

NASA 激光通信中继演示项目技术

赵方,刘兴,罗广军,刘芳

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:美国航空航天局(NASA)激光通信中继演示(LCRD)项目是美国第一个长周期卫星激光中继演示项目,是美国对其下一代卫星中继系统的一种探索。为了便于研究卫星激光中继新技术,对 LCRD 项目的背景、现状以及后续发展情况进行了详细阐述,并给出一系列具体技术指标。

关键词:激光通信中继演示;激光通信;卫星中继

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)08-0049-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



NASA laser communication relay demonstration project technology

ZHAO Fang, LIU Xing, LUO Guangjun, LIU Fang

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: National aeronautics and space administration (NASA) laser communications relay demonstration (LCRD) project is the USA first long-term satellite laser relay project, is also a pathfinder project for USA next generation of satellite relay system. In order to facilitate the study of new satellite laser relay technology, this paper gives a detailed description of the project, including the background, current status and future development. Besides, this paper gives out a list of technical specifics of the project.

Key words: laser communications relay demonstration; laser communication; satellite relay

0 引言

激光通信中继演示(LCRD)项目是由美国国家航空航天局(NASA)提出,并由 NASA 戈达德太空飞行中心、喷气推进实验室以及麻省理工学院林肯实验室联合开发的。项目旨在演示验证现实环境下高轨卫星向地面用户提供激光中继服务的可行性,为美国下一代卫星中继系统做好技术储备。

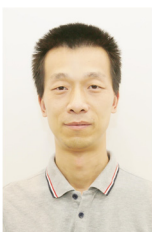
目前,美国正在运行的卫星中继系统为跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS),由 10 颗轨道高度为 35420 km 的高轨卫星组成,主要利用射频技术进行数据中继。由于空间激光通信技术所特有的优势(如:通信速率高、保密性好、通信终端体积小和重量轻等),美国考

虑在下一代卫星中继系统中应用激光通信技术。LCRD 项目作为美国第一个长周期(计划在轨至少 2 年)空间激光通信技术探路者项目,对美国未来的卫星中继系统具有深远影响。

LCRD 项目最早于 2011 年被提出,并于 2012 年通过概念评审,2013 年完成初步设计评审,2017 年进入集成与测试阶段。2020 年 1 月,LCRD 飞行载荷卫星完成最后的测试工作并运抵位于弗吉尼亚州的诺斯格鲁曼公司开始与卫星平台集成,并计划 2021 年初发射。在 LCRD 项目载荷卫星即将发射之际,本文力图尽可能详尽地对该项目进行全面阐述,为相关科研人员提供技术参考。

收稿日期:2020-04-29。

作者简介:赵方(1980—),男,广西桂林人,本科,工程师,主要研究方向为光通信和数据库应用。主持完成了光纤集成通信设备、微波光纤传输设备、光切换与光/电转换模块和光纤控制器等项目的论证、策划与实施工作。



1 LCRD 项目细节

1.1 项目任务架构

LCRD 项目任务架构^[1]如图 1 所示,其架构由 2 个星载光通信终端、2 个光学地面站 (OGS)、1 个宿主卫星地面站以及 LCRD 任务控制中心(LMOC)和宿主卫星控制中心(SSOC)组成。其中,LCRD 项目宿主卫星是

赵方,刘兴,罗广军,等:NASA 激光通信中继演示项目技术

美国空军的一颗太空试验项目卫星(STPsat-6),2个光学地面站分别设置于美国加州的桌山和夏威夷的毛伊岛。卫星定位于西经 $107^{\circ}\sim 172^{\circ}$ 的区域,使得2个光学地面站通信仰角均大于 20° ,从而防止仰角太小造成的链路损耗过大。LMOC设于新墨西哥州,主要对OGS进行控制和任务规划。在LCRD项目任务架构中,为了便于不同地点研究人员开展试验,该项目在美国马里兰州戈达德太空飞行中心设置了一个LMOC扩展中心。SSOC与LMOC都通过STPsat-6卫星地面站对宿主卫星以及LCRD载荷进行控制。与最初设计不同的是,最新的LCRD项目任务架构新增了一条高速射频(HBRF)链路,这样做不但可以避免当一条光

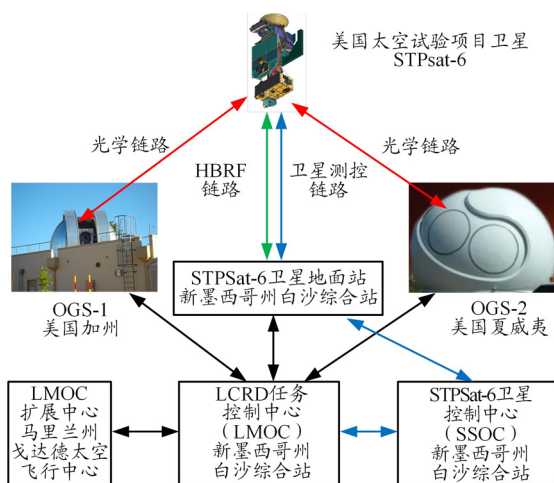


图1 LCRD项目任务架构

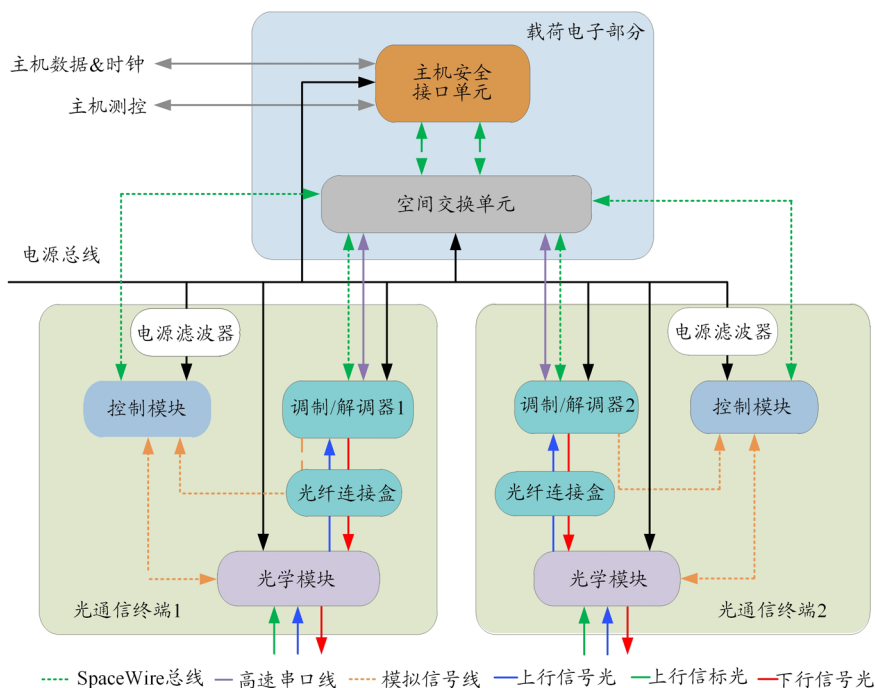


图2 LCRD项目卫星载荷架构

学链路被云层遮挡无法进行中继试验的情况,也更加贴近未来实际应用场景。HBRF链路采用Ka波段,上、下行速率分别为64 Mb/s和622 Mb/s^[2]。HBRF链路地面站选址与宿主卫星地面站相同。

1.2 卫星载荷

LCRD项目卫星载荷架构^[3]如图2所示,主要由2个完全相同的光通信终端和载荷电子部分构成。其中,光通信终端由光学模块、控制模块及调制/解调器组成,载荷电子部分由空间交换单元和主机安全接口单元组成。而新增的HBRF链路并不属于LCRD载荷,它仅作为一个单独的系统搭载于STPsat-6卫星。架构中各单元或模块的功能如下:

①主机安全接口单元是LCRD载荷与宿主卫星对接的接口,不仅能够实现相关测控数据的交互,还能从信息安全的角度实现LCRD载荷与宿主卫星的隔离。该单元采用专门的加密技术阻止非法接入、使用和记录甚至是破坏LCRD载荷的相关数据信息。借助该单元,LCRD载荷未来可搭载于其它不受信任的非美国政府空间飞行器上。

②空间交换单元既是LCRD载荷的控制单元也是数据交换单元,它通过Spacewire总线与其它各模块/单元互联,并采用1+1主备设计以提高系统可靠性;同时连接2个光通信终端和HBRF链路终端,完成不同终端之间的数据交换,从而实现数据的卫星中继。

③控制模块通过Spacewire总线与空间交换单元互联并接收来自空间交换单元的指令,然后通过模拟接口控制光学模块完成一系列的捕获、瞄准和跟踪(PAT)动作。

④调制/解调器同时支持差分相移键控(DPSK)和脉冲幅度调制(PPM)信号的调制/解调,支持72 Mb/s~2.88 Gb/s双向DPSK通信和下行39~622 Mb/s、上行10~20 Mb/s PPM通信。2种信号的调制均采用马赫-曾德尔调制器,调制后的光信号利用掺铒光纤放大器进行放大,输出功率0.5 W,并通过单模光纤实现与光学模块的互联。2种信号的解调方式有所不同,PPM信号采用由光电探测器和2个比较器组成的解调器对二进制信号进行硬判决,而DPSK信号解调则通过延迟线干涉仪加平衡光电探测器进行相干解调。

⑤光学模块是整个卫星载荷中的核心部件,其结构大致可以分为4个部分:光学组件(OA)、粗瞄组件&天线保护罩(GLA)、磁流体惯性参考单元(MIRU)以及阳光屏蔽窗(SWA),具体实物^[4]如图3所示。

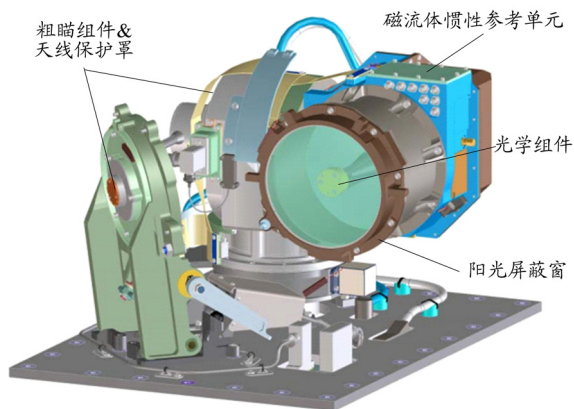


图3 LCRD星载光学模块结构实物图

◆OA包括前端口径为10.8 cm的卡塞格伦天线和后端光学处理部件。其中,光学天线由主反射面、次级反射面以及一个非球面透镜组成。反射面由金属铍制成,具有很高的刚度重量比。天线放大倍数为47x,从而能够大幅压缩光束直径(约为2.3 mm),减小后端光学处理部件尺寸。光学处理部件则实现对上行信号光、上行信标光以及下行信号光3个不同波长信号的处理。光学处理部件内部结构^[5]如图4所示。图中红色光束表示下行信号光束,蓝色表示上行信号光束,绿色表示上行信标光束。3个不同波长信号通过2个分色镜(分色镜A和分色镜B)实现分离。分离出来的信标光经折镜反射后通过窄带滤波器和捕获镜头到达四象限捕获探测器(视场角为2 mrad^[6]),实现地面目标捕获,并通过调整天线使光斑处于探测器正中位置从而完成粗跟踪。上行信号光通过接收镜头后直接进入接收光纤,接收光纤置于一个压电偏摆台上,能够实现在焦平面2个方向上的横向偏移,从而实现对上行

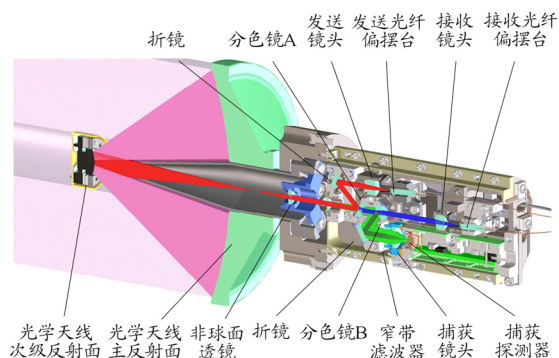


图4 光学处理部件内部结构实物图

信号光的精跟踪。下行信号光从发送光纤发出经发送镜头、折镜和分色镜A进入天线,信号波长为1545 nm^[7],发散角为15 μrad。发送光纤同样置于一个压电偏摆台上,通过控制横向偏移量的大小可形成不同的发射提前角。

◆GLA粗瞄准组件采用双轴万向节结构,并由步进电机驱动,步进角度为52 μrad。天线保护罩为一次性装置,用于在发射时保护光学天线,待卫星入轨后通过石蜡驱动器开启。该保护罩内置准直镜,在开启前可用于进行收发光路的校准。

◆MIRU用于消除卫星平台微小振动对光路造成的影响。MIRU是一个小型光学平台,安装有磁流体角速度传感器,能够测量角度变化,并形成反馈信号驱动音圈电机来保持平台惯性稳定。

◆SWA不仅可以对内部光学结构起到环境保护作用,还可以减少阳光的进入。其本质是一个带通滤波器,仅允许1550 nm波段的光线通过,而对其它所有波段光线均进行衰减。

1.3 OGS-1

OGS-1重用原月球激光通信演示(LLCD)项目地面站,只是在原来基础上新增了自适应光学(AO)系统以及DPSK调制/解调器,OGS-1内部结构^[8]如图5所示。

OGS-1共包括以下几个部分:光通信望远镜(OCT)、综合激光安全系统(LASSO)、调制/解调&编解码&放大(GMCA)系统、集成光学系统(IOS)、信标系统、监控系统(MCS)、大气信道监测(ACM)系统以及光学地面站网络(LOGSNet)。各部分内的控制器、控制电路、控制台、控制计算机或控制系统分别负责其所在部分的控制功能。

①OCT采用口径为1 m,F数(透镜的口径与焦距的比值)为75.8的折轴光学天线(采用收发共用天线设计),大的口径保证了良好的接收灵敏度。OCT还配备了口径为20 cm的目标发现天线,无渐晕视场角为5 mrad,用于引导光源进入主望远镜视野。OCT在方位角方向和仰角方向的旋转速度分别为20°/s和10°/s,指向误差为17 μrad^[9]。

②LASSO采用多种手段保证发射光束对过往飞机及其它卫星的安全,它由宽、窄视场长波(8~14 μm)红外相机和雷达组成,能够在飞机或其它卫星经过时自动关闭激光器。OCT及LASSO实物如图6所示。

③GMCA系统由调制/解调器、编/解码器、GMCA控制器和光放大器组成。其中,调制/解调器部分与卫星端类似。编/解码器采用DVB-S2级联前向纠错机

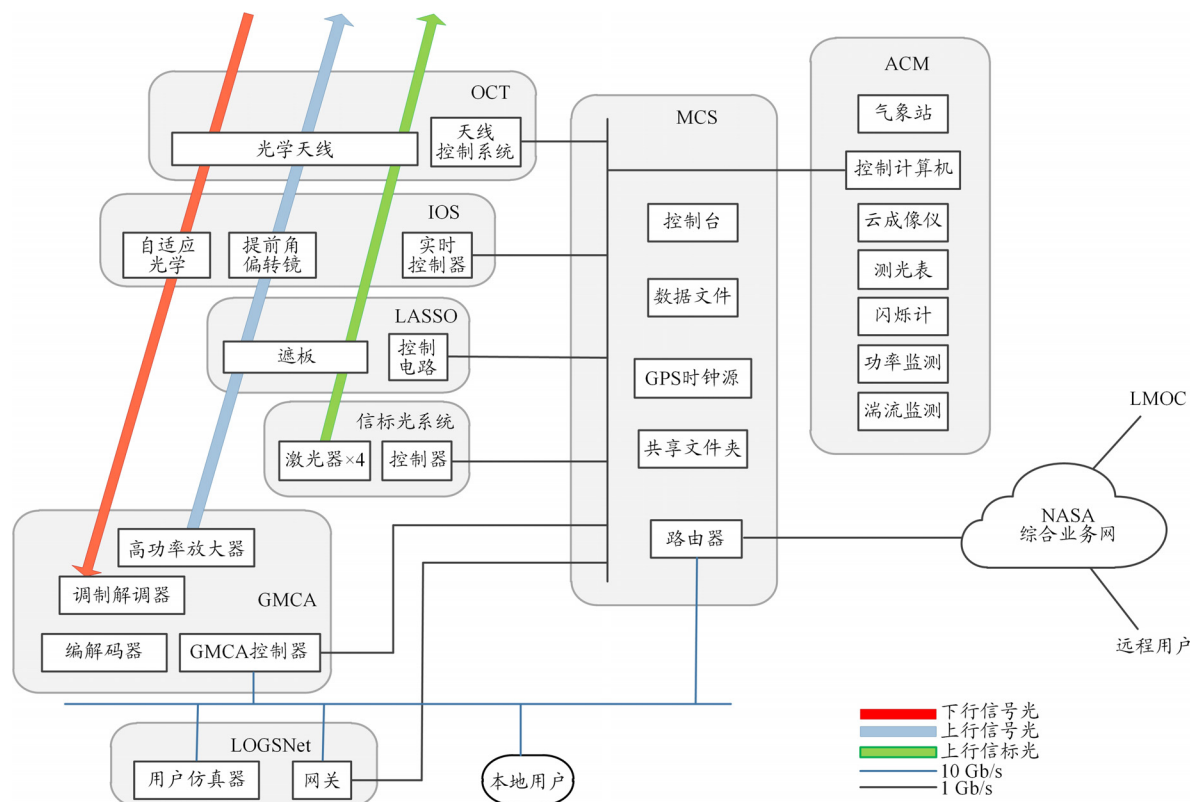


图 5 OGS-1 内部结构图

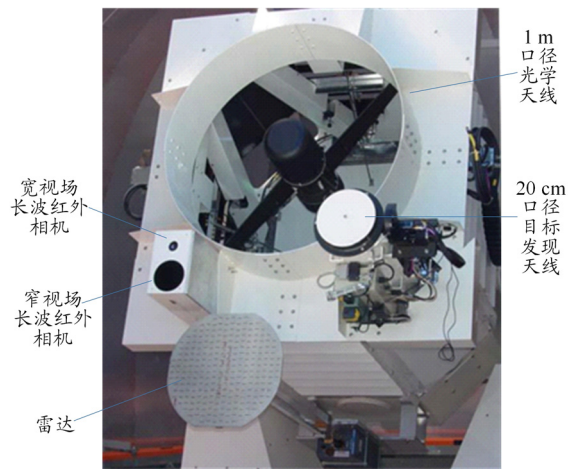


图 6 OGS-1 OCT 及 LASSO 系统实物图

制,内码为 1/2 码率的低密度校验(LDPC)码,外码为 BCH 码。用一个商用放大器将调制器输出的小信号光放大至 10 W,并通过单模光纤传递给 IOS。

④IOS 连接 GMCA 系统和 OCT,实现对上、下行信号光以及信标光的处理。IOS 的内部结构^[10]如图 7 所示。

◆在接收方向,来自 OCT 的信号光首先经过一个由阳光传感器控制的遮板,如果阳光过强,则关闭遮板,从而保护内部的自适应光学系统。接着经过抛物

面镜实现下行信号光的准直,然后经过快速偏摆镜和分色镜到达自适应光学系统的核心部件波前矫正器。波前矫正器由高阶变形镜(HODM)和低阶变形镜(LODM)组成,变形镜采用直径小于 1 cm 的微机电系统(MEMS)镜片。其中,HODM 用于矫正小幅度高频波前形变,LODM 用于矫正大幅度低频波前形变。经变形镜反射后光束先后通过分束器 1 和分束器 2,分束器 1 分出 20%~30%的光给 Shack-Hartmann 波前传感器用于对光束波前畸变情况进行检测,并生成控制信号控制变形镜偏转,矫正波前畸变。分束器 2 分出 1%的光给光束监测相机,通过测量、矫正光束的斯特列尔比来判定补偿效果。同时,该相机还具备捕获功能,其视场角为 $280\ \mu\text{rad}$,如此宽的视场角避免了扫描捕获,使得捕获时间更短。最后,光束经过慢速偏摆镜和波片耦合进接收光纤。其中,慢速偏摆镜的作用是调整角度使得进入光纤的光最大化,波片的作用是调整入纤光束的极化方向。

◆在发送方向,信号光和信标光经过慢速偏摆镜和分色镜耦合至 OCT,慢速偏摆镜用于瞄准和跟踪目标卫星,而分色镜则实现收发光路的分离。发射信号光发散角为 $20\ \mu\text{rad}$,波长为 $1563\ \text{nm}$ ^[7]。为补偿传播延迟,发送信号光束提前角为 $18\ \mu\text{rad}$ 。

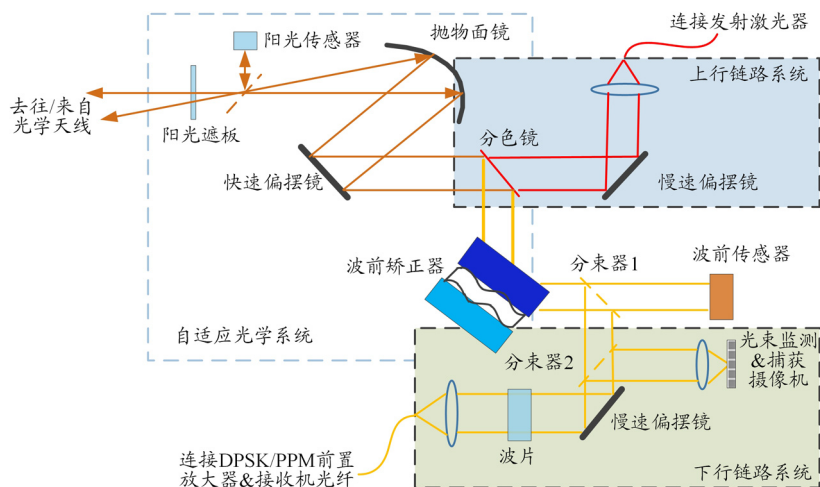


图7 IOS架构图



图8 LCRD OGS-2 激光通信终端实物图

⑤信标光系统将生成4束低速调制的信标光,用于引导星载激光终端瞄准地面站。信标光波长为 1553 nm ^[7],单束信标光功率为 2.5 W 。各信标光光束在天线口径处互相间隔 20 cm ,并在远场实现重合。多束信标光的好处是可有效对抗大气闪烁效应,更有利于星载激光通信终端捕获。信标光发散角为 $280\text{ }\mu\text{rad}$,几乎是信号光提前角的15倍,因此无需为信标光专门设置提前角。信标光和发射信号光虽共用同一副光学天线,但由于光学天线口径较大,信号光和信标光各利用天线口径的一部分,各光束互不干扰^[11]。

⑥ACM系统主要由一系列环境监测设备组成,LMOC根据每个光学地面站的实时和未来环境数据决定是否进行地面站切换。此外,也可以根据积累的环境数据分析环境对光学信道的影响,为未来的改进提供参考依据。

⑦LOGSNet由用户仿真器和用户网关组成,用户仿真器主要用于模拟不同应用场景下的终端用户,而用户网关则实现用户仿真数据接入LCRD激光链路。

⑧MCS是整个地面站的控制中枢,它接收来自LMOC的任务规划,然后将任务规划解析为控制各个分系统的具体指令,并通过 1 Gb/s 以太网将指令下发至各个分系统。

1.4 OGS-2

OGS-2为新建地面站,预计2020年内完成集成与测试。该地面站激光通信终端采用经纬仪式瞄准结构如图8所示,且收发光路分置。其中,发射天线口径为 15 cm ,接收天线口径为 60 cm ,并安装于直径为 5.5 m 的保护罩内。光源发光功率 $<10\text{ mW}$,经过一个商用高功率光纤放大器后,功率可放大至 10 W ,但日常工作

输出为 7.3 W ,经过各种传输损耗最终天线出射功率为 5.4 W ^[12]。此外,OGS-2仅支持DPSK通信调制格式。

1.5 PAT流程

LCRD项目采用单向信标光捕获方式,即只有地面站发射信标光,而星载激光通信终端不发射信标光,整个PAT流程^[13]如图9所示。PAT流程在LMOC的控制下从左到右依次进行,具体过程如下:地面站和星载终端同步初始化,初始化后星载终端进入开环瞄准状态,等待接收地面站信标光,地面站完成初始化后则开启信标光发射。星载终端一旦接收到信标光便进入粗跟踪状态,并向地面站发送下行信号光。地面站接收到该下行信号光后打开上行链路,星载终端在接收到该上行信号光后便进入精跟踪状态。同时,地面站根据接收到的下行信号光开启时钟同步。待地面站与星载终端时钟完全同步,地面站向星载终端发送链路状态确认字,星载终端收到后反馈链路状态确认字给地面站。至此,双向空间激光通信链路建立。此时,便不再需要LMOC的干预,星载终端与地面站之间将自动维持整条通信链路的正常工作。

2 LCRD项目后续发展

NASA下一步计划在国际空间站安装激光通信终端,进一步演示验证LCRD载荷卫星对低轨空间飞行器的数据中继能力。为此,NASA专门推出了集成LCRD低地球轨道用户调制/解调器与放大器终端(ILLUMA-T)项目,并计划实现空间站到LCRD载荷卫星 1.244 Gb/s 以及LCRD载荷卫星到空间站 51 Mb/s 的数据通信。

未来,美国计划借助LCRD项目积累的经验和技

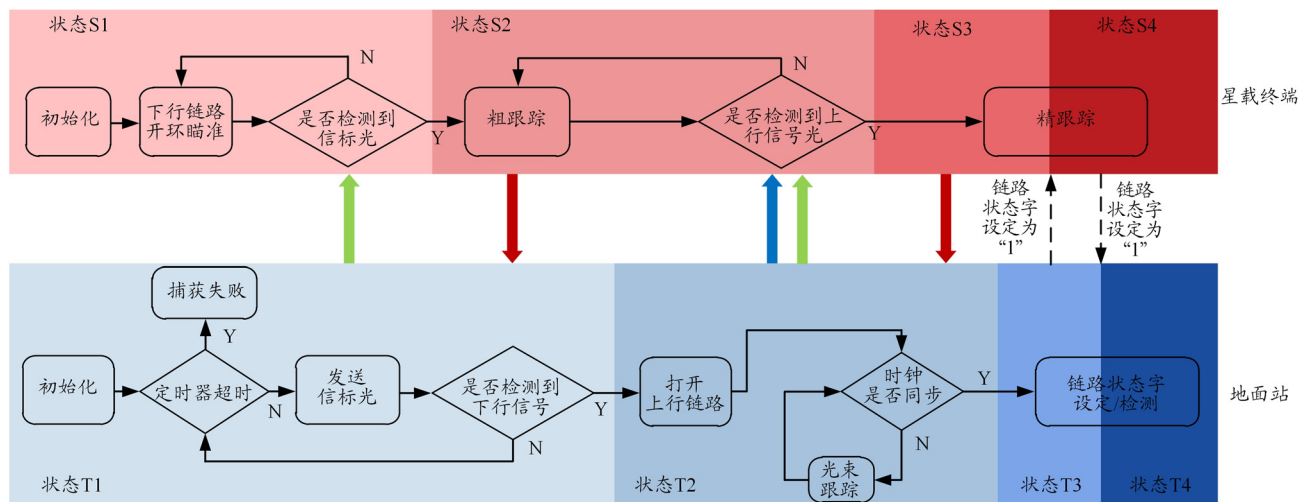


图9 星载终端与地面站 PAT 流程

术成果构建新型卫星中继系统——激光通信近地卫星系统(LOCNESS),与现有的 TDRSS 互相补充。该新型卫星中继系统初始阶段将部署至少 3 颗中继卫星,并为每颗中继星配备 4 台口径为 22 cm 的第二代卫星激光通信终端,实现中继星与用户之间 10 Gb/s 以及中继星间 100 Gb/s 激光互联,系统首颗卫星计划 2025 年发射^[14]。

3 结束语

卫星中继是空间激光通信技术最直接、最迫切的应用,目前世界各国都在积极发展卫星激光中继系统。除了美国的 LCRD 项目,还有欧洲的欧洲数据中继系统(EDRS)、日本的日本数据中继系统(JDRS)等。LCRD 项目作为美国探索下一代卫星中继系统的探路者项目,意义重大,其相关发展策略和创新技术值得我们参考借鉴。

参考文献:

- [1] BERNARD L E, DAVID J I. Update on NASA's Laser Communications Relay Demonstration Project [C]//15th International Conference on Space Operations, May 28–June 1, 2018, Marseille, France. Marseille: AIAA, 2018: 1055–1065.
- [2] BERNARD L E, DAVID J I, SEEMA K V. Latest Changes to NASA's Laser Communications Relay Demonstration Project [C]// SPIE Photonics West 2018 Conference, January 27–February 1, 2018, San Francisco, United States. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2018. DOI: 10.1117/12.2285221.
- [3] 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,2018,6(11):901–912.
- [4] BERNARD L E, DAVID J I. Overview of the Laser Communications

Relay Demonstration Project [C]//12th International Conference on Space Operations, June 11–15, 2012, Stockholm, Sweden. Stockholm: AIAA, 2013: 1–11.

[5] JAMIE W B, STEPHEN D C, ALLEN D P, et al. Design of an Inertially Stabilized Telescope for LLCD [J]. SPIE, 2011, 7923: 79230L-1–79230L-8.

[6] BERNARD L E, DAVID J I, DONALD E W. A Space Based Optical Communications Relay Architecture to Support Future NASA Science and Exploration Mission [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications, May 7–9, 2014, Kobe, Japan. Kobe: IEEE, 2014: S6-1-1–S6-1-10.

[7] 芮道满,刘超,陈莫,等.自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用[J].光电工程,2018,45(3):170647-1–170647-8.

[8] ROBERTS W T, ANTOS D, CROONQUIST A, et al. Overview of Optical Ground Station 1 of the NASA Space Communications and Navigation Program [J]. SPIE, 2016, 9739: 1–18.

[9] JOHN D M, KEITH E W. The architecture of the laser communications relay demonstration ground stations: an overview [J]. SPIE, 2013, 8610: 1–9.

[10] IOAG. Optical Link Study Group Final Report [R]. Washington: Interagency Operations Advisory Group, 2012: 1–54.

[11] ROBERTS W T, PIAZZOLLA S. LCRD Optical Ground Station 1 [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14–16, 2017, Okinawa, Japan. Okinawa: IEEE, 2017: 82–88.

[12] DAVID J I, BERNARD L E, JOHN W S. Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) Update and the Path towards Optical Relay Operations [C]//2017 IEEE Aerospace Conference, March 4–11, 2017, Montana, USA. Montana: IEEE, 2017: 1859–1864.

[13] BERNARD L E, DAVID J I, ARMEN C, et al. A Day in the Life of the Laser Communications Relay Demonstration Project [C]//14th International Conference on Space Operations, May 16–20, 2016, Daejeon, Korea. Daejeon: AIAA, 2016: 1–13.

[14] ELIZABETH A PARK, DONALD C, DAVID J I. NASA's Next Generation ≥ 100 Gb/s Optical Communications Relay [C]//IEEE Aerospace Conference, March 2–9, 2019, Montana, USA. Montana: IEEE, 2019: 1–9.