

高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势

张若凡, 张文睿, 张学娇*, 张锦龙, 姜承志, 朱晓程, 裘磊, 汪波, 陈伟军

中国空间技术研究院西安分院, 西安 陕西 710100

摘要 自由空间激光通信技术长期以来都是卫星通信和载荷技术领域的研究热点, 具有大带宽、高速率等特点。高轨中继卫星是星间数据传输的骨干节点, 随着激光通信技术的成熟, 激光通信链路已成为国内外高轨中继卫星数据传输的可靠途径。对国内外高轨卫星激光中继链路的最新发展动态及其未来发展规划进行综述, 该综述为我国建设空间激光信息网络提供参考。

关键词 光通信; 自由空间激光通信; 高轨卫星; 激光中继链路; 激光通信终端

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0500001

Research Status and Development Trend of High Earth Orbit Satellite Laser Relay Links

Zhang Ruofan, Zhang Wenrui, Zhang Xuejiao*, Zhang Jinlong, Jiang Chengzhi,
Zhu Xiaocheng, Qiu Lei, Wang Bo, Chen Weijun

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, Shaanxi, 710100, China

Abstract Free space laser communication technology has been a research hotspot in the field of satecom and payload technology for a long time, with characteristics such as large band width and high speed. High earth orbit relay satellites are the backbone nodes of data transmission between satellites. With the maturity of laser communication technology, laser communication link has become a reliable technical means for data transmission of high earth orbit relay satellites at home and abroad. This paper introduces the latest development trends of high earth orbit satellite laser relay links at home and abroad and its future development plans, which provides a reference for the construction of space laser information networks in China.

Key words optical communications; free space laser communication; high earth orbit satellite; laser relay links; laser communication terminal

OCIS codes 060.2605; 060.1660; 060.1155

1 引 言

中继卫星系统是指利用地球同步轨道(GEO)卫星为高动态、大范围、高速率的各类低轨用户提供数据中继服务的数据传输系统,是建立天基信息网络的重要组成部分。传统的中继卫星系统采用

微波频段(Ka、S等),随着海量数据中继业务需求的增加,传输容量瓶颈难以被突破。空间激光通信具有大带宽、高速率、高保密、体积小等特点,在射频资源紧张、通信速率受限的条件下成为当今空间高速数据传输的首选途径^[1-6]。高轨卫星(GEO)是星间数据中继节点,随着国内外各类天基信息系统的

收稿日期: 2020-05-11; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(62001375)

*E-mail: zxjhope@126.com

建设提速,传输容量需求日益增长。激光通信链路能够充分满足中继卫星的功能要求,是实现高速数据中继业务的可行途径。相比于低轨激光星地链路,高轨激光中继链路能够大幅提高链路可用度、增加可用时长,同时,高轨激光中继链路(包括高轨-高轨、高轨-低轨、高轨-航空飞行器、高轨-地面站等)将成为构建天基信息网络的基石。

自 1994 年日本在 ETS-VI 卫星上搭载 LUCE 激光终端、建立首个 GEO 对地 1 Mbit/s 双向链路以来^[7],空间激光通信技术蓬勃发展,各研究机构广泛开展了相关技术的在轨验证。2001 年,欧空局(ESA)在 SILEX 计划中首次实现了高轨与低轨之间的双向激光链路,速率为 50 Mbps^[8-9];2008 年,美国 NFIRE 卫星与欧洲 TerraSAR-X 卫星的双向激光通信链路首次验证了相干通信体制,速率为 5.625 Gbps^[10];2013 年美国宇航局(NASA)在月地激光通信演示验证(LLCD)项目中首次建立了 622 Mbps 的月地激光通信链路^[11],次年又在

OPALS 项目中实现了 50 Mbps 的空间站对地激光通信;2016 年,ESA 欧洲数据中继系统(EDRS)的首颗正样星发射升空,开始正式提供商用激光数据中继服务,这标志着激光链路已进入业务运营阶段,具有跨时代的重要意义。

本文主要以星间数据传输的骨干节点卫星激光链路为中心,综述国内外高轨卫星激光通信的建链情况、空间激光网络的建设计划及激光终端技术的最新发展动态,分析了激光通信高速率、高可用度、高集成化、网络化的发展趋势。

2 国内外发展现状

国内外历年来具有代表性的高轨卫星激光中继链路技术成果如表 1 所示。表 1 中 PPM 表示脉冲位置调制,IM-DD 表示强度调制-直接检测,BPSK 表示二进制相移键控,QPSK 表示正交相移键控,DPSK 表示差分相移键控,RZ-DPSK 表示归零码-差分相移键控。

表 1 国内外高轨卫星激光链路最新研究成果

Table 1 Recent achievements of GEO laser communication links

Number	Task	Type	Country/ Region	Time	Bit rate	Distance / km	Bit Error	Status
1	Artemis/ SPOT4	GEO-LEO (low-earth orbit)	Europe	2001	2 Mbps@PPM (forward) 50 Mbps@IM-DD (return)	45000	10^{-6}	Experiment
2	EDRS/ Copernics	GEO-LEO	Europe	2013— 2019	1.8 Gbps@ BPSK (two-way)	45000	10^{-11}	
3	Airbus-A310/ EDRS	Airplane-GEO	Europe	2019	1.8 Gbps@ BPSK (uplink)	39000	0.5	In-service
4	SJ-13	GEO-OGS (optical ground station)	China	2017	2.4 Gbps/4.8 Gbps@IM- DD (downlink)	36000	—	
5	SJ-20	GEO-OGS	China	2019	10 Gbps@QPSK (Downlink)	36000	10^{-3}	
6	LCRD	GEO-OGS	US	2020	2.88 Gbps@DPSK (downlink)622 Mbps@ 16PPM (downlink)	38000	—	
7	JDRS/ALOS- 3	GEO-OGS GEO-LEO	Japan	2020	1.8 Gbp@RZ-DPSK (return)50 Mbps@ IM-DD (forward)	45000	—	Prepare to launch
8	HICALI/ CubeSOTA	GEO-OGS GEO-LEO	Japan	2021	10 Gbps (two-way)	45000	—	
9	EDRS-D	GEO-GEO	Europe, Japan	2025	3.6–10 Gbps@BPSK (two-way)	80000	—	
10	ScyLight	GEO-GEO GEO-LEO GEO-OGS	Europe	2025	100 Gbps	80000	—	

2.1 国外典型链路

国外在轨运行的高轨卫星激光链路以 ESA “欧洲数据中继系统(EDRS)”为典型代表^[12]。在研高轨激光中继链路演示验证计划主要包括美国的“激光通信中继演示验证(LCRD)”^[13-14]、日本的“日本数据中继系统(JDRS)”^[15-16]和“高速通信先进激光仪器计划(HICALI)”^[17-18]。国内则以 SJ-13、SJ-20 高轨卫星激光星地链路为代表。

2.1.1 欧洲数据中继系统

目前 EDRS 的 GEO 节点卫星包括 2 颗业务卫星(EDRS-A/轨位 9E 和 EDRS-C/轨位 31E)和 1 颗试验卫星 Alphasat, 低轨用户卫星为地球观测卫星 Copernics。EDRS 是迄今为止唯一在轨商业化运行的激光星间链路, 为低轨航天器用户提供数据中继服务, 示意如图 1 所示。

星上激光终端均由 TESAT 公司研制, 其设计参数如表 2 所示。

星间链路采用同频收发偏振隔离体制和无线

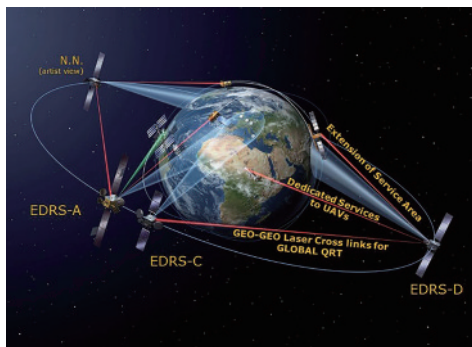


图 1 EDRS 系统示意及轨位^[19]

表 2 TESAT 激光终端(LCT)技术指标

Table 2 Technical indexes of TESAT LCT

Number	Parameter	Specification
1	Bit rate	1.8 Gbps@10 ⁻⁸
2	Distance	45000 km
3	Wavelength	1064 nm
4	Modulation/ Demodulation	BPSK/Homodyne coherent detection
5	Optical antenna diameter	135 mm
6	Structural style	Periscopic
7	Divergence	16–22 μrad
8	Output power	2.2 W
9	Weight	50 kg
10	Power consumption	160 W

标捕获、跟踪通信一体化技术路线, 激光终端实物和原理框图如图 2 所示。2016 年 6 月, EDRS-A 首次与 Copernics-1A 卫星 Sentinel 终端建立了 1.8 Gbps 的激光通信链路, 并将接收图片数据回传至地面。2019 年 8 月 6 日, EDRS-C 激光终端搭载 Avanti 公司 Hylas-3 入轨, 进一步提升了 EDRS 系统的探测能力。EDRS 激光中继链路目前在轨稳定运行, 建链次数超过 25000 次, 仅在 2017—2018 年间, EDRS-A 与 Sentinel 的建链总次数就超 15000 次, 单次链路持续平均时长为 14.5 min, 如图 3 所示^[20]。由图 4 可得, 激光星间链路建立时间小于 3 s, 跟踪精度达 100 nrad, 通信误码率优于 10⁻¹¹@600 Mbps, 终端稳态功耗为 125 W, 传输总数据量达 787.9 TB, 链路可用度高于 99.7%。

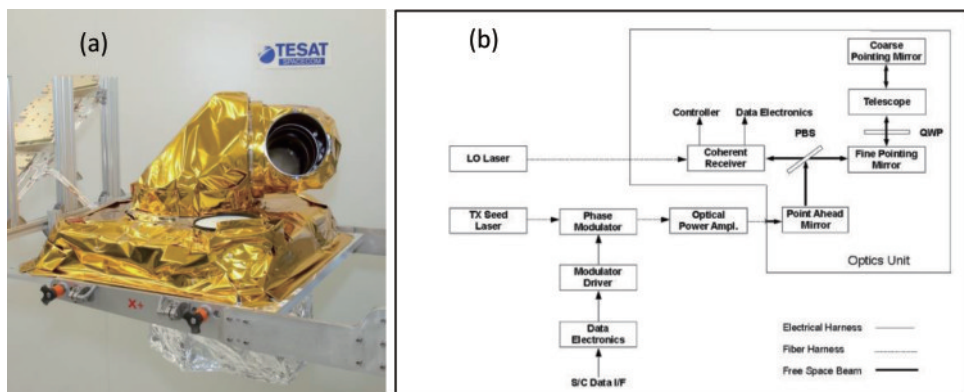


图 2 TESAT LCT^[12]。(a)实物图; (b)原理框图

Fig. 2 TESAT LCT^[12]. (a) Image of product; (b) principle diagram

2019 年 9 月, 德国宇航中心(DLR)研制的机载光学通信终端(AOC)搭载一架空客 A310 飞机, 结

合 Alphasat 卫星激光终端, 以 15 W 的上行发射功率, 建立了首个 1.8 Gbps 的上行激光通信链路, 机

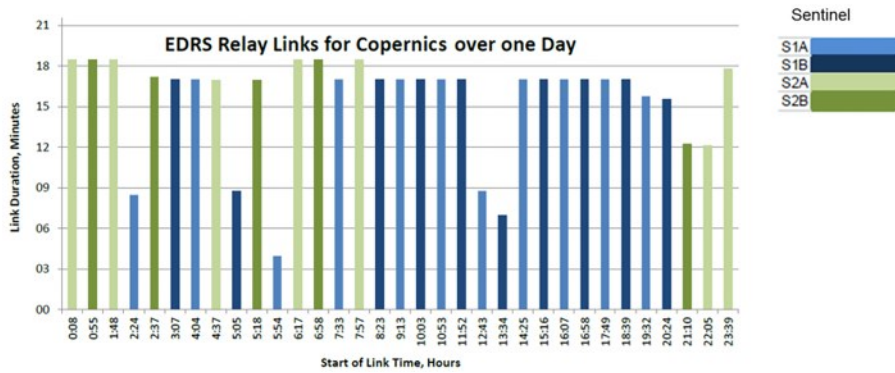


图 3 GEO-LEO 24 h 链路统计^[20]
Fig. 3 GEO-LEO laser links over 24 h^[20]

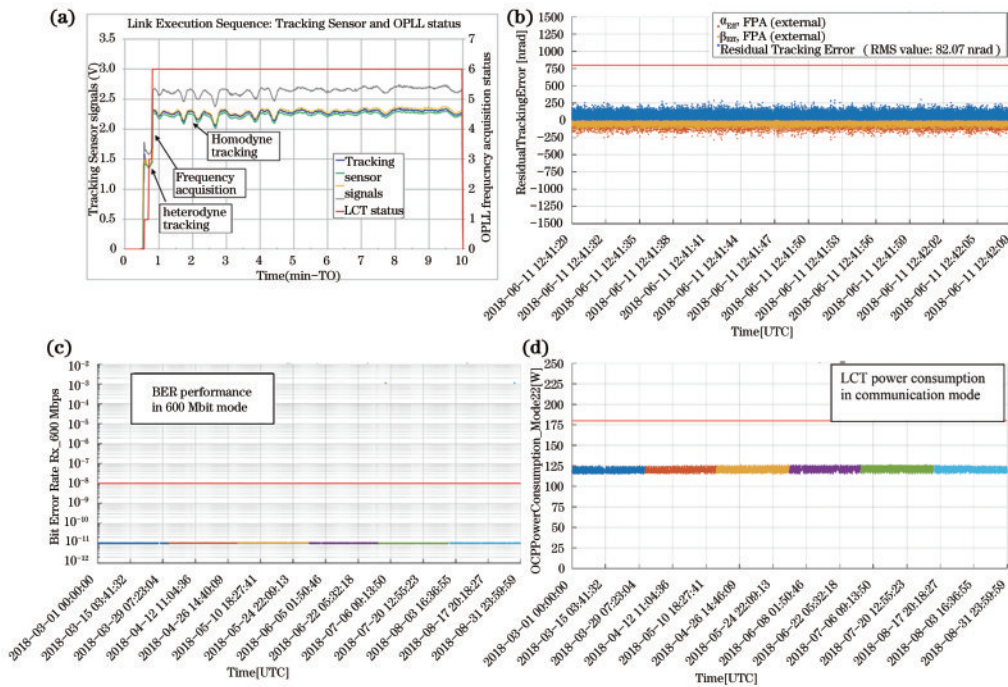


图 4 在轨测试数据^[20]。(a)链路建立时间；(b)跟踪精度；(c)600 Mbps 通信误码率；(d)功耗
Fig. 4 In-orbit test results^[20]. (a) Link establishment time; (b) tracking error;
(c) BER for 600 Mbps communication; (d) power consumption

上激光终端如图 5 所示。飞机飞行高度为 11000 m，链路距离约为 39000 km^[21]。

此外，ESA 于 2019 年 2 月与日本签订了 EDRS-D 的共同研发协议^[19]，计划开发亚太地区激光数据传输业务。卫星将于 2025 年发射，星上将配置 3 套激光终端，可将亚太地区数据回传到欧洲，链路距离为 80000 km，速率为 3.6 Gbps，兼容 1064 nm 和 1550 nm，届时 EDRS 将提供全球空间激光通信网络服务。

2.1.2 激光通信中继演示验证

LCRD 是 NASA 开展的空间高速光通信演示



图 5 机上激光终端^[21]
Fig. 5 AOC installed in Airbus A310^[21]

验证项目,其架构如图 6 所示。LCRD 以 LLCD 为产品基线,目的是验证空间激光通信链路和网络技术、激光-微波混合通信技术等关键技术,是美国建立下一代“跟踪与数据中继卫星(TDRS)”空间激光通信网络的重要参考。LCRD 激光终端于 2020 年 8 月在白沙靶场搭载空间实验卫星 STPSat6 发射升空,并开展为期 2 年的在轨验证,包括其与两个光学地面站之间的双向激光通信试验和地面站-GEO-地面站的激光中继通信试验。

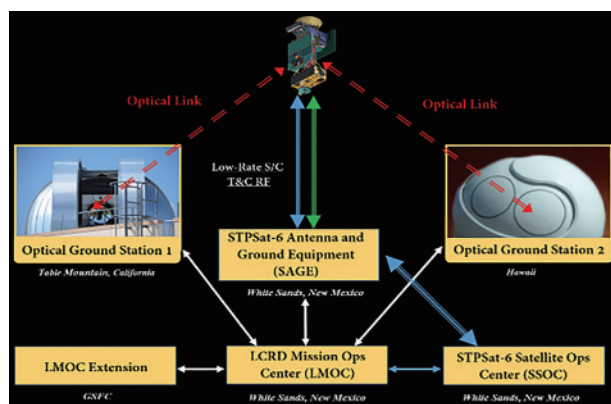


图 6 LCRD 任务架构^[13]

Fig. 6 LCRD mission architecture^[13]

LCRD 星上搭载的 2 个独立的激光终端可分别与地面站或飞行平台建立激光通信链路,每个激光终端由光学模块、调制解调器和电控箱构成,终端实物如图 7 所示。



图 7 LCT 实物图^[13]。(a)光学模块;(b)调制解调器

Fig. 7 Photos of LCT^[13]. (a) Optical module; (b) modem

在光学模块的振动抑制设计中,使用磁力惯导单元(MIRU)抑制 5 Hz 以上的振动,MIRU 是一个小型平台,内置光学组件,它使用基于磁力惯导的角度传感器来感应角度变化,并将信号反馈给音圈致动器以实现闭环控制和望远镜的稳定。5 Hz 以下的扰动由压电传感器驱动的光纤章动产生的误差信号来抑制。调制解调器采用 DPSK/16PPM 体制,相比于 M-PPM 和 BPSK 调制解调方式,DPSK 调制解调方式下的接收灵敏度较低,但接收机实现复杂度

相对较低。终端的主要指标如表 3 所示。

表 3 LCRD LCT 技术指标

Table 3 Technical indexes of LCRD LCT

Number	Parameter	Specification
1	Bit rate	2.88 Gbps/622 Mbps
2	Distance	38000 km
3	Wavelength	1550 nm
4	Modulation	DPSK/16PPM
5	Optical antenna diameter	108 mm
6	Structural style	Theodolite
7	Output power	0.5 W
8	Weight	69 kg
9	Power consumption	130 W

LCRD 的两个光学地面站分别位于加州和夏威夷,均可进行全天时工作,如图 8 所示。加州站包括口径为 1 m 的光学望远镜、自适应(AO)光学系统、信标发射系统、温控系统等;夏威夷站采用经纬仪式结构,包括一个 60 cm 口径的接收天线和一个 15 cm 口径的发射天线,将该结构置于一个直径为 5.5 m 的球形保护罩中。

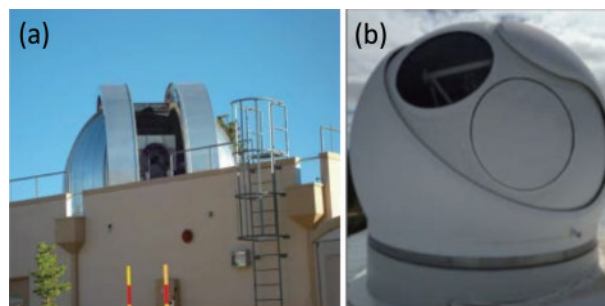


图 8 光学地面站(OGSs)^[13]。(a)加州站;(b)夏威夷站

Fig. 8 Optical ground stations (OGSs)^[13]. (a) California OGS; (b) Hawaii OGS

根据 NASA 试验计划,LCRD 早期将以一个地面站充当用户终端,开展大气湍流条件下的激光中继通信、编译码、DTN 网络协议等性能的验证,后续将根据 NASA 国际空间站 ILLUMA 激光终端的发射计划(目前暂定 2021 年),开展“准业务运行”级的激光数据中继试验。

2.1.3 日本数据中继系统

2015 年,日本宇航探索局(JAXA)提出建设新型星间激光中继系统 JDRS,该系统可为地球观察卫星、灾害观测卫星等低轨用户提供 LEO-GEO-OGS 的激光中继服务。根据评估,通过激光中继链路,JDRS 能够将 LEO 卫星数据落地可用时长由 LEO-OGS 的约 1 h/d 提高到 LEO-GEO-OGS 的 9 h/d。

JDRS 高轨卫星轨位初定于 90.75E, 原计划于 2019 年发射(目前未见发射报道), 其首个用户即先进光学卫星(ALOS-3)于 2020 年发射。JDRS 的任务规划为 10 年, 期间将为各类用户卫星或航天器提供激光中继服务, 其系统架构如图 9 所示。

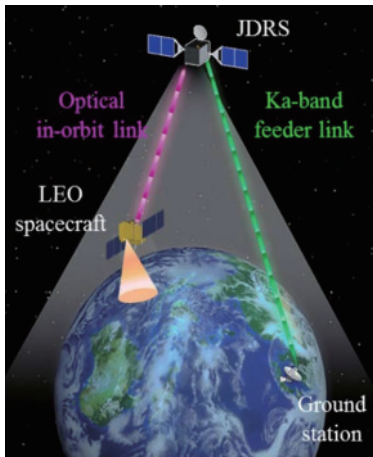


图 9 JDRS 概念图^[15]
Fig. 9 Concept of JDRS^[15]

JDRS 激光终端在设计上继承了早期 LUCE 终端的成果, 分为 GEO 和 LEO 两型, 二者分别选用超声电机驱动的单轴万向节和双轴万向节的结构形式, 如图 10 所示。终端技术参数如表 4 所示。JAXA 计划在 GEO 卫星上安装多个终端, 其在在轨运行期间能够支持多个目标同时接入, 同时终端采用波分复用(WDM)技术, 能够满足更大业务数据量的扩展。

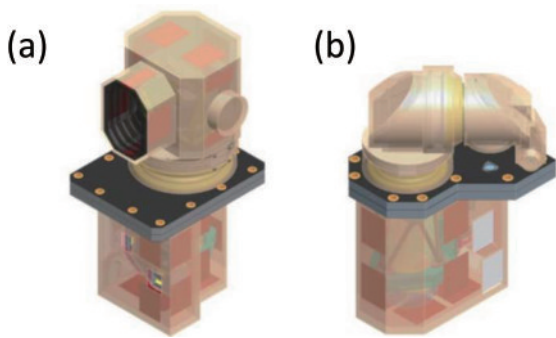


图 10 JDRS 终端模型^[15]。(a)GEO 终端; (b)LEO 终端
Fig. 10 Structural model of JDRS LCT^[15]. (a) GEO LCT; (b) LEO LCT

2.1.4 高速通信先进激光仪器计划

HICALI 计划是由日本国家信息与通信技术研究所(NICT)针对超宽带卫星提出的解决方案, 其激光链路的通信速率设计指标为 10 Gbps。HICALI 高轨激光终端于 2021 年搭载 ETS-9 新一

表 4 JDRS 激光终端技术指标
Table 4 Technical indexes of JDRS LCT

Number	Parameter	Specification
1	Bit rate	1.8 Gbps (return)
		50 Mbps (forward)
2	Distance	45000 km
3	Wavelength	1560 nm (return)
		1540 nm (forward)
4	Modulation	RZ-DPSK-DD (return)
		IM-DD (forward)
5	Optical antenna diameter	GEO: 150 mm;
		LEO: 100 mm
6	Structural style	One axis gimbal (GEO)
		Dual axis gimbal (LEO)
7	Link establishment time	60 s
8	Doppler shift	$\pm 5 \text{ GHz}, 6 \text{ MHz}\cdot\text{s}^{-1}$

代高通量卫星进行发射, 研究人员已于 2014 年建立了地面自由空间光通信网络设备(INNOVA), 完成了编译码、时钟恢复等关键技术验证。

HICALI 高轨终端包括如图 11 所示的 5 部分, 即光学头部、光放大器(包括发射光功率放大器和接收光低噪声放大器)、光发射接收单元、射频-激光交换单元和数据单元。除支持数字通信外, HICALI 高轨终端还支持 RF 信号的透明转发, 其优点是不需要进行星上数据处理, 界面简单、兼容性好、风险低、无需考虑 RF 地面站调制系统能力。

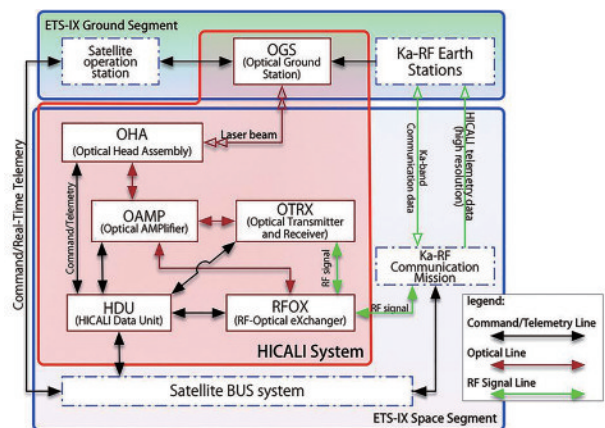


图 11 HICALI 高轨激光终端框图^[17]
Fig. 11 Diagram of GEO LCT for HICALI^[17]

终端主要参数如表 5 所示。光学口径为 150 mm, 信号光的发射波长为 1541.35 nm、功率为 2.2 W, 接收端接收 1560 nm 信号光和 1530 nm 信标光。

表 5 HICALI 激光终端技术指标
Table 5 Technical indexes of HICALI LCT

Number	Parameter	Specification
1	Bit rate	10 Gbps
2	Distance	45000 km
3	Wavelength	1541.35 nm (forward signal) 1560 nm (return signal)/ 1530 nm (return beacon)
4	Modulation	DPSK
5	Optical antenna diameter	150 mm
6	Angle range	$\pm 10^\circ$ (conic)
7	Divergence	16–22 μ rad
8	Output power	2.5 W
9	Weight	50 kg
10	Power consumption	160 W

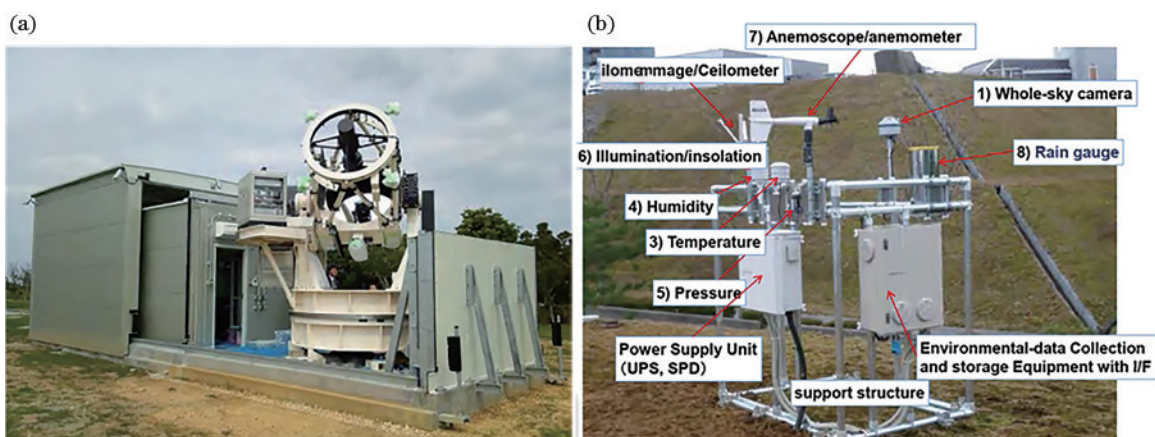


图 12 地面观测设备^[17]。(a) 1 m 口径分布式地面站；(b) 链路条件分析设备

Fig. 12 Ground observation equipment^[17]. (a) Distributed ground station with 1 m diameter; (b) link condition analysis equipment

2.2 国内代表链路

国内高轨卫星激光链路的研究目前多属于搭载试验阶段,2017年中国空间技术研究院研制的实践 13 号卫星上搭载了一台哈尔滨工业大学研制的激光终端,采用 IM/DD 体制,最高通信速率为 4.8 Gbps。2019 年 12 月 27 日,中国空间技术研究院研制的实践 20 号卫星搭载长征-5 号运载火箭于海南文昌发射基地成功发射,星上搭载了由中国空间技术研究院西安分院研制的激光终端,终端主体如图 13 所示。2020 年 3 月 30 日,该终端与丽江光学地面站建立了国际上首个 QPSK 相干体制的星地激光通信链路,该系统的速率高达 10 Gbps,是我国当前星载激光链路的最高速率,链路其他关键指标也达到了国际先进水平。

星地链路验证了中强大气湍流强度($r_0 \geq 3$ cm)下的高速激光通信,经 AO 校正后下行信号光束波

地面站方面,NICT 已在东京、神户、鹿岛、冲绳等多地建立了具有 AO 校正系统的分布式光学地面站,接收天线口径为 1 m,并利用其链路条件分析设备对天气、云层、背景光等干扰因素进行分析,以提高建链效率。地面观测设备如图 12 所示,此地面站已在其 SOTA 星地链路任务中得到应用。

此外,根据公开资料显示,NICT 计划于 2023 年发射一颗低轨 6U 卫星 CubeSOTA^[22],星上将配备一台 3U 大小的激光终端,其前向速率为 10 Gbps,可发射 1560 nm 信号和 1530 nm 信标,并与 HICALI 高轨终端建立试验性质的 LEO-GEO 星间链路。

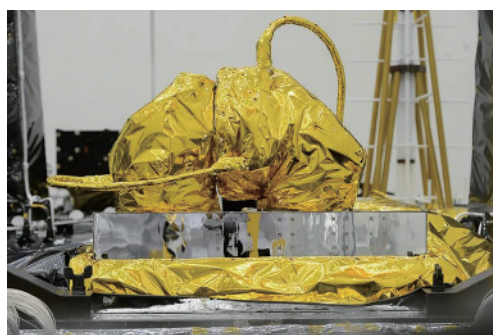


图 13 实践 20 号 (SJ-20) 卫星激光终端

前畸变和光束抖动被显著抑制,跟踪精度优于亚微弧度量级,波前精度优于 $\lambda/10$,这保证了空间光至单模光纤的高效耦合,平均单模光纤耦合效率达 28% 以上。图 14 为接收 AO 系统示意图,图 15 为卫星高角 36° ($r_0 = 4$ cm) 时 AO 校正前后的波前畸变和光斑抖动。

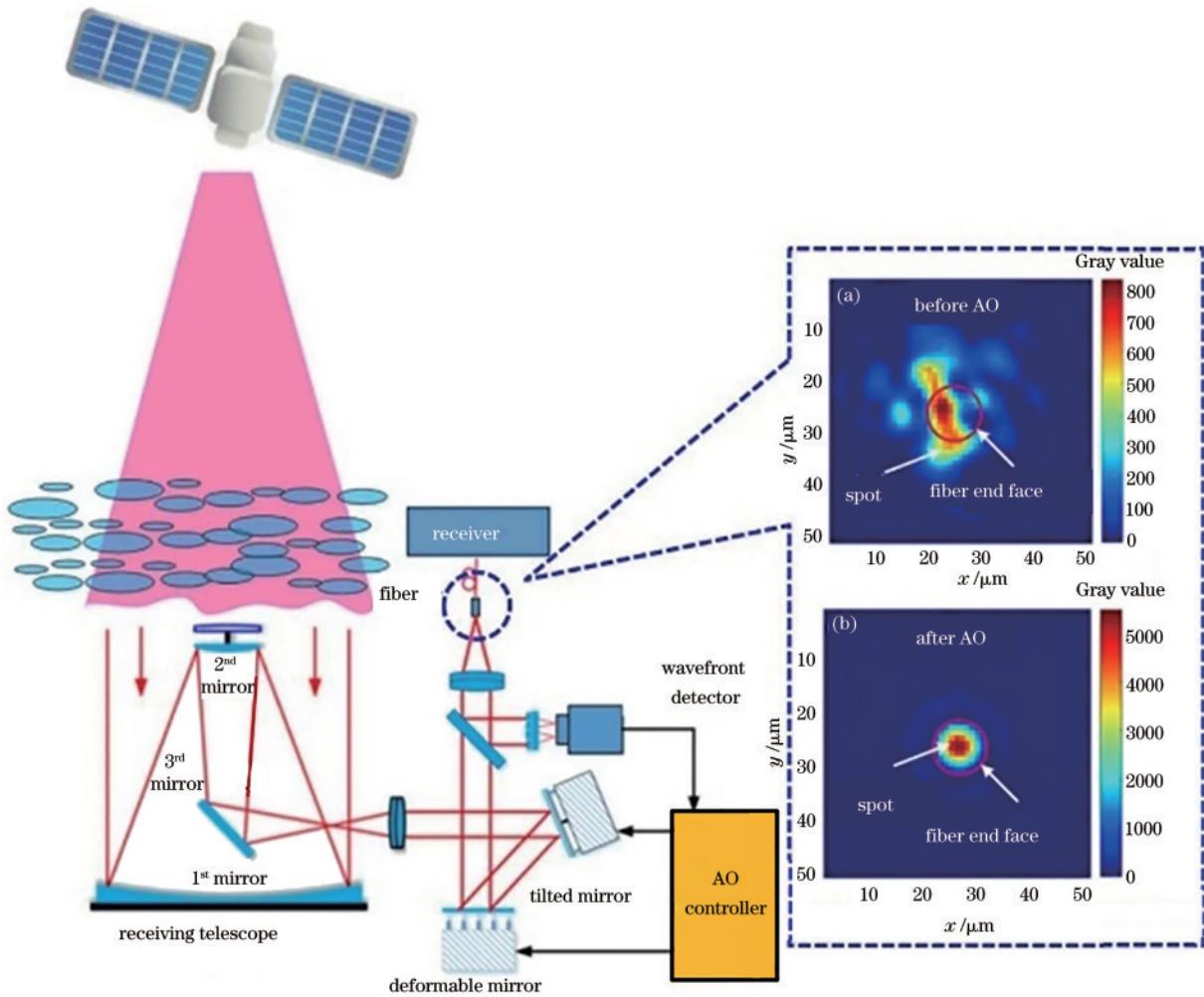


图 14 激光通信自适应光学校正系统示意图

Fig. 14 Schematic diagram of AO correction system for laser communication

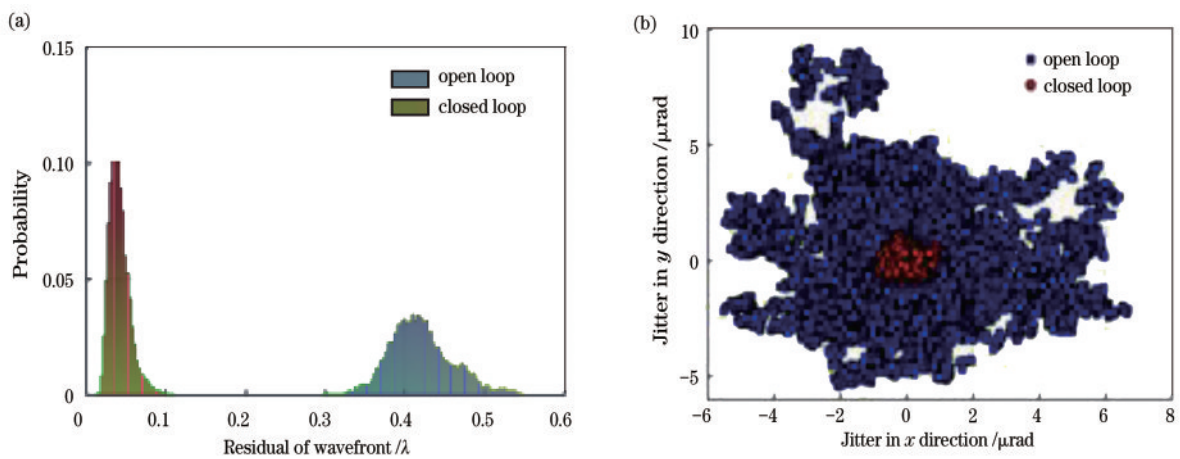


图 15 AO 校正前后状态。(a)波前畸变；(b)光斑抖动

Fig. 15 States before and after AO correction. (a) Wavefront distortion; (b) jitter of light spot

3 发展趋势

纵观国内外空间激光通信技术的最新研究进展,高轨激光中继链路呈现出以下几个发展趋势。

3.1 通信速率

相较微波通信,激光通信最明显的优势就在于其通信速率。随着技术的进步,通过采用光复用技术(波分/时分/偏振等)、高阶调制技术等技术手段,激光链路的通信速率可获得进一步提升,未来5~10年内其最高传输速率有望达到100 Gbps以上量级。

在ESA规划中,EDRS-D终端将支持最高10 Gbps的通信速率;在其“安全与激光通信技术(ScyLight)”计划^[23-24]中,ESA提出了建设Tbps级的“高通量光学网络(HydRON)”,总体规划了如图16所示的4个研究领域。通过开展激光通信系统技术、激光通信终端技术、星载光电子/光学载荷技术的体系化研究,最终建成所谓的“空中的光纤网络”,并将从2021年起逐步开展验证。

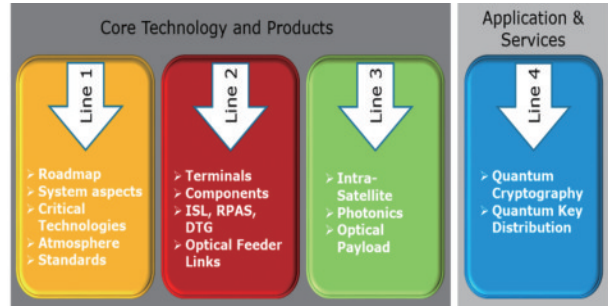


图 16 ScyLight 主线任务及有关技术领域^[23]

Fig. 16 ScyLight thematic lines and related technological areas^[23]

NASA将在LCRD试验完成后,于2025年起在TDRS系统中安装激光终端^[25],其目标是构建5~10 Gbps的激光中继链路,同时规划了200 Gbps的激光链路演示验证计划,并已研制了可安装低轨卫星的TBIRD激光终端原型样机。

JAXA针对2029年以后的中继业务需求,已规划建设下一代JDRS系统,其技术路线如图17所示,采用多波长波分复用技术路线,单通道(波长)速率大于20 Gbps,总速率可达100 Gbps^[26]。

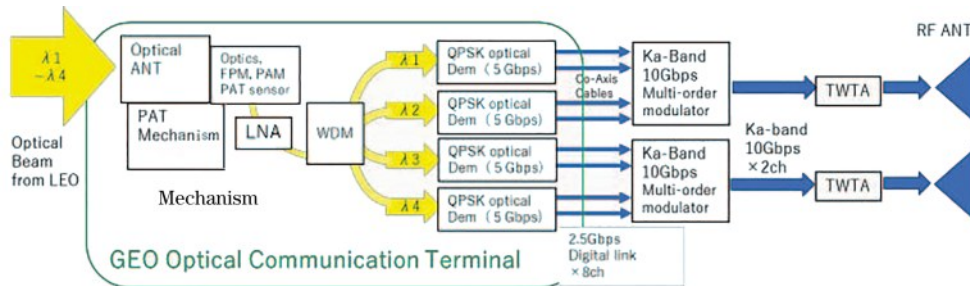


图 17 下一代JDRS系统多波长复用技术路线^[26]

Fig. 17 WDM technical route of successor for JDRS^[26]

3.2 链路可用度

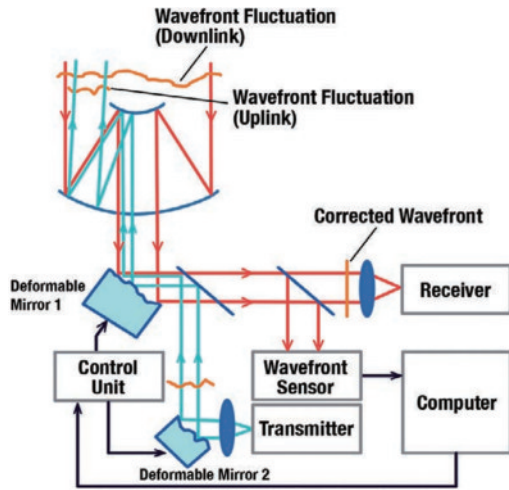
激光中继链路的可用度主要受限于大气效应对激光光束传输的影响,如云层遮挡和大气湍流引起的闪烁、散射等,这些因素也是当前空间激光通信领域的研究热点,成熟度较高的解决途径主要是AO技术和激光微波混合传输技术,其他有应用潜力的新技术包括锋芒光束、少模光纤接收技术等。

在地面段,常采用AO技术来减弱大气变化的影响,传统做法是用波前传感器来测量恒星图像的畸变并对下行链路进行补偿。但对于激光通信链路,还需补偿由于卫星运动而产生的像差,且应同时关注双向链路的波前畸变。

针对上行激光链路,NICT于2017年提出了一

种新型波前补偿方法,该方法在接收机孔径处进行传感,计算发射路径上的波前畸变,并进行上行传输畸变的“预补偿”,系统原理框图如图18所示。德国航天中心(DLR)也在2018年提出了相似的概念,并开展了在真实的湍流场景中进行AO预补偿的演示试验,以评估AO对发射和接收信道的影响。试验证明耦合效率和光强闪烁都得到明显的改善^[27]。此外,其他多个国家的研究机构均提出在高纬度地区建立分布式地面站的方案,并以多站接入的策略提高激光中继链路的可用度。

NASA认为另一条提高链路可用度的途径是在未来运行的GEO中继链路上采用功能互补的激光微波混合链路。激光中继链路提供高速率传输服务(如科学探测数据等),但存在一定的传输延

图 18 NICT 双向畸变补偿系统^[17]

迟；射频链路提供高实时性的服务（如遥测、告警信息等），但传输速率较低。因此 NASA 在 LCRD 任务星上载荷中加入了大带宽射频中继器，进行混合链路性能验证。

针对星地大气信道中大气湍流对激光束的影响，中国科学院光电技术研究院提出了一种新方法来构建锋芒状光束^[28]，使激光在传输过程中逐步消除激光在传输过程中的横向波矢，从而产生能够抑制大气湍流影响的稳态光场。与传统的大气湍流抑制方法相比，该方法的应用难度和成本明显降低。2019 年，试验实现了 km 级的传输，与国际上最高水平相比，传输距离提升了 3 个数量级，且效率高达 90% 以上。

其他提高星地链路可用度的技术还包括少模光纤放大接收、模式复用接收等技术。诺基亚贝尔实验室验证了一种利用多空间模式相干接收机进行数字湍流补偿的方法，该方法能够将灵敏度提高 6 dB，所得到的系统性能与理想 AO 系统性能接近^[29]；NASA 和 DLR 均开展了少模光纤接收技术^[30-31]，借助少模光纤大模场直径降低 AO 系统的复杂度，利用光子灯笼实现信号在少模光纤与多个分离的单模光纤之间的低损耗传输，并在后端进行高效探测。NASA 仿真并测试了大气相干长度 r_0 为 7~50 cm 湍流强度下的 60 cm 口径望远镜少模光纤接收机的耦合效率，该条件下的灵敏度比多模光纤高出 0.65 dB 以上；NEC 公司提出基于少模光纤的模式复用接收机，其灵敏度相比于单偏振模式信号解调系统提高了 5 dB^[32]。

3.3 集成度

人们普遍认为，如果使得高轨激光中继链路可以同时服务于多个目标，GEO 节点卫星上应装备 2~3

台激光终端，因此激光终端需最大程度地减小终端尺寸、质量、功耗（SWaP）等资源需求。高轨卫星链路距离通常为 36000~80000 km，因此终端需要较大的光学口径以提供足够的增益，这制约了终端的光机减重设计。通过增大视场能够减少终端所需数量或降低粗指向机构复杂度，从而减小终端的质量，潜在的技术手段包括光学相控阵技术^[33-35]、微机电系统（MEMES）技术^[36]等。但对于高轨卫星远距离激光链路而言，仍需对相关技术开展长期的工程化研究。

一条更为可行的技术途径是发挥以“全光集成电路（PIC）”为代表的新型光子学器件的应用潜力，提高终端后端的集成度。将多种光学器件、电光器件甚至处理电路集成为一体，使之成为通用化、高度集成化的功能模块，并使其具有大带宽、无损传输、力热性能优良的特点，从而使其能够适应星上电磁环境。NICT 在其 HICALI 激光终端的 DPSK 解调模块中，首次搭载了以 PIC 型光纤延时线为代表的新型高速光学器件，并将开展在轨性能验证；ESA 在 ScyLight 中明确指出，新型器件的开发和应用将是下一阶段的重要发展方向，新型器件包括放大器、激光器、光纤、探测器及无源器件，器件的关键特性主要有 TB 量级带宽、无损传输、支持任意编码调制格式、电磁干扰免疫和高度集成等。NASA 同样开展了 PIC 模块研究^[37]，实现了调制解调器的高度集成，其体积、质量、成本将为传统实现方案的 1/100 以下，实物如图 19 所示。

图 19 PIC 型光通信模块（NASA）^[37]Fig. 19 Laser comm modem based on PIC (NASA)^[37]

3.4 网络化

目前，研究人员基于以 EDRS 为代表的激光星间链路初步建成了空间激光通信网络，包括高轨骨干节点，低轨或大气层内用户、地面站等要素。ESA 在 EDRS 的系统设计中，采用同频收发偏振隔

离的光传输体制,初步给出了一种激光中继链路的组网解决方案。随着中低轨用户数量的增多,未来的星座规模将变得庞大,激光中继链路将演变为真正的天基激光信息网,并实现与地面段高速光纤网络的互通,如图 20 所示。

在HydRON计划中,ESA提出建设类似地面光

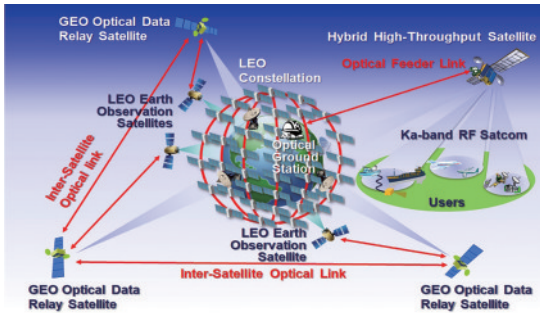


图 20 天基激光信息网概念图^[23]

Fig. 20 Concept map of space-based laser information network^[23]

纤网络的新型空间段激光网络,其中包含了载荷配置、传输体制、网络协议等,如图 21 所示。此概念中,未来 GEO 卫星将作为高通量全光链路节点,具有用户数据收集和分发能力。所有星上模块(包括激光终端、光路由及交换设备、数据处理设备、网络接入设备)均可定制,即插即用。激光链路中的信号传输采用波分复用体制,光学地面站则作为地面光纤网络的接入点。同时,通过利用人工智能技术进行优化处理并将原本独立的地面段和空间段网络进行深度融合,可实现高度灵活的天地一体化信息网络,从而大大降低卫星通信系统的成本。未来的节点数量将进一步增多,GEO、MEO、LEO 的结合可进一步融合微小卫星巨型星座;数据路由向星上处理和全光交换方式发展,协议层面将兼顾 TCP/IP、CCSDS、DTN 等标准。HydRON 计划的难点在于高效、动态的网络拓扑结构设计,低延时数据处理和交换等。

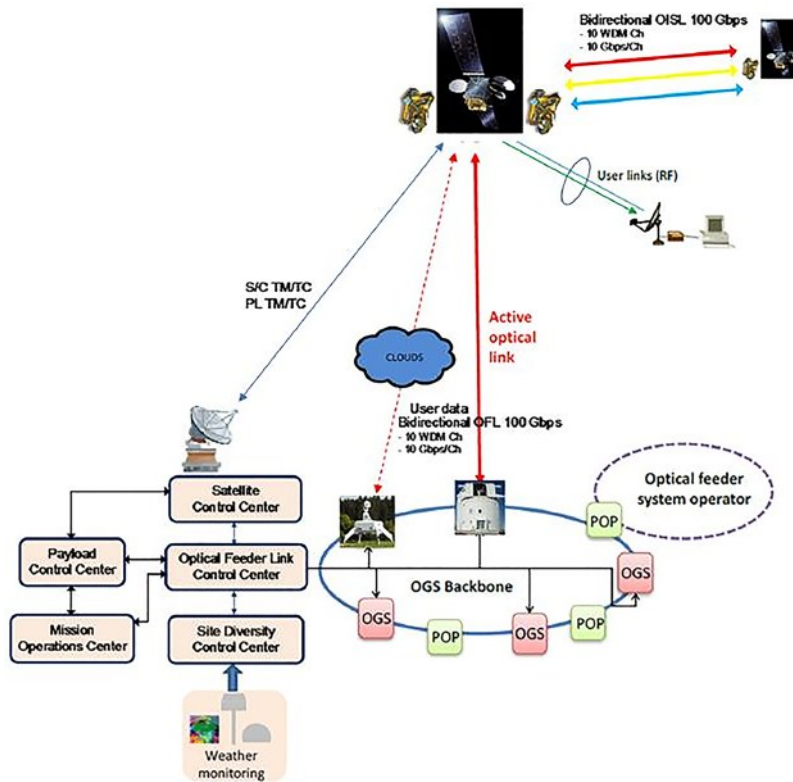


图 21 HydRON 系统概念图^[23]

Fig. 21 Overall system concept of HydRON^[23]

4 结 论

回顾了空间激光通信技术的发展历程和关键技术验证情况,重点介绍了国内外高轨卫星激光中继

链路的最新在轨表现和研制进展。对高轨卫星激光中继链路的发展趋势进行了分析,针对高速率、高可用度、高集成化、网络化的应用需求,总结了国外研究机构的最新研究动态和研究重点,该综述为我国

空间激光信息网络建设提供了借鉴和参考。

参 考 文 献

- [1] Liu W D, Luo Z B, Li X, et al. Optimized design of baffle for laser communication system on geostationary orbit [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0206005.
刘伟达, 罗忠宝, 李响, 等. 地球静止轨道激光通信系统的遮光罩优化设计 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0206005.
- [2] Wan X F, Hao S Q, Zhang D, et al. Link performance optimization for inter-satellite laser communications based on beckmann distribution [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0206003.
宛雄丰, 郝士琦, 张岱, 等. 基于贝克曼分布的星间激光通信链路性能优化 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0206003.
- [3] Dong M J, Lin B J, Liu Y C, et al. Topology dynamic optimization for inter-satellite laser links of navigation satellite based on multi-objective simulated annealing method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0706004.
董明佶, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0706004.
- [4] Jiang H L, Jiang L, Song Y S, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [5] Zhao S H, Wu J L, Li Y J, et al. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 092801.
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 092801.
- [6] Qu Z, Tong S F, Dong Y, et al. Design and verification of coarse tracking loop for satellite ground link laser communication load [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070603.
曲正, 佟首峰, 董岩, 等. 星地链路激光通信载荷跟踪回路设计与验证 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070603.
- [7] Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M, et al. Preliminary result on laser communication experiment using (ETS-VI) [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2381: 151-158.
- [8] Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [9] 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. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [10] Gregory M, Heine F, Kämpfner H, et al. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7923: 792303.
- [11] Robinson B S, Boroson D M, Burianek D, et al. The NASA lunar laser communication demonstration: successful high-rate laser communications to and from the moon [C]//SpaceOps 2014 Conference, May 5-9, 2014. Pasadena, CA. Reston, Virginia: AIAA, 2014.
- [12] Mark G, Heine F, Hartmut K, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. Optical Engineering, 2012, 51(3): 031202.
- [13] Bernard L E, David J I. Update on NASA's laser communications relay demonstration project [EB/OL]. (2018-05-28) [2020-05-11]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180003222.pdf>.
- [14] Bernard L E, David J I, Donald E W. A space based optical communications relay architecture to support future NASA science and exploration missions [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, May 7-9, 2014. Kobe, Japan. New York: IEEE Press, 2014: 1-10.
- [15] Chishiki Y, Yamakawa S, Takano Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390D.
- [16] Satoh Y, Miyamoto Y, Takano Y, et al. Current status of Japanese optical data relay system (JDRS) [C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), November 14-16, 2017. Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 240-242.
- [17] Kubo-Oka T, Kunimoria H, Suzukia K, et al. Development of "HICALI" high speed optical feeder link system between GEO and ground [J].

- Proceedings of SPIE, 2018, 11180: 1118060.
- [18] Hideaki K, Junichi N, Takuo G, et al. Design and verification of a space-grade 10 Gbit/s high-speed transponder for an optical feeder link [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10910: 1091012.
- [19] Harald H, Nicolas G, Silvia M, et al. Global quasi-real-time-services back to Europe: EDRS global[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 11180: 111800X.
- [20] Frank H, Alicia S, Patricia M P, et al. In orbit performance of tesat LCTs [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10910: 109100U.
- [21] Hubertus H, Christofer S. Airborne optical communication terminal: first successful link from Tenerife to the GEO Alphasat [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11133: 1113306.
- [22] Carrasco-Casado A, Do P X, Kolev D, et al. Intersatellite-link demonstration mission between CubeSOTA (LEO CubeSat) and ETS9-HICALI (GEO satellite) [C]//2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 14–16, 2019. Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [23] Hauschildt H, Elia C, Jones A, et al. ESAs ScyLight Programme: activities and status of the high throughput optical network “HydRON” [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 11180: 111800G.
- [24] Hauschildt H, Elia C, Moeller H L, et al. ScyLight-ESA’s secure and laser communication technology framework for SatCom [C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), November 14–16, 2017. Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 250-254.
- [25] Marco T, Heckler G. Payload performance of third generation TDRS and future services [EB/OL]. (2017-10-18)[2020-05-11]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170010176.pdf>.
- [26] Araki T. A study of the future optical data relay system; requirements, problems and solution[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), November 14–16, 2017. Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 199-202.
- [27] Ramon M C, Juraj P, Janis S, et al. Optical technologies for very high throughput satellite communications [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10910: 109100W.
- [28] Zhang Z, Liang X L, Goutsoulas M, et al. Robust propagation of pin-like optical beam through atmospheric turbulence[J]. APL Photonics, 2019, 4 (7): 076103.
- [29] Fontaine N K, Ryf R, Zhang Y H, et al. Digital turbulence compensation of free space optical link with multimode optical amplifier [C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), Dublin, Ireland. Scotland: Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [30] Sarah T, Bertram F, Yousef C, et al. Measurements of few-mode fiber photonic lanterns in emulated atmospheric conditions for a low earth orbit space to ground optical communication receiver application [EB/OL]. [2020-05-11]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20200001012.pdf>.
- [31] Calvo R M, Allieux D, Reeves A, et al. Alternative passive fiber coupling system based on multi-plane light conversion for satellite-to-ground communications [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11272: 112720Q.
- [32] Arikawa M, Ito T. Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28263-28276.
- [33] Hutchison D N, Sun J, Doyle J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. Optica, 2016, 3(8): 887-890.
- [34] Huang W R, Montoya J, Kinsky J E, et al. High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array [J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17311-17318.
- [35] Tyler N A, Fowler D, Malhouitre S, et al. SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength [J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5851-5858.
- [36] Peng. D, Mohsn K, Yan L. MEMS-based beam steerable free space optical communication link for reconfigurable wireless data center [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10128: 1012805.
- [37] Robinson B S, Boroson D M, Schieler C M, et al. TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) : a demonstration of large-volume direct-to-Earth data transfer from low-Earth orbit [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10524: 105240V.