

面向星地融合的激光通信：研究现状、关键技术与未来展望

袁仁智¹, 郭 嘉¹, 姚海峰^{2,3}, 陈之北¹, 李玉钗¹, 孙耀华¹, 彭木根¹

(1.北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876;

2.北京理工大学光电学院, 北京 100080;

3.空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130000)

摘 要: 卫星激光通信利用波长更短的激光作为信息载体进行数据传输, 能够实现比射频通信更高的传输速率; 光波段的频谱资源丰富, 具备比射频通信更大的带宽; 此外, 激光束的高度定向性和窄波束特性使激光难以被拦截和窃听。卫星激光通信凭借高速率、高带宽、高安全性以及频谱资源丰富等特点, 已成为6G星地融合网络发展的重要支撑技术。总结面向星地融合的激光通信国内外研究现状, 重点分析卫星激光通信瞄准捕获跟踪、调制与编码、交换与路由以及激光与射频协作等关键技术, 并展望相应关键技术的未来发展方向, 为我国未来研究和发​​展面向星地融合网络的激光通信技术提供参考。

关键词: 星地融合网络; 卫星激光通信; 激光与射频协作

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024037

Laser Communications for Satellite-Terrestrial Integration: Research Status, Key Technologies, and Future Prospects

YUAN Renzhi¹, GUO Jia¹, YAO Haifeng^{2,3}, CHEN Zhibei¹, LI Yuchai¹, SUN Yaohua¹, PENG Mugen¹

1. Beijing University of Posts and Telecommunications, the State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing 100876, China

2. Beijing Institute of Technology, School of Optics and Photonics, Beijing 100080, China

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Space Optoelectronic Technology, Changchun 130000, China

Abstract: Satellite laser communication uses laser with shorter wavelength as the information carrier for data transmission, which can achieve a higher data transmission rate than RF communication. With an abundant spectrum resource of in optical band, the laser communication has a larger bandwidth than RF communication. Besides, because of the highly directional and narrow beam characteristics of the laser beam, it is difficult to intercept and eavesdrop the laser links. Satellite laser communication, with its characteristics of high speed, high bandwidth, high security, and abundant spectrum resources, has become an important supporting technology for the development of future 6G satellite-terrestrial integration networks. This paper summarized the current research status of laser communication for satellite-terrestrial integration both domestically and internationally, with a focus on key technologies such as satellite laser communication pointing, acquisition, and tracking, modulation and coding, switching and routing, and laser-radio frequency cooperation. The future development directions of corresponding key technologies were also discussed, provided direction reference for future research and development of laser communication technology for satellite-terrestrial integration networks in China.

Keywords: satellite-terrestrial integration network, satellite laser communication, laser-radio frequency cooperation

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB2902603); 国家自然科学基金资助项目 (No. 62201075, No. 62105029)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2902603), The National Natural Science Foundation of China (No. 62201075, No. 62105029)

0 引言

传统卫星通信链路以射频技术为主，6G对星地融合网络的高速率与高带宽要求，使频谱资源丰富的卫星激光通信技术逐渐成为未来卫星通信网络的主流技术方案之一^[1-3]。相比卫星射频通信技术，卫星激光通信具有更高的传输速率、更大的信道带宽以及更好的链路安全性。例如，为降低太阳背景噪声和太阳散射对激光链路的影响，当前卫星激光通信技术多采用750~3 000 nm波段的近红外光为信息载体，相对卫星射频波段采用30 mm~3 m波段的电磁波，卫星激光通信技术理论上能够获得3个数量级左右的速率和带宽优势。同时，相比射频通信终端，激光通信终端还具备体积小、重量轻、功耗低等优势，更符合当前各国对低轨卫星通信终端的要求。因此，国内外各星座都已将激光通信作为星间链路的核心传输方式之一，激光通信技术已经成为各国发展卫星通信网络的重要技术方向。

近年来，卫星激光通信技术的发展已将星地融合网络建设提上日程。当前卫星激光通信网与地面光纤通信核心网和射频无线接入网在通信信道、信号体制、收发机形态、拓扑动态结构等方面都存在巨大差异，这就必然导致未来星地融合组网面临诸多挑战。图1为典型的星地融合网络，星间通信通常采用激光链路，星地通信可灵活采用激光链路和射频链路，高轨（GEO）卫星和中轨（MEO）卫星多承担数据中继任务，低轨（LEO）卫星与地面距离近，多承担与地面站、空中载具以及地面用户等的直接通信任务。激光通信的窄波束特性导致激光链路的建立难度相比射频链路大得多，因此需要配合更复杂的瞄准捕获跟踪（PAT）系统。同时，卫星的高速移动特性要求星间与星地链路具备快速建链能力，这又增大了对激光通信PAT系统的要求，未来大规模低轨卫星组网的发展趋势将进一步对PAT系统的高效性提出挑战。此外，当前各国各机构的卫星激光通信研究相对独立，系统采用各种不同的调制与编码方式，而星地融合趋势必将要求卫星激光通信的调制方式具备更好的可扩展性以及地面通信网络的兼容性。因此，设计可拓展和兼容性更高的调制与编码体制也将是未来星地融合趋势下卫星激光通信面临的重要挑战。最后，激光链路在星地通信场景中易受大气湍流、云层衰减等因素影响，未来星地融合网络中的星地链路仍需部分依赖传统射频通信技术。因此，相对低速的星地射频链路如何与相对高速的星间激光链路交换数据以及星地链路本身完成激

光链路与射频链路的协作，将成为未来发展星地融合网络时需解决的重要挑战。

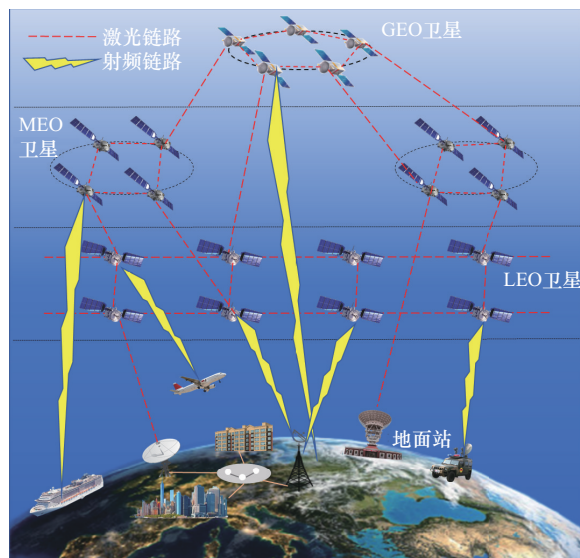


图1 典型的星地融合网络

1 卫星激光通信研究现状

1.1 国外卫星激光通信研究现状

1.1.1 美国

美国自20世纪60年代开始研究卫星激光通信技术^[1]，并于70年代末设计出世界上第一个空间光通信实验终端。近年来，美国官方针对卫星激光通信技术的研究主要由NASA主导。NASA于2013年完成了月球激光通信演示验证（LLCD）项目，在月球探测器和地面通信基站之间进行了激光通信实验，最远通信距离接近40万千米，最高上下行速率分别为20 Mbit/s和622 Mbit/s^[4]。2015年，NASA的光通信与传感演示验证（OCSD）项目利用小型卫星完成了星地激光通信，证明了小体积小质量卫星进行卫星激光通信的可行性。2021年，NASA开展了激光通信中继演示验证（LCRD）项目，完成GEO与地面激光通信链路演示验证，采用BPSK调制，通信速率达到1.244 Gbit/s，为建立下一代跟踪与数据中继卫星提供参照^[5]。2022年，NASA搭载太字节红外传输（TBIRD）载荷的小型立方体卫星实现了与小型地面终端的激光通信，速率达200 Gbit/s。同年11月，NASA的深空光通信（DSOC）项目利用Psyche航天器实现了1 600万千米的深空-地球激光通信实验。此外，NASA正在推进的阿耳忒弥斯二号光通信（O2O）项目计划实现地面站与月球轨道上的猎户座飞船之间的双向激光通信，该飞船预计于2025年发射。

在商业卫星激光通信方面,美国SpaceX公司的“Starlink”项目采用星间激光链路组建低轨卫星星座^[6]。2021年1月发射的“星链”卫星已开始搭载激光通信载荷,其星间信息传输速率在100 Mbit/s以上。SpaceX公司计划在每颗“星链”卫星的前、后、左、右分别搭载一个重量为1.5 kg、用于与附近的卫星进行通信的激光通信载荷。截至2023年年底,SpaceX公司的在轨低轨卫星已超5 000颗,星座中有超过9 000个激光通信终端。

1.1.2 欧洲

欧洲的卫星激光通信研究主要由欧洲航天局(ESA)负责。20世纪80年代中期,ESA发布半导体卫星间链路实验(SILEX)项目。2001年,ESA的SPOT-4卫星与ARTEMIS卫星实现了世界上首次LEO与GEO卫星之间的激光通信传输^[7]。ESA随后推出了欧洲数据中继系统(EDRS),首个激光通信中继载荷EDRS-A于2016年1月搭载“欧洲通信卫星”进入地球静止轨道,星间传输速率可达1.8 Gbit/s,能够连接轨道高度600~800 km的低轨卫星与地球同步轨道卫星,整个PAT系统的链路建立时间小于55 s,并能够在7.8 km/s的相对速度下保持连接。EDRS-A载荷实现在轨服务是近年来欧洲航天技术快速发展的一个重要里程碑,标志着空间激光通信从在轨演示验证阶段迈入了工程化应用阶段。2019年,EDRS-C成功发射到地球静止轨道,采用BPSK调制实现GEO-GEO激光链路相干通信,速率达1.8 Gbit/s。此外,ESA预计于2025年补充发射第3颗卫星EDRS-D,其有效载荷将由3个下一代激光通信终端(LCT)组成,以允许EDRS-D与多颗卫星同时通信。

在商业卫星激光通信方面,2020年,俄罗斯MOST-COM公司研发的SOT-90/150激光终端可用于50 000 km的最高10 Gbit/s的高速星间激光通信,并考虑了量子密钥分发,引入了视频监控系统。2021年,德国TESAT公司开发的LCT135激光终端被用于地球同步卫星轨道中,通信速率可达1.8 Gbit/s。在小卫星领域,由德国的TESAT公司研发的TOSIRIS和CubeLCT终端分别可以以10 Gbit/s或100 Mbit/s的速率对地面站传输数据,其中TOSIRIS的重量仅为8 kg,CubeLCT的重量仅为0.397 kg。

1.1.3 日本

日本卫星激光通信研究主要由邮政部通信研究办公室(CRL,现更名为NICT)和空间开发公司(JAXA)主导。2005年,JAXA研发的OICETS卫星和ESA的ARTEMIS卫星进行了首次星间双向光通信实验^[8]。2014年,NICT研发的小型光发射模块(SOTA)可装载在微型卫星

上,可在1~10 Mbit/s的通信速率。2018年,NICT与日本东北大学联合研制的超小型光发射模块(VSOTA),重量小于1 kg,功耗低于10 W,通信距离小于2 000 km,速率在0.1~10 Mbit/s。2020年,日本发射日本数据中继卫星(JDRS),该卫星在地球同步轨道运行,为情报采集卫星(IGS)提供数据中继服务,星间链路传输速率达1.8 Gbit/s^[9]。此外,为促进下一代卫星激光通信技术研究,NICT启动了先进激光仪器高速通信(HICALI)项目,目标是实现10 Gbit/s的高数据率激光通信。

1.2 国内卫星激光通信研究现状

2011年,哈尔滨工业大学研制的激光通信终端由“海洋二号”卫星搭载升空,是国内首次星地激光通信实验,可以实现星地间2 000 km距离、最高504 Mbit/s速率的通信传输^[10]。2016年,中国科学院上海光学精密所等研制的激光通信终端由“墨子号”量子卫星搭载升空,完成了我国首次相干通信体制的星地激光通信验证,实现星地间1 200 km距离、下行5.12 Gbit/s、上行20 Mbit/s速率的通信传输,具备视频及图片的传输能力^[11]。同年,“天宫二号”空间实验室搭载的激光通信终端完成与新疆南山地面接收站之间的通信实验,该终端采用强度调制/直接检测(IM/DD)通信体制,实现星地1.6 Gbit/s速率的通信传输,本次实验还首次完成了白昼激光通信,可实现白昼激光跟踪能力与夜间相近。

2017年,“实践十三号”卫星搭载哈尔滨工业大学研制的激光通信终端升空,该终端利用IM/DD通信体制,实现同步轨道卫星与地面间45 000 km距离、5 Gbit/s速率的高速通信传输^[12]。2019年,“实践二十号”顺利入轨,该终端搭建了国际首个QPSK相干体制星地激光链路,通信速率达到10 Gbit/s,各项指标位于国际先进水平^[13]。2020年,“行云二号”01星和02星搭载物联网星间激光通信载荷升空,该终端是LaserFleet公司研制的一款紧凑型激光通信终端,可实现不少于3 000 km距离、100 Mbit/s速率的通信传输,该项目是我国首次低地激光通信实验验证^[14]。2023年,中国科学院空天信息创新研究院自主研制的500毫米口径激光通信地面系统与长光卫星技术股份有限公司所属“吉林一号”MF02A04卫星开展了星地激光通信试验,通信速率达到10 Gbit/s。

2 面向星地融合的激光通信关键技术与未来展望

2.1 卫星激光通信瞄准捕获跟踪技术

2.1.1 概述

由于卫星激光通信的激光波束宽度较窄,能量基本

集中在传输方向上，同时卫星激光通信需保持发射端波束和接收端视场在一条直线上以实现稳定高速的数据传输。因此，卫星激光通信中收发端需要通过PAT技术来建立并动态维持视距链路。下面以LEO-GEO链路的双向捕获方式为例简要说明PAT建链过程。在瞄准阶段，LEO和GEO均根据星历与自身轨道姿态信息调整自身发射天线视轴对准对方所在方位。在捕获阶段，LEO在事先设置的捕获不确定域内扫描，GEO探测到对方信标光后，根据信标光探测角误差和超前瞄准角等信息调整自身天线视轴指向LEO并向LEO发射信标光；随后LEO根据接收信标光的探测角误差和超前瞄准角等信息调整自身天线视轴指向GEO；双方均捕获到对方信标光后，均根据自身探测到的信标光角度误差微调视轴指向，最终实现稳定的双向捕获状态。在跟踪阶段，双方将目标引入跟踪探测器视场，完成捕获状态向跟踪状态的切换，并根据四象限探测器等误差信号对跟踪进行点校正，实现稳定的跟踪状态。

典型的PAT系统发射端/接收端示意如图2所示，由跟瞄系统和通信子系统组成。发射端发射光信号时，由于两终端相距很远且相对运动速度大，在光束的传播时间内两终端相对运动的角度不能忽略，在瞄准过程中需采用超前瞄准指向机构快速反射镜(FSM)来进行对发射光束的超前校正，以补偿相对运动引起的对准偏差。接收端接收光信号后，先利用粗瞄结构完成较大范围的扫描捕获过程。粗跟踪闭环稳定工作后，精跟踪启动，当精瞄探测器探测到对方光束后，将光斑在精瞄探测器上的位置信号传输至精瞄控制器，控制精瞄指向机构偏转，使得光斑位置尽可能靠近精瞄探测器中心，以实现稳定的跟踪控制。

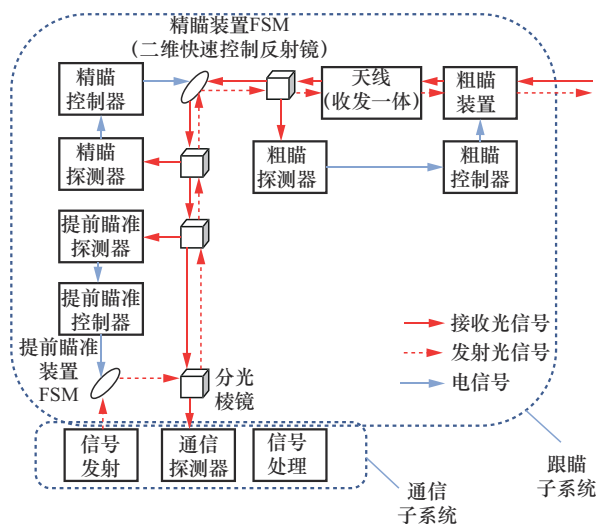


图2 典型的PAT系统发射端/接收端示意

根据工作原理，PAT机制可分为基于云台的、基于反射镜的、基于云台-反射镜混合的、基于自适应光学的、基于液晶的、基于射频(RF)-自由空间光通信(FSO)混合的以及其他PAT机制^[15]。基于云台的PAT机制使用由电机控制的机械旋转云台，电动平台提供两轴或三轴移动能力的万向节^[16]。基于反射镜的PAT机制使用快速反射镜来执行光束PAT。基于云台-反射镜混合的PAT机制采用云台和快速反射镜串联来执行粗跟踪和精跟踪。自适应光学是一项应用于天文望远镜的技术，它利用波前传感器对大气湍流中光波的波前畸变进行校正^[17]。基于液晶的PAT机制使用非机械的精细光束导向装置，该装置由数万个细长电极组成的一维阵列组成，以操纵光束的振幅或相位模式^[18]。基于RF-FSO混合的PAT机制是在可能导致通信收发器之间的光链路暂时中断的情况下，可以使用射频信号作为辅助链路，在光通信链路断开时继续发送信号信息。

2.1.2 PAT技术研究展望

卫星激光通信终端今后的主要发展方向是小型化和轻量化，以往的宽信标（信标光发散角在数百微弧度量级）捕获跟踪技术，由于终端组成复杂和功耗大，已经很难满足上述要求。而在卫星光通信链路中采用窄信标（也称为无信标，信标光与信号光复用，发散角在50微弧度左右）进行双向捕获跟踪，可实现终端小型化，符合卫星激光通信终端的发展方向。但由于卫星光通信链路距离长、光束散角小和能量受限，同时存在相对角运动、卫星平台振动等因素的干扰，采用窄信标进行捕获跟踪成为PAT技术发展的重要挑战。近年来，针对PAT技术的研究可大致分为结构创新与算法改进两方面。在结构创新方面，通过引入基于液晶材料的光学相控阵技术，去除了传统机械控制和调整结构，能够实现体积功耗更小的PAT系统，完成激光链路的快速切换和调整。然而，当前基于液晶材料的光学天线仍受制于光学液晶材料自身的低控制精度和小偏转角度，后续仍需在材料性能和结构设计上进一步实现突破。在算法改进方面，通过引入神经网络等机器学习方法，改进探测器的跟踪精度，并可进一步引入强化学习等方法，优化捕获策略。总之，对于PAT技术的研究应以研制轻量化、小型化和低功耗的激光通信终端为发展方向，不断突破技术瓶颈，提高PAT系统性能。

2.2 卫星激光通信调制与编码技术

2.2.1 概述

卫星激光通信采用的调制方法可分为非相干调制和

相干调制两大类。不同于射频通信的接收机,激光通信系统采用的光接收器一般仅能响应光强变化。因此,激光通信采用的调制技术大多采用非相干调制方式,其中最常用的为强度调制/直接检测方式。卫星激光通信常用的非相干调制方式包括开关键控(OOK)和脉冲宽度调制(PPM)。OOK调制技术是激光通信系统中最简单的技术,将输入的信息序列直接调制为输出光源的强度,即通过有无信号传输来进行二进制传输。但是OOK调制存在能量效率低、频率利用率低等问题。在对带宽要求不高的激光链路中,可以适当通过降低脉冲幅度来节省系统的功率开销。PPM利用脉冲的位置来表示数字信息,不同位置的脉冲代表不同的数字值。尽管PPM的带宽资源利用率低,但PPM特别适用于速率要求不高但平均激光探测功率受限的情形,随着单光子探测器的广泛运用,进一步提升了PPM的适用范围,例如地月激光链路和深空激光链路。

相干调制采用相位调制与相干检测方式,需要引入本振激光,其接收结构相对复杂,但接收灵敏度高,相比非相干调制能够支持更高的通信速率。卫星激光通信常用的相干调制方式包括差分相移键控(DPSK)、二元相移键控(BPSK)和正交相移键控(QPSK)。DPSK利用码元之间的相位差来传递信息,其接收机设计简单,抗背景干扰能力强,但灵敏度略差。BPSK调制利用相差 180° 的二元相位传递信息,该调制方式具有较高的灵敏度和非常强的抗背景噪声能力。QPSK是基于四进制的相位调制方式,相比BPSK能够提供更快的通信速率,同时灵敏度与BPSK相近,但对接收信噪比要求更高。此外,由于现有地面光纤通信设备大多支持QPSK调制,采用该调制方式能够兼容大多数地面光纤通信器件,有利于降低研发成本。

卫星激光通信距离远,光强衰减严重,同时星地激光链路易受大气因素影响,而现有卫星通信激光功率受限,难以通过不断提高激光发射功率来提升接收信噪比。因此,为对抗信道衰减和大气湍流衰弱等效应,激光通信需要采用卷积码、Turbo码、LDPC等前向纠错码(FEC)降低系统突发误码率,并采用深交织编码等编码方法降低大气湍流引起的衰落影响、减少长片误码干扰。此外,由于卫星通信链路容易发生中断,还需要引入自动请求重发(ARQ)协议以保障链路的可通性。

2.2.2 研究展望

激光在星地传输过程中,大气湍流对通信系统的影响是最大的。目前高码率的调制技术、高性能的信道编

码技术、大孔径接收技术、自适应光学技术等是星地链路中常用的抗湍流干扰技术^[19]。近年来,一些新的信道估计方案被提出以解决大气湍流带来的影响。例如,2024年,Zhou等^[20]提出了一种新的基于元学习的信道估计方案,该方案基于神经网络的信道估计器输出信道参数,并利用元学习来提高其收敛速度和对新环境的适应性。此外,利用新的涡旋光等新型激光光源来遍历平均各个尺度的湍流影响也是当前研究星地激光通信抗湍流技术的重要方向。

面向未来星地融合的网络发展趋势,当前卫星激光通信调制与编码方式的研究可从以下3个方面进行探索。第一,进一步研究更高效、更可靠的调制与编码技术,以满足未来星地融合网络的高通信带宽和高传输质量要求。例如,Sarangal等^[21]研究了基于置换矩阵零相互关联码的非相干频谱-振幅编码-光码分多址(SAC-OCDMA)系统。Wang等^[22]提出了一种基于指数威布尔分布模型的正交频分复用多输入多输出-空频块编码(MIMO-SFBC)系统,用于卫星激光上行链路和下行链路通信。第二,可采用全光处理结构摆脱传统激光调制方法对电学采样和处理速率的依赖。例如,Lin等^[23]在不使用数字信号处理(DSP)结构的情况下,实现了一种基于光子的多输入多输出卫星激光通信光子预编码。第三,为适应星地融合网络的发展需求,未来卫星激光通信的调制与编码体制还需考虑与现有地面和卫星通信网络的兼容性问题,在系统设计中考虑多调制体制融合的技术方案。

2.3 卫星激光通信交换与路由技术

在卫星激光通信网络中,存在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。

2.3.1 卫星激光通信交换技术

目前,星上光交换可根据交换粒度不同分为光电路交换(Optical Circuit Switching, OCS)、光分组交换(Optical Packet Switching, OPS)和光突发交换(Optical Burst Switching, OBS)3种交换技术^[24]。

OCS技术是传统电路交换技术的光学实现,它在交换节点之间预先建立一个固定的光学路径,类似于语音网络中的电路交换,其原理如图3所示。OCS技术通过光开关在源节点和目的节点之间建立一条光路,一旦光路建立,数据可以光速传输,因此时延很低,适合长时间、大量数据传输。但OCS光路的带宽资源需要完全预留,

如果没有数据传输,带宽资源将被浪费,导致OCS技术资源利用率低,灵活性差。

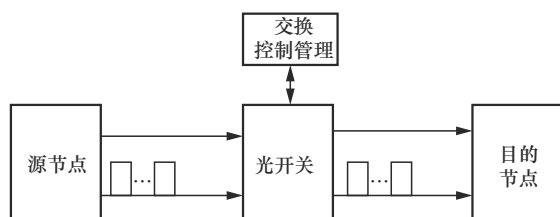


图3 OCS技术原理

OPS技术是一种基于分组的交换技术,如图4所示,类似于传统的电分组交换。数据被划分成小的分组,每个分组包含一个头部和数据载荷,头部包含用于路由和交换的信息。每个分组在网络中独立交换,节点根据头部信息动态决定分组的路径。OPS利用高速光开关技术在节点处进行实时分组交换,实现高效的数据传输。其优点是灵活性高,资源利用率最大化,适合多样化和高动态的数据流。但OPS技术实现复杂,光分组交换需要高度精确的同步和控制机制,可能引入较高的时延和抖动。

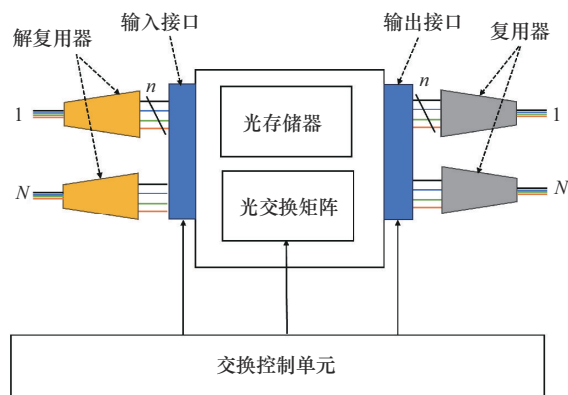


图4 OPS技术原理

OBS技术结合了OCS和OPS的优点,旨在提高网络的利用率和灵活性。OBS技术原理如图5所示。在OBS技术中,基本交换单元称为突发包,每个突发包分为控制分组和突发数据。突发数据分组交换传输完全在光域内完成。每个突发数据包都会对应一个控制包,用于预先配置路径。这些控制包在突发数据包到达之前,提前为突发数据包预留资源。与OCS技术不同,OBS技术不需要为每个通信会话建立和释放光路,而是按需配置路径,数据传输结束后光路自动释放。因此OBS技术的资源利用率较高,适合大数据量传输和低时延小命令传

输,并且能够满足高传输吞吐量需求,但是需要复杂的控制机制,可能引入较高的突发时延,无法进行实时传输。

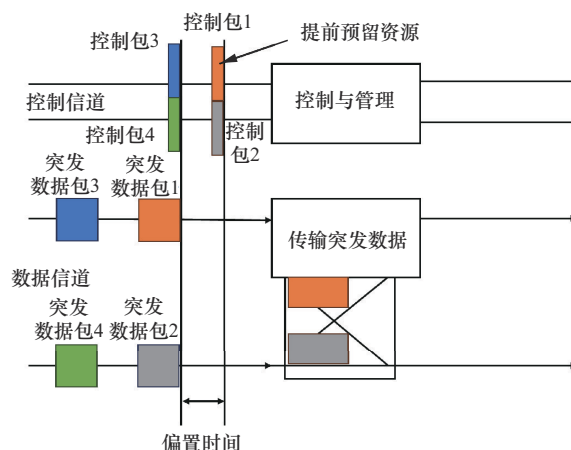


图5 OBS技术原理

2.3.2 卫星激光通信路由技术

在卫星激光通信网络中,信息需要在多个节点之间传输,这需要路由策略来确定数据的传输方向,以确保端到端的可靠通信。由于卫星通信网络具有复杂的拓扑结构和动态变化的特点,传统的静态路由算法已不适用于卫星激光通信网络^[25]。为了解决这一问题,需要使用能够维护和更新路由表的动态路由算法。根据路由决策主体的不同,卫星路由算法可以分为集中式、分布式和混合式3种^[26]。

集中式路由算法由一个中心节点负责整个网络的路由计算和维护,能够实现较好的流量分配和负载均衡,但运算复杂度高,对中心节点的要求高,如果中心节点或链路故障则会影响网络性能。分布式路由算法中,每个卫星节点独立进行路由决策,灵活且具有自适应能力,但缺乏全局视角,可能导致整体路由选择不是最优,并增加信令开销。混合式路由算法结合集中式和分布式的优点,一部分节点采用集中式路由,其余节点采用分布式路由,实现全局优化和负载均衡的同时提高网络灵活性,但设计和实现复杂,需要协调和平衡集中式与分布式策略。

2.3.3 研究展望

未来,卫星激光通信交换与路由技术的研究将集中在以下几个关键领域。首先是自适应路由算法的开发,这些算法能够适应动态网络拓扑变化,根据卫星节点的位置和链路状态实时调整路由策略,从而提高通信的可

靠性和效率。其次,多层次网络架构的构建也是一个重要方向,通过整合地面站、LEO 卫星、MEO 卫星和 GEO 卫星,利用不同轨道高度卫星的特点来优化路由和交换。与此同时,可利用机器学习和人工智能技术开发智能化路由算法,通过数据分析和预测动态调整网络配置和路由策略,以提升网络整体性能。此外,还需要加强安全性研究,开发卫星激光通信的安全路由协议,防范网络攻击和数据窃取,保障通信数据的安全性和完整性。最后,未来的卫星交换节点将能够处理各种类型的数据流,包括实时视频、传感数据和大规模数据,并且研究星间光电混合交换技术,不仅可以利用光交换的超高速传输特性,还可以同时保留电交换在复杂处理和控制方面的优势,这种多颗粒度、光电混合的交换技术将显著提升卫星通信网络的性能和灵活性。

2.4 卫星激光与微波链路协作技术

卫星激光与微波链路协作技术^[30]是为了适应大容量数据传输需求,通过在卫星互联网的骨干网络中采用激光通信链路,并与地面用户的微波通信链路有效结合,实现高效、可靠的通信服务。由于激光具有高带宽、低功耗和强方向性的特点,因此星间链路采用激光通信可以大幅提高数据传输容量和速度,构成卫星互联网的核心网部分。因为微波信号受大气效应的影响较小,能提供稳定的通信服务,所以地面用户通信大多采用微波通信链路。为了实现星间激光链路与地面微波链路的有效协作,主要面临以下两个核心问题:一个是汇聚与分发问题,当地面用户通信对象超出本卫星覆盖范围时,需要将通信信号转换到星间激光通信链路进行远距离传输;

另一个是光电混合交换问题,在卫星节点处,需要将来自地面微波链路的低速率数据码流转化为适合激光通信的高速率数据码流,反之亦然。

2.4.1 光电混合交换技术

为了在卫星节点对业务进行有效的疏导与聚合,微波光子学技术被广泛应用。这种技术能够在光域和电域之间实现高效的信号转换和处理。从微波链路到激光链路的切换需要汇聚处理,低速率数据码流经过时钟序列恢复处理单元,变成由时钟控制的信号,信号经过码型转换单元,以时间间隔 τ 进入光合路单元,输出高速率数据码流。从激光链路到微波链路的切换需分发处理,高速率数据码流在目的节点被光分路单元分成多路光信号,每路光信号经过间隔为 τ 的延时处理,当第一路的第一个数据业务到达时,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,实现降速处理。光电异构电路如图 6 所示^[27]。

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。光交换是利用成熟的光交换技术进行高速光信号的路由和转发。射频交换用来处理微波信号,主要用于地面用户的接入和传输,分组交换适用于 IP 分组、以太网帧等业务的灵活处理。通过光电混合交换,可以节省分组交换和电路交换端口,减小总的交换容量,提高资源利用率,并且能够同时处理不同速率、不同格式的业务数据,适应多样化的通信需求。

目前光电混合交换的研究主要集中于数据中心网络

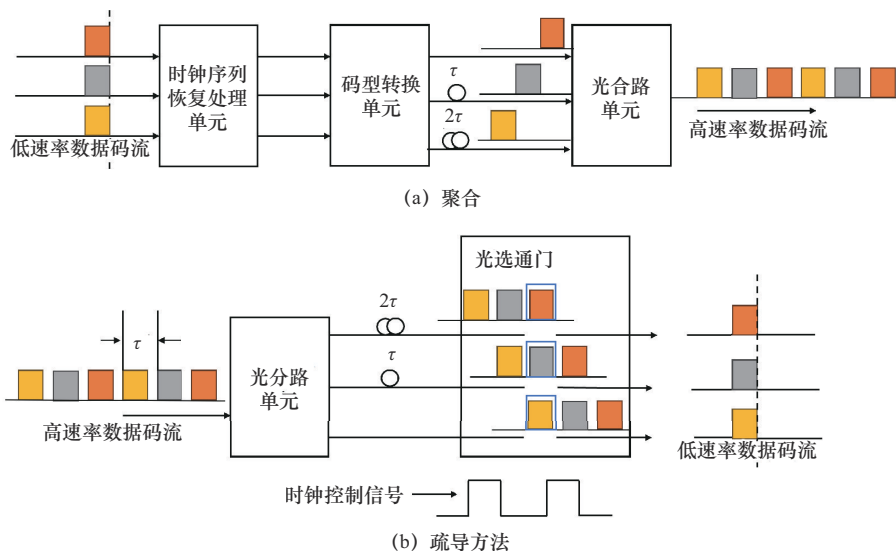


图 6 光电异构电路

(DCN) 和分组增强型光传输网 (POTN)。在 DCN 中, 光电混合交换技术可以实现高效的数据传输和交换, 满足大数据处理和高速互联的需求。在 POTN 中, 光电混合交换技术提供了高灵活性和高可靠性的传输解决方案, 能够支持多种业务类型的传输和交换。

2.4.2 激光微波混合传输

激光微波混合传输技术的核心思想是通过在激光链路连接的两个节点间建立额外的微波链路, 以在天气恶劣时使用微波链路进行辅助传输, 从而保障节点间通信的不间断^[28]。激光通信系统在天气良好时能提供高带宽的无线传输, 但在雾、雨等恶劣天气条件下, 激光链路的可用性会受到严重影响。为了提高通信的可靠性, 可以在激光链路的基础上添加微波链路作为备份, 从而实现混合传输系统。

在激光微波混合传输系统中, 数据的分配是根据传输需求和链路状态进行的。通常情况下, 高速、大容量的数据通过激光链路传输, 而需要高可靠性和全天候传输的数据通过微波链路传输。当激光链路受到天气或其他环境因素影响时, 系统会自动将数据切换到微波链路上, 确保通信的连续性和稳定性。这种混合传输方式使得整个通信系统具备更高的可靠性。此外, 为了实现高效的数据传输, 激光微波混合传输系统需要实时监控链路状态, 并根据情况调整数据分配策略, 最大化利用链路资源, 提升传输效率。激光通信和微波通信在不同的频谱范围内工作, 互不干扰, 可以实现频谱资源的高效利用。通过结合激光和微波两种链路的优势, 可以实现更大的传输带宽和更大的数据容量, 增强系统的可靠性, 确保通信的连续性和稳定性。

3 结束语

未来, 卫星激光与微波链路协作技术的研究将着重于以下几个重要领域。一是设计支持激光和微波通信的融合通信协议, 确保在不同链路之间的平滑切换和协作, 从而提供统一的通信服务。二是研究基于多模传输的技术方案, 实现激光和微波通信的协同工作, 以提高通信的鲁棒性和可靠性。三是利用人工智能技术, 根据实时通信环境和链路状态动态选择最佳通信链路, 可以显著提高通信效率和服务质量。四是研究节能高效的协作通信策略, 这将有助于延长卫星系统的使用寿命和运行时间。五是在激光微波混合传输技术的基础上, 研究有效的光束整形和自适应光学技术, 减小激光链路受到的天气和大气扰动的影响。

参考文献

- [1] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [3] 蒋瑞红, 冯一哲, 孙耀华, 等. 面向低轨卫星网络的组网关键技术综述[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 37-47.
JIANG R H, FENG Y Z, SUN Y H, et al. A survey on networking key technologies for LEO satellite network[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 37-47.
- [4] TOYOSHIMA M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 693-699.
- [5] MITCHELL J. NASA optical communications update[Z]. 2022.
- [6] YADAV A, AGARWAL M, AGARWAL S, et al. Internet from space anywhere and anytime - starlink[J]. SSRN Electronic Journal, 2022.
- [7] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[Z]. 2002.
- [8] JONO T, TAKAYAMA Y, KOYAMA Y, et al. In-orbit test results of the inter satellite laser link by OICETS[J]. AIAA, 2007.
- [9] SATOH Y, MIYAMOTO Y, TAKANO Y, et al. Current status of Japanese optical data relay system (JDRS)[C]//2017 IEEE ICSOS. [S.l.:s.n.], 2017.
- [10] 吴应明, 刘兴, 罗广军, 等. 空间光通信网络技术的研究进展及架构体系[J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 46-49.
WU Y M, LIU X, LUO G J, et al. Research progress and structure system of space optical communication network technology[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(11): 46-49.
- [11] GAO S J, WU J B. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1171-1181.
- [12] 王旭. 实践十三号卫星成功发射 开启中国通信卫星高通量时代[J]. 中国航天, 2017(5): 13.
WANG X. Practice the successful launch of the 13th satellite and open the Qualcomm era of China communication satellite[J]. Aerospace China, 2017(5): 13.
- [13] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. 国际太空, 2020(7): 38-41.

- CUI Y, TANG Y. Practicing that the on-orbit core test of the No.20 satellite has been completed[J]. Space International, 2020(7): 38-41.
- [14] 高世杰, 吴佳彬, 刘永凯, 等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171-1181.
- GAO S J, WU J B, LIU Y K, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1171-1181.
- [15] KAYMAK Y, ROJAS-CESSA R, FENG J H, et al. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1104-1123.
- [16] KINGSBURY R, NGUYEN T, RIESING K, et al. Fast-steering solutions for cubesat-scale optical communications[Z]. 2017.
- [17] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A. Free-space laser communications with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2004, 1(4): 355-379.
- [18] WANG X H, WANG B, POUCH J, et al. Liquid crystal on silicon (LCOS) wavefront corrector and beam steerer[C]//Proceedings of the Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications. SPIE, 2003: 139-146.
- [19] 彭小平, 郑建生. 星地激光通信链路抗湍流干扰技术研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(12): 47-50.
- PENG X P, ZHENG J S. Study on technologies of combating turbulence interfering in satellite-ground laser communication links [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(12): 47-50.
- [20] ZHOU X L, LIN Z L, GU R S, et al. A new meta-learning framework for estimating atmospheric turbulence and phase noise in optical satellite Internet of Things systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(7): 11190-11201.
- [21] SARANGAL H, SINGH A, MALHOTRA J, et al. Performance investigation of PM-ZCC code in hybrid SAC-OCDMA system through inter-satellite OWC channel[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 120(4): 3329-3341.
- [22] WANG H B, WANG Y, WANG Q Q. Research on the performance of multiple-input/multiple-output space-frequency block coded system with exponential Weibull distribution in the satellite laser communication[J]. Optical Engineering, 2022, 61(8).
- [23] LIN T, YU H Y, ZHAO S H, et al. Photonic pre-coding for MIMO system in satellite-terrestrial communication[J]. IEEE Access, 2020, 8: 40378-40388.
- [24] 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 optical switching technology for satellite Internet[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(2): 47-55.
- [25] FENG X A, SUN Y H, PENG M G. Distributed satellite-terrestrial cooperative routing strategy based on minimum hop-count analysis in mega LEO satellite constellation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(11): 10678-10693.
- [26] 张家铭. 卫星激光通信网络研究进展[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 37-44.
- ZHANG J M. Research progress of satellite laser communication network[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(5): 37-44.
- [27] 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.
- [28] 徐晓帆, 陆洲. 星地激光通信可靠性保障技术研究现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 650-657.
- XU X F, LU Z. Research status of mitigation techniques to assure the reliability of satellite-to-ground laser communications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 650-657.

[作者简介]



袁仁智 (1990-), 北京邮电大学研究员, 主要研究方向为空天地一体化通信等。

郭嘉 (2000-), 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为光网络路由与交换技术等。

姚海峰 (1990-), 北京理工大学光电学院副教授, 主要研究方向为卫星激光通信等。

陈之北 (2001-), 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星激光通信等。

李玉钊 (2002-), 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为光通信与光感知等。

孙耀华 (1992-), 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为星地融合网络和无线算力网络等。

彭木根 (1978-), 北京邮电大学教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化等。