



研究与开发

基于标准空间光传送网协议的天地一体化网络构建研究

邓伟, 李允博, 张剑寅, 刘亮
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053)

摘要: 伴随航天、航空及地面通信技术的迅猛发展, 构建具备全球无缝覆盖、随遇接入与按需服务特性的空天地一体化网络, 已成为通信网络发展的必然趋势。基于标准空间光传送网协议实现天地一体化网络展开研究: 首先, 提出空间光传送网是构建天地一体化网络的核心基石, 阐述空间光通信的标准现状, 剖析制式差异致使卫星信息互通受限的困境; 其次, 从协议层面深入探究空间光传送网的组网功能, 根据卫星高速运动、星间链路切换频繁、星载资源有限等特性, 提出适配空间信息网络环境的新型帧结构与可靠传输协议, 支撑多星座互联互通, 在确保数据精准、可靠传输的同时, 提升网络资源利用效率; 最后, 总结此网络架构于行业应用的前景, 提出未来应着重开展统一空间光传送网技术标准化的布局研究, 为天地一体化网络的高效运转与广泛应用筑牢根基。

关键词: 空间光传送网; 帧结构; 6G; 天地一体化网络; 互联互通

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025127

Research on construction of space-terrestrial integrated network based on standard space optical transport network protocol

DENG Wei, LI Yunbo, ZHANG Jianyin, LIU Liang
China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

Abstract: With the rapid development of aerospace, aviation and ground communication technologies, it has become an inevitable trend for the development of communication networks to build an integrated space-terrestrial integrated network with global seamless coverage, on-demand access and on-demand services. The realization of the space-terrestrial integrated network based on the standard space optical transport network protocol was studied. Firstly, it is clear that the space optical transport network is the fundamental cornerstone of building the integrated network, the status quo of the standards of space optical communication was described, and the dilemma of the limited satellite information exchange caused by the differences in systems was analyzed. Furthermore, the networking function of the space optical communication network was deeply explored at the protocol level. In view of the characteristics of high-speed satellite movement, frequent inter satellite link switching, and limited on-board resources, a new frame struc-



ture and reliable transmission protocol adapted to the space optical transport network were proposed to support the interconnection and communication of multiple constellations, and improve the efficiency of network resource utilization while ensuring accurate and reliable data transmission. Finally, the broad prospects of this network architecture for industrial applications were summarized, future research should focus on the layout of unified space optical transport network standardization, so as to lay a solid foundation for the efficient operation and wide application of the space-terrestrial integrated network.

Key words: space optical transport network, frame structure, 6G, space-terrestrial integrated network, interconnection

0 引言

在 2G 至 5G 的演进过程中, 各代移动通信技术对网络架构与覆盖范畴影响深远。2G 以数字语音传输为核心, 增强了保密性与系统容量, 催生出手机短信与上网功能; 3G 推动高速数据传输, 优化了上网体验; 4G 融合 3G 与无线局域网技术, 借助多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术提升频率复用度, 速率跃升约 10 倍, 为 5G 打下基础; 5G 以超宽带、超低时延等特性, 驱动个人与社会产生深刻变革。光通信技术作为通信网络关键支撑, 承载超 95% 的全球信息流量, 是无线、宽带、数据中心、物联网等通信设施的根基, 亦为算力网络关键枢纽互联及泛在入算的核心依托。

6G 网络的愿景之一即实现全球全域覆盖, 卫星通信因其具有广域覆盖特性而意义非凡。地面网络仅覆盖约 20% 的陆地, 不足地球表面积的 6%。为构筑全域无缝覆盖通信体系, 实现“任何人、任何时、任何地”皆可通信的目标, 填补地面网络部署空白或高成本区域覆盖缺口, 天地一体融合网络将为偏远、荒漠、海洋、航空等地区全域提供泛在连接^[1]。天地一体化网络以卫星光通信为底座, 具有高速宽带、强抗干扰、保密性好等优势, 国外多个星座系统已将卫星光通信作为核心传输链路之一^[2]。从业务需求审视, 未来星间须传输高清图像、视频等海量多媒体数据以及卫星协同、空间科研复杂指令与信息, 星间链路带宽预计将在 2030 年达

100 Gbit/s 乃至 400 Gbit/s^[2]。同时, 伴随遥感技术革新, 卫星观测数据呈几何级数增长, 迫切需要实现高速星地通信以提升数据采集与传输效能, 所以未来星地激光通信速率有望超过 100 Gbit/s^[3]。卫星的任务不仅有满足基本通信需求, 还有为复杂和计算密集型任务 (如遥感) 提供计算服务^[4]。星上波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 技术的出现^[5], 进一步提升了卫星互联网的容量。地面光纤通信是地面信息网络、算力网络的基石, 卫星光通信将成为卫星互联网、卫星算力网络的基石, 实现卫星光通信与地面光纤通信的融合组网, 可达成全球全域的信息网络覆盖, 为全球数字化转型和智能化升级筑牢根基。

1 卫星通信研究的意义及挑战

1.1 卫星通信的发展及应用现状

卫星通信网络技术蓬勃发展, 为全球通信全覆盖贡献了创新方案。据 CelesTrack 数据, 截至 2024 年 5 月, 在轨卫星有 9 770 颗, 其中低轨卫星占比约 91.5%, 通信卫星有约 7 000 颗, 遥感及对地观测卫星有 1 300 余颗。截至 2024 年 9 月, 国际商业星座发展现状见表 1。

大规模的卫星部署可为全球用户提供低时延、高速的互联网接入, 填补了地面网络盲区, 在偏远与海洋区域的效用显著, 在灾害应急通信中可起到关键作用。如美国星链在美国遭受飓风灾害时, 中国移动在地震、暴雨等灾害救援时, 均通过卫星通信提供了稳定的救援通信服务。

表1 国际商业星座发展现状

星座名称	运营公司	用途	低轨卫星规划数量	低轨卫星在轨数量	激光终端规划数量
Starlink	Space X	低轨通信	42 000	6 557	~9 000
OneWeb(2.0)	OneWeb	低轨通信	7 020	648	600
Kuiper	Amazon	低轨通信	3 236	2	~6 400
AETHER	Kepler Communications	低轨通信	140	2	~200
OuterNET	Rivada	低轨通信	600	0	~1 200
Lightspeed	Telesat	低轨通信	198	0	792
WarpHub InterSat	WarpSpace	数据中继	3	0	9
Acadia	Capella	合成孔径雷达	40	1	40

卫星通信技术为多行业创新赋能。在金融领域，环球银行金融电信协会（Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication, SWIFT）的跨境金融数据传输以卫星通信为备份，网商银行“大山雀”系统借助卫星遥感服务农村信贷；在传输跨境数据时，挪威国家石油公司、中国石油天然气集团公司通过卫星通信实现海上平台与油井数据实时回传；在车联网中，比亚迪仰望U8与吉利银河E8通过卫星通信提供双向消息服务；在遥感遥测领域，长光卫星实现了星间、星地高速激光通信及星地遥感影像传输。

卫星之间、卫星和地面之间需要建立高速、稳定的通信链路，以实现数据的传输和共享，从而提高整个星座通信服务的性能。光通信技术的应用可提高星间、星地通信的容量和效率，降低

通信时延，增强卫星星座、卫星和地面之间的协同工作能力。随着卫星通信技术的不断发展和应用需求的变化，卫星光通信技术的灵活性和可扩展性能够更好地适应卫星网络的动态变化，快速建立或调整星间、星地的通信链路，实现网络拓扑的优化和资源的合理分配，进而提高卫星网络的可靠性和适应性。

1.2 卫星光通信面临的挑战

基于标准光传送网协议融通空天地一体化网络架构如图1所示。卫星激光通信的关键技术包括捕获跟踪瞄准、通信调制解调、大气湍流抑制以及抗干扰链路维持等技术，从国内外卫星激光通信技术的发展来看，点对点的激光捕获跟踪和通信验证均已实现^[5-7]，但链路快速稳定建联与互联互通组网仍为业界难题：其一，卫星高速相

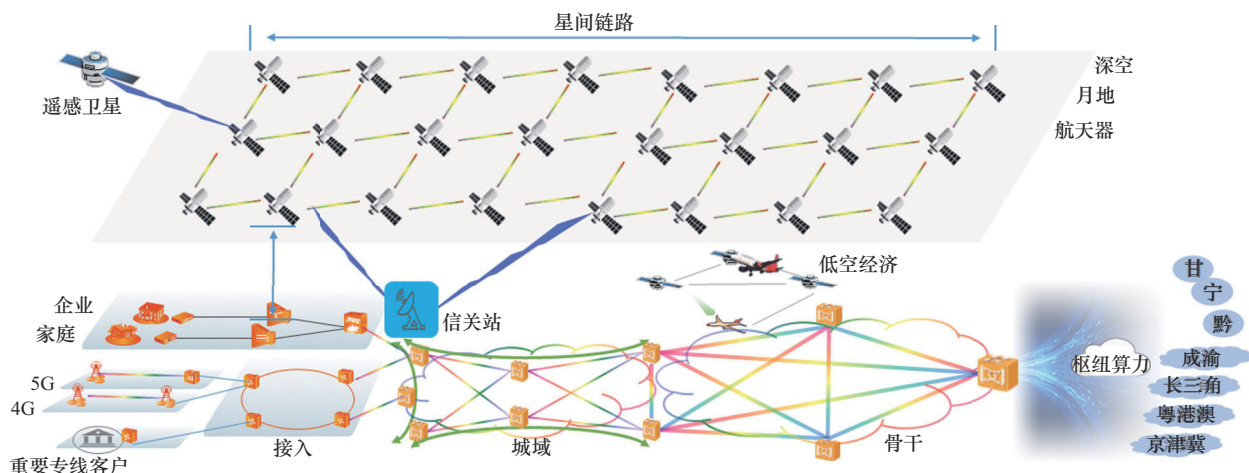


图1 基于标准光传送网协议融通空天地一体化网络架构



对运动致使光束对准跟踪艰难,星间通信易中断,且带宽资源稀缺,高效传输亟待破题;其二,卫星类型丰富,功能与数据资源各异,虽互联互通可推动资源共享与协同,如气象卫星数据共享可提升获取与应用的效能、多星协同探测定位,但目前还存在技术难点。因此,基于标准光传送网协议实现空天地一体化网络架构,构建全球无缝网的需求迫切,实现卫星光通信互联互通可整合不同轨道、功能的卫星,抵御环境干扰,保障通信连续可靠,通过开展基于标准协议实现星间、星地激光链路互联互通的研究,探索卫星协同路径,提升资源效率,强化应急响应,满足未来通信需求^[8]。

2 卫星光通信标准进展

目前,面向天地一体化覆盖愿景,构建新一代空间基础网络协同技术体系,探索高动态自由空间环境适配的卫星网络架构至关重要。宽带卫星通信网络的建设及运营是产业竞争与战略布局的焦点,卫星光通信以其明显优势成为卫星互联网的关键,国内外高度聚焦其技术标准的推进。

- 国际空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS): 低速 (Gbit/s 级别) 卫星光通信标准全球通用,涵盖物理层与链路互操作关键参数及技术规范。2023 年相干光通信标准项目启动,项目规划 2025 年三季度发布标准,有多个航天局与商业公司参与项目并积极协同。
- 美国: 2024 年美国太空发展局 (Space Development Agency, SDA) 发布光通信终端 (optical communication terminal, OCT) 标准,标准旨在保障互操作性,赋能多平台通信。2015 年 1 月美国 SDA 宣布,约克空间系统公司 (York Space Systems) 和太空探

索技术公司 (SpaceX) 成功实现星间激光通信;美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 天基自适应通信节点 (Space-BACN) 项目打造了可重构光学终端,破除卫星通信壁垒,实现推动太空互联互通^[9]。

- 国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU): 国际电信联盟无线电通信部门 (ITU-R) 第四研究组 (SG4) 下设工作组 WP4B 聚焦下一代卫星接入技术,确立系统、接口、性能与可用性目标,发布系列报告书与愿景规划,2023 年 6 月立项首个 6G 卫星研究项目,重点关注手机直连、星上处理、星间链路等核心技术方向。2024 年,中国移动牵头申请技术报告,旨在探究卫星传送网架构与需求,剖析研究动态、应用场景,预研天地一体光传送网架构、卫星光通信、协议优化、时间同步、管控等高精尖技术。
- 中国: 全国宇航技术及其应用标准化技术委员会 (SAC/TC425) 基于 CCSDS 发布多项标准,如《空间数据与信息传输系统深空光通信物理层》(GB/T 43372—2023)。中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA) 已完成《基于光交换的空间组网技术研究》《空间光通信用关键光器件技术研究》《面向空天地一体化网络的承载网架构及需求研究》和《空间光通信关键技术及应用》等研究课题。

当前业界的主流卫星网络体制协议是 CCSDS 与时延容忍网络 (delay tolerant network, DTN) 的融合体系,CCSDS 打造了一系列通信与数据处理规范建议,覆盖遥测、遥控、射频、调制、时码、编码、轨道运行、数据单元、外测轨道数据等多元领域。其光通信协议架构含

光物理层、光编码与同步层、太空数据链路协议层，当前着重前两层标准化工作：光物理层规范了协议架构、收发架构与关键参数；光编码与同步层依信号流程精确定义帧设计、切片、编解码等技术细节。CCSDS 的数据域支持灵活封装路由数据功能，可适配不同长度原始数据，采用分片、聚合映射模式，依帧长智能切换逻辑，适配多变通信场景。国际互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force, IETF）RFC 4838 规范的 DTN 以“存、携、转”消息交换机制为特色，构建容忍延迟、稳定可靠的覆盖层架构，有效应对网络中断难题，保障业务稳健运行。

3 标准空间光传送网协议探讨

3.1 定义与内涵

空间光通信是保障卫星之间、卫星和地面信关站之间实现大带宽、高可靠、轻量化、低功耗等关键能力的基础，而空间光通信标准化可以确保不同的卫星、地面站设备等能够无缝对接和协同工作，是实现统一空间信息协议的基础，如卫星运营商可以自由选择不同供应商的设备来构建卫星互联网系统，而不用担心设备之间的兼容性问题，就像不同品牌的手机能够在统一的通信标准下使用不同厂商的基站进行通信一样。基于标准空间光传送网协议，卫星互联网中的各个卫星节点、激光信关站可以顺利地建立光通信连接，实现数据的传输与交互。在构建大规模卫星互联网星座时，标准链路有助于将众多卫星以及地面基础设施集成为一个有机整体。无论是低轨道、中轨道还是高轨道卫星，只要遵循统一标准，便可具备高效融入整个网络体系的物理基础，降低系统集成的复杂性和成本，提高卫星互联网建设的效率。

3.2 协议设计要素

标准空间光传送网协议涵盖物理与数据链路

双层设计：物理层聚焦光信号物理特质与传输介质，规范波长频率、调制方式、功率调控，适应卫星间距波动与外界干扰；数据链路层专注数据组织管理，定义帧结构，将原始比特流转化为意义明晰的帧结构，通过前向纠错编码、自动重传请求等差错控制机制，保证数据传输精确无误。卫星互联网通信，尤其是低轨卫星互联网中，信息在多个连接之间传输，需要一定的策略来选择传输路径，以确保信息能在端与端之间可靠传输^[10]。

卫星星历凭借轨道半长轴、偏心率、倾角、升交点赤经、近地点幅角和平近点角六要素精准勾勒卫星轨迹，卫星根据星历数据可精准定位、定向，在高速动态场景下，把握转瞬即逝窗口实现卫星之间、卫星和地面之间的建联及数据传输；在链路预算环节，星历支撑精确测算链路距离、衰减，科学调配发射功率、带宽等资源，优化链路性能；在轨道预测与连接规划中，地面控制或卫星依星历前瞻轨道动态，编排连接次序与时间窗口。

星历数据的利用在星间通信中也逐渐受到重视，星历可以预测卫星之间的相对位置和运动状态，为优化通信路径和提高通信效率提供了可能。然而，现有技术中星历数据的利用大多停留在路径规划和链路建立阶段，对于通信过程中的数据传输效率和可靠性提升作用有限。如何将星历信息有效融入通信协议和帧结构设计中，以实现更精准的通信调度和资源分配，也是当前技术方案中的空白点。

3.3 新型帧结构设计

帧结构是标准空间光传送网协议的重要内容，其需要较高的数据承载效率、空口带宽利用率，承载更多的用户数据，同时具备高效运维能力，有完善的故障、性能、自测试等管理能力，在业务发生故障后，能够快速定位、定界。

沿用光传送网（optical transport network，



OTN) 相关协议到空间光通信组网中已成为业界研究的方案之一, CCSDS 已经将 ITU-T G.709 所定义的 OTN 接口协议纳入标准化范畴开展相关讨论, 国内标准组织也提出考虑沿用 OTN 架构^[11]。OTN 帧结构在地面光通信得以广泛应用, 为适应空间光通信应用场景, 应综合考虑增强容错性、优化灵活性、提高兼容性等多方因素, 基于现有 OTN 架构设计一种新型的帧结构, 以满足空间光通信场景的需求。

结合卫星链路具有确定时间连接和中断的特殊性, 可以考虑在卫星链路建立连接的场景下, 将星历信息融合到传输层的帧结构当中, 并通过固定帧长+固定间隙的帧结构, 在保证数据传输效率和可靠性的前提下, 充分利用星历数据预测卫星之间的相对位置和运动状态, 实现通信资源的优化配置。如日凌现象、反向缝导致卫星有规律开关, 基于星历有序刷新星载路由计划和拆建星间通信链路。这些链路变化基本是可以预测的, 为此本文设计一种新型的加载星历信息的定长帧结构, 如图2所示。



图2 加载星历信息的定长帧结构

- 固定帧长设计。根据星历数据预测的链路状态, 预设一个最优的固定帧长 L , 该帧长能够确保在链路状态稳定时, 数据传输的效率最大化。同时, 固定帧长的设计简化了通信协议, 降低了通信系统的复杂度。

该帧包含数据部分和必要的控制信息: 数据部分用于传输业务数据, 控制信息用于标识元的类型、序列号等, 便于数据的管理和恢复。

- 固定长度空隙帧插入。根据星历数据预测的链路状态, 在固定帧长的基础上, 适时插入固定长度的空隙帧。这些空隙帧用于适应链路状态的短暂变化, 如卫星之间的相对位置调整、日凌现象等, 从而保证数据传输的可靠性。信元与信元之间设有固定空隙, 空隙帧的长度根据卫星间连接的预测中断时间确定。在连接中断时, 空隙帧可以作为缓冲区, 存储未完成传输的数据, 待连接恢复后继续传输, 从而减少数据的重传, 提高通信效率。
- 星历数据融合。准确的星历信息能够帮助卫星之间快速建立通信链路, 调整天线指向, 确保信号的准确传输和接收。如何将星历数据无缝融合到帧结构中是新型帧结构的突破口。星历数据包含卫星的精确位置、速度等轨道参数, 是卫星通信中的关键辅助信息。通过星历数据, 可以预测卫星之间的相对位置和运动状态, 为固定帧长和空隙帧的设定提供依据。随着空天一体化网络架构的快速发展, 星间、星地通信对高精度动态链路管理提出迫切需求。传统卫星导航系统依赖独立信道传输星历数据 (包含卫星位置、速度等轨道参数), 存在带宽占用高、系统复杂度大等问题。如当两颗低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 卫星进行数据交互时, 它们需要实时知道对方的位置和运动状态, 才能精确地调整自身天线指向, 快速建立通信链路并不断调整维系连接; 在地面信关站与卫星的通信中, 地面站通过获取分析卫星星历信息, 准确地将天线指向卫星, 保证信号的稳定接收和发送。

在数据帧中融合星历数据, 数据信息包括发送卫星和接收卫星的当前位置、速度以及未来一段时间内的预测位置和速度。这使得准备建立或者已经建立起空间光通信连接的两个通信实体之间, 能够实时从数据帧中获取星历信息并根据星历信息提前调整光束对准和跟踪策略, 减少通信中断的可能性, 增强卫星之间、卫星与地面之间的准确指向与跟踪能力, 提升空间光通信系统的整体性能, 包括通信的可靠性、数据传输速率和信号质量等。

新型数据帧可参考 OTN 帧结构进行设计和优化。OTN 帧结构包括净荷区和开销区, 净荷区承载业务数据, 开销区承载与网络运维管理相关的信息, 通过增加卫星星历信息, 避免了为传输星历数据单独开辟数据通道。传统的通信方式传输卫星星历, 可能需要专门分配一部分带宽资源来建立独立的通信链路, 不仅增加了系统的复杂性, 还会占用大量的宝贵带宽资源。而 OTN 帧开销原本就用于承载运维管信息, 在不影响其基本功能的前提下, 合理利用其中部分区域携带星历信息, 实现了对帧资源的高效复用。目前, 常用的单颗卫星文本格式星历文件在 10 KB 量级。从目前 OTN 开销的容量进行分析, 一个标准 100 Gbit/s OTN 接口, 可以考虑使用其在光信道传送单元 (optical channel transport unit, OTU_k) 层的通用通信信道 (general communications channel, GCC) 开销的 2 字节携带星历信息, 带宽可以接近 2 Mbit/s, 从容量上完全满足星历传输的需求。

在通信传输过程中, 误码往往不是随机孤立出现的, 而是以突发的形式集中发生, 如在受到脉冲噪声干扰、信号衰落时, 短时间内会连续出现多个误码。OTN 采用交织技术将原始数据序列按照特定规则重新排列, 把原本可能集中出现的突发错误分散到不同的时间段或位置上。当重新突发错误时, 这些错误就会被分

散到不同的数据块或时间段中, 而不是集中影响某一段连续的数据。接收端在进行解交织操作后, 这些分散的误码就可以被后续的纠错算法更有效地纠正。

在卫星通信场景下, 卫星容易受到电离层闪烁、空间辐射等因素的干扰, 突发误码。假设在一个没有采用交织技术的卫星通信系统中, 当遇到一次强烈的电离层闪烁干扰时, 可能会在几百个连续的比特位上出现错误。如果采用的纠错编码只能纠正连续几个比特位的错误, 这些突发的大量误码就无法被有效纠正, 从而导致较高的误码率。采用 OTN 交织技术将原本连续的数据序列按照矩阵交织的方式重新排列, 当遇到突发误码时, 这些误码会被分散到不同的行和列中。接收端在接收到交织后的数据并进行解交织操作后, 误码就被分散开来, 原本集中的几百个误码可能变成了每行只有几个误码, 纠错功能模块可以有效地对这些分散的误码进行纠正, 从而降低误码率, 保证卫星通信数据传输性能。目前, OTN 主要采用 16 字节交织编解码器, 交织过程中数据被分成 16 个子行, 这些子行被按照特定的算法进行重新排列, 并依次填入一个矩阵中, 然后按照不同的顺序从矩阵中取出, 形成交织后的数据序列。在接收端, 解交织器会按照相反的规则将交织后的数据恢复成原始的数据排列顺序, OTN 交织技术如图 3 所示。

假设信道误码率为 $P_S = 10^{-3}$, 纠错码参数为 RS(n, k), 其中 n 代表编码后的总符号数 (码字长度), 即传输或存储的完整数据块大小, k 代表原始数据中的有效信息符号数 (信息段长度), 即需要保护的核心数据量。纠错能力 $t = (n - k) / 2$, 如 RS(255, 223) 码中, 纠错能力 $t = (255 - 223) / 2 = 16$, 单帧纠错极限 $t = 16$ 符号/帧。当突发误码长度 $L = 200$ 符号时, 超出单帧纠错能力。

采用交织方案, 交织粒度为 $N = 16$, 每帧分配误码数 $E_{ro} = \lceil L / N \rceil = \lceil 200 / 16 \rceil = 13$, 满足 $E_{ro}(13) < t(16)$,

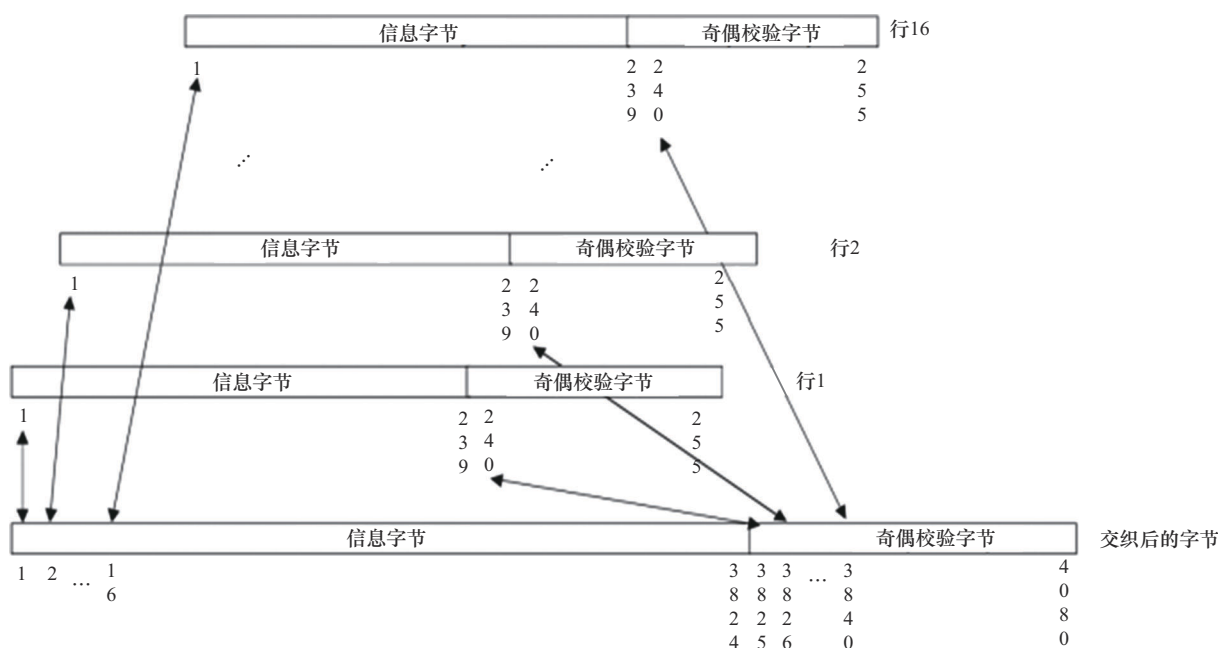


图3 OTN 交织技术

可纠正。RS 码纠错后残余错误率为：

$$P_{\text{残余}} \approx \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} p_s^i (1-p_s)^{n-i} \quad (1)$$

其中， i 为实际发生错误的符号数量； p_s 为单帧中单个符号的误码率。

当 $t=16$, $n=255$, $p_s \approx 8 \times P_s = 8 \times 10^{-3} = 0.008$ 时：

$$P_{\text{残余}} \approx \sum_{i=17}^{255} \binom{255}{i} \times 0.008^i \times 0.992^{255-i} \quad (2)$$

当 $p_s \ll 1$ 且 $n \gg t$ 时，可采用泊松近似估算：

$$P_{\text{残余}} \approx 10^{-12} \quad (3)$$

交织技术通过物理层扩展与时空重排，将不可纠错的突发误码转化为可纠错的随机误码，从而实现了误码率的指数级改善。

在传统的通信方式中，接收端可能需要通过不同的渠道或协议来获取星历信息，这不仅增加了系统的复杂性，还可能导致信息获取的延迟。此外，星历数据质量的好坏将大大影响用户的定位精度^[12]。接收端直接从接收到的数据帧中提取星历信息，能够及时、准确地获取卫星运行的实时信息。以卫星遥感数据传输为例，星历信息与

遥感图像数据同时传输，接收端能准确知道图像数据对应的卫星位置和姿态，可以根据星历信息对遥感图像进行精确的地理定位和校正，使得图像数据能够更准确的反映实际的地理信息，提高数据的准确性和可用性。此外，将星历信息融合传输层帧结构，无须为星历信息单独开辟通信通道或专用设备，减少了系统的复杂性和资源消耗。对于小型卫星物联网终端设备来说，通信带宽和处理能力较低，将星历信息融合到传输层帧结构中，能够有效节省设备的通信带宽和处理能力，使设备能更高效地运行数据采集、处理和传输等任务。

OTN 技术在光网络领域已经经过长期发展和广泛应用，技术成熟度体现在标准化的接口、完善的管理协议和高效的数据处理机制等。融合星历信息的 OTN 帧结构一方面可以辅助建立和维系稳定可靠的空间光通信连接，另外一方面为实现与现有地面光网络基础设施的兼容与对接提供一种方案。卫星信关站作为卫星与地面网络的接口，承担着数据中转和协议转换的重要任务，采用基于 OTN 帧结构的空光传送网，在业务从空间传

回卫星信关站后，空间光传送网以标准的 OTN 域间接口（inter-domain interface, IrDI）直接与地面光传送网进行连接，降低了地面系统升级的成本和技术难度，使得新型空间光传送网更容易被推广和应用，加速空间光通信与地面光通信的融合进程。

定长帧结构设计可减少帧头和帧尾的开销，提高了数据传输效率，空隙帧设计则优化了连接中断时的数据恢复和重传机制，当网络连接中断时，未完成的数据被存储在帧尾的空隙中，一旦连接恢复，这些数据可以继续传输。在数据帧中插入星历信息有助于卫星链路连接的快速建立和稳定维系，这种设计为在网络不稳定的环境中保持数据的连续性和完整性提供了一种技术选择。

4 空间光传送网协议发展方向

可互联互通的空间光传送网架构是构建无缝通信覆盖的“桥梁”和实现天地一体化的关键环节。天地一体化网络旨在将地面网络与空间网络紧密融合，形成一个无缝覆盖的通信系统，标准统一的空间光传送网就像一座“桥梁”，连接着天空中的卫星网络和地面的通信基础设施，实现“一桥飞架南北，天堑变通途”。针对空间光通信存在的高动态、链接存续周期性强等特点，可通过优化帧结构设计、合理应用开销字段、选择合适前向纠错编码方式和改进映射复用方式，提高空间光通信系统传输效率、增强可靠性并确保兼容性。新型帧结构将更好地适应空间光通信特殊环境和业务需求，为空间光通信技术发展提供有力支持，推动其在更多领域广泛应用。

- 全方位提升通信效能。空间光传送网标准链路规定的通信协议和参数，包括光信号的调制解调方式、编码格式、功率控制等，使得卫星之间以及卫星与地面站之间的光通信能够在各种复杂的空间环境下保持稳

定可靠的数据传输。在面对太阳活动干扰、大气闪烁等不利因素时，针对性地采用相应的抗干扰技术和自适应调整机制可保障通信链路的稳定性。如在卫星遥感应用中，卫星获取的大量地球观测数据（如高分辨率的图像、气象数据等）通过空间光传送网被快速传输到地面的数据中心进行分析和处理。

- 智能优化网络资源配置。可互联互通的空间光传送网为天地网络资源统一调配创造条件。根据区域与时段需求差异，管理者灵活调度卫星、基站资源及链路带宽。如偏远大型活动期间，按需精准分配卫星带宽资源，保障通信品质，实现资源利用效益最大化。
- 动态重构网络拓扑。标准统一且互联的空间光传送网为天地一体化网络植入动态重构能力。卫星轨道变迁与地面需求波动驱动拓扑自适应调整，含星历信息的帧结构依势灵活切换链路、重建通信链路。在星座多链路冗余架构下，链路出现故障时可智能切换到备份链路，确保网络不间断运行，强化网络韧性与可靠性。

考虑空间光通信特殊环境与需求，设计一种具有丰富开销管理、高效前向纠错、灵活映射复用和兼容性强的帧结构是新型空间光通信的发展目标。新型帧结构的确立需要进一步研究和攻关技术难题，如星历如何嵌入帧结构、星地之间大气湍流的影响、前向纠错编码与调制技术优化组合、与其他通信系统无缝对接等，以实现空间光传送网技术的持续发展和创新。

5 结束语

本文首先分析了空间光通信技术对于卫星互联网的重要性。空间光通信技术应成为整个卫星网络未来发展的关键环节之一，担负起星间与星



地之间传输海量、高效、稳定数据的重任；其次，结合卫星通信网络朝大规模、复杂体系演进，进一步阐述了构建互联互通、标准统一的空间光传送网的重要意义，底层物理网络的标准化将打破不同卫星之间的通信壁垒，畅通复杂卫星网络信息交互，驱动全球一体化通信愿景实现；本文系统梳理了各标准组织的领域进展与布局，提出以携带卫星星历为特征的新型空间光传送网帧结构和协议，为进一步提升空间光通信链路的性能和适应性提供一种技术发展的选择。

卫星网络作为我国通信基建新的战略高地，意义深远，后续研究应立足我国光纤通信技术积累，拓展优势至卫星通信领域，借助卫星光通信标准化进程，打通多星座、多类型卫星及星地链路互联互通瓶颈，高效运用轨道资源构建基于空间光传送网的高韧性卫星通信网络，为全球经济社会发展筑牢公共信息基建底座。

参考文献:

- [1] 翁玮文, 程锦霞, 刘京, 等. 基于星地协同组网的天地一体关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 3-10.
WENG W W, CHENG J X, LIU J, et al. Key technical research of space-terrestrial integrated network based on satellite-terrestrial collaborative networking[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 3-10.
- [2] 陈山枝, 范志文, 金家德, 等. 卫星互联网星间激光通信的分析及建议[J]. 电信科学, 2024, 40(2): 1-10.
CHEN S Z, FAN Z W, JIN J D, et al. Analysis and suggestions on inter-satellite laser communication of satellite Internet[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(2): 1-10.
- [3] LI Y L, ZHANG H Q, HUANG P, et al. Demonstration of 10 Gbps satellite-to-ground laser communications in engineering[J]. The Innovation, 2024, 5(1): 100557.
- [4] CHEN Q, GUO Z, MENG W X, et al. A survey on resource management in joint communication and computing-embedded SAGIN[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, PP(99): 1.
- [5] 赵尚弘, 彭聪, 李勇军, 等. 面向卫星互联网的下一代卫星光网络关键技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 11-21.
ZHAO S H, PENG C, LI Y J, et al. Key technology progress of next-generation satellite optical network for satellite Internet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 11-21.
- [6] 侯霞, 刘哲琦, 常亦迪, 等. 卫星激光通信技术发展现状与趋势分析[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101013.
HOU X, LIU Z Q, CHANG Y D, et al. Analysis on development status and trend of space laser communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 1101013.
- [7] 崔潇. 卫星光通信关键技术及发展态势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2021(11): 65-72.
CUI X. Analysis of key technologies and development trend of satellite optical communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021(11): 65-72.
- [8] 倪思洁. 深空“星座”搭建星际互联网[N]. 中国科学报, 2018-10-11(1).
NI S J. Deep space “constellations” build an interstellar Internet[N]. China Science Daily, 2018-10-11(1).
- [9] 陈占胜. 未来智能化网络化多功能卫星系统技术发展思考[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 63-67, 108.
CHEN Z S. Consideration on the development of intelligent networked multifunctional satellite system technology in the future[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 63-67, 108.
- [10] 常呈武, 刘宏阳. 卫星互联网星间激光通信链路传输与路由交换技术研究(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 0706005.
CHANG C W, LIU H Y. Research on inter-satellite laser communication link transmission and routing switching technology of satellite Internet(invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(7): 0706005.
- [11] 崔潇, 刘可为, 谢俊杰, 等. 空间光通信关键技术及应用研究[R]. 北京: 中国通信标准化协会, 2024.
CUI X, LIU K W, XIE J J, et al. Research on key technologies and applications of space optical communication[R]. Beijing: China Communications Standards Association, 2024.
- [12] SUN Z Z, XU T H, GAO F, et al. The quality assessment of non-integer-hour data in GPS broadcast ephemerides and its impact on the accuracy of real-time kinematic positioning over the South China Sea[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2019, 119. 263-280.

[作者简介]



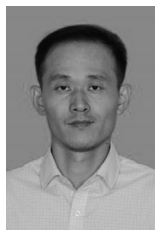
邓伟（1978-），男，博士，中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所所长、正高级工程师，CCSA TC12 副主席，主要研究方向为卫星通信、4G/5G 行业网技术及应用、5G-Advanced/6G 天地一体化技术等。



张剑寅（1974-），男，博士，中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所主任研究员、正高级工程师，ITU-T SG11 Q1 副报告人，CCSA TC3 WG4 副组长，主要研究方向为天地一体化网络、核心网演进、5G 专网等。



李允博（1975-），男，中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所主任研究员、正高级工程师，CCSA TC12 WG4 副组长，主要研究方向为卫星通信、光通信、数字孪生技术等。



刘亮（1983-），男，博士，中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所主任研究员、正高级工程师，主要研究方向为通感一体、无线通信中的信号处理、移动通信系统无线网络架构和协议、网络智能化和自动化等。