

# 激光与光电子学进展

## 面向卫星互联网的下一代卫星光网络 关键技术进展

赵尚弘\*, 彭聪, 李勇军, 李海, 李信, 薛凤凤

空军工程大学信息与导航学院通信系统教研室, 陕西 西安 710077

**摘要** 随着卫星光通信技术的发展,通过光链路进行组网能够满足未来爆发式增长的互联网业务的接入、传输以及分发需求。本文首先介绍了基于光通信的卫星互联网架构和星座类型;然后,分析了下一代卫星光网络的关键技术,包括光电混合交换、卫星光网络波长路由、波长需求量分析以及业务疏导技术;最后,对卫星光网络几个技术发展方向进行了展望。

**关键词** 光通信; 光网络; 卫星互联网; 光电混合交换; 波长路由; 业务疏导

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221390

### Key Technology Progress of Next-Generation Satellite Optical Network for Satellite Internet

Zhao Shanghong\*, Peng Cong, Li Yongjun, Li Hai, Li Xin, Xue Fengfeng

Communication System Teaching and Research Section, School of Information and Navigation, Air Force  
Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China

**Abstract** With the development of satellite optical communication technology, networking through optical links can meet the access, transmission, and distribution needs of the explosive growth of internet services in the future. First, the satellite internet architecture based on optical communication and constellation types are introduced. Then the key technologies of the next generation of satellite optical network are analyzed, including photoelectric hybrid switching, satellite optical network wavelength routing, wavelength demand analysis, and traffic grooming technology. Finally, the technical development directions of satellite optical network are discussed.

**Key words** optical communication; optical networks; satellite internet; photoelectric hybrid switching; wavelength routing; traffic grooming

## 1 引言

卫星互联网是一种由分布于高、中、低轨道的卫星通过星间链路连接,为空地海用户提供随时、随地和大规模互联网接入等通信服务的新型网络<sup>[1]</sup>。由于未来海量用户接入所造成的业务爆发式的增长,传统的卫星网络受限于星上载荷资源和链路容量,已经很难满足业务的传输以及分发需求。此外,新兴应用的涌现对业务的服务质量(QoS)提出了较高的要求,例如毫秒量级的时延和时延抖动, Gb/s 量级的传输速率<sup>[2]</sup>。卫星光通信具有大容量、低时延、抗干扰性能好和终端小型化等优点,为卫星互联网的设计提供了一种新的思路,即构建下一代卫星光网络<sup>[3-5]</sup>。

卫星光通信的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代,随着终端设备升级以及光调制解调技术的发展,星间激光通信的演示验证与相关研究逐步深入。代表性的计划包括:美国的 STRV-2、OPALS 和 LCRD 实验<sup>[6-8]</sup>; 欧洲航天局的 SILEX 计划、STROPEX 和 EDRS-A 实验<sup>[9-10]</sup>,以及日本的 ETS-VI、OICETS 与 ARTEMIS 在轨光学链路实验等<sup>[11-12]</sup>。2016 年 1 月,欧洲通信卫星 Eutelsat 9B 搭载首个激光通信数据中继有效载荷进入地球静止轨道,实现了星间 45000 km 通信,通信速率可以达到 1.8 Gb/s。同年,日本启动了先进激光仪器高速通信项目,目的是验证同步地球轨道(GEO)卫星到光学地面站 10 Gb/s 量级的通信。2020 年 11 月,日本宇航探索局发射了光学数据中继卫星,通过星间激

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-14; 录用日期: 2022-06-28; 网络首发日期: 2022-07-08

通信作者: \*zhaoshangh@aliyun.com

光和星地微波协同进行数据传输,传输速率可达 1.8 Gb/s。2021 年 12 月 2 日,SpaceX 公司“猎鹰”9-1.2 型火箭在卡纳维拉尔角天军站成功发射了 48 颗加装了激光星间链路的“星链”v1.5 型卫星,标志着卫星激光通信正在向大规模组网迈进。我国涉足卫星光通信领域时间较短,但已经实现了跨越式的发展,2016 年“墨子号”卫星的成功发射,实现了我国首次星地高速相干激光通信技术在轨试验,海洋二号、天宫二号、实践十三和实践二十等卫星也搭载了激光通信终端进行实验验证<sup>[13-14]</sup>。

卫星光通信的发展使得卫星光组网成为下一步研究方向,尤其是星上波分复用(WDM)技术的出现,使得构建大容量、高速传输的卫星互联网成为可能。美国的 MITRE 公司从第二代中继星 TDRSS II 的应用场景研制了 WDM 模拟实验系统,通过带通滤波器分解三个不同波长的信号光,在温控装置的作用下输出了多路稳定的波长<sup>[15]</sup>。在此之后,朗讯实验室相继开展了 4 波长和 16 波长、单波长速率 2.5 Gb/s、通信距离 4.4 km 的 WDM 实验<sup>[16-17]</sup>。日本以下一代低轨卫星星座系统为背景研制了 WDM 模拟实验系统,利用铍酸锂外调制器分别调制 4 路不同波长,产生单波长数据率为 2.5 Gb/s 的信号,并且在接收端采用可调滤波器对单路信道进行窄带滤波<sup>[18]</sup>。

然而,相比于地面光纤网络,卫星光网络在组网的

过程中具有一定的局限性:1)波长资源严重不足,地面光纤传输采用的是密集波分复用(DWDM)技术,单条光纤可以容纳几百个波长,易于构建超大容量传输信道来满足各类业务需求,而星间无线链路是基于稀疏波分复用(SWDM),单条链路最多只能容纳十几条波长;2)路由选择局限,不同于地面光纤网络的路由选择方式,卫星光网络的路由选择是基于已建立的星间链路,并且长距离的传输会增加网络时延;3)拓扑动态变化,卫星光网络节点高速运动,节点间相对位置不固定,链路动态地连接与中断,导致网络拓扑处于不断变化中;4)星上载荷受限,卫星体积有限,所容纳的天线以及内部模块数量较少,能量来源单一,无法维持长期大功率的能量供应。

基于以上问题,本文首先梳理了卫星光通信和星上 WDM 技术的研究现状,然后介绍了基于光通信的卫星互联网体系架构以及星座类型,接着研究了下一代卫星光网络的关键技术,最后展望了未来的主要研究方向。

## 2 基于光通信的卫星互联网架构

### 2.1 卫星互联网的基本组成

如图 1 所示,基于光通信的卫星互联网是由天基骨干网、中继传输网和空间接入网三部分组成,星间组网链路为激光链路,星地传输链路为微波链路。

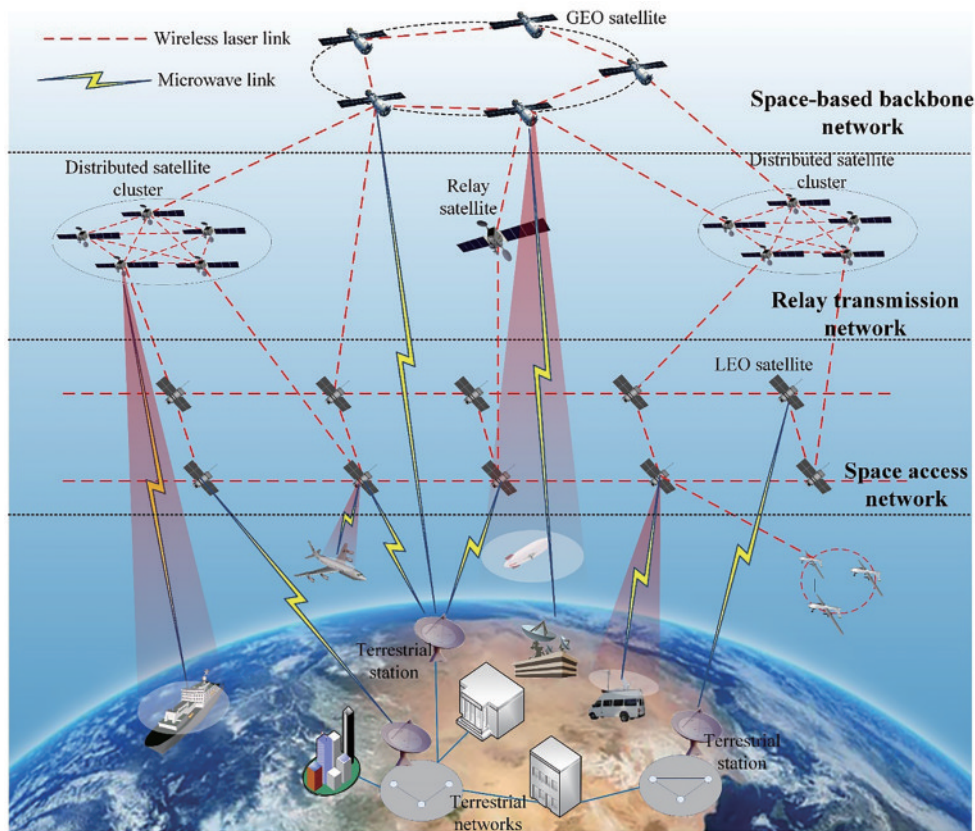


图 1 基于光通信的卫星互联网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the satellite internet based on optical communication

天基骨干网是由 GEO 卫星组成,卫星之间通过高速激光链路连接构成一个环网。天基骨干网不仅能够进行骨干信息的传输,还能感知全网的态势并下达指令,用于指导下层网络的拓扑控制以及业务转发。由于 GEO 卫星与地面相对静止,天基骨干网可以将全网状态收集并且回传至地面站,以促进卫星互联网与地面互联网的融合,实现信息的实时高效共享。

中继传输网是由中继卫星组成,负责天基骨干网和空间接入网之间业务的中继和控制指令的转发。由于距离低轨卫星较近、时延较短,中继卫星也对低轨卫星网络有局部控制的功能。当低轨卫星网络出现中断或者路由跳数较长等问题时,中继卫星也可以起到转发作用。

空间接入网由低轨(LEO)卫星组成,由于对地距离近,它可以为地空用户提供低时延的接入服务。通过激光链路连接,低轨卫星可以构造覆盖全球的宽带网络,它与地面 5G 网络的融合,是未来信息网的一个重要研究方向。

## 2.2 星座类型

卫星星座由一定数量的位于不同轨道高度和位置的卫星组成,卫星星座的构型直接影响其覆盖性能、通信性能、星间链路的连通性、星座成本、容错性和稳定性等,卫星星座的类型主要分为极/近极轨道星座、倾斜轨道星座、共地面轨道星座、赤道轨道星座、混合轨道星座等,在全球卫星通信星座中主要采用的星座构

型为极/近极轨道星座和倾斜轨道星座<sup>[19]</sup>。极/近极轨道星座最先被提出用来实现全球覆盖,它是由若干高度相同、倾角均为 90°的圆轨道面组成,各个轨道面的卫星数目相同且轨道面内的卫星均匀分布,由于其各个轨道面的升交点在 180°内等间隔分布,所以也将这种星座称为  $\pi$  星座<sup>[20]</sup>。极轨道星座的构型决定了星座卫星在全球分布的不均匀性,在两极等高纬度地区密集分布而在赤道等低轨道地区稀疏分布,特殊地,极/近轨道星座的第一个轨道面和最后一个轨道面的卫星反向运动,其相对速度很快造成星间链路建立困难。倾斜轨道星座主要包括 Walker 倾斜轨道星座或玫瑰星座,这两种星座类型相互等效,倾斜轨道星座由高度和倾角相同的圆轨道组成,轨道面升交点在参考平面内等间隔分布,卫星在轨道面内均匀分布,相邻轨道的相邻卫星间存在确定的相对位置关系,倾斜轨道星座可以实现对地球的近似均匀覆盖。

卫星通信在覆盖范围、通信距离、可靠性等方面具有很大的优势,随着卫星通信技术和卫星发射进一步发展,卫星通信的质量,容量得到极大提升同时卫星星座的建设成本大幅下降,卫星通信极大的应用价值和市场使其得到了极大的关注,为了抢占珍贵的卫星轨道和卫星通信频带,近年来发射了大量的通信卫星。“Starlink”、“Oneweb”和鸿雁星座等世界上著名的卫星通信系统目前已完成了初步的建设计划并且建设进度在不断加快<sup>[21]</sup>,国内外主要卫星星座系统如表 1 所示。

表 1 国内外主要卫星星座的系统  
Table 1 System situation of main satellite constellations at home and abroad

Constellation (time)	Number	Orbital altitude / km	Technical feature	Progress
Iridium(1998)	66	780	The 1st global satellite communication system, communication frequency: L/Ka	Termination
Iridium Next (2007)	66	780	Inter-satellite link, communication band: L/Ka	75 satellite in orbit
O3b(2014)	42	8062	MEO Constellation, communication band: Ka, transmission delay $\leq 100$ ms	16 satellite in orbit
Oneweb(2013)	648	1200	Communication band: Ka/Ku, transmission delay $\leq 50$ ms	428 satellite in orbit
Starlink(2015)	11926	540~570 340	Inter-satellite optical link, Communication band: Ka/Ku, transmission delay $\leq 40$ ms	1900 satellite in orbit
Kuiper(2019)	3236	610,630	No	Develop
Hongyan(2018)	324	1070	Navigation enhancement technology, communication band: L/Ka	One experimental satellite

摩托罗拉公司在 1987 年设计了全球第一个卫星移动通信系统“铱星计划”,该卫星通信系统最初设计由 77 个均匀分布在 7 个轨道倾角为 86.4°,轨道高度为 780 km 的极轨道面上的卫星组成,卫星的轨道周期为 111 min<sup>[22]</sup>。第一代“铱星计划”实际上只发射了 66 颗

卫星,并且在 1998 年 11 月投入使用,然而在 1999 年 3 月,铱星公司却因资金问题破产而终止了铱星的商业服务。铱星公司经历破产重组后在 2007 年宣布了第二代“铱星计划”的构想<sup>[23]</sup>,并在 2017~2019 年期间发射了 75 颗卫星成功完成对铱星星座的升级,第二代

“铱星计划”的星座构型和第一代相同,仍然是 6 个轨道平面 66 颗卫星的结构,轨道高度保持不变,此外还有 9 颗在轨备用卫星和 6 颗地面备用卫星,共 81 颗卫星。

O3b 星座系统是第一个中轨道卫星通信系统,目前由卢森堡 SES 公司负责其运营,致力于为边远地区的其他 30 亿人提供服务,其在 2019 年发射 20 颗卫星来完成了初步部署,O3b 星座中的卫星位于赤道圆轨道,轨道高度为 9062 km,能够有效覆盖地球上南北纬 45° 的区域。随后在 2019 年 O3b 发布了下一代 O3bmPOWER 星座建设计划,计划再发射 22 颗卫星来增强星座的通信能力<sup>[24]</sup>。

Oneweb 星座是英国卫星通信公司 Oneweb 在 2013 年提出的低轨道卫星星座计划,旨在实现能够提供低延时高质量通信连接的卫星通信网络系统,Oneweb 星座由 648 颗分布在轨道倾角为 87.9° 的极轨道平面上的低轨道卫星组成,轨道平面的轨道高度均为 1200 km。Oneweb 在 2022 年 2 月 10 进行了第 13 次发射,成功发射了 34 颗卫星在这次发射之后其在轨卫星总数为 428 颗,已经完成了 Oneweb 计划的 648 颗卫星发射任务的 2/3<sup>[25]</sup>。

Starlink 是美国 SpaceX 公司的一个低轨道卫星星座项目,其计划发射约 1.2 万颗卫星组成巨型星座来提供全球卫星互联网服务,Starlink 由 4408 颗位于 540~570 km 的低地球轨道卫星和 7518 颗轨道高度为 340 km 的极低地球轨道卫星组成,其中位于低地球轨道的卫星中有 520 颗卫星位于轨道倾角为 97.6° 的极轨道平面上,有 3888 颗卫星位于轨道倾角分别为 53° 和 70° 的倾斜轨道平面<sup>[26]</sup>。为了提高 Starlink 星座通信系统的通信容量和质量,SpaceX 在 2019 年宣布计划再增加发射 3 万颗卫星<sup>[27]</sup>,Starlink 是目前世界上建设规模和卫星数量最大的星座,其系统用户频率为 Ku 频段,馈电频率为 Ka 频段,配备星间链路来实现组网,同时据 SpaceX 透露,Starlink 星座中已经成功实现了卫星间的激光通信<sup>[28]</sup>,这将极大地降低 Starlink 的通信时延和提高容量。Starlink 的设计初衷主要是为了给偏远地区的提供可靠低成本的网络连接和作为地面网络的补充,所以其用户主要位于地面网络未覆盖的地区、船只和海岛以及飞机等,同时由于卫星通信在军事上的重要作用 Starlink 得到了美国国防部的极大重视。截至 2022 年 2 月,Starlink 目前约有 1900 颗在轨卫星。

Kuiper 是亚马逊公司的低轨卫星星座项目,旨在发射数千颗低轨卫星来提供全球宽带互联网通信服务,该星座计划发射 3236 颗卫星来为南北纬 56° 间的区域提供宽带卫星通信接入,其中 1156 颗卫星分布在轨道高度为 630 km、轨道倾角为 51.9° 的倾斜轨道面上,在轨道高度为 610 km、轨道倾角为 42° 的倾斜轨道面分布着 1296 颗卫星,剩余的 784 颗卫星位于轨道高度和倾角分别为 590 km 和 33° 的轨道面上。目前,

Kuiper 星座还处于计划和研制阶段,计划在 2022 年发射其首颗互联网卫星。

鸿雁星座是中国航天科工集团主导建设的全球卫星通信系统,鸿雁星座将由包括 54 颗核心卫星和 270 颗用来补网的小卫星在内的总共 324 颗卫星组成。完成论证的一期鸿雁星座由 54 颗核心骨干卫星组成,卫星位于轨道高度为 1070 km、轨道倾角为 85° 的倾斜轨道面上。在 2018 年 12 月,第一颗鸿雁星座发射拉开了鸿雁星座建设的序幕<sup>[29]</sup>,鸿雁星座计划一期发射 60 颗核心骨干卫星并于 2022 年投入使用,二期计划通过发射数百颗卫星提供宽带互联网通信服务,并且于 2025 年完成建设。

### 3 下一代卫星光网络关键技术

结合卫星光网络的特点,从用户的业务需求出发,对卫星组网进行关键技术分析具有重要意义。卫星互联网的业务不仅包括人与人之间通信所产生的宽带业务,例如视频、语音和数据业务,还包括以物联网业务为代表的窄带业务,这些业务时空分布不均,并且呈现出多粒度特征。借助于卫星光网络,多粒度业务可以实现远程多跳转发:基于微波光子学原理,光电混合交换技术实现了多粒度业务的重构以及业务与光波长的适配,在光域与电域之间架起了一座桥梁;通过波长路由技术,可以在业务的起始卫星和目的卫星之间建立一条最短的光路径;在业务量已知的前提下,需要对卫星光网络进行波长需求量分析,满足业务转发需求的同时减少波长数量;考虑到单个业务带宽与波长容量的严重失配,在业务转发的过程中,通过业务疏导技术将多个业务流汇聚加载到同一个波长上,可以提高波长利用率,从而达到节约波长资源的目的。

#### 3.1 光电混合交换技术

##### 1) 原理和场景介绍

受到大气效应的影响,星地之间的业务传输一般采用的是微波链路,而星间链路采用大容量的激光链路,因此需要借助微波光子学技术在卫星节点对业务进行疏导与聚合,如图 2 所示。在源节点处,低数据速率码流经过时钟序列恢复处理单元,变成由时钟控制的信号,再经过码型转换单元后以时间间隔为  $\tau$  进入光合路单元,最后可输出一路高数据速率码流。多粒度业务在卫星光网络中透明转发,当到达目的节点时,由光波长承载的高速率数据码流被光分路单元分成多路,分路后的每路光信号经过间隔为  $\tau$  的延时,当第一路的第一个数据业务到达的时候,多个光选通门同时打开,选出相应路信号中同一个周期内不同时隙位置的光信号,即可实现高速数据到多路低速并行数据的降速处理。

基于以上光域信号处理技术,以现有的成熟光交换、射频交换和分组交换为基础,可以实现多粒度业务的灵活处理和分发,即光电混合交换。它融合了多个

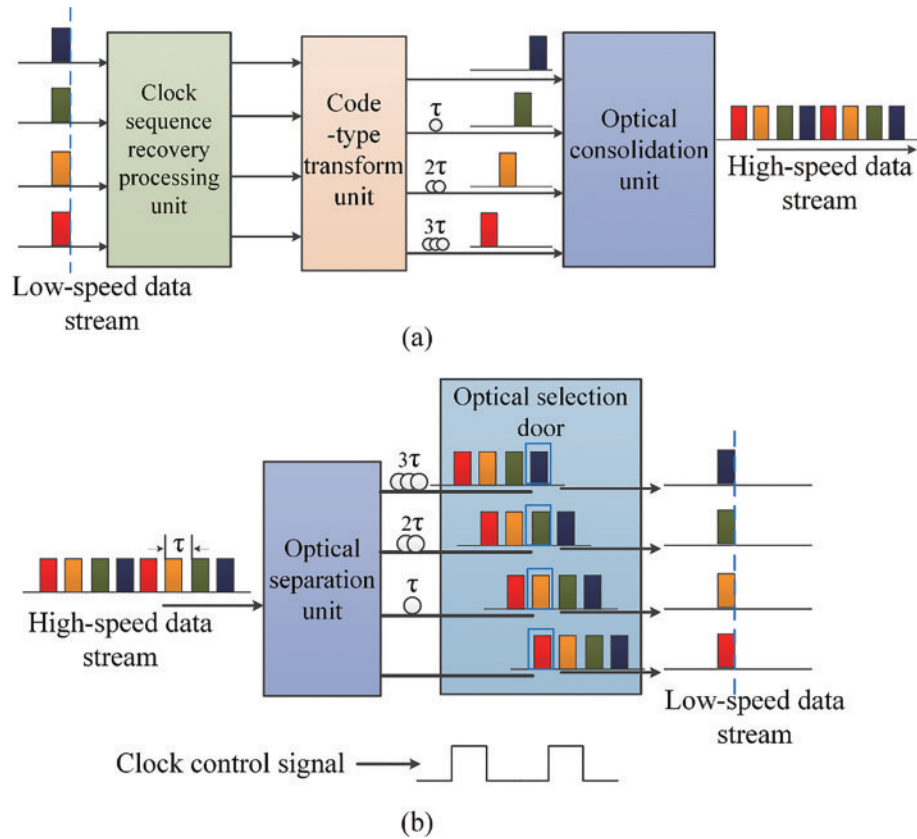


图 2 光电异构链路。(a)聚合; (b)疏导方法

Fig. 2 Photoelectric heterogeneous link. (a) Dredging; (b) polymerization method

交换单元的功能,能够同时处理光、射频和分组业务,实现业务的汇聚与疏导,不仅能节省分组交换与电路交换端口,还能减小总的交换容量。目前光电混合交换的研究主要集中于数据中心网络(DCN)和分组增强型光传输网(POTN)。

## 2) 相关研究

作为云计算的载体,DCN是一个光电混合的网络。随着多粒度业务的爆发式增长,DCN在组网的过程中需要解决负载均衡,资源分配和业务流调度问题。文献[30]针对DCN中大象流携带大量数据造成网络拥塞和负载不均衡的问题,提出基于SDN(Software defined network)的大象流负载均衡(EFLB)方法,当网络负载超过阈值时,控制器利用Openflow特性将检测到的大象流分裂为多个老鼠流,并根据收集的网络拓扑和链路状态动态地计算负载最小的下一跳交换机,确保负载均衡。文献[31]介绍了一种数据中心混合交换网络结构的资源分配机制,该机制通过考虑两个交换平面所允许的服务质量区间,可以依据不同优化目标,获得最优的资源分配。文献[32]在数据中心内采用快速可调波长激光器和光波长路由器来适应流量模型,并基于SDN技术,采用统一的控制平面,感知全网状态信息,下发扩展的流表动态实现流量的分类识别调度。

POTN是指具有分组交换、光通路交叉、虚容器

以及光通路单元交叉等数据处理和分析能力的一种新型复合数据传输技术,具有实现时分复用和分组的统一传送能力,能够提高传输效率。文献[33]提出了一种应用在POTN中的基于业务捆绑的多业务疏导机制,它根据通信网络业务特点进行优先级划分,并结合了业务捆绑的业务量疏导算法,能有效承载通信网中多类型、多粒度业务,提高资源的利用率。文献[34]提出一种在电力系统中采用POTN技术的汇聚算法,通过与现有的光传送网技术对比,验证了POTN在电力分组传送网中汇聚承载的优势和适用性。

关于卫星光电混合交换的研究主要聚焦于交换方案、交换架构设计和信令处理。文献[35]提出了一种光电混合星上交换技术方案,从汇聚打包算法、光交换模块结构和控制方法等关键技术出发对星上光电混合交换进行了分析。在此基础上,文献[36]研究了一种空间信息网络光/射频/分组混合交换的新型星上交换方式,并提出一种基于增强型通用多协议标签交换(GMPLS)的光电混合交换方法。文献[37]提出一种分组交换和子带交换一体化的星上交换架构,通过在Cross-Bar交叉节点设置缓存实现了100 Gb/s以上的交换容量,利用在输入端对子带进行二次封装和在输出端对子带进行重新排序,在交换层面上实现了分组交换和柔性转发的统一。文献[38]提出基于光信令和分组资源预留信令消息的一体化信令格式,对协议流

程进行了简化,基于输入和输出端口信息对一体化信令进行重构得到输入和输出可用路径集,以负载均衡为目标计算可用路径权值,获得最优光电异构路径,从而有效平衡卫星中的光电交换路径负载。

### 3.2 卫星波长路由技术

#### 1) 原理和场景介绍

波长路由是卫星光网络的关键技术,它将网络中的约束条件和性能指标转化为权重因子,并且利用路由算法求解从源节点到目的节点的最短路径。如图 3 所示,卫星光网络的波长路由是指当有业务到达源卫星节点  $s$  时,为业务寻找到达目的卫星节点  $d$  的最短

路径,并分配有效波长。图 3 中卫星节点间的链路为激光链路,节点间不同颜色的线段表示不同的可用波长。在不考虑星上波长转换器情况下,卫星光网络的波长路由必须满足波长连续性和互异性约束,即同一物理链路同一光路源、目的节点间使用的波长必须相同,同一物理链路不同光路间使用的波长不能相同,即图 3 中从源卫星节点  $s$  到目的卫星节点  $d$  只能使用同一颜色的线段。此外,在进行卫星光网络波长路由时还需要考虑卫星节点的动态特性、星上光转发器数量限制以及跳数增多引起的时延和误码率增大等因素<sup>[39]</sup>。

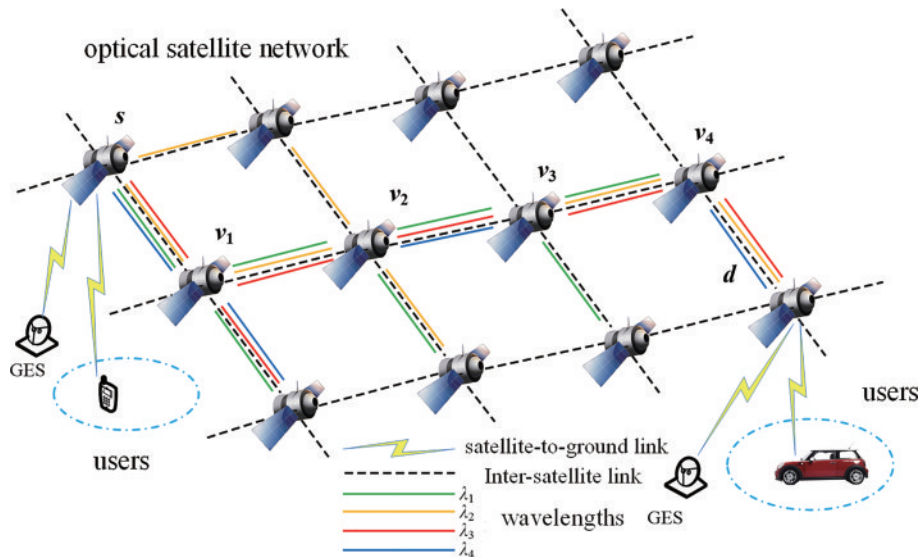


图 3 卫星光网络波长路由<sup>[3]</sup>

Fig. 3 Satellite optical network wavelength routing<sup>[3]</sup>

#### 2) 相关研究

由于卫星光网络拓扑结构时变、链路间歇性连接和星上波长资源有限等特点,卫星光网络波长路由问题远比地面光网络波长路由问题复杂。文献[40]提出一种基于小窗口策略的蚁群算法用来解决卫星光网络路由和波长分配问题,通过引入星间距离、链路持续时间和波长空闲比来构造启发式函数,结果表明,所提算法在降低阻塞概率的同时提高了资源的利用效率。文献[41]研究了  $\pi$  星座和  $2\pi$  星座的路由和波长分配问题,提出了一种确定星间链路最优拓扑结构的方法,仿真结果表明,小规模  $\pi$  星座场景下算法收敛较快,拓扑连接度较高,网络资源消耗较少。文献[42]提出了一种跨层蚁群优化的路由和波长分配方法,以提高网络鲁棒性为目标,与时延最小化的算法相比,所提算法能够大大降低阻塞概率。文献[43]研究了 SpacePro 星座和 NeLS 星座的路由和波长分配问题,提出了基于存储和计算能力的超级卫星节点的波长路由算法,能够大大减少波长数量。文献[44]提出了一种基于多业务的卫星光网络蚁群优化波长路由算法,通过改进蚁群算法的启发函数,将波长空闲率、时延、时延抖动、

丢包率作为蚂蚁选路的重要依据,为业务选择了满足多种服务质量的最优路径,并且采用分组波长分配方法对不同等级的业务进行了区分服务,所提算法能够降低时延、丢包率,同时能够提高波长利用率。

### 3.3 卫星光网络波长需求

#### 1) 原理和场景介绍

波长需求分析指的是在满足业务需求的条件下,通过改变拓扑结构来估计波长数量的边界。随着波分复用和波长路由技术的发展,可以在每条星间链路中建立多个波长信道来满足大带宽业务的传输需求。由于星载光放大器的带宽有限,并且波长信道之间需要保持一定的冗余来减少多普勒效应的影响,卫星光网络的波长资源十分有限。因此,在满足多粒度业务需求的前提下分析波长需求量具有重要意义。

凭借着较低的对地时延,低轨星座通过光链路进行组网,可以为地面用户提供低时延、大带宽和广覆盖范围的互联网接入服务。低轨星座拓扑常采用曼哈顿街道网络,拓扑结构呈现出周期性变化,每个卫星节点与相邻的可视卫星建立链路,包括轨道内链路和轨道间链路,如图 4 所示。轨道内链路是指建链卫星处于

同一个轨道平面内,并且卫星之间相对静止,链路的距离基本不变,这种链路属于永久性链路;轨道间链路是指建链卫星位于不同轨道平面,彼此之间处于高速运动中,这种链路属于间歇性链路,容易受到多普勒效应的影响。在图 4 中,波长路由应满足波长连续性限制。

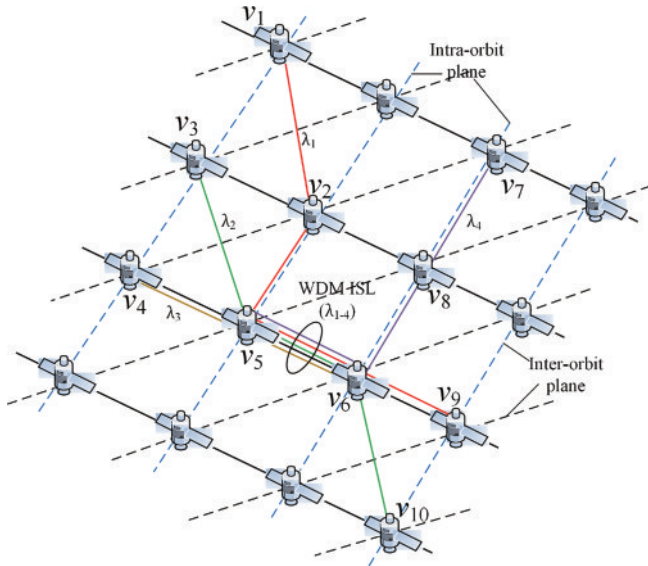


图 4 低轨卫星光网络波长需求量分析

Fig. 4 Analysis of the wavelength requirement of the low-orbit satellite optical network

## 2) 相关研究

目前,针对卫星波长需求量分析的研究主要集中于 LEO 卫星光网络。文献[45]以 NeLS 星座为研究

对象,分析了基于波分复用和波长路由的时变拓扑,在此基础上研究了大量随机生成的具有不同拓扑结构的连接网络以估计波长需求量的边界,研究发现低轨卫星光网络波长需求量是由活跃光学终端的比例、最大容许星间链路跳数和星上光学终端数量共同决定的。文献[46]通过将常规的双向曼哈顿街道网络作为物理拓扑来估计波长需求量的边界,伴随着最大容许星间链路跳数的减少和活跃光学终端的比例下降,波长需求量也减少。文献[47]提出了基于完美匹配模型的链路分配方案,设计了一种合适的拓扑结构,确保了路由路径的长度较短,每条星间链路分配的波长数量较少,与常规的曼哈顿网络拓扑相比,所提方案可以大大降低波长需求量和平均端到端时延。为了解决动态卫星光网络中波长需求量问题,文献[48]提出了一种基于时空演化图的卫星光网络波长需求方法,利用时空演化图表征卫星光网络的动态连接,解决了卫星光网络波长需求量与网络连通度等性能指标的关系问题。

## 3.4 卫星光网络业务疏导技术

### 1) 原理和场景介绍

业务疏导是将一系列虚拟的电连接映射到底层光网络中,既提高了波长的利用率,又节省了端口开销。如图 5 所示,3 路低速率的数据流分别通过路由端口 1、2 和 3 进入核心路由器,经过 EO 端口 4 汇聚成一路光信号,通过底层光链路的传输到达目的节点,最后经过 OE 端口 5 解汇聚成 3 路低速率的数据流分别从 6、7 和 8 端口输出。相比于 IP 层路由,整个业务疏导过程节省了大量路由端口(端口 10-25),因此利用业务疏导可以大大降低光网络能量消耗。

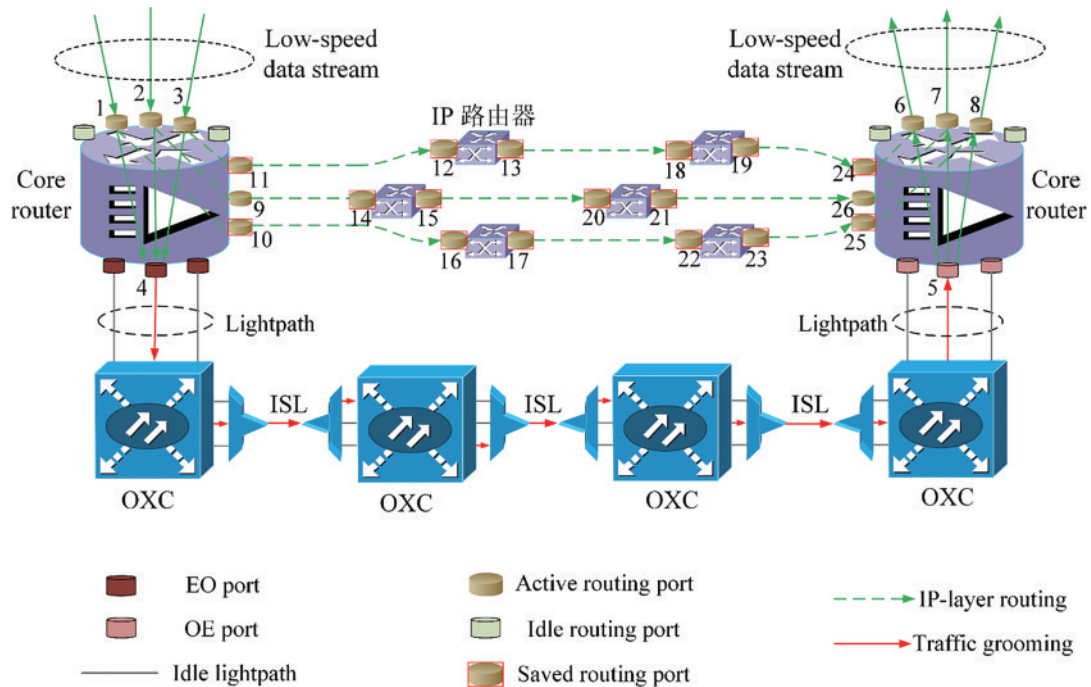


图 5 业务疏导原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of the traffic grooming

根据在中间节点是否需要波长变换,光网络业务疏导可以分成两类:逐跳业务疏导和多跳光路旁路疏导<sup>[49-54]</sup>。其中:逐跳业务疏导要求所有网络节点都具有波长转换能力,具有波长利用率高、业务灵活重构和光路灵活配置等优点;多跳光路旁路疏导指的是从源节点到目的节点都使用同一个波长,在路由的过程中不需要进行波长转换,首先根据转发需求在源节点处对业务流进行汇聚并加载到波长上,然后在路由过程中只需要对波长进行透明转发,到达目的节点后对信号进行解汇聚并且下路输出,相比于逐跳业务疏导,这种方法波长利用率较低。但由于在转发的过程中避免了频繁的波长转换和业务流的重构操作,多跳光路旁路疏导能够减少端口开销,因此降低了能耗。为了提高波长的利用率同时降低系统能耗,通常将这两种业务疏导方式的优势进行结合,即混合业务疏导,首先根据业务流的转发需求在源节点处对多粒度业务进行汇聚,然后对波长的利用率进行判断,如果波长的利用率达到了预期要求,在转发的过程中采用多跳光路旁路疏导的方式,如果波长的利用率较低,再采用逐跳业务疏导方式来加载更多的业务流来提高波长资源利用率。

## 2) 相关研究

目前对于业务疏导问题的研究主要集中于地面光网络中,包括业务疏导模型建立、整数线性规划问题分析和启发式算法求解。文献[49]提出了一种异构波分复用网状网络中业务疏导的通用图模型,分析了辅助图边权重的影响,在此基础上提出了一种集成业务疏导算法,利用最短路径方法求解了业务疏导子问题。文献[51]以降低波分复用环网中光电复用开销为目标,提出了一种适用于单向 SONET/WDM 环网业务疏导算法,通过启发式算法求解了上/下路复用器(ADM)数量的边界值,并研究了弹性光网络中动态业务疏导问题,提出了一种多层附属图模型来同时解决电层的路由和光层的路由和波长分配问题,通过调整边权重来实现业务疏导,同时提出了一种基于带宽变量的频谱预留方案,能够有效提高波长利用效率。文献[52]提出了一种基于深度强化学习的能效优化方法,用来解决云雾弹性光网络中业务疏导问题,通过将传统网络模型和业务路由路径转化为记录状态的彩色网络图像,提取图像特征后建立了一个客观的奖惩制度来评估业务疏导策略,能够大大降低系统能耗。由于卫星光网络的路由方式不同,拓扑动态变化和波长资源不足,地面光网络的业务疏导方法并不适用于解决卫星光网络的业务疏导问题,因此需要结合卫星光网络的特点探索更高效的业务疏导方法。

由于节点和链路资源严重不足,卫星光网络的业务疏导属于一种稀疏业务疏导。文献[53]研究了 IP over WDM 的低轨卫星光网络业务疏导问题,提出了非对称业务模型,在此基础上对比了多个业务疏导和

路由和波长分配算法,通过实验验证了多跳业务疏导和基于波平面的波长分配方法不仅能节省波长资源,还能减少 IP 业务的平均传输时延。文献[54]提出了一种分离式的卫星光网络业务疏导方法,通过引入汇聚单元作为中间粒度,首先通过聚集业务请求构造汇聚单元,然后再将汇聚单元加载到波长上,所提方法可以在波长数量和平均端到端时延之间实现折中。文献[55]研究了分布式星群(DSC)中的业务疏导方法,将分布式星群业务疏导划分为星群内业务疏导和由主节点构成的环网业务疏导,针对星群内业务疏导,提出一种改进蚁群算法用来获得最优解,针对环网业务疏导,提出一种基于双向图的疏导环构造方法,所提方法能够大大提高波长利用率。

## 4 性能指标及制约因素

上述关键技术之间并不是完全独立的,而是相互联系、互相包含的,其中光电混合交换是业务疏导的前提,波长路由是业务疏导的重要步骤,而波长需求是业务疏导需要讨论的指标,这些关键技术的性能指标包括波长数量(NoW)、平均端到端时延(AED)、业务的平均跳数(ANoH)和阻塞概率(BP)等,制约因素包括多普勒频移(DS)、收发天线数量(NoTA)、节点内部端口数量(NoP)、光交换矩阵容量(OSMC)和电交换矩阵容量(ESMC),性能指标与制约因素之间的关系如表 2 所示。

表 2 卫星光网络关键技术性能指标与制约因素关系  
Table 2 Relationship between performance indexes and restriction factors of satellite optical network

Constraints	DS	NoTA	NoP	OSMC	ESMC
NoW	×	√	√	√	×
AED	√	×	×	×	×
ANoH	×	√	√	√	√
BP	√	√	√	√	√

1) 波长数量。由于星间链路是基于 SWDM 的,波长资源十分有限,波长数量受到 NoTA、NoP 和 OSMC 等因素的制约,NoTA 决定了星间链路的数量,从而间接影响了波长数量。NoP 决定了光波长在节点中的转换效率,当 NoP 不足时,波长就会被阻塞。OSMC 影响了光交换的吞吐量,从而影响了波长数量。

2) 平均端到端时延。该性能指标主要受到 DS 的影响,当两个建链卫星相对高速运动时,容易产生 DS,DS 会增加建链时间、接收端的处理时延,甚至会导致建链失败和链路中断。

3) 业务的平均跳数。该性能指标与业务的 QoS 有关,在波长路由和业务疏导时需要进行讨论,主要受到 NoTA、NoP、OSMC 和 ESMC 等因素的影响,业务的平均跳数是由承载它的光波长的跳数决定的,因此



当波长的跳数变化或者波长发生中断时,业务的平均跳数也会发生改变。

4) 阻塞概率。该性能指标受到 DS、NoTA、NoP、OSMC 和 ESMC 等因素的影响,业务的阻塞包含两种情况:① ESMC 的容量不足,无法完成业务的汇聚;② 承载该业务的光波长发生中断。

## 5 结束语

随着卫星互联网的发展,传统的卫星网络受限于星上载荷和链路容量,很难满足未来互联网业务的接入、传输和分发需求。卫星光通信具有大容量、低时延、抗干扰性能好和终端小型化等优点,为卫星互联网的设计提供了一种新的思路,即构建下一代卫星光网络。本文介绍了基于光通信的卫星互联网的基本架构和星座类型,综述了下一代卫星光网络的关键技术。这些技术从未来卫星互联网业务需求出发,一定程度上解决了卫星光网络组网过程中面临的资源受限、动态变化等问题。为了充分发挥卫星光网络的优势,实现网络资源的高效利用,未来的研究需要关注以下几个方面:

1) 基于 SDN 的卫星弹性光网络频谱分配方法。随着 SDN 技术的发展,软件定义光网络可以实现更精细的网络资源管理,尤其对于资源受限的卫星光网络具有十分重要意义。通过业务疏导,波长利用率已经能够得到一定程度的提升,但利用率还是不够高。通过构造卫星弹性光网络,从频谱角度出发对光波长进行分割能够进一步提高波长的利用率。

2) 基于能效优化的业务疏导方法。星上能量供应非常有限,有限的能量主要用于星间链路的建立和维持,星上信号处理。在业务疏导的过程中,部分业务在卫星节点进行重构并且加载到光波长上,因此需要消耗大量端口能量,同时业务在光网络中转发需要进行的光信号放大,光信号的发射接收也需要消耗大量能量。因此,在未来卫星光网络组网时要充分考虑能耗限制,利用有限的能量满足业务传输和分发的需求。

3) 基于分布式星群光网络构造卫星数据中心。随着云计算、物联网和移动边缘计算的发展,传统的数据中心网络由于接入时延长、鲁棒性差、扩展性差和资源利用率低,已经很难满足各种业务需求。分布式星群网络凭借着灵活的组网方式和广域的覆盖范围,可以作为地面数据中心的扩展,通过大容量的星间光链路互连构造卫星数据中心网络,能够为空天地用户提供随时随地大规模的通信计算服务,具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] 张更新,王运峰,丁晓进,等. 卫星互联网若干关键技术研究[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 1-14.  
Zhang G X, Wang Y F, Ding X J, et al. Research on

several key technologies of satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 1-14.

- [2] 潘成胜,梁芷铭,石怀峰,等. 面向并发业务的卫星网络服务功能链优化算法[J]. 计算机工程, 2021, 47(3): 196-201.  
Pan C S, Liang Z M, Shi H F, et al. Optimization algorithm of satellite network service function chain for concurrent services[J]. Computer Engineering, 2021, 47(3): 196-201.
- [3] 王蔚龙,李勇军,赵尚弘,等. 基于负载均衡的卫星光网络路由与波长分配方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0706004.  
Wang W L, Li Y J, Zhao S H, et al. Routing and wavelength assignment based on load balance for optical satellite network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0706004.
- [4] 郝少伟,李勇军,赵尚弘,等. 基于非正交多址接入的星间可见光通信最优功率分配研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706002.  
Hao S W, Li Y J, Zhao S H, et al. Optimal power allocation for intersatellite visible light communication based on nonorthogonal multiple access[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0706002.
- [5] 张悦,王惠琴,曹明华,等. 无线光通信中的增强型光空间调制[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0306001.  
Zhang Y, Wang H Q, Cao M H, et al. Enhanced optical spatial modulation in wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0306001.
- [6] Kim I I, Riley B, Wong N M, et al. Lessons learned for STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4272: 1-15.
- [7] Landau E. OPALS boosts space-to-ground optical communications research[J]. NASA JPL News-Press Release, 2015: 14.
- [8] Edwards B, Fletcher A. NASA's LCRD, laser communications relay demonstration[EB/OL]. (2013-10-28) [2021-05-06]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160000779/downloads/20160000779.pdf>.
- [9] Tolker-Nielsen T, Oppenhaus G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [10] Singer T. Implementation of the true multi-mission control room at GSOC[C]//SpaceOps 2016 Conference, May 16-20, 2016, Daejeon, Korea. Virginia: AIAA Press, 2016: 2454.
- [11] Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M, et al. Preliminary result on laser communication experiment using Engineering Test Satellite-VI (ETS-VI) [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2381: 151-158.
- [12] Jono T, Takayama Y, Ohinata K, et al. Demonstrations of ARTEMIS-OICETS inter-satellite laser communications [C]//24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, June 11-14, 2006, San Diego, California. Virginia: AIAA Press, 2006: 5461.
- [13] 姜洋,于龙江,王跃,等. 高分多模卫星飞行程序设计及验证[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 94-101.

- Jiang Y, Yu L J, Wang Y, et al. Design and on-orbit verification of GFDM-1 satellite flight program[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(3): 94-101.
- [14] 崔潇. 卫星光通信关键技术及发展态势分析[J]. *信息技术与政策*, 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.
- [15] Carlson R T. Analog-modulated satellite laser crosslinks at 300 and 650 Mbps[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1866: 226-235.
- [16] Nykolak G, Szajowski P F, Jacques J, et al. 4×2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1550 nm[C]// *Optical Fiber Communication Conference*, 1999, and the *International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, February 21-26, 1999, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1999: PD11.
- [17] Szajowski P F, Nykolak G, Auburn J J, et al. Key elements of high-speed WDM terrestrial free-space optical communications systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 3932: 2-14.
- [18] Koyama Y, Aizono M, Morikawa E, et al. Evaluation of a high-power optical amplifier for intersatellite links[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4975: 164-171.
- [19] 刘刚. 非静止轨道卫星移动通信系统组网关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003: 20-29.
- Liu G. Research on the key technologies of networking in the NGSO satellite mobile communication systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003: 20-29.
- [20] Wood L. *Internetworking with satellite constellations* [M]. Guildford: University of Surrey, 2001.
- [21] 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.
- Song Y C, Xu X T, Song W T. Overview of the development of satellite mobile communication systems at home and abroad[J]. *Telecommunications Information*, 2019(8): 37-41.
- [22] Collins M. The Iridium communications satellite: an artefact, system and history in the 1990s[J]. *Showcasing Space*, 2005, 6: 116-141.
- [23] 李博. 第二代铱星(Iridium NEXT)[J]. *卫星应用*, 2017(9): 70.
- Li B. The second generation Iridium NEXT[J]. *Satellite Application*, 2017(9): 70.
- [24] 郭晓宇. SES 要建 10 大比“O3b 增强”星座[J]. *中国航天*, 2017(12): 43.
- Guo X Y. SES to build 10 more than the “O3b enhancement” constellation [J]. *Aerospace China*, 2017(12): 43.
- [25] 晓春. OneWeb 太空互联网低轨星座的新进展[J]. *卫星应用*, 2016(6): 75-77.
- Xiao C. New progress of OneWeb space Internet LEO constellation[J]. *Satellite Application*, 2016(6): 75-77.
- [26] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链计划卫星网络资料申报情况分析[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(1): 60-68.
- Yang W H, Hua G L, Feng Y, et al. Analysis of the starlink satellite network filing application[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(1): 60-68.
- [27] 方芳, 吴明阁. “星链”低轨星座的主要发展动向及分析[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16(9): 933-936.
- Fang F, Wu M G. Development trend and analysis of “Starlink” LEO satellites constellation[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2021, 16(9): 933-936.
- [28] 高铎瑞, 谢壮, 马榕, 等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0406001.
- Gao D R, Xie Z, Ma R, et al. Development Current status and trend analysis of satellite laser communication (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406001.
- [29] 晓曲. 鸿雁星座首颗试验星[J]. *卫星应用*, 2019(2): 62.
- Xiao Q. The first experimental star of Hongyan constellation[J]. *Satellite Application*, 2019(2): 62.
- [30] 金玲, 束永安. 数据中心网络中基于 SDN 的大象流负载均衡的研究[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(1): 203-205.
- Jin L, Shu Y A. Research on load balancing of elephant flow based on SDN in data center network[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(1): 203-205.
- [31] 冯张潇, 孙卫强, 胡卫生. 数据中心混合交换网络中的资源分配机制[C]// *全国第 17 次光纤通信暨第 18 届集成光学学术会议——SDN、网络架构、技术经济和设计权衡专辑*. 南京: 南京光通信与光电子技术学会, 2015: 33-35.
- Feng Z X, Sun W Q, Hu W S. Resource allocation mechanism in data center hybrid switching network[C]// *The 17th National Optical Fiber Communication and The 18th Integrated Optics Academic Conference-SDN, Network Architecture, Technical Economy and Design Trade-Off Album*. Nanjing: Nanjing Institute of Optical Communication and Optoelectronic Society, 2015: 33-35.
- [32] 张天亿, 刘逢清. 基于 SDN 的光电混合数据中心流量调度方法[J]. *光通信技术*, 2018, 42(4): 25-28.
- Zhang T Y, Liu F Q. Traffic scheduling method in hybrid optical-electronical data centers based on SDN[J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(4): 25-28.
- [33] 欧清海, 陈勋, 刘柱, 等. 面向电力通信网业务的 POTN 多业务疏导机制[J]. *电力信息与通信技术*, 2017, 15(7): 1-6.
- Ou Q H, Chen X, Liu Z, et al. POTN multi-service routing mechanism for power communication network[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2017, 15(7): 1-6.
- [34] 刘国军, 李宏发, 戚延翔, 等. 电力光通信网络中 POTN 业务汇聚研究[J]. *光通信技术*, 2018, 42(5): 33-36.
- Liu G J, Li H F, Qi Y X, et al. Research on POTN service aggregation in optical communication network of electric power[J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(5): 33-36.
- [35] 李瑞欣, 赵尚弘, 么周石, 等. 通信卫星光电混合交换

- 技术研究[J]. 光通信技术, 2011, 35(6): 51-53.
- Li R X, Zhao S H, Yao Z S, et al. Research of on-board mixed optical/electric switching of GEO broadband multimedia satellite[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(6): 51-53.
- [36] 丁西峰, 赵尚弘, 李瑞欣, 等. 空间信息网络光/射频/分组混合交换技术研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 6-9.
- Ding X F, Zhao S H, Li R X, et al. Research on laser/RF/packets hybrid switching of space information network[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(6): 6-9.
- [37] 赵哲, 孙汉汶, 马伟. 面向混合业务的星载一体化交换架构设计[J]. 空间电子技术, 2017, 14(5): 17-21.
- Zhao Z, Sun H W, Ma W. Multi-services oriented integrated switching architecture of satellite[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(5): 17-21.
- [38] 李静玲, 黎军, 梁薇, 等. 具有光电混合交换能力的星上信令设计与处理方法[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(6): 112-116.
- Li J L, Li J, Liang W, et al. Design and processing method of satellite signaling with a mixed optical/electric switching capability[J]. Microelectronics & Computer, 2018, 35(6): 112-116.
- [39] 郑印. 具有 QoS 保证的抗毁动态 RWA 算法设计与仿真[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 11-55.
- Zheng Y. Design and simulation of dynamic RWA algorithm with QoS and link protection mechanism[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 11-55.
- [40] Dong Y, Zhao S H, Ran H D, et al. Routing and wavelength assignment in a satellite optical network based on ant colony optimization with the small window strategy[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(10): 995-1000.
- [41] Sun X, Cao S Z. Wavelength routing assignment of optical networks on two typical LEO satellite constellations[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [42] Wen G L, Zhang Q, Xin X J, et al. Cross-layer design based ant colony optimization for routing and wavelength assignment in an optical satellite network[C]//2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016.
- [43] Sun X, Cao S Z. A routing and wavelength assignment algorithm based on two types of LEO constellations in optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2106-2113.
- [44] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 软件定义卫星光网络蚁群优化波长路由技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 20200125.
- Shi X D, Li Y J, Zhao S H, et al. Ant colony optimization routing and wavelength technology for software-defined satellite optical networks[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 20200125.
- [45] Tan L Y, Yang Q L, Ma J, et al. Wavelength dimensioning of optical transport networks over nongeosynchronous satellite constellations[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(4): 166-174.
- [46] Yang Q L, Tan L Y, Ma J, et al. An analytic method of dimensioning required wavelengths for optical WDM satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(2): 247-249.
- [47] Liu Z, Guo W, Deng C L, et al. Wavelength dimensioning for wavelength-routed WDM satellite network[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 763-771.
- [48] Liu X F, Yang L, Chen Q, et al. An analytic method of wavelength requirements in dynamic optical satellite networks[J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(11): 2569-2573.
- [49] Zhu H Y, Zang H, Zhu K Y, et al. A novel generic graph model for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(2): 285-299.
- [50] Chiu A L, Modiano E H. Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(1): 2-12.
- [51] Zhang S Q, Martel C, Mukherjee B. Dynamic traffic grooming in elastic optical networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(1): 4-12.
- [52] Zhu R J, Li S H, Wang P S, et al. Energy-efficient deep reinforced traffic grooming in elastic optical networks for cloud-fog computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12410-12421.
- [53] Dong T Y, Shen G X. Traffic grooming for IP over WDM optical satellite networks[C]//2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), November 9-10, 2014, Suzhou, China. New York: IEEE Press, 2014.
- [54] Peng C, Zhao S H, Li R X, et al. Separated traffic grooming for Low Earth Orbit (LEO) optical satellite networks with wavelength dimensioning[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(6): 499-511.
- [55] Peng C, Zhao S H, Li J, et al. Provision of traffic grooming for distributed satellite cluster networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(6): 557-574.