEERARAGHAVAN M, and SHEN Haiying. Evaluation study of a proposed hadoop for data center networks incorporating optical circuit switches[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(8): C50–C63. doi: [10.1364/JOCN.10.000C50](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000C50).
- [55] SHI Yongpeng, CAO Yurui, LIU Jiajia, *et al.* A cross-domain SDN architecture for multi-layered space-terrestrial integrated networks[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 29–35. doi: [10.1109/MNET.2018.1800191](https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1800191).
- [56] DU Jun, JIANG Chunxiao, ZHANG Haijun, *et al.* Auction design and analysis for SDN-based traffic offloading in hybrid satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(10): 2202–2217. doi: [10.1109/JSAC.2018.2869717](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2869717).
- [57] 向敏, 饶华阳, 张进进, 等. 基于图卷积神经网络的软件定义电力通信网络路由控制策略[J]. 电子与信息学报, 待发表. doi: [10.11999/JEIT190971](https://doi.org/10.11999/JEIT190971).
- XIANG Min, RAO Huayang, ZHANG Jinjin, *et al.* Software-defined power communication network routing control strategy based on graph convolution network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, To be published. doi: [10.11999/JEIT190971](https://doi.org/10.11999/JEIT190971).
- [58] 徐璿, 吴慧慈, 陶小峰. 5G网络空间安全对抗博弈[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(10): 2319–2329. doi: [10.11999/JEIT200058](https://doi.org/10.11999/JEIT200058).
- XU Jin, WU Huici, and TAO Xiaofeng. 5G cyberspace security game[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(10): 2319–2329. doi: [10.11999/JEIT200058](https://doi.org/10.11999/JEIT200058).
- 徐常志: 男, 1985年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为卫星通信与网络.
- 靳一: 男, 1984年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为卫星通信与网络.
- 李立: 男, 1976年生, 研究员, 研究方向为卫星通信与网络.
- 张学娇: 女, 1987年生, 工程师, 博士, 研究方向为激光通信与组网.
- 谢天娇: 女, 1983年生, 研究员, 博士, 研究方向为卫星网络及信道编译码技术.
- 汪晓燕: 女, 1971年生, 工程师, 博士, 研究方向为激光通信技术.
- 李明玉: 男, 1978年生, 副教授, 博士, 研究方向为射频电路与系统.
- 曹振新: 男, 1976年生, 研究员, 博士, 研究方向为天线理论与设计.

责任编辑: 余蓉