

## 星间激光链路数据中继技术研究进展

赵 静,赵尚弘,李勇军,赵卫虎,韩 磊,李 轩

(空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077)

**摘 要:** 基于高性能激光链路构建高速安全的数据中继卫星系统可为不同轨道、不同功能的对地观测卫星和用户航天器提供大容量、无缝隙的数据中继服务,在军事和民用领域均具有广泛的应用前景。以欧洲为代表的发达国家相继开展了星间激光链路数据中继技术的理论研究和星上演示验证,并启动了相应的工程验证计划。综述了国内外星间激光链路数据中继技术的研究现状,对几种典型激光链路数据中继卫星系统,着重研究了系统结构、激光终端及模拟验证实验。最后,分析了数据中继卫星激光链路组网中着重关注的几个方向。

**关键词:** 数据中继技术; 星间激光链路; 卫星光网络

**中图分类号:** TN929.13    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3103-08

## Advance on data relay technology for inter-satellite laser links

Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, Zhao Weihu, Han Lei, Li Xuan

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** High speed and secure data relay satellite system based on high power inter-satellite laser links can provide high capacity and seamless relay services for earth observation satellite and user spacecraft with different functions in different orbits, it has a broad prospect of application both in military and civil fields. The European countries have studied the data relay satellite with laser links, the theoretical research and technology demonstration on-board is launched, and so is the corresponding engineering verification program. In this paper, the research progress was demonstrated and reviewed; typical data relay satellite system based on inter-satellite laser links was introduced, especially in the system structure, the hardware and experimental foundations. The prospect of the inter-satellite laser links networking toward advanced applications was expected.

**Key words:** data relay technology; inter-satellite laser link; satellite optical networks

收稿日期:2013-03-17; 修订日期:2013-04-19

基金项目:中国博士后科学基金(2012M512066)

作者简介:赵静(1988-),女,硕士生,主要从事卫星光通信方面的研究。Email:panpasi126@126.com

导师简介:赵尚弘(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信与激光技术方面的研究。Email:Zhaoshangh@yahoo.com.cn

## 0 引言

数据中继卫星系统是转发地球站对中、低轨道航天器的跟踪测控信号,并对中、低轨道航天器发回地面的数据、图像和话音等进行实时、连续的中继的系统。通常包括中继卫星、用户航天器和地面站 3 个部分<sup>[1-2]</sup>。随着新型对地高分辨率遥感器和新的卫星数据业务的发展,对地观测卫星、合成孔径雷达、气象观测卫星、军事通信卫星和侦查卫星等的数据传输速率需求越来越高,需要实时处理传输 Gbps 量级及以上的高码率的海量数据。

现有基于微波链路的数据中继卫星系统,从数据星经中继星到地面的反向链路传输速率已接近 Gbps 量级,然而微波频率资源有限,难以满足高速数据传输速率的要求,并且由于微波链路抗干扰性能较差,难以保证保密信息的可靠传输。星间激光链路数据中继技术正是针对微波链路的不足所提出的解决方案,与微波链路相比具有高传输速率、高可靠性、抗电磁干扰等优点<sup>[3-5]</sup>。主要优点如下:

(1) 设备间无射频信号干扰,目前无需申请使用许可证。

(2) 激光链路终端在体积、重量和功耗方面都具有优势。

(3) 激光链路有远高于微波星间链路的极高的潜通信数据传输率(可达 100 Gb/s),实际上已经做到同时传输几百到几千,多者达几万路通信话路。

(4) 激光光束的发射角极窄,通常都在毫弧度甚至微弧度量级,因此星间激光链路的抗干扰能力强,数据传递具有极高的保密性。

因此,针对目前数据中继卫星系统现状与未来数据中继传输需求,建设基于激光链路的数据中继卫星系统具有广泛的应用前景,而研究星间激光链路数据中继技术具有重要的战略意义,文中综述了国内外星间激光链路数据中继技术的研究现状,并对数据中继卫星激光链路组网中着重关注的几个方向进行了分析。

## 1 研究现状和发展

以欧洲为代表的发达国家相继开展了星间激光链路数据中继技术的理论研究和星上演示验证,并

启动了相应的工程验证计划。

### 1.1 激光链路数据中继卫星系统

#### 1.1.1 转型卫星通信系统 TSAT

自美国麻省理工大学信息与决策系统实验室提出卫星光网络概念以来,20 世纪到 21 世纪初,卫星光网络曾辉煌一时,包括 Celestri, Teledesic 和日本 NeLS 等采用激光链路的卫星网络相继出台,由于这三个系统都是全部采用新发射的 LEO 卫星来构建单层光网络,为实现全球覆盖,卫星数量和终端数量巨大,从而导致预算超额计划破产。2001 年美国国防部规划的转型卫星通信系统(TSAT)<sup>[6-7]</sup>属于一个相对保守的过渡系统。TSAT 空间段由 5 颗卫星组成,是以激光链路为骨干,整合静止轨道卫星系统、光学中继卫星通信系统(ORCA)、高级极轨卫星通信系统(APS)以及数据中继系统(TDRSS-C)为一体,能对南北纬 65°间区域提供连续覆盖,保密的下一代宽带卫星通信系统。其系统框架如图 1 所示。TSAT 引入星间激光链路,较微波通信大幅度提高了带宽,卫星与飞机间的数据速率达到 6 Gbps,星间激光链路支持 10~40 Gbps 的流量可提供 20~50 路的高速激光链路(2.5~10 Gbps)。

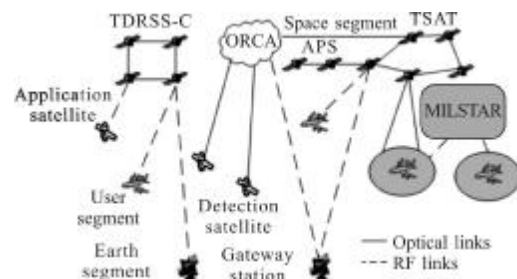


图 1 TSAT 系统框架

Fig.1 Framework of TSAT system

#### 1.1.2 Alpha 星计划(Alpha SAT)

欧空局和国际海事卫星公司(Inmarsat Global)联合推出 Alpha 星计划(Alpha SAT),其中提出了数据中继卫星激光链路组网的概念<sup>[7-8]</sup>。Alpha SAT 是一颗 GEO 通信卫星,计划于 2012 年左右发射,拟定轨在东经 25°,为欧、非、亚用户提供数据转发业务。与此前欧洲半导体激光星间链路试验(SILEX)系统类似,LEO 卫星对地观测数据可借助激光链路传到 GEO 卫星,GEO 卫星采用 Ka 频段微波链路将数据传回地面,最大下行速率达 600 Mb/s。Alpha SAT 将

提供 LEO-GEO 高速数据中继服务,支持 45 000 km 距离上 2.5 Gbps 的数据传输,使 LEO 同 GEO 之间具备高速激光通信的能力。Alpha SAT 激光通信实验不仅是卫星光网络中的一次重要的技术验证,同时也是星间激光链路在数据中继应用中的一次推广。

### 1.1.3 欧洲数据中继卫星(EDRS)系统

近年来,随着欧洲“全球环境与和安全监视”(GMES)计划的实现,预计欧洲空间通信基础设施每天将需要从空间到地面传输 6 TB 的数据,在较短的时间延迟内交付如此大的数据量,给当前的通信基础设施带来了挑战,因为常规的通信手段可能不足以满足地球观测数据用户的需要。此外,当前欧洲依赖非欧洲地面站的可能性来接受地球观测卫星的数据,因为这些至关重要的空间资产可能不在欧洲的控制之下,所以给欧洲的战略独立性带来了潜在的威胁。因此,2008 年 6 月 27 日欧空局发布了新的中继卫星“欧洲数据中继卫星”(EDRS)系统计划<sup>[8-10]</sup>,为这些挑战提供了一个解决方案。EDRS 空间段由三颗 GEO 卫星组成,如图 2 所示,GEO 卫星相互之间采用激光链路互联,可提供全球覆盖,是直接面向应用的数据中继卫星系统,具备星间激光链路组网的雏形。地面段包括卫星控制中心、地面站和任务与运行中心。当前,EDRS 的主要任务是为欧洲“全球环境和安全监视”(GMES)计划提供数据中继服务。

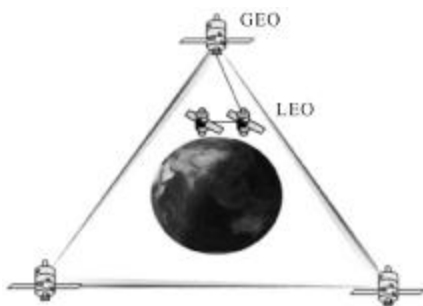


图 2 EDRS 空间段示意图  
Fig.2 Space section of EDRS

在如图 3 所示的 EDRS 星座中,数据从 LEO 卫星通过激光链路传到 GEO 卫星,再从 GEO 卫星通过发 RF 链路传回地面。EDRS 能够提供 LEO-GEO 之间 1.8 Gb/s 的激光双向链路,同时为用户星“哨兵”系列卫星提供 600 Mb/s 的 Ka 频段双向链路及 GEO-地面之间的 600 Mb/s 的 RF 链路。GEO-地面

之间激光链路近年来仍在研究之中,装备有光学自适应系统的光学地面站预计将在 2012 年底投入使用,用以验证 GEO-地面之间高速激光下行链路。EDRS 中星间激光链路的带宽和频率优势真正展现到卫星通信领域,并将首次实现激光链路数据中继卫星组网通信。

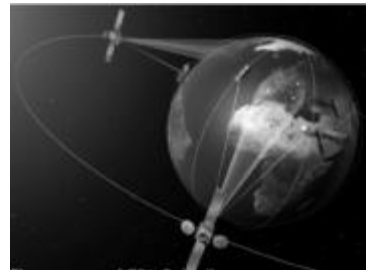


图 3 GEO 中继系统  
Fig.3 GEO relay system

### 1.1.4 下一代数据中继卫星系统

日本十分重视数据中继卫星的发展。2002 年 9 月日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)的数据中继试验卫星(DRTS)发射成功并获得在轨运行的经验,可以以较小延迟传输超过 99%接收到的对地观测图像<sup>[11-12]</sup>。数据中继卫星灵活拓展业务,对人类航空活动具有决定性作用,因此增加数据中继卫星传输容量是 JAXA 下一步迫切的主题,而星间激光链路的引入是有效的解决方法。为了满足高分辨率对地观测卫星传输大容量数据的需求,日本提出了基于星间激光链路的下一代数据中继卫星系统的任务规划,如图 4 所示,激光链路被用于对地观测卫星(LEO)与数据中继卫星(GEO)之间通信的建立,需要注意的是,数据中继卫星与地面站之间的链路是 Ka 波

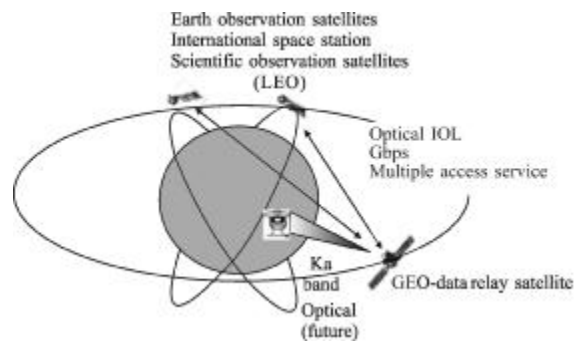


图 4 基于星间链路的下一代数据中继卫星任务概览  
Fig.4 Overview of next generation of data relay satellite mission using inter-orbit laser links

段,这是因为地面站与日本天气条件的限制,很难达到光学馈电链路的要求,而在未来,LEO-GEO-光学地面站之间的光学链路都要被考虑在中继系统中。

## 1.2 激光通信终端

### 1.2.1 Tesat 相干激光通信终端

欧洲航天局(ESA)进行的半导体激光星间链路试验(SILEX)系统,实现了 48 000 km、50 Mb/s 速率的世界上首次星间激光链路试验<sup>[13]</sup>。作为 SILEX 的后续计划的产物,ESA 合约单位 Tesat 公司研制了相干激光通信终端 LCT/LCTSX,采用 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光器,二进制相移键控(BPSK)调制/零差检测。2008 年初搭载 LCTSX 激光通信终端的德国卫星 Terra-SAR-X 与搭载有和 LCTSX 相似的 LCT 激光终端的美国卫星 NFIRE 实现了 5 000 km 距离单信道 5.5 Gb/s 无误数据传输,标志着高速星间激光链路实现大容量数据传输的时代已经到来。LCTSX 采用标准化机/电接口、相位调制/零差检测方案和信号光直接捕获的方案,增加了终端的兼容性和可靠性,同时系统复杂度和故障率得到明显降低,LCTSX 特别适用于超长距离高速的数据传输。新一代欧洲数据中继卫星系统(EDRS)将会采用 Tesat 的终端方案构建骨干网,日本宇宙航空开发机构(JAXA)和国家信息与通信技术(NICT)宣称他们下一步也会采用类似的技术方案。

在欧洲中继卫星系统(EDRS)中,激光通信终端(LCT)将搭载在中继星 EDRS 系列卫星和用户星“哨兵”系列卫星上,提供 LEO-GEO 之间 1.8 Gb/s 的激光双向链路。LEO-GEO 激光链路的关键性能参数如表 1 所示。

表 1 EDRS 中 LEO-GEO 激光链路主要性能参数

Tab.1 Key performance parameters of EDRS

LEO-GEO link	
Parameter	EDRS LEO-GEO-Link
Date rate/Gbps	1.8
Range/km	>45 000
Bit error rate	>10 <sup>-8</sup>
Transmit power/W	2.2
Telescope diameter/mm	135
Mass/kg	50
Power consumption/W	~160(max)
Envelop/m <sup>3</sup>	~0.6×0.6×0.7

激光通信终端(LCT)如图 5 所示,作为一个独立单元,LCT 允许其主飞行器上简单的结合及测试试验。LCT 由一个装载有粗瞄准机构的矩形结构、望远镜及接收器组成,该结构包括整个电子和能动力学设备占用空间 0.6×0.6 m<sup>2</sup>。当粗瞄准机构处于停放位置时,在无操作模式下特别是发射阶段,光学设备被保护不受到辐射。一个装载在停放位置单元的反射镜可提供整个数据传输和接收链中(包括望远镜和粗瞄准机构)端到端测试,这个运行在光学闭环位置的 LCT 自测试可以在地面验证和在轨测试过程中实现。

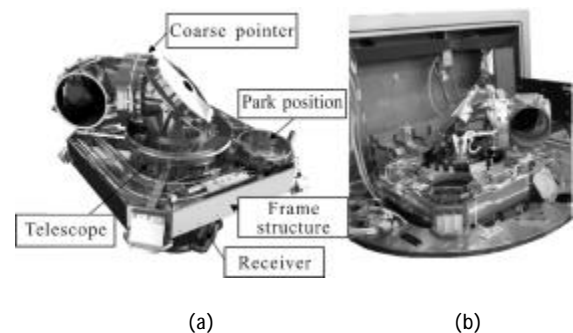


图 5 LCT 示意图及测试平台

Fig.5 LCT sketch and test chamber

Alpha SAT 上将搭载一个 LCTSX 的升级通信终端 ALCT,提供 LEO-GEO 高速数据中继服务,ALCT 是 TerraSAR 与 NFIRE 上装载的激光终端的改进版本,改进后的终端同样使用 1 064 nm 的 Nd:YAG 固体激光器,采用 BPSK 调制/零差检测技术,在相同系统功耗下最高发射功率提高到 5 W,支持 45 000 km 距离上 2.5 Gbps 的数据传输,使 LEO 同 GEO 之间具备高速激光通信的能力。

### 1.2.2 JAXA 高级激光通信终端 LUCE

JAXA 为建立下一代空间数据中继网络做了很多工作,星间激光链路是网络基础部分,JAXA 还研制了高级激光通信终端 LUCE<sup>[12]</sup>,其目的是在 LEO 用户星与 GEO 中继星之间建立数据传输速率高达 2.5 Gbps 的激光链路。JAXA 下一代激光通信系统试验性参数如表 2 所示,可见 LUCE 性能获得了引人注目的明显进步,特别是在通信链路数据速率、LEO 终端质量及功耗方面。

考虑到未来与其他数据中继卫星系统兼容与协同的问题,激光通信终端采用与 Tesat 相干激光通信

表 2 JAXA 下一代激光通信终端目标参数  
Tab.2 Target specifications of JAXA's next generation laser communication terminal

	LEO	GEO
Communication wavelength	1.06 mm	
Modulation/Demodulation scheme	BPSK/Homodyne	
Date rate	2.5 Gbps/1.2 Gbps(Fwd./Rtn.)	
Transmitter optical power	+36.0 dBm	
Transmitter/Tracking/Pointing scenario	Beaconless	
Optical antenna diameter	100 mm	200 mm
Weight	<35 kg	<50 kg
Power consumption	150 W(max)/ 100 W(avg)	130 W(max)/ 100 W(avg)

终端相类似的方案:波长 1.06 μm 信号光和 BPSK 调制/零差检测方案,激光发射器中的高功率激光放大器采用 Nd:YAG 晶体波导。波导光放大器具有高效且小巧的特点,除此之外还具有良好的抗辐射能力,能够在 GEO 上运行超过 15 年,且与大多数光纤放大器相比表现出对宇宙射线相对的高敏感性。LEO/GEO 激光终端上应用了不同的粗瞄准机构。为了覆盖大范围视野,LEO 终端上采用一个直径 100 mm 的折轴光学望远镜作为光学天线,而 GEO 终端采用了一个转向平面镜与直径 20 mm 紧固光学天线的组合来覆盖与 LEO 通信的视野。尽管 LEO 与 GEO 终端具有相同规格但其形状和构造都不尽相同,考虑到 LEO 终端在中型地球观测卫星(质量约为 500 kg)上的应用,其目标重量将小于 35 kg。激光终端的概念图如图 6 所示。

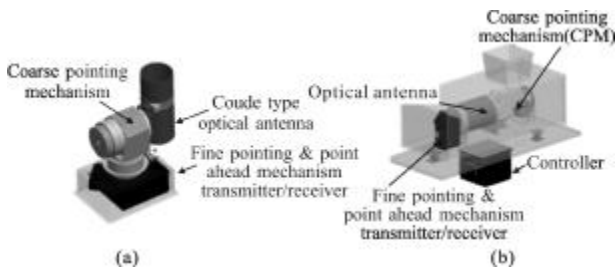


图 6 LEO 终端及 GEO 终端概念图

Fig.6 Schematics of LEO terminal and GEO terminal

1.3 地面模拟实验

美国是世界上开展卫星激光通信研究最早的国

家之一,20 世纪 90 年代以来美国喷气动力实验室(JPL)<sup>[14]</sup>已成功实现了地面激光通信的演示实验,演示论证了运动平台之间、平台与地面之间高码率的通信连接以及未来激光通信与微波通信相比在性能、体积、质量、功耗和传输码率方面的优势,近年来,JPL 建成了 LEO-GEO-GND 的实验室卫星光通信链路演示系统,LEO 的数据通过 GEO 中继转发到 GND。实验采用稀疏波分复用(CDMA)技术,LEO 发射机孔径 13cm,GEO 接收孔径 30cm,波段 1550nm,数据速率达 2.5 Gbit/s,链路范围 43 000 km,误码率为 10<sup>-7</sup>,该实验的成功对实现卫星光通信从点到点通信到组网转化具有重要的意义。为满足通信需求的不断增加以及替换接近或超过服役期限的第一代 TDRS,20 世纪 90 年代中期美国宇航局决定研制第二代数据中继系统,称为“高级跟踪与数据中继卫星系统(ATDRSS, Advanced Tracking and Date Relay Satellite System)”,为解决第一代跟踪与数据中继卫星 TDRS 带宽不足的问题,美国在设计第二代中继卫星时考虑采用星间激光链路,以此为背景,朗讯科技公司进行了地面空间光通信的模拟试验,实现了 1550 nm 附近的四波长复用,单信道速率达 2 Gbps。

虽然美国最近几年在卫星激光通信方面的实验成果并不多,但是美国在深空激光通信方面一直处于领先水平。在 NASA“行星间互联网 IPN”计划的支持下,JPL 早在 1992 年底就开展了单向激光束深空探测实验“伽利略光学实验计划(GOPEX)”。1994 年 JPL 开始了对深空通信方案的详细论证,综合分析了激光同 X 波段/Ka 波段通信的效费比,结果表明激光在大数据量传输方面具有明显优势。美国还在激光调制/检测方式方面进行深入研究,确定了脉冲位置调制及其相关改进调制方式为重点发展方向。同时也进行了深空数据的星载中继和地面站直接接收方案比较,结果表明要实现不间断深空激光链路是数据中继,单个星载中继站同多个地面站投资成本相当。而多地面站联网工作的优势是可以分散部署减少天气影响,达到与星载中继站相同的效果,并且在天气状况好的时候可以跟踪多个深空探测器,因此美国当前重点发展方向是用于深空通信的多光学地面站。

为了使终端更小更轻具有灵活性,有利于 LEO 的星上载荷容量,JAXA 于 2008 年开展了终端面包

板模型(BBM)<sup>[11]</sup>的研究,近年来对 LEO 及 GEO 上激光终端的可行性进行了研究,特别是对零差相干接收机、波导高功率放大器和捕获跟踪传感器的性能研究。JAXA 设计了 BPSK 零差接收机,研究了其在星间激光通信中的适应性。在实验工作台中,获得伪噪声(PN)序列锁相环达 7 Gbps 的初始性能。为了克服由于 GEO 与 LEO 距离实时变化而引起的多普勒频移,利用多普勒频移补偿技术进行了研究。波导高功率放大器结构如图 7 所示:将由晶体制作的平面光波导嵌入到两层低折射率的包层间,然后置于散热片上,用来将冗余泵浦光导致的热量吸收,从而达到散热的效果。波波长 1.5  $\mu\text{m}$ ,宽 3.3  $\mu\text{m}$ ,信号光沿 x 轴传播,经波导另一面反射后输出。同时,泵浦光进入波导的另一面,两个光场的叠加使得能量能够从泵浦光转移至信号光,从而实现信号光的放大。

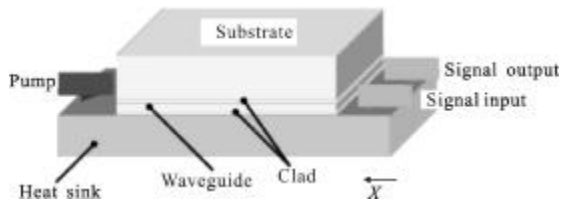


图 7 波导光放大器示意图

Fig.7 Schematic of waveguide optical amplifier

捕获跟踪系统没有专门的信标光发射器,通信用的信号光被用于相应卫星间的初始捕获,捕获跟踪系统的原型用于建立精瞄准机构,跟踪精确度为 1 mrad,精瞄准机构的 BBM 用以验证四象限探测器(QD)安全性及瞄准精度。

#### 1.4 星上演示验证

2001 年 11 月欧洲数据中继卫星 ARTEMIS 搭载的激光通信终端成功与法国的地球观测卫星 SPOT-4 建立了激光通信链路<sup>[13]</sup>,实现了 48 000 km、50 Mb/s 速率的激光通信试验,这是世界上进行的首次星间激光链路试验。2005 年 ARTEMIS 又与日本星间光通信工程试验卫星 OICETS 实现双向光学链路<sup>[15]</sup>,这也是全球首次成功实现双向星间通信试验,其中上行链路速率 50 Mb/s,下行链路速率 2 Mb/s。这次实验结果说明了自由空间激光通信技术用于建立 GEO-LEO 之间通信链路的有效性,为利用地球观测卫星进行全球性数据采集和为载人航天任务提供稳定通信等未来空间活动做了准备。2008 年 2 月,

搭载激光通信终端的德国低地球轨道(LEO)遥感成像卫星 Terra-SAR-X 和美国国防部红外侦察卫星 NFIRE 之间成功进行了通信实验。这是世界上首次实现长距离相干解调的激光通信,也是空间激光通信首次超越微波体现出大带宽、高速率的优势,卫星激光通信开始了由工程实验向实际应用的初步转变。

目前,GEO-地面之间的 RF 链路通信是激光链路数据中继卫星系统的瓶颈,要突破星地接入的带宽和容量限制,需要通过 GEO-地面之间的激光链路来扩展数据速率。由于大气湍流导致光束漂移、扩散,相点抖动、强度起伏等效应影响光信号的吸收检测,星地激光链路受大气湍流影响严重,而克服大气湍流采取的措施主要集中在自适应相位补偿技术。ESA、NASA 等机构近两年都将重心转向了大气激光通信,研究克服大气湍流的策略,采取的措施主要是自适应相位补偿。

目前 ESA 针对 EDRS 中 GEO-LEO 链路的自适应光学系统正在研究中,该系统由具有矩阵阵列相机(100×100 像素,像素尺寸 20  $\mu\text{m}$ ×20  $\mu\text{m}$ )的高速 Shack-Hartman 型波前传感器和一个具有连续表面变形镜的卫星机电系统(12×12 单元,单元尺寸 0.45 mm×0.45 mm)组成,运行频率高于 5 kHz。该系统已在最坏条件下进行自由空间实验验证:在 20 km 水平线上穿过大气的连续光束被严重吸收,通过直径 1 m 的天线接收并进行自适应光学补偿后,补偿比率高于 0.8。该自适应光学系统能够用于 GEO-地面激光链路通信以达到 LEO-GEO 星间链路的 1.8 Gb/s 数据速率。

JPL 自适应光通信实验受到 NASA 行星间互联网计划支持,他们开发的自适应光学试验床包含一个由 97 个形变单元构成的变形镜,总直径 1 m,对 1 064 nm 激光束波前校正后残留误差在 220 nm 左右,Strehl 比约 20%。JPL 实验表明,自适应光学天线对 100 Mb/s 的 OOK 激光链路性能改善在 5 dB 以上,能够很好地抑制湍流影响。

## 2 关键技术及发展趋势

### 2.1 关键技术

目前,基于星间激光链路数据中继技术还处于理论研究阶段,在国外也只是完成了一些链路级的实验,下一步建设基于激光链路数据中继卫星系统

还存在很多基础理论和关键技术需要研究。其主要关键技术如下:

### (1) 微波/激光混合的节点信息处理机制

激光链路数据中继卫星最简单的节点配置仅仅由收发信机和光交换机组成,但这种结构不支持射频接入,在目前的星地激光链路水平下,很难得到实际应用。融合微波地面接入和高速空间激光链路的中继卫星节点必须具备星载调制解调、交换及路由功能。因此,卫星节点结构要同时具备微波接入和光交换的功能,其结构属于微波/激光混合模型。微波/激光混合的中继卫星节点属于一种新型节点,是激光链路数据中继卫星系统发展的关键技术之一。

### (2) 多用户接入控制策略

在具有激光链路的数据中继卫星网络中,中继星通过激光链路构成数据中继骨干网,同时为用户星提供多条激光和微波链路,随着用户的增加,中继链路负载越来越高。由于中继卫星的数量有限,且受载荷的限制,一颗中继星只能为用户星提供一条光学链路,因此必然会出现一颗中继星收到多颗用户星中继服务请求的极端情况,同时,还有其他微波链路用户的接入,此时,中继星的多用户接入控制转化为网络全局资源调度。如何生成一个满意的中继卫星调度方案,合理分配中继卫星系统资源来完成更多的跟踪、测控与数据中继任务,对充分发挥中继卫星系统的能力至关重要。

### (3) 高可靠性网络数据传输协议

国内外几次在轨星地激光通信实验结果表明,星地激光通信中最难实现的是上行链路。受湍流影响,上行链路光强起伏比下行链路大得多。而受技术条件的限制,短期内无法建立高质量的星地上行激光链路<sup>[16-17]</sup>。这种前后向链路极端不对称性将会导致传输协议效率低下甚至失效。因此研究现有传输协议在空间数据中继网中失效的根本原因,针对空间光骨干网和星地返回链路的特点,开发在高速、高度非对称传输环境中,适合激光链路数据中继的网络传输协议是激光链路数据中继卫星系统建设的一个技术难点。

## 2.2 发展趋势

从国外数十年发展经验来看,尤其是 EDRS 计划初步表明了高速激光链路数据中继卫星组网的可能性,也展示了高速激光链路构建空间数据传输通

道的应用前景。自 20 世纪 70 年代卫星光网络的概念提出以来,经过理论研究、实验验证、工程实验的过程,正逐步进入推广应用阶段。欧洲数据中继卫星(EDRS)系统和日本下一代数据中继卫星系统将实现激光链路数据中继卫星组网通信,这将在数据中继领域真正展现星间激光链路的带宽和频率优势。以欧洲航空航天局(ESA),德国航天局(DLR),宇宙航空开发机构(JAXA)和国家信息与通信技术协会(NICT)以及美国喷气推进实验室(JPL)为代表的空间激光通信研究机构进行了一系列星间激光链路数据中继技术的研究卫星系统体系结构、激光通信终端和地面模拟及星上演示验证,为下一步激光链路数据中继卫星系统的实现应用提供了相对成熟的硬件条件和实验基础。“天链一号”01 星和 02 星的数据中继卫星系统解决了我国在数据中继这一崭新领域的“有无”问题,为今后的发展奠定了坚实的基础,但由于未实现空间组网,覆盖和容量有限,还不能满足迅速增长的军事和民用需求。综合来看,基于激光链路的数据中继卫星系统具有通信容量大,数据传输速率高,保密性好抗电磁干扰等优点,将是解决未来空间海量数据高速传输的可选方案之一。因此,为了实现对低轨道航天器 100%的覆盖目标,满足迅速增长的军事和民用需求,研究适合我国的数据中继卫星的激光链路组网是具有前瞻性和战略性的未来发展方向。

## 参考文献:

- [1] Teles J, Samii M V, Doll C E. Overview of TDRSS[J]. *Adv Space Res*, 1995, 16(12): 67-76.
- [2] Shaw Harry C, Rackley Michael W. TDRSS space ground link terminal user services subsystem replacement and upgrades[J]. *Space Ops*, 2010: 1-13.
- [3] Otakar Wilfert, Hennes Henniger, Zdenek Kolk. Optical communication in free space[C]//SPIE, 2008, 7141: 714102-1-12.
- [4] Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, et al. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48: 7-21. (in Chinese) 赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48: 7-21.
- [5] Tong Shoufeng, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. High data-rate space laser communication system and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 655-659. (in

- Chinese)  
佟首峰, 姜会林, 张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 655-659.
- [6] Zhu Guiwei, Zhang Zhaoyan. Research on USA transformational communications architecture [J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(6): 102-108. (in Chinese)  
朱贵伟, 张照炎. 美国转型通信体系研究[J]. 航天器工程, 2010, 19(6): 102-108.
- [7] McKinney Maurice M. Transformational satellite (TSAT) communications systems[D]. Maxloell AFB AL: Air University, 2007.
- [8] Zoran Sodnik, Hanspeter Lutz, Bernhard Furch, et al. Optical satellite communications in Europe [C]//SPIE, 2010, 7587: 758705-1-9.
- [9] Lucente M, Re E, Rossi T, et al. Future perspectives for the new European data relay system[C]//IEEE, 2007: 1-7.
- [10] Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, et al. Laser communication terminals for the european data relay system [C]//SPIE, 2012, 8246: 82460D-1-7.
- [11] Shiro Yamakawa, Tatsuyuki Hanada, Hiroki Kohata. R & D status of the next generation optical communication terminals in JAXA[C]//IEEE, 2011: 389-393.
- [12] Tatsuyuki Hanada, Shiro Yamakawa, Hiroki Kohata. Study of optical inter-orbit communication technology for next generation space data-relay satellite [C]//SPIE, 2011, 7923: 79230B-1-6.
- [13] Toni Tolker-Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In orbit test result of an operational optical inter-satellite link between ARTEMIS and SPOT4 [C]//SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [14] Hemmati H. Status of free-space optical communications program at JPL[C]//SPIE, 2002, 4635: 185-191.
- [15] Löscher A. Atmospheric influence on a laser beam observed on the OICETS -ARTEMIS communication demonstration link [C]//Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3: 1233-1239.
- [16] Yuan Xiuhua, Zhao Ming, Zhao Yanli. Analysis and resolution for wireless optical communication in turbulent atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 415-422. (in Chinese)  
元秀华, 赵茗, 赵彦立. 湍流大气对无线光通信影响分析及解决方案[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 415-422.
- [17] Tan Liying, Wang Qiang, Yu Siyuan, et al. Optical signal quick recognition for the satellite-ground laser link[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 655-659. (in Chinese)  
谭立英, 王强, 于思源, 等. 星地激光链路中的光信号快速识别方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 655-659.