

小卫星激光通信终端技术现状与发展趋势

杨成武, 谌 明, 刘向南, 李晓亮, 赵 卓, 林 一
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 在激光通信技术快速发展及商业卫星组网应用迫切需求的背景下, 小卫星激光通信技术逐步发展成为商业卫星通信领域的研究热点之一。首先, 对近年来国内外小卫星激光通信技术的发展现状及性能指标特点进行了详细论述, 归纳出轻量化、低功耗、模块化、低成本四个发展趋势。在此基础上, 分析了小卫星激光通信终端的四项关键技术, 以期为我国小卫星激光通信终端技术的发展提供一定的参考和借鉴。

关键词: 小卫星; 激光通信; 卫星通信

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)03-0001-07

Current status and development trends of minisatellite laser communication terminal technology

YANG Chengwu, CHEN Ming, LIU Xiangnan, LI Xiaoliang, ZHAO Zhuo, LIN Yi
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Under the background of the rapid development of laser communication technology and the urgent needs of commercial satellite networking applications, minisatellite laser communication technology is one of the research hotspots in the field of commercial satellite communication. First, the latest development status and performance index characteristics of minisatellite laser communication terminal technology at home and abroad are discussed in detail. Then, the four development trends such as lightweight and miniaturized, low power consumption, modular and low cost are summarized. Finally, four key technologies of minisatellite laser communication terminal are analyzed for promoting the development of China's minisatellite laser communication.

Key words: Minisatellite; Laser communication; Satellite communication

引 言

与传统的卫星微波通信相比, 卫星激光通信具有通信速率高、抗干扰能力强、保密性好以及激光终端体积小、重量轻和功耗低等优点^[1]。因此, 激光通信已经成为卫星通信的重要发展方向之一。随着航天技术的不断发展以及商业航天活动日益增加, 对小卫星组网通信的应用需求愈加迫切, 并以此为动力极大地促进了小卫星激光通信终端技术的发展。美国、法国、德国、日本等对小卫星激光通信终端所涉及到的关键技术和核心器件进行了全面研究, 先后开展了多次在轨试验验证。小卫星激光通信终端技术逐渐成熟, 目前已达到工程应用水平。通过对小卫星激光通信终端技术研究现状梳理和总结, 分析了小卫星激光通信终端中涉及的关键技术, 可以为我国在该领域的技术发展提供借鉴, 进一步促进我国小卫星激光通信技术的快速发展和工程应用。

1 国内外发展现状

1.1 国外发展现状

近些年来, 在小卫星组网应用需求的牵引下, 各国竞相研制适用于商业化应用的低成本微小型激光通信终端。此类激光终端的重量通常在 10kg 量级, 通信速率在 10Mbps 至 10Gbps。典型应用为低轨(互联网)通信星座系统, 包括美国的 Starlink 星座、LeoSat 星座和 HALO 激光全球混合网络以及加拿大的 Telesat 星座等。

相关公开资料表明, 国外典型微小卫星激光通信终端典型产品主要有: 法国的 OPTEL- μ , 德国的

T-OSIRIS、CubeLCT、MLT-TS, 日本的 SOTA 以及美国的 OCSD、ISOC、 μ LCT、Xen-Hub 等。其应用场景涵盖星地链路和星间链路。表 1 给出了国外典型微小卫星激光通信产品的主要指标参数^[2-20]。

表 1 国外典型微小卫星激光通信产品指标参数

终端	研制单位	链路类型	调制方式	通信速率	通信距离	功耗	重量
OPTEL- μ	法国 Thales Alenia Space	星地	OOK/16-PPM	2.5 Gbps	1 000 km	45 W	8.0 kg
OCSD	美国 Fibertek	星地	OOK	200 Mbps	450 km	40~50 W	2.3 kg
CubeLCT	德国 Tesat	星地	OOK	100 Mbps	1 500 km	8 W	0.36 kg
T-OSIRIS	德国 Tesat	星地	OOK	10 Gbps	1 500 km	50 W	8 kg
SOTA	日本 NICT	星地	OOK	10 Mbps	500 km	/	5.9 kg
2 ST LCT	美国 Fibertek	星间	OOK/PPM/DPSK	1 Gbps	/	<30 W	2.5 kg
ISOC	美国 JPL	星间	OOK	1 Gbps	1 000 km	1 W	/
μ LCT-10	美国 SPACE MICRO	星间	DPSK/OOK	10 Gbps	4 000 km	150 W	20.9 kg
μ LCT-100	美国 SPACE MICRO	星间	16QAM/QPSK	200 Gbps	4 000 km	150 W	23.7 kg
Xen-Hub	美国 Xenesis	星间	/	4×2.5 Gbps	2 000 km	120 W	15 kg
MLT-LS	德国 Mynaric	星间	OOK	10 Gbps	4 500 km	<60 W	<20 kg

1.1.1 美国

美国在小卫星激光通信技术方面开展了大量研究, 其研制的终端主要包括 OCSD、2STLCT、ISOC、 μ LCT 等。

1.1.1.1 OCSD 激光终端和 2STLCT 终端

2015 年 10 月, 由 NASA 研制的光通信和传感演示立方星 OCSD (也称 OCSD-A 或 AeroCube-7A) 成功入轨^[2,3], 开启了美国在小卫星激光通信技术的在轨试验篇章。如图 1 所示, 该卫星是 1.5U 的立方体卫星, 尺寸为 10 cm×10 cm×15 cm。基于 CubeSat 小卫星平台的 OCSD 激光通信终端, 旨在演示甚小型卫星通过激光通信提供高速率数据通信服务的能力。2018 年, OCSD 激光终端成功实现了星地 200 Mbps 的激光通信^[4], 引起了人们的关注。该立方星的两颗后续星 OCSD-B 和 OCSD-C (又称 AeroCube-7B 和 AeroCube-7C), 将进一步测试更高速率的激光通信。

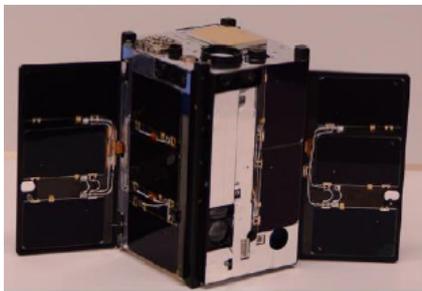


图 1 美国 OCSD 立方星

Fig. 1 OCSD CubeSat

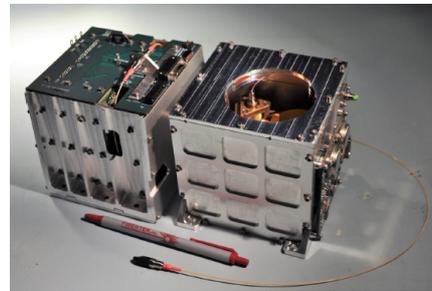


图 2 2STLCT 电学单元 (左) 和光学单元 (右)

Fig. 2 Electronics module and optical module of 2STLCT

继 OCSD 激光终端之后, 美国 Fibertek 公司计划研制第二代 2STLCT 激光终端, 该终端包括 1 个大小为 1U、重量约 1.25 kg 的电学单元和 1 个大小为 1U、重量约 1.25 kg 的光学单元, 样机结构如图 2 所示。其主要用于 LEO-GEO 星间激光链路, 通信速率为 1 Gbps, 支持 OOK/PPM/DPSK 三种调制体制, 功耗小于 30 W^[5]。

1.1.1.2 ISOC 激光终端

为满足 Cubesat 组网应用, NASA 开发了一个全向的激光通信终端 ISOC, 支持实现通信距离为 200 km~1 000 km、通信速率为 1 Gbps 的激光通信链路, 最终用于多颗 Cubesat 卫星间的激光通信组网^[6,7]。在进行全向终端设计时, 考虑到 Cubesat 的体积和外形限制, ISOC 终端采用了创新的球形设计, 如图 3 所示。目前, 2 台原型样机已经完成室内测试, 后续计划搭载到 6U 的 Cubesat 上进行在轨试验。



图3 ISOC 激光终端样机
Fig. 3 Laser terminal of ISOC

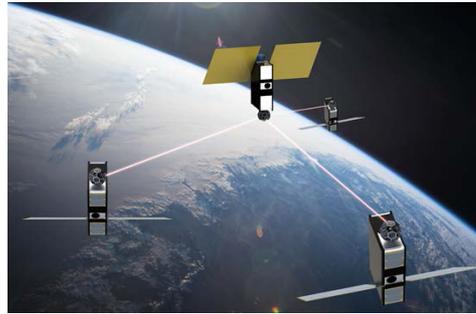


图4 ISOC 系统应用
Fig. 4 ISOC system application

1.1.1.3 μ LCT 激光终端

针对低轨小卫星星座应用,美国 SPACE MICRO 公司研发了 μ LCT-10 和 μ LCT-100 两款激光终端。 μ LCT 激光终端机构采用半潜望式结构,通过快反实现精跟踪。终端的发射功率可调,支持最大 5 W 光功率输出。天线口径支持 1 cm~20 cm 选配,通过波分复用实现多通道的收发。其中, μ LCT-10 的激光终端采用 1 550 nm 波长,可选配 OOK 和 DPSK 通信体制。当发射功率为 3 W,通信体制为 DPSK 时,可实现 4 000 km 的通信距离下的 10 Gbps 通信速率,整机重量为 20.9 kg,功耗为 150 W。 μ LCT-100 的激光终端采用 1 550 nm 波长,可选配 QPSK 和 16QAM 通信体制。当发射功率为 3 W,通信体制为 16QAM 时,可实现 4 000 km 的通信距离下的 200 Gbps 通信速率,整机重量为 23.7 kg,功耗为 150 W^[8,9]。

1.1.1.4 Xen-Hub 激光终端

由 Laser Light Communications 公司、Atlas Space Operations 公司和 Xenesis 公司合作,布署 HALO 激光全球混合网络。其中,HALO 的星载激光终端由 Xenesis 公司生产,拟采用 Xen-Hub 激光通信终端,如图 5 所示。该终端单通道星地下行速率为 2.5 Gbps,支持四通道波分复用,最高通信速率可达 10 Gbps。其中,400 km 轨道高度可搭载重量为 10 kg,功耗为 60 W 的激光终端;2 000 km 轨道高度可搭载重量为 15 kg,功耗为 120 W 的激光终端^[10]。

1.1.1.5 CrossBeam™激光通信终端

美国 SA Photonics 公司研制的 CrossBeam™激光通信终端支持星间和星地双向通信,采用潜望式结构,如图 6 所示^[11]。相关资料表明,后续该公司将为 DARPA 黑杰克项目提供卫星星间激光通信终端产品。

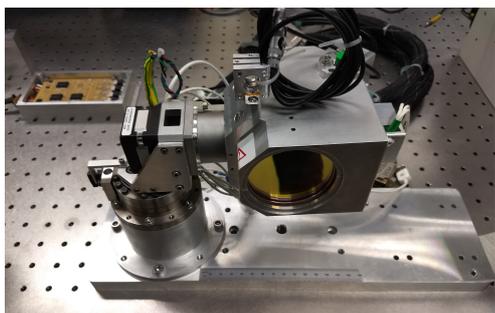


图5 Xen-Hub 激光通信终端样机
Fig. 5 Xen-Hub Laser communication terminal



图6 CrossBeam™激光通信终端样机
Fig. 6 CrossBeam™ laser communication terminal

1.1.2 德国

得益于良好的空间激光通信基础,德国在小卫星激光通信技术方面发展迅速, Tesat 公司和 Mynaric 公司为典型终端研制单位。

1.1.2.1 CubeLCT 终端和 T-OSIRIS 终端

针对小卫星激光通信应用需求,德国 Tesat 公司推出了 2 款小卫星激光通信终端 CubeLCT (图 7) 和 T-OSIRIS (图 8)。其中, CubeLCT 终端采用高度的集成化设计,重量为 0.36 kg,功耗为 8 W,采用 OOK 体制,支持星地下行^[12];而 T-OSIRIS 终端的重量为 8 kg,功耗为 40 W,其星地下行通信速率扩展至 10 Gbps^[13]。

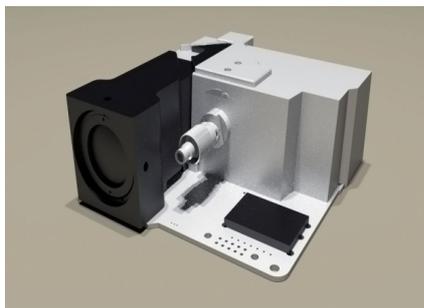


图 7 CubeLCT 终端
Fig. 7 CubeLCT laser terminal

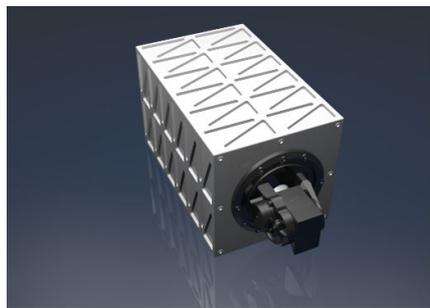


图 8 T-OSIRIS 终端
Fig. 8 T-OSIRIS laser terminal

1.1.2.2 MLT-LS 激光终端

德国 Mynaric 公司研制的 MLT-LS 激光终端主要针对 LEO 星间链路应用场景, 终端结构如图 9 所示。其单通道/波长通信速率为 10 Gbps, 天线口径为 80 mm, 重量小于 20 kg, 功耗小于 60 W。若采用波分复用(10 通道@10 波长), 能够支持 100 Gbps 的通信速率扩展^[14]。

1.1.3 日本

1.1.3.1 SOTA 激光终端

日本国家信息与通信技术研究所 NICT 于 2011 年成功研制出适合搭载于 50 kg 级微型 LEO 卫星的光应答机 SOTA 工程样机, SOTA 总重量为 5.9 kg, 天线口径为 70 mm, 通信速率为 1 Mbp~10 Mbps。如图 10 所示, 该终端上安装了 4 个激光模块, 2 个作为激光通信光源, 另外 2 个作为量子密钥分发的纠缠光子源^[15,16]。



图 9 MLT-LS 激光终端样机
Fig. 9 MLT-LS laser terminal

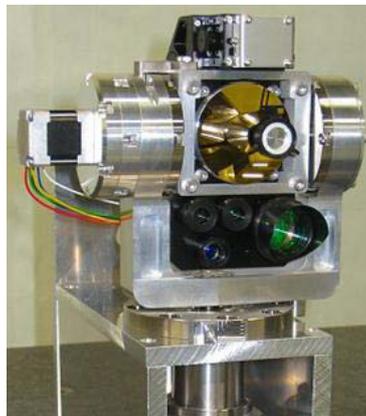


图 10 SOTA 激光终端
Fig. 10 SOTA laser terminal

1.1.3.2 SOLISS

2016 年, 日本航空航天研究局 JAXA 和日本索尼计算机科学实验室 (Sony CSL) 开始合作研制了一种小型卫星激光通信终端 SOLISS (Small Optical Link for International Space), 如图 11 所示^[17]。SOLISS 的光通信单元重量约为 1.2 kg, 于 2019 年 9 月份搭载 HTV-8 货运飞船前往国际空间站, 在 10 月 25 日安装完成。2020 年 3 月 5 日, SOLISS 双向通信链路的地面站完成安装, 随后在 3 月 11 日, 地面站通过激光链路收到了国际空间站的第一批高清图像, 其双向通信速率达 100 Mbps^[18]。

1.1.4 法国

OPTEL- μ 是法国 Thales Alenia Space 公司于 2018 年面向 LEO 微纳卫星研制的一款激光终端, 其光学头设计如图 12 所示。整机重量为 8 kg, 功耗为 45 W, 包络为 8 000 mm³。该终端采用双通道设计, 通信速率最高达 2.5 Gbps, 通信波长 1 550 nm, 调制体制兼容 OOK 和 PPM, 探测方式为直接探测, 通信距离不小于 1 000 km^[19,20]。

1.2 国内发展现状

我国紧追国外技术发展步伐, 在空间激光通信方面取得了众多成就, 为发展小卫星激光通信技

术奠定了基础^[21,22]。2011年,“海洋二号”激光终端成功进行了星地激光链路捕获跟踪试验,实现星地 504 Mbps 激光通信。

2016年,“天宫二号”激光终端与新疆南山和河北兴隆地面站间进行了数十次星地激光通信,通信速率为 1.6 Gbps。同年,“墨子号”卫星开展了我国首次星地高速相干激光通信试验,通信距离 2 000 km,通信速率为 5.12 Gbps。

2017年,“实践十三号”开展高轨卫星与地面的双向激光通信试验,速率最高达到 5 Gbps。

“实践二十号”卫星于 2020 年初开展了高阶相干激光通信终端在轨实验,首次验证了 QPSK 相干体制的激光通信,通信速率高达 10 Gbps。

商业航天应用方面,国内已有多家单位相继开展了小卫星激光通信技术的研究和终端研制。其中,2018年9月29日,微厘空间一号试验卫星发射,其搭载的小激光通信终端将验证适用于微纳星座的激光星间链路技术^[23]。2020年3月中旬,由新技术试验卫星 C 星、D 星搭载的低轨小卫星激光终端实现了低轨星间激光通信,双向通信速率为 2.5 Gbps,终端重量为 9 kg^[24]。2020年5月12日,“行云二号”01 星和 02 星搭载 T5 小卫星激光终端发射升空,随后将开展低轨卫星星间激光链路技术验证。T5 激光终端的重量为 5 kg,双向通信速率为 100 Mbps,通信距离约 3 000 km^[25]。

随着商业航天活动的不断增加,小卫星激光通信终端在卫星空间组网中的应用将更加广阔。

2 发展趋势

综上所述,区别于大卫星平台的应用,小卫星激光终端的发展重点将是轻小型化、低功耗以及低成本。在技术发展方面,小卫星激光通信终端也呈现出高速化、模块化、商业化的发展趋势。

2.1 轻小型化与高速率化

受限于搭载平台的约束,激光通信终端正朝着轻小型化的方向发展。德国的 Mynaric 公司研制的 MLT-LS 激光通信终端重量约 20 kg,通信速率为 10 Gbps;美国 Xenosis 的 Xen-Hub 激光通信终端重量为 15 kg,4 路波分复用通信速率可达 10 Gbps;德国 Tesat 公司的 T-OSIRIS 激光通信终端重量为 8 kg,通信速率为 10 Gbps。从中可以发现,在保证小卫星激光通信终端轻小型化的同时也同时兼顾速率的需求,可达 10 Gbps 甚至更高的水平。

2.2 低功耗

小卫星平台为载荷所能提供的能量有限,因此促使激光通信终端朝着低功耗方向发展。法国 Thales Alenia Space 公司的 OPTEL- μ 激光通信终端,其功耗为 45 W;德国 Tesat 公司的 CubeLCT 激光通信终端的功耗为 8 W;美国 JPL 所研发 ISOC 激光终端,功耗仅仅为 1 W。可以发现,小卫星平台的激光终端对功耗的需求呈现出越来越低的趋势。

2.3 模块化

针对不同的应用场景与任务需求,小卫星激光通信终端呈现出模块化发展趋势,通过组装不同的模块,即可集成满足不同场景和不同任务需求的激光通信终端,为终端的快速组装、批量生产提供了条件。以美国 SPACE MICRO 公司的 μ LCT 激光通信终端为例,其规划了 μ LCT-10 和 μ LCT-100 两种类型的激光通信终端,应用场景涵盖星间链路和星地链路,通信速率覆盖 1 Gbps 到 200 Gbps,通信距离从 1 000 km

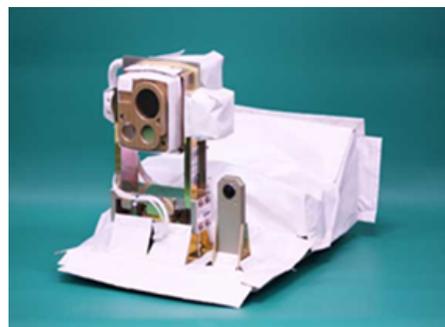


图 11 SOLISS 激光终端样机
Fig. 11 The laser terminal of SOLISS

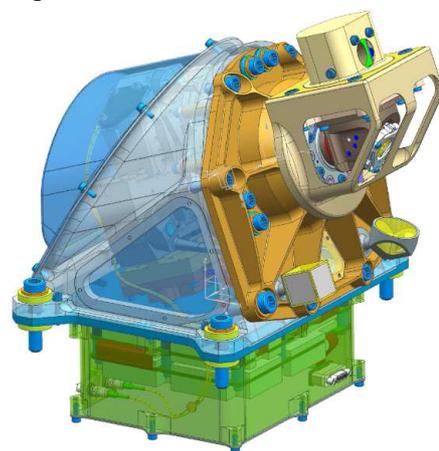


图 12 OPTEL- μ 激光终端光学头
Fig. 12 The optical head design of OPTEL- μ

至 8 000 km。因此, 模块化是未来发展的重要方向之一。

2.4 低成本

随着商业航天领域需求的不断增加, 促使小卫星激光通信终端技术逐渐从在轨试验验证向商业应用转变。以美国 SpaceX 公司的 Starlink 星链为例, 其计划发射约 42 000 颗小卫星。区别于传统大卫星载荷, 如此大批量的小卫星激光通信终端将会告别传统的定制方式。批量生产将会是未来小卫星激光通信终端的主要生产方式。与此同时, 其生产成本也随之降低, 以进一步满足商业航天的成本要求。因此, 随着商业航天对小卫星激光通信终端需求的不断扩大, 小卫星激光通信终端的成本将不断降低。

3 关键技术

3.1 轻小型及低功耗设计技术

随着微小卫星激光通信组网应用需求的不断增加, 微小卫星激光终端应具备互联互通的能力。由于微小卫星平台的承载能力和搭载空间十分有限, 需对激光载荷的重量、体积和功耗等方面的设计进行深层次分析。如光学天线小型化设计、空间光路模块小型化、光机结构轻量化、通信收发模块集成化等。

3.2 链路的快速建立与稳定维持技术

小卫星激光通信终端捕获视场范围有限。由于卫星自身在沿着设定轨道运动的同时不断调整姿态, 而且外界环境因素带来的摄动也会对卫星平台的轨道和姿态产生影响。这些因素对小卫星激光链路的快速建立与稳定维持造成了困难。因此, 小卫星激光通信终端需不断地调节自身的激光光束空间指向, 通过优化捕跟策略, 如采用扫描-凝视的捕获方式、复合扫描方式以及嵌套复合轴跟踪系统等, 完成与通信目标间的激光链路的快速建立与稳定维持。

3.3 小卫星平台振动抑制技术

小卫星在轨运行期间, 由于卫星转动部件正常工作会引起平台幅度较小的往复运动或振荡。平台振动会造成激光通信终端发射和接收时的瞄准出现偏差, 从而导致功率下降、信噪比降低、误码率增加。因此, 要实现激光通信终端的高可靠通信, 需对小卫星平台振动所带来的影响进行抑制。可采取一些物理隔振装置、反馈控制技术抑制振动、自适应带宽抑制抖动噪声等设计。

3.4 批量化生产与自动化测试技术

与传统的卫星激光终端相比, 小卫星激光终端凭借其小型化、低成本的优势, 在未来的商业卫星激光通信网络中将得到大量应用。以 SpaceX 公司 Starlink 卫星终端发射为例, 后续这种搭载方式将对小卫星激光终端的批量化生产与自动化测试提出非常高的要求。因此, 建立小卫星激光通信终端批量化生产线, 通过自动化测试等方式, 完成激光通信终端的快速组装与调试。

4 结束语

近些年来, 空间激光通信技术的快速发展进一步促进了光学天线轻质化、光机结构小型化以及激光终端低功耗设计的快速进步, 为小卫星激光通信终端技术的发展奠定了重要基础。目前, 低轨卫星的轨道及频谱资源日愈紧张, 我国已将卫星互联网建设纳入“新基建”范畴, 上升为国家战略工程。可以预见, 小卫星激光通信终端凭借其高速化、小型化、低成本以及频谱资源不受限等优势, 必将在我国卫星互联网建设以及天基信息系统建设中发挥重要作用。

参考文献

- [1] 刘向南, 李春才, 李晓亮, 等. 天地一体化信息网络空间激光通信新技术[J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 1-7.
LIU Xiangnan, LI Chuncai, LI Xiaoliang, et al. New technologies of space laser communication for the space-ground integrated information network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(1): 1-7.
- [2] ROSE T S, ROWEN D W, WERNER N I, et al. Optical communications downlink from a 1.5 U CubeSat: OCS D program[C]. Proc of SPIE, 2018, 11180: 111800J.
- [3] BADAGAVI P, NANADI S. CubeSat - A smart device in space technology[C]. 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT), Mysuru, 2017: 1-6.

- [4] MATHASON B, ALBERT M M, ENGIN D, et al. CubeSat lasercom optical terminals for near-Earth to deep space communications[C]. Proc of SPIE, 2019, 10910: 1091005.
- [5] MATHASON B, ALBERT M M, ENGIN D, et al. Advances in CubeSat Laser Communications Transceiver[C]. 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2019.
- [6] GRIFFIN J, WERNICKE D, DENUCCI A, et al. Inter-satellite omnidirectional optical communicator for remote sensing[C]. Proc of SPIE, 2018, 10769: 107690L.
- [7] VELAZCO J, GRIFFIN J, WERNICKE D, et al. High data rate inter-satellite omnidirectional optical communicator[C]. 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018.
- [8] SPACEMICRO. Laser communications μ LCT™100 laser communications terminal 100 GBPS – HIGHEST SATCOM DATA RATE[EB/OL]. (2019-3-9) [2021-01-10]. http://www.spacemicro.com/assets/datasheets/lasercom/uLCT-100_Lasercom.pdf.
- [9] SPACEMICRO. Laser communications μ LCT™10 laser communications terminal [EB/OL]. (2019-3-9) [2021-01-10]. http://www.spacemicro.com/assets/datasheets/lasercom/uLCT-10_Lasercom.pdf.
- [10] SATSEARCH. The Xen-Hub [EB/OL]. (2020-01-13) [2021-01-10]. <https://satsearch.co/products/xenesis-the-xen-hub>.
- [11] SA PHOTONICS. Free space optical communication systems, with applications in terrestrial, maritime, air and space environments. [EB/OL]. (2020-05-15) [2021-01-10]. <https://www.saphotonics.com/communications-sensing/optical-communications>.
- [12] TESAT. CubeLCT smallest laser communication transmitter worldwide [EB/OL]. (2019-08) [2021-01-10]. https://www.tesat.de/images/tesat/products/CubeLCT_Data-Sheet.pdf.
- [13] TESAT. TOSIRIS direct-to-earth laser communication terminal [EB/OL]. (2019-04) [2021-01-10]. https://www.tesat.de/images/tesat/products/TOSIRIS_Data-Sheet.pdf.
- [14] MÜNCHENBERG S, GAL C, HORWATH J, et al. Development status and breadboard results of a laser communication terminal for large LEO constellations[C]. Proc of SPIE, 2018, 11180: 1118034.
- [15] KOLEV D R, TAKENAKA H, MUNEMASA Y, et al. Overview of international experiment campaign with small optical transponder (SOTA)[C]. 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015.
- [16] PETIT C, VÉDRENNE N, MICHAU V, et al. Adaptive optics results with SOTA[C]. 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2015.
- [17] KOMATSU H, OHTA S, YAMAZOE H, et al. In-orbit experimental architecture design of bi-directional communication with a small optical communication terminal attached on ISS and an optical ground station[C]. Proc of SPIE, 2020, 11272: 112720C.
- [18] PARABOLICARC. JAXA, Sony CSL to conduct in-orbit demonstrations of long-distance laser communication using ISS Kibo module [EB/OL]. (2019-08-09) [2021-01-10]. <http://parabolicarc.com/2019/08/09/jaxa-sony-csl-to-conduct-in-orbit-demonstrations-of-long-distance-laser-communication-using-iss-kibo-module>.
- [19] BAISTER G, GREGER R, BACHER M, et al. OPTEL- μ R LEO to ground laser communications terminal: flight design and status of the EQM development project[C]. Proc of SPIE, 2016, 10562: 105622U.
- [20] DREISCHER T, THIEME B, BUCHHEIM K. Functional system verification of the OPTEL- μ Laser downlink system for small satellites in LEO[C]. Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2014.
- [21] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901–913.
- [22] 姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1–8.
- [23] 空间光通信技术研究中心. 微厘空间一号卫星验证微纳星座激光星间链路等六项技术[EB/OL]. (2018-09-29) [2021-01-10]. <http://occ.hit.edu.cn/2018/0929/c4535a215626/page.htm>.
- [24] 上海无线电设备研究所公众服务. 上海无线电设备研究所实现国内首次低轨星间激光通信[EB/OL]. (2020-06-10) [2021-01-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/72dOwGAZ9CpMN833I5eQtw>.
- [25] 航星太空通信. 行云双星发射, 中国首次尝试搭建 LEO 星间激光链路, LaserFleet 负责研制主载荷[EB/OL]. (2020-05-12) [2021-01-10]. <http://www.gnss-world.com/zixun/2020/0512/1218.html>.

[作者简介]

杨成武 1994年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为空间激光通信高速信号处理技术。

湛明 1977年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术。

刘向南 1985年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间激光通信总体技术。

李晓亮 1979年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为测控通信技术。

赵卓 1993年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为空间激光通信技术。

林一 1984年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为激光通信编译码技术。