

日本空间光通信技术的发展状况^{*}

尹道素^{**} 皮德忠

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 日本是在空间光通信领域发展最为迅速的国家,它利用装载于 ETS-VI 卫星上的 LCE 系统,建立起了卫星与地面站间的光通信链路,并进行了大量的研究和试验,为空间光通信技术的实用化打下了坚实的基础。文中就日本空间光通信技术的发展及 ETS-VI 系统作了较为详细的介绍。

关键词 空间光通信; 光链路 工程测试卫星; 通信研究实验室
中图分类号 TN929.1

日本是世界上最早开始进行空间光通信技术研究的国家之一,根据近年的研究状况来看,日本基本上是在对两个自由空间光通信系统进行研究和试验,一是由日本航天局(NASDA)支持的安装于 OICETS 卫星上的 LUCE (Laser Utilizing Communication Equipment) 系统,另一个则是由邮电部通信研究实验室(CRL)研制的安装于 ETS-VI 的 LCE (Laser Communication Equipment) 系统。本文对这两个系统的研究作较为详细的介绍。

1 NASDA 的研究

日本航天局支持的安装于 OICETS 卫星上的 LUCE 系统,其目的是实现卫星间的光通信链路。这项计划始于 1985 年,1987 年开始系统中的关键技术—跟瞄技术的研究。1993 年 1 月,NASDA 与 ESA (欧洲宇航局)建立了国际合作关系,并建立了项目组,确定 NEC 为研究单位。

NASDA 计划于 1998 年发射载有 LUCE 系统的 OICETS 卫星,并在 OICETS 卫星与 ESA 的 ARTEMIS 卫星间建立光通信链路。在日本的这项轨道内实验计划 (IN-ORBIT Experiment Plan) 中,主要研究以下内容:1) 研究光学器件在太空中的性能,如半导体激光器 (LD)、电荷耦合器件 (CCD)、雪崩光电二极管 (APD)、四象限探测器 (QD) 等;2) 进行捕获、跟踪、瞄准 (ATP) 实验;3) 用 ESA 的 ARTEMIS 卫星进行通信实验,测试通信误码率;4) OICETS 卫星与地面站间的光链路实验。目前,正在进行 LUCE 的工程模型计划,主要是对各部分进行温度和机械冲击方面的检测,对 LD、APD、CCD、QD 等也进行了可靠性检测。

2 ETS-VI/LCE 系统

日本的另一个研究机构是邮电部的通信研究实验室,从 70 年代初开始着手空间光通信技术的相关工作,目前主要从事卫星的光学跟踪和地面与卫星间激光传输技术的研究。1987 年开始研制空间光通信基础实验系统 LCE,先后制作了面包板模型 (BBM)、结构动态模型 (SDM)、热动态模型 (TDM)、系统工程模型 (SEM),1990 年开始制作工程飞行模型 (EFM)。LCE 的研制于 1993 年全部完成,装载于 1994 年发射的 ETS-VI 技术试验卫星上,其主要性能指标如表 1 所示。LCE 主要部件包括:双轴万向支架、望远镜、精定位装置 (FPA)、光程差校正装置 (PAA)、扩束器、通信用 LD、APD、调制/解调器、数据处理器和一些控制。FPA 有两个小副镜,受陀螺控制;PAA 也有两个小副镜,受压电器件控制,这种结构保证了系统对特殊环境的适应性。LCE 装置中,光学部分重 13 kg,长 60 cm,附在卫星上地球定位仪的一侧 (卫星外侧)

1998 年 7 月 15 日收稿

* 国防科研基金资助项目

** 女 30 岁 博士 讲师

的调制器, LCE 的各种信息, 如 CCD 信号电平、上行链路 BER 等, 通过下行链路又传到地面站。系统地面站设在东京, 采用直径为 20 cm 的射电望远镜为发射天线, 直径 150 cm 的射电望远镜为接收天线, 该地面站也具有高精度的跟瞄和光程差校正功能。光程差校正机械装置 (PAM) 偏转角度范围大于 $300 \mu\text{rad}$, 分辨率为 $2 \mu\text{rad}$, PAM 的精确控制使光束特性通过地面接收机测试, 信号光采用曼彻斯特码脉冲调制, 信标光用 8 kHz 的信号进行 20% 的幅度调制。由于 ETS-VI 卫星在发射过程中未级推动引擎发生故障, 使卫星未能进入预定的同步轨道, 使光链路严重地受范爱伦辐射带的影响。为了更好地进行试验, 在美国的加州建立了另一个光学地面站 TMF (Table Mountain Facility), 其发射天线是直径为 60 cm 的望远镜, 接收天线是直径为 120 cm 的望远镜, 系统装有大气能见度监测器, 卫星姿态控制由美国宇航局 (NASA) 担任。LCE 与地面站间通信链路如图 2 所示, 其设计指标见表 2。

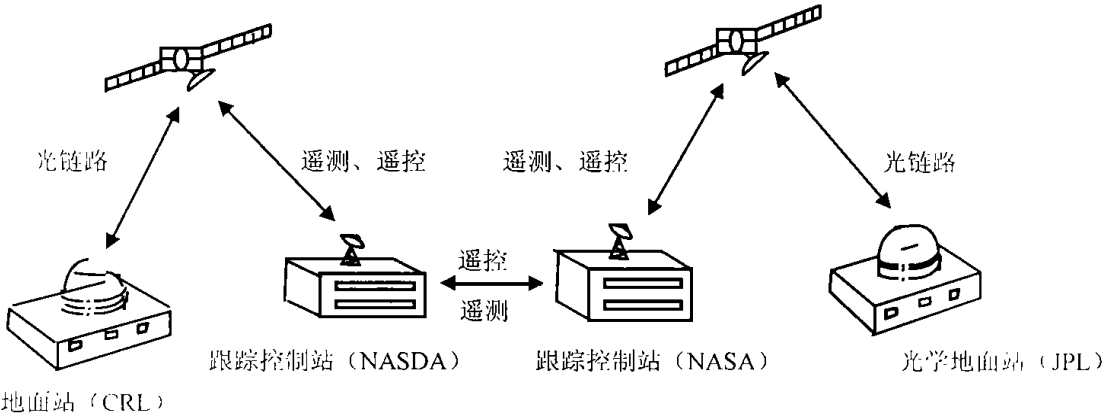


图 2 LCE 与地面站间的通信链路

表 2 LCE 和地面站之间的通信链路设计指标¹⁾

	上行链路	下行链路
发端参数		
激光功率 (平均)	4 W 30.0 dBm	13.8 Mw 11.4 dBm
发射效率/ dB	-4.0	-5.8
天线增益/ dB	109.0	105.5
光束散角/ μrad	20	30
定位偏移衰减/ dB	3.0	-1.5
通道参数		
空间衰减/ dB	-299.3	-295.2
大气衰减/ dB	-3.0	-3.0
接收参数		
天线增益/ dB	113.2	135.0
天线孔径/ cm	7.5	150
发射效率/ dB	-11.0	-1.7
接收功率/ dBm	-62.1	-55.3
接收灵敏度/ dBm	-62.0	-58.0
功率裕量/ dB	0.1	2.7

注: 1) 距离: 37 800 km 码率: 1.024 Mbps BER: 10^{-6}

运用 ETS-VI/LCE 主要作以下关键技术研究:

- 1) 捕获和跟踪;
- 2) 双工通信: ETS—VI 卫星和地面站之间的通信实验, 采用强度调制、直接探测技术, 其上行和下行链路码率均为 1.024 Mbps;
- 3) 卫星空间方位角测量: 根据信标光的定位误差引起转动(轴)误差、信标光的偏振方式引起偏转(轴)误差的特性, 测量卫星的空间方位角。这个实验将提供有关卫星高频振动的信息;
- 4) 光束传播特性: 测量上、下行链路的接收功率, 估算光束在空间的传播特性;
- 5) 光学器件在太空环境中的性能测试: 主要测试 CCD、LD、APD 等光学器件在太空中的使用寿命及性能。

表 3 LCE 进行的主要实验记录

实验序号	时间/月. 日	起止时间/小时: 分~小时: 分	持续时间/小时: 分	总时间/小时: 分	记 录
与 CRL 地面间的实验					
CRL03	12 07	20: 55~26: 00	5: 05	12: 32	双向激光传输
CRL21	4 12	14: 59~17: 57	2: 58	67: 57	白天捕获
CRL25	6 08	8: 57~19: 50	10: 53	89: 41	地球背景辐射测量
CRL74	12 25	22: 30~2: 33	4: 03	309: 15	LD2 故障
CRL86	2 14	17: 49~19: 41	1: 52	340: 41	螺旋扫描
CRL92	3 21	17: 44~18: 38	0: 54	349: 13	双轴万向支架故障
CRL93	3 24	17: 27~18: 44	1: 17	350: 30	失去初定位自动跟踪功能
CRL108	5 26	13: 25~16: 45	3: 20	372: 15	E2 数据捕获
CRL115	7 04	10: 29~13: 32	3: 03	383: 43	最后一次实验
与 JPL 地面间的实验					
JPL01	11 02	10: 51~15: 07	4: 16	4: 16	GOLD 第一阶段开始
JPL03	11 08	19: 45~24: 55	5: 10	13: 22	双向激光传输
JPL10	12 08	17: 28~23: 01	5: 33	44: 03	E2 数据捕获
JPL15	1 13	14: 59~20: 48	5: 49	69: 40	GOLD 第一阶段结束
JPL16	3 22	12: 14~15: 44	3: 30	73: 10	GOLD 第二阶段开始
		15: 49~17: 40	1: 51	75: 01	CCD 故障
JPL28	5 12	09: 28~13: 33	4: 05	123: 03	白天捕获
JPL32	5 27	08: 11~12: 48	4: 37	140: 33	GOLD 第二阶段结束

LCE 总的运行时间为

$$383: 43 \text{ (CRL)} + 140: 33 \text{ (JPL)} = 524: 16$$

LD 总的使用时间为

$$\text{LD1} \quad 92: 02 \text{ (CRL)} + 119: 26 \text{ (JPL)} = 211: 28;$$

$$\text{LD2} \quad 55: 01 \text{ (CRL)} + 0: 30 \text{ (JPL)} = 55: 31$$

ET—VI 卫星由 NASDA 于 1994 年 8 月 28 日发射, 同年 12 月建立起 LCE 与 CRL 地面站间的光链路, 在 1995 年 11 月至 1996 年 5 月期间, 还同美国 JPL 的 TMF 进行了间断性的通信实验, 其主要实验及进行时间如表 3 所示。由于卫星出现了严重故障, 已于 1996 年 7 月结束了它

的在轨生涯,对 LCE 的试验也就随之终止。尽管如此,该系统仍获得了一些重要的实验成果:

- 1) 实现了 ETS—VI 与地面站间的双工光通信,距离大于 40 000 km;
- 2) 星载光通信装置的运行状况同预先的设计一致;
- 3) 演示了窄光束的信息传输技术,无论白天还是晚上均能实现地面站到卫星的光传输;
- 4) 获得了大量的实验数据,包括光学终端特性、上行下行链路光束传播特性、通信特性、地球背景光特性等;
- 5) 利用 JPL 的 TMF 进行了国际合作实验研究。

其定位均方误差为 30 mrad,每次实验开始前要进行 12 min 的修正。虽然有如此困难,但 LCE 仍工作良好,并获得了一些初始结果。在最近的一次试验中,其上行链路的误码率已降为零。实验还验证,开环状态下卫星的抖动比在闭环状态下要明显,也就是说,闭环可以补偿卫星的抖动误差,使定位精度提高。

日本还将在近期开展以下有关空间光通信技术的研究:

- 1) 分析、处理通过 ETS—VI 获得的实验数据;
- 2) 深入研究整个实验系统的性能,以推动未来光通信系统的发展;
- 3) 研制一种更轻更小型的光通信装置;
- 4) 利用自适应光学,研究激光大气通信系统,其通信码率大于 10 Gbps。

3 展 望

几年前,一些专家认为深空卫星通信链路采用激光有极大的优越性,LEO—GEO 和 LEO—LEO 链路也有采用激光的必要,但却认为 LEO—地面站的通信链路只能采用微波。然而在 1995 年日本成功地进行了 GEO—地面站光链路的演示实验,实现了地面站对 GEO 的跟瞄。俄罗斯研制的地面站通信系统,在相距 3.8 km 的两站之间,成功地实现了连续 3 年的全天候通信。从而证明了 LEO—地面站之间仍可用激光建立通信链路,打消了多年来支持自由空间激光通信的人们的担心,即未来卫星通信激光链路网的高码率通信的瓶颈将是 LEO 与地面站之间的微波通信。

由于早年的研究主要由政府和军方支持,其应用面受到了一定的限制。近年来,工业和商业发展的需要大大推动了自由空间光通信技术的研究进展,目前已基本完成了各项关键技术的演示实验。专家估计,自由空间光通信技术将在本世纪末首先在 LEO—地面站的通信链路中进入实用化,并在 2010 年内实现 GEO—LEO 的激光通信。

参 考 文 献

- 1 Araki T, Nakamori S, Hisada Y *et al.* Present and future of optical intersatellite communication research at the national space development agency of Japan (NASDA). SPIE, 1994, 2 123: 2~13
- 2 Nakagawa K, Yamamoto A. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical Inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS). SPIE, 1995, 2 381: 14~25
- 3 Arimoto Y, Toyoshima M, Toyoda M *et al.* Preliminary result on laser communication experiment using (ETS—VI). SPIE, 1995, 2 381: 151~159
- 4 Shikatani M, Yoshikado S, Arimoto Y *et al.* Optical intersatellite link experiment between the earth station and ETS—VI. SPIE, 1990, 1 218: 2~12
- 5 Komukai, Toshihachō, Saiwaiku *et al.* Performance evaluation of laser communication equipment on board the ETS—VI satellite. SPIE, 1996, 2 699: 52~60
- 6 Toyoda M, Toyoshima M, Takahashi T. Ground to ETS—VI narrow laser beam transmission, 1996.

- 2 699; 71~80
- 7 Toyoshima M , Fukazawa T , Toyoda M *et al.* . Measurements of background noise from the earth surface using the ETS-VI/LCE. SPIE, 1996, 2 699; 93~102
- 8 Jeganathan M , Toyoshima M . Data analysis results from the Gold experiments. SPIE, 1997, 2 990; 70~81
- 9 Araki K , Toyoshima M , Takahashi T *et al.* . Experimental operations of laser communication equipment on board ETS-V satellite. SPIE, 1997, 2 990; 264~275

Development of Free-space Laser Communications of Japan

Yin Daosu Pi Dezhong

(Institute of Applied Physics UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Japan develops rapidly in the field of free-space laser communications. By using the ETS-VI/LCE system, an optical link between GEO and optical ground station is established. The data and results obtained from the system accelerate the application of free-space laser communication technique. This paper summarizes the development of free-space laser communications of Japan and its ETS-VI/LCE system.

Key words space laser communications; optical link; engineering satellite test; communication research lab