

## 激光星间链路发展综述: 现状、趋势、展望

李 锐<sup>1,2,5</sup>, 林宝军<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, 刘迎春<sup>1,2,5</sup>, 沈 苑<sup>1,5</sup>, 董明信<sup>1,5</sup>, 赵 帅<sup>1,5</sup>, 孔陈杰<sup>1,5</sup>, 刘恩权<sup>1,5</sup>, 林 夏<sup>1,5</sup>

(1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210;

4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

5. 上海微小卫星工程中心, 上海 201210)

**摘 要:** 由于激光通信在空间传输中波长短且方向性强, 已成为下一代卫星通信与导航的重要手段。激光星间链路的高速率、高带宽、高安全性等特点, 可以提供高质量卫星空间通信, 同时其还可以提高星间测距的精度, 因此, 构建激光星间链路成为下一代卫星网络的研究重点之一。文中首先从技术层面介绍激光星间链路的基本组成, 主要介绍了卫星激光建链模式、卫星激光信号调制模式及卫星激光载波波长三个重要技术点。从技术到现象, 根据不同轨道高度和不同的任务需求, 按照发射时间顺序综合调研并总结了近年来国内外典型中高轨和低轨卫星激光通信成果的发展现状与未来计划。通过调研, 进一步从宏观角度分析出卫星激光通信发展标准化、兼容化、网络化和商业化四个趋势, 并从微观角度总结了卫星激光终端弹性和模块化的发展方向。最后, 除了作为通讯手段, 展望了星间激光链路用于卫星激光测距的良好前景。通过对激光星间链路的现状、趋势和展望的综合分析, 旨在为未来激光星间链路的设计与优化提供一定的借鉴和参考, 并为我国未来星间激光通信和测距技术的发展及研究提供方向参考。

**关键词:** 通信与信息系统; 激光星间链路; 卫星激光通信; 激光通信终端; 卫星测距

**中图分类号:** V474.2; TP393 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220393

### 0 引 言

近年来, 星间链路在下一代卫星网络中扮演着重要的角色。星间链路是航天器之间实现在空间中通信或测距的手段<sup>[1]</sup>。应用星间链路, 可以支持建立全球覆盖的卫星骨干网络, 实现全球卫星的管控, 极大地提升其不依赖于地面系统的独立性, 扩充系统通信容量, 解决地面测控站星地数传地域局限性, 从而提升系统的抗毁性、自主性、机动性和灵活性。

激光通信具备高信道吞吐率、高传输带宽、强抗干扰能力、高保密性和安全性等优点。实现激光通信的激光终端同时具备轻量级和高能效的特点, 可以较

好地支持如今日益增加的数据传输需求, 使得激光链路成为实现下一代星间链路颇具前景的手段之一<sup>[2]</sup>。同时, 激光通信终端设备向着更小体积、轻量化和低功耗的方向发展, 这也符合卫星平台对有效载荷小型化、轻型化、低能耗的要求<sup>[3]</sup>。中国的“星网”、“鸿雁”、“虹云”、“行云”以及“天地一体化”星座和国外的“Kuiper”、“Telesat”、“Starlink”网络等已经将激光星间链路作为其核心传输链路的方式之一, 激光通信终端也将在未来航天器载荷中成为标准通信设备, 可以预见, 星间通信将从电波时代向着激光时代不断发展转变。

卫星测距应用可应用于导航卫星的自主定轨和

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2022-07-05

作者简介: 李锐, 男, 工程师, 博士生, 主要从事空间激光通信、空间网络拓扑及路由、导航卫星技术等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 林宝军, 男, 研究员, 博士, 主要从事飞行器设计及仿真方面的研究。

对空间星体的探测等方面。导航组网卫星实现自主精确定轨的前提是可靠的星间通信与精确的星间测距能力。通过采用激光星间链路可以增加星座系统的鲁棒性、安全性、防窃听能力,同时可以提高导航卫星系统的星间测距精度以及星间通信速率,从而提高导航卫星系统的自主导航能力。因此,除了高速空间通信,激光星间链路也将提供一种精密测距的途径。

激光星间链路的发展已经吸引了国内外的目光。参考文献[3]较早地综述了空间激光通信的技术优势,主要总结了2011年以前国外空间激光通信系统运行计划和相应的参数指标。参考文献[4]在其基础上进一步调研了2018年以前国内外空间激光通信的关键技术试验。参考文献[5]仅面向高轨卫星激光通信,调研了高轨激光星间链路的建链情况、网络建设计划及终端发展。而参考文献[6]则更关注微小卫星激光通信系统发展趋势。参考文献[7]额外结合了深空探测需求,总结出激光星间链路高速化、深空化、集成化、网络化和全光化五个大趋势。相比于上述激光星间链路发展综述,文中首先从技术到现象的逻辑顺序更加全面地介绍了激光星间链路的发展现状。通过调研近年来国内外激光星间链路在不同轨道和不同任务需求上的最新发展和未来计划,从终端和链路两个角度分析了激光星间链路的发展趋势,且调研覆盖面更新更广,时间跨度更大。最后,除了激光星间链路用于通信的调研,进一步展望了该链路用于卫星测距的应用前景,为激光星间链路的未来发展提供借鉴。

## 1 卫星激光通信技术

对比传统基于无线电波的卫星通信,卫星激光通信具有频率更高且方向性更强的特点,因此可以实现更快、更高体量的数据传输<sup>[8]</sup>,对于日益增长的短报用户入站需求,激光星间链路可大幅提升用户接入数量、用户入站效率和短报文信息回传实时性。其次,星间激光通信不需要向国际电联申请特

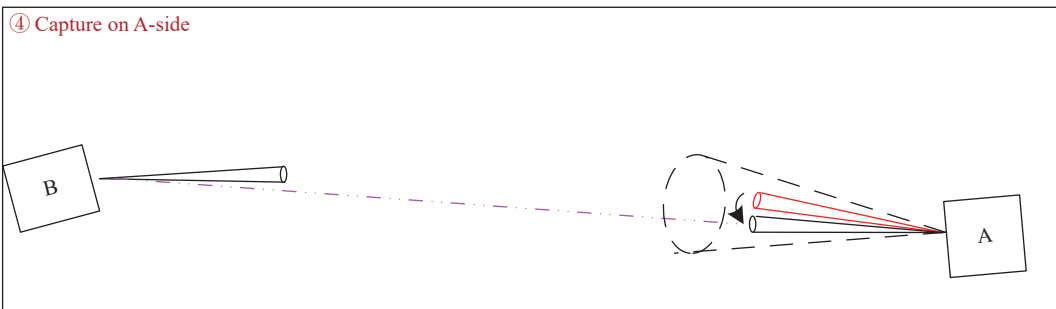
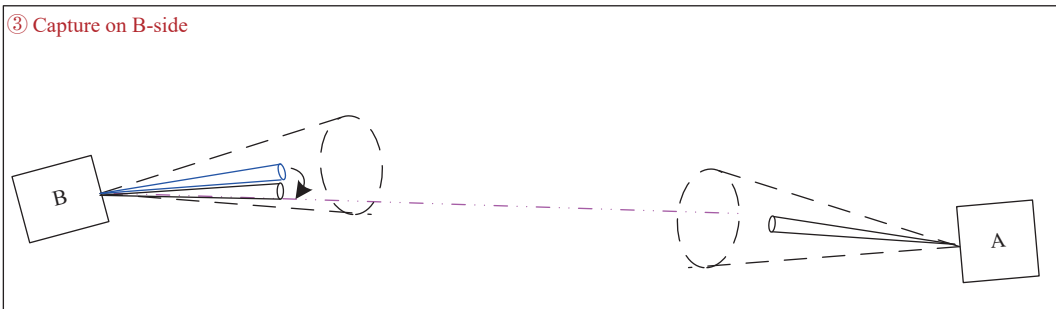
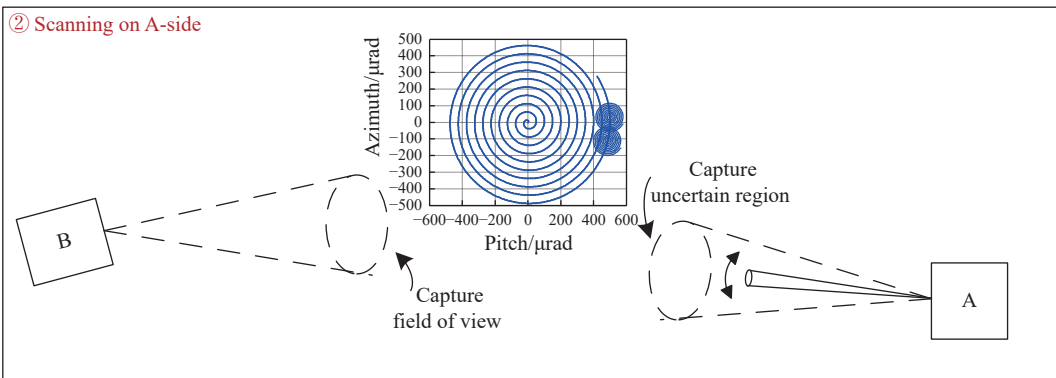
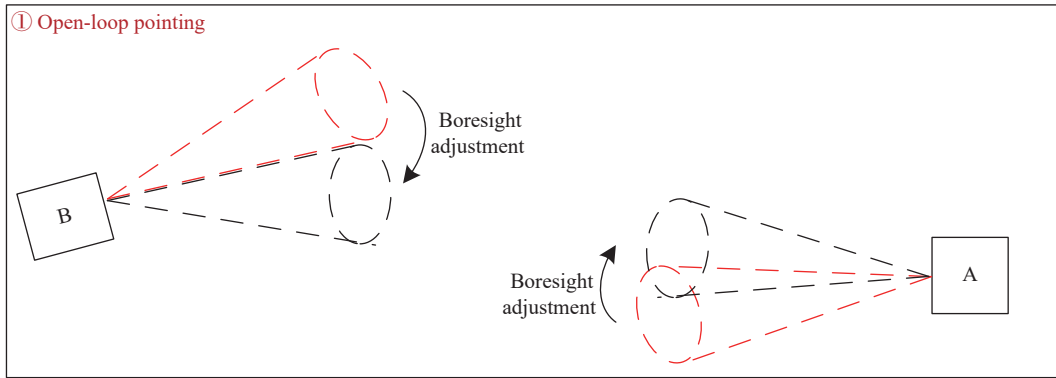
定频段,使得频道使用更加便捷。此外,卫星激光通信频谱属于不可见光频段,通信时不易被发现,其波束比微波更窄,发散角更小,指向性好,从而使得通信获得很好的抗干扰能力和抗截获能力,提供了更高的安全性和可靠性。最后,星间激光通信具有很高的能量集中度,当需要很高的链路通信速率时,激光通信终端在体积、质量和功耗方面的优势变可以体现,而这也符合当今卫星平台对有效载荷的要求<sup>[7]</sup>。

星间激光通信终端是一种光机电综合系统,具体包括光学、跟瞄和通信三个基础分系统,并且配有热控、配电等模块。其中,通信分系统主要实现电学信号和激光载波的转换<sup>[5]</sup>。为了展示激光星间链路的主要技术实现,主要介绍卫星激光通信的三个重要技术角度,包括卫星激光建链模式、卫星激光信号调制模式及卫星激光载波波长。

### 1.1 卫星激光建链模式

星间激光建链主要依赖捕获、跟踪和瞄准三个步骤,综合称为PAT(Pointing Acquiring Tracking)系统。PAT系统是一种复合控制系统结构,包含瞄准机构、控制及传感系统三个主要部分。瞄准机构进一步可以划分为粗瞄准、精瞄准及预瞄准机构。粗瞄准阶段用到的感光元器件为CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)和CCD(Charge coupled Device)的组合。其中CMOS技术成熟且成本低,可做成大面积阵列用于提高捕获搜索面积,但该器件对光束边缘的模糊度分辨力低。精瞄准阶段用到的感光元器件则是QD(Quantum Dots)与CCD的组合。其中QD对不同波长的激光隔离度较好且目前技术成熟,但其对光的敏感度不高,容易出现定位精度不准的问题。两个阶段中都采用了CCD器件,该器件对光强敏感,但价格较高,技术也不够成熟,面阵容易出现坏点。因此,在两个阶段中均将其作为器件的组成部分之一,用以扬长避短。

信号光捕获跟踪过程示意图如图1所示,共由六个主要步骤组成,分别为开环指向、主动端扫描、被动端捕获、主动端捕获、双端捕获和稳定跟踪。



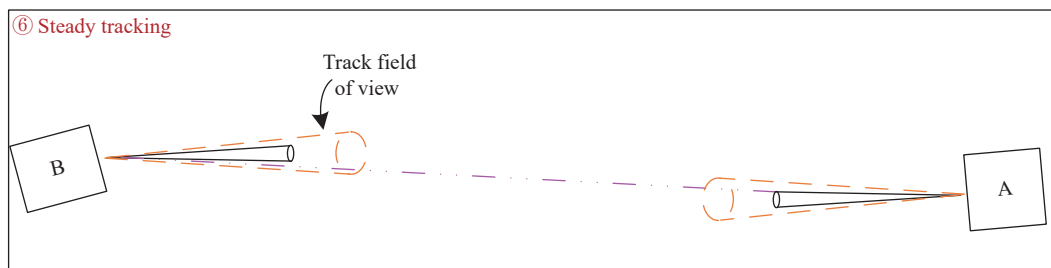


图 1 信号光捕获跟踪过程示意图

Fig.1 Illustration of the PAT process

(1) 开环指向: 主动端、被动端激光终端均根据链路卫星星历 (卫星的轨道的计算值) 和本地卫星平台的姿态信息计算出跟踪指向引导数据, 控制光学天线视轴以数字引导跟踪方式实现对对方终端的开环指向跟踪。

(2) 主动端扫描: 主动端激光终端按照扫描策略, 控制光学天线视轴在设置的捕获不确定区域内扫描, 并在扫描路径的每个点上通过抖动扫描形成一个等效宽波束信号光, 降低平台微振动引起的漏扫概率。

(3) 被动端捕获: 被动端激光终端信号光捕获探测器探测到主动端激光终端的信号光后, 根据信号光探测角误差和超前瞄准角值, 调整视轴跟踪瞄准主动端。

(4) 主动端捕获: 主动端激光终端信号光捕获探测器探测到被动端激光终端的信号光后, 停止扫描, 根据信号光探测角误差和超前瞄准角值, 调整视轴指向, 跟踪瞄准被动端。

(5) 双端捕获: 双方均捕获到对方信号光后, 均根据信号光捕获探测器反馈的信号光探测角度误差实时调整视轴指向, 进入稳定双端捕获状态。

(6) 稳定跟踪: 双方根据信号光捕获探测器输出的角误差将目标引入相干跟踪探测器视场, 完成捕获状态向跟踪状态的切换, 并根据平衡探测器是否探测到光信号进行跟踪点校正, 建立稳定跟踪。稳定跟踪后, 双方均关闭信号光强度调制, 开启信号光相位调制, 按通信速率要求向对方发射固定数据的调制信号光。

(7) 通信接收: 双方接收固定数据的调制信号光后, 开始载波频率捕获和锁相, 并采用相干探测精跟踪模式。信号光锁相完成后, 固定数据能够解调正确, 即具备测量通信条件, 完成建链。

如今激光终端控制通常采用上述的一对一机械

光束建链过程, 然而该方式接入系统所耗用的时间较长, 光束的指定方向是同一个方向, 因此在通信链路上只能达到点对点的程度, 不能同时进行多个终端的动作, 达不到高效组网的需求。而为对光束的方向及其形状进行改变, 研究者们提出了基于光学的球面光学头阵列<sup>[9]</sup>, 使用电子可编程方式, 进而对光学头指向进行控制, 能对波束角度进行快速调整。该方法能以极快的速度对角度进行变换, 并具备较高的分辨率等, 在未来激光星间链路组网发展上具有较大的潜力。

### 1.2 卫星激光信号调制模式

卫星激光通信分系统中的电光调制单元和光解调单元负责卫星激光通信中光信号的调制和解调, 而调制方法可以分为非相干通信和相干通信两大类。非相干通信体制通过强度调制/直接探测 (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 方式实现, 具体可以分为开关键控 (On-Off Keying, OOK) 方法和脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 方法。相干通信体制<sup>[10]</sup>通过相位调制和相干探测的方式实现, 包含二进制相移键控 (Binary Phase-Shift Keying, BPSK) 方法、差分相移键控 (Differential Phase-Shift Keying, DPSK) 方法和正交相移键控 (Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK) 方法<sup>[4]</sup>。

(1) OOK 调制/直接探测体制: 该调制简单地将在特定时间段内将存在载波表示为二进制 1, 而其不存在则表示为二进制 0。该体制解调技术简单, 在空间激光通信发展初期普遍被选用, 但该体制探测灵敏度较低, 易受背景光和大气湍流的影响。

(2) PPM 调制/单光子探测体制: PPM 不同于 OOK, 在于其将特定时间段内的存在载波表示为二进制对应序号。尽管该调制体制带宽的资源利用率低, 不利于进行高速率的通信。但该直接探测体制所采

用的信号光脉冲时隙占空比低,在平均激光探测功率受限的情况和条件下,易于激光脉冲获取更高峰值功率;同时,由于该体制可利用超导纳米线单光子探测器,因此可以实现单光子量级的接收灵敏度。上述两种因素使得该体制更适用于码速率要求不是太高、但链路距离遥远的月地及深空激光链路。

(3) DPSK 调制/自差探测体制:该体制利用调制信号相邻两个码元之间载波相位差来传递信息。其探测灵敏度处于直接调制探测和相位调制探测体制之间,抗背景干扰能力较强,是目前星地高速激光通信系统中主要选用的通信体制之一。在自由空间光链路系统中,大气湍流会导致激光束的强度闪烁和相位起伏,因此可以通过考虑了大、小尺度湍流引起的强度闪烁和相位变化分布,采用分布式天线阵列接收技术完成自动编码补偿<sup>[11]</sup>。

(4) BPSK 调制/相干探测体制:该体制利用二元数字基带信号,根据相差为 $180^\circ$ 的载波相位信息来进行编码,包括零差探测和外差探测两种情况,但不论哪种情况均需采用本振激光对接收信号光进行混频。由于激光链路中存在多普勒频移,该体制必须对多普勒频移进行有效的补偿。受限于当前多普勒频移补偿的能力,对于补偿 $30\text{ GHz}$ 范围的频移量存在一定困难。同时,相干激光通信具有较高的灵敏度和非常强的抗背景噪声能力,是目前星间、星地远距离高速激光通信系统的首推技术。

(5) QPSK 调制/相干探测体制:不同于 BPSK 调制方式,QPSK 是一种基于四进制的相位调制方式,调制过程中主要采用了 $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 和 $315^\circ$ 四种载波相位。这种调制方式可以提供更快的通信速率,主要用于支持星间或者星地的高速率通信,但同时需要满足频率稳定性的要求。

由于相干体制相比于非相干体制有频谱效率高等优势,对于需要承载更复杂和精细的通信任务的中高轨卫星,其激光星间链路多采用相干通信体制调制,如欧洲数据中继系统 EDRS(European Data Relay System)-A 采用 BPSK 调制<sup>[12]</sup>;美国激光通信中继演示验证(Laser Communications Relay Demonstration, LCRD)<sup>[13]</sup>和日本数据中继卫星系统(Japanese Data Relay Satellite, JDRS)<sup>[14]</sup>采用 DPSK 调制方式。而目前低轨卫星激光通信和深空探测项目主要采用非相

干通信体制调制,如美国的立方卫星激光红外连接(CubeSat Laser Infrared Crosslink, CLICK)任务<sup>[15]</sup>采用 PPM 下行调制方式;快速国际科学实验卫星的超小型光转发器(Very Small Optical Transmitter, VSOTA)<sup>[16]</sup>采用 OOK/PPM 下行调制方式;日本数据中继卫星 JDRS<sup>[14]</sup>前向采用 IM/DD 调制。但由于相干光通信需要外调制与本振光相干检测等需求,其技术更加复杂,终端重量与功耗也相对较高,例如 EDRS<sup>[12]</sup>基于高轨卫星平台的激光终端通信距离达到 $75\ 000\text{ km}$ ,但激光终端质量高达 $53\text{ kg}$ ,整体功耗 $180\text{ W}$ 。因此,通信制式的选择除了根据轨道的高低不同,也要根据特定的任务需求合理搭配。

### 1.3 卫星激光载波波长

红外光辐射范围按照波长可以被大致划分为两类: $750\sim 3\ 000\text{ nm}$ 为近红外; $3\ 000\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 为远红外。其中,激光通信链路采用 $750\sim 1\ 600\text{ nm}$ 的近红外波长范围,对比无线电通信采用 $30\text{ mm}\sim 3\text{ m}$ 的波长范围,这种上千倍的波长差使得激光通信可以提供更高质量的卫星通信服务<sup>[17]</sup>。

目前各国的卫星激光通信在通信波长的选择上也有所区别。不同的波长选择对星间链路的表现和探测器的敏感度影响不同,具体来说,更低的波长可以带来更大的天线增益,但更高的波长又能提供更低的信号瞄准衰减。为了降低太阳背景和太阳散射带来的影响,目前激光通信主要考虑在 $500\sim 2\ 000\text{ nm}$ 范围内进行选择。由于地面工业级激光器元器件多采用 $1\ 550\text{ nm}$ 波长激光为标准制备,只需要较低成本就可以将通信技术迁移到卫星网络,因此目前美国与日本多采用 $1\ 550\text{ nm}$ 波长通信,如日本 JDRS<sup>[14]</sup>和美国 LCRD<sup>[13]</sup>均采用 $1\ 550\text{ nm}$ 波长通信,其各自型号的后继任务也继续延用了前几代采用的波长体制。另外,随着技术发展,各国的通信体制都在向更加兼容的方向发展,即同时兼容 $1\ 064\text{ nm}$ 与 $1\ 550\text{ nm}$ 波长,如计划 $2025$ 年发射的欧洲数据中继系统 EDRS-D<sup>[12]</sup>与高通量光学网络系统 HydRON<sup>[18]</sup>都兼容 $1\ 064\text{ nm}$ 与 $1\ 550\text{ nm}$ 波长通信。

## 2 国内外激光通信发展现状

各国陆续在星间激光通信领域成功开展了多项不同轨道的在轨技术验证,并进入规模化应用阶段。

调研发现目前在轨技术验证除了采用定制化的激光终端,以满足各项任务的具体需求,为了支撑下一代太空体系大规模部署激光通信载荷的发展目标,各国的商业化航天科技公司如 TESAT、Mynaric、Hyperion Tech、Thales Alenia Space、NICT 等开始推出更高速率、更小质量和体积及更低功耗的激光终端产品,这些终端产品可以适应同类多任务的普适需求。根据不同轨道高度任务需求不同,按照发射时间顺序总结了自 2015 年起至今中高轨和低轨卫星激光通信成果的发展现状与未来计划,如表 1 所示。其中,链路形式表明了卫星所在的轨道高度。根据星地高度以及与赤道面的夹角不同,卫星轨道可分为五种类别:低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO)、中地球轨道 (Middle Earth Orbit, MEO)、地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GEO)、地球同步转移轨道 (Geosynchronous Transfer Orbit, GTO)、太阳同步轨道 (Sun-Synchronous Orbit, SSO)<sup>[19]</sup>,表中用缩写表示。

## 2.1 国外典型技术验证计划

根据表 1,按代表性地区归纳出欧洲、美国、日本、中国的典型技术验证计划,具体分析其技术细节和发展历程,以进一步总结国内外卫星通信发展现状和趋势。

### 2.1.1 欧洲

欧洲数据中继系统 EDRS 基于 GEO 卫星平台建立的卫星中继平台,搭载了激光和 Ka 两种模式的通信载荷,通过该终端载荷连接低轨到高轨和高轨到地面的通信,可以为低轨卫星用户、航空用户、无人机用户和地面终端设备提供中继服务。其通信距离为 45 000 km,激光发射功率为 5 W,通信速率为 1.8 Gbps,通信制式为 BPSK,激光波长为 1 064 nm,并采用双向通信<sup>[7]</sup>。

2016 年 6 月,EDRS-A 采用了星间激光通信,信息速率为 600 Mb/s,每天为 40 颗低高轨卫星提供中继服务<sup>[12]</sup>。2019 年 8 月,EDRS-C 成功发射到地球静止轨道运行,其激光星间链路的实现终端架设于 SmallGEO 开发的平台上<sup>[20-21]</sup>。预计于 2025 年补充的第三颗卫星 EDRS-D 的有效载荷将由三个下一代激光通信终端组成,以允许 EDRS-D 与多颗卫星同时通信。它将包含三组激光终端,预计实现高达 80 000 km 的传输距离,兼容 1 064 nm 和 1 550 nm 波长,可将亚

太地区数据传到欧洲以实现全球数据中继服务<sup>[5,22]</sup>。德国宇航中心 (Deutsche Forschungsanstalt für Luftund Raumfahrt, DLR) 开发了针对小型卫星进行优化的实验性光学终端和系统 C 计划。OSIRIS 的开发始于 2016 年和 2017 年发射的卫星 OSIRISv1 和 BiROS (OSIRISv2) 卫星上的两项科学任务,2018 年第四季度后续发射了 OSIRIS4 Cubesat,以及于 2019 年安装在国际空间站上的空中客车 DS Bartolomeo 平台上的 OSIRISv3。第四代 OSIRIS-4 目前正在开发小型化版本,它的尺寸小于 10 cm×10 cm×3 cm,加上运行期间仅 8 W 的低功耗,提供了几乎可以在任何 CubeSat 卫星上进行搭载的能力<sup>[23-24]</sup>。

为了解决卫星通信系统中大量引入光学/光子技术的系统层面问题,欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 准备了一项创新项目提案,即高吞吐量光网络 HydRON。在 HydRON 中,通过将卫星有效载荷分为网络部分和应用部分,相当于地面光纤网络的骨干部分和接入部分,结合新型光学技术、新型光电子设备和高效网络的概念,设想目标光纤互连达到 Tbps,实现“全光负载”,为真正的空间光纤网络提供“桥梁”<sup>[25]</sup>。

德国的 TESAT 公司推出了一系列激光终端可以适应多任务需求。对于近地轨道任务, TESAT 推出了 SmartLCT 终端,它可以部署在更小、更轻的卫星上,从而节省大量的质量和空间。SmartLCT 的数据传输距离长达 45 000 km,同时可提供 1.8 Gbps 的高速数据传输,仅重约 30 kg,具备安全、快速且完全无故障的性能特点。在小卫星领域, TESAT 的激光产品系列提供小质量的 TOSIRIS 和 CubeLCT。它们分别以 10 Gbps 或 100 Mbps 的速度传输对地数据,其中 TOSIRIS 仅重 8 kg,调制方式为 IM/DD 且下行速率可调,而边缘长度仅为 10 cm 的 CubeLCT 仅重 0.397 kg。通过激光终端构建地球数据骨干网, TESAT 可以实现近乎实时的全球数据传输<sup>[26]</sup>。

德国的 Mynaric 公司推出的 CONDOR Mk3 激光终端可提供在 7 500 km 距离上达到 10 Gbps 的通信速率。该终端采用 1 553 nm/1 536 nm 波长激光,发射功率为 2 W,设计寿命 7 年。相比于 CONDOR Mk2 的 5 000 km@1.25 Gbps 的通信能力有进一步的提高。

类似地,瑞典的 AAC Clyde Space 公司推出的

表 1 卫星激光通信技术验证现状和计划  
 Tab.1 Current status and plan of laser communication technology validation for medium and high orbit satellites

Orbits	Region/ Country	Name	Launch time	Research institute	Link format	Wavelength/ nm	Communication rate/ bps	Modulation mode
Middle/High-orbit laser communication	Europe	EDRS-A	2016	ESA	GEO-GEO GEO-LEO	1 064	1.8 G	BPSK (Duplex)
	China	Shijian-13	2017	China Academy of Space Technology	GEO-GND	-	5 G	IM/DD (Duplex)
	Europe	CONDOR Mk3	2017	Mynaric	7 500 km	1 553/1 536	10-100 G	-
	Europe	EDRS-C	2019	ESA	GEO-GEO	1 064	1.8 G	BPSK (Duplex)
	China	Shijian-20	2019	China Academy of Space Technology	GEO-GND	-	10 G	QPSK
	Japan	JDRS	2020	JAXA/NICT	GEO-LEO	1 540/1 560	1.8 G/50 M	RZ-DPSK (Downlink) IM/DD (Uplink)
	Europe	SmartLCT	2020	TESAT	45 000 km	1 064	1.8 G	-
	Europe	SOT-150	2020	MOSTCOM	50 000 km	-	1.25 G	-
	Europe	LCT135	2021	TESAT	80 000 km	1 064	1.8 G	BPSK
	Japan	HICALI	2021	NICT	GEO-GND	1 550	1 G	DPSK
	USA	LCRD	2021	NASA, MIT	GEO-GND ISS-GEO	1 550	GEO-GND: 2.88 G/622 M ISS-GEO: 1.244 G/51 M	GEO-GND: DPSK/ PPM (Duplex) ISS-GEO: DPSK
	Europe	EDRS-D	2025	ESA	GEO-GEO	1 064/1 550	3.6-10 G	BPSK (Duplex)
	Europe	HydRON	2025	ESA	GEO-LEO GEO-GND	1 064/1 550	100 G	-
	China	Mozi	2016	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	LEO-GND	-	20 M/5.12 G	PPM (Uplink) DPSK (Downlink)
	China	Tiangong-2	2016	China Academy of Space Technology	LEO-GND	-	1.6 G	IM/DD
Europe	OPTEL-μ	2015	Thales Alenia Space	LEO-GND	1 550	2 G	OOK/PPM	

续表 1  
Continued Tab.1

Orbits	Region/ Country	Name	Launch time	Research institute	Link format	Wavelength/ nm	Communication rate/ bps	Modulation mode
	USA	OCSD	2015/2017	NASA/US Aerospace	LEO-GND	1 064	10 k (Uplink) 5-200 M (Downlink)	OOK/PPM
	USA	CLICK-A	2018	NASA/MIT	LEO-GND	1 537/1 563	20 M	PPM (Downlink)
	Japan	VSOTA	2018	NICT	LEO-GND	980/1 550	1 k-1 M (Adjustable)	OOK
	Europe	TOSIRIS	2019	TESAT	LEO-GND	1 550	10/5/2.5/1.25 G (Downlink, adjustable) 1 M (Uplink)	IM/DD
	China	Xingyun-2	2020	Aerospace Xingyun Technology Co., Ltd.	LEO-LEO /LEO-GND	-	100 M	-
	Europe	OSIRSv3/4	2020	DLR	LEO-GND	1 550	10 G	IM/DD (Downlink)
	Europe	SOT-90	2020	MOSTCOM	5 000 km	-	10 G	-
	Europe	ConLCT	2021	TESAT	8 000 km	-	10 G (Duplex) 100 M (Downlink)	-
	Europe	CubeLCT	2021	TESAT	LEO-GND	-	1 M (Uplink)	IM/DD
	Europe	CubeCat	2021	AAC Clyde Space	LEO-GND	-	100 M/300 M/1 G (Downlink, adjustable) /200 k (Uplink)	-
	USA	TBIRD	2021	NASA/MIT	LEO-GND	1 550	200 G (Downlink) 5 k (Uplink)	PPM (Uplink)
	USA	CLICK-B/C	2022	NASA/MIT	LEO-LEO/ LEO-GND	1 537 /1 563	>20 M	PPM
	USA	O2 O	2022	NASA	LEO-LEO/ LEO-GND	1 550	80-250 M (Downlink) 20 M (Forward)	PPM
	USA	DSOC	2022	NASA	LEO-LEO/ LEO-GND	1 550	-	-

Low-orbit laser  
communication



CubeCat 终端是空地通信终端,适用于立方星,其可以实现 1 Gbps 下行速率和 200 Kbps 上行速率。且该终端也属于轻量级终端,功耗小于 15 W,质量小于 1.33 kg,体积仅为 1 U×1 U×1 U (1 U=10 cm),内存为 64 GB<sup>[27]</sup>。

Thales Alenia Space 公司推出的 OPTEL-μ<sup>[28]</sup> 总体思路是建立一个强大的直接探测激光通信系统,用于微小卫星从近地轨道到地面通信。该终端由三个主要单元组成:光学头、电子单元和激光单元,通信速率为 2 Gbps。该系统基于 1550 nm 波长技术,将由一个星载空间终端和多个光学地面终端构成,以较低的星载体积、功率和质量提供较高的每日下行链路容量。

俄罗斯的 MOSTCOM 公司推出的 SOT-90/150 两款终端用于最远 50 000 km 的高速通信,该设备既可用于星间通信,也可用于天地通信。它们采用统一的光收发路径和业务信息交换协议,适用于多种应用场景。该设备支持半球形视区及稳定的双向通讯,并考虑引入量子密钥分发和视频监控系统,以增加设备功能的多样性<sup>[29]</sup>。

### 2.1.2 美国

激光通信中继演示计划 LCRD 是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 进行的太空激光通信演示验证项目之一,通过该项目可以建立下一代空间跟踪与空间激光通信中继卫星的重要依据<sup>[30]</sup>。ILLUMA-T 终端是 NASA 为 LCRD 计划预计在 2022 年集成的卫星激光终端,以建立高低轨卫星之间的双向通信链路,实现多层次空间组网。该终端搭载了光子集成技术,通过采用光子元器件代替传统电子元器件,从而进一步使得激光通信终端从质量、体积、功耗几个方面实现轻量化,提高可靠性<sup>[31]</sup>。

在此之前,美国的 Optical Communication and Sensor Demonstration (OCS-D) 卫星验证了微小卫星可以通过激光星间链路实现高速率星地通信,打破了人们以前对激光星间通信在体积和质量上的限制。OCS-D-A 星于 2015 年 10 月发射,OCS-D-B/C 星则于两年后即 2017 年 11 月发射,分别验证了卫星对地面空间站可以通过激光星间链路实现较高的通信速率<sup>[32]</sup>。类似地,麻省理工学院、佛罗里达大学和美国航空航天局埃姆斯研究中心联合研制的立方星激

光红外连接 CLICK 系统也用于验证星间、星地激光通信。CLICK 系统可以展示低 SWaP 激光终端,能够进行全双工高数据速率下行和星间连接,以提高精确测距和时间同步。CLICK-A 有效载荷包括一个激光发射器与精确指向 PAT 系统,目前已完成装配测试,并已交付航天器总体总装。预计于 2022 年中旬发射的 CLICK-B/C 继承了 CLICK-A 任务,且有效载荷增加了新元素,包括进行通信所需的信标光和探测器系统。CLICK-B/C 任务由两颗相同的立方星组成,采用一箭双星发射,用以演示全双工互联,通信速率大于 20 Mbps,该系统还具有 0.5 m 的测距能力与 200 ps 的时间同步能力<sup>[30]</sup>。2021 年下半年, Terabyte Infrared Delivery (TBIRD) 项目<sup>[33]</sup> 将演示全新的仅用体积 1.8 U×1 U×1 U 和质量小于 2.25 kg 的 200 Gbps 下行链路。

后续 NASA 计划推进更多的激光星间链路项目,其中, Orion Artemis II Optical Communications System (O2O) 计划使用激光通信为月球轨道上的猎户座航天器提供双向光通信能力,以完成实时的 4 k 视频传输。为了实现这一目标,猎户座飞船上的调制解调器将数据转换成光信号,从月球表面传送到地球上的接收器,相同设备也将能够接收来自地球的光信号并将其转换为数据供航天器分析<sup>[20]</sup>,这将是人类探索任务第一次将光通信用于其高带宽链路。NASA 预计于 2022 年推进另一个深空光通信 DSOC 飞行演示,该系统将提供一个可供飞行的深空光学平台组件和地面数据系统,由现有地面资产的地面激光接收器和发射器组成<sup>[34]</sup>。空间和地面之间的通信将在近红外区域使用先进的激光器,在寻求在不增加质量、体积或功率的情况下,将通信性能提高 10~100 倍<sup>[35]</sup>。

### 2.1.3 日本

JDRS 卫星由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 和日本政府联合开发,内阁卫星情报中心拥有并运营这颗卫星,JAXA 负责光学数据中继功能。这颗卫星将在地球上空 35 400 km 的地球静止轨道上运行,属于高轨卫星,负责在日本卫星和地面站之间更快地传递数据,尤其适用于在卫星无法清楚地看到地面站时促进数据的传输<sup>[36]</sup>。其中,JDRS-1 是日本的数据中继卫星,具有军事和民用双重任务,取代了 2002 年发射并运行到 2017 年 8 月的“Kodama”数据中继测试卫星 DRTS。

它使用红外光束以高达 1.8 Gbps 的速率在航天器之间传输数据,由两个激光终端组成。LUCAS 有效载荷允许 JDRS-1 以比 S 波段和 Ka 波段 DRTS 快七倍的速度传输数据<sup>[14]</sup>。

日本国家信息和通信技术研究所 NICT 推出了适用于不同任务的多款终端。小型卫星光通信终端是 Small Optical TrAnsponder (SOTA), 总重 6 kg, 目前部署在一颗 50 kg 级的空间光通信研究先进技术卫星 SOCRATES 上。目前使用 SOTA 的光通信实验主要在东京小金井地球站进行, 包含低密度发生器矩阵 (Low Density Generator Matrix, LDGM) 码的图像传输和验证测试以及量子卫星通信演示等实验, 验证了 SOCRATES 借助 SOTA 可以实现与地面站之间的光子级信息交换<sup>[37]</sup>。

超小型光转发器 VSOTA 终端是由 NICT 开发的紧凑型双波段 (980 nm/1 550 nm) 轻型激光信号发射器, 搭载于快速国际科学实验卫星 RISESAT 上。RISESAT 卫星是东北大学空间机器人实验室 SRL 目前正在开发的 50 kg 级地球观测微型卫星, 它已被选为日本宇宙航空研究开发机构 JAXA“创新卫星技术示范计划”的一部分。借助 VSOTA 的支撑, RISESAT 可以演示 LEO 对地单向激光通信<sup>[38]</sup>。

ETS-IX 搭载的 HICALI 终端包含光发送器、接收器、放大器、数据转换模组、通信设备连接模组、望远镜以及地面目标定位的粗略捕获和精细跟踪机制等模块。HICALI 使用波长为 1 550 nm 的近红外激光, 该波长广泛用于地面上的光纤通信, 因此更适合将在地面光通信网络中使用的装置和系统迁移到空间光通信中<sup>[39]</sup>。

## 2.2 国内典型技术验证计划

我国空间激光通信技术的研究工作开始于 20 世纪 90 年代, 主要研究卫星激光通信整机研制, 高精度光学天线和跟瞄系统优化, 激光器、光放大器和探测器等核心器件服务质量提高和模块化定制等技术难点。

作为国内第一次星地激光通信在轨技术试验, “海洋二号”卫星于 2011 年成功入轨。该卫星的激光终端由哈尔滨工业大学研发, 通过非相干通信, 可以实现 2 000 km 星地通信距离, 最高通信速率可达 504 Mbps<sup>[40]</sup>。

在此之后, “墨子号”量子卫星于 2016 年成功发

射, 该卫星的激光终端由中国科学院上海光学精密机械研究所等单位联合研发, 通过相干调制方式实现了激光通信, 其中, 下行相干调制体制采用 DPSK, 而上行采用 PPM, 实现了 5.12 Gbps 的通信速率, 能够支持具备高维图像和视频信息的加密传输<sup>[41]</sup>。

2016 年, “天宫二号”与新疆南山地面站成功实现了激光通信实验, 其激光终端的数据下行速率为 1.6 Gbps, 该终端的通信体制为 IM/DD。该载荷也首次实现了白昼激光通信, 其载荷跟踪能力在白昼时与夜晚情况接近<sup>[18]</sup>。

2017 年, “实践十三号”卫星发射成功。该卫星的激光终端同样由哈尔滨工业大学研发。该技术验证借助 IM/DD 的通讯体制, 实现了全球第一次同步轨道卫星与地面的双向高速激光通信, 通信速率最高可达 5 Gbps, 通信距离最高可以支持 45 000 km, 刷新了当时国际高轨星地激光最高通信数据率<sup>[42]</sup>。

2019 年, “实践二十号”卫星于海南文昌基地发射成功, 该卫星搭载的激光终端是由中国空间技术研究院研发, 采用相干调制方式。2020 年, 该卫星与丽江地面站成功建立了基于 QPSK 调制体制的激光通信链路, 实现从卫星到地面站最高 10 Gbps 的下行传输速率, 其他关键指标也已经对齐国际先进水平<sup>[13]</sup>。

“行云”系列卫星搭载了由 LaserFleet 公司开发的激光通信载荷, 并于 2020 年发射成功, 是我国第一次进行低轨卫星星间激光链路技术试验<sup>[43]</sup>。该激光通信载荷的通信距离大于 3 000 km, 通信速率可以达到 100 Mbps。

根据上述调研可以看出, 2015~2021 年期间, 国际上开始对激光星间链路进行了大规模部署研究, 通过推动大量项目的实践和验证, 不断探索不同轨道和不同任务需求下激光星间链路的潜力, 多个项目的在轨良好运行也验证了卫星激光通信的优势。同时, 借助一些商业公司的低成本、高效率的激光终端研制能力和大规模载荷量产能力, 可以满足未来大型星座对激光载荷的大规模部署需求。因此, 激光星间链路的大力发展成为可能, 对构建新一代全球卫星系统具有重要意义。

## 3 卫星激光通信趋势分析

由上述发展现状以及未来计划的调研中可以看

出,不同的激光星间链路的构建,比如选择不同的调制模式、波长等,与卫星的轨道高度、距离、载荷大小,或不同的任务需求均有关联。一般来说,中高轨道卫星大多承载高速率、大带宽通信任务,往往对应着较大通信载荷,采用相干调制模式和更低的波长。另一方面,低轨卫星大多承载频率更高的对地通信任务,需求和部署的卫星数量更多,对应着更小型、更轻量化的通信载荷,采用非相干调制模式和较高的波长。但实际激光星间链路的参数选择可以根据具体的任务需求和设计目标灵活调整。

除此之外,通过进一步分析可以得到现今国内外卫星激光通信的发展过程正在迈向标准化、兼容化、网络化和商业化四个趋势。

(1) **标准化**: 为了提升激光通信载荷的部署效率,美国太空发展局有针对性地发布了激光星间链路和激光通信终端的标准文件,推荐了下一代太空体系激光链路主要链路体制和性能指标,推动美国激光载荷的研制进入了标准化、批量化的阶段。而我国具备快速推进行业标准制定的能力,通过整合资源,统筹规划,未来将有望快速实现激光通信标准化发展。标准化的确定有助于推动并扩大卫星覆盖范围和空间关联性,以更好地实现卫星网络的互联互通。

(2) **兼容化**: 标准化则进一步体现在产品兼容化趋势上。国外已经在兼容化方向上进行了一定的探索,例如,EDRS-D的激光星间链路兼容1064 nm和1550 nm两种波长。而目前国内主要系统因其应用场景和业务数据传输需求差异化,如低轨通信星座更注重激光载荷的轻小型、低功耗和高速率;而中高轨导航卫星更注重测量与通信性能的统一,导致各星座激光星间链路的接入体制、波长、调制方式等均有较大差别。因此,为了实现不同系统间激光链路体制的统一,我国更需要注重兼容性互联的研究和发展,比如相干与非相干体制兼容技术、通信波长兼容技术、在轨激光终端可编程等技术的研究。

(3) **网络化**: 各国激光通信在轨演示验证也都在由单链路功能验证转向空间网络验证,即每星搭载多条激光星间链路、不同轨道卫星互相关联验证组网技术,从而使得激光星间链路构成的高速安全空间网络能够支持感知定位信息分发、遥感信息分布式边缘计算与回传、全球任务规划响应、星座自主运行、组网

测控、加解密信息等综合信息支援能力。由于国际环境的限制,我国测控站均在境内部署,只有在卫星通过我国上空时才可以直接与卫星通信。因此,为了更加高效获取卫星数据,我国同样需要加快推进网络化发展,借助激光星间链路进行星间组网,以避免数据依赖单跳定向通信带来的传输限制。

(4) **商业化**: 为了适配大规模激光通信载荷部署的发展目标,各国的商业化航天科技公司进入赛道,根据不同需求开始推出各类激光终端产品。从技术实现的角度来看,卫星激光终端的发展趋势向着更加弹性,配置更加自由的方向发展以适应未来多样化的任务需求。同时通过模块化设计以适用于各种卫星平台,承受卫星平台震动和大的温度变化范围。同时,未来各商业公司都将量产激光终端列为公司发展计划,如Mynaric公司计划于2022年达到年产500套激光终端的能力。而我国随着技术的发展以及更大用户数量与需求的增加,大到工业、海事、地面运输等产业,小到普通家庭、移动用户等个人,都对卫星网络覆盖提出了更高的要求,因此推动我国激光星间链路的商业化发展有助于增强该领域的产研活力,以实现本土技术的高速发展。

除了宏观的激光星间链路发展趋势外,上述调研还可以从微观的角度体现出卫星激光终端的发展趋势。可以看出,中高轨卫星激光通信终端主要向更高速率、更长寿命和更高的可靠性方向发展,低轨卫星激光通信终端则主要向更小体积、更高速率、更小功耗的方向发展。而商业化通用终端则主要向着弹性和模块化方向发展:

(1) **弹性化**: 终端配置向着更加弹性、更加自由的方向发展,包括通信速率、波长、功率等参数均可按照任务需求灵活调整。比如CONDOR Mk系列终端速率范围可调,EDRS-D所用终端在1064 nm和1550 nm两种波长模式下可调等。

(2) **模块化**: 大多数激光终端都采用了光学系统组件OSA和独立电子盒EB的高度模块化设计,与每个终端的单个EB相比,这种设计可以降低多个OSA的功耗,且可以根据不同应用需求灵活搭建终端。当每颗卫星需要多个OSA时,高度模块化设计则有助于减少终端质量和生产成本。如SmartLCT和ConLCT均采用了OSA和EB的独立模块化设计,为模块冗余

备份提供了可能。

另外,大多数终端还朝着高速率、轻质量、小体积、全双工、全自动在轨标校、自动建链的方向设计和发展。商业化终端产品的量产将成为扩大空间系统的主要推手之一。

#### 4 激光星间链路未来展望

激光除了可以作为信息交互的载体外,由于其高方向性和短波长等特点,相比于传统 RF 测距方案,激光测距可以获得更加精确的星间测距值,以及更强的抗干扰和防窃听等能力。目前,俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 OPTEL-D 以及预计于 2025 年发射的下一代伽利略卫星导航都会搭载激光终端提高测距精度。

欧洲航天局将行星撞击任务 (Asteroid Impact Mission, AIM) 视为首次进行激光通信的深空任务,该任务卫星搭载深空激光通信终端 OPTEL-D,同时具备激光通信与测距功能<sup>[44]</sup>。AIM 任务目标是以 50 cm 或更小的精度提供精确的 Didymoon 3D 形状,通过以小于 1 m 的精度测量该星体的摆动来确定其质量。作为高度计,激光终端 OPTEL-D 将具有 1 m 或更高的垂直和水平表面分辨率,以准确地将 AIM 航天器定位在 Didymoon 星体周围。

以下一代伽利略导航系统为例,该导航系统要求在 45 000 km 的链路距离条件下达到小于 5 cm 的测距精度,大于 120 kbps 的数据传输速率,且任意两点的中断时长小于 30 s。仿真研究结果显示,Smart LCT 终端在 1 064 nm 波长下工作可以满足该任务要求。通过该终端的自由组网为伽利略导航系统提供虚拟地面站功能、更长的通信时间窗、不需受国际电联规则制约和地面站不可用时系统更高的鲁棒性。在安全领域方面,该终端也可以为导航系统提供系统抗干扰与抗阻塞能力,同时具有量子密钥分发能力和更高的防窃听能力。在应用性能方面,该终端可以使系统实现高精度、高带宽、高数据更新速率、低时延,以及更强的网络智能性<sup>[45]</sup>。

#### 5 总结

文中梳理了近年来国内外空间激光通信的最新发展情况,从宏观角度归纳整理出卫星激光通信的标准化、兼容化、网络化和商业化发展趋势,并进一步

从微观角度分析出激光终端产品的弹性化和模块化发展方向。除了提供高通信质量外,还展望了激光星间链路具备的精密测距功能,能够为未来导航卫星提供高性能服务。

激光星间链路正在蓬勃发展,同时卫星网络任务需求复杂多样,针对不同轨道和任务类型的卫星,激光星间链路的通信体制、波长、接入方式等标准的选择需要根据各自情况具体分析判断确定。而未来为了更好的利用空间资源,构建标准化、兼容化、网络化和商业化的激光星间链路将有助于实现空间资源最大化和卫星网络的互联互通。文中的调研旨在为未来激光星间链路的设计与优化提供一定的借鉴和参考。

#### 参考文献:

- [1] Liu Xiangnan, Zhao Zhuo, Li Xiaoliang, et al. Research status and key technology analysis of inter-satellite link technology [J]. *Telemetry Remote Control*, 2019, 40(4): 1-9. (in Chinese)
- [2] Xu Miao, Shi Haodong, Wang Chao, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1206002. (in Chinese)
- [3] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)
- [4] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-903. (in Chinese)
- [5] Zhang Ruofan, Zhang Wenrui, Zhang Xuejiao, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500001. (in Chinese)
- [6] Gao Shijie, Wu Jiabin, Liu Yongkai, et al. Development status and trends of micro-satellite laser communication systems [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese)
- [7] Gao Duorui, Xie Xiaoping, Xie Zhuang, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406001. (in Chinese)
- [8] Ren Jianying, Sun Huayan, Zhang Laixian, et al. Development status and new networking methods of space laser communication [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 143-150. (in Chinese)

- [9] 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.
- [10] Dai Yonghong, Liu Yanfei, Zhou Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3110-3116. (in Chinese)
- [11] Wang Yi, Zhang Ao, Ma Jing, et al. Effects of phase fluctuation and intensity scintillation caused by weak atmospheric turbulence to BER employing distributed antenna array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 758-763. (in Chinese)
- [12] Perdignes J M, Sarasa P, Porte-Proust F, et al. The ESA's optical ground station for the EDRS-A LCT in-orbit test campaign: Upgrades and test results [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2017.
- [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): 4.
- [14] Yamakawa S, Chishiki Y, Sasaki Y, et al. JAXA's optical data relay satellite programme [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2016.
- [15] Luzhanskiy E, Edwards B, Israel D, et al. Overview and status of the laser communication relay demonstration [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390C.
- [16] Tomio H, Kuwahara T, Fujita S, et al. Assembly and integration of optical downlink terminal VSOTA on microsatellite RISESAT [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2019.
- [17] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques [J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2016, 19(1): 57-96.
- [18] 六博光电. 天宫二号 [EB/OL]. (2016-12-11) [2022-07-05]. <http://whu-fso.com/clist?in=gywm>.
- [19] Liu Cheng, Li Fang. Study on perturbation analysis method of the influence of satellite orbit error on positioning accuracy [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2018, 15(1): 40-45. (in Chinese)
- [20] Che Xiaojie, Liang Zhongcheng, Liu Xueming. Receiving characteristics of indoor MIMO visible light communication [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(2): 242-249.
- [21] Calzolaio D, Curreli F, Duncan J, et al. EDRS-C—The second node of the European Data Relay System is in orbit-ScienceDirect [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 537-544.
- [22] Via Satellite. Airbus, JSAT to design and develop EDRS-D node [EB/OL]. (2019-02-08) [2022-07-05]. <https://www.satellitetoday.com/launch/2019/02/08/airbus-jsat-to-design-and-develop-edrs-d-node/>.
- [23] Fuchs C, Schmidt C. Update on DLR's OSIRIS program [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2019, 11180: 111800I.
- [24] Li Li, Zhang Xuejiao, Zhang Jianhua, et al. Advanced space laser communication technology on CubeSats [J]. *ZTE Communications Technology: English Version*, 2020, 18(4): 45-54.
- [25] Hauschildt H, Elia C, Moeller H L, et al. HydRON: High throughput Optical Network [C]//Proceedings of SPIE, 2020, 11272: 112720B.
- [26] TESAT. Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG [EB/OL]. [2022-07-05]. <https://www.tesat.de/products>.
- [27] CubeCat, AAC clyde space. Laser communication module [EB/OL]. [2022-07-05]. <https://www.aac-clyde.space/what-we-do/space-products-components/communications/cubecat>.
- [28] Hyvönen P, Vidmark A, Francou L, et al. On-board terminal developments and operations of optical ground networks for small satellites [C]//International Conference on Space Operations, 2018.
- [29] Mostcom. Space terminals [EB/OL]. [2022-07-05]. <http://www.moctkom.ru/space-terminals/>.
- [30] Cornwell D M. NASA's optical communications program for 2017 and beyond [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
- [31] NASA. Integrated LCRD Low-earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal (ILLUMA-T) [EB/OL]. [2022-07-05]. <https://esc.gsfc.nasa.gov/projects/ILLUMA-T>.
- [32] Janson S, Welle R. The NASA optical communication and sensor demonstration program: An update [C]//28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [33] Chang J, Schieler C M, Riesing K M, et al. Body pointing, acquisition and tracking for small satellite laser communication [C]//Free-Space Laser Communications XXXI, International Society for Optics and Photonics, 2019, 10910: 109100P.
- [34] Hemmati H, Boroson D M, Roberts W T. Discovery deep space optical communications (DSOC) transceiver [C]//Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, SPIE Conference Series, 2017, 10096: 100960V.
- [35] Biswas A, Srinivasan M, Rogalin R, et al. Status of NASA's deep space optical communication technology demonstration [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.

- [36] Chishiki Y, Yamakawa S, Takano Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA [C]//SPIE LASE, 2016, 9739: 97390D.
- [37] Munemasa Y, Saito Y, Carrasco-Casado A, et al. Feasibility study of a scalable laser communication terminal in NICT for next-generation space networks [C]//International Conference on Space Optics — ICSO, 2019, 11180: 111805W.
- [38] Hideki Takenaka, Hiroo Kunimori, Toshinori Kuwahara, et al. Optical communication experiment with microsatellite body-pointing using VSOTA on RISESAT [C]//Proceedings of the 37th International Communications Satellite Systems Conference, 2019.
- [39] Kubo-Oka T, Kunimori H, Suzuki K, et al. Development of "HICALI": high speed optical feeder link system between GEO and ground [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2019, 11180: 1118060.
- [40] Wu Yingming, Liu Xing, Luo Guangjun, et al. Research progress and structure system of space optical communication network technology[J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 11(12): 46-49. (in Chinese)
- [41] 中国科学院. 量子科学实验卫星[EB/OL]. [2022-07-05]. <https://www.cas.cn/zt/kjzt/lzwx/>.
- [42] 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.
- [43] Song Hao, Wang Tong, Ma Xin. Low earth orbit satellite internet constellations: Status quo and suggestions[J]. *China New Telecommunications*, 2020, 22(19): 61-63. (in Chinese)
- [44] Sodnik Z, Heese C, Carnelli I, et al. Multi-purpose laser communication system for the asteroid impact mission (AIM) [C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems & Applications, 2016.
- [45] Zech H, Biller P, Heine F. Optical intersatellite links for navigation constellations [C]//International Conference on Space Optics (ICSO), 2019, 11180: 111800Z.

## Review on laser intersatellite link: Current status, trends, and prospects

Li Rui<sup>1,2,5</sup>, Lin Baojun<sup>1,2,3,4,5\*</sup>, Liu Yingchun<sup>1,2,5</sup>, Shen Yuan<sup>1,5</sup>, Dong Mingji<sup>1,5</sup>,  
Zhao Shuai<sup>1,5</sup>, Kong Chenjie<sup>1,5</sup>, Liu Enquan<sup>1,5</sup>, Lin Xia<sup>1,5</sup>

(1. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

5. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201210, China)

### Abstract:

**Significance** The high directionality and short wavelength of laser transmission in space make it a promising direction for the next generation of satellite laser communication. The laser intersatellite communication can achieve high quality-of-service satellite communication with high transmission speed, wide bandwidth, and high security, which can even improve the precision of satellite ranging in space. The establishment of a satellite backbone network with laser intersatellite links can achieve global management and control of satellites, greatly improve its independence from the ground system, and expand the communication capacity. Due to its advantages in improving the survivability, autonomy, mobility and flexibility of satellite networks, the domestic "Star Network", "Hongyan", "Hongyun", "Xingyun" and "Space-Earth Integration" constellations and foreign "Kuiper", "Telesat" and "Starlink" networks have integrated laser intersatellite links as one of its core transmission link methods, laser communication terminals also become one of the standard spacecraft payloads. It is foreseeable that intersatellite communication will continue to develop and transform from the radio wave era to the laser era, which makes the survey on laser intersatellite links meaningful.

**Progress** This paper first introduces the technical fundamentals, including the link establishment modes, link modulation modes, and wavelengths. The intersatellite laser link establishment mainly relies on three steps of pointing, acquiring, and tracking, comprehensively called PAT system. The link modulation modes include non-coherent and coherent communications. Compared with the non-coherent system, the coherent system has the advantages of high spectral efficiency. For medium and high-orbit satellites that need to carry more complex and sophisticated communication tasks, the laser intersatellite link is mostly modulated by the coherent communication system. Conversely, low-orbit satellite laser communication and deep space exploration projects mainly use non-coherent modulation mode. To reduce the impact of the solar background and solar scattering, the current laser communication mainly considers the selection in the range of 500 nm to 2 000 nm. Since ground industrial-grade laser components mostly use 1 550 nm wavelength laser as the standard preparation, the communication technology can be migrated to the satellite network at a relatively low cost. With the development of technology, the communication systems of various countries are developing in a more compatible direction, that is, compatible with both 1 064 nm and 1 550 nm wavelengths. Countries have successfully carried out a number of on-orbit technology verifications in the field of inter-satellite laser communication, and have entered the stage of large-scale application. The survey finds that the current on-orbit technology verification uses customized laser terminals to meet the specific needs of various tasks. Companies such as Mynaric, Hyperion Tech, Thales Alenia Space, and NICT have begun to launch laser terminal products with higher speed, smaller mass and volume, and lower power consumption. These terminal products can adapt to the universal requirements of similar multi-task. According to the different mission requirements of different orbit heights, this paper summarizes the current development status and plans of laser communication achievements since 2015 (Tab.1). Through the comprehensive survey, this paper reveals the flexibility and modularity trends of laser communication terminals, and four development trends of satellite laser communication: standardization, compatibility, networking, and commercialization. In addition to being used as a carrier for information interaction, laser ranging can obtain more accurate intersatellite ranging values, stronger anti-interference and anti-eavesdropping capabilities compared to traditional RF ranging solutions. The end of this paper surveys on prospects of satellite laser ranging applications, which intends to provide reference to the domestic development and research of laser-based satellite technology.

**Conclusions and Prospects** The laser intersatellite link is developing vigorously. At the same time, the mission requirements of the satellite network are complex and diverse. For satellites of different orbits and mission types, the selection of the communication system, wavelength, and access mode of the laser intersatellite link needs to be analyzed in detail according to each situation. The research aims to provide some reference for the design and optimization of laser inter-satellite links in the future. It is expected that building a standardized, compatible, networked and commercialized laser intersatellite link will help maximize space resources and interconnection of satellite networks.

**Key words:** communication and information system; laser intersatellite link;  
satellite laser communication; laser communication terminal; satellite ranging