



综述

卫星互联网星间激光通信的分析及建议

陈山枝¹, 范志文², 金家德², 曹云^{2,3}

(1. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室, 北京 100191;

2. 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;

3. 光通信技术和网络全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 卫星通信和地面移动通信具有较强的互补性, 卫星互联网是当前产业发展的热点, 也是未来 6G 网络的重要组成部分。全球覆盖需要星间组网, 但星间通信带宽需求与自由空间信道带来的不稳定性对空间承载网提出了新的挑战。对星间通信及其传输链路进行对比分析, 提出了基于星间激光的光传送网络 (OTN) 承载方案, 以充分发挥地面光通信的成熟产业链优势和规模经济优势, 构建经济性、兼容性、扩展性强的星地一体化网络。最后展望了星间激光通信的技术演进方向, 并提出了我国产业发展建议。

关键词: 卫星互联网; 星间激光通信; OTN; 星地一体化网络; 6G

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024033

Analysis and suggestions on inter-satellite laser communication of satellite Internet

CHEN Shanzhi¹, FAN Zhiwen², JIN Jiade², CAO Yun^{2,3}

1. The State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Information and Communication Technology Group Co., Ltd. (CICT), Beijing 100191, China

2. FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China

3. The State Key Laboratory of Optical Communication Technology and Networks, Wuhan 430074, China

Abstract: Satellite communication and terrestrial mobile communication have strong complemented co-benefits. Satellite Internet is the hot spot supporting current industrial development and an important part of the future 6G network. Global coverage requires interstellar networking, but inter-satellite communication bandwidth requirements and the instability brought by the free space channel pose new challenges to the space bearer network. Inter-satellite communication technologies and link interface technologies were compared and analyzed. An optical transport network (OTN) carrier network solution based on inter-satellite laser was proposed, which could fully leverage the advantages of the maturities and the economies of the scaled ground optical communication. It constructs a satellite-terrestrial integrated network with strong cost-effectivity, compatibility, and scalability. Finally, the technological directions and evolutions of the inter-satellite laser communication were discussed, and suggestions for industrial development in China were proposed.

Key words: satellite Internet, inter-satellite laser communication, OTN, satellite-terrestrial integrated network, 6G

收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-02-15



0 引言

从 1G 到 5G, 10 年一代的地面移动通信经历了高速发展, 取得了巨大成功。5G 等地面移动通信在城镇等区域用户密集接入的场景具有规模经济优势, 目前已服务的全球人口覆盖率约为 70%, 但受制于技术、经济成本等因素, 仅覆盖了约 20% 的陆地面积, 小于 6% 的地球表面积, 且地面基站和网络对地震、洪水、海啸等自然灾害的抗毁能力弱、应急通信能力差。而卫星互联网通过卫星通信技术接入互联网, 形成卫星规模组网, 从而覆盖全球, 构建具备实时信息处理、应急通信能力的卫星系统, 有效地向偏远地区、海洋、沙漠、森林和空中等场景的广域稀疏用户或终端提供通信接入服务。相比于中高轨卫星, 低轨卫星具备高带宽、低时延、低成本等优势, 满足人类活动空间拓展和行业应用范围扩展的强劲需求, 与 5G 等地面移动通信网络互为补充^[1]。

卫星通信与地面移动通信已由过去铱星系统与地面 2G 的竞争关系转变为今后的互补关系, 卫星接入体制将融合到移动通信系统中。星地融合移动通信的技术发展路径将是“5G 体制兼容、6G 系统融合”^[1]。

卫星互联网将是 6G 的重要组成部分, 对于 6G 实现全域覆盖、场景智联等愿景与目标具有重要意义。同时, 由于近地轨道可容纳的低轨卫星数量有限, 各国正在争相抢占优质的轨道资源。其中, 美国 SpaceX 公司的低轨卫星在轨已超 5 000 颗, 我国卫星通信网络建设目前正在推进中。各国在卫星互联网领域的竞争日益激烈, 由于国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的先占先得原则, 先行者能够获得轨道与频率资源及市场先机^[1]。

宽带卫星通信网络建设和运营不仅是产业竞争与商业发展的必然趋势, 也是国家和地区战略布局的重要组成部分, 其必要性和重要性不言而喻,

其紧迫性也要求我国航天、卫星、通信等研究机构与企业迅速行动, 以适应不断变化的国际环境和市场需求^[2]。

卫星通信分为透明转发和再生处理两种类型。透明转发只完成信号的中继传输, 功能简单, 但要全球部署地面信关站; 再生处理具有更优的通信性能和灵活性, 且不受地面信关站的全球部署限制, 但需要星间通信的支持, 是卫星互联网的发展方向。众所周知, 基于光纤通信的地面光承载网在 5G 网络中扮演着重要的角色, 对于确保 5G 网络的高速、高效和可靠起着核心作用。例如, 通过高效的传输技术提供大容量高速率的信号传输, 通过灵活的组网技术确保数据传输的快速、低时延和高可靠性, 通过网络架构的灵活扩展及控制功能的集中提高整体网络的性能和资源利用率。同样, 采用星间激光通信技术的空间承载网作为卫星互联网信号与数据传输的基础设施, 其技术选择对卫星互联网系统性能的影响尤其重要。国外的 Starlink、OneWeb、Kuiper、Telesat 等星座系统均已将激光星间通信作为核心传输链路之一。

相对地面以光纤为主要介质的通信系统, 星间激光通信链路呈现出更加复杂、不稳定和不可靠的特征, 例如, 卫星相对运动带来的由光机跟瞄构建的链路质量不稳定、空间环境干扰带来的链路状态不可靠、卫星节点的意外失效等。因此, 需要选择相对稳定的光传送技术来弥补上述不可靠因素。

本文将对星间激光通信关键技术进行详尽的分析与研究, 并在此基础上提出我国发展星间激光通信的相关建议。

1 卫星互联网星间通信技术分析

1.1 星间激光通信技术特点

卫星主要以电磁波为载体信号进行无线连接^[3]。根据电磁波所处的频段不同, 星间通信技术可分为微波通信、太赫兹通信、激光通信。长期以来,

微波通信是卫星互联网的主要传输手段,用于连接星地、星间各类链路,具有技术成熟、传输距离远、覆盖范围广等优势。太赫兹通信所用波段位于红外激光和微波之间,频率范围为 $0.1\sim 10$ THz(波长为 $30\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$),与微波通信相比波束窄、方向性好、在大气层外衰减较小,目前尚处于实验研究阶段,产业成熟度较低。然而,随着卫星及各种航天器所需的通信容量呈指数增长,微波通信已难以满足急剧增长的通信容量需求,星间激光通信被认为是极具潜力的空间通信技术。

激光的波长比微波小 $3\sim 5$ 个数量级,其极高的时空相干特性使得星间激光通信具有如下特点,星间微波与星间激光通信的比较见表1。

(1) 可用带宽大、速率高:通信系统中,载波频率越高,承载带宽越大。光载波中心频率高达 10^{16} Hz,即使在1%的承载效率下可用带宽也高达100 THz,其可用带宽是射频微波的万倍以上。参照地面光纤通信系统单通道传输速率 $2.5\ \text{Gbit/s}\rightarrow 10\ \text{Gbit/s}\rightarrow 100\ \text{Gbit/s}\rightarrow 400\ \text{Gbit/s}$ 的技术演进历程,未来星间激光通信链路单波速率有望达到400 Gbit/s量级。

(2) 体重小、功耗低:由于激光波长比微波波长小、方向性好且能量集中,可以有效降低收发机功耗。激光通信系统所需的光学天线、收发机等器件比微波通信系统尺寸小、质量轻,更容易满足星上有效载荷小型化、轻量化、低功耗的要求。

(3) 抗干扰能力强:微波通常采取一对多的通信方式,容易被相似波段信号干扰且容易被窃取和破解。激光光束发散角小、束宽极窄、方向性好,在空间中不易被捕获和监听,具有较强的保密性,可有效提高抗干扰防窃听能力。

(4) 无频谱管制:因微波散角大,易对邻近接收器产生干扰,且用于航天行业的波段频率日益枯竭,ITU对微波频率有着严格管制。激光通信发散角小,抗干扰性强,其频率资源的使用不受限制。

表1 星间微波与星间激光通信的比较

特性	星间微波通信	星间激光通信
电磁波长	30 mm~3 m	0.7~1.6 μm
可用带宽	较大(40 GHz)	极大(100 THz)
频带管制	有	无
传输速率	低(300 Mbit/s)	极高(400 Gbit/s)
抗干扰能力	一般	强
信号聚焦性	一般	好
功耗尺寸	大	小
持续演进潜力	弱	优
产业规模	较小	大

此外,经过40多年的发展和演进,地面光通信技术有力地支撑了社会信息化革命的蓬勃发展以及产业成熟的进程,规模经济效益显著。星间激光通信可以充分共享地面光通信的成熟技术和规模产业链,以降低系统成本。

综上所述,星间激光通信具有通信带宽大、质量轻、体积小、功耗低、抗干扰能力强、安全性高、产业规模大等优点,可以更好地支持卫星互联网日益增长的大容量数据传输需求,增强星座系统的安全性和防窃听能力,是星地融合网络的关键技术。

1.2 星间激光通信的挑战

尽管成熟的地面光通信技术可为星间激光通信提供强大的技术和产业支撑,但由于卫星孤悬于太空并处于高速移动状态,受太空极端环境的影响,星间激光通信在传输介质、系统环境、节点移动性、链路稳定性、能源供给、存储处理、系统运维等方面与地面光纤通信系统存在显著差异,具体见表2。整体而言,星间激光通信技术目前仍处于起步阶段,尚面临诸多技术挑战^[4]。

星间激光通信是极远距离、极弱信号的探测,其技术难点来自超远距动态变化链路特性、复杂的空间环境和受限的能源供给、数据处理能力。



表 2 星间激光通信与地面光纤通信的差异

对比项	星间激光通信	地面光纤通信
传输介质	自由空间	光纤光缆
系统环境	极端温度、强烈震动、高强度辐射等	机房环境，相对稳定
节点移动性	卫星高速运动，收发机需要精准跟瞄	静止状态
链路稳定性	受太空环境、卫星运动及跟瞄精度影响	受环境影响较小
能源供给	受限于太阳帆板面积、星载电池及星蚀现象	稳定充分
存储处理	能力弱	能力强
系统运维	困难	容易

(1) 卫星通信收发两端相距遥远且处于高速运动状态，卫星本身的振动可造成发射光束的抖动，激光链路的稳定性较低，使得激光信号传输时出现接收功率抖动甚至误码，快速光束捕获和高精度光束跟踪是星间激光通信的关键所在。由于卫星一直处于高速运动状态，卫星之间的相对位置时刻高速变化，星间激光通信依赖高精度的光学跟瞄系统保持星间链路的动态对准和连接，光学跟瞄系统的性能主要受光学天线精度、轨道预测精度、载荷控制补偿精度的约束^[5]。在卫星体积、质量、功耗和成本约束下，光学跟瞄系统难以确保足够的鲁棒性。

(2) 卫星运行环境极度恶劣，星间激光通信受源于太阳、月球及其他星球的辐射和反射的背景噪声影响，有时候这种背景噪声光强度甚至超过所接收的信号光强度，要求星间激光通信系统具有较强的抗背景噪声能力。在这种运行环境下，上层的数据链路和路由承载协议的抗链路失效能力对卫星通信尤为关键。

(3) 卫星的能源供给受限于太阳能帆板面积、星载电池容量、星蚀现象等因素，卫星载荷数据采集、存储、计算和转发等能力也相应受影响^[6]。一方面要求卫星载荷采用高级光电集成工艺，提高卫星载荷的处理转发能力，减小卫星载荷体积和功耗；另一方面需要对地面光通信成熟的信号传输、数据承载和网络路由算法进行简化，以适应卫星受限的能源供给和数据处理能力。

总之，星间链路的不稳定特性和复杂的空间

环境给星间激光通信带来了极大的技术挑战。针对这些技术挑战，一方面需要技术创新提升光学跟瞄、能源供给及载荷处理性能，另一方面可以充分借鉴地面光网络几十年来成熟的经验和技能，从物理连接、数据承载和路由组网等多个方面入手，进一步优化卫星网络性能、降低卫星网络成本，提高卫星网络可靠性和安全性。

2 星间激光通信关键技术

星间激光通信的关键技术包括物理连接技术和光传送接口技术。

2.1 物理连接技术

当前星间激光通信中物理连接技术，包括光收发技术和跟瞄技术，其中光收发技术分为直接探测和相干探测。直接探测主要采用通断键控 (on-off keying, OOK) 调制，相干探测主要采用二进制相移键控 (binary phase-shift keying, BPSK) 或四相移相键控 (quadrature phase-shift keying, QPSK) 调制，相干探测具备如下技术优势，具体星间相干探测技术与直接探测技术比较见表 3。

(1) 灵敏度和传输距离：直接探测技术架构简单但灵敏度低，相干探测技术架构相对复杂但灵敏度高。理论上，同样速率条件下相干探测接收灵敏度相较于直接探测提高 1~2 个数量级，优势明显。

(2) 通信速率：相干探测可结合高阶调制和波分复用技术，更有利于提升通信速率，且已经在陆地光通信中得到广泛应用。

表 3 星间相干探测技术与直接探测技术比较

指标	星间相干探测	星间直接探测
传输距离	>10 000 km	<2 000 km
灵敏度	相干比非相干高 1~2 个数量级	
调制格式	支持强度、相位、偏振、时间、频率等多维度调制检测	仅支持强度、时间维度上的调制检测
传输速率	>400 Gbit/s	~40 Gbit/s
高低轨互通	支持	不支持
成熟度	技术成熟, 长距场景	技术成熟, 短距场景

(3) 成熟度: 激光终端成熟度主要受制于激光种子源、调制器、高功率放大器、低噪声放大器、探测器、快反镜等关键部件。当前相干探测额外需要的外调制器和窄线宽高频稳激光器成熟, 速率指标对应的高速 ADC/DAC (analog-to-digital conversion/digital-to-analog conversion) 问题已经解决, 且多数研究单位均已突破数字解调技术。

(4) 质量、功耗: 相干探测技术灵敏度更高, 光学口径更小, 光放大功率需求更低, 有利于减少天线及跟踪架质量。

总体而言, 传统的直接探测通信技术难以满足星间激光通信大容量发展的需求, 未来的研究应用方向逐渐转向相干探测技术。同时, 面向卫星应用, 相干探测技术也需要升级优化, 例如, 工业相干光电器件航天适应性加固、有源器件抗辐照能力增强、星间信道数字信号处理 (digital signal processing, DSP) 算法简化优化, 以及跟瞄系统不稳定因素等。

支撑星间激光通信的核心组件还有光机与跟瞄系统, 但当前技术水平还难以消除跟瞄系统的不稳定因素, 因此星间激光通信的数字信号处理部分还需要对不稳定的跟瞄进行补偿。制约跟瞄系统性能的因素主要有以下几个方面。

(1) 光学精度劣化: 火箭发射阶段的冲击震动, 使精密光学组件面临移位变形等影响; 发射阶段无法供电造成激光组件主动温控短暂失效, 环境极低温也会带来材料的不可恢复形变或光路偏离; 卫星平台在轨阶段受太阳角度影响产生大

范围的温度变化, 跟瞄系统各子区域很难全程保持在最佳工作温度范围内, 造成光学精度的不可控劣化。

(2) 器件带宽与计算精度不足: 双星之间激光传输需要根据传输时延、卫星速度与卫星轨道信息进行提前角度计算, A 星和 B 星之间激光通信提前瞄准示意图如图 1 所示。然而激光组件从卫星平台获取星历信息的刷新率与精准度有限, 导致激光组件对 A、B 两端的轨道预测精度下降; 另一方面, 卫星平台的随机低频振动也会影响跟瞄系统性能, 但受限于功耗与成本, 快反镜响应带宽与时延、采样与驱动电路的带宽与时延、计算单元的精度与速度目前仅能克服约 1 kHz 以内的平台振动。

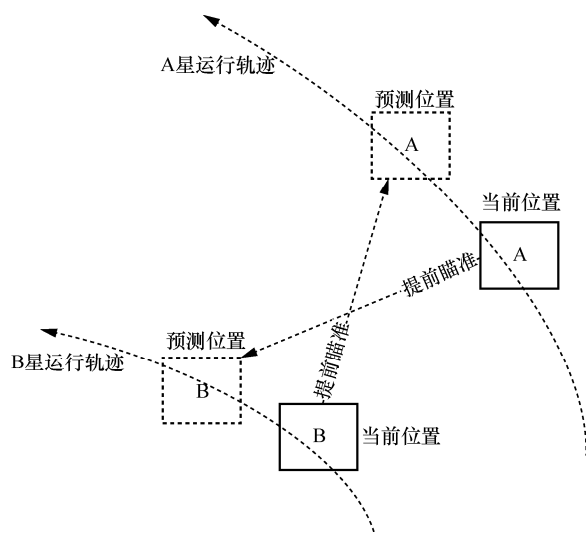


图 1 A 星和 B 星之间激光通信提前瞄准示意图

虽然激光组件能够通过更优的材料选择、更稳固的结构设计、更大带宽与更强性能的器件与



电路克服以上困难,但势必会造成体积、质量、成本的大幅上升。地面光网络历经数十年的发展,已具备极强的鲁棒性,硬件具有规模经济优势,同时采用了灵活可靠的软件保护策略降低硬件层面的压力。这种利用软件降本增效的思路也适用于卫星网络。

2.2 光传送接口技术

星间激光通信要在不可靠自由空间中构建可靠连接的通信系统。星间光通信系统及其信道特性如图 2 所示,卫星激光通信面临卫星超高速运动、星间超长距传输链路、卫星光学天线平台振动以及太空环境辐射噪声等不可靠因素的影响,因此光传送接口需要增加链路保护能力,提升系统鲁棒性。当前主流的光传送接口主要采用空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data System, CCSDS)链路协议增强信道可靠性,其对星上的计算资源与功耗的要求较低,但通信承载能力以及信道可靠性不足。

历经 20 年发展,地面光网络形成了非常成熟的光传送网络(optical transport network, OTN)标准体系,其高可靠性、高传输性能、高智能化已得到长期的验证。将 OTN 技术引入星间链路协议,可具备以下方面的优势。

(1) 承载效率高: OTN 协议提供了将客户业务适配到传送网络的一种通用机制,可以把变长

的净荷映射到字节同步的传送通路中,并通过空闲帧完成客户业务与刚性管道的速率适配。其采用直接映射的方式,平均承载效率高达 87%,且原始数据帧长度对承载效率的波动影响较小,通信系统稳定性与可靠性较高。传统的 CCSDS 协议的承载效率对原始数据的帧长十分敏感,极端情况下承载效率会低至 43%,亦或高达 77%,在业务峰值接入时容易发生丢包等问题,对通信系统鲁棒性要求极高。

(2) 抗突发误码能力强: 产业界通常采用交织编码算法对抗突发误码,交织编码算法可以把一个较长的突发误码离散成随机误码,再用前向纠错(forward error correction, FEC)编码技术消除随机误码。交织深度越大,则离散度越大,抗突发误码能力也就越强,但也会造成数据传输时延增大。交织深度为 16 时可以在时延(硬件资源需求)与抗突发误码特性之间取得较好的折中值。OTN 标准帧结构的交织深度为 16 时,可以在地面通信中表现出极好的抗突发误码性能,也同样适用于链路不稳定和处理能力受限的星间通信场景。

(3) 监测与运维能力丰富灵活: OTN 协议预留的开销区资源丰富,例如,通用通信信道(general communications channel, GCC)开销可用于提供带内(随路)的网管通道,每一路业务均可提供一条网管通道,实现冗余备份;自动保护

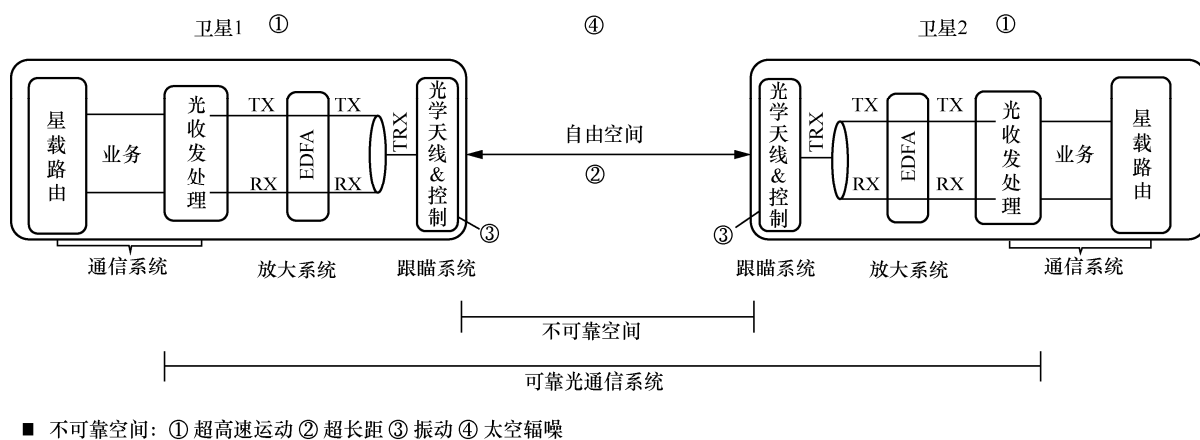


图2 星间光通信系统及其信道特性

倒换和保护通信信道 (automatic protection switching/path communication channel/protection communication channel, APS/PCC) 提供自动保护倒换的能力; 通道监测 (path monitoring, PM)、段监测 (section monitoring, SM) 提供了多层级的误码与同步状态监测; OTN 协议开销区目前还有足够的预留字节, 可轻松容纳额外所需的星间信息传递, 网络具有可持续性迭代升级和扩展的能力。

(4) 映射与复用灵活: OTN 协议具有接入和处理不同颗粒度业务的能力, 有利于提升带宽利用效率。OTN 支持多个速率容器的业务映射与复用, 从光通路数据单元 (optical channel data unit, ODU) 0 到 ODU_{Cn} (1.25 Gbit/s ~ $N \times 100$ Gbit/s) 均可以灵活组合与编排, 合成更大颗粒的容器, 因此 OTN 可以灵活承载子速率业务, 并提供子波长级业务混合传输。面对不同速率接口的多种用户星接入时, OTN 承载更加高效灵活。

(5) 业务隔离能力强: OTN 协议定义了低阶通道向高阶通道的复用机制, 低阶通道之间实现带宽、资源的硬隔离, 是原生的“硬”切片网络隔离技术。虚拟通道或逻辑通道类型的非硬管道隔离机制容易出现资源抢占的情况, 而 OTN 切片管道在静态部署后在流量高峰或出现拥堵的情况下仍可以保证低时延、低抖动、高安全的业务特性。

(6) 加密方案灵活高效安全: 与 IP 层加密技术不同, OTN 层加密与客户类型、协议或速率无关, 针对的是传输有效载荷帧, 且在 OTN 帧中利用保留开销字节来承载加密认证等标签。OTN 层加密具备以下几点优势: 对加/解密光通道净荷单元 (optical channel payload unit, OPU_k) 有效载荷和插入/读取认证字段的处理资源需求较低, 只需要增加少量缓存; 具备低时延特性, 可以在任意 OPU_k 帧实现低于 1 μ s 的时延; OTN 层加密模块无须针对不同的客户类型或数据帧长度增加额外开销, 可提供 100%吞吐量; OTN 层端到端加密

仅针对源节点和宿节点进行, 中间节点透传处理, 其管理复杂性显著低于 IP 层; 具备可扩展性和灵活性, 既可以选择针对子速率端口加密, 也可以选择针对复用后的通道加密; OTN 层加密属于管道加密技术, 极大增强了外部截获数据难度, 安全等级极高。

OTN 协议与 CCSDS 协议的特点对比见表 4, 总体而言, OTN 协议可兼容非相干、相干、波分、子载波等传输技术, 对以太网、同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 等业务也具有较强的承载鲁棒性, 同时由于标准十分成熟还能大量复用地面光电器件, 因此采用 OTN 进行星间互联可快速实现成熟、先进、可靠的高速光承载网。CCSDS 协议虽然能够基本满足当前卫星组网需求, 但随着网络的升级迭代, CCSDS 协议还需要进行大量的论证修改, 且由于标准还未统一、生态链尚不成熟, 难以避免器件可选择性低、价格昂贵的发展现状。

表 4 OTN 协议与 CCSDS 协议的特点对比

对比项	OTN 协议	CCSDS 协议
可承载业务类型	以太网、SDH 网	以太网
映射类型	GFP/AMP/GMP/BMP...	分片、聚合
速率范围	1.25 Gbit/s ~ 1.6 Tbit/s	~10 Gbit/s
交织深度	16	4
测距精度	≤ 1 cm	≤ 1 cm
开销区容量	大且灵活	小
隔离方式	硬隔离	软隔离
智能运维能力	高	低

当然, OTN 协议仍在 ITU 标准组织不断迭代演进, 针对星上应用进行裁剪优化, 形成更加适合且具有竞争力的技术方案。例如, 在卫星网络中, 各卫星之间无中继且业务颗粒单一, 有别于地面网络存在大量中继及多种业务颗粒调度的场景, 星上 OTN 协议可以采用直接映射流程适配信道中的业务, 并针对特定业务颗粒混合接入进行优化设计, 能够显著降低处理复杂度与功耗。



3 星间激光通信解决方案

面对日凌、高速相对运动、跟瞄系统稳定度劣化、卫星故障等空间环境的复杂性, OTN 方案能够改善星间通信信道不确定性带来的影响。OTN 在将业务承载效率大幅提升的同时, 其自带抗突发误码增强及搭配高增益 FEC, 能够弥补跟瞄系统精度不足引入的性能问题, 在底层通道改善信道的不可靠性。结合路由协议组网技术, OTN 解决方案可构建一张大规模、大带宽、灵活可靠、运营高效的端到端星地一体承载网, 基于 OTN 的星地一体承载网如图 3 所示。

(1) OTN 协议提供高可靠的通信管道

基于 OTN 光接口协议, 能够支持多业务类型与多接口速率, 提供时钟同步及测距等可扩展功能, 同时硬管道隔离特性可为企业大客户提供低时延、高可靠的专线体验。在传送性能方面, OTN 可搭配不同类型 FEC, 灵活支持不同的通信距离; 另一方面, OTN 具备完善的标准体系和演进方向, 已定义的标准接口速率涵盖 1.25~800 Gbit/s, 使得星座之间的组网更加灵活。

地面 100 Gbit/s OTN 商用已超过 10 年, 具备从算法、芯片、器件、模块、系统全产业链自主可

控能力, 网络应用从骨干网、城域网延伸到接入网, 从而覆盖全业务场景。考虑 100 Gbit/s 相干和 10 Gbit/s 非相干绝对灵敏度相当, 同时 100 Gbit/s 相干能够复用地面产业链, 获得低成本高性能的产业支持, 因此面向星间互联场景, 建议发展我国自主可控的 100 Gbit/s 相干技术进行星上演进。

(2) 路由组网提供高可靠的传输路径

OTN 作为一种传输管道技术, 能够在通信链路未完全中断的前提下提供容错能力更强的业务连接。但复杂的空间环境仍会较频繁地出现通信管道完全中断的情况, 例如, 日凌现象或跟瞄系统捕跟丢失等, 则需要采用组网技术保证业务高可靠传输。地面 5G 承载网的组网技术主要有基于 IPv6、SR-MPLS 和 SRv6 协议等, 其中 SRv6 结合了源路由优势和 IPv6 地址易扩展特质, 同时具有多重编程空间, 符合软件定义网络 (software defined network, SDN) 思想, 是未来的主要演进方向, 同样可作为主要路由技术用于星间组网, 实现星间与地面网络的端到端一体化承载。

综合考虑空间网络环境复杂和星上资源限制, 需要对星间组网协议进行轻量化处理, 并结合 SDN 管控机制, 进一步实现高效星间链路计算、传输质量保证、不稳定链路和单节点故障的无损切换等。

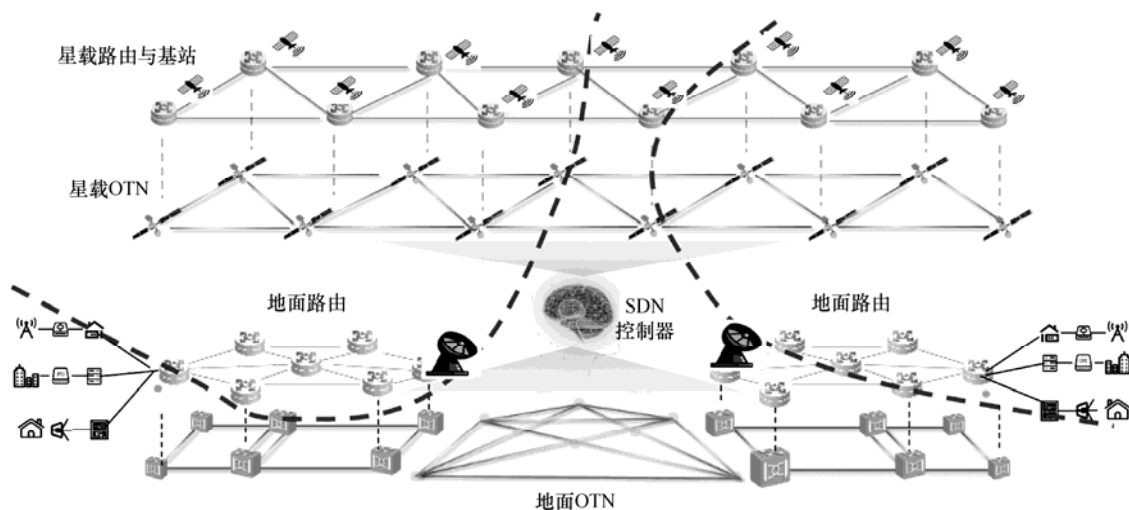


图3 基于 OTN 的星地一体承载网

4 技术演进方向及产业发展建议

卫星通信网络向宽带化、星地融合发展，是产业界的重要共识。预计 2030 年，宽带卫星通信网络将全面连接空天、延伸至地月空间。地面、临空和太空用户随遇无感接入智能至简的宽带网络，跨轨道自适应混合组网，形成与地面平行又业务高度耦合的信息高速公路^[7-8]。

面向天地一体化网络，我国的空间承载网与地面承载网需要在技术架构、协议、管控方面融合演进成一个整体，6G 通过采用统一的无线传输、协同的资源调度、一致的服务质量、星地无缝的漫游，提供用户无感知的一致服务^[8-9]。

为了实现上述愿景，卫星通信技术发展将朝着更高带宽、更大容量、更加灵活高效的组网技术演进，构建高性价比、兼容性、扩展性的星地一体化网络。

(1) OTN 向 400 Gbit/s 演进：基于业务需求分析，预计 2030 年星间链路带宽将达到 100 Gbit/s 甚至 400 Gbit/s，因此相干技术是必然之选。金融、大企业等高品质专线数据回传需要具备大带宽、高可靠特征的星间链路，支持任意速率接入的 OTN 技术相关协议是星间链路承载高品质专线的基础。在相干超过 100 Gbit/s 上星方面，将会出现高灵敏度雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 直接检测、单光子探测、相敏放大接收等技术。在动态大规模组网方面，将会实现预先光连接、业务无缝切换，1+1 备份提供高可靠性网络保护，多因素最优路径、弹性带宽防拥塞，物理隔离与管道加密，实现专网安全等组网应用。

(2) OTN 由硬管道向高可靠组网演进：OTN 具备灵活高效可靠的光业务单元 (optical service unit, OSU) 软硬管道和 ODUk 交叉调度能力，同时具备基于段层和链路链接层的灵活光业务单元 (flexible OSU, OSUflex)，ODU 的 1+1 子网连接保护 (subnetwork connection protection, SNCP)

和基于光通道层保护、光线路层保护，可形成环网、全连接网络等。在激光链路层面，未来可考虑多波长复用组网，通过不同波长进行调度和容量的极速提升。

(3) OTN 向高中低轨混合组网演进：OTN 标准体系完备，速率覆盖范围广，可支持 1.25~800 Gbit/s 光接口，结合相干探测技术，可实现传输速率和距离的灵活调整，面向低轨通信距离较近时则可以提高传输速率以提升频谱利用率，面向中高轨通信距离较远时则降低速率以保证传输性能。

(4) 管控平台向智慧网络操作系统演进：针对卫星互联网络全生命周期管理和控制过程中面临的各类挑战，研制超强智能的空间承载网络操作系统。支持网络自动优化、自动治愈、自动治理，实现网络“规划、建设、维护、优化”全生命周期全自动智能处理，支持网元、网络、业务多维度精准仿真建模，实现网络故障自动定位和排查，支持基于数字孪生的全业务场景验证，实现复杂网络闭环自动优化升级。

为实现我国卫星通信网络领域的技术优势，同时形成具有国际竞争力的产业链集群，结合空间承载网发展趋势，提出以下建议。

(1) 制定卫星通信网络演进规划，建成全域覆盖、技术先进、高效运行的国家空间基础设施，形成未来空间信息网络的骨干架构。我国空间承载网络的技术路线选取要与网络运营现状密切结合，形成与之适配的解决方案。

(2) 商业化推进空间承载网和地面承载网的深度融合，形成全球覆盖、星地一体化网络，发挥地面光通信产业链的杠杆作用，提升空间承载产业链的效率和竞争力。加强试验对应用的带动作用，推动组网星的规模建设。

(3) 加大空间承载网的核心芯片和器件的攻关力度，实现核心元器件、系统软件等的自主可控，为空间承载网规模应用奠定坚实基础。



5 结束语

本文简要分析了卫星互联网的技术特征与挑战,分析了我国发展空间承载网的技术选择及解决方案,建议采用基于 OTN 的星间激光通信构建星地一体的卫星承载网络,有利于发挥我国地面光通信的自主可控产业链优势,发挥规模经济的杠杆作用,更有利于构建经济性、兼容性、可扩展性强的星地一体化网络。

星地一体化信息网络是我国未来重要的公共信息基础设施,基于星间激光通信的空间承载网作为重要组成部分,需要发挥我国在 5G 和光通信领域的技术优势,形成具有国际竞争力的产业链集群,为经济社会发展提供坚实的公共信息基础设施支撑,以在全球信息通信技术与产业领域占据有利地位。

参考文献:

- [1] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [2] 陈东, 仲小清, 邓恒, 等. 宽带卫星通信网络技术发展态势与发展建议[J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 86-93.
CHEN D, ZHONG X Q, DENG H, et al. Development trend and suggestions of broadband satellite communication networks[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 86-93.
- [3] 赵雄文, 张钰, 秦鹏, 等. 空天地一体化无线光通信网络关键技术及其发展趋势[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 1-17.
ZHAO X W, ZHANG Y, QIN P, et al. Key technologies and development trends for a space-air-ground integrated wireless optical communication network[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 1-17.
- [4] SACCHI C, GRANELLI F, BASSOLI R, et al. A roadmap to future space connectivity - satellite and interplanetary networks[M]. Heidelberg: Springer Nature, 2023.
- [5] KOLAWOLE M O. Satellite communication engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] LAI S T, PRADIPTA R. Physics of satellite surface charging[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [7] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [8] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, 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.
- [9] 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[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.
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[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.

[作者简介]



陈山枝(1969—), 男, 博士, 中国信息通信科技集团有限公司副总经理、总工程师、科学技术委员会主任、教授级高级工程师、博士生导师, 无线移动通信全国重点实验室主任, 负责 4G 和 5G 移动通信、C-V2X 技术与标准研究及产业化工作。国家杰出青年科学基金获得者, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士。科研成果曾获得国家科技进步奖特等奖、一等奖、二等奖, 国家技术发明奖二等奖等。主要研究方向为 B5G 和 6G、车联网、星地融合移动通信与卫星互联网等。



范志文(1979—), 男, 烽火通信科技股份有限公司副总裁、正高级工程师, 长期从事光通信、数据通信、光电子芯片与器件、卫星通信等方面的研究工作。



金家德(1976—), 男, 烽火通信科技股份有限公司空间光通信产品线总监、高级工程师, 长期从事光通信系统、数据通信、卫星通信等方面的研究工作。



曹云(1980—), 男, 烽火通信科技股份有限公司飞思灵微电子副总经理、正高级工程师, 光通信技术和网络全国重点实验室高级研究员, 主要从事超高速光电子芯片与器件研发及超高速光传输系统等方面的研究工作。