

# 面向卫星互联网的星载光交换技术

孟佳成<sup>1,2</sup>, 谢宁波<sup>1,2,3</sup>, 白兆峰<sup>1,2</sup>, 朱嘉轩<sup>1,2</sup>, 武军霞<sup>1,2</sup>, 高铎瑞<sup>1,2,3</sup>, 汪 伟<sup>1,2</sup>, 谢小平<sup>1,2,3</sup>

(1.中国科学院西安光学精密机械研究所光子网络技术研究室, 陕西 西安 710119;

2.中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要：**随着卫星遥感、大数据超算中心、视频战场、6G移动通信等超高速大容量信息传输需求日益提高，以激光取代传统微波作为信息载体的卫星通信技术发展成为趋势，这也是解决微波通信带宽瓶颈和缓解频谱资源紧张的有效手段。未来需要构建全球覆盖的卫星互联网，提供地面光纤网络所不具备的能力（大覆盖率、低时延、人口稀少地区服务、无地理障碍等）。对于未来卫星节点超高速大容量信息处理来说，星载光交换技术是关键与核心。首先，介绍基于激光通信的卫星互联网发展脉络，分析面向卫星互联网的星载光交换技术的重要性，重点对星载光交换技术进行细致地分类对比、体制及信息处理模式研究，展示潜在的技术方案。然后，针对光交换核心器件特性和应用方案进行分析研究，希望为下一代卫星互联网技术研究提供借鉴与参考。

**关键词：**卫星互联网；星载光交换；核心光电器件

**中图分类号：**TP929.1

**文献标志码：**A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2022020

## Spaceborne Optical Switching Technology for Satellite Internet

MENG Jiacheng<sup>1,2</sup>, XIE Ningbo<sup>1,2,3</sup>, BAI Zhaofeng<sup>1,2</sup>, ZHU Jiaxuan<sup>1,2</sup>, WU Junxia<sup>1,2</sup>, GAO Duorui<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Wei<sup>1,2</sup>, XIE Xiaoping<sup>1,2,3</sup>

1. Laboratory of Photonics and Network, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** With the increasing demands for ultra-high speed and large-capacity information transmission such as satellite remote sensing, big data super computing center, video battlefield and 6G mobile communication. The satellite laser communication technology using laser instead of traditional microwave as information carrier has become development trend. It is an effective mean to solve the bottleneck of microwave communication bandwidth and reduce the shortage of spectrum resources. In the future, we need to build a satellite internet with global coverage, which are needed to provide the capabilities that terrestrial optical fiber networks do not have (large coverage, low-delay, services in sparsely populated areas, no geographical obstacles, etc.). The spaceborne optical switching technology is the key and core for the ultra-high speed and large capacity information processing on satellite nodes. Firstly, the development context of satellite internet based on laser communication was introduced, the importance of spaceborne optical switching technology for satellite internet was analyzed. It focused on the detailed classification and comparison, system and information processing mode of space-borne optical switching technology, and showed the potential technical scheme in the future. Then, the characteristics and application schemes of optical switching core devices were analyzed and studied to provided reference for the next generation of satellite internet technology research.

**Keywords:** satellite internet, space optical network, core photoelectric devices

**收稿日期：**2022-02-15；**修回日期：**2022-04-10

**通信作者：**谢小平, xxp@opt.ac.cn; 汪伟, wangwei2012@opt.ac.cn

**基金项目：**国家重点研发计划 (No.2018YFC0307904-02)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFC0307904-02)

## 0 引言

随着信息化技术高速发展,互联网流量爆炸式增长、海量终端接入需求,以及工业控制、远程医疗对网络时延和可靠性提出越来越高的要求,催生了5G通信技术,也将通信能力从移动性、时延、用户感知速率、峰值速率、用户连接密度、流量密度、能源效率等7个方面带来了质的飞跃<sup>[1]</sup>。在全球5G技术如火如荼发展的同时,6G技术悄然来临<sup>[2]</sup>。由于信息网络对人类活动支撑由传统地面通信网络主导的“平面网络”向地面/空间混合构成的“立体网络”发展和延伸,6G技术亟须构建跨地域、跨空域、跨海域的卫星互联网<sup>[3]</sup>。愿景中的卫星互联网主要架构可分为3部分:由各种轨道通信卫星构成的天基网络、由飞行器构成的空基网络以及传统地基网络(包括蜂窝无线网络、卫星地面站、移动卫星终端以及地面的数据与处理中心等),提供地面互联网所不具备的能力(大覆盖率、低时延、人口稀少地区服务、无地理障碍等),实现真正意义上的全球无缝覆盖<sup>[4]</sup>。

构建不依赖地面网络的全球覆盖的卫星互联网,实现波束间信息交互,星载交换技术是关键<sup>[5]</sup>。星载交换系统中的业务主要是网状业务,由卫星直接进行信号处理和交换,所有用户间的通信只有一跳,也就摆脱了对地面站的依赖。在非静止轨道(Non-GeoStationary Orbit, NGSO)卫星星座中,采用星载交换技术和星间链路可实现不依赖地面网络的全球覆盖天基组网。考虑到我国建立海外信关站所面临的限制,星载交换是我国卫星互联网建设中的关键技术。

目前星载交换技术主要分为电交换和光交换两种方式。星上电交换方式存在难以突破的“电子速率”瓶颈,很难适应主要依托空间激光通信链路的超高速卫星互联网发展现状。由于光交换不经过任何光/电、电/光转换,将输入端光信号直接交换到任意端口进行光输出,这种方案可最大程度提升星上激光数据交换的速率和容量,并且能够大量节省建网成本,大幅提高网络可靠性、灵活性和安全性<sup>[6]</sup>。

## 1 卫星激光通信技术发展脉络

### 1.1 基于激光通信的空间光网络

卫星激光通信技术是指利用激光作为信息载体进行空间(包括大气空间和星际空间)信息传输的相关技术。2019–2021年,NASA规划一系列近地卫星激光通信任务,其中最具代表性的重要研究计划是激光通信中继演示(Laser Communications Relay Demonstration, LCRD)<sup>[7]</sup>。LCRD有效载荷包括两个光学空间终端(Optical Space

Terminal, OST),它们彼此独立,通过双向光学链路与地面站进行通信<sup>[8]</sup>。LCRD计划成为NASA在卫星激光通信领域的开拓者,将激光通信整合到当前运行的空间网络中,形成空间立体光网络体系架构。

不仅NASA针对未来高通量信息网络建设筹划空间光网络研究计划,欧洲航天局(ESA)及加拿大等21国规划了全光化的空间信息网络研究项目(High Throughput Optical Network, HyDRON),彻底颠覆星上“电中继”运作模式,旨在将空间光传输网络无缝连接到地面大容量网络基础设施中,形成所谓的“空中光纤”。ESA分析称<sup>[9]</sup>,现阶段的卫星通信系统中,光通信技术的内在潜力并未得到充分利用,存在光电/电光转换过程中带宽限制所带来的“速率瓶颈”问题,难以达到Tbit/s量级。在HyDRON中,设计的“全光有效载荷”可实现卫星间Tbit/s体制下的互联互通,为“空中光纤”网络提供“桥梁”。该演示系统由HyDRON DM1和DM2两套全光载荷(DM1对应GEO,DM2对应LEO)、光学地面站及网络控制中心组成,可实现大于100 Gbit/s的星间双向通信,并配备超大容量全光交换系统,为空间全光组网提供重要支撑<sup>[10]</sup>。

纵观国际卫星激光通信网络发展现状,美国发展更加具有阶梯性和体系化。从LCRD项目实施,到2025年LOCNESS中继节点实施下一代卫星激光通信网络,实现以地球为中心,连接近地、高轨、月球和L2点的超大激光通信网络,对目前的跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)进行补充。欧洲卫星激光通信网络技术也已发展得比较成熟,对卫星激光通信组网和深空激光通信做了明确的规划,随着2025年EDRS-D的发射,欧洲将实现全球第一个实用化的卫星激光通信中继网络。同时,欧洲正在实施HyDRON计划,计划建成可以覆盖全球的全光激光通信网络。无论美国的LOCNESS还是欧洲的HyDRON都具备大容量星载光交换载荷,支撑了空间光网络的高效运行。

### 1.2 具有激光链路的低轨通信星座

典型卫星互联网星座由低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星构成,距离地面500~2 000 km,运行周期约为1.6 h,虽然单颗LEO卫星覆盖范围有限,但可以通过发射众多低轨小卫星构建卫星通信星座系统来弥补缺陷,从而达到降低时延,增强信号,实现全球覆盖的目的<sup>[11]</sup>。随着新型多媒体技术的出现,数据业务吞吐量方面的需求日益增多,要求卫星通信系统能够与地面通信网络互补,以达到全球覆盖效果<sup>[12–13]</sup>。毫无疑问,卫星通信将引领下一代无线通信新热潮,新兴LEO卫星

通信系统包括 Telesat、Starlink等。

Telesat星座模式使用V波段，建立一个拥有超过117颗LEO卫星的全球网络，高度为1 110~1 248 km，时延为30~50 ms<sup>[14-15]</sup>。同一轨道组内的同一平面或相邻平面及在两个轨道组间的相邻卫星，都将通过激光星间链路（Inter-Satellite Link, ISL）进行通信<sup>[16]</sup>。

SpaceX提出了Starlink星座分两步完成的计划。首先，将使用Ku和Ka频段，发射4 425颗LEO卫星，高度为1 110~1 325 km<sup>[17-18]</sup>；然后发射7 518颗LEO卫星，高度为340 km<sup>[18]</sup>；2018年2月，SpaceX使用猎鹰9号火箭将两颗Starlink卫星送入轨道，每个卫星的总吞吐量预计为17~23 Gbit/s<sup>[20]</sup>。卫星都配备了激光通信终端，可提供大容量信息传输服务。

在这个信息量爆炸的时代，更大容量、更高带宽、更高安全性数据传输需求日益增长，卫星激光通信技术随之诞生。作为低轨星座的代表，无论是Telesat星座，还是Starlink星座都配备了激光通信终端，用来满足未来更高效海量数据传输需求，为低轨卫星互联网性能提升提供重要支撑。

我国卫星激光通信技术研究起步较晚，目前的相关研究工作主要是验证星间“点对点”激光通信技术，而且通信速率不超过5 Gbit/s。星上交换体制还采用电交换，交换容量和数据处理时延还需改进，影响了空间节点海量数据处理、分配、转发及交换效率。因此，我国发展大容量低时延星载光交换技术势在必行。

2 星载光交换技术

传统的电交换主要有电路交换和分组交换两种类型。电路交换又分为时分交换（Time Division Switching, TDS）和空分交换（Space Division Switching, SDS）两种方式<sup>[21]</sup>。电交换是基于电子数字信号处理技术进行交换的。光交换和电交换的优劣势比较见表1，交换数据粒度很小，直接供用户使用，但交换容量受电子元器件带宽限制，功耗大，系统串扰严重。光交换带宽极宽，其交换容量大，功耗远小于电交换，节省了网络资源，大大提高了网络的灵活性和可靠性<sup>[22]</sup>。

2.1 光交换技术体制

根据交换的粒度不同，现有的光交换大致可分为光电路交换（Optical Circuit Switching, OCS）、光突发交换（Optical Burst Switching, OBS）和光分组交换（Optical Packet Switching, OPS）3种交换体制<sup>[23]</sup>。

(1) OCS技术

如图1所示，OCS技术以光学波长作为交换粒度<sup>[24]</sup>，其

表1 光交换和电交换的优劣势比较

| 交换方式 | 优势                                                         | 劣势                             |
|------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 电交换  | 以电子数字信号处理技术为基础的交换方式，交换数据粒度可以非常小，直接提供用户使用                   | 交换容量要受到电子元器件工作速度的限制，功耗大，系统串扰严重 |
| 光交换  | 拥有极宽的带宽，是电交换的几百倍，运行速度快，模拟信号与数字信号传输均可进行光交换；光交换的体积、功耗要远小于电交换 | 光缓存技术不成熟，无法进行光域存储转发交换          |

交换过程分为光路建立、光路维护（信息传输）、光路释放3个阶段。OCS技术主要特点是在光路建立、保持的条件下<sup>[25]</sup>，需要往返时间（Round-Trip Time, RTT）<sup>[26]</sup>，但其静态和粗粒度特性降低了端口和链路利用率<sup>[27]</sup>，不能满足用户突发数据交换使用需求<sup>[28]</sup>，容易造成大量带宽浪费<sup>[29]</sup>，而OBS和OPS技术在提高网络带宽利用率方面具有优势。

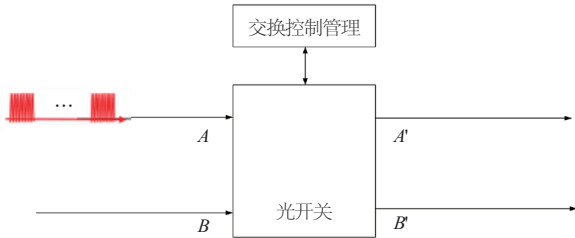


图1 OCS原理

(2) OBS技术

如图2所示，OBS技术基本交换单元称为突发包<sup>[30]</sup>，每个突发包分为控制分组和突发数据，突发数据具有相同属性（如IP分组、以太网帧、中继帧等）。每个突发数据对应一个控制包，其中包含突发数据的长度、偏置时间、生存时间、波长、路由参数等基本信息<sup>[31]</sup>。OBS网络的核心问题是资源保留协议设计，可分为单向和双向。典型的双向资源保留协议是呼叫协议<sup>[32]</sup>，其缺点是带宽利用率低、网络灵活性不足<sup>[33]</sup>。利用OBS将数据组成突发包，满足传输吞吐量高的大数据和传输时延低的小命令，但突发包会引入较大时延，无法满足实时传输需求。

(3) OPS技术

如图3所示，OPS技术属于光包交换范畴，以更小粒度的光分组作为交换单位<sup>[34]</sup>。虽遵循电域“存储转发”原则，但光分组交换可看作电分组交换在光域中的实现。OPS技术具有容量大、交换灵活、速率和格式透明、粒度细、可配置、资源利用率高等特点<sup>[35-36]</sup>，将OPS技术与波分复用（WDM）技术相结合，可实现网络交换容量与传输容量匹配，这已成为下一代光网络实时处理

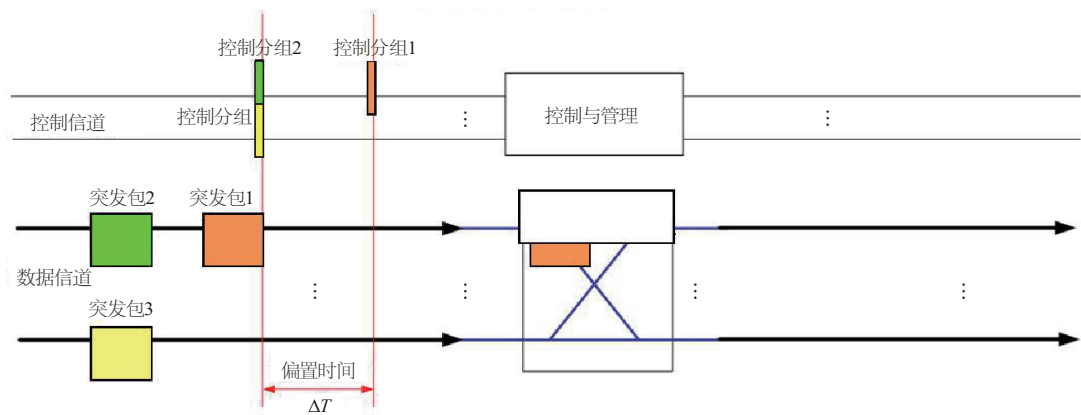


图2 OBS原理

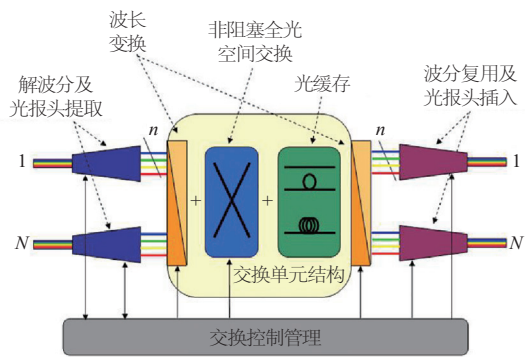


图3 OPS原理

的核心技术。

从交换粒度、时延特性、链路利用率等方面来说，OCS、OBS、OPS的相关参数对比见表2<sup>[37]</sup>。由此可知，若传输数据量很大，而且传送时间远大于呼叫时间，则采用OCS较为合适；当端到端通路由多业务、多粒度链路组成时，采用OBS和OPS较为合适。与传统地面光纤网络相比，空间立体光网络因其异构性、自组织性、动态时变性等特点，面临前所未有的挑战。其在流量分配、负载均衡、协议优化、功率控制、资源管理和分配等方面会受到多种约束。ESA在Darwin和Xeus项目中研制了无阻塞光交换载荷，验证了星上光交换技术的可行性。从卫星激光通信网络角度来看，GEO节点面向多种业务实现高可靠性的快速接入服务，其主要实现透明转发大粒度业务数据，因此采用OCS体制；LEO节点负责将用户终端或其他空基平台接入的流量组装成小粒度业务数据，当处理突发数据时，采用OBS体制，根据突发业务流量动态变化，实时调整子波长调度粒度。当处理低时延需求的光层大容量数据时，OPS体制更具优势。

表2 不同光交换方式的参数对比

| 参数      | 光电路交换              | 光突发交换        | 光分组交换  |
|---------|--------------------|--------------|--------|
| 交换颗粒度   | 最大<br>(链路、信道)      | 大(突发包)       | 小(分組包) |
| 交换时间    | ms量级               | ms量级         | μs量级   |
| 连接需求    | 面向连接               | 面向连接         | 面向非连接  |
| 资源预约    | 资源预留机制；含光路建立、保持和释放 | 需要预约端口、波长等资源 | 无须预约   |
| 临时接入灵活性 | 不灵活                | 不灵活          | 灵活     |
| 链路资源利用率 | 极低，带宽资源浪费严重        | 低            | 高      |
| 核心要求    | 先建立链路再传输           | 信令网          | 光缓存    |

2.2 光放大中继

由于光网络多跳引起光信号的功率衰减以及信噪比降低，因此在交换节点也需要对光信号进行放大中继处理。光放大中继（Optical Amplify and Forward, OAF）结构如图4所示<sup>[38]</sup>，发射端光场经过一段空间距离的传输后，到达交换中继节点，其不仅包含发射端光信号，也包含空间传输引入的噪声。在交换中继节点处，光信号由掺饵光纤放大器（EDFA）进行功率放大，然后再由带通滤波器进行匹配滤波移除带外噪声后转发至接收端。在接收端，光信号最终由光电探测器转换为电信号。在这样的“一跳”光放大中继系统中，接收端解调后的光电流不仅包含有用信息，也包含背景辐射、ASE噪声以及众多拍频噪声分量<sup>[39-40]</sup>。

2.3 光再生中继

光再生中继（Optical Regenerate and Forward, ORF）技术是一种可直接在光域提升光信号质量的技术，能够使

输入、输出信号幅度或者相位之间发生阶跃型非线性变换,从而达到大幅度抑制信号噪声的目的。全光再生技术(全光3R再生技术)主要包括再放大、再整形及再定时<sup>[41-42]</sup>3个核心功能。全光域内对光信号进行再生的3R再生技术在未来全光通信中有着十分大的发展潜力。由于光器件性能不断优化,全光3R再生技术在光通信中扮演的角色越来越多。全光3R再生系统具体可以划分为3部分:全光放大单元、全光时钟提取单元以及全光判决单元<sup>[43-44]</sup>,如图5所示。

## 2.4 基于“波长地址路由”的星载光交换创新方案

本文提出基于光波长地址路由的星载光交换技术,利用光信号波长作为用户地址信号,通过光波长变换实现地址路由,通过规定波长出口,实现“传输光信号的同时进行地址识别”达到无时延全光数据交换的目的,避免光缓存问题。其设计原理如图6所示。该设计原理可分3步:第一步,分配波长;第二步,波长变换;第三步,发送与接收。用于光交换的全光波长变换技术要求:第一,数据格式透明,支持光信号幅度、相位透

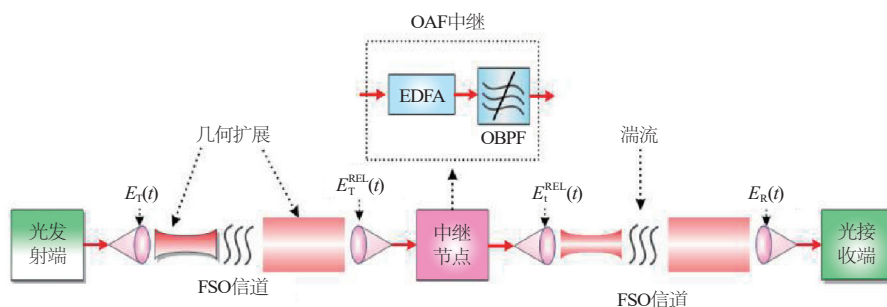


图4 光放大中继结构

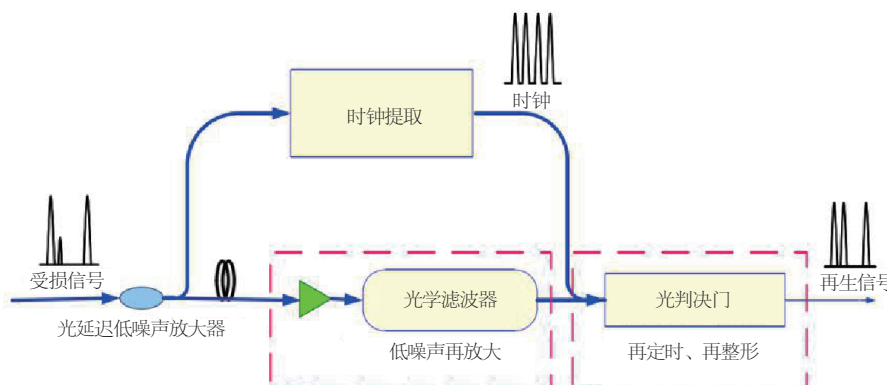


图5 全光3R再生系统示意

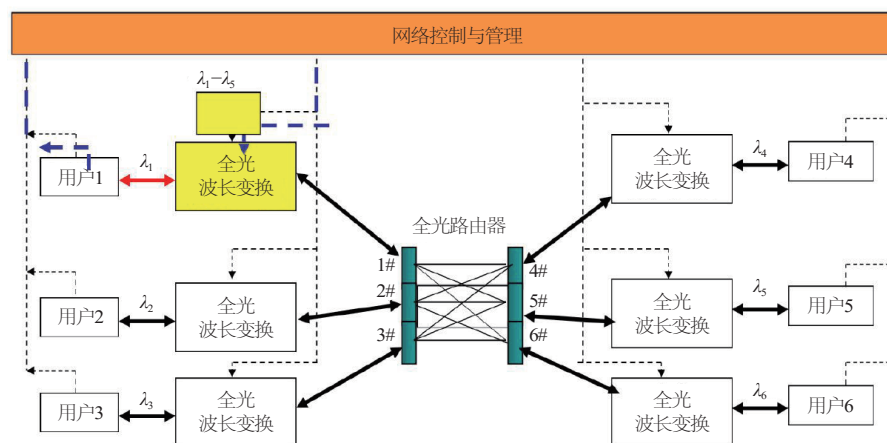


图6 基于“波长地址路由”的光交换原理

明；第二，偏振无关，适应不同卫星激光链路信号；第三，宽变换范围，可满足更多卫星组网。

2.5 星载光交换研究现状

目前，我国北京邮电大学、华中科技大学等高校重点从事光网络及光交换新技术相关理论研究工作，中国航天科技集团有限公司第五研究院西安分院等科研院所融合微波交换和光突发交换方案，开展理论研究和原理样机研制。中国科学院西安光学精密机械研究所围绕空间信息网络国家战略需求，“十二五”“十三五”期间先后部署了星载光交换技术研究任务。国内首次提出“波长地址路由”创新技术方案，并研制出我国首台背板带宽40 Gbit/s的多端口空间光交换工程样机，解决了我国空间信息网络高速激光链路数据交换带宽瓶颈难题；依托中国科学院重点部署预研项目，研制光电混合交换原理样机，实现了高轨卫星的光线路交换及电分组交换；依托航天系统部专用技术预研项目，研制分组交换原理样机，该样机可支持40 Gbit/s交换容量，交换时间仅为0.388 μs。目前研制了国内首台星载高速光交换机，预计2022年10月搭载“XM壹号”卫星上天验证。中国科学院西安光学精密机械研究所在星载光交换技术领域所取得的研究成果，能够为我国空间立体高速光信息组网重大需求提供重要技术支撑。

3 星载光交换技术核心器件

3.1 光缓存器

光缓存是解决光交换、光互联过程中数据包竞争导致时延的一项关键技术。只有解决了光缓存技术难题，光网络才能真正为用户提供更多服务。光在缓存器中实现时延有两种手段：真时延操作和慢光操作。利用真时延操作技术实现缓存的器件叫作光纤时延线性光缓存器，主要分为向前型光缓存器和反馈型光缓存器<sup>[45]</sup>；利用慢光操作技术实现缓存的器件叫作慢光型缓存器，主要分为电磁诱导透明型光缓存器和光子谐振型光缓存器<sup>[46]</sup>。面向星载使用条件应考虑空间辐照等环境适应性问题的，在对光纤型光缓存器进行辐照实验时，发现随着辐射剂量的增加，反射峰波长先增加然后趋于饱和；在辐照实验结束后再对其进行退火实验，发现一定的温度退火有利于器件的光学性能恢复。

3.2 光调制器

光调制器的作用是实现由电信号到光信号的转换，它可以通过改变光束参量（振幅、频率、相位、偏振态）来传输信息。对光源进行强度调制的方法一般分为

两类：直接调制和间接调制<sup>[47]</sup>。直接调制是直接对光源进行调制，通过控制半导体激光器的注入电流的大小来改变激光器输出的光的强弱；间接调制是在光源的输出通路上外加调制器对光波进行调制（实际上起到一个开关的作用）。常用的一般为铌酸锂晶体（LiNbO<sub>3</sub>）光调制器，在空间环境中，当质子辐照量较大时，质子辐照会破坏LiNbO<sub>3</sub>波导内部的晶格结构和原子分布，直接影响LiNbO<sub>3</sub>电光调制器的插入损耗。

3.3 光开关

光开关是星载光交换设备的核心器件，设计实现高频率、低插损、低串扰、长寿命、高可靠等性能优越的光开关器件，可提升光交换载荷系统级能力，从而影响整个空间光网络效能发挥。可以说，光开关技术是承载空间光网络建设中星载光交换设备研制的关键技术。常用的光开关技术体制包括平面光波导（Planner Lightwave Circuit, PLC）、微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）及硅基液晶显示器（Liquid Crystal on Silicon, LCOS），其各有其优缺点，具体见表3。

表3 不同光开关的参数对比

| 性能   | 种类   |      |     |
|------|------|------|-----|
|      | MEMS | LCOS | PLC |
| 拓展性  | 高    | 低    | 中   |
| 体积   | 小    | 中    | 中   |
| 插损   | 中    | 中    | 小   |
| 回损   | 优    | 差    | 良   |
| 串扰   | 优    | 差    | 差   |
| 开关速度 | 慢    | 慢    | 快   |
| 功耗   | 中    | 小    | 小   |

基于PLC技术的光开关方案<sup>[48]</sup>，通带优化后能获得较好的特性，其通过热光效应和等离子体色散等非线性效应实现，具有响应速率快，极高带宽，低插损等优点，但其只能提供两个自由度（二维器件）的互联，无法解决多维度连接。目前可实现的光开关通道端口数较少，且增加端口数会使损耗线性增加。基于MEMS技术的光开关方案<sup>[49]</sup>具有体积小、重量轻、惯性小、光学鲁棒性较好等优点，且方便扩展，但切换速率较慢导致时延较高，普遍为ms量级，机械结构导致一定的插入损耗；而MEMS微镜驱动IC一般需要高压，驱动以及控制电路都较为复杂，大规模依靠堆叠方式实现。基于LCOS技术的光开关方案<sup>[50]</sup>具有最好的通带特性，无惯性、无振动、无磨损、支持灵活栅格，可采用低电压驱动，通过低功

耗、微电流的方式实现,具有较高的集成度,但液晶对光束指向能力的不足,需要更多阵列以满足大端口的交换数量。其衍射光栅的色散能力与液晶芯片的限制阻碍了光开关光谱分辨率的进一步缩小,同时柱面镜对光束的压缩能力限制了光开关中单个波长通道的最小带宽,且稳定性较差,实现复杂。在空间辐射环境持续的影响下,光开关的切换速度会出现明显的降低,这主要是由位移损伤效应引起的。考虑到实际空间辐射环境的辐射总剂量在100 krad左右,需要采取加固措施进一步降低寿命期内累积的辐射总剂量。

结合未来空间立体光网络光交换多体制应用的需求,星载光开关技术将向大容量、多维度的方向发展;同时需要考虑良好的网络扩展能力,而且能够实现来自东、南、西、北任一方向的任意波长信号均可从任意其他3个方向输出,各上下话路端口转发可以来自任意方向的任意波长信号或任意波长信号至任意方向;同时支持所有方向上的广播业务和灵活栅格功能。不仅如此,星载光开关技术可以被广泛应用于GEO骨干网、LEO接入网等各种场合,并支持环形网、网状网等各种动态网络拓扑结构以及对网络资源和拓扑结构的动态调整。考虑到硅基液晶显示器的多维度、灵活性及平面光波导的高集成度、多功能性,采用PLC与LCOS相结合的技术是未来星载光开关技术的发展趋势。

## 4 总结与展望

基于激光通信的卫星互联网将超高速、超大容量的地面光纤网络技术扩展到空间立体维度,不但提供了支持全球覆盖的网络体系架构,而且大幅降低了地面基础设施的铺设,为6G等革命性技术发展提供重要支撑。因此,我国亟须规划超高速大容量的卫星互联网战略性基础建设。

卫星作为空间信息网络的重要节点,星载光交换技术是其核心技术。本文重点梳理了不同星载光交换技术方案优缺点,给出了基于“波长地址路由”的光交换可行性方案,着重介绍了核心光电器件的设计与应用,为卫星互联网领域发展提供了开创性技术思路。

## 参考文献：

- [1] DANG S, AMIN O, SHIHADA B, et al. What should 6G be? [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3 (1): 20-29.
- [2] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 64(1): 1-74.
- [3] RAPPAPORT T S, XING Y C, KANHERE O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 78729-78757.
- [4] 谢小平, 高锋瑞, 汪伟, 等. 星载空间激光通信系统设计与实现[J]. *无线电通信技术*, 2020, 46(5): 577-584.
- XIE X P, GAO D R, WANG W, et al. Design and realization of satellite-borne space laser communication system[J]. *Radio Communications Technology*, 2020, 46(5): 577-584.
- [5] WANG C F, YU X S. A satellite on-board OFDM switch system based on network coding[C]//*Proceedings of 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 799-803.
- [6] JI Y F, ZHANG J W, WANG X, et al. Towards converged, collaborative and co-automatic (3C) optical networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(12): 1-19.
- [7] LUZHANSKIY E, EDWARDS B, ISRAEL D, et al. Overview and status of the laser communication relay demonstration[C]//*SPIE LASE. Proc SPIE 9739, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII*. [S.l.:s.n.], 2016, 9739: 100-113.
- [8] ROBERTS W T, PIAZZOLLA S. LCRD optical ground station I[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 82-88.
- [9] HAUSCHILDT H, ELIA C, MOELLER H L, et al. ScyLight—ESA's secure and laser communication technology framework for SatCom[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 250-254.
- [10] PERDIGUES J, HAUSCHILDT H, EL-DALI W, et al. HYDRON: the ESA initiative towards optical networking in space[C]//*Proceedings of 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [11] LI S, XU J, ZHONG S, et al. Design, fabrication and characterization of a high fill-factor micromirror array for wavelength selective switch applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 171(2): 274-282.
- [12] LIU J J, SHI Y P, ZHAO L, et al. Joint placement of controllers and gateways in SDN-enabled 5G-satellite integrated network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(2): 221-232.
- [13] GOPAL R, BENAMMAR N. Framework for unifying 5G and next generation satellite communications[J]. *IEEE Network*, 2018,

- 32(5): 16-24.
- [14] SU M D, SU X, ZHAO Q L, et al. BeiDou augmented navigation from low earth orbit satellites[J]. *Sensors* (Basel, Switzerland), 2019, 19(1): 198.
- [15] MATRICCIANI E. Geocentric spherical surfaces emulating the geostationary orbit at any latitude with zenith links[J]. *Future Internet*, 2020, 12(1): 16.
- [16] KIRAT B. Design of nano satellite constellations for internet of things applications[D]. Istanbul: Istanbul Technical University, 2021.
- [17] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 25-31.
- [18] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 55-61.
- [19] ZHANG S L, ZHU D L, WANG Y M. A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 174.
- [20] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A survey on non-geostationary satellite systems: The communication perspective[J]. *arXiv preprint arXiv:2107.05312*, 2021.
- [21] VEJENDLA P R, BANOTH C S, KRISHNA A R. Digital switching In telecom-munication[Z].
- [22] GU R T, ZHANG S Z, JI Y F, et al. Network slicing and efficient ONU migration for reliable communications in converged vehicular and fixed access network[J]. *Vehicular Communications*, 2018, 11: 57-67.
- [23] LIN X, SUN W Q, VEERARAGHAVAN M, et al. Slotted store-and-forward optical circuit-switched networks: a performance study[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(7): 563-576.
- [24] STABILE R, ALBORES-MEJIA A, ROHIT A, et al. Integrated optical switch matrices for packet data networks[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2016, 2.
- [25] SAINI H S, WASON A. Fallacious node algorithm for performance enhancement in optical-burst-switching networks[J]. *Journal of Optical Communications*, 2019, 40(3): 239-245.
- [26] CHENG Y J, CHEN B T, WU C P, et al. Design of optical tunnel switching networks for big data applications[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2098.
- [27] KOZAK M, JAUMARAD B, BOHAC L. How to enhance the efficiency of loss-less optical burst switching networks with the streamline effect[J]. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2015, 13(4): 407-416.
- [28] RAJA A S, LANGE S, KARPOV M, et al. Ultrafast optical circuit switching for data centers using integrated soliton microcombs[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5867.
- [29] TE T, LI J, PAN X, et al. Asynchronous Optical Traffic Offloading of Hybrid Optical/Electrical Data Center Networks[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2020.
- [30] YE T, LI J, PAN X, et al. Asynchronous optical traffic offloading of hybrid optical/electrical data center networks[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2020, 2489(99).
- [31] LE V H, NGUYEN H Q, DANG T C, et al. A model of service differentiation burst assembling and padding for improving transmission efficiency in OBS networks[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2021, 29(7): 3133-3149.
- [32] LI S, ZUKERMAN M, WANG M Q, et al. Improving throughput and effective utilization in OBS networks[J]. *Optical Switching and Networking*, 2015, 18: 222-234.
- [33] IMRAN M, COLLIER M, LANDAIS P, et al. Performance evaluation of TCP over software-defined optical burst-switched data centre network[J]. *Journal of Computational Science*, 2018, 24: 44-53.
- [34] GUPTA A, UNIVERSITY E C. An efficient signaling framework based on multiple time slots for OBS networks[J]. *SOP Transactions on Signal Processing*, 2015, 2(1): 7-16.
- [35] YAN F L, XUE X W, CALABRETTA N. HiFOS: a scalable and low-latency hybrid data center network architecture based on flow-controlled fast optical switches[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(7): 1-14.
- [36] PROIETTI R, YIN Y W, YU R X, et al. Scalable optical interconnect architecture using AWGR-based TONAK LION switch with limited number of wavelengths[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 4087-4097.
- [37] HAILU D H, LEMA G G, GEBREHAWERIA B G, et al. Quality of Service (QoS) improving schemes in optical networks[J]. *Heliyon*, 2020, 6(4): e03772.
- [38] CHENG Y J, SHIAU Y. Design of an all-optical network based on LCoS technologies[J]. *Journal of Optical Communications*, 2016, 37(2): 209-216.
- [39] 黄新宁. 非线性光学参量效应在空间激光通信网络中的应用研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019.
- HUANG X N. Research on the applications of nonlinear optical parametric effects in free-space optical communication networks[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [40] DABIRI M T, SADOUGH S M S. Performance analysis of all-

optical amplify and forward relaying over log-normal FSO channels[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(2): 79-89.

- [41] KASHANI M A, RAD M M, SAFARI M, et al. All-optical amplify-and-forward relaying system for atmospheric channels[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1684-1687.
- [42] PATRICK D M, MANNING R J. 20 Gbit/s all-optical clock recovery using semiconductor nonlinearity[J]. Electronics Letters, 1994, 30(2): 151-152.
- [43] MAMYSHEV P V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C]//Proceedings of 24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No.98TH8398). Piscataway: IEEE Press, 1998: 475-476.
- [44] MARHI M E, ANDREKSON P A, PETROPOULOS P, et al. Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(1): 50-74.
- [45] GABRIELLI L H, HERNANDEZ-FIGUEROA H E, FRAGNITO H L. Robustness optimization of fiber index profiles for optical parametric amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(24): 5571-5579.
- [46] LANGENHORST R, EISELT M, PIEPER W, et al. Fiber loop optical buffer[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 324-335.
- [47] BIGELOW M S, LEPESHKIN N N, BOYD R W. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid[J]. Science, 2003, 301(5630): 200-202.
- [48] LIU H, LIN H Y, RUAN J J, et al. A special intracavity power-modulator using the TGG magneto-optical effect[J]. Optik, 2020, 212: 164739.
- [49] HIDA Y. Recent progress on arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer[C]//Proc SPIE 5595, Active and Passive Optical Components for WDM Communications IV. [S.l.:s.n.], 2004, 5595: 339-348.
- [50] TSAI J, WU M C. A high port-count wavelength-selective switch using a large scan-angle, high fill-factor, two-axis MEMS scanner array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(13): 1439-1441.
- [51] WANG M, ZONG L J, MAO L, et al. LCoS SLM study and its application in wavelength selective switch[J]. Photonics, 2017, 4(4): 22.

#### [作者简介]



**孟佳成**（1990-），男，助理研究员，主要研究方向为空间高速光通信、光网络、高速数据处理等。



**谢宁波**（1995-），男，博士生，主要研究方向为基于光子集成的光交换技术。



**白兆峰**（1985-），男，助理研究员，主要研究方向为空间高通量光网络、卫星激光通信等。



**朱嘉轩**（1995-），男，工程师，主要研究方向为卫星激光通信、空间光交换等。



**武军霞**（1987-），女，工程师，主要研究方向为卫星激光通信、空间光交换等。



**高铎瑞**（1989-），男，助理研究员，主要研究方向为深空激光通信、卫星激光通信等。



**汪伟**（1982-），男，研究员，主要研究方向为深空激光通信、卫星激光通信及水下无线光通信等。



**谢小平**（1976-），男，研究员，主要研究方向为空间/海洋高速激光通信网络、空间激光通信和空间光交换等。