

欧洲空间高速激光中继系统概述

冯杰¹,陈宇宁²,雷波¹,房汉林¹,罗广军²,刘兴²

(1. 中央军委装备发展部军事代表局驻桂林地区军事代表室,广西 桂林 541004;

2. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:欧洲在空间激光中继领域处于世界领先地位,就其在该领域的发展历程、重点项目欧洲数据中继系统(EDRS)中激光通信终端(LCT)技术和EDRS工作流程进行了详细介绍,并给出一系列具体技术指标,对我国天地一体化信息网络的建设具有一定参考意义。

关键词:欧洲数据中继系统;空间激光通信;卫星中继

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)09-0017-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Overview of european high speed space laser relay system

FENG Jie¹, CHEN Yuning², LEI Bo¹, FANG Hanlin¹, LUO Guangjun², LIU Xing²

(1. Military Representative office of Military Representative Bureau in Guilin, Central Military Commission Equipment

Development Department, Guilin Guangxi 541004, China; 2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Europe is in the leading position in the field of space laser relay. The development history of this field, the technology of laser communication terminal (LCT) and the workflow of EDRS in the european data relay system (EDRS) are introduced in detail, and a series of specific technical indicators are given. The integration of space and earth information network in China is also discussed. The construction has certain reference significance.

Key words: EDRS; space laser communication; satellite relay

0 引言

空间激光通信技术由于通信容量大、通信距离远,且激光通信终端(LCT)体积、重量和功耗相较于传统射频天线有明显的优势,因此受到越来越多国家和地区的关注。在空间激光通信技术众多应用领域中,空间激光中继是目前研究的一个热点,如:美国激光通信中继演示(LCRD)项目、日本数据中继系统(JDRS)以及欧洲数据中继系统(EDRS)等。其中,欧洲在空间高速激光中继领域发展较为领先,目前已经实现激光中继系统的日常运作。

早在1989年,欧洲航天局就制定了数据中继卫星

发展计划——数据中继和技术任务计划,并于2001年发射了先进中继技术试验Artemis卫星。同年11月,Artemis卫星与SPOT-4卫星实现了速率为50 Mb/s的激光通信,这是世界上首次星间激光通信试验,此次试验验证了激光数据中继卫星的可用性以及性能优势。2008年,欧洲又与美国合作开展了NFIRE卫星与TerraSAR-X卫星之间的激光通信试验,采用德国TESAT公司研制的第一代LCT,首次验证了无信标光的空间捕获以及星间零差二进制相移键控(BPSK)激光通信链路的性能。2014年、2015年又先后开展了Aphasat卫星与“哨兵-1A”卫星和Alphasat卫星与“哨兵-2A”卫星间的激光通信试验,激光通信终端采用TESAT公司研制的第二代LCT,通过多次试验充分验证了该型LCT的可靠性,为后续该型LCT在EDRS上的应用奠定了基础。EDRS作为全球首个实用化的空间高速激光中继系统,对世界各国发展空间激光中继系统具有很高的参考价值,本文将对其进行详细介绍。

收稿日期:2019-03-09。

作者简介:冯杰(1979-),男,重庆人,硕士,工程师。主要从事光通信整机、系统的研制和生产工作,先后在中文核心期刊上发表文章3篇,参加了13项国家和行业标准的编制,参与了4项技术基础课题的研究,以及1部教材的编写工作。



冯杰,陈宇宁,雷波,等:欧洲空间高速激光中继系统概述

1 EDRS 介绍

1.1 系统概要

EDRS 项目隶属于欧洲航天局通信系统预先研究 (ARTES) 计划,由欧洲航天局与空客公司以公私合营的方式进行运作,旨在通过空间激光链路为低轨卫星和其它航天器提供激光中继服务。低轨卫星和其它航天器通过激光链路将数据传送给 EDRS 卫星,EDRS 卫星再通过射频链路将用户数据回传至地面。EDRS 系统主要包括空间段和地面段两部分。其中,空间段主要由 EDRS-A 和 EDRS-C 2 颗高轨卫星组成。EDRS-A 卫星已于 2016 年 1 月发射;而 EDRS-C 卫星目前也已完成发射前的准备,计划 2019 年年中择机发射。2 颗卫星分别定位于东经 9°和东经 3°,轨道高度均为 35876 km,服务覆盖区域包括了欧洲、中东、非洲、南美、中亚和极地地区。地面段则主要由分布于德国、英国以及比利时境内的地面基础设施组成。目前,EDRS-A 卫星已在为“哥白尼”项目 4 颗地球观测卫星提供日常地球观测图像回传服务。从 2016 年年末至今,EDRS-A 卫星已完成 20000 次空间激光连接,可靠性达 99.5%,并且成功实现 1P 字节数据回传。2019 年的早些时候 EDRS 将为空间站“哥伦布”太空舱提供中继服务,未来还将向其它商业用户开放。

1.2 系统核心部件——LCT

在整个 EDRS 中,最核心的部件当属星间激光通信终端——LCT。TESAT 公司先后研制了两代 LCT 产品,性能参数^[1]如表 1 所示。用于 EDRS 的 LCT 是德国 TESAT 公司研制的第二代产品,产品型号为 LCT-135,设计使用寿命 15 年,其外部结构如图 1 所示。可以看出,该 LCT 采用了一体化结构设计,所有部件均安装于框架单元系统(FUS)内,并通过 MIL-STD 1553B 数

据总线与卫星平台互联,这样的设计便于 LCT 与卫星平台的集成与测试。FUS 上半部分为粗瞄准组件,暴露于宇宙空间;下半部分为电子及光学处理部分,延伸至卫星内部。粗瞄准组件采用双旋转轴潜望式结构,入射光经过 2 次反射引入内部光学系统,避免了中心遮挡。潜望式的结构也使得光学天线和收发光路均置于卫星舱内,不但可以减小转动惯量、提升链路建立速度,还可以更好地实现对光学天线和收发光路的温度控制。在发射阶段和不工作时,粗瞄准组件被锁止于驻停位,以抵御发射带来的震动,防止内部光学部件被污染。

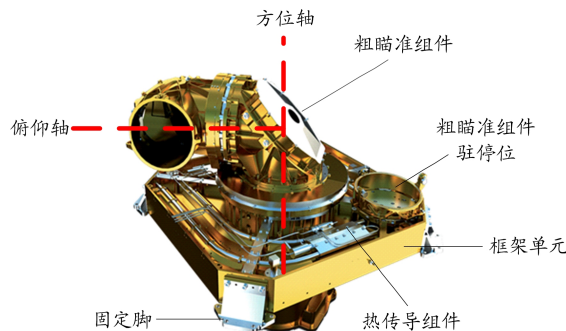


图 1 EDRS LCT 外形图

LCT 内部主要由 3 个部分组成:发射机、接收机和瞄准、捕获、跟踪(PAT)装置,其内部结构如图 2 所示。

发射机部分由种子光源、编码器、调制器、光放大器以及调制驱动电路组成。其中,种子光源采用 1064 nm Nd:YAG 固态单块环形激光器 (MISER),线宽为 50 kHz^[2];编码器采用差分编码器;调制器采用 BPSK 相位调制器,调制速率为 2.8 Gb/s。光放大器采用掺镱光纤放大器(YDFA),使用激光二极管泵浦,输出功率为 5 W^[3];调制驱动电路则主要完成对电脉冲的整形。由于泵浦激光二极管对整个 LCT 的可靠性至关重要,因此泵浦激光二极管分为 2 组进行冷备份,每组由若干泵浦激光二极管提供热备份,泵浦激光通过多模光纤送入 YDFA。

接收机部分由本振激光器、相干接收器和数据接收电路组成。其中,核心单元为相干接收器,它除直接用于通信外,还用于空间捕获、频率捕获和零差跟踪控制信号的产生。该接收器内部采用四象限光电二极管(QD)作为探测器^[4],并采用零差相干方式进行解调。这种解调方式最直接的好处就是接收灵敏度高,在速率为 600 Mb/s,误码率为 10^{-8} 的情况下接收灵敏度可达 -51 dBm;速率为 1.8 Gb/s,误码率为 10^{-8} 的情况下,

表 1 TESAT 公司两代 LCT 参数

参数	第一代 Tesat LCT	第二代 Tesat LCT
数据格式	1064 nm, BPSK 零差	1064 nm, BPSK 零差
用户数据速率	5.625 Gb/s	1.8 Gb/s
光学链路长度	>5100 km	45000 km
发送功率	0.7 W	2.2 W
天线直径	125 mm	135 mm
质量	35 kg	53 kg
平均功耗	120 W	160 W
体积	0.5 m×0.5 m×0.6 m	0.6 m×0.6 m×0.6 m

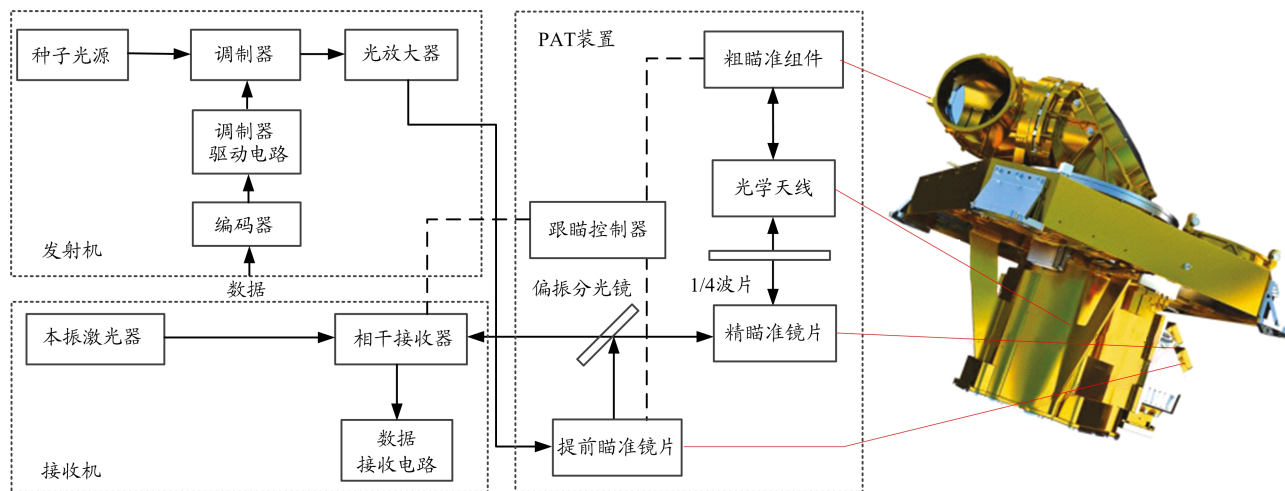


图2 LCT内部结构

接收灵敏度可达 $-47.8\text{ dBm}^{[3]}$ 。此外,相干接收具有比镀膜更高的波长选择性,受背景光影响极小,即使太阳位于视场内,接收系统仍能正常工作。为实现零差相干接收,在接收机内部相干接收器与本振激光器组成科斯塔斯(Costas)光学锁相环,精确跟踪因卫星相对运动而发生多普勒频移的对端发射频率。这种非线性锁相环可以有效消除数据信号和锁相信号之间的相互串扰,具有锁相残差低的优点^[5]。

由于EDRS LCT采用无信标光捕获方案,使得其PAT装置结构得到大幅简化,既节约了硬件、降低了对平台的功耗要求,又避免了当信标光与通信光波长不一致时镀膜对通信性能带来的影响。整个PAT装置由粗瞄准组件、光学天线、精瞄准镜片、提前瞄准镜片、偏振分光镜、1/4波片以及跟瞄控制器组成。粗瞄准组件通过围绕方位轴和俯仰轴旋转可以实现半球面指向覆盖,旋转角速度可达 $25^\circ/\text{s}$,角度分辨率为 $0.5\text{ }\mu\text{rad}^{[6]}$;光学天线采用135 mm口径,信号光束散角为 $10\text{ }\mu\text{rad}^{[7]}$ 。精瞄准镜片和提前瞄准镜均采用快速反射镜,其中精瞄准镜用于捕获阶段的空间螺旋扫描以及捕获后的跟踪,跟踪精度为 $1\text{ }\mu\text{rad}^{[8]}$;提前瞄准镜则用于补偿在信号传输期间卫星位置的变化,根据服务对象的不同该提前量会有所变化。1/4波片的作用则是完成圆极化光与线极化光的转化。

综合以上各个部件的误差,LCT总的均方根(RMS)瞄准精度为 $100\text{ }\mu\text{rad}^{[9]}$ 。由于EDRS LCT采用收发共光路设计,且收发均采用 1064 nm 波长激光,因此收发光主要依靠极化进行隔离。偏振分光镜的作用就是实现极化方向相互垂直的2束线极化光的分离。另外,为防止卫星平台旋转对接收性能造成影响,粗

瞄准组件发出的光束为圆极化光,通信的双方分别采用左旋和右旋圆极化光。

在EDRS-A卫星上,LCT通过4个固定脚安装于卫星朝向地球的一面。EDRS-A并不是一颗专用卫星,而是作为通信载荷搭载于空客公司制造的Eutelsat-9B商用卫星上,如图3所示。安装于Eutelsat 9B卫星的EDRS-A LCT如图4所示。为保证LCT工作于合适温度,系统配备了专门的热辐射器,对不同工作环境及功耗情况下LCT的温度进行控制;热传导系统冷凝片是LCT与宿主卫星主要的热接口,温度维持在 $-10^\circ\text{C}\sim 15^\circ\text{C}$ 工作范围内。另外,为减小卫星平台振动对LCT的影响,还配备了专门的载荷弹性安装系统(PEMS)。LCT与卫星对地面是呈一定角度安装的,这是由于采用双旋转轴设计的粗瞄准组件存在一个问题:当要捕获的目标越接近方位轴,围绕方位轴的旋转速度越快。为限制这一速度,需人为通过支撑支架使LCT方位轴与卫星对地面呈 15° ,从而使方位轴偏离工作视场^[10],如图5所示。

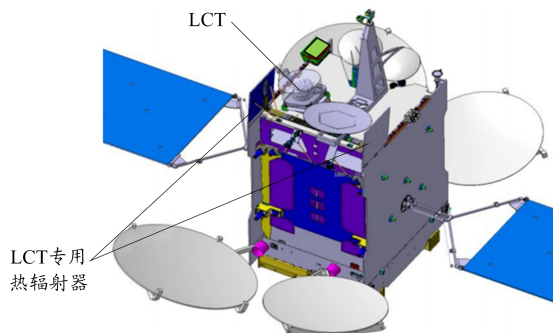


图3 Eutelsat 9B卫星图

冯杰,陈宇宁,雷波,等:欧洲空间高速激光中继系统概述

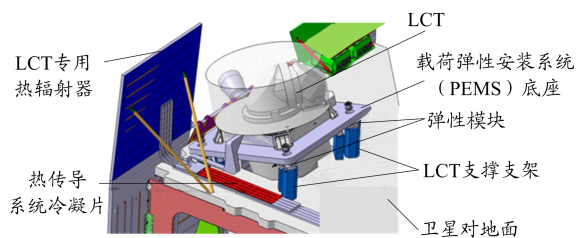


图4 安装于 Eutelsat 9B 卫星的 EDRS-A LCT

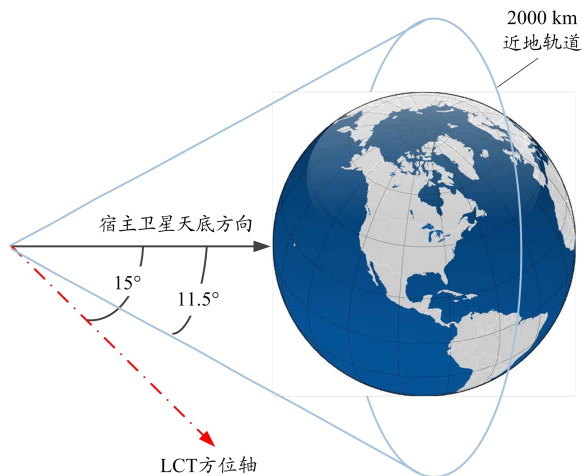


图5 LCT 方位轴指向

由于低轨卫星搭载的 LCT 除卫星平台适配接口与高轨卫星有所不同,而其它功能和性能是一致的,这里不再赘述。

1.3 系统工作流程

EDRS 在提供激光中继业务之前,需要先建立空间激光通信链路,其建立过程如图 6 所示。

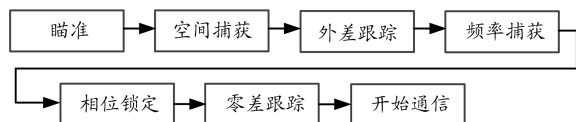


图6 EDRS 空间激光链路过程

首先,地面任务操作中心根据目标用户卫星位置规划中继链路,并将配置指令通过卫星地面控制中心上传给 EDRS 卫星和目标用户卫星。然后,EDRS 卫星和目标用户卫星根据指令将 LCT 指向对端所在的大致方向进行开环瞄准,之所以不能精确确定对端方向是由很多原因造成的,如双方卫星时间同步误差、轨道位置信息误差、卫星姿态信息误差和卫星平台振动,甚至 LCT 在卫星组装、集成和测试(AIT)阶段装配误差等。通常不确定范围在几个毫弧度以内,不确定范围越小捕获所需的时间越短,且不确定范围应小于对方视场角,EDRS LCT 捕获阶段视场角为 $5 \text{ mrad}^{[10]}$ 。

完成开环瞄准后,双方 LCT 进入空间捕获阶段。EDRS LCT 采用无信标光捕获,即利用通信光束以螺旋扫描的方式进行捕获。根据预先约定,通信的一方 LCT-A 首先发射光束对不确定区域进行扫描,对端 LCT-B 每接收到一次 LCT-A 发出的光就向收光方向调整一次,调整步长逐次减小。由于卫星平台抖动、噪声等因素,不是每次扫描对端都能 100%收到光。在经过预定次数的扫描后,LCT-A 停止扫描。改为 LCT-B 开始扫描,其过程与 LCT-A 相同,不同的是经过 LCT-A 的扫描,LCT-B 的不确定区域已经缩小很多,所以单次扫描时间要比 LCT-A 短很多。当 LCT-A 的不确定区域达到预设范围后,LCT-A 重新开始扫描,此时双方同时扫描并调整指向,扫描不确定区域不断减小,直至跟踪传感器有所响应,则停止扫描,完成空间捕获。空间捕获流程如图 7 所示。接着,双方 LCT 根据各自接收到的光信号跟踪对方,进入闭环跟踪阶段。由于此时收光频率与本振频率并不一致,所以这一阶段采用的是外差跟踪。外差跟踪一旦建立,LCT 随即启用 Costas 锁相环进行频率捕获,并最终锁定相位进而实现零差跟踪,为后续星间激光通信做好准备。EDRS 系统完成以上所有流程并建立空间激光链路所需的时间小于 1 min。

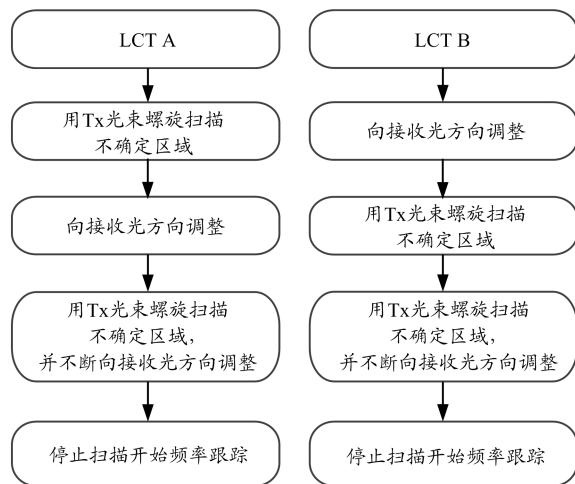


图7 EDRS LCT 空间捕获流程

空间激光通信链路建立后,EDRS 便可以开始提供激光中继服务,其完整中继流程如图 8 所示。LEO 卫星上大容量存储器(MM)将采集到的数据经 LCT 接口适配单元(LIAU)处理,转换为适合 LCT 传送的数据帧传递给 LCT,然后经由 LCT 构建的星间激光链路(ISOL)传送到 GEO 中继卫星;GEO 卫星将 LCT 接收到的数据经过数据处理单元(DPU)再次处理,转换为 GEO 帧并传递给 Ka 波段调制器,随后通过若干条 Ka

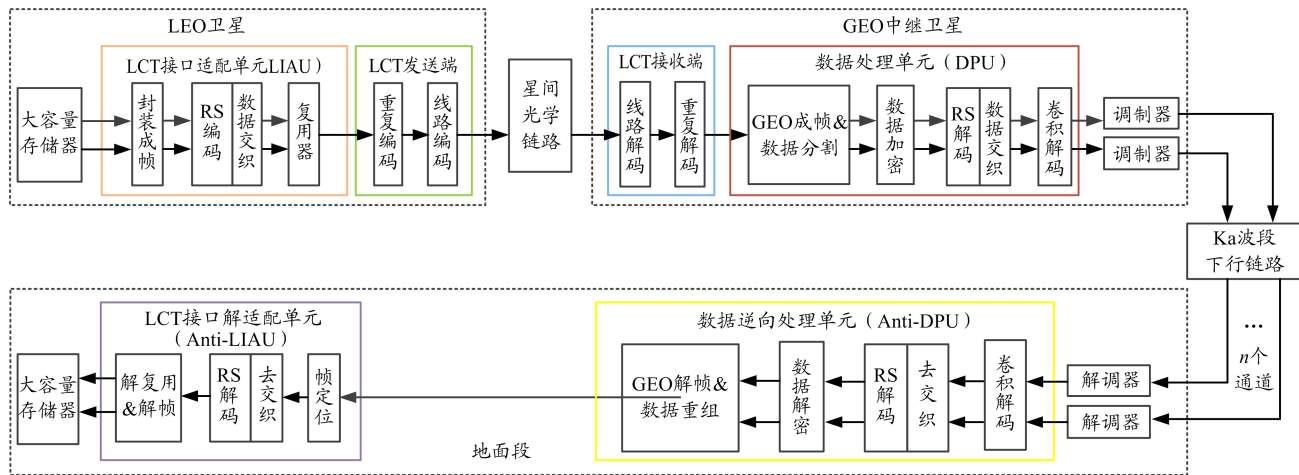


图 8 EDRS 中继流程

表 2 EDRS 各单元指标参数

单元名称	参数	哨兵模式	高级模式
MM	输出数据速率	低于 2×280 Mb/s	
	数据结构	CADU 帧	待定
	帧长度	2044 字节	
LIAU	输出数据速率	600 Mb/s	
	数据结构	LIAU 帧	
	帧长度	2044 字节	
	编码方式	RS(255, 239)	
	帧填充	是	
ISOL	用户数据速率	600 Mb/s	1800 Mb/s
	总数据速率	2812.5 Mb/s	2812.5 Mb/s
DPU	输入数据速率	2×300 Mb/s	4×450 Mb/s
	输出数据速率	2×600 Mb/s	4×600 Mb/s
	数据结构	GEO 帧	GEO 帧
	帧长度	2044 字节	2044 字节
	编码方式	RS(255, 239)× CC(2/3)	RS(255, 239)× CC(5/6)
	加密方式	AES-CBC	无
	帧填充	是	是
	空闲帧比例	低于 19.41%	低于 3.34%
Ka DL	载波频率	26 GHz	26 GHz
	极化方式	圆极化	圆极化
	数据速率	2×600 Mb/s	4×600 Mb/s
	符号速率	2×300 Baud	4×300 Baud
	调制格式	OQPSK	OQPSK

波段下行链路(DL)回传至地面。地面段通过数据逆向处理单元(Anti-DPU)以及 LCT 接口解适配单元(Anti-LIAU)单元对数据进行相反过程的处理,最终还原原始数据,从而完成数据中继。

EDRS 有 2 种中继模式,分别是“哨兵模式”和“高级模式”,不同模式下各单元指标参数有所不同,具体参数^[11]如表 2 所示。

2 未来发展计划

未来,欧洲航天局与空客公司计划为 EDRS 星座新增 2 颗卫星,将 EDRS 进一步扩展为 GlobeNet,实现卫星激光中继服务的全球覆盖。计划的第一步是在原有 2 颗高轨卫星的基础上新增一颗高轨卫星 EDRS-D,将目前的服务覆盖范围拓展至亚太地区。2019 年 2 月,空客公司与日本卫星通信运营商 JSAT 公司就 EDRS-D 卫星合作事宜签订合作协议。

另据空客防务与航天公司最新消息,EDRS-D 卫星将于 2024 年进行发射。从以上一系列动作可知,欧洲航天局与空客公司正在稳步推进 EDRS 向 GlobeNet 系统的转型升级,届时将实现全球范围的卫星激光中继服务。

3 结束语

欧洲空间激光中继系统历经了长达 20 年的发展已基本成熟,激光中继的应用价值得到充分体现,为世界空间激光中继系统的发展起到了良好的示范作用。我国“十三五”规划纲明确提出要建设天地一体化信息网络,并将其列为“科技创新 2030——重大项目”中首个启动的重大工程项目,而空间激光中继技术是

冯杰,陈宇宁,雷波,等:欧洲空间高速激光中继系统概述

天地一体化信息网络建设项目中的一项关键技术。欧洲在空间高速激光中继系统的发展可以为我国提供良好的借鉴。

参考文献:

- [1] ZECH HERWIG, HEINE FRANK, MOTZIGENMBA MATTHIAS, et al. Laser communication terminal: product status and industrialization process [C]//Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2014, May 7-9, 2014, Kobe, Japan. New York: IEEE, 2014: S6-3-1-S6-3-4.
- [2] GREGORY MARK, HEINE FRANK, KMPFNER HARTMUT, et al. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates [J]. Optical engineering, 2012, 51(3): 031202-1-031202-7.
- [3] MUEHLNIKE GERD, KAMPFNER HARTMUT, HEINE FRANK, etc. The Alphasat GEO laser communication terminal flight acceptance tests [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012, October 9-12, 2012, Ajaccio, France. New York: IEEE, 2012: 13-1-1-13-1-4.
- [4] UWE S, GREGORY MARK, HEINE FRANK. Beaconless acquisition for ISL and SGL, summary of 3 years operation in space and on ground[C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2011, May 11-13, 2011, California, USA. New York: IEEE, 2011: 38-43.
- [5] HODGKINSON TG. Costas loop analysis for coherent optical receivers [J]. Electron. Lett., 1986, 22(7): 394-396.
- [6] FRIEDERICH KARL-GEORG, HEINE FRANK, HIMMLER ROLAND, et al. High precision encoder for GEO space applications[C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2012, October 9-12, 2012, Ajaccio, France. New York: IEEE, 2012: 8-1-1-8-1-9.
- [7] ZECH, HEINE F, TR NDLE D, et al. LCTS ON ALPHASAT AND SENTINEL 1A: IN ORBIT STATUS OF THE LEO TO GEO DATA RELAY SYSTEM [C]//International Conference on Space Optics 2014, October 7-10, 2014, Tenerife, Spain. Washington state: SPIE, 2014: 105630W-1-105630W-5.
- [8] 孙建锋. 天地一体化信息网络激光通信系统发展设想[J]. 电信科学, 2017(12): 2017319-1-2017319-4.
- [9] FIELDS R, KOZLOWSKI D, YURA H, et al. 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an Optical Ground Station [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) 2011, May 11-13, 2011, California, USA. New York: IEEE, 2011: 44-53.
- [10] PONCET D, GLYNN S, HEINE F. Hosting the first EDRS payload [C]//International Conference on Space Optics 2014, October 7-10, 2014, Tenerife, Spain. Washington state: SPIE, 2014: 105630D-1-105630D-9.
- [11] FRIEDRICHS BERND. Data Processing for Broadband Relay Satellite Networks Digital Architecture and Performance Evaluation [C]//31st AIAA international communications satellite systems conference, October 14-17, 2013, Florence, Italy. Virginia: AIAA, 2013: 5712-1-5712-14.

2020 年征订启事

光通信技术 月刊

主管单位 中国电子科技集团公司

主办单位 中国电子科技集团公司 第三十四研究所

《光通信技术》杂志 1977 年创刊,属中国无线电电子学、电信技术类中文核心期刊。

现已成为中国光通信领域有代表性的刊物。其主要栏目有:

- | | |
|-----------|----------------|
| (1) 光通信网络 | (2) 光通信器件 |
| (3) 光纤光缆 | (4) 光通信系统设计与施工 |
| (5) 无线光通信 | |

《光通信技术》为大 16 开本,每期约 13 万字。

刊 号: $\frac{\text{ISSN } 1002-5561}{\text{CN45-1160/TN}}$

广告经营许可证: 4503004000141

国内定价: 每期 16 元(含邮费)

海外定价: 每期 16 美元(含邮费)

邮发代号: 48-126

汇款方式: 银行汇款

开户银行: 建设银行桂林高新支行

账 号: 45001635207050505972

收款单位: 中国电子科技集团公司
第三十四研究所