

## 激光与光电子学进展

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)

常呈武\*, 刘宏阳

北京空间信息传输中心, 北京 102300

**摘要** 随着低轨卫星互联网的迅猛发展,星间激光通信链路成为低轨大型星座互联互通的关键,也是用户接入卫星互联网实现全球范围内端到端交互的基础。与地球同步轨道的星间环网不同,由于低轨卫星的高动态性,造成星间链路需要不断动态重构,由此带来空间节点的编址方式、交换路由方法等诸多技术难题,是目前该领域关注的热点。此外,用户终端通过微波链路接入卫星互联网,需要微波链路和激光链路之间的汇集和分发,也是迫切需要研究解决的重点难点问题。

**关键词** 卫星互联网; 低轨星座; 星间激光通信链路; 传输; 交换

中图分类号 TN929.13

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240799

Research on Inter-Satellite Laser Communication Link Transmission and  
Routing Switching Technology of Satellite Internet (Invited)

Chang Chengwu\*, Liu Hongyang

Beijing Space Information Transmission Center, Beijing 102300, China

**Abstract** With the rapid development of LEO satellite internet, inter-satellite laser communication link, which is the key to connect each other for the LEO large constellations, and is the base for users to access satellite internet and achieve the end-to-end communication around the world. It is different between the ring network of the GEO satellites and the LEO satellite internet, due to the high dynamics of the LEO satellite motion, the inter-satellite laser links need to reestablish continually, so it brings a lot of technology problems in the addressing mode and switching routing method along the space nodes, and is the hotspot in this field. In addition, user terminals access the satellite internet by microwave link, which needs aggregation and distribution between microwave link and laser link. It is also a key and difficult problem that needs to be urgently studied and solved.

**Key words** satellite internet; low-orbit constellation; inter-satellite laser communication link; transmission; switching

## 1 引言

地球上海洋面积约占地球表面的 71%,加之还有大量的高山、沙漠、草原等偏远地区,都是人类信息交互的通信盲区。从 20 世纪 50 年代开始,随着人造卫星尤其是通信卫星技术的发展,人类全球范围内随时随地的通信才成为可能。20 世纪 80 年代,美国摩托罗拉公司提出“铱星”计划,这是世界上第一个低轨全球个人卫星移动通信系统,设想 66 颗卫星围绕 6 个极地圆轨道运行,实现个人手持手机式的全球移动通

信,由于地面移动通信发展迅速、多媒体业务兴起,以及通信成本急剧下降,加之“铱星”商业推广和投资结构的问题,投入运营半年后便陷入破产境地,低轨卫星通信进入发展低谷。进入 21 世纪后,由于卫星平台技术、相控阵载荷技术、星上处理技术的发展以及芯片、功放等成本的下降,低轨卫星通信系统的发展又日益引起关注,铱星、轨道通信和全球星三大系统完成了升级换代,OneWeb、StarLink、O3b 等以 Ku、Ka,甚至更高频段的新兴互联网星座进入爆发式增长,尤其是“星链”,截止到 2023 年 12 月 5 日,“星链”

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-01-31; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 航天系统部“十四五”装备综合研究项目

通信作者: \*chang\_cw@126.com

星座在轨卫星规模达 5144 颗,占全球在轨卫星总量超 55%,SpaceX 公司已向国际电信联盟提交申请,将星链系统卫星数量提升至 41927 颗,是人类有史以来规模最大的卫星星座。与此同时,中国为了抓住低轨卫星互联网发展的战略机遇,相继推出了“鸿雁”“虹云”“天启”等低轨星座,尤其是中国卫星网络集团有限公司的成立,整合各类卫星网络资源,加快了我国卫星互联网的发展进程。

卫星互联网是一种基于卫星通信技术的互联网解决方案,通过布署在低轨、中轨和高轨的通信卫星,实现全球范围内的宽带互联网接入和通信服务。对于卫星互联网,基于高轨通信卫星的卫星互联网的星间链路,由于卫星之间的相对静止性,星间链路建立以及路由交换比较简单。而低轨卫星互联网尤其是低轨巨型星座构建的卫星互联网,由于其高动态性,卫星构型处于动态变化之中,服务的地面用户也处于动态变化之中,其星间激光通信链路建立以及激光链路和微波用户链路之间的交换,就是一个复杂的技术问题,也是目前卫星互联网研究的重点。

## 2 国内外卫星星间激光通信链路发展情况

卫星星间激光通信链路技术是一种利用激光作为载体在空间进行信息传输的技术,它具有高吞吐率、高传输带宽、高安全性等特性,使得空间激光星间链路技术成为未来空间通信的重要发展方向。该技术通过在卫星之间建立激光链路,实现高速数据传输和轻量级载荷、低能耗通信,为空间任务提供了更高效、更可靠的数据传输方式,也成为国内外卫星间通信的主要发展方式之一。

激光通信作为一种新的卫星通信星间链路传输方式,仅有 20 多年时间,经历了一个由简单到复杂,由星地链路到星间链路的发展历程。欧洲较早开展激光通信技术研究和试验应用。2001 年,欧空局 SILEX 项目实现了世界上首次星间/星地激光通信,最大通信速率仅为 50 Mbit/s;2008 年,德国航空航天中心(DLR)利用低轨 TerraSAR-X 卫星与美国低轨 NFIRE 卫星建立了星间激光通信链路,两颗卫星间距离 5000 km,以 5.625 Gbit/s 的数据传输速度首次实现了两颗低轨卫星间的相干激光通信试验。随着相干激光通信在轨试验成功,欧空局正式启动了欧洲数据中继系统(EDRS)计划。2019 年,EDRS-A 星与 EDRS-C 两颗高轨中继卫星间建立了激光通信链路,通信速率为 1.8 Gbit/s,表明星间激光通信链路技术已达到工程实用水平。美国在卫星激光通信技术研究方面起步较早,2013 年 10 月,美国首次成功开

展了“月球激光通信演示验证”,验证了月地光通信关键技术和长距离激光通信的可行性,链路距离达到 380000 km,最大下行速率为 622 Mbit/s。2018 年 8 月,美国又完成了一项星载激光通信领域里程碑的事件,美国的 OSCD-B 和 OSCD-C 终端分别搭载两颗 1.5U 的立方卫星 AeroCube-7B 和 AeroCube-7C,首次完成了基于 Cubesat 微小卫星平台间的激光通信,两个通信终端的质量仅为 360 g,通信速率为 100 Mbit/s。我国自 2011 年开始,相继在海洋二号、墨子号、实践十三号、实践二十号等卫星上搭载激光通信终端,开展了星地激光通信链路试验,最高通信速率达到 10 Gbit/s,验证了直接探测和相干探测激光通信技术的可行性<sup>[1-2]</sup>。

随着星间激光通信链路技术日益成熟,以及低轨卫星互联网海量数据传输和交互的需要,星间激光通信链路在卫星互联网中的应用已成为一个发展趋势。星链(Starlink)系统在 V1.5 版本的卫星上搭载了 4 台激光通信终端,可以同时与同一轨道面、相邻轨道面的 4 颗卫星建立星间激光通信链路,该星座的星间激光通信速率已超过 100 Mbit/s。美国国防部正在建设的国防太空架构“传输层”卫星搭载了先进的激光通信载荷,国防太空架构采用一体化多层体系架构,由传输层、跟踪层、监控层、新兴能力(威慑)层、作战管理层、导航层和支持层等 7 个功能层组成,其中,骨干层为传输层,为全球范围内作战平台提供可靠、弹性、低延迟的军事数据和通信连接。当前美军太空发展局正在加速建设传输层 0 期和传输层 1 期,传输层卫星的关键技术之一便是星间激光链路。传输层 0 期由 20 颗卫星构成,分布在 2 个极地轨道平面,每个轨道平面将部署 7 颗 A 组卫星和 3 颗 B 组卫星,其中:A 组卫星搭载 4 条星间链路(前、后、左、右),能提供进出轨道平面的交链,支持传输层以外的星间及星地链接;B 组卫星搭载 2 条星间链路,可与 A 类卫星之间进行交联;传输层 1 期由 126 颗卫星构成,这 126 颗卫星分布在 6 个轨道平面上,每颗卫星至少有 4 条光学链路,都能与传输层 1 期其他所有卫星进行互操作。同时,备受美国国防部关注的星链商业星座也搭载了激光通信载荷,为了将军事和商业等异构星座连接起来,美国国防部正在开发一种称为“天基自适应通信节点”的光通信终端,可实现军事通信“传输层”卫星与商业低轨卫星互联网如“星链”的无缝连接<sup>[3]</sup>。我国“行云”系列卫星搭载了由 LaserFleet 公司研制的激光通信载荷,于 2020 年发射入轨,是我国首次开展低轨卫星星间激光链路技术试验,该激光通信载荷的通信距离大于 3000 km,通信速率可以达到 100 Mbit/s。国内外星间激光通信链路发展情况如表 1 所示。

表 1 国内外星间激光通信链路发展情况

Table 1 Development of inter-satellite laser communication link at home and abroad

Time	Country	Satellite system	Link type	Data rate
2008	Germany	TerraSAR-X	LEO-LEO	5.625 Gbit/s
	US	NFIRE		
2018	US	AeroCube B/C	LEO-LEO	100 Mbps
2019	US	EDRS	GEO-GEO/GEO-LEO	1.8 Gbit/s
2020	China	Xing Yun	LEO-LEO	100 Mbit/s
2021	US	Starlink	LEO-LEO	100 Mbit/s
2024	US	O2O <sup>[4]</sup>	LEO-LEO	250 Mbit/s
2022	US	BlackJack	LEO-LEO	119 Mbit/s
2022	US	Transmission Layer 0/1	LEO-LEO	1 Gbit/s

### 3 卫星互联网星间激光通信链路总体技术架构

与一般的卫星与卫星的“点对点”星间激光通信链路不同,卫星互联网星间激光通信链路是一种网状分布的激光通信链路,同时,还存在用户微波通信链路与

星间激光通信链路的微波与激光之间的汇聚和分发,因此,卫星互联网星间激光通信链路的研究,不仅包括星间激光通信链路的传输,也包括星上激光通信链路与微波通信链路的转换,还包括不同卫星节点之间的激光通信链路的交换和路由。其总体技术架构如图 1 所示。

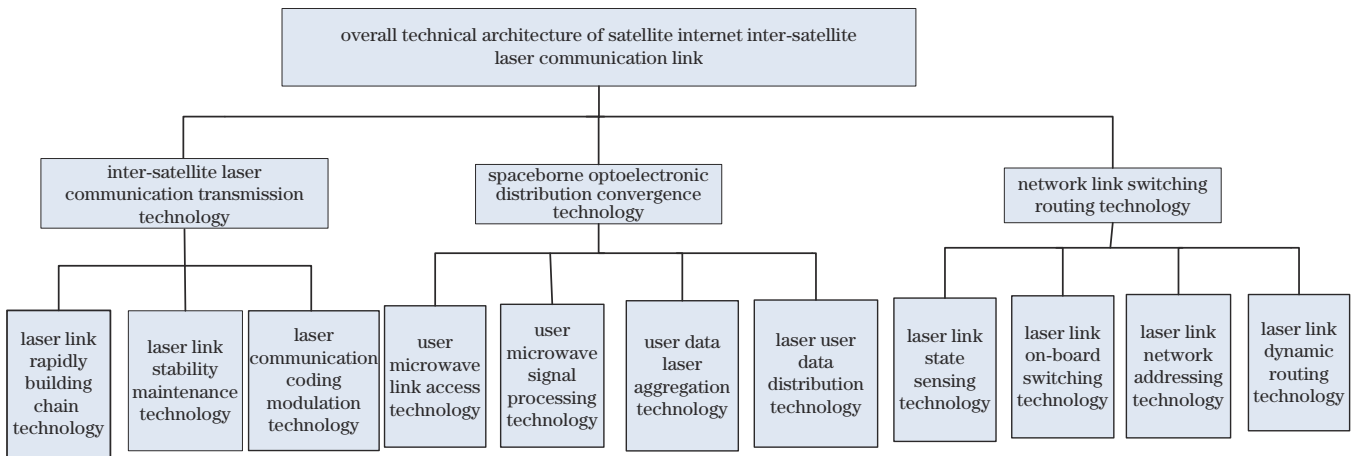


图 1 卫星互联网星间激光通信链路总体技术架构图

Fig. 1 Overall technical architecture diagram of inter-satellite laser communication link for satellite internet

对于卫星互联网而言,为了适应大容量数据的传输,星间链路发展的趋势是采用激光通信链路,以代替原来的星间微波通信链路,构成一个骨干卫星互联网,也可以称为卫星互联网的核心网部分,但是卫星通信服务的用户大多分布在地球表面各个区域,采用的通信链路大多是微波通信链路,这样一来,就涉及星间激光通信链路和用户微波通信链路的汇聚和分发问题,即某个卫星通信节点的地面用户通信对象如果超出本卫星覆盖范围,就需要转换到星间激光通信链路进行远域传输。星载光电分发汇聚技术已在高轨卫星通信中得到应用,相对比较成熟,仅将基本流程进行描述:在卫星节点上,需要将接收到的用户微波信号进行解调处理,根据目的地址判断其信息传输方向,如果目的地址不在本卫星覆盖范围,需要将相同方向的用户数据汇聚,调制到激光通信链路上,进行电光转换。同

时,对接收到的激光通信链路信号进行光电转换和解调处理,判断是在本卫星覆盖范围内分发还是远域传输,如果目的地址在本卫星覆盖范围,则调制到相应的微波波束上,否则根据目的地址判断其传输方向,调制到相应的星间激光通信链路上。其用户微波链路与星间激光通信链路组成如图 2 所示。

### 4 卫星互联网星间激光通信链路传输技术

星间激光通信链路从本质上来讲就是点与点之间的激光通信链路,但从低轨卫星互联网视角来看,一般每颗卫星与相邻的 4 颗卫星建立星间激光通信链路,分别是同一轨道面内的前后 2 颗卫星、相邻轨道面的左右 2 颗卫星,同一轨道面内各卫星间相对位置保持不变,相应地任意两颗卫星之间的激光通信链路也保



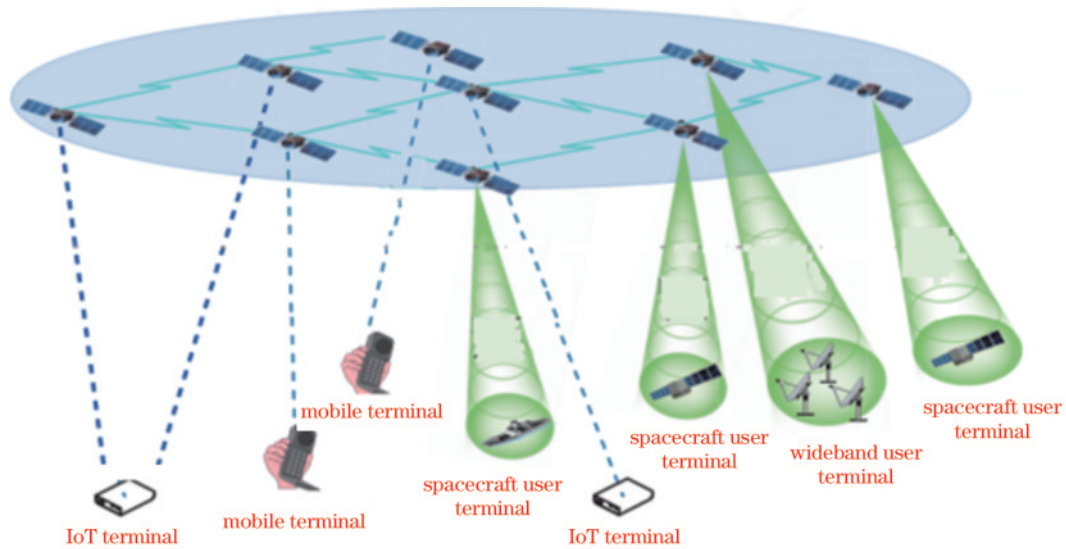


图 2 卫星互联网用户微波链路及星间激光通信链路分发与汇聚示意图

Fig. 2 Distribution and convergence diagram between user microwave link and inter-satellite laser communication link for satellite internet

持不变,是一种固定连接关系,而不同轨道面之间的卫星相对位置处于变化之中,不同轨道面的两颗卫星之间的激光通信链路处于动态切换之中,即不同轨道面之间星间激光通信链路需要经历一个“建链—断链—新的链接”的动态建链过程。卫星互联网星间激光通信链路构型如图 3 所示,不同轨道面之间星间激光通信链路动态建链如图 4 所示。

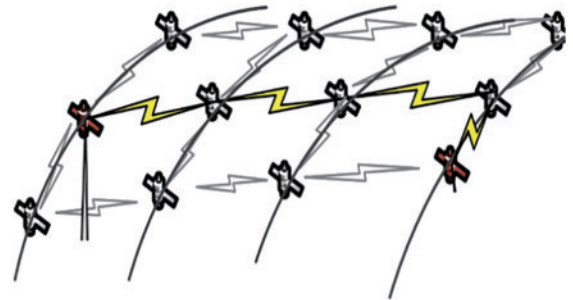


图 4 不同轨道面间星间链路动态切换示意图

Fig. 4 Diagram of dynamic switching of inter-satellite links between different orbital planes

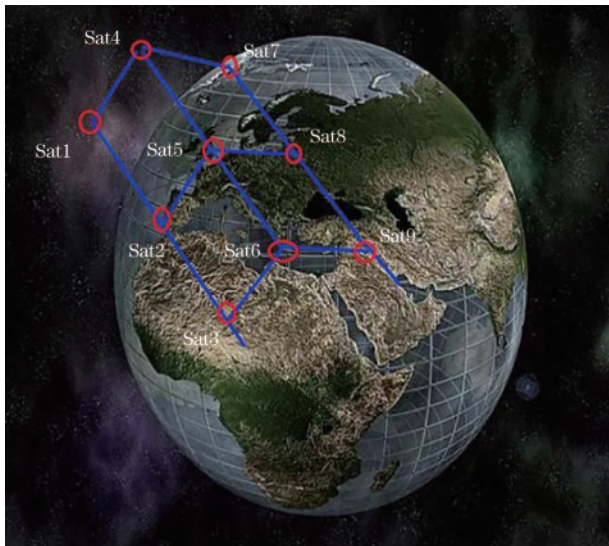


图 3 低轨卫星互联网星间链路构型示意图

Fig. 3 Diagram of inter-satellite link configuration for low-orbit satellite Internet

对于卫星互联网的星间激光通信链路传输,除了通常意义上的波长选择、光路设计、功率大小、编码方式、调制方式、波分复用、跟瞄方式的技术体制外,由于不同轨道面间星间链路的动态特性,链路连接处于时刻变化之中,所以最关键的就是星间快速建链技术。

1) 对于稀疏低轨卫星通信星座,一般两颗星之间相距较远,且每颗星与同轨道面、相邻轨道面的卫星较少,在这样的情况下,每颗星记住同轨道面前后的轨道根数、相邻两个轨道面的所有卫星轨道根数,在星间链路建立时,采取“轨道根数引导+小范围扫描”方式,即可快速建立星间激光通信链路。

2) 对于高密度的低轨卫星互联网星座,星与星之间相距较近,且由于卫星密度很大,像星链星座建成以后预计有 4.2 万颗卫星,分布在不同高度的轨道上,形成多层卫星网络,在每颗卫星的光学视场中,都可以同时看到几颗卫星。对于这样的情况,星间链路建立采取随遇接入的方式即可,如果某颗卫星在特定条件下,

光学视场内缺少建立星间激光链路的卫星,可以采取“小角度扫描寻星”的方式,快速建立星间激光通信链路。

### 5 卫星互联网星间激光通信链路交换路由技术

卫星互联网作为一个网络,在星上存在用户微波链路与星间激光链路、多个星间激光链路之间的交换

问题,也存在不同卫星之间信息的流向控制问题,也就是路由问题,因此星间激光通信链路交换路由技术包括交换和路由两个部分。

#### 5.1 星上激光通信交换技术

传统的电交换可分为电路交换、虚电路交换和分组包交换等 3 种,其共同特点是在电域的交换。而卫星互联网存在着电域的分组交换和光域的光交换,星上激光通信交换是一种混合交换方式<sup>[5]</sup>,如图 5 所示。

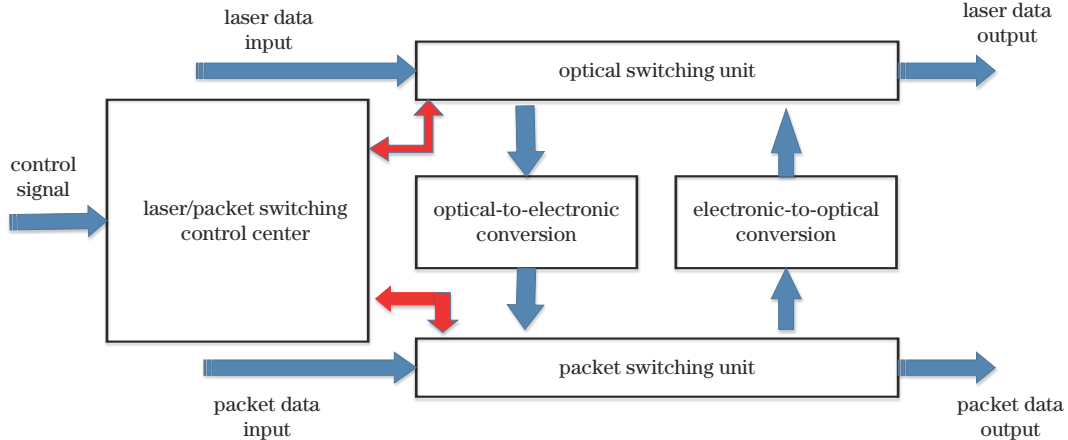


图 5 星上光电混合交换组成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the composition of on-board photoelectric hybrid exchange

对于用户微波链路与激光通信链路的光电、电光转化,技术上比较成熟,比较复杂的是星上光交换技术。目前,在星上激光交换方面,主要有 3 种技术途径:光电路交换(OCS)、光突发交换(OBS)和光分组交换(OPS)。

光电路交换(OCS),以光学波长作为交换粒度,

是一种面向连接的模拟交换,类似于星上的微波矩阵开关,但不同的是光电路交换是在光域的模拟交换,需要通过光路设计和光控制电路实现不同光学波长链路的交换。在“十三五”某科研项目中,中国科学院西安光学精密机械研究所做出了基于波长交换的全光交换机<sup>[6]</sup>,如图 6 所示。

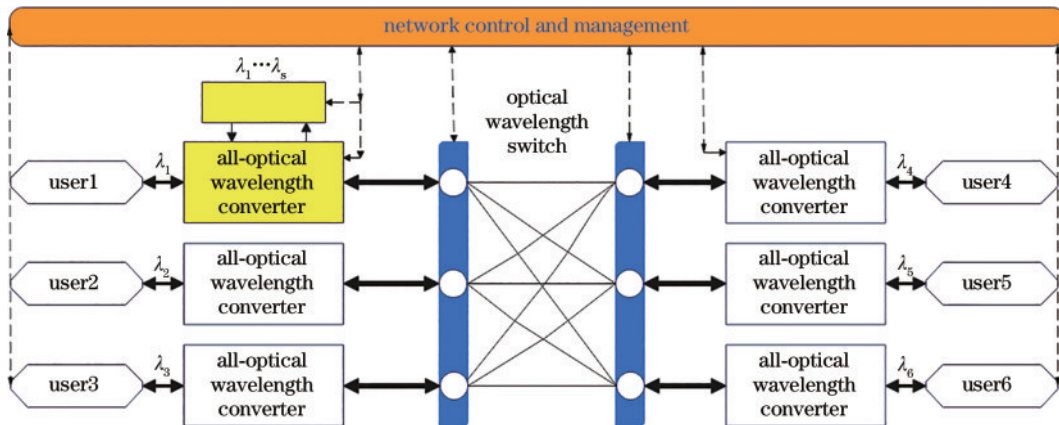


图 6 基于波长交换的星载光交换机组成图

Fig. 6 Composition diagram of spaceborne optical switching based on wavelength

基于波长交换的光交换机,对于卫星互联网的骨干星间激光通信链路较为适应,因为每颗卫星的星间激光链路数量有限,一般只有 4 条链路,适用于有限波长的交换场景,但对于“骨干+接入”类型的卫星通信网络并不适用,尤其是接入用户数量众多的情况下,如果采用波长作为各个用户的识别标志的情况下,骨干

星的波长交换是难以适应的。

光突发交换(OBS)的基本交换单元称为突发包,也是一种面向连接的交换,需要将数据组合成大的突发包,但这种模式会增加时延,不能满足实时传输的要求,并且对控制电路要求较高。光分组交换(OPS)的基本交换单元是数据包,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,与电域的分组交换原理一样,这也是一种“存储转发”模式,目前制约光分组交换技术工程应用的难点主要是光存储技术,光缓存技术也是国内外研究的热点。

## 5.2 星间激光通信路由技术

卫星互联网通信,尤其是低轨卫星互联网,信息在多个连接之间传输,需要一定的策略来确定传输的方向,以确保信息能在端与端之间可靠传输,这就是路由问题。星间激光通信的路由,需要以下几个流程:

1) 链路状态感知:首先卫星要具备感知与其他卫

星的链路状态的情况,这是路由选择的基础。

2) 单个链路的路由:如果某个卫星在某个时刻的条件下,对外只有一条链路,这样的条件下别无选择,采取的策略应该是“尽快传输”,将需要发送到其他卫星的信息通过星间激光通信链路发送出去。

3) 多条链路的路由:在某个卫星对其他相邻卫星具有多条链路的情况下,需要通过网络空间地址判断信息需要传送的地理区域,然后确定需要传送的方向,在中间的多个连接链路中,遵循同样的原则,渐进地逼近到达的用户端。

一种设想的空间网络地址编址方式如图 7 所示。

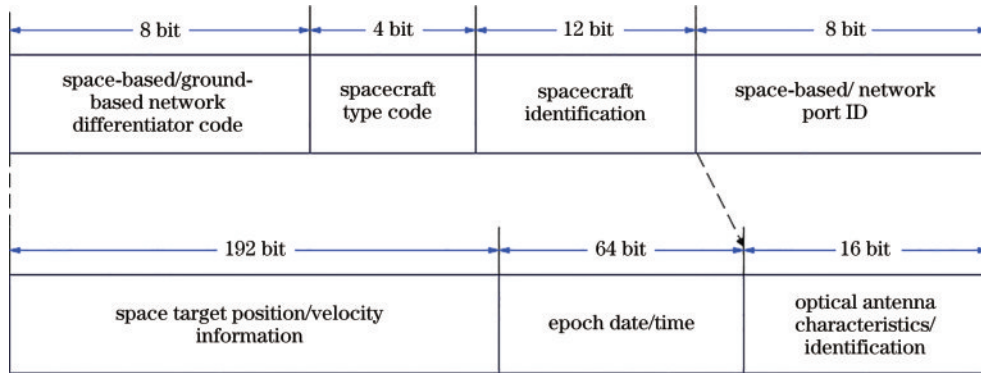


图 7 卫星互联网空间网络地址编址示意图

Fig. 7 Satellite internet space network address addressing diagram

## 6 结束语

卫星互联网的传输与交换路由问题,是卫星互联网尤其是低轨卫星互联网发展的一个极为关键的技术问题,本文结合自己的研究和思考,从宏观上论述这一问题,以起抛砖引玉之效。目前,卫星互联网作为一种新兴的技术趋势,处于蓬勃发展过程。同时,光相控阵技术也得到了快速发展。美国和欧洲都在积极研发自适应光学终端,这些终端能够在不同卫星互联网系统之间无缝建立激光通信链路。这一进步为卫星互联网注入了新的活力,并推动了激光通信链路的建立过程变得更加灵活和迅速。此外,路由选择的复杂性也随着增加,这将进一步促进星间激光通信链路技术的进步和发展。

### 参 考 文 献

- [1] 曾智龙, 刘兴, 孙晖, 等. 空间激光通信最新进展及发展建议[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 1-5.  
Zeng Z L, Liu X, Sun H, et al. Latest developments of space laser communications and some development suggestions[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(6): 1-5.
- [2] 李锐, 林宝军, 刘迎春, 等. 激光星间链路发展综述: 现

状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 20220393.

Li R, Lin B J, Liu Y C, et al. Review on laser intersatellite link: current status, trends, and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 20220393.

- [3] 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): 64-65.  
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):64-65.
- [4] Seas A, Robinson B, Shih T, et al. Optical communications systems for NASA's human space flight missions[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 111800H.
- [5] 徐常志, 靳一, 李立, 等. 面向 6G 的星地融合无线传输技术[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(1): 28-36.  
Xu C Z, Jin Y, Li L, et al. Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(1): 28-36.
- [6] 孟佳成, 谢宁波, 白兆峰, 等. 面向卫星互联网的星载光交换技术[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(2): 47-55.  
Meng J C, Xie N B, Bai Z F, et al. Spaceborne light switching technology for satellite Internet[J]. World Integrated Information Network, 2022, 3(2): 47-55.