

微小卫星激光通信系统发展现状与趋势

高世杰^{1*}, 吴佳彬¹, 刘永凯¹, 马 爽¹, 牛艳君², 杨会生¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:空间激光通信凭借其速率高、体积小、质量轻和功耗低的优势,成为卫星间高速通信不可或缺的有效手段,特别在微小卫星应用场合,更能体现激光通信的优势。文章详细介绍了微小卫星激光通信技术领域最新的研究进展。在此基础上,总结了需要突破的同轨终端轻量化、异轨终端轻量化、大气湍流影响抑制等关键技术,归纳了工程化应用、双工通信、单点对多点、国产化和批产能力 5 个方面的发展趋势。

关键词:空间激光通信;自由空间光通信;微小卫星;天基互联网;星间通信

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2020-0033

Development status and trend of micro-satellite laser communication systems

GAO Shi-Jie^{1*}, WU Jia-Bin¹, LIU Yong-Kai¹, MA Shuang¹, NIU Yan-Jun², YANG Hui-sheng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of*

Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China*)

* *Corresponding author, E-mail: gaoshijie@ciomp.ac.cn*

Abstract: With its high speed, small size, light-weight and low power consumption, space laser communication has become an indispensable and effective means of high-speed communication between satellites, especially in micro-satellite applications, which can benefit more strongly from the advantages of laser communication. This paper provides a detailed introduction of the latest research progress in the field of micro-satellite laser communication technology. On this basis, key techniques such as light miniaturization of identical orbital terminals, light miniaturization of different orbital terminals and turbulence mitigation technologies are summarized, and the development trends of the technology's applications, duplex communication, single-point to multi-point, localization and batch production capacity are concluded.

Key words: space laser communication; free-space optical communication; micro-satellite; space-based internet; inter-satellite communication

收稿日期:2020-03-02; 修订日期:2020-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11603024, No. 11973041); 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0500100); 民用航天预研项目(No. D04010)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11603024, No. 11973041); National Key R & D Program of China (No. 2016YFB0500100); Civil Aerospace Pre-research Project (No. D04010)

1 引言

质量在 1000 kg 以下的人造卫星统称为“微小卫星”。按照质量由大到小其又可以进一步划分为小卫星、微卫星、纳卫星、皮卫星和飞卫星等。该类卫星具有研制周期短、成本低的特点。由微小卫星构成的卫星网络,在遥感、测距、通信等领域均有其优势,尤其在空间信息网络领域具有广阔的应用前景,可以提供具有低延迟,低成本、高速度、高可靠性的卫星服务。微小卫星已被视为卫星互联网的重要组成。

得益于卫星技术和航天发射技术的进步,逐渐具备低轨道微小卫星系统的大规模部署的条件,继而对星间、星地互联互通数据传输提出了更高的要求,同时微小卫星对其载荷尺寸、质量、功耗和成本,即 SWPaC (Size, Weight, Power and Cost) 4 个方面要求很高。空间激光通信技术具有传输速率高、体积小、质量轻、功耗低、距离远、保密性好和抗干扰能力强等特点,其中速率高、体积小、质量轻和功耗低的特点特别适合应用于微小卫星平台,以适应高通量卫星星座对星间、星地数据传输需求^[1-2]。因此,微小卫星激光通信技术迎来发展契机。

微小卫星间通过激光通信方式进行互联互通,构建成激光通信网络。该网络呈现“网状网”拓扑结构,根据通信链路类型的不同,各节点激光通信系统的用途、功能组成和技术参数也不同。

文章第 2 部分主要围绕用途、功能组成和技术参数 3 个方面总结微小卫星激光通信系统的最新发展现状,第 3 部分总结微小卫星激光通信系统的关键技术,第 4 部分归纳微小卫星激光通信技术的发展趋势。

2 微小卫星激光通信系统发展现状

卫星星座各个卫星节点间的激光链路是通过搭载在卫星上的激光通信系统互联实现的,近年来,典型微小卫星激光通信系统包括美欧日等国的 OCSD、CLICK、VSOTA、FITSAT 和国内的行云 T5。此外,商业化终端也正在形成,包括国外

的 OPTEL-μ、Mynaric CONDOR 和 SA photonics Nexus 等。

2.1 OCSD

OCSD 卫星是由美国 NASA 和美国航空航天公司联合研制的,旨在演示甚小卫星通过激光通信提供高速率数据通信的能力,以验证星地通信。

OCSD-A 星于 2015 年 10 月发射,试验卫星因姿态控制系统发生问题,导致无法对星上的激光通信载荷进行测试^[3]。

OCSD-B/C 星于 2017 年 11 月发射,试验验证了卫星对地下行 50/100 Mbps 的通信能力^[4-5]。激光终端和地面站如图 1 所示。

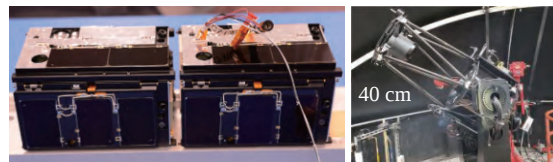


图 1 OCSD-B/C 激光终端和地面站

Fig. 1 OCSD-B/C laser terminals and ground station

OCSD-B/C 的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 OCSD-B/C 系统主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of the OCSD-B/C

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	2.31
2	体积/mm ³	10×10×15
3	通信距离/km	450
4	波长/nm	1064 信号光下行 1550 信标光上行
5	发射功率/W	2
6	速率/Mbps	50/100 验证 (200 Mbps 设计能力)
7	指向方式	依靠卫星姿态指向

OCSD 地面站的主要技术参数如表 2 所示。

表 2 地面站主要参数

Tab. 2 Main technical parameters of the ground station

序号	技术参数	典型值
1	口径/mm	40
2	粗跟踪光学视场/(°)	2
3	精跟踪光学视场/(°)	0.2
4	通信光学视场/(°)	0.06

下行 50 Mbps 和 100 Mbps 的通信结果如图 2 所示。可见, 在没有纠错条件下误码率高达 1.0×10^{-6} 。

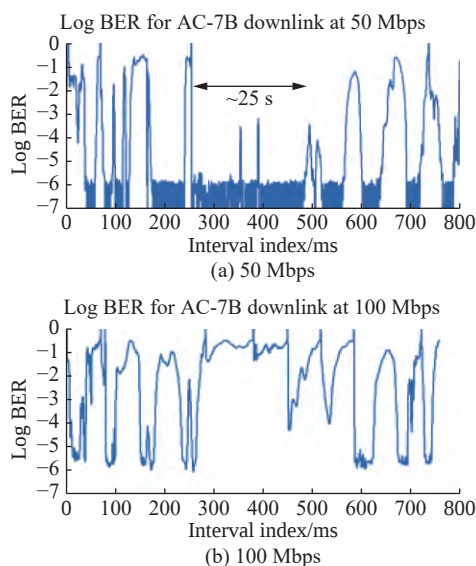


图 2 下行通信误码率(卫星对地)

Fig. 2 BER for the downlink (satellite to ground)

2.2 CLICK-B/C

由美国麻省理工学院 MIT (Massachusetts Institute of Technology)、佛罗里达大学 UF (University of Florida) 和美国航空航天局埃姆斯研究中心 (NASA Ames Research Center) 联合研制的 CLICK 系统, 用于验证星间、星地激光通信。

CLICK-B/C 系统包括光学和电子学两部分^[6], 如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 终端上半部分为光学系统, 下半部分电子学系统, 外形尺寸为 1.5 U (96 mm×96 mm×147 mm)。激光终端采用卫星作为粗指向机构 (Coarse Pointing Assembly, CPA), 利用星历数据解算卫星开环粗指向。精指向机构 (Fine Pointing Assembly, FPA) 是快速反射镜。

CLICK 终端设计中采用了信标光 (976 nm) 和信号光 (1537/1563 nm), 粗跟信标光收发分立设计, 信标光发散角全角为 $22.2 \text{ mrad} (1/e^2)$, 发射功率为 250 mW, 信标光接收分为两部分, 分别为粗跟位置解算和精跟位置解算两个支路。其中: 粗跟解算支路使用分立镜头, 型号为 Aptina MT9P031, 其通光口径为 16.1 mm, 利用 CMOS 面阵探测器解算光斑位置, 信标光精跟位置解算支路用四象限探测器作为位置传感器^[7], 与信号光收发支路共用开普勒 10 倍缩束望远系统, 通光口

径为 20 mm, 利用微机电快反镜 (MEMS FSM) 作为 FPA, 空间光缩束后, 经由近红外/短波红外分色片和短波红外 1537/1563 nm 分色片共分为 3 个光学支路, 分别是信标光精跟位置解算支路, 信号光发射支路和通信支路。在信标光精跟支路和信号光通信支路上装有相应谱段的窄带滤光片。信号光发散角全角为 $120.2 \mu\text{rad} (1/e^2)$, 发射功率为 200 mW。通信支路利用 200 μm 空间靶面 APD 作为探测器。

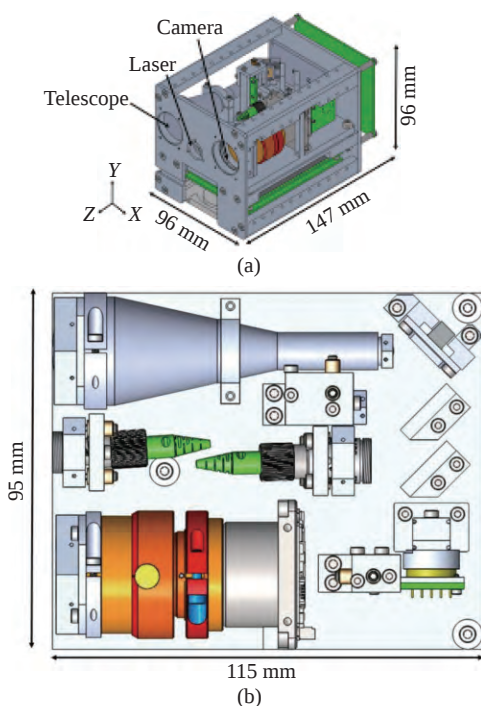


图 3 (a)CLICK 激光终端布局及(b)原理框图

Fig. 3 (a)CLICK laser terminal layout and (b) its principle block diagram

CLICK 的主要技术参数如表 3 所示。

表 3 CLICK 系统的主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of the CLICK system

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	<2.5
2	功耗/W	15 平均
3	通信距离/km	25~580 (星间)
4	波长/nm	1537/1563
5	发射功率/mW	200
6	速率/Mbps	>20 (全双工)
7	指向方式	依靠卫星姿态指向, 自身配有 FPA

2.3 VSOTA

由日本情报通信研究机构(National Institute of Information and Communication Technology, NICT)和东北大学(Tohoku University)联合研制的超小型激光发射模块,用于验证星地激光通信。

VSOTA 的组成如图 4 所示。可见, VSOTA 主要分为 VSOTA-COL 和 VSOTA-E 两部分, 其中: VSOTA-COL 包括激光准直发射和立方体两个部分, 发射激光波长分别是 1 540 nm 和 980 nm, 采用分立光路发射方案, 立方体用于装星标校; VSOTA-E 为激光二极管驱动电气部分。依赖卫星做 CPA, 完成激光的指向功能^[8]。

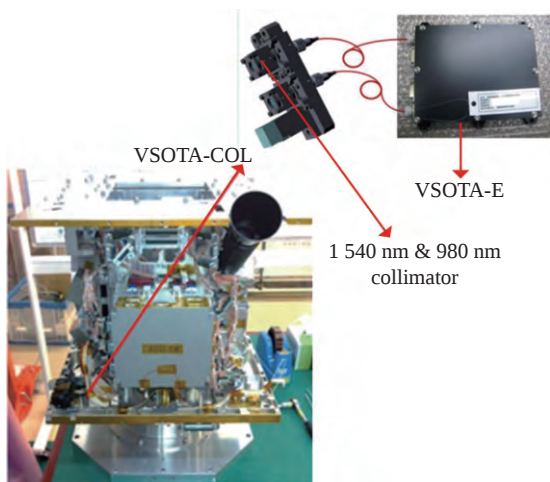


图 4 VSOTA 系统组成

Fig. 4 System composition of VSOTA

VSOTA 的主要技术指标参数如表 4 所示。

表 4 VSOTA 的主要技术指标

Tab. 4 Main technical parameters of the VSOTA

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	<1
2	功耗/W	<10
3	通信距离/km	<2 000
4	波长/nm	通道1: 980, 通道2: 1 540
5	发射功率/mW	通道1: <540, 通道2: <80
6	速率/Mbps	0.1~10
7	指向方式	依靠卫星姿态指向

2.4 FITSAT-1

日本在 2012 年 10 月, 利用国际空间站 ISS (International Space Station) 发射了一颗名为 FIT-

SAT-1^[9] 微纳卫星, 用于试验星地可见光通信, 如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

该卫星上表面(+Z)装载 50 颗绿 LED 阵列, 下表面(-Z)装载 32 颗红 LED 阵列, 发散角为 120°, 波长为 520 nm, 调制频率为 1 kHz, 占空比为 15% 情况下, 绿灯功耗为 30 W, 红灯功耗为 15 W, 轨道高度为 400 km, 通信速率为 1~10 kbps。

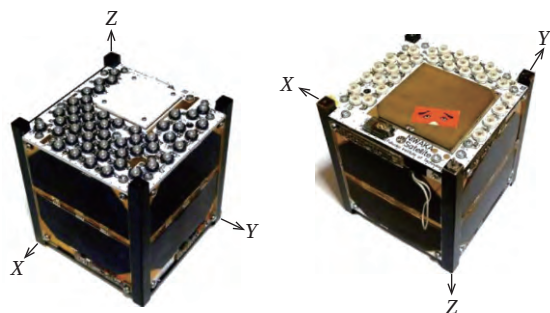


图 5 FITSAT-1 俯视图和仰视图

Fig. 5 Top view and bottom view of the FITSAT-1

2.5 OPTEL-μ

瑞士 OPTEL 公司研制了 OPTEL-μ 星载终端。该项目启动于 2010 年, 目的是将 LEO 卫星上产生的数据以 2.5 Gbps 的速率传输到光学地面站, 遵循轻小型、稳定型和多功能的原则, 为各种低轨道小卫星平台服务, 其系统组成如图 6 所示

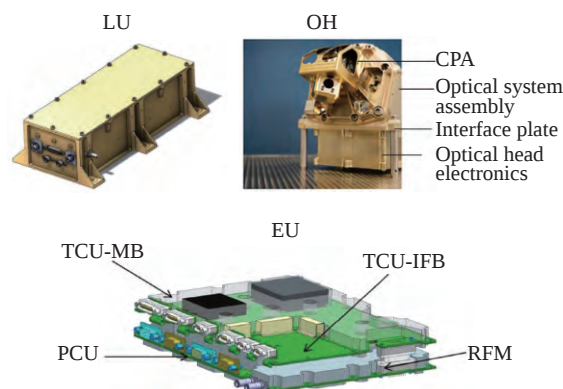


图 6 OPTEL-μ 系统组成

Fig. 6 OPTEL-μ system composition

OPTEL-μ 终端由激光单元 LU(Laser Unit)、电气单元 EU(Electronics Unit)和光学头 OH(Optical Head)3 部分组成, 3 者之间通过导线和光纤连接^[10]。

OH 内部集成了 CPA、光学系统和电气单元 3 部分。其中: OH 用于实现激光扩束发射、激光

耦合接收和光束指向等功能; LU 包括激光源、调制器和放大器, 用于生成待发射光源; EU 包括终端控制器、通信电子电源(TCU)、RF 模块(RFM)和功率调节单元(PCU), 用于完成指向机构控制、激光器控制等功能。

OH 具有光束指向功能, 可用于链路的建立与维持, 在保证指向角度范围和通光口径的前提下, 通过小型化设计, OH 的质量为 4.4 kg, 体积为 204 mm×238 mm×226 mm。

OPTEL- μ 终端的主要技术参数如表 5 所示。

表 5 OPTEL- μ 的主要技术指标

Tab. 5 Main technical parameters of the OPTEL- μ

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	<8
2	功耗/W	<45
3	通信距离/km	400~900
4	波长/nm	1544/1565
5	速率/Gbps	1.25×2(双波长)
6	指向方式	自带CPA和FPA

2.6 Mynaric CONDOR

德国 Mynaric 公司的 CONDOR 星载终端如图 7 所示。CONDOR 用于星间双向通信, 主要包括 CPA、光学系统和电子学 3 部分^[11]。

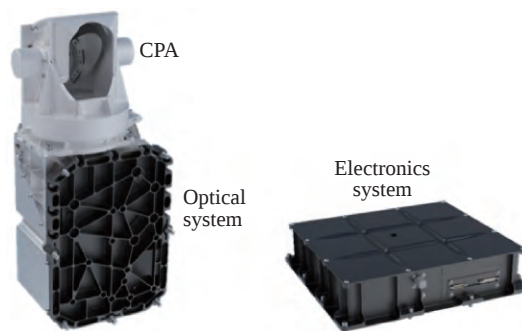


图 7 CONDOR 系统组成

Fig. 7 CONDOR system composition

系统原理框图如图 8 所示^[12]。光路组件主要包括望远镜、FPA、提前瞄准机构(Pointing Ahead Assembly, PAA)、窄带滤光片(BP)、分光片(BS)、跟踪探测器(CTS&FTS)、发射准直和接收单元。

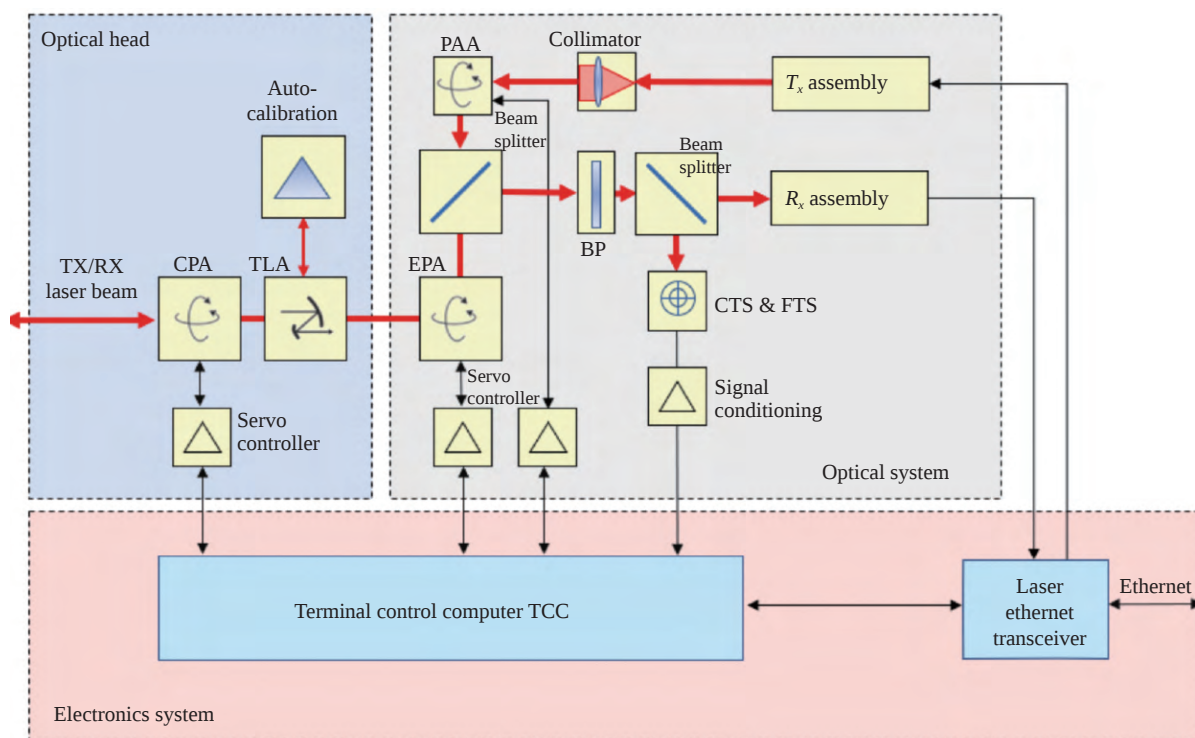


图 8 CONDOR 激光终端原理框图

Fig. 8 Schematic diagram of the CONDOR laser terminal

CONDOR 的主要技术参数如表 6 所示。

表 6 CONDOR 的主要技术指标

Tab. 6 Main technical parameters of the CONDOR

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	<18
2	功耗/W	<60
3	通光口径/mm	80
4	发射功率/W	1
5	通信速率/Gbps及距离/km	<5~10, 5@7780 km
6	波长/nm	1545/1560
7	指向方式	CPA, FPA, PAA

2.7 行云 LaserFleet T5

2020 年 5 月 12 日, LaserFleet 公司为“行云二号”01 星(武汉号)和“行云二号”02 星研制的物联网星间激光通信载荷以“一箭双星”的方式发射成功。这是我国首次尝试低轨卫星星间激光链路技术验证。

LaserFleet 公司首款星间激光通信终端 T5 是搭载在微小卫星上的紧凑型激光通信终端。如图 9 所示。

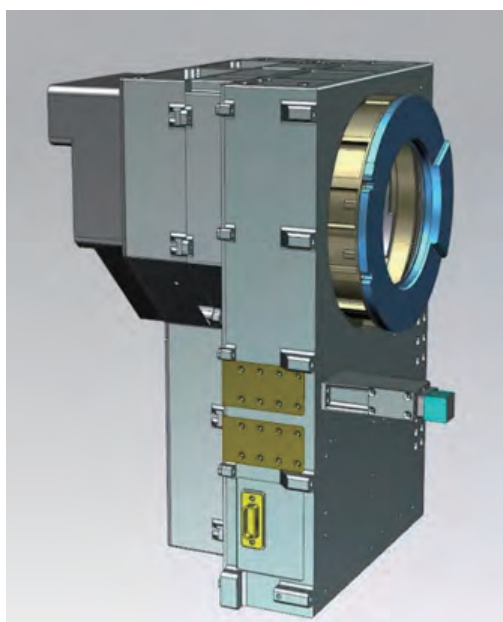


图 9 LaserFleet 公司的星间激光通信终端 T5 布局

Fig. 9 Layout of T5 laser terminal of inter-satellite communication made in LaserFleet company

T5 设计指标如表 7 所示。

表 7 T5 主要技术指标

Tab. 7 Main technical parameters of the T5

序号	技术参数	典型值
1	质量/kg	5
2	通信距离/km	<3 000
3	速率/Mbps	100
4	指向方式	旋转双棱镜±30°

2.8 小 结

文中提及的 VSOTA、FITSAT、CLICK、OCSD、OPTEL-μ、CONDOR 和 T5 几种激光通信终端由于卫星平台能力、业务数据带宽、组网方式等不同,相应的系统组成也不同,主要区别体现在光束指向机构方案不同。通过表 8 可以看到,为满足发射端光束指向要求,第一种方式是依赖微小卫星做 CPA,这时激光终端自身带有 FPA 或者不带 FPA^[13];第二种方式是激光终端自身配有 CPA 和 FPA。另外,对于通信距离远的场合(CONDOR 终端),由于通信双方相对运动会导致发射对准难度增加,这种情况下须配有 PAA。

表 8 激光通信终端光束指向机构

Tab. 8 Laser communication terminal beam pointing mechanism

终端名称	卫星指向	卫星指向和FPA	CPA	CPA和FPA	PAA
VSOTA	√				
FITSAT	√				
CLICK	√	√			
OCSD	√	√			
OPTEL-μ			√	√	
CONDOR			√	√	√
T5			√		

3 微小卫星激光通信的关键技术

3.1 星间同轨激光通信终端轻量化

星间同轨通信场合下,根据轨道高度和轨道面布置卫星数量的不同,通信距离约为 3 000~6 000 km,

依据卫星姿态, 光束粗指向范围小于 5° 。为完成星间互通互联, 一颗卫星上安装的终端数量为 2~3 颗, 终端质量一般小于 8 kg。典型的同轨星间激光通信终端原理框图如图 10 所示, 发射接收部分采用光谱分光方案。

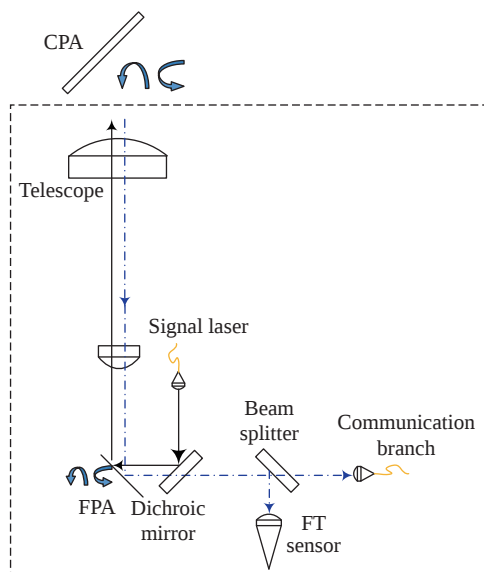


图 10 典型同轨激光通信终端原理框图

Fig. 10 Schematic diagram of typical co-orbit laser communication terminal

为了达到轻小化目的, 进一步缩小系统规模, 除了考虑采用高集成度电子学系统外, 还需要进一步优化跟瞄机构和减少光学支路的数量, 主要包括两方面:

(1) CPA 和 FPA 一体化技术

同轨终端的 CPA 多数情况下为摆镜, 用以修正初始瞄准指向偏差和光束的慢速漂移, 由于摆镜位于终端望远镜前端, 镜面尺寸大。高分辨率的精跟探测器 (FT sensor) 为 FPA 提供位置反馈, 从而实现高精度快速跟瞄。

从 CPA 优化角度出发, 在满足偏转角度的前提下, 提高系统谐振频率, 从而获得更高的系统闭环带宽, 即使其具有镜面尺寸大, 运动范围大、谐振频率高、分辨率高的特点, 如何降低系统功耗和质量, 提高分辨率是关键。

从 FPA 优化角度出发, 在满足谐振频率和分辨率的前提下, 提高偏转角度, 终端即可获得更大的光束指向范围。该类机构的要点是如何在保证

大偏摆角度的同时获得高分辨率, 同时保证一定的镜面尺寸, 使其满足光学缩束和装调要求。

(2) 位置探测支路和通信支路一体化技术

对于通信速率要求不高的应用场合, 将光斑位置探测支路和通信支路合二为一是实现小型化的有效途径, 这样减少了光学支路和分光组件。但是该类系统对于探测器响应和电子学处理系统提出了更高的要求。

3.2 星间异轨激光通信终端轻小型化

星间异轨相比于同轨通信场合复杂, 通信对象可以是同星座的异轨道卫星, 也可以是不同星座的卫星, 轨道高度从低轨道到高轨道, 通信距离范围大, 约为 3000~36000 km, 而终端质量受微小卫星平台约束, 往往小于 20 kg。典型的异轨星间激光通信终端原理框图如图 11 所示。

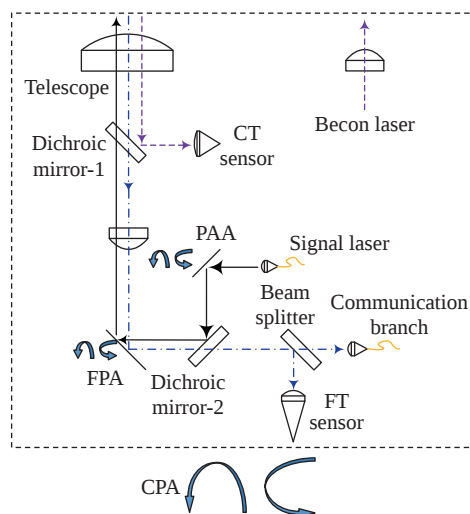


图 11 典型异轨激光通信终端原理框图

Fig. 11 Schematic diagram of typical hetero-orbit laser communication terminal

异轨终端 CPA 是角度摆动范围较大的机构, 如 U 型架、潜望式、大偏摆镜等, 由于通信距离远, 望远镜通光口径偏大, 约为 80~200 mm, 通信双端距离远, 便于搜索捕获, 系统中还存在大发散角的信标光 (Beacon laser) 发射和用于粗跟的信标光位置探测单元 (CT Sensor)。

为了进一步降低系统规模, 除考虑高集成度电子学系统外, 还需要缩小光机部分的尺寸和重量, 主要包括 3 方面:

(1) 粗跟精跟探测器一体化技术

星间异轨终端有 CPA 和 FPA, 在图 11 所示的系统中, CT sensor 为 CPA 提供位置反馈, FT sensor 为 FPA 提供位置反馈, 粗精跟探测器一体化设计, 无疑是精简了位置探测环节, 但是要点在于如何保证捕获阶段大视场和精跟阶段的高分辨率需求, 如何实现一个位置探测器对应粗精跟执行结构的运动解耦, 如何匹配粗精跟位置反馈不同频率要求等, 以上因素均为其研究要点。

(2) CPA 和望远镜一体化设计技术

CPA 和望远镜在异轨终端结构尺寸中占据很大比重, 保证有效通光口径, 实现二者一体化设计, 是实现轻小型的关键。以折射式望远镜和二轴运动机构为例, 图 12 给出了两种一体化设计思路^[14]。该种思路的关键点是光机耦合设计的同时, 还需要保证光学系统的性能及装调可行性。

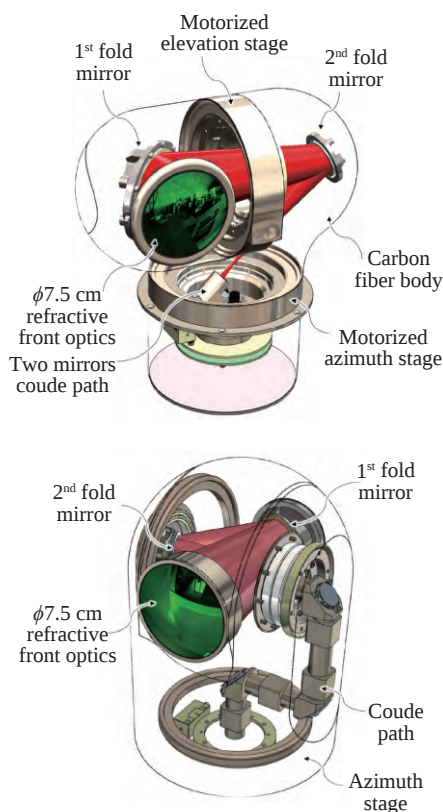


图 12 折射式望远镜及两轴转动结构一体化设计

Fig. 12 Integrated design of refractive telescope and dual axis gimbal

(3) 无信标光捕获技术

无信标光捕获技术, 即利用信号光实现不确定区域的发射扫描和利用信号光位置探测支路实

现不确定区域的捕获: 一方面, 利用 CPA 和 FPA 在扫描角度和扫描频率两方面相互补充, 实现高效的区域扫描; 另一方面是实现发射束散角和接收视场角的实时可调, 从而确保双向捕获的效率, 而发射束散角往往是几十微弧度量级, 如何保证发散角调整过程中, 光轴晃动偏差实时修正是无信标光捕获技术的实现要点。

3.3 星地通信大气影响抑制技术

星地激光通信链路, 大气会给激光传输带来衰减、闪烁和漂移等影响^[15], 出现激光光束质量裂化、接收端光功率起伏范围大、接收光功率衰减增加等现象, 导致光学接收支路调光困难^[16], 退化光斑位置提取处理复杂^[17-18], 跟瞄精度下降, 通信质量变差, 通信距离减少等问题。当前, 大气影响因素是星地激光通信链路规划、激光通信终端设计过程中一个无法量化的因素^[19]。通过加大接收光学天线口径、引入自适应光学技术^[20-21]、高阶调制解调方法、编码纠错和光纤章动^[22]等技术手段能一定程度上抑制大气影响。但不同地域、不同天候以及环境变化带来的大气影响是实时变化的, 因此, 激光通信大气影响抑制技术属于理论和实践不断迭代、不断深入的一项技术。

4 发展趋势

4.1 太空互联网大发展将加快微小卫星激光通信技术从演示验证向工程应用的步伐

当前国内外空间信息网络发展迅猛, 据悉, 中国航天科技集团“鸿雁”星座(300 颗)、中国航天科工集团“虹云”星座(156 颗)和“行云”星座(80 颗)、中国电子科技集团“天地一体化”(80 颗)等; 国外“Kuiper”星座(3236 颗), “Telesat”星座(298 颗), “Starlink”网络(1.2 万颗)等^[23-24]星座大都由低轨道微小卫星组成, 大都将激光通信列为其骨干传输链路方式之一。其中, 截止 2020 年 4 月 22 日, “Starlink”星座在轨卫星已经达到 422 颗, 计划从 2020 下半年开始发射装备有星间激光通信链路的卫星。

从军事应用角度看, 欧美等国家也在加快布置微小卫星互联网。据美国国防部高级研究计划

局(DARPA)官网 2020 年 5 月 11 日报道, DARPA 正在与美国太空军和太空发展局合作, 计划于 2020 年底和 2021 年将“黑杰克”项目的小卫星发射到低地球轨道, 用于验证卫星星座自治和空间网状网技术。该星座星间互联采用了激光通信技术, 激光终端由 SA 光子公司提供。

由上可见, 太空互联网大发展, 军民两大应用领域都将加快微小卫星激光通信技术的发展步伐, 缩短从演示验证向工程应用的过渡时间。

4.2 终端双向传输能力需求

卫星业务数据最终要回传至地面, 建立具有中继数传能力的微小卫星星座, 实现数据在星间的中继传输, 是实现卫星对地下行传输行之有效的手段。因此, 具有双向数传能力的星载激光通信终端更加适用于微小卫星应用场合, 而收发速率匹配是实现高效率中继的保障, 因此, 激光终端要具有全双工高速率通信能力。

德国 Mynaric 公司的 CONDOR 终端目的即实现星间全双工 5~10 Gbps 通信。

4.3 单点对多点通信能力需求

随着激光通信技术在天基通信网络(GEO、MEO、LEO)中的逐步应用, 激光通信组网成为未来主要发展趋势。然而, 受激光发散角小、动态接入、空间环境等影响, 当前激光通信都是点对点互联, 实现卫星组网的, 因此, 单个卫星上需要安装多台激光通信终端。受微小卫星平台资源限制, 解决上述问题可通过优化终端质量功耗, 达到要求更加严格的 SWaP 水平; 研究动态路由解决接入问题; 研究激光终端单点对多点通信能力。对于瞄准星间组网一点对多点的目标, 美国加利福尼亚大学研究的 ISOC(Inter-spacecraft Omnidirectional Optical Communicator)^[25] 提供了一种思路, 系统中每个单元利用 MEMS 快速反射镜摆动可覆盖 $\pm 12^\circ$ 的光学空间锥角, 将多个发射接收单元拼接为阵列球型, 可实现全天域空间角度覆盖(除卫星安装面遮挡外)。ISOC 系统光学头布局 and 实现原理如图 13(彩图见期刊电子版)所示。系统设计指标如下: 通信距离为 200 km, 通信速率为 1 Gbps, 波长为 850 nm, 发射功率为 1 W。

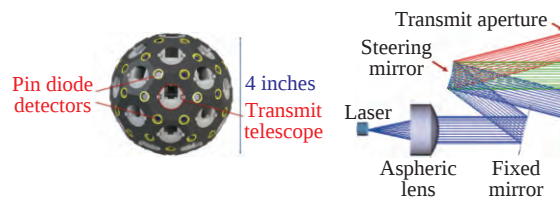


图 13 光学头布局及原理图

Fig. 13 Layout of optical head and its principle diagram

4.4 整机国产化能力需求

微小卫星激光通信终端主要包括瞄准、跟踪、光电位置探测和调制解调等部分, 单元组件包括光学元件、电机、测角组件、快反、光斑位置解算(CMOS 焦平面探测器、QAPD 等)、通信组件(耐辐照光纤、光纤放大器、直接探测器组件、相干探测组件等)、信号处理组件(FPGA、DSP 等), 当前我国相关研究机构正在开展相关组件的国产化研究, 整机国产化率要求也将从组件国产化发展为器件国产化。

4.5 批量生产及低成本能力需求

未来对微小卫星激光通信终端的需求量巨大, 发射组网规划要求缩短生产周期。综合考虑以上要求, 微小卫星激光通信终端研制方应在具有批量生产能力的同时降低终端研制成本, 保证 SWPaC, 最终形成货架产品 COTS(Commercial Off The Shelf)。

5 结束语

空间激光通信凭借其带宽大、质量小、功耗低等优势, 有望成为未来空间高速通信的主要方式, 在卫星互联网的应用中扮演重要角色。美国、欧洲和日本均已深入研究空间激光通信关键技术, 且完成了多项在轨试验, 正走向商业化运行, 微小卫星激光通信领域发展也很迅猛, 多项验证均已开展。我国虽然起步晚, 但是近年发展很快, 完成了 LEO-地、GEO-地、MEO-地、MEO-MEO、GEO-GEO、空空、空地等多项试验验证。

本文以微小卫星激光通信系统为切入点, 综述了其部分发展现状, 归纳了发展趋势, 有助于该领域研究人员及时了解发达国家在微小卫星激光通信领域的发展现状和发展规划, 有利于提前做

好技术准备,使我国空间激光通信技术稳步推进, 让该技术助力微小卫星互联网快速发展。

参考文献:

- [1] CAPLAN D O, CARNEY J J, LAFON R E, *et al.*. Design of a 40-watt 1.55 μm uplink transmitter for lunar laser communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8246: 82460M.
- [2] KOYAMA Y, TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, *et al.*. SOTA: small optical transponder for micro-satellite[C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications*, IEEE, 2011: 97-101.
- [3] JANSON S, WELLE R, ROSE T, *et al.*. The NASA optical communications and sensor demonstration program: initial flight results[C]. *Proceedings of the 29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2015.
- [4] ROSE T S, ROWEN D W, LALUMONDIERE S, *et al.*. Optical communications downlink from a 1.5U Cubesat: OCSD program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 11180: 11180J.
- [5] ROWEN D, JANSON S, COFFMAN C, *et al.*. The NASA optical communications and sensor demonstration program: proximity operations[C]. *Proceedings of the 32th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2018.
- [6] YENCHESKY L, CIERNY O, GRENFELL P, *et al.*. Optomechanical design and analysis for nanosatellite laser communications[C]. *Proceedings of the 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2019.
- [7] SERRA P, CIERNY O, DIEZ R, *et al.*. Optical communications crosslink payload prototype development for the Cubesat Laser Infrared Crosslink (CLICK) mission[C]. *Proceedings of the 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2019.
- [8] KUWAHARA T, YOSHIDA K, TOMIOKA Y, *et al.*. Laser data downlink system of micro-satellite RISESAT[C]. *Proceedings of the 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
- [9] TANAKA T, KAWAMURA Y, TANAKA T. Development and operations of nano-satellite FITSAT-1 (NIWAKA)[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 107: 112-129.
- [10] BAISTER G, GREGER R, BACHER M, *et al.*. OPTEL- μ LEO to ground laser communications terminal: flight design and status of the EQM development project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10562: 105622U.
- [11] MÜNCHBERG S, GAL C, HORWATH J, *et al.*. Development status and breadboard results of a laser communication terminal for large LEO constellations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 11180: 18034.
- [12] CARRIZO C, KNAPEK M, HORWATH J, *et al.*. Optical inter-satellite link terminals for next generation satellite constellations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11272: 1127203.
- [13] 吕佳飞. 微小卫星激光通信终端跟踪机构的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
LV J F. Research for the spaceborne laser communication terminal tracking-pointing turntable[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese).
- [14] TALMOR A G, HARDING JR H, CHEN C C. Two-axis gimbal for air-to-air and air-to-ground laser communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9739: 97390G.
- [15] 李波, 王挺峰, 王弟男, 等. 激光大气传输湍流扰动仿真技术[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 289-295.
LI B, WANG T F, WANG D N, *et al.*. Simulation of laser beam propagation through turbulence[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 289-295. (in Chinese)
- [16] 赵海丽, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间光通信中高帧频相机动态调光技术研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 267-270.
ZHAO H L, JIANG H L, WANG X M, *et al.*. Dynamic light-adjusting technology of high frame frequency CCD camera in space optical communication system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 267-270. (in Chinese)
- [17] 王玉坤, 贾娜, 张锐. 激光通信成像光斑处理方法研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32(9): 736-740.
WANG Y K, JIA N, ZHANG R. Laser communication spots imaging process method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(9): 736-740. (in Chinese)
- [18] 高世杰, 盛磊, 吴志勇, 等. 大气激光通信光斑图像的快速复原与实时检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2393-2399.
GAO SH J, SHENG L, WU ZH Y, *et al.*. Rapid restoration and real-time detection on spot image of atmospheric laser

- communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2393-2399. (in Chinese)
- [19] 马晶, 高庞, 谭立英, 等. 星地光通信中PAT链路的衰落冗余[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 308-314.
MA J, GAO P, TAN L Y, *et al.*. Fade budgets of PAT link in satellite-to-ground optical communications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 308-314. (in Chinese)
- [20] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 337-351. (in Chinese)
- [21] 刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2605-2610.
LIU CH, CHEN SH Q, LIAO ZH, *et al.*. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2605-2610. (in Chinese)
- [22] 吴天琦, 王睿扬, 王超, 等. 单模光纤章动跟踪耦合系统设计[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 62-69.
WU T Q, WANG R Y, WANG CH, *et al.*. Design of single mode fiber optic nutation tracking coupling system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 62-69. (in Chinese)
- [23] 付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.
FU Q, JIANG H L, WANG X M, *et al.*. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [24] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
JIANG H L, AN Y, ZHANG Y L, *et al.*. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 34(3): 207-217. (in Chinese)
- [25] VELAZCO J E, WERNICKE D, GRIFFIN J, *et al.*. Inter-spacecraft omnidirectional optical communicator for swarms[C]. *Proceedings of the 33th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2019.

作者简介:



高世杰(1979—),男,吉林抚松人,副研究员,博士,2003年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光通信技术研究。E-mail: gaoshijie@ciomp.ac.cn



吴佳彬(1988—),男,吉林舒兰人,助理研究员,博士,2011年于吉林大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光斑位置检测及快速偏转镜技术的研究。E-mail: wujb@ciomp.ac.cn



刘永凯(1989—),男,黑龙江黑河人,助理研究员,硕士,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事高精度光束跟踪、指向与控制技术的研究。E-mail: liuyongkai_ciomp@163.com



马爽(1987—),男,吉林长春人,助理研究员,博士,2010年于吉林大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事大气激光通信调制解调技术的研究。E-mail: jy01892231@126.com



牛艳君(1982—),女,吉林公主岭人,硕士,讲师,2004年、2006年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,主要从事基础数学相关研究。E-mail: 992585016@qq.com