



研究与开发

卫星互联网光电混合交换技术综述

张振华, 孙思月, 刘高赛, 王龙, 姜兴龙, 董琳, 梁广
(中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 200120)

摘要: 在激光链路与微波链路共存的空间环境下, 卫星互联网光电混合交换的发展有助于推动空天地一体化的建设。针对卫星互联网业务的特点与传输需求, 对电域交换技术和光域交换技术的现状进行调研和分析, 总结现有交换技术在卫星互联网构建中的适用性。同时, 根据分析结果, 构建星上的端到端网络, 并以此为基础完成星上光电混合架构的设计, 主要包括接口、电域适配模块、光域适配模块、光电汇聚模块、光交换模块、分组交换模块与管理控制模块。

关键词: 卫星互联网; 光电混合交换; 端到端网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022284

A survey of optical/electric hybrid switching technology for satellite Internet

ZHANG Zhenhua, SUN Siyue, LIU Gaosai, WANG Long, JIANG Xinglong, DONG Lin, LIANG Guang
Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China

Abstract: In the space environment where laser links and microwave links coexist, the development of satellite Internet optical/electric hybrid switching will help promoting the construction of air-space-ground integration. According to the characteristics and transmission requirements of satellite Internet services, the current status of electrical domain switching technology and optical domain switching technology were investigated and analyzed, and the applicability of existing switching technologies in the construction of satellite Internet was summarized. At the same time, according to the analysis results, the end-to-end network on the satellite was constructed, and based on this, the design of the optical/electric hybrid switching architecture on the satellite was completed. It mainly included the interface, electrical domain adaptation module, optical domain adaptation module, optical/electric convergence module, optical switching module, packet switching module and management control module.

Key words: satellite Internet, optical/electric hybrid switching, end-to-end network

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-11-08

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目 (No. 2020294); 上海产业协同创新项目 (No. 2021-CYXT2-KJ03)

Foundation Items: The Project of Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2020294), Shanghai Industrial Collaborative Innovation Project (No. 2021-CYXT2-KJ03)



0 引言

卫星互联网是基于卫星的通信系统,通过人造卫星对业务数据提供处理、存储和转发等服务,实现空、天、地、海的互联互通。2020年,卫星互联网被列入我国新型基础设施建设重要发展范畴,这标志着我国的卫星互联网工程被提上了议程。卫星互联网并不是一个新兴事物,从 Iridium 的构想到如今的 Starlink,已有 30 多年。早期卫星通信较多采用地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO),使用单颗卫星中继数据。随着卫星通信技术的发展,地面网络无法满足更高的信息传输需求,如对高速移动的飞机通信业务无法保证较高的通信质量,在极地、沙漠、远洋等极端地区无法实现通信的覆盖等。而较低的卫星轨道具有低成本、低时延、大规模、带宽化等优点,不断受到相关研究人员的关注^[1]。如今,卫星通信系统采用的轨道越来越低,O3b 采用中地球轨道(medium earth orbit, MEO),以二代 Iridium、OneWeb、Starlink 等为代表的星座采用低地球轨道(low earth orbit, LEO)。LEO 卫星互联网已经引发全球的研发热潮。

1 卫星互联网发展现状

在 20 世纪 90 年代,LEO 卫星通信就掀起了一次热潮,其中以摩托罗拉公司的 Iridium 最为著名。由于当时研制成本较高,加上地面蜂窝网络发展的冲击,Iridium 项目最终破产。近几年,随着微小卫星的研制和发射成本降低,发射 LEO 卫星

的优势愈加明显。目前,全球部署卫星互联网的公司近 30 家,计划发射卫星数量在 10 万颗以上^[2]。其中已有 10 多家卫星公司提出非静止轨道(non-geostationary orbit, NGSO)卫星计划,涉及卫星规模达到 8 万颗。主要卫星互联网星座见表 1。

表 1 主要卫星互联网星座

星座	规模/颗	频段	服务
Iridium	66	L/Ka	语音通信
Starlink	4.2 万	Ku/Ka/V	高速互联网
OneWeb	882	Ku/Ka/V	高速互联网
Kuiper	3 236	Ka	互联网
虹云	156	Ka	互联网
鸿雁	324	L/Ka	互联网

早期的卫星通信主要使用透明转发的方式进行数据传输,主要在地面站进行信息处理,因此星上对信息处理的能力十分有限。同时,将地面站作为转发节点增加了通信时延,影响了传输质量。而近年来伴随着接入用户数量的增多,信息的交互和共享越来越频繁,透明转发的方式不能满足国家通信发展的需求,因此需要研制和发展具有一定星上信息处理能力的卫星,如多媒体卫星。

当前卫星通信系统星间链路与星地链路主要采用微波链路,但微波链路受到频率限制,造成传输速率、通信容量等瓶颈,难以满足多种类业务的分发与传输需求^[3]。近年来不断发展的光通信技术为该问题提供了解决方案,星上激光链路具有容量大、设备体积小、抗干扰能力强等优势,可以弥补微波链路的不足,进行信息的有效传输。因此,发展空间激光通信是实现卫星互联网的重要途径。卫星链路状态见表 2。

表 2 卫星链路状态

轨道类型	链路类型	传输介质	单端口速率	服务
星间轨道	同轨、异轨、跨层建链	激光/微波	多档速率(100 Mbit/s、2.5 Gbit/s、5 Gbit/s、10 Gbit/s、100 Gbit/s)	支持语音、图像、视频等应用服务
接入链路轨道	用户建链	微波	多用户、多频段 速率差异大(1 Mbit/s~20 Gbit/s)	
馈电路径轨道	信关站建链	微波	Ka 频段 10~20 Gbit/s	

表 3 业务模型

数据类型	资源类型	分组时延/ms	丢包率	可保证带宽
信令	non-GBR	100	10^{-6}	共享
会话类语音	GBR	100	10^{-2}	共享
会话类视频	GBR	150	10^{-6}	共享
非会话类视频	GBR	300	10^{-6}	共享
多媒体视频	non-GBR	300	10^{-6}	共享
TCP、P2P 文件共享	non-GBR	300	10^{-6}	共享
专线业务	GBR	100	—	独占线路

卫星在轨交换技术可以有效地降低卫星系统对地面站的依赖,降低通信时延是星上信息处理的重要手段。当前卫星主要使用微波链路传输信息,因此星上的主要交换方式是电交换,但电交换存在电子瓶颈,导致通信的速率和容量提升十分困难,并且星上电交换器件的体积较大,提高了卫星内部设计的要求。与电交换相比,光交换器件的体积较小,同时具有传输容量大、信息保密性好等优势。因此对星上光交换的研究将会为未来卫星互联网性能的提升打下基础。业务模型将对卫星互联网的交换体制做进一步约束。业务模型见表 3。

当前光交换的发展受到光器件等因素的制约,可用的光交换方式都难以灵活处理多种类、多粒度的星上业务,因此为了满足卫星互联网的业务转发需求,需要使用星上的光电混合交换。光电混合交换的应用结合了光交换与电交换的优势,在需要处理信息传输次数较多而信息量较小的数据流时使用转发灵活且技术成熟的电交换,在处理传输次数较少而信息量较多的数据流时采用大容量的光交换,这样就能有效满足空间中多种类、多粒度业务的高效传输需求。

2 交换技术研究现状

2.1 基于 OTN 的电域交换技术

我国在向全光网络方向转型的过程中,从骨干网和传输网的光纤化到接入网的光纤化已经逐渐完成,但是传输节点的信息处理依旧使用电交换,下一步对光交换节点的应用将推进全光网络的发展。

光传送网 (optical transport network, OTN) 是以波分复用技术为基础,在光层组网的网络。其标准制定于 1998 年开始启动,在 2000 年之前,设计思路与同步数字体系 (synchronous digital hierarchy, SDH) 体制相同,以光网络分层为基础,分别从网络节点接口、物理层接口、网络抖动性能等方面对 OTN 进行定义,主要标准在 2003 年基本完成。

OTN 分为光层和电层两层完成对业务的传输,如图 1 所示,其中光层结构主要作为信息的传输管道,完成光层调度,实现对光信号的交叉调度。其中完成光信号调度的核心单元是可重构光分插复用器 (reconfigurable optical add/drop multiplexer, ROADM)。ROADM 单板接收光转换单元 (optical transport unit, OTU) 的光信号后,创建内部光交叉路径,将信号输出至指定的出口,每个出口对应不同的线路。同时,各个子层和复用段之间加入了用于管理和监控的帧头,前向纠错 (forward error correction, FEC) 编解码技术的引入在一定程度上可以降低光信噪比,最终实现更好的容错抗干扰。



图 1 OTN 结构



电层可以采用所有电层适配的承载方式,它继承了 SDH 等传输体制的有效方面,在不同速率的光数据单元 (optical data unit, ODU) 帧结构与光净荷单元 (optical payload unit, OPU) 帧结构层加入了开销管理功能,使网络具有故障监测能力,并且电层提升了对更大业务粒度的透明传输能力,提高了带宽的利用率。而其核心在于对电层的波长交换将传统收发合一的 OTU 拆分成线路侧与支路侧,中间加入 OTN 单元完成交换,可以保证大粒度业务的传输,同时兼顾了电层传输的灵活性^[4-5]。

但随着信息化速度的不断加快,近年各类视频业务增长十分迅速,这类业务具有带宽小、数量多的特点,因此要求简单快捷地带宽灵活调整,而传统 OTN 技术已经无法完成对此类业务的高效传输。光业务单元 (optical service unit, OSU) 技术应运而生。2020 年 1 月,国际电信联盟电信标准化部门 (ITU Telecommunications Standardization Sector, ITU-T) 在日内瓦全会通过了光业务单元通道层网络 (optical service unit path layer network) 标准立项,开展 OTN 承载小颗粒业务的标准研究。为了应对新一代大容量通信网络的不同粒度业务的灵活传输需求,国际上众多相关机构参与制定 OSU 标准。目前 ITU-T 完成了 Gosu (optical service unit (OSU) path layer network) 的立项。

基于 OSU 的交换本质上是一种光层传输、电层交换的交换技术,OSU 是 OTN 中用于支持 Mbit/s 量级速率业务的承载容器,其帧长为 192 byte,帧结构包括开销区和净荷区。与传统 OTN 技术采用 5 层逐级映射封装相比,OSU 只需要 3 层就可以有效降低封装业务时延。低速率业务、分组业务通过电层适配到 OSUFlex,而后通过 ODU_k/OTU_k/OTUC_n 逐级封装完成传输,有效提高了业务传输的灵活性,可以提供各种细化的带宽粒度,具有更强的可扩展性。

2.2 光交换技术

目前光交换技术主要分为光路交换 (optical

circuit switching, OCS)、光突发交换 (optical burst switching, OBS) 和光分组交换 (optical packet switching, OPS)。其中光路交换研究得最多,相对成熟;光分组交换继承了传统电域分组交换的特点;而光突发交换更接近前两者性能的折中方案。

(1) 光路交换

光路交换作为技术较为成熟的光交换技术,继承了传统电路交换的特性,业务的传输与交换需要经过电路的建链过程,从源端到目的端,每个链路需要分配专业波长。交换过程中如果需要建立链路,必须要有双向的带宽申请,完成请求与应答的过程。一旦链路建立,只有建链的双方能进行信息传输。拆除链路后才能进行资源释放。因此,虽然光路交换的传输管道可以高速率、大容量地进行信息传输,但是无法满足当前多数类似于视频业务的多次数、少传输容量的业务类型需求。目前交换节点中的光路交换使用波分复用技术,采用波长交换的方式,通过光交叉连接 (optical cross-connect, OXC) 设备、光分插复用器 (optical add/drop multiplexer, OADM) 等光器件设置光通路,中间节点不需要使用光缓存,链路的建立采用电路交换的建链方式。

(2) 光突发交换

光突发交换技术是一种控制包先进入光交换节点,数据包跟随控制包进行转发的交换技术。光突发包 (optical burst, OB) 是光突发交换技术的交换单元,它包括突发数据包 (burst data packet, BDP) 和突发控制包 (burst control packet, BCP) 两部分。BDP 对网络中的数据重新封装打包,封装依据包括目的地址、服务质量 (quality of service, QoS) 需求等属性。BCP 包含 BDP 的路由信息及其长度、偏置时间、优先级、服务质量等信息,BCP 与对应的 BDP 分别在不同的光信道中传输,且比 BDP 提前一个偏置时延 τ 。提前一个 τ 可以在没有光缓存和光同步的情况下,预留 BDP 所需资源,使得 BDP 到达节点之前,相应的光路径已经建立,从而保证

BDP 的交换和传输^[6-8]。

BCP 与 BDP 信道划分如图 2 所示。在 OBS 过程中, 需要在 BCP 与 BDP 之间设置一个偏置时延, 偏置时延的设置可以保证在任意一个 BDP 到达之前 BCP 已经预留了相应的资源, 这样的设计可以避免在单向的预留过程中对交换技术的缓冲^[9]。但是一旦网络中出现阻塞, 丢包率会增大, 不同的网络结构可能导致阻塞的发生, 即使有光延迟线也难以保证传输质量, 因此对阻塞处理策略的研究十分关键^[10]。

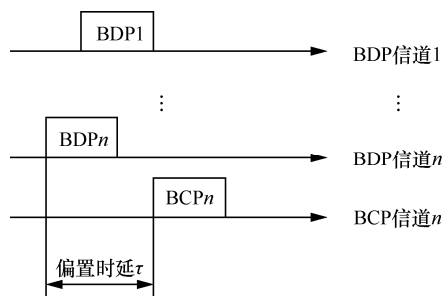


图2 BCP与BDP信道划分

光突发交换的交换粒度为几个 IP 到几百个 IP, 因此可以降低控制开销; BDP 与 BCP 在物理信道上的分开传输可以使交换节点在 BCP 到达后对 BDP 进行资源预留, 因此 BDP 可以直接传输而不用经过光电转换的过程, 从而实现高宽带业务的有效传输。但是当业务传输的频次较高时, 拥塞和冲突将导致 OBS 无法高可靠地完成业务传输, 这对于具有高可靠性要求的业务传输来说是无法接受的^[11-13]。

光突发交换是在 1997 年提出的一种新的光交

换技术, 主要作为光路交换到光分组交换的过渡技术。1999 年, Qiao 等^[14]对 OBS 的各项技术进行了介绍, 并对基于恰量时间 (just enough time, JET) 协议的 OBS 协议性能进行了评估^[14]。2000 年, Verma 等^[15]提出一种将 OBS 应用于太比特 IP 骨干网的可行解决方案, 提供了一个使用 OBS 在波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 上部署 IP 的框架。OBS 的主要技术研究集中在 21 世纪初, 现在已经较为成熟, 因此现有对 OBS 技术的研究主要集中于对突发包头的分析和研究以及对现有技术的优化。

(3) 光分组交换

传统分组交换采用存储-转发的方式, 从源节点发送的报文以固定的格式进行分组, 在分组头中加入目的节点的地址, 使用虚电路的方式传输, 在传输过程中网络中的交换机会暂时存储接收到的分组报文, 通过分组中目的节点的信息在网络中寻找空闲的交换路径完成报文的传输。分组交换原理如图 3 所示。这大大提高了线路的利用率。光分组交换是基于光信号传输的分组技术, 它继承了电域分组交换的特点。相较于传统网络, 光分组交换网络资源利用率高, 对突发数据和信息的适应能力强。光分组交换技术的功能包括处理光分组、识别信头、同步光分组、解决光分组冲突、控制网络流量、光分组路由、交换波长等^[9-10]。

光分组交换的性能优于光突发交换和光路交换, 但是其目前主要受限于光学器件, 尤其是尚未成熟的光缓存器件, 因此光分组交换的应用受

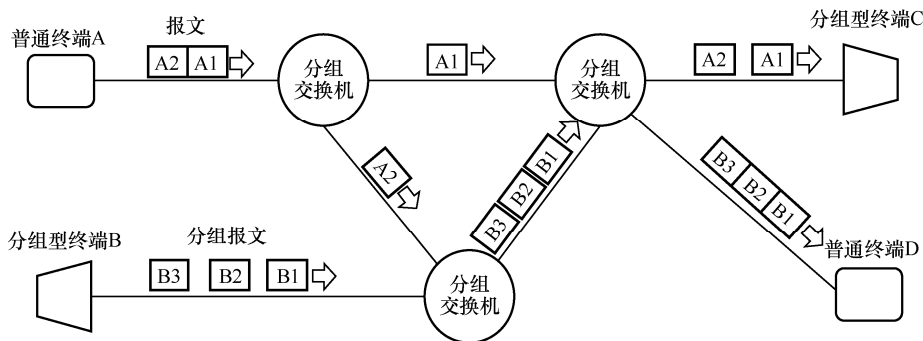


图3 分组交换原理



到制约。2021年,中国科学技术大学的Ma等^[16]提出了在原子频率梳存储器中存储1 h相干光。2020年,Chen等^[17]提出了一种采用分组缓冲结构中的频谱幅值编码的光码分多址信号。2016年,Liu等^[18]提出了一种基于主动微环谐振腔自脉动实现数据恢复的波长可调光缓存器。

3 星上交换技术

当前的星上链路形式主要是微波链路,并有少量激光链路,而激光链路是未来主要发展的链路形式,因此未来星上的主要方向是微波链路与激光链路共存。但对于星上使用何种交换技术,目前还在试验阶段。

3.1 基于OSU的星上交换技术

OSU作为光传送网的技术拓展,在地面可以完成小粒度业务的高效传输,具有较高的技术成熟度,相应的器件也较为完善。但在传统的地面网络中,完成端到端通信的过程较为复杂。首先用户终端将信息发送到接入网,然后在接入网通过无线电接入网IP化(IP radio access network, IPRAN)等方式将信息发送到核心网,其中主要由光纤通道完成大容量信息的传输,最后通过IP承载的核心网处理信息并转发^[19-20]。作为承载大流量、远距离业务的技术,OTN只能算作地面网络中的一部分,而星上网络的构建需要包含整个地面架构的内容与功能。星上网络并没有划分接入网、承载网与核心网,业务上传到星上后需要新的选路与交换方式完成传输,因此在星上使用OSU技术时需要考虑核心网与接入网的功能设计。

OSU技术在本质上属于光层传输、电层交换的交换技术,而光交换技术的应用前景与效率都高于电域交换技术。在光层,OSU需要提前建立通道才能实现端到端通信,而星上业务种类多样,需要灵活的网络带宽才能完成高效传输,OSU的管道切换在专线业务上存在优势,但难以有效应对大量的用户终端灵活接入的业务场景。同时在

管道建立、拆除的时延和带宽利用率方面,OSU与光层交换相比也存在劣势。

综上,OTN背景下的OSU技术由于在地面的应用较为成熟、有可以使用的成熟器件,其在星上应用层面更加可靠。但是未来光域交换具有更好的发展前景。

3.2 星上光交换

(1) OCS

OCS技术更适合作为大容量的业务传输管道,在大粒度、时延不敏感的星上业务传输方面,继承自传统电路交换的OCS技术有很大优势;另外,对于星上的一些专线业务,也可以使用OCS技术完成,单独分配信道资源完成高可靠传输。但是在处理小粒度、时延敏感的业务时,OCS技术很难灵活高效地完成传输。

(2) OBS

OBS技术对光缓存器件的需求较低,并且转发过程采用单向预留也缩减了转发流程,在工程实现层面并不困难,因此在地面已经实现一定规模的商用。目前在星上使用该技术还需要聚焦在光延迟线与光交换矩阵方面。前文说到OBS需要进行抗阻塞的设计,而光延迟线的设计将影响整个星上网络的性能;光交换矩阵是OBS系统的核心器件,会直接影响交换网络的性能,目前提出的光突发交换矩阵的典型结构包括基于空间光开关矩阵的光突发交换结构和基于阵列波导光栅(array waveguide grating, AWG)的光突发交换结构。

OBS技术的突发包粒度适中,可以在一定程度上满足多次小粒度业务(如视频业务)的星上业务传输;同时OBS对信道资源的利用率较高,不像传统的电路交换形式需要完成建链过程并且独占信道资源。在时延方面,OBS的时延主要产生于BCP在各节点处的处理和交换时延,各节点只需要对BCP进行光电光的转换,而不需要对BDP进行解析处理。

表 4 交换技术对比

交换技术	交换层面	可实现性	性能	当前星上适用性
OSU	电域	成熟	性能较好, 但受限于电子瓶颈	适用
OCS	光域	成熟	传输容量大, 但不灵活, 适用于专线业务	不适用
OBS	光域	较成熟	业务粒度适中, 传输效率较高, 但拥塞对性能影响较大	适用
OPS	光域	不成熟	由于光器件不成熟, 无法满足业务需求	不适用

综上, OBS 技术在星上的工程实现层面具有一定基础, 但不如 OTN 成熟。OBS 技术适用于星上的业务传输场景, 有较高的带宽利用率, 但需要制定合理的抗阻塞策略。

(3) OPS

继承自电域分组交换形式的 OPS 技术因其高效灵活的信息传输能力完全可以承担卫星互联网的相应业务。但是 OPS 技术的一个主要难点在于没有高效的光缓存器件。地面网络中的电交换技术可以实现电缓存、复制电路块交换、随读随取等功能, 但是在光网络中, 目前只能通过光延迟线来实现短暂缓存, 在理想条件下, 通过改变晶格结构和增加微环谐振腔, 缓存时间可以达到 1 h, 缓存速率可以达到 1 Gbit/s^[21-22]。但是使用光延迟线进行光缓存无法有效地解决缓存竞争这类突发情况, 这是因为这种光缓存技术无法保证满足交换过程中的时延差要求。当前光缓存的存储能力无法满足节点设备的要求, 因此很难在星上网络中应用。

当前星上光缓存技术的使用将引入额外的噪声, 因此对放大器的性能要求更加严格, 目前基于卫星网络的光信号数量庞大, 需要高功率的光纤放大器来支持卫星网络的信号传输, 并且需要额外的器件来保证光传输过程中光信号的信噪比, 这将进一步引入额外的功耗, 提高额外的器件投资成本。同时, 提高光缓存的性能会产生信号干扰, 其干扰源包括强控制脉冲产生的相干噪声、动态解耦序列引入的额外光子噪声以及慢光效应带来的热噪声与色散等。当接收光功率远远低于接收灵敏度时, 信号可能已经淹没在噪声中, 这会导致光信号的失真。

综上, 由于光缓存器件的发展并不成熟, 想完成光缓存过程只能使用光延迟线, 因此 OPS 技术虽然在理论层面比 OBS 与 OCS 技术更加高效、更加灵活、更加适合作为光网络的交换技术, 但是由于物理层器件不成熟, 当前 OPS 技术很难有效地应用于星上网络。

交换技术对比见表 4。现阶段对卫星互联网组网可以工程化实现的技术, 电域可以使用 OSU 技术, 但随着通信容量的增加会遇到电子瓶颈; 而光域中目前有能力实现工程化的是 OBS 技术, 其具有较好的星上适用性。在光缓存器件发展成熟后, OPS 技术将更加适用于卫星互联网的组网业务。

4 星上光电混合架构设计

在微波链路与激光链路并存, 并且相当长一段时间内激光链路无法取代微波链路情况下, 光电混合交换的设计更加符合未来的发展趋势。星上端到端网络如图 4 所示。

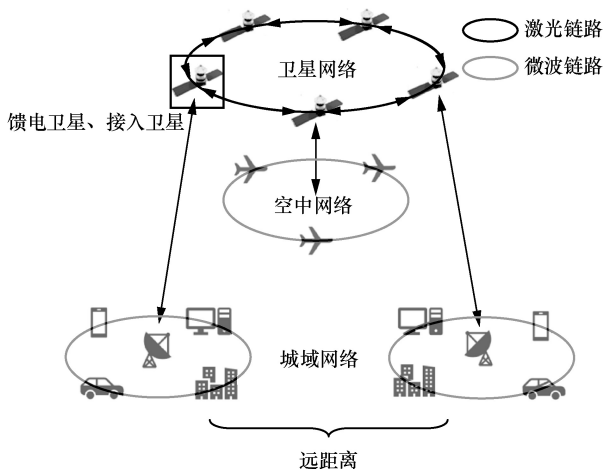


图 4 星上端到端网络



地面上的用户可以通过信关站接入和自身终端直接接入两种方式接入星上网络,对于信关站可以覆盖的终端,可以先将业务汇聚到信关站再传到星上,好处是可以对传输信息进行高效的管控,保证信息传输的安全性。在信关站无法覆盖的偏远地段,包括远洋货轮、飞机等,也可以直接接入星上网络。目前,覆盖用户的卫星将作为接入卫星,若其从信关站上传业务数据也可作为馈电卫星,其通过微波链路将业务数据传到星上后,对于小粒度、时延敏感的业务,通过光电混合交换在各个中继卫星间使用激光链路传输,而传统使用微波传输的业务则可以继续使用原有的微波链路,将业务数据传输到可以覆盖目的地址的馈电卫星,在馈电卫星上再次完成光电混合交换后将业务数据转为电信号传给用户终端或者信关站,从而完成一次端到端传输。

现阶段卫星互联网的构建目标瞄准 LEO 卫星,因此,很多数据传输类业务选择建立在 LEO;由于 LEO 卫星较容易地获得高分辨率图像或其他数据,LEO 卫星还可用于测控。其中空间到核心网的高速汇聚业务场景包括通用航空飞机联网娱乐、援救-医疗-警务航空联网应用、远洋船舶宽带通信、极地科考通信、陆地应急指挥通信等,此类业务传输的数据类型包括信令、会话类语音、会话类视频、非会话类视频等。测控类业务包括

遥控、遥测业务。遥测主要用于集中检测分散的或难以接近的被测对象,如被测对象距离遥远、所处环境恶劣或处于高速运动状态。卫星互联网除了要满足最基本的数据传输和测控需求,还需要具有对网络本身的管理和保障功能。

综上所述,对光电混合架构的设计需要支持各种业务类型,同时也需要加入相应的管理功能,如果有必要,也可以考虑相关的网络安全措施。

光电混合交换架构如图 5 所示,是基于业务类型的设计,其中外部包括高速电信接口与光纤接口,可以同时构建激光链路与微波链路;电域适配模块完成对用户侧接入的监视与控制、分组交换包的组合与拆分、传输控制等;分组交换模块的功能包括呼叫处理、流量控制、路由选择、系统配置与管理等;光电汇聚模块主要完成光电的汇聚与解汇聚,包括光电转换与电光转换;管理控制模块完成数据包分类、生成与配置转发表等;光交换模块包含光开关以及协议处理;光域适配模块主要完成收发光信号的适配工作,具体包括数据生成与拆解、数据队列控制。

大颗粒度的业务速率一般为 Mbit/s 量级,可以使用激光链路传输,如果中继卫星不需要参与信息处理,则数据包在进入光交换模块后反向进入适配模块直接转发,到需要处理的阶段进行光

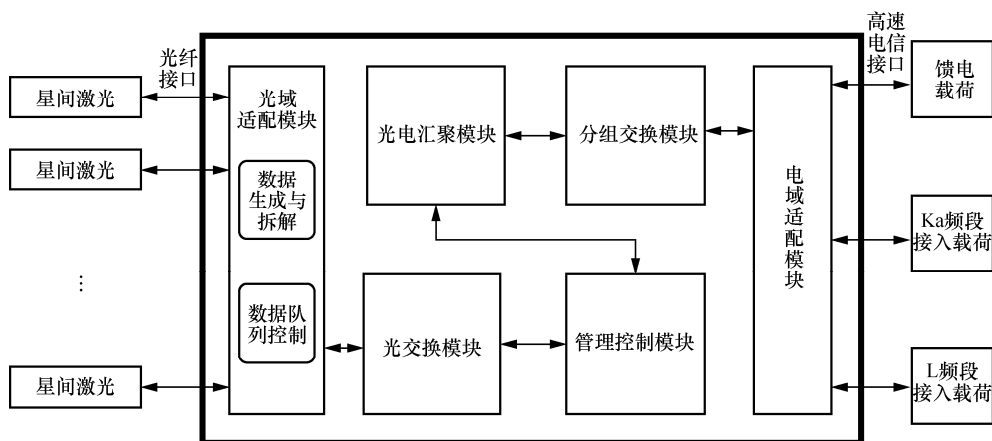


图 5 光电混合交换架构

电转换后进入电分组交换；中等粒度的业务可以直接使用成熟的电分组交换，可以灵活地转发相应业务，同时也具有较高的可靠性；而小粒度的业务速率大概在 kbit/s 量级，发送端往往是地面的用户或者小的测控设备，可以将这些粒度的业务汇聚到相应的地面站打包成较大粒度的业务后发送，这样做的好处是可以节约星上的开销，并且能有效地提高星上网络的安全性。

5 结束语

交换技术是构建卫星互联网的关键技术。本文首先对卫星互联网的星上交换需求进行了梳理和分析，并对当前主流的交换技术进行了调研分析，总结了各交换技术在星上应用的优势与劣势。其中电域交换作为发展成熟的交换技术，在传输体制和交换设备上都十分完善，在应用层面更容易实现；而能够克服电子瓶颈的光域交换的性能更加优越，是面向未来的交换技术，但由于器件和体制的发展不够完善，因此目前在星上的实现难度较高。同时针对交换技术、星上链路形式和星上业务的现状，提出可以兼容光域与电域信息交换的星上光电混合交换架构，在未来光信号业务与电信号业务长期共存的背景下，光电混合交换会有更广阔的应用场景，其中光电混合交换在单层卫星网络中的传输协议设计、交换技术选择、多波长激光终端设计以及器件小型化设计方面都有重要的研究意义。

参考文献：

- [1] CHEN Q, GIAMBENE G, YANG L, et al. Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(3): 2743-2755.
- [2] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Free space optics for next-generation satellite networks[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2021, 10(6): 21-31.
- [3] 赵尚弘, 彭聪, 李勇军, 等. 天地一体化信息网络光电混合交换技术研究[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 46-52.
- ZHAO S H, PENG C, LI Y J, et al. Research on optical/electric hybrid switching technique for space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 46-52.
- [4] 张会彬. 光传送网的资源优化和约束路由关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- ZHANG H B. Research of key technologies on resource optimization and constraint-based routing for optical transport networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [5] 房超. 光传送网(OTN)若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- FANG C. Research on some key technologies of optical transport network (OTN)[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [6] 朱智俊. 光突发交换网中若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
- ZHU Z J. Study on the several key technologies in optical burst switching network[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.
- [7] 李耀华. 光突发交换关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- LI Y H. Research on key technologies in optical burst switching network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [8] 付明磊. 光突发交换网络中的拥塞控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- FU M L. Study on the congestion control schemes in optical burst switching network[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [9] 杜婧妮. 新型光分组交换网络研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- DU J N. Research on new optical packet switching networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [10] 杨柳. 全光分组交换网络中先进调制格式研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- YANG L. Research on advanced modulation format in optical packet switched networks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [11] PAPAZOGLU C, SARIGIANNIDIS P G, PAPADIMITRIOU G I, et al. Techniques for improved scheduling in optical burst switched networks[C]//Proceedings of 2009 International Symposium on Autonomous Decentralized Systems. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [12] DE PEDRO L, ARACIL J, HERNANDEZ J A, et al. Analysis of the processing and sojourn times of burst control packets in optical burst switches[C]//Proceedings of 2008 International Conference on Optical Network Design and Modeling. Pisa:



taway: IEEE Press, 2008: 1-3.

- [13] LI C Y, LI G M, WAI P K A, et al. Optical burst switching with large switching overhead[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(2): 451-462.
- [14] QIAO C M, YOO M. Optical burst switching (OBS) - a new paradigm for an optical Internet[J]. J High Speed Networks, 1999, 8: 69-84.
- [15] VERMA S, CHASKAR H, RAVIKANTH R. Optical burst switching: a viable solution for terabit IP backbone[J]. IEEE Network, 2000, 14(6): 48-53.
- [16] MA Y, MA Y Z, ZHOU Z Q, et al. One-hour coherent optical storage in an atomic frequency comb memory[J]. Nature Communications, 2021, 12: 2381.
- [17] CHEN K S, YANG C C. An application of spectral-amplitude-coding labels in optical signal buffering over optical packet-switching networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(9): 2020-2023.
- [18] LIU W L, ROMEIRA B, LI M, et al. A wavelength tunable optical buffer based on self-pulsation in an active microring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3466-3472.
- [19] 黄德明. OSU 关键技术及标准进展[J]. 长江信息通信, 2021, 34(11): 36-38.
HUANG D M. Progress in key technologies and standards of OSU[J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(11): 36-38.
- [20] 古春海. 以 OSU 为核心的 M-OTN 技术创新与验证[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(9): 106-108.
GU C H. Innovation and verification of M-OTN technology with OSU as the core[J]. Digital Technology & Application, 2021, 39(9): 106-108.
- [21] 辛明. 光分组交换中的关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
XIN M. Studies on key technologies in optical packet switching[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [22] 季伟. 光分组交换网络中的若干关键技术研究: 交换矩阵、光逻辑、光缓存、全光信号处理和 OVPN 技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
JI W. Studies on several key technologies in optical packet switched networks—switching matrix, all-optical logic gates, optical buffer, optical signal processing and OVPN[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006.

[作者简介]



张振华 (1997-), 男, 中国科学院微小卫星创新研究院博士生, 主要研究方向为卫星通信、星上交换技术。



孙思月 (1985-), 女, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院研究员、硕士生导师, 技术研发中心副主任, 中国科学院青年创新促进会会员。2016 年入选上海市青年科技英才扬帆计划, 2021 年入选中国科学院上海分院青年英才培育计划。



刘高赛 (1995-), 男, 中国科学院微小卫星创新研究院博士生, 主要研究方向为卫星通信、5G/6G 与卫星网络融合技术。

王龙 (1989-), 男, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院助理研究员, 主要研究方向为微小卫星组网技术与应用。

姜兴龙 (1984-), 男, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院副研究员、技术研发中心通信室副主任, 主持多项卫星通信系统、星座架构设计、网络优化、运控与应用以及激光通信等相关课题。

董琳 (1986-), 女, 中国科学院微小卫星创新研究院工程师, 主要研究方向为卫星光网络交换。

梁广 (1983-), 男, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院研究员, 中国科学院青年创新促进会优秀会员, 入选上海市青年拔尖人才, 获得上海市科技进步奖二等奖、中国科学院杰出科技成就奖。