

# 深空月地激光高速信息传输技术

谭立英<sup>1</sup>, 孙征虎<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001;  
2. 中国空间技术研究院 通信卫星事业部, 北京 100094)

**摘要:** 深空月地激光高速信息传输技术利用光波进行深空信息传输, 相比于传统微波波段的信息传输技术而言, 在同样传输数据率情况下, 具有通信终端体积小、重量轻、功耗低等优点, 数据传输过程中接收灵敏度更高。此外, 由于激光光束较窄, 能量更为集中, 可达到更远的传输距离。针对深空月地激光高速信息传输技术, 介绍了深空月地激光信息传输技术发展的必要性和迫切性, 阐述了国内外深空月地激光高速信息传输技术的研究发展现状; 论述了深空月地激光技术上的挑战和技术可实现性, 可为我国深空激光通信的发展及其工程化应用提供参考。

**关键词:** 光波; 信息载体; 激光通信

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)06-0515-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.06.001

**引用格式:** 谭立英, 孙征虎. 深空月地激光高速信息传输技术[J]. 深空探测学报, 2019, 6(6): 515-522.

**Reference format:** TAN L Y, SUN Z H. High speed laser information transmission technology of deep space between Moon and Earth[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6): 515-522.

## 引言

20世纪50年代末, 人类开始了对月球的探索, 掀起了深空探测活动的序幕。随着航天技术的发展, 深空探测活动范围正进一步扩大, 探测任务也逐渐趋于多样化, 大量的探测数据使传统的通信链路成为深空探测的瓶颈<sup>[1]</sup>。目前的空间通信技术适合地球同步轨道, 尤其是近地轨道的航天活动。但当人类的航天活动扩展到月球及以远星体时, 遥远的通信距离使通信损耗剧增<sup>[2]</sup>, 同时低通信覆盖率也限制了传统的微波通信链路在深空探测技术中的应用。为了适应日新月异的深空探测技术的发展, 急需一种崭新的通信手段解决通信瓶颈问题。

卫星光通信技术是近几十年发展起来的通信通信技术, 以激光作为信息的载体, 信号光束散角极窄<sup>[3]</sup>, 可以提供大的发射天线增益以适应遥远的通信距离。同时, 卫星光通信终端体积小、重量轻、通信容量大, 更适合安装于深空探测器上。

将卫星光通信技术应用于绕月卫星-地球激光通信系统中, 组成绕月卫星-地球激光通信链路, 在极远的通信距离下, 尤其是在航天载荷体积、重量、功耗严格受限的条件下<sup>[4-5]</sup>, 为探月任务提供更高通信

带宽, 可将海量月球探测信息及时传输到地面, 为我国的深空科学研究提供依据。因此, 卫星光通信技术是探月信息传输瓶颈问题的理想解决方案<sup>[6]</sup>, 具有重要的科学和社会意义。

## 1 需求分析

1957年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)提出了深空探测计划。20世纪60年代深空探测中使用的频段是L波段(900 MHz)和S波段(2.29~2.30 GHz)。1977年, 在下行链路中使用了X波段(8.4 GHz)。20世纪90年代, NASA提交了较小飞行器科学载荷的概念, 扩展到用Ka波段进行地面-空间通信, 降低了其质量和功耗。用光进行深空探测中的信息传输则是近些年来人们所盼望的, 这可以使终端质量和功耗进一步地降低。特别是近几年又大大增加了对小体积、低质量、低功耗空间飞行器的需求, 已形成了美国在深空探测中用光频段作为信息载体研究的推动力。美国在地球轨道深空中继卫星(Deep Space Relay Satellite, DSRS)链路采用光频段直接探测通信, 在地球静止轨道(Geostationary Earth Orbits, GEO)的星上终端中, 用雪崩光电二极管(Avalanche Photo Di-

ode, APD)接收,采用固体半导体激光器直接发射激光。光学直接探测的深空中继卫星系统(Deep Space Relay Satellite System, DSRSS)的性能要比Ka波段深空探测网络(Deep Space Network, DSN)提高1个数量级以上。为此,近几年美国开展了用于深空通信的直接探测光学中继卫星的研究工作<sup>[7-8]</sup>。

深空探测是脱离地球引力场,进入太阳系和宇宙空间的探测活动,当前主要包括5大领域:月球探测、火星探测、水星与金星探测、巨行星及其卫星探测、小行星和彗星探测<sup>[7]</sup>。深空探测是人类了解地球、太阳系和宇宙,进而考察、勘探、开发利用太阳系其它星体的第一步<sup>[8]</sup>,具有十分重要的科学和经济意义。因此,深空探测技术正日益成为世界各国重点研究的领域。随着航天技术的发展,深空探测活动范围进一步扩大,探测任务趋于多样化,大量的探测数据使传统的通信链路成为深空探测的瓶颈。为了适应

日新月异的深空探测技术的发展,需要崭新的通信手段突破这些瓶颈问题。

卫星激光通信在深空探测活动中具有微波通信系统无可比拟的优势:①具有更高的载波频率,更高的通信容量,目前,卫星微波通信使用的频段在300 MHz~300 GHz,然而卫星光通信的频段则为300 THz,二者相差103~106倍,采用光波段进行通信时的通信调制带宽可以显著增大,通信的数据率可达数Gbps或更高;②终端体积、重量明显减小,光波波长是微波波长的十万分之一,与卫星微波通信系统相比,卫星光通信系统的天线尺寸成倍减小,从而有效地减少了通信终端的体积与重量;③功耗更低,卫星光通信系统通过压缩信号光束散角,提供了巨大发射天线增益,从而有效地减小了通信时所需的信号光功率,降低了系统所需功耗,深空激光通信优势见图1。

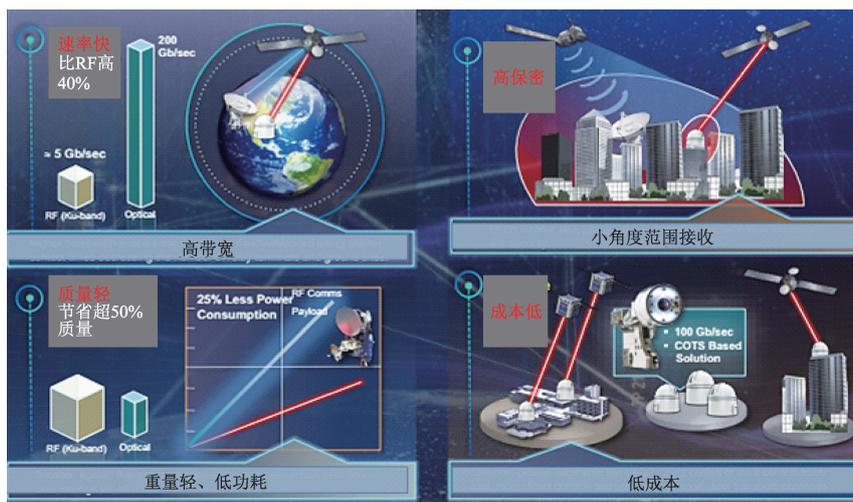


图1 深空激光通信优势

Fig. 1 The advantages of laser communication link

近年来,随着我国探月工程的不断推进,绕月卫星-地球高速激光信息传输需求越来越迫切,急需突破绕月卫星-地球激光通信技术。因而月地激光通信链路的建立可充分发挥探测器上高分辨率、宽视场成像仪的作用的而不受通信数据率的影响,为深空探测技术的发展带来深远的影响。同时也为我国深空探测技术发展提供关键技术支撑。

## 2 国内外研究现状分析

### 2.1 国外研究现状分析

自从20世纪60年代中期开始,美国对空间光通信技术和应用制定了相应的研究计划,同时针对大气湍流的影响,积极开展了自由空间激光传输理

论和实验研究<sup>[9]</sup>。目前,NASA、喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)、美国弹道导弹防御组织(Ballistic Missile Defense Organization, BMDO)和麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)林肯实验室等机构从事卫星激光通信相关技术的理论和实验研究<sup>[10]</sup>。

1992年12月9—16日,美国的JPL做了伽里略光学实验,实验的内容为在飞往木星的“伽里略号”探测器上的相机接收由加州的Table Mountain天文台和新墨西哥州的Starfire Optical Range发射的光信号,起始距离为60万km,终止距离为600万km,为地球到月球距离的15倍<sup>[10]</sup>。伽里略光卫星通信实验是人类首次深空光通信实验,该实验是在太阳-地球-探测

器角度为 $90^\circ$ 时,太平洋标准时间3—6点进行的,这使得探测器上的照相机所拍到的地球一半亮一半暗,这种几何分布使得以暗半球为背景的激光很容易在照相机的底片上成一个清晰的像。该实验的主要目的是:①演示仅依据星历表预测深空探测器位置的激光上行链路;②演示对脉冲调治光信号的接收;③检验深空星间链路理论模型正确性;④对分别用532 nm和1 064 nm进行光学链路通信性能评估。

照相机对红外波段的光不敏感,所以波长在1 064 nm的激光上行链路并没有做。因为实验在夜间进行,照相机的曝光时间可以长达800 ms,该实验共拍照159幅,记录下光信号的48幅,在相机曝光时间小于400 ms时没有一次成功的接收,说明激光器的功率不够大。实验中是利用“伽里略号”探测器的轨道信息瞄准与其角度在 $0.5^\circ$ 以内的恒星来实现的,通过实验测得误差在 $85 \mu\text{rad}$ 以内。影响该实验的3个最大因素分别为:①天气;②管理机构美国空间防御指挥中心对光束发射的限制;③“伽里略号”探测器下行链路信噪比异常。

2013年1月,NASA在戈达德航天飞行中心成功地将达芬奇名画《蒙娜丽莎的微笑》的数码影像,通过激光脉冲发送至月球上的月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO),数据的传输速率大约是300 bps。美国在2013—2014年进行的绕月卫星-地球激光通信演示验证计划(Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD)由MIT林肯实验室和NASA的戈达德航空间飞行中心共同承担<sup>[11]</sup>。该计划中,NASA尝试在绕月轨道与地面站间进行激光通信实验,该项目的星上激光通信终端安装于月球大气与尘埃环境探测飞船(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE)上,与地面激光通信终端建立激光通信链路完成下行最高为622 Mbps,上行最高为20 Mbps的演示验证实验<sup>[11]</sup>。该计划同时验证飞行试验测量技术(time-of-flight measurement),可实现星上与地面终端间亚厘米级的定位修正,是实现高速上行、下行信号传输的基础。2014年4月,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)位于西班牙的光学地面站接收到了NASA月球大气和尘埃环境资源探测器的激光信号,下行数据率为80 Mbps<sup>[12]</sup>。

LLCD主要包括3个组成部分:星上终端LLST(Lunar Lasercom Space Terminal)、地面终端LLGT(Lunar Lasercom Ground Terminal)、绕月卫星-地球激光通信操作中心LLOC(Lunar Lasercom Operation

Center)。林肯实验室完成此3部分的全部测试、制造、测试工作,在轨运行由NASA的戈达德航空间飞行中心管理,如图2所示。

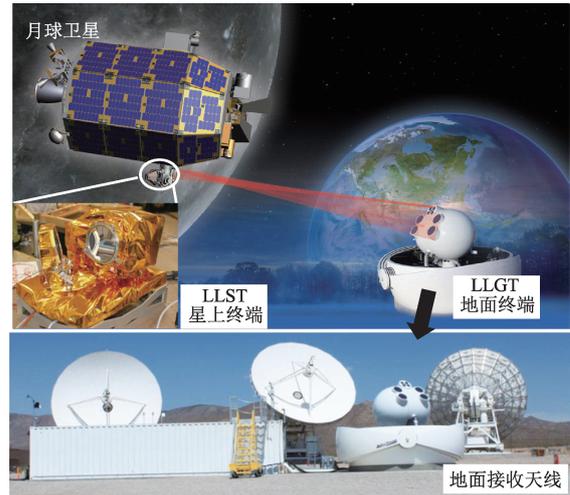


图2 LLCD项目激光通信试验  
Fig. 2 The LLCD laser communication experiment

LLST的承载平台LADEE由NASA的Ames研究中心设计研制,于2013年发射,该飞船带有3个科学载荷,在其飞行任务中进行约100 d的科学实验,科学实验中该飞行器距月球表面几十千米高。在科学实验前有1个月的试运行阶段,其中16 d飞船将进行星地激光通信实验。试运行阶段飞船距月球表面约250 km,轨道周期约2 h。由于受到能源限制同时考虑热控,在每个轨道周期LLST仅工作15 min。考虑地面终端的可见性,一天有3~5个轨道周期可进行绕月卫星-地球激光通信。

为实现目标的空间捕获与跟踪LLST使用了大视域的InGaAs四象限探测器。发射光通过光纤出射经由望远镜发射,入射光经由望远镜耦合入光纤中。这些光纤固定在压电陶瓷上,以实现超前瞄准和对目标的跟踪。光发射与接收器安装在调制解调模块中,光纤将其于光学模块连接起来。

调制解调模块中的数字电路集成了下行链路不同的数据源(包括LADEE的科学实验数据、LLST的高速遥测数据、光上行信号的回放数据)。调制解调模块进行数据编码。编码后的数据通过高带宽脉冲位置调制加载到光信号上,之后通过掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大到0.5 W的平均功率。接收探测器为直接探测器,装有一个基于低噪EDFA的前置放大器。基于双PPM(Pulse Position Module)的硬判决脉冲位置解调器对上行链路

波前进行解调,之后上行链路信号由FPGA(Field-Programmable Gate Array)进行解码。

该终端由发射天线阵列、接收天线阵列、控制室组成。采用天线阵列的方式不但增加了天线口径,同时通过空间分离的方式降低了大气湍流对光信号的影响。

LLGT的发射天线由4个15 cm口径的透射式望远镜组成,接收天线由4个40 cm的反射式望远镜组成<sup>[13]</sup>,每一个望远镜的光信号都通过光纤耦合至控制室中,与光发射器、接收器相联。这8个望远镜安装于同一个二维转台上,转台可在半球空间内实现光学天线的粗对准。每一个光学天线的后续光学系统都包括一个焦平面阵列和一个高速偏转镜,以实现对下行光束的跟踪,同时对每一个光学天线的光轴进行校准。望远镜阵列安装在玻璃纤维保护罩中,以保证它们的工作环境。

LLGT的所有电子学设备安装在控制室中,实现对转台与天线的控制及对光信号的调制解调。光发射器通过EDFA放大输出功率为10 W的光束,调制方式为脉冲位置调制。发射光束通过偏振保持单模光纤耦合至发射望远镜中。LLGT的接收器为光

子计数超导纳米线阵列(photon-counting superconducting nanowire arrays),工作在低温环境中,具有极高的光子探测效率。在LLGT的接收光学系统中,为了提高大气湍流条件下的光耦合效率,同时考虑下行光信号的偏振性,使用了特制的多模保偏光纤。

除美国以外,ESA自1977年开始也在大力发展卫星激光通信技术。例如,2001年,欧空局开展的半导体激光星间链路实验(Semiconductor Laser Inter-satellite Link EXperiment, SLIEX)实现了国际首次星间激光链路前向2 Mbps和反向50 Mbps数据率传输,调制方式为强度调制/直接探测。近些年来,欧空局正逐步开展欧洲数据中继系统(European Data Relay Satellite, EDRS)计划,最大通信数据率1.8 Gbps,通信光波长1 064 nm,调制方式为BPSK(Binary Phase Shift Keying)相干调制,如图3所示。其中,EDRS-A高轨中继卫星已经于2016年1月27日发射入轨,计划2020年完成发射EDRS-C/D/E等3颗高轨中继卫星,完成4颗高轨中继激光通信卫星与地面构建的星间/星地EDRS高速通信光网络,并为用户提供运营服务。

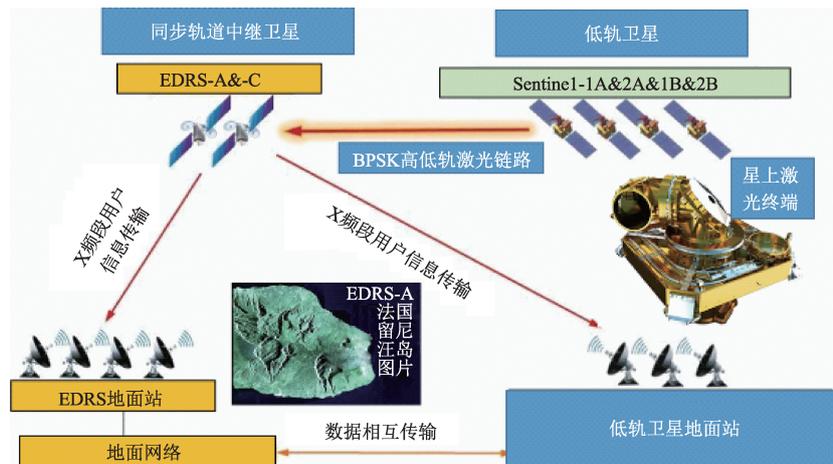


图3 EDRS通信系统示意图  
Fig. 3 Scheme of EDRS system

日本自20世纪80年代开始卫星激光通信相关研究,包括LCE(Laser Communication Experiment)计划、光学轨道通信实验卫星(Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite, OICETS)和SOCRATES(Stages of Change Readiness and Treatment Eagerness Scale)计划等。日本在卫星激光通信方面的研究更多地注重在激光通信终端10 kg以内的

小型化、轻量化的发展,像SOCRATES计划中的终端SOTA(Small Optical TrAnsponder),总重量仅为5.8 kg,下行通信数据率为10 Mbps,如图4所示。日本还制定了“激光数据中继卫星”计划,调制方式为DPSK(Differential Phase Shift Keying)相干调制,数据率设定为2.5 Gbps,计划2019年发射入轨。

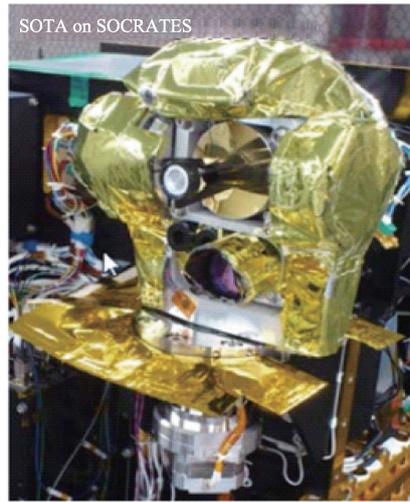
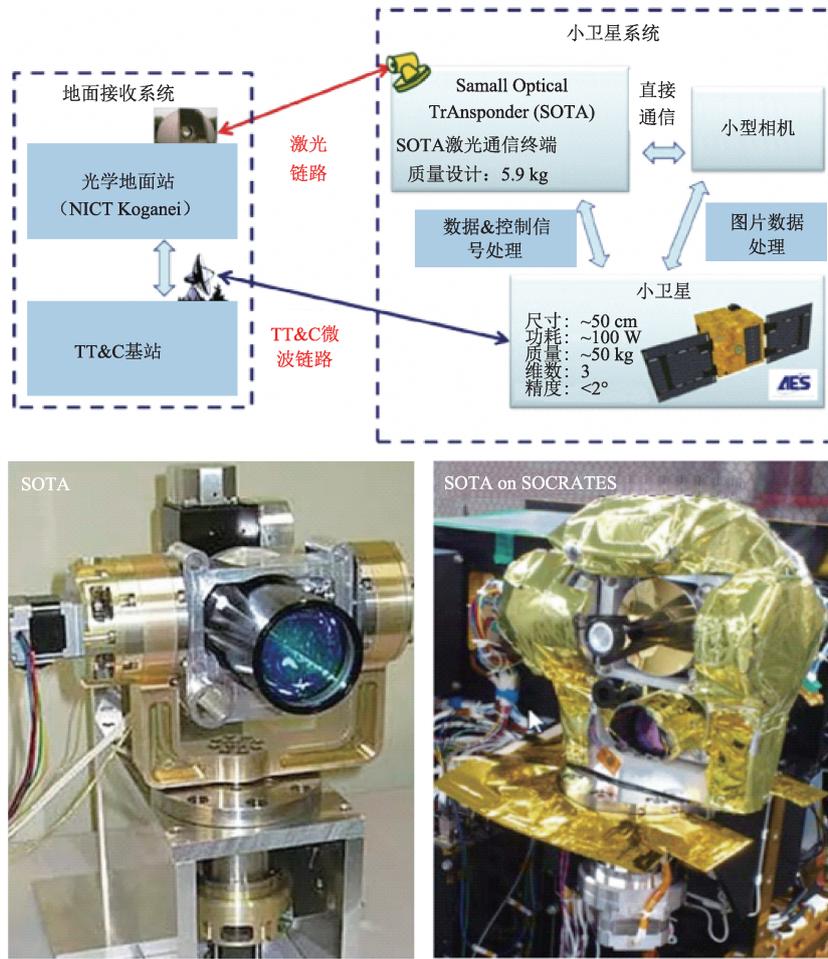


图4 SOCRATES通信系统示意图  
Fig. 4 Scheme of SOCRATES system

虽然欧洲以及日本等其它国家在卫星激光通信研究过程中取得了一系列成果，但除了美国，迄今为止并未有深空探测激光通信计划的公开报道。

### 2.2 国内研究现状分析

哈尔滨工业大学自1991年就开展了卫星光通信的研究工作，迄今已近30年，是国内最早开展卫星光通信技术研究的单位<sup>[4]</sup>。研制了星地、星间激光通信系统工程样机。终端的质量、体积、功耗及数据率等技术指标上都优于目前国际激光链路空间试验中正在使用的终端，卫星光通信系统研制上达到国际先进水平。

2017年4月12日，搭载哈尔滨工业大学团队研制的激光通信终端随“实践13号”（中星16号）同步轨道卫星发射入轨。2017年4月27日—8月27日，成功进行了我国首次高轨卫星星地高速激光通信，在近4万km距离的卫星与地面站间，实现了上下行双向光束“针尖对麦芒”般的高精度捕获跟踪，成功进行了星地高速激光通信数据传输、实时转发和存储转

发，实现了高轨空间与地面站之间激光信道的“捕跟快速切换、精确锁定、高速通信”，最高传输数据率达5 Gbps (2.5 Gbps×2)，是迄今为止国际上已进行或近期计划进行的高轨卫星星间及星地激光通信在轨试验中的最高传输数据率，如图5所示。

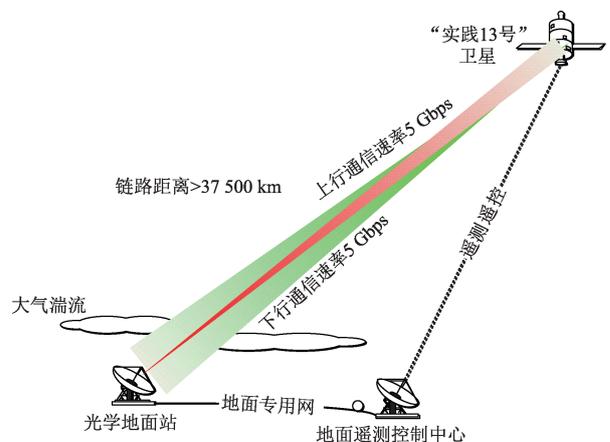


图5 高轨星地激光链路捕获过程示意图  
Fig. 5 Scheme of high-orbit satellite/ground link acquisition process

试验的成功,开创了国际卫星激光通信发展新局面,具有如下特点:①链路跟踪稳定,在近4万km传输距离下,成功实现光束信号的快速捕跟切换和高精度稳定跟踪锁定,平均捕获时间2.5 s,1 h跟踪稳定度为100%;②传输速率高,国际首次实现了高轨星地激光双向通信,最高速率达5 Gbps,国际领先;③通信质量好,国际上首次实现了高轨星地600 Mbps、1.25 Gbps、2.5 Gbps、5 Gbps多种数据率的激光通信,误码率均优于 $10^{-6}$ ;④采用多项自主创新先进技术,在卫星与地面间首次采用波分复用激光通信技术,并对短时保密高速通信、高速激光信息接收与转发、远距离高速激光通信大气影响补偿等多项技术进行了验证,为后续天地一体化信息网络国家重大科技工程的实施奠定了坚实基础。

### 3 深空月地探测激光通信关键技术

深空月地激光通信研究过程中,涉及到很多关键技术难题,主要包括大功率高带宽激光器技术、高灵敏度接收技术、瞄准捕获跟踪技术和调制编码技术等<sup>[15-16]</sup>。

#### 3.1 大功率、高带宽的激光器技术

一般而言,深空光通信距离较远,使得通信误码率较高,因而对光发射模块提出了新的要求:大输出功率条件下激光要具有线宽小的特性,高码率调制条件下低啁啾系数,此外,激光器尺寸要小。现阶段常用的放大器有MOPA (Master Oscillator Power-Amplifier) 主振荡功率放大器,可产生高度相干光束,在放大功率的同时保留其主要特性,转换效率较高。此外,MOPA放大器可以较容易得到线宽、波长调谐范围、光束质量或脉冲持续方面的优异性能,并与激光功率关系较小,在深空月地激光通信技术中有较大的应用前景<sup>[17-19]</sup>。

#### 3.2 高灵敏度接收技术

在月地卫星激光通信系统中,光信号经过远距离传输已经非常微弱,需要采用高灵敏度的接收机对微弱信号进行探测。超导纳米线单光子探测器 (Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors, SNSPDs) 能够在超紫外到红外波段实现高速单光子探测,具有高探测效率、低噪声和精确的光子计时。美国喷气推进实验室和美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 合作开发的单像素光纤耦合WSi SNSPD (钨硅化物超导纳米线单光子探测器) 阵列,可展现出高达93%的系统检测效率,这一光子技术探测器被广泛应用于

NASA的LLCD等项目中<sup>[10-12]</sup>。

#### 3.3 瞄准、捕获和跟踪技术

相比于近地轨道卫星激光通信而言,深空月地激光通信对瞄准、捕获和跟踪 (Pointing Acquisition and Tracking, PAT) 技术提出了新的要求:考虑月球探测器的姿态变化、工作平台振动的影响、较大的实时提前量角修正以及亚微弧度量级误差的动态跟踪<sup>[20]</sup>。因此,针对此类问题,PAT控制策略、振动补偿方法以及控制执行速度等均需进一步深入研究。

#### 3.4 大气信道自适应光学

大气湍流不但对下行链路信号能量和像质接收产生严重的能量展宽和相差畸变,还会对上行信号激光束产生明显的光束漂移和强度起伏<sup>[21]</sup>。从而严重影响着深空月地激光通信的质量和链路稳定性。因而,下行链路地面接收终端需开展自适应光学技术减少大气湍流的影响。而上行链路中可采用地面终端多路发射的方法,减小大气湍流对上行链路接收的光强闪烁影响。

#### 3.5 调制与编码技术

深空月地激光通信要实现高功率、超远距离的传输,需要对发射端激光器进行高码率调制,因此高码率调制技术是实现深空光通信的关键技术之一,即一种具有更高功率利用率、频率利用率以及更好的误码特性的调制方式。PPM调制是一种在激光脉冲频率一定的情况下可以利用很小的光平均功率实现较高的数据传输率,从而可降低对激光器发射功率的要求。此外,PPM调制抗干扰能力也相对较高,且编码设计和实现较为简单易行,是一种深空月地激光通信较为实用的调制方式。在NASA提出的“用于未来10年技术演示的深空光通信架构中”,采用了串行级联脉冲位置调制 (Serially Concatenated Pulse Position Module, SCPPM),最大数据速率达到267 Mb/s,同时使用LDPC (Low-Density Parity-Check) 方式,编码速率为2 kb/s<sup>[22]</sup>。

尽管PPM调制方式应用广泛,但是它需要瞬时光强度的不平衡分布,这导致了对发射器中使用的激光光源的峰值平均功率比的严格要求。此外,PPM在带宽以及传输容量方面尚有不足,现在又提出了许多像差分脉冲位置调制 (Differential Pulse Position Modulation, DPPM) 和数字脉冲间隔调制 (Digital Pulse Interval Modulation, DPIM) 等调制方式。

## 4 结 论

相比于传统的微波频段深空探测通信技术, 卫星激光通信具有体积小、重量轻和功耗低等优点, 数据传输接收灵敏度更高, 极窄的激光光束使得链路传输距离更远。在航天载荷体积、重量、功耗严格受限的条件下, 可为探月任务提供更高通信带宽。本文综述了国内外卫星激光通信在深空探测领域的研究进展, 并在此基础上论述了深空月地激光技术上的挑战和技术可实现性。为我国深空科学研究提供依据。绕月卫星-地球激光通信链路可实现绕月卫星与地球之间的高速数据传输, 将月球探测资料无压缩高保真传回地面的科学试验, 将具有重要的科学意义和社会意义。

### 参 考 文 献

- [1] 刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147-153.  
LIU X N, LI Y F, XIANG C Y, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153.
- [2] 刘婧. 深空探测中测控与通信技术现状和未来发展趋势[J]. 深空探测研究, 2008, 6(2): 27-32.  
LIU J. Current status and developing trend of tracking and technology in deep space exploration[J]. Deep Space Exploration, 2008, 6(2): 27-32.
- [3] 徐科华, 马晶, 谭立英. 月地激光通信系统误码率分析[J]. 半导体光电, 2005, 26(1): 50-53, 57.  
XU K H, MA J, TAN L Y. Big error rate in lunar-earth optical communication system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(1): 50-53, 57.
- [4] DAVIDSON F M, SUN X L. Gaussian approximation versus nearly exact performance analysis of optical communication systems with PPM signaling and APD receivers[J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 11(11): 1185-1192.
- [5] 伍尚慧, 毛登森, 李聪. 激光通信测控在深空探测中的引用现状及对我国未来发展的启示[J]. 电光系统, 2015(1): 12-19.  
WU S H, MAO D S, LI C. Application status of laser communication TT&C in deep space exploration and its inspirations for future development in our country[J]. Electronic and Electro-optical system, 2015(1): 12-19.
- [6] 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.
- [7] 王杰华. NASA 将利用国际空间站测试“激光通信光学有效载荷”[J]. 中国航天, 2013(11): 24-27.  
WANG J H. NASA will use the International Space Station to test "effective optical values of laser communications"[J]. Aerospace China, 2013(11): 24-27.
- [8] LEWIS C R, SETH R M, SABINE P, et al. Daytime adaptive optics for deep space optical communication[C]//Proceedings of SPIE, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VIII. [S.l.]: SPIE, 2019.
- [9] 张立华, 吴伟仁. 月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J]. 深空探测学报, 2018, 5(6): 497-505.  
ZHANG L H, WU W R. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(6): 497-505.
- [10] 刘阳. 卫星动态光网络的时延及路由特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
LIU Y. Research on the delay and routing characteristic of dynamic optical satellite network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 刘丰, 朱忠博, 李栋, 等. 太赫兹波在遥感技术中的应用探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(5): 693-701.  
LIU F, ZHU Z B, LI D, et al. Discussion on terahertz techniques in remote sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(5): 693-701.
- [12] 周卫来, 凌闽河, 朱培芸. 深空探测天线技术发展现状及趋势[J]. 空间电子技术, 2011(2): 17-21, 64.  
ZHOU W L, LING M H, ZHU P Y. Progress and prospect of antenna technology in deep space exploration[J]. Space Electronic Technology, 2011(2): 17-21, 64.
- [13] 杨清波. 星地下行相干激光通信系统接收性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
YANG Q B. Research on respective performance of satellite-to-ground downlink coherent laser communication system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [14] 丁国庆. FSO 中基于动态接入节点选择的 FPMIPv6 切换方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.  
DING G Q. Research on FPMIPv6 handover scheme based on dynamic access point selection in FSO network[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [15] 李梦男. 激光空间相干度对光纤耦合的自差接收系统性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
LI M N. Research on the influence of laser spatial coherence degree of performance of receiving systems based on fiber coupled self-homodying detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [16] 李力行. 基于图像检测的空间激光通信链路误差校正技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
LI L X. The space laser communication link error correction techniques based on image detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2017.
- [17] 张靓, 郭丽红, 刘向南, 等. 空间激光通信技术最新进展与趋势[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 286-293.  
ZHANG L, GUO L H, LIU X N, et al. Latest progress and trends of development of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4): 286-293.
- [18] 刘童. 激光光斑位置提取技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学

精密机械研究所,2018.

LIU T. Research on laser spot position extraction technology[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of, Chinese Academy of Sciences, 2018.

- [19] 常国龙. 半导体激光器辐射效应及影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

CHANG G L. The study of the influence of radiation effect on laser diodes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

- [20] 王义龙. 特殊口径调光系统的研制及其实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

WANG Y L. Development of the special caliber dimming system and its experimental study[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

- [21] 马晶, 韩琦琦, 谭立英, 等. 卫星光通信技术发展及其影响因素分析[J]. 光通信技术, 2004, 28(10): 45-47.

MA J, HAN Q Q, TAN L Y, et al. Development of satellite optical communications and analysis of influence factors[J]. Optical Communication Technology, 2004, 28(10): 45-47.

- [22] 曹馨蕾, 林澄清, 黄东海, 等. 卫星光通信技术发展及其影响因素分析[J]. 中国西部科技, 2014, 13(2): 27-28, 66.

CAO X L, LIN C Q, HUANG D H, et al. The development of satellite optical communication and its influence factors[J]. Science and Technology of West China, 2014, 13(2): 27-28, 66.

作者简介:

谭立英(1957-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 卫星激光通信。

通讯地址: 哈尔滨工业大学科学园2A1502(150001)

电话: (0451)86402866-1502

E-mail: tanly@hit.edu.cn

## High Speed Laser Information Transmission Technology of Deep Space Between Moon and Earth

TAN Liying<sup>1</sup>, SUN Zhenghu<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2 Communications Division, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The application of light wave for deep space information transmission will have the advantages of smaller terminal volume, mass and low power consumption under the same data rate, and the receiving sensitivity is high during the transmission process. Because of the narrow beam width, it can make the energy centralized and reach a long transmission distance. Using light wave as the information carrier of deep space exploration will have the advantages that the microwave band does not have. The feasibility of technology is described, and the research status of the moon earth laser information transmission technology is summarized, providing a reference for the development and engineering application of deep space laser communication in China.

**Keywords:** light wave; information carrier; laser communication

**Highlights:**

- The essential requirements and feasibility of deep space laser information transmission technology is introduced.
- The research progress of laser communication technology is summarized.
- Some suggestions on laser communication technology in deep space exploration are put forward.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]